なぁんちゃって電子工学

～　あるいは自転車と交流　～

楽しい電子工作のための（いい加減さを極めた）電気の知識

2017 年 10 月 25 日

なぁんちゃんて電子工学 882.doc

By dokunewon

目次

１．はじめに 1

１．本書の目的と特徴 1
２．著作権 1
３．免責 1

２．直流回路入門 3

１．直流回路 3
２．オームの法則 3
３．ＥｘｃｅｌとｍＡやｋΩ（単位接頭語） 3
４．暗算とｍＡやｋΩ（単位接頭語） 6
５．回路図の描き方 7
６．回路図に電流や電圧を書き込む 7
７．直列合成抵抗 8
８．分圧 8
９．キルヒ電流則（キルヒホッフの第１法則） 9
１０．キルヒ電圧則（キルヒホッフの第２法則） 9
１１．抵抗とコンダクタンス 12
１２．並列合成抵抗 12
１３．分流の法則 14
１４．中点の電圧 14

３．直流回路 15

１．電流と電荷 15
２．コンデンサ 16
３．ＣＲ回路の放電 17
４．時定数τ 19
５．ＣＲ回路の充電 20
６．テブナンの定理 23
７．重ね合わせの原理 25
８．コイル 27
９．フライバック 29
１０．内部抵抗１ 30
１１．内部抵抗２ 31

１２．エネルギと仕事 32
１３．電力（仕事率） 33
１４．電力量 38
１５．デシベル（ｄＢ） 40
１６．半端な数のデシベル 41
１７．電圧のデシベル 42
１８．デシベルから電力の倍率を求める 43
１９．デシベルから電圧の倍率を求める 43
２０．デシベルの目安 44

４．交流回路入門 46

１．交流回路 46
２．交流と周波数 46
３．交流の強さ（交流電圧） 46
４．ピーク・トゥ・ピーク電圧 47
５．交流電圧や電流の計算 49
６．交流の「流れ難さ」と「流れ易さ」 50
７．交流とオームの法則 51
８．ＬＣのインピーダンスとアドミタンス 52

５．交流回路（周波数が一定の場合）前編 54

１．交流回路の知識は必要か 54
２．不思議な現象と交流理論の世界 54
３．抵抗、コイル、コンデンサを区別する 55
４．直列合成インピーダンス 56
５．複素インピーダンス（あるいは「鬼畜魔王」） 58
６．ＬＣの複素アドミタンス 59
７．ＬＣの複素インピーダンス・アドミタンスの計算 60
８．ＬＣＲ直列回路 61
９．ＬＣＲ並列回路 63
１０．トランス 65
１１．漏れインダクタンス 67
１２．交流と回転 68
１３．フェーザ表示 72
１４．フェーザの正体 74
１５．ラジアン 76

１６．位相とラジアン 76
１７．周波数と角周波数 77
１８．角周波数とＬＣのインピーダンス 79

６．複素数とＥｘｃｅｌ 81

１．本章が必要な人、不要な人 81
２．なぜ複素数と呼ぶのか 81
３．実部と虚部 82
４．Ｅｘｃｅｌで複素数を計算する 83
５．Ｅｘｃｅｌの設定 83
６．Ｅｘｃｅｌによる複素数の計算 83
７．複素平面 85
８．複素数の大きさ（絶対値）と偏角（角度） 86
９．複素数の足し算 88
１０．複素数の掛け算 88
１１．複素数の逆数 89
１２．複素数とｅｘｐ関数 90

７．交流回路中編（周波数が一定の場合） 91

１．Ｅｘｃｅｌでフェーザから波形を描く 91
２．複素電圧、複素電流 92
３．複素電圧と電流のオーム則 94
４．力率 96
５．複素電力 98

８．交流回路後編（周波数の変動を扱う場合） 101

１．周波数は後で決める 101
２．実は数学は殆ど使いません 101
３．回路の出力電圧を求める 102
４．周波数による出力の変化 104
５．出力の大きさ（絶対値）と位相（偏角） 106
６．周波数伝達関数 107
７．周波数伝達関数の意味 111
８．周波数特性 112
９．周波数特性とデシベル 114
１０．ＣＲ微分回路・積分回路 115

１１．学問的な周波数伝達関数 117
１２．（参考）伝達関数から（四則演算だけで）ステップ応答を計算する 118
９．アナログ回路入門 121
１．オペアンプ 121
２．オペアンプの端子と動作 121
３．理想的なオペアンプの性質 121
４．ユニティゲイン増幅器 122
５．オペアンプの電源 124
６．オペアンプの中の人 124
７．擬人化したユニテイゲイン増幅器 125
８．非反転増幅回路 125
９．コンパレータ 129
１０．アナログ回路前編 134
１．反転増幅回路 134
２．シーソーとオペアンプ 135
３．反転増幅器の特徴 136
４．理屈の寄り道（反転増幅器と交流理論） 136
５．加算回路 139
６．差動増幅回路 141
７．計装増幅回路 143
８．オペアンプと応用回路の周波数特性 146
９．帯域制限 148
１０．積分回路 150
１１．微分回路 156
１２．交流増幅回路 159
１３．反転交流増幅器 160
１４．単一電源の交流反転増幅回路 163
１５．１次のフィルタ 167
１６．１次ローパスフィルタＬＰＦ 168
１７．１次ハイパスフィルタＨＰＦ 170
１８．１次バンドパスフィルタＢＰＦ 172
１９．１次組み合わせフィルタ（動作のイメージ） 173
２０．１次組み合わせフィルタ（事例検討） 176
２１．シュミット・トリガ（反転） 177

２２．非反転シュミットトリガ 180
２３．無安定マルチバイブレータ 182
２４．電流電圧変換回路 185
２５．半波整流回路 188
２６．絶対値回路 193
２７．最大値検波回路 194
１１．アナログ回路中篇 194
１．入力バイアス電流 194
２．入力バイアス電流の小さなオペアンプ 201
３．最大出力電流 201
４．入力オフセット電圧 204
５．入力オフセット電圧の特徴 205
６．入力オフセット電圧の影響と対策 206
７．入力オフセット電圧温度ドリフト 208
８．回路によるオフセット対策 208
９．オフセット調整端子のある場合 208
１０．外付け回路による場合 209
１１．交流増幅回路のオフセット対策 212
１２．最高／最低出力電圧 215
１３．同相入力電圧範囲 217
１４．差動入力電圧範囲 219
１５．理想と現実の違い４（スルーレイト） 220
１６．雑音 221
１７．雑音対策の必要な部分 222
１８．データシートと雑音 222
１９．雑音電圧 223
２０．雑音電流 225
２１．雑音と周波数 227
２２．雑音の分布 227
２３．雑音の足し算 228
２４．増幅器の雑音スペクトラム密度を求める 229
２５．雑音スペクトラム密度から雑音電圧を求める 230
２６．ホワイト雑音の区間 231
２７．ピンク雑音の区間 231
２８．増幅回路が積分動作している区間 232

２９．各区間の雑音電圧を合計する 233
３０．抵抗が発生する雑音 233

１２．半導体回路入門 235

１．似非半導体物性 235
２．導体・絶縁体・半導体 235
３．ＰＮ接合の整流作用 236
４．ＮＰＮ接合の増幅作用 236
５．ダイオード 238
６．ダイオードの順電圧 238
７．発光ダイオード（ＬＥＤ） 239
８．ダイオードの逆電圧 241
９．トランジスタ 243
１０．ＮＰＮとＰＮＰ 244
１１．エミッタの特徴とＢ－Ｅ間の逆電圧 245
１２．コレクタの特徴とＣ－Ｂ間の逆電圧 246
１３．トランジスタの重要な性質 246
１４．定電流特性 250
１５．h_{FE}分類 251
１６．エミッタ電流の安定化 252
１７．エミッタ抵抗 253
１８．分圧バイアス 259
１９．トランジスタの状態 261

１３．半導体回路 263

１．主なトランジスタの種類 263
２．スイッチング回路 263
３．トランジスタをＯＦＦさせる 263
４．トランジスタをＯＮさせる 265
５．スイッチング回路のポイント 267
６．誘導負荷とスナバ回路 276
７．ＮＰＮとＰＮＰ 278
８．小信号増幅回路 282
９．直流と小信号 282
１０．小信号とダイオード 284
１１．直流と小信号の区別 288

１２．小信号とトランジスタ 289
１３．エミッタバイパスコンデンサ 295
１４．増幅回路の分圧バイアス 301
１５．入出力インピーダンス 304
１６．コレクタのインピーダンス 307
１７．ベースのインピーダンス 308
１８．エミッタのインピーダンス 311
１９．コンデンサの選択 315
２０．入出力コンデンサ 317
２１．エミッタバイパスコンデンサ 318
２２．標準的なトランジスタ交流増幅器 320
２３．エミッタフォロア 331
２４．カレントミラー 335
２５．アクティブロード（能動負荷） 339
２６．差動増幅回路 345
２７．差動増幅回路とエミッタフォロア 353
２８．差動増幅回路の能動負荷 358
２９．コレクタ出力容量 362
３０．接地方式 363
３１．カスコード 365
３２．V_{BE}マルチプライヤ 367
３３．電力増幅回路 371
３４．コンプリメンタリ・エミッタフォロア 372
３５．ダーリントン接続 381
３６．放熱器（ヒートシンク） 385
３７．接合型ＦＥＴ 389
３８．ＦＥＴを使用した増幅器 391
３９．ＭＯＳＦＥＴ 395
４０．ＭＯＳＦＥＴによるスイッチング回路 396
４１．ＯＮ損失 396
４２．スイッチング損失 401
４３．スイッチングの高速化 402
４４．誘導負荷とアバランシェ耐量 403

１４．アナログ回路後編 405

１．電流ブースタ 405

２．シングルブースタ 405
３．コンプリメンタリブースタ 409
４．安定化電源回路 420
５．定電流回路 422
６．ホーランド回路 425
７．対数圧縮回路 431
８．正弦波発生回路 440
９．三角波発生回路 441
１０．鋸歯状波回路 444
１１．パルス幅変調回路 444
１２．振幅変調回路（★） 446
１３．乗算回路（★） 446
１４．フィルタ 446
１５．ステートバリアブルフィルタ（★） 447
１６．Ｅｘｃｅｌとフィルタの正体 447

１５．受動素子（★） 449

１．抵抗（★） 449
２．寄生インダクタンスとキャパシタンス（★） 449
３．電力定格と最高電圧（★） 449
４．発熱（★） 449
５．コンデンサ（★） 449
６．ＭＬＣＣの容量（★） 449
７．フィルムコンデンサ（★） 449
８．電解コンデンサ（★） 449
９．温度と寿命（★） 449
１０．コイル（★） 449

１６．高周回路波入門 450

１．高周波 450
２．ｄＢｍとｄＢμ 450
３．ｄＢｍＶとｄＢμＶ 451
４．直流や低周波と、高周波の違い（★） 453
５．反射とＳパラメーター（★） 453
６．正規化インピーダンス（★） 453
７．インミタンス（スミス）チャート（★） 453

１７. 高周波回路（★）.....454
１. 整合（★）.....454
２. デカップリング（★）.....454
３. 高周波増幅回路（★）.....454
１８. 制御回路（★）.....455
１９. 論理回路（★）.....456
２０. マイコン（★）.....457
２１. 実装（★）.....458
２２. 電子工作例（★）.....459
１. 簡単パワーアンプ.....459
２. はんだゴテコントローラー.....459
３. 電離電流測定器.....459
４. ガンマ線スペクトル測定器.....459
５. ワイアレス給電装置.....459
２３. あとがき.....460
１. 本書に書いた事、書かなかった事.....460

１．はじめに

１．本書の目的と特徴

本書は趣味で電子回路を楽しむ方のために作成しました。つまり、回路を理解したり設計して遊ぶ方を対象にしています。このため、本書は次の方針で作成しています。

１．数学を忘れた人でも（簡単な算数ができれば）電子回路が楽しめるようにする

正確さは潔く犠牲にして、「式」では無く「図」を使って、日常生活に喩えて説明しています。計算はＥｘｃｅｌで行います。

２．回路図から回路の動作を感じられるようにする

等価回路に置き換えずに、回路図上で動作を説明することで、回路図から直接に動作を読み取り、回路の動作を感じながら回路図を描いて楽しめるように工夫しています。

３．理解が深まるよう構成する

解説と練習問題を交互に組み合わせ、質問に答えながら読み進めることで、理解が深まるように構成しています。

４．予備知識が無くても読めるようにする

基礎的な内容も必要に応じて紹介し、予備知識が無くても理解できるように構成しています。

本書は、分り易さを重要視しすぎた結果「不正確」なうえ、（個人が作成しており、校正が行き届かないため）「誤字・脱字・誤算等」が多いことをご了承ください。

プロのエンジニアから「こんな説明では安全に動作する機器は設計できない」と非難があるのは当然でしょう。しかし、思い出してください。あなたが子供の頃、色々な回路を作っては壊した愉快な思い出を。そのような楽しさを味わう下地を提供するのが本書の目的です。まずは「安全じゃないけど、一応は動作するように設計できる」所まで行きましょう。

２．著作権

本書の部分や全体は、著者の承諾なしに、任意に複写や改良を行い、用途や有償・無償を問わず配布することができます。誤りの訂正やより分かり易くするための改良は歓迎されます。但し、複写や改良を行い、配布する著作物には、本枠内のメッセージをそのまま転載し、著作物の部分や全体を、著者の承諾なしに、任意に複写や改良を行い、有償・無償を問わず配布することを許可しなくてはなりません。

by dokunewon

３．免責

本書のあらゆる関係者は、本書の情報とその運用結果及び、その影響について、かかる損害の発生可能性を了知している場合であっても、直接的、間接的、偶発的、結果的損害、逸失利益、懲罰的損害、または特別損害を含む全ての損害に対して、状況のいかんを問わず一切責任を負いません。

本書は全く新たに書き起こしたものです。つまり、私自身の過去の著作物をコピー・ペーストすることはもちろん、参照することもせずに、白紙のの状態から作成したものです。これにもかかわらず、自然科学現象を平易に説明するという性質上、私が過去に作成した書面と類似の表現が現れる可能性があ

ります。

　また筆者が若い頃に、名著『プログラム学習による半導体回路ⅠⅡ』（職業能力開発教材委員会）で勉強したため、一部同書と似た表現や練習問題が表れる傾向もあります。もちろん参照して引き写した部分は一切ありませんが、若い時期に刻み込まれた記憶は一生残ってしまう結果として、（同書が名著である証であると考えて）ご勘弁ください。

２．直流回路入門

１．直流回路

水道から流れ出す水のように、いつも同じ向きと大きさで電流が流れている回路を「直流回路」と呼びます。

２．オームの法則

略してオーム則とも呼びます。回路を考えるとき、オーム則は何度と無く使います。このため、瞬間的に使えるようにしておくと、スラスラと回路が読めます。

オーム則は、次のように考えることで、経験が浅くても素早く使えます。

・電圧が出てきたら、必ず割られる

・電圧が出てこなければ、双方を掛ける

電圧は割られる！

の２つです。例えば、次表のように使います。

状況	考え方	計算
１２Ｖで４Ａ流れた	電圧の１２は割られる	１２÷４＝３Ω
３Ωに１２Ｖが掛かった	電圧の１２は割られる	１２÷３＝４Ａ
３Ωに４Ａ流れた	電圧が出てこない（掛ける）	３×４＝１２Ｖ

３．ＥｘｃｅｌとｍＡやｋΩ（単位接頭語）

Ｅｘｃｅｌに「指数」で入力することで、単位接頭語（本項と次項でのみ、単に「単位」と書きます）を手早く処理できます。たとえば、５μＡなら、5E-6、と、２２０ｋＶなら、220E3 というように、値の後に（「単位」に対応した）「指数」（E3 等）を付けて入力します。例えば「E3」は「1000」（ゼロ３つ）「E-3」なら「0.001」（１の前にゼロ３つ）を意味します。下表に、単位に対応する指数を示します。

単位を指数で入力する

単位	f フェムト	p ピコ	n ナノ	μ マイクロ	m ミリ	k キロ	M メガ	G ギガ	T テラ
指数	E-15	E-12	E-9	E-6	E-3	E3	E6	E9	E12

単位を指数で入力した場合、Ｅｘｃｅｌには裸の値（１０ｋなら、１００００）が入力されています。

指数を入力したセルや、指数を元に計算したセルの表示形式は、自動的に「指数」に変更されます。指数ではなく、ゼロを並べて表示したいときは、表示形式を「標準」に設定します。（但し、「標準」に設定しても、とても大きな数字やとても小さな数字は指数で表示されます）逆に強制的に指数で表示させたいときは、セルの表示形式を「指数」に指定します。

（セルの表示形式は、セルを選択して、右クリックし、セルの書式設定ショートカットメニューを選択し、セルの書式設定ダイアログボックスで、表示形式タブを選択して、分類ボックスで指定します。）

Ｅｘｃｅｌの入力と表示

値	入力	標準表示	指数表示
４８ｋΩ	48E3	48000	4.80E+04
１００ｐＡ	100E-12	1E-10	1.00E-10
４７μＶ	47E-6	0.000047	4.70E-05
０．０２２ｎＦ	0.022E-9	2.2E-11	2.20E-11

Ｅｘｃｅｌでオーム則を計算した例を示します。まず、下表のように値を指数を使って入力します。この例では、１行目は見出しです。２行目を使って、１ｍＶを１００ｋΩで割って、流れる電流を求めています。

	A	B	C	D
1	電圧１ｍＶ	抵抗１００ｋΩ	電流の値［A］	
2	1E-3	100E3	=A2/B2	

Ｅｘｃｅｌは結果を次のように示します。

	A	B	C	D
1	電圧１ｍＶ	抵抗１００ｋΩ	電流の値［A］	
2	1.00E-03	1.00E+05	1.00E-08	

Ｂ２セルを見ると、入力したとおりには表示されない事が分ります。（100E3 と入力したけれど、1.00E+5 と表示されている、どちらも値は 100000）つまり、Ｅｘｃｅｌは入力した形式までは覚えておらず、入力した値を覚えているだけです。

Ｃ２セルに表示される計算結果 1.00E-08［A］は、そのままでは分かり難い値です。そこで、［ｎA］を使って表示させます。項初の「単位を指数で入力する」の表によれば n（ナノ）は E-9 でした。ですから逆に、裸の値に 1E+9 を掛けてやれば、［ｎA］で表示することができます。そこで、次表Ｄ２のように入力します。

	A	B	C	D
1	１ｍＶ	１００ｋΩ	電流の値［A］	電流の値［ｎA］
2	1E-3	100E3	=A2/B2	=C2*1E9

すると、Ｅｘｃｅｌは次のように表示します。

	A	B	C	D
1	１ｍＶ	１００ｋΩ	電流の値［A］	電流の値［ｎA］
2	1.00E-03	1.00E+05	1.00E-08	1.00E+01

指数を元に計算したので、Ｄ１セルの表示形式も自動的に指数に設定されています。Ｄ１セルの表示形式を標準に設定すると、次表のように１０と表示されます。

	A	B	C	D
1	１mV	１００kΩ	電流の値［A］	電流の値［nA］
2	1.00E-03	1.00E+05	1.00E-08	10

このように、裸の値に、単位に対応した指数の、Eの後の符号を逆にして掛けると、その単位で表すことができます。このような、裸の値に掛けて単位で表示する場合の指数を次表に示します。

裸の値を単位で表示する

単位	f	p	n	μ	m	k	M	G	T
指数	1E15	1E12	1E9	1E6	1E3	1E-3	1E-6	1E-9	1E-12

※「単位を指数で入力する」ときの表の、E の後の符号を逆にしただけです。

※２００７以降のＥｘｃｅｌでは CONVERT 関数を使った変換も可能です。

３.１. 練習（オーム則と単位）

次表は、見出しに記載の２つの値を元に、オーム則で計算した値を示す表です。例えば、見出しに太枠で示す１２Ｖと３Ωからオーム則で計算した結果が、表中に太枠で示す４Ａです。

この表にはいくつか間違いがあります。間違っている値を指摘してください。

	12μV	3kΩ	12V	3Ω	12mV	3MΩ
4μA	3Ω	12mV	3MΩ	12μV	3kΩ	12V
3MΩ	4mA		4μA		4nA	
4A	3μΩ	12kV	3Ω	12V	3mΩ	12kV
3Ω	4μA		4A		4mA	
4mA	3mΩ	12V	3Ω	12mV	3Ω	12kV
3kΩ	4nA		4mA		4μA	

３.２. 答

下表に、誤りのある値を下線で示します。

	12μV	3kΩ	12V	3Ω	12mV	3MΩ
4μA	3Ω	12mV	3MΩ	12μV	3kΩ	12V
3MΩ	4mA		4μA		4nA	
4A	3μΩ	12kV	3Ω	12V	3mΩ	12kV
3Ω	4μA		4A		4mA	
4mA	3mΩ	12V	3Ω	12mV	3Ω	12kV
3kΩ	4nA		4mA		4μA	

４．暗算とｍＡやｋΩ（単位接頭語）

ここではＥｘｃｅｌを使わず暗算で単位やオーム則を使う方法を説明します。Ｅｘｃｅｌを使って計算を繰り返していると、自然とできるようになりますが、本項のコツを意識することで、より短期間で慣れることができます。

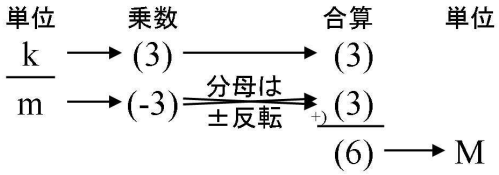
まず、数字同士計算し、次にこれとは別に、単位同士を計算します。Ｅｘｃｅｌを使う方法でも使用した、各単位の乗数を下表に示します。

主な単位接頭語とその乗数

単位	f	p	n	μ	m	k	M	G	T
乗数	(-15)	(-12)	(-9)	(-6)	(-3)	(3)	(6)	(9)	(12)

たとえば、$10kV$ で $2mA$ 流れた場合、抵抗はオーム則で$\frac{10kV}{2mA}$と計算して求めますが、まず数字だけに注目して、$\frac{10}{2}=5$と計算し、次に単位だけを$\frac{k}{m}=M$ と計算して、両者を合わせて $5M\Omega$と答を出します。

上で使用した$\frac{k}{m}=M$ 等の「単位の計算」は自然と覚えますが、慣れるまでは、乗数で計算します。今回の例では下図のように、$\frac{k}{m}$を$\frac{(3)}{(-3)}$と考え、分母の(-3)の符号は反転して(+3)から合算して、(6)=Mと考えます。



別の例として、3kΩ×4μA の場合なら、数字の部分は「3×4」で 12 です。単位の部分は「k×μ＝m」ですから（覚えるまでは (3)+(-6) = (-3) = m と考える）3kΩ×4μA=12mA と暗算できます。

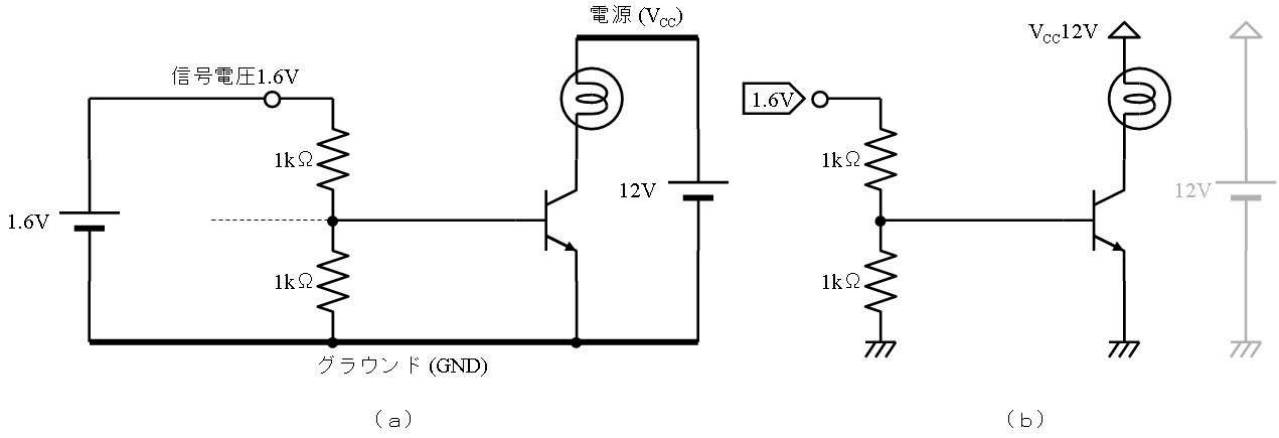
参考までに頻度の高い単位の計算を次表白色部に示します。もちろん意識するだけで良いので、下表を暗記する必要はありません。

単位の計算（グレーの欄はあまり使わない）

$\frac{n}{f}=M$	$\frac{\mu}{p}=M$	$\frac{m}{n}=M$	$\frac{1}{\mu}=M$	$\frac{k}{m}=M$	$\frac{G}{k}=M$	$m\times m=\mu$		$n\times k=\mu$
$\frac{n}{p}=k$	$\frac{\mu}{n}=k$	$\frac{m}{\mu}=k$	$\frac{1}{m}=k$	$\frac{M}{k}=k$	$\frac{G}{M}=k$		$\mu\times k=m$	$n\times M=m$
$\frac{n}{\mu}=m$	$\frac{\mu}{m}=m$	$\frac{1}{k}=m$	$\frac{k}{M}=m$	$\frac{M}{G}=m$	$\frac{G}{T}=m$	$m\times k=1$	$\mu\times M=1$	$n\times G=1$
$\frac{n}{m}=\mu$	$\frac{m}{k}=\mu$	$\frac{1}{M}=\mu$	$\frac{k}{G}=\mu$	$\frac{M}{T}=\mu$		$m\times M=k$	$\mu\times G=k$	$n\times T=k$

5. 回路図の描き方

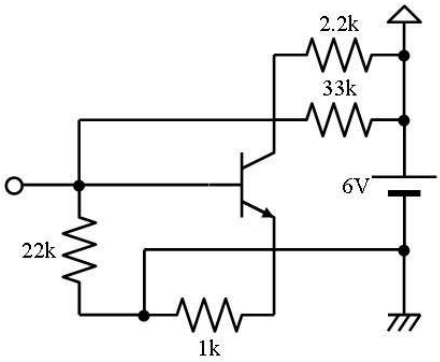
電子系の回路図では、電源とグラウンドの配線は記号で表し、電源（電池マーク）は記入しない場合が大半です。たとえば、練習で登場した下図（ａ）の回路は、下図（ｂ）のように簡素に描かれます。



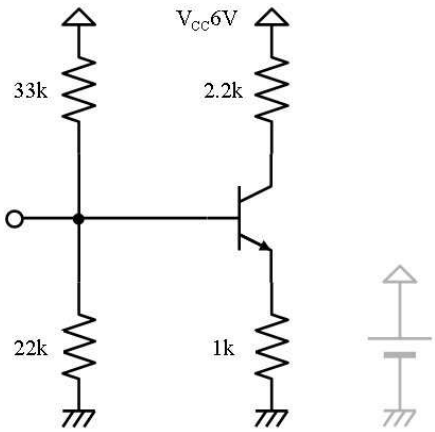
また、電圧が高い部分程、回路図の上部に描くと（回路図は大きくなりますが）回路が読み易くなります。

5.1. 練習

下図の回路図を、見易く書き直してください。



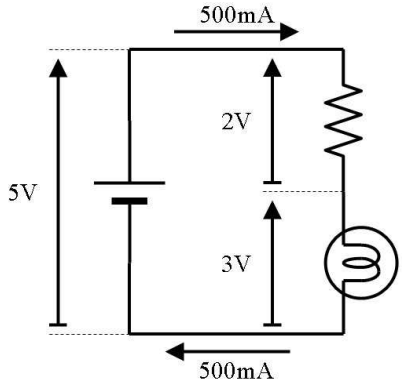
5.2. 答



6. 回路図に電流や電圧を書き込む

回路図を読むときは、電流や電圧を書き込みながら読みます。本書では、電流は矢印 ⟶ で、電圧は尻尾に棒のついた矢印 ⟼ で示します。

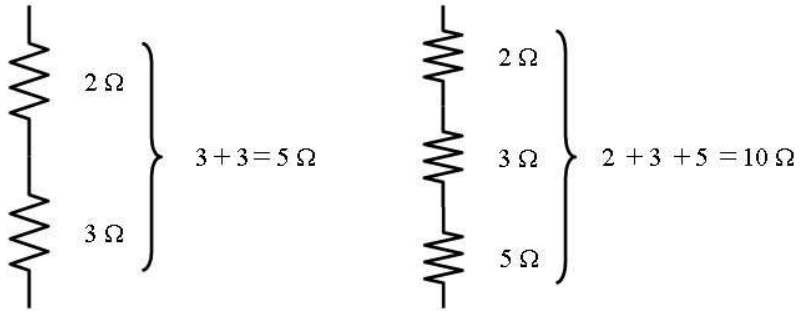
尚、電圧を両矢印 ◀⟷▶ で示す方法もありますが、この方法では電圧の方向が分らないので、本書では使いません。



本書では、交流と直流を一つの回路に示す必要がある場合、直流を実線 ⟶ で、交流を点線 - - - - -▶ で示します。

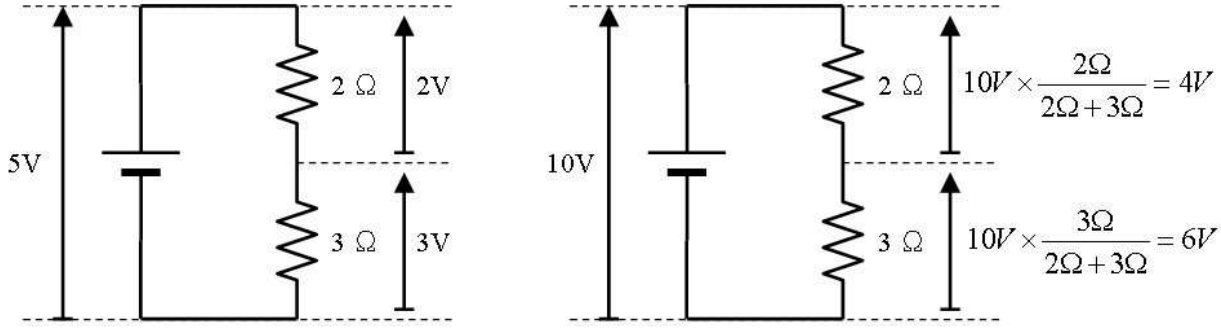
7. 直列合成抵抗

複数の抵抗を接続して得られる抵抗値を、合成抵抗と呼びます。直列に接続した場合は直列合成抵抗で、その抵抗値は、各抵抗の和で求めることができます。



8. 分圧

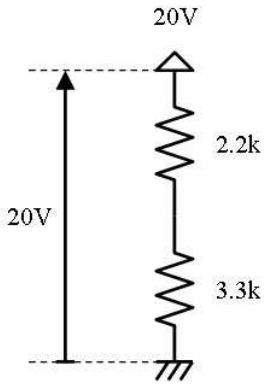
下図に示すように、直列に接続した各抵抗には、抵抗値に比例した電圧が発生します。



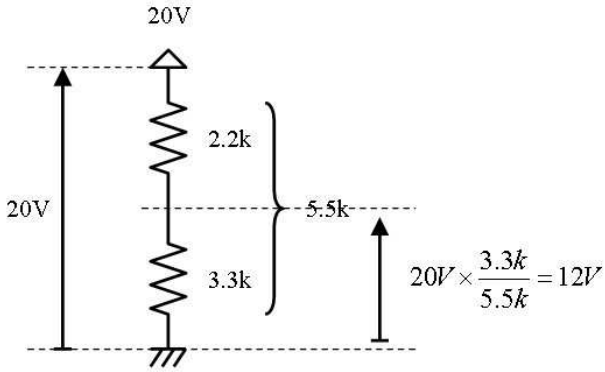
$$\text{注目した抵抗の電圧} = \text{全体の電圧} \times \frac{\text{注目した抵抗の値}}{\text{全体の抵抗}}$$

8.1. 練習（分圧）

分圧で、3.3k の両端に得られる電圧を求めてください。

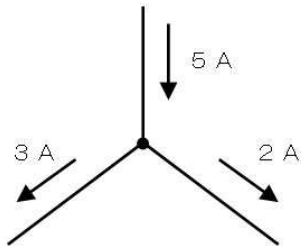


8.2. 答



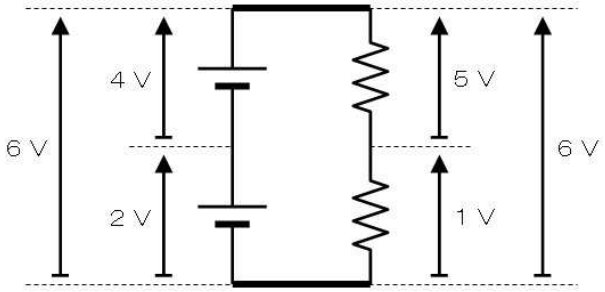
9. キルヒ電流則（キルヒホッフの第１法則）

下図のように、回路上の一点から流れ出す電流の合計（３Ａ＋２Ａ）は、流れ込む電流の合計（５Ａ）と同じになります。



１０. キルヒ電圧則（キルヒホッフの第２法則）

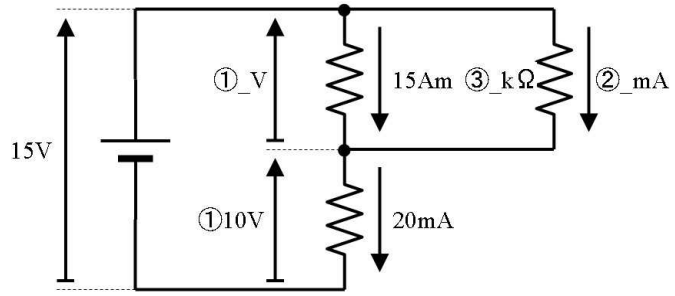
下図のように互いに（太線部で）接続された２つの回路では、左右の電圧が同じになる（左６Ｖ、右６Ｖ）という法則です（あたりまえですね）。「各部品の電圧を合計すると、全体の電圧になる」法則と考えることもできます。（左側が４Ｖ＋２Ｖ＝６Ｖ、右側が５Ｖ＋１Ｖ＝６Ｖ）



このようにキルヒには電流則と電圧則がありますが、本書で単に「キルヒ則」と言った場合は、キルヒ電流則を指します。キルヒ電圧則は意識せずに使える場合が多いです。

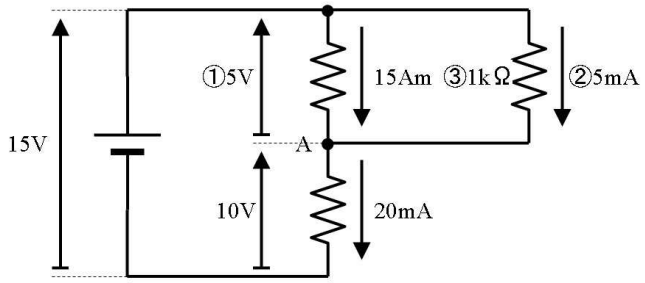
１０.１. 練習

下図の回路の、①～③の電圧、電流、抵抗、を求めて下さい。



番号	答	ヒント
①	V	キルヒ電圧則を使用
②	mA	キルヒ電流則を使用
③	kΩ	オーム則を使用

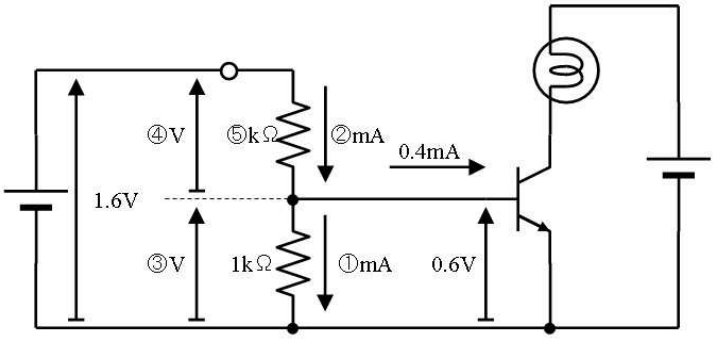
１０.２. 答



番号	答	説明
①	５V	キルヒ電圧則より、１５Vと１０Vの差で５V
②	５mA	キルヒ電流則より、A点に注目して、２０mAと１５mAの差で５mA
③	１kΩ	オーム則より、５Vで１mAだから１kΩ

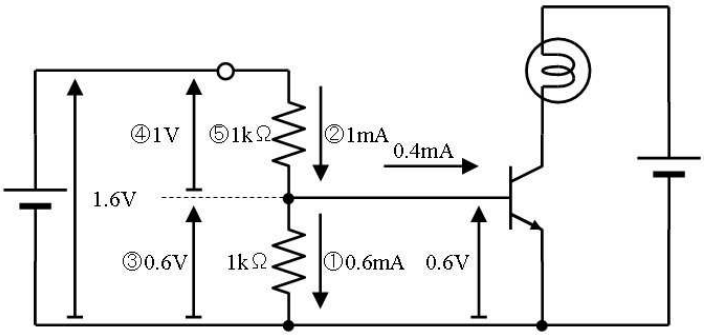
１０.３. 練習

下図の回路の、①～⑤の電圧、電流、抵抗、を求めて下さい。



番号	答	ヒント
①	mA	オーム則を使用
②	mA	キルヒ電流則を使用
③	V	キルヒ電圧則を使用
④	V	キルヒ電圧則を使用
⑤	kΩ	オーム則を使用

10.4. 答



番号	答	説明
①	0．6mA	オーム則より、1kΩに0．6Vが加わって、0．6mA
②	1mA	キルヒ電流則より、流れ出す電流が0．3mAと0．6mAだから、流れ込む電流は1mA
③	0．6V	キルヒ電圧則より、0．6V
④	1V	キルヒ電圧則より、③の0．6Vと④を加えると、1．6Vとなるから、1V
⑤	1kΩ	オーム則より、1Vで1mA流れるから、1kΩ

１１．抵抗とコンダクタンス

抵抗は「電流の流れ難さ」ですが、コンダクタンスは「電流の流れ易さ」です。下表に「値の例」で示すように、抵抗の値が小さい程、コンダクタンスの値は大きくなります。つまり、抵抗とコンダクタンスの値には「逆数」の関係があります。

名前	抵抗 （レジスタンス）	コンダクタンス	
イメージ	電流の流れ難さ	電流の流れ易さ	
単位	Ω	℧	S
単位の読み	OHM オーム	MHO モー	SEMENS ジーメンス
値の例	４Ω	１／４S	
	１Ω	１S	
	１／４Ω	４S	

上表にあるとおり、コンダクタンスの単位は（℧とSの）２つあります。Ω（OHM）の逆数が ℧（MHO）というのは、お茶目で覚え易いため、是非使いたいのですが、℧ という文字が無いため、本書ではS（ジーメンス）を使います。

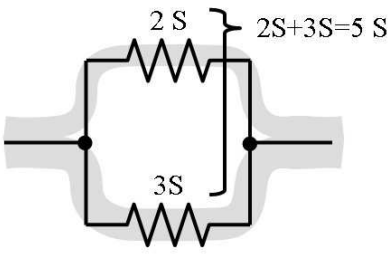
一本の抵抗器を「流れ難さΩ」で呼んでも、「流れ易さS」で呼んでもかまいません。つまり、部品店で４Ωの抵抗を購入する時に「４分の１ジーメンスの抵抗を下さい」と言っても良い訳です。ですから「抵抗（Ω）があれば、コンダクタンス（S）なんて要らないとや」と思い勝ちですが、実はこのコンダクタンス、並列回路でとても役に立ちます。

１２．並列合成抵抗

直列合成抵抗は合計するだけで求めることができましたが、並列合成抵抗はちょっと面倒でした。そこでコンダクタンス（通りやすさ）を使って考えてみます。コンダクタンスを使うと並列回路は合計するだけで計算できます。

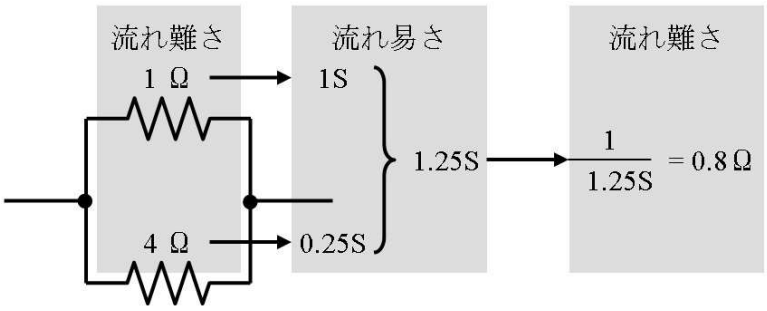
下図の回路では、通りやすさ２Sと３Sの抵抗が並列に接続されています。道路に喩えれば、道幅２mと、３mの、２本の道路で目的地に繋がっている状態です。ですから、２本の道路を合わせて、道幅５mの道と同じだけの人が通れる筈です。

回路に話を戻すと、通りやすさ２Sの抵抗と３Sの抵抗が並列なので、並列にした通りやすさは５Sとなります。このように、コンダクタンス（流れ易さ）を合計するだけで、並列回路の計算ができました。答えをΩで出したい場合は、５Sの逆数を求めて、０．２Ωとなります。



さて、上図では抵抗の仕様が、流れ易さ（コンダクタンス：Ｓ：ジーメンス）で示されていました。次に、抵抗がいつも通り、流れ難さ（抵抗：Ω）で示されている場合を考えます。

下図の回路では、１Ωと４Ωが並列に接続されています。それぞれの抵抗値を、流れ易さに書き直すと、１Ｓと０．２５Ｓです。流れ易さを合計して、並列接続の流れ易さ（並列合成コンダクタンス）を計算すると、１．２５Ｓです。答えを流れ難さ（Ω）で出したい場合は、１．２５Ｓの逆数を求めて、並列合成抵抗は０．８Ωとなります。



公式では $\dfrac{1}{\dfrac{1}{1\Omega}+\dfrac{1}{4\Omega}} = \dfrac{1}{1S+0.25S} = \dfrac{1}{1.25S} = 0.8\Omega$

上図の下部に並列合成抵抗を公式で求める方法を示します。実は公式の方法も、２つの抵抗値をコンダクタンスに変換してから合計し、合計で得たコンダクタンスを、もう一度抵抗値に戻している、と分ります。

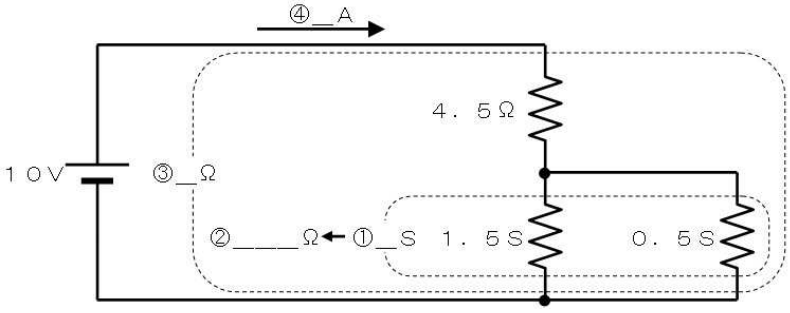
並列抵抗の計算は次のように書く場合があります。

１Ω　／／　４Ω　＝　０．８Ω

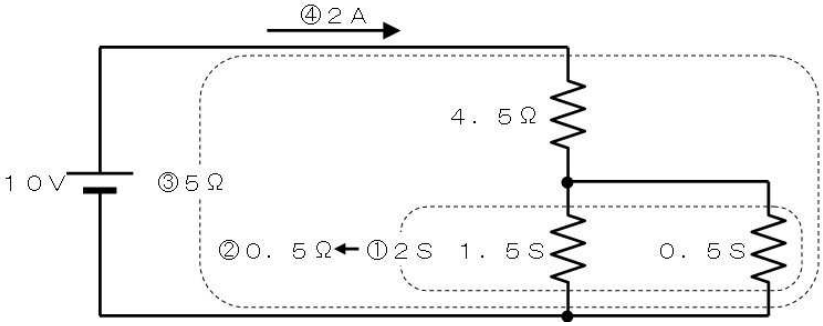
「／／」は並列の抵抗値を計算する、という記号です。

１２.１. 練習

下図の回路の①～④のコンダクタンス、抵抗、電流を回路図内に記入してください。



１２.２. 答



①０．５Ｓと１．５Ｓが並列なので、２Ｓ

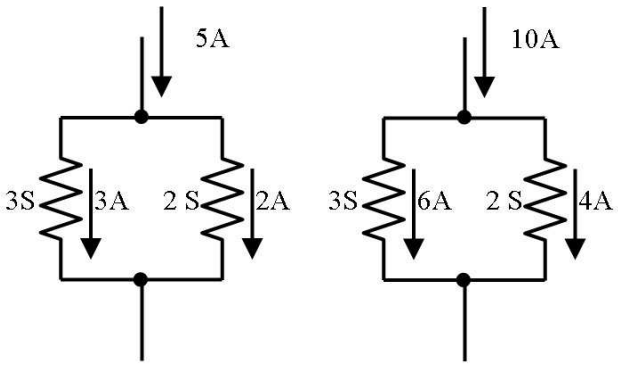
②２Ｓを逆数にして、０．５Ω

③４．５Ωと０．５Ωが直列なので５Ω

④５Ωに１０Ｖが加わっているので、２Ａ

１３. 分流の法則

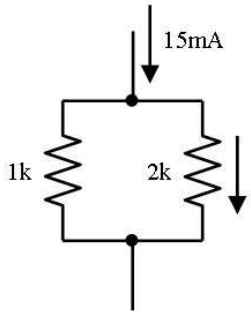
直列抵抗に分圧の考え方があるように、並列抵抗には分流の考え方があります。下図に示すように、並列に接続した各抵抗には、コンダクタンス（流れ易さ）に比例した電流が流れます。



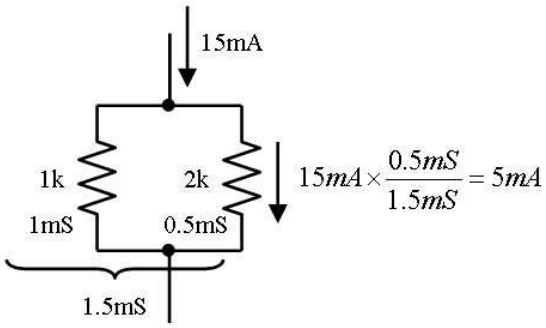
$$\text{注目した抵抗の電流} = \text{全体の電流} \times \frac{\text{注目した抵抗のコンダクタンス}}{\text{全体のコンダクタンス}}$$

１３.１. 練習（分流）

下図の回路で、2kΩに流れる電流を回路図内に記入して下さい。



１３.２. 答

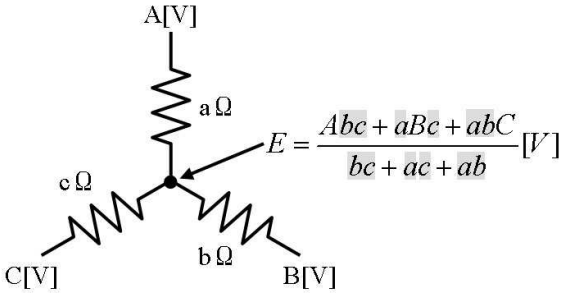


１４. 中点の電圧

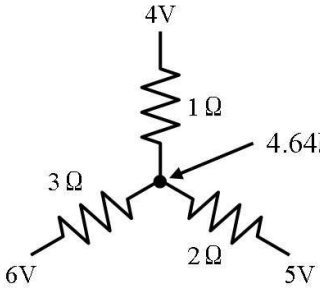
下図に示す、３つの電圧に繋がった、３本の抵抗の中点の電圧は、キルヒ則で連立方程式立てなくて

も、図中の公式で求めることができます。この公式は一見複雑そうですが、規則性があるので楽に覚えられます。

大文字 ABC が電圧、小文字 abc は抵抗値です。また、Abc は A×b×c の事です。（つまり、×は省略する場合があります）



$$E=\frac{Abc+aBc+abC}{bc+ac+ab}[V]$$



$$4.64V=\frac{4\times2\times3+1\times5\times3+1\times2\times6}{2\times3+1\times3+1\times2}V$$

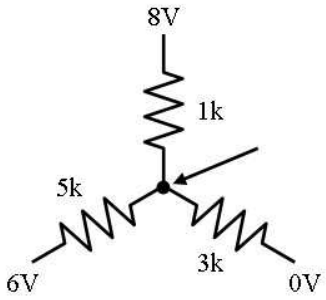
抵抗が４本、５本と増えた場合はそれぞれ次のようになります。

$$E_4=\frac{Abcd+aBcd+abCd+abcD}{bcd+acd+abd+abc}$$

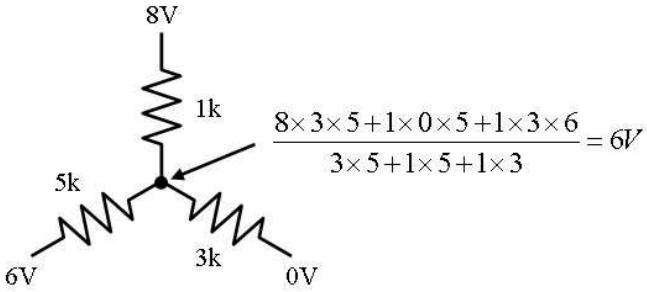
$$E_5=\frac{Abcde+aBcde+abCde+abcDe+abcdE}{bcde+acde+abde+abce+abcd}$$

１４.１. 練習（中点の電圧）

下図の回路に矢印で示す点の電圧を求めてください。



１４.２. 答



$$\frac{8\times3\times5+1\times0\times5+1\times3\times6}{3\times5+1\times5+1\times3}=6V$$

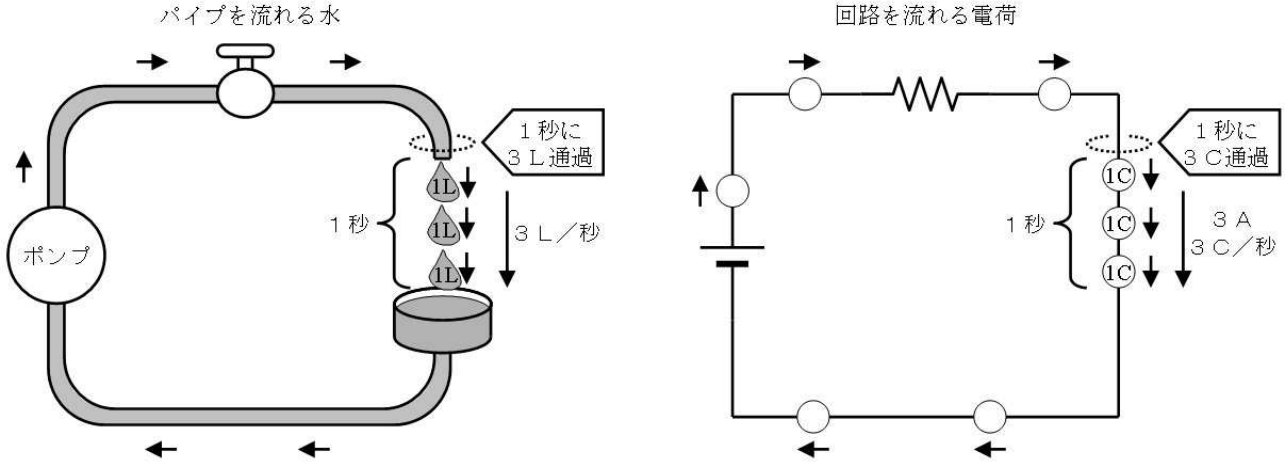
３. 直流回路

１. 電流と電荷

下図左側の装置は、ポンプで水を送り、１秒間に３Ｌ（リットル）の水を循環させています。流れる水の量は３Ｌ／秒です。蛇口を眺めていると、１秒あたり３Ｌの水が通過するのが見えます。

さて、「水の量」：Ｌ（リットル）に相当する電気の量を「電荷」：Ｃ（クーロン）と呼びます。下図

右の回路では、１秒間に３Ｃ（クーロン）の電荷が通過しています。つまり、３Ｃ／秒です。私たちは、これを３Ａと呼んでいます。（つまり、３Ａ ＝ ３Ｃ／秒です）



毎秒３Ｌで５秒間流れると、１５Ｌの水が通過します。これと同様に、毎秒３Ｃ（３Ｃ／秒＝３Ａ）が５秒間流れると、１５Ｃの電荷が通過します。つまり、

通過した電荷［Ｃ］＝電流［Ａ］×時間［秒］

です。

1.1. 練習

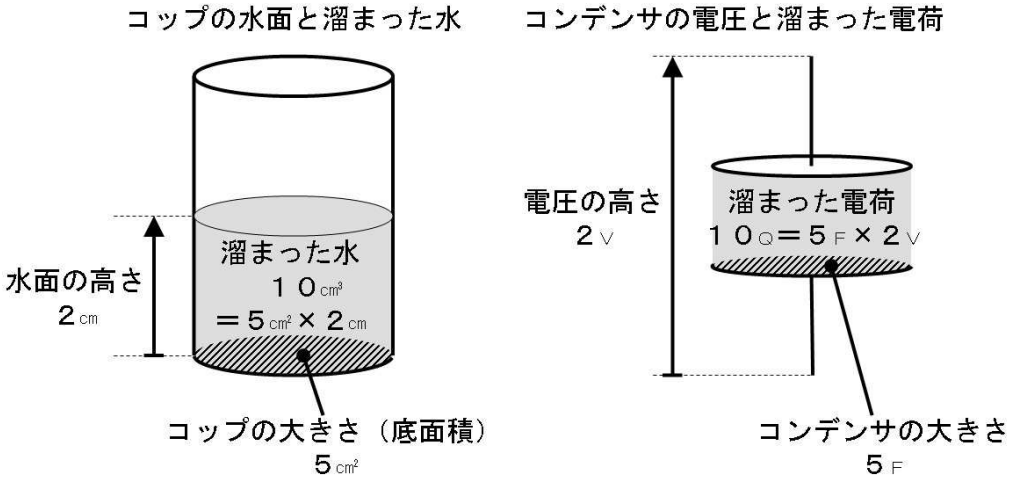
５Ωの抵抗に１０Ｖを加えると、１分間で何クーロンの電荷が通過しますか。

1.2. 答

オーム則より、電流は１０Ｖ÷５Ω＝２Ａ。１分は６０秒だから、電荷は２Ａ×６０秒＝１２０Ｃ通過する。

2. コンデンサ

コンデンサは下図のコップが水を蓄えるように、電荷を蓄える部品です。



コップでは水面の高さとコップの大きさ（底面積）を掛けると溜まった水の量を知ることができます。上図の例では、

コップの大きさ（底面積）５ｃｍ^2　×　水面の高さ２ｃｍ　＝　水の量１０ｃｍ^3

となります。コンデンサでも同様に、溜まっている電荷は、電圧の高さとコンデンサの大きさ（容量）

を掛けて求めることができます。

コンデンサの大きさ（容量）５Ｆ　×　電圧の高さ２Ｖ　＝　電荷の量１０Ｃ

もしこのコップに、毎秒１ｃｍ^{3}の勢いで、１０秒間水を注ぐとと、水面が２ｃｍに上昇しますから、

水の勢い１ｃｍ^3／秒　×　１０秒　／　コップの大きさ５ｃｍ^2　＝　水面の高さ２ｃｍ

となります。水の勢い１ｃｍ^3／秒は、電流１Ｃ／秒（つまり、１Ａ）のことですから、コンデンサでは、電流と時間を掛けて（流れ込んだ電荷を求めて）容量で割れば、上昇した電圧が計算できます。

電流１Ａ　×　時間１０秒　／　容量５Ｆ　＝　電圧の高さ（増加）２Ｖ

2.1. 練習

①１２Ｆのコンデンサに、２Ａの電流で１分間充電しました。（コンデンサに電流を流し込んでて、電荷を貯めることを充電すると言います）コンデンサに溜まった電荷は何クーロンですか。コンデンサは何ボルトに充電されますか。

②１００μＦのコンデンサが２０Ｖに充電されています。一定の電流１ｍＡで放電（コンデンサから電流を流れ出させ、コンデンサに溜まっている電荷を吐き出させることを、放電と言います）させれば、何秒で空（コンデンサの電荷がなくなる）になりますか。

2.2. 答

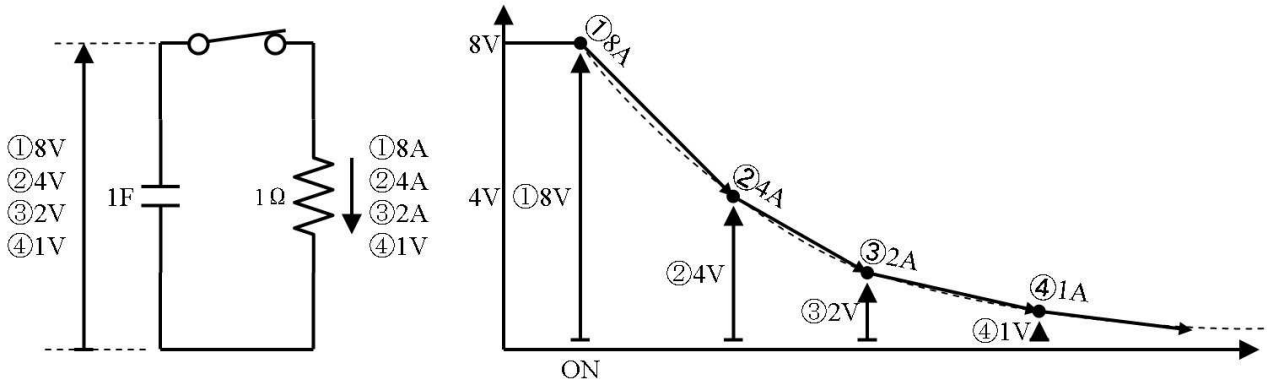
①１分は６０秒だから、溜まった電荷は２Ａ×６０秒＝１２０Ｃ。１２Ｆのコンデンサに１２０Ｃが蓄えられると、電圧は１０Ｖとなる。

②コンデンサに溜まっている電荷は、１００μＦ×２０Ｖで2mCである。１ｍＡとは、１ｍＣ／秒のことだから、2mC÷１ｍＣ／秒＝２秒でコンデンサが空になる。

３．ＣＲ回路の放電

下図の回路ではコンデンサは最初８Ｖに充電されています。ここで、ＳＷをＯＮにすると、１Ωの抵抗を通じて、コンデンサが放電（コンデンサに溜まった電荷が電流で流れ出す）を始めます。

ＳＷをＯＮした瞬間、下図回路図の①のように、抵抗には８Ｖが掛かり８Ａの電流が流れます、その結果、グラフに①で示すように、コンデンサの電荷は８Ａの勢いで放電し、速やかに電圧が下がり始めます。

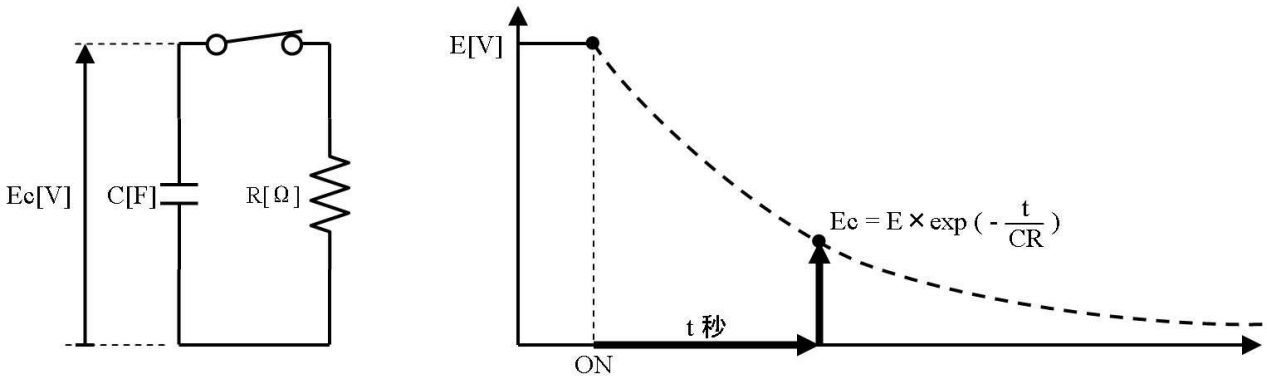


コンデンサが４Ｖまで放電すると、上図②のように、放電電流が４Ａに減少し、放電の勢いが弱まります。このように次第に勢いを弱めながら放電が続き、例えば、１Ｖまで放電すると、上図④のように、放電電流は１Ａに減少し、放電の勢いは極めてゆるやかになります。

このようにコンデンサに抵抗を接続すると、電圧が低下すると、放電する電流も減少するため、上図

のグラフに点線で示すように、次第に勢いを弱らせながら、放電して行きます。

下図に放電の様子を簡素に示します。コンデンサの容量がＣ［Ｆ］，抵抗がＲ［Ω］の場合、下図に点線で示すように滑らかに放電します。



コンデンサの最初の電圧がＥ［Ｖ］の場合、スイッチＯＮからｔ秒後のコンデンサの電圧Ｅｃは、次の式で計算できます。（exp は次第に勢いを弱らせる（強める）様子を計算する関数です。）

$$E_C = E \times \exp(-\frac{t}{CR})$$ ←この式は分らなくても良い

Ｅｘｃｅｌでは、=E1*EXP(-T1/C1/R1)で計算できます。

E1=最初の電圧［Ｖ］、T1=時間［秒］、C1=コンデンサの容量［Ｆ］、R1=抵抗値［Ω］

たとえば、たとえば、１０μコンデンサを１００Ｖに充電して、１００ｋΩで１秒放電した場合は、Ｅｘｃｅｌに=100*EXP(-1/10E-6/100E3)と入力して、約３７Ｖまで電圧が下がると計算できます。

逆に、コンデンサが所定の電圧に放電するまでの時間を計算することもできます。（ln は exp の逆の働きをする関数です。）

$$t = -CR \times \ln(\frac{E_C}{E})$$ ←この式は分らなくても良い

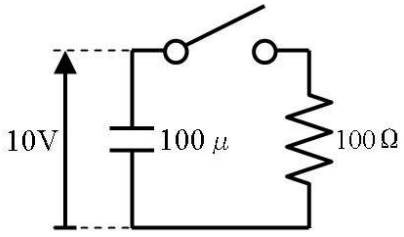
Ｅｘｃｅｌでは、=-C1*R1*ln(E2/E1)で計算できます。

E1=最初の電圧［Ｖ］、E2=所定の電圧［Ｖ］、C1=コンデンサの容量［Ｆ］、R1=抵抗値［Ω］

たとえば、１０μのコンデンサを１００Ｖに充電して、１００ｋΩで放電して６０Ｖに電圧が下がるまでの時間は、Ｅｘｃｅｌに=-10E-6*100E3*LN(60/100)と入力して、約０．５１秒と計算できます。

３.１. 練習

Ｅｘｃｅｌを用いて、下図の回路のスイッチをＯＮにした後の放電の様子を１０ｍ秒毎に計算し、グラフに示してください。



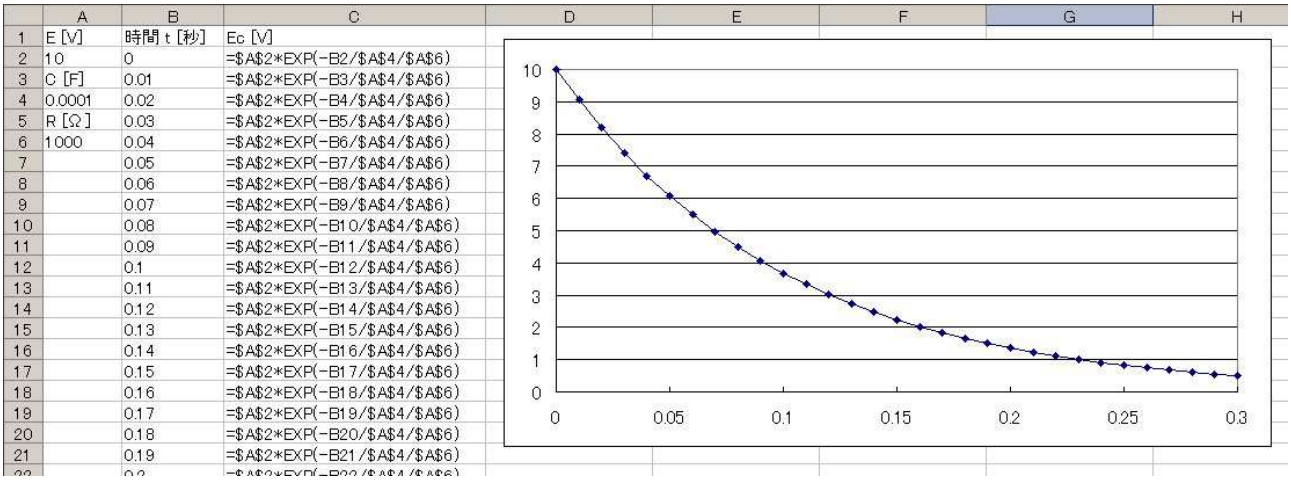
３.２. 答

Ｅｘｃｅｌに下図のように入力します。A2、A4、A6 のセルは絶対参照なので、Ｆ４キーを押して、

$A$4 等とします。

	A	B	C
1	E [V]	時間 t [秒]	Ec [V]
2	10	0	=$A$2*EXP(-B2/$A$4/$A$6)
3	C [F]	0.01	=$A$2*EXP(-B3/$A$4/$A$6)
4	0.0001	0.02	=$A$2*EXP(-B4/$A$4/$A$6)
5	R [Ω]	0.03	=$A$2*EXP(-B5/$A$4/$A$6)
6	1000	0.04	=$A$2*EXP(-B6/$A$4/$A$6)
7		0.05	=$A$2*EXP(-B7/$A$4/$A$6)
8		0.06	=$A$2*EXP(-B8/$A$4/$A$6)
9		0.07	=$A$2*EXP(-B9/$A$4/$A$6)

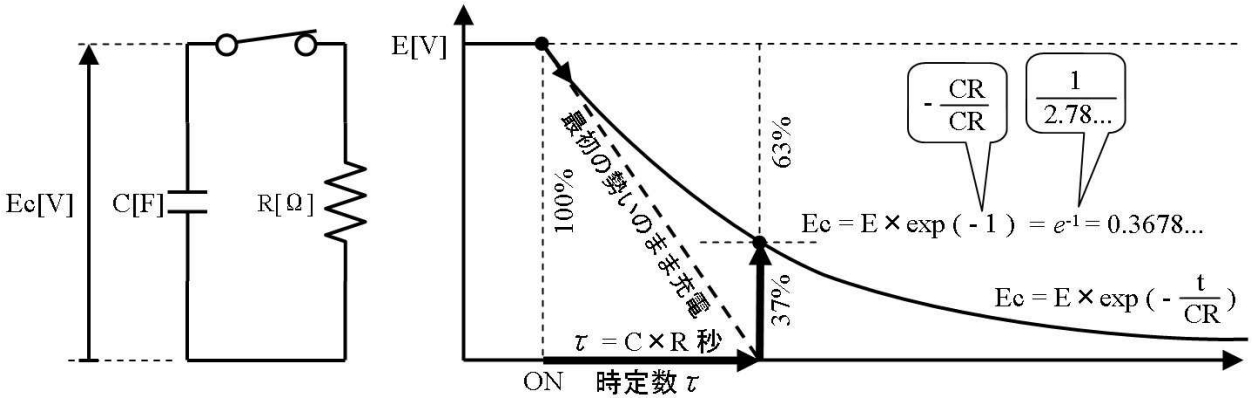
計算させ、グラフを表示させると、下図のようになります。



４．時定数τ

時定数は、じていすう、ときていすう、ときじょうすう、と読み方が様々にありますが、どれも正しいとされています。記号はτ（タウ）です。

ＣＲ回路は最初は勢い良く放電を開始し、次第に放電の勢いを弱めて行きますが、「時定数τ」は下図のグラフに太い点線で示すように、「もし、最初の勢いのまま放電し続けたら、何秒で放電が終了するか」を表しています。放電のグラフを手で書くときに、この時間τが分ると便利です。



τの値は、ＣとＲを掛けて求める事ができます。

τ［秒］ ＝ Ｃ［Ｆ］×Ｒ［Ω］

さらに、最初の電圧を１００Ｖとして、スイッチをＯＮにしてからτ（＝Ｃ×Ｒ）秒経過したときのコンデンサの電圧を計算すると、

１００ × ｅｘｐ（－ＣＲ／ＣＲ）＝ Ｅ × ｅｘｐ（－１）＝ 約３７

Ｅｘｃｅｌでは=100*EXP(-1)で 36.78…と表示される。

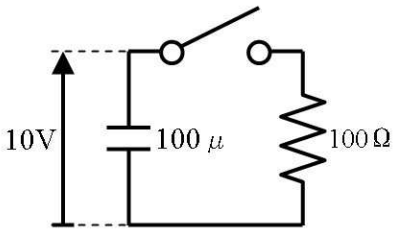
となり、τ秒経つと、コンデンサの電圧は最初の３７％まで低下します。（さらにτ秒経つと、さらにその３７％まで低下し、これを繰り返して放電して行きます。）このように時定数の値は、回路の動作を調べるのにとても役に立ちます。

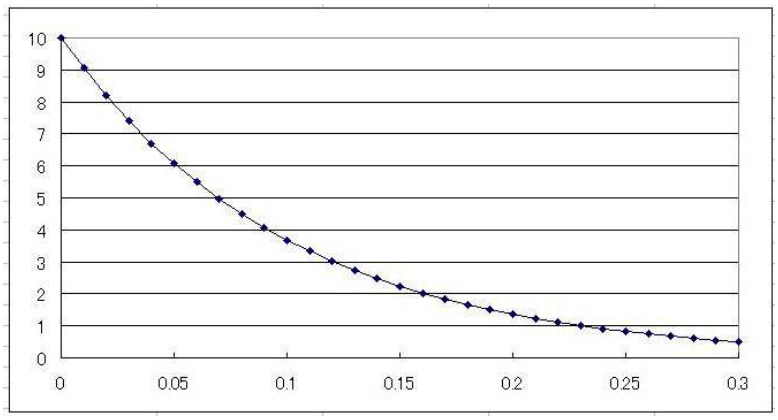
コンデンサ容量[Ｆ]と抵抗[Ω]を掛けると、時間[秒]が求まるのは、奇妙な感じですが、容量＝電荷／電圧また、電荷＝電流×時間であることから、次のように考えることができます。

$$容量\times抵抗=\frac{電荷}{電圧}\times\frac{電圧}{電流}=\frac{電流\times時間}{電圧}\times\frac{電圧}{電流}=時間$$

4.1. 練習

先の練習問題（Ｃ＝１００μＦ、Ｒ＝１ｋΩ）の回路の時定数τを求め、放電開始からτ秒後のコンデンサの電圧を練習問題の答のグラフから求めてください。最初の電圧の何%に低下していますか？





時定数τ　　m秒　グラフから求めた電圧　　V　電圧の割合　　%

4.2. 答

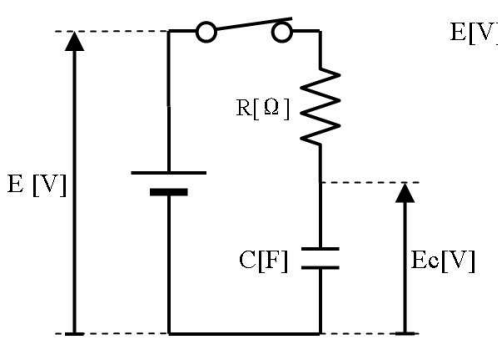
時定数τ＝１００μＦ×１ｋΩ＝１００m秒

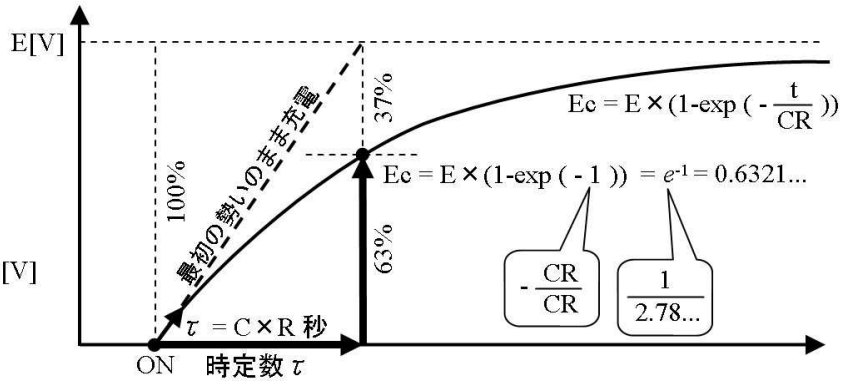
時定数τ　１００m秒　グラフから求めた電圧　３．７V　電圧の割合　３７%

５．ＣＲ回路の充電

下図左側の回路でスイッチをＯＮにすると、抵抗を通して電流が流れ、コンデンサが充電されて行きます。

また、下図右側に示すとおり、コンデンサ放電のグラフを上下逆にすると、今回のコンデンサ充電のグラフになります。





上下逆になったために、時定数 τ 後の充電電圧は、最初の電圧の 63%となります。（充電されずに残っている電圧が 37%です）また、コンデンサの充電電圧Ｅｃは、電池の電圧をＥ［Ｖ］とすると、

$$E_C = E \times (1 - \exp(-\frac{t}{CR}))$$

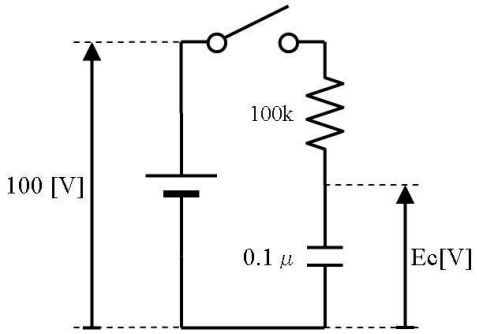
Ｅｘｃｅｌでは、=E1*(1-exp(-T1/C1/R1))で計算できます。

E1=電池の電圧［Ｖ］、T1=時間［秒］、C1=コンデンサの容量［Ｆ］、R1=抵抗値［Ω］

で計算できます。

5.1. 練習

下図の回路でＳＷをＯＮにした後のコンデンサの電圧の変化を、１ｍ秒毎にＥｘｃｅｌで計算しグラフを描いてください。



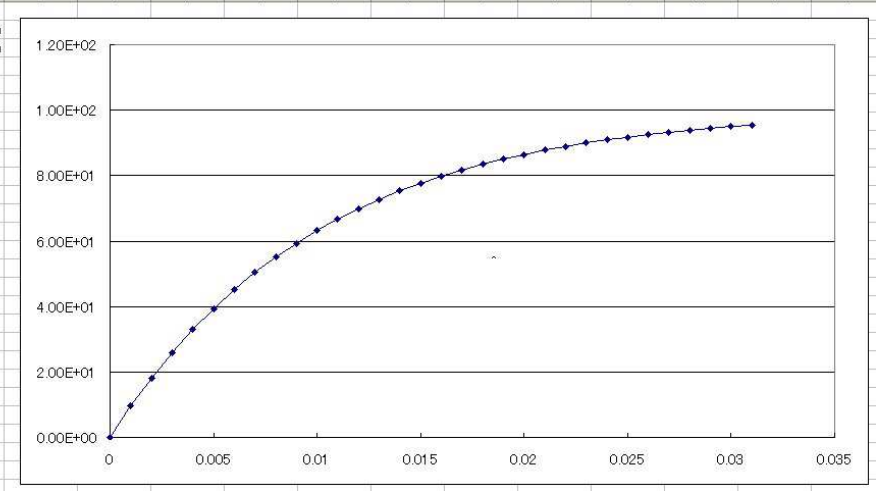
5.2. 答

抵抗が１００ｋΩ、コンデンサがＯ．１μ、電源が１００Ｖだから、Ｅｘｃｅｌで、ＯＮ後の時間を時間をＢ２セルに入れれば、充電電圧は=100*(1-(exp(-B2/100E3/0.1E-6))で計算できる。ｔの値を次第に大きくして、例えば下図のようにＥｘｃｅｌに入力し、計算させる。（下図ではＣとＲもセルから与えている）

	A	B	C
1	E [V]	時間 t [秒]	Ec [V]
2	100	0	=$A$2*(1-EXP(-B2/$A$4/$A$6))
3	C [F]	0.001	=$A$2*(1-EXP(-B3/$A$4/$A$6))
4	0.0000001	0.002	=$A$2*(1-EXP(-B4/$A$4/$A$6))
5	R [Ω]	0.003	=$A$2*(1-EXP(-B5/$A$4/$A$6))
6	100000	0.004	=$A$2*(1-EXP(-B6/$A$4/$A$6))
7		0.005	=$A$2*(1-EXP(-B7/$A$4/$A$6))
8		0.006	=$A$2*(1-EXP(-B8/$A$4/$A$6))

計算結果は次のようになる。

	A	B	C
1	E [V]	時間 t [	Ec [V]
2	100	0	0.00E+00
3	C [F]	0.001	9.52E+00
4	1.00E-07	0.002	1.81E+01
5	R [Ω]	0.003	2.59E+01
6	1.00E+05	0.004	3.30E+01
7		0.005	3.93E+01
8		0.006	4.51E+01
9		0.007	5.03E+01
10		0.008	5.51E+01
11		0.009	5.93E+01
12		0.01	6.32E+01
13		0.011	6.67E+01
14		0.012	6.99E+01
15		0.013	7.27E+01
16		0.014	7.53E+01
17		0.015	7.77E+01
18		0.016	7.98E+01
19		0.017	8.17E+01
20		0.018	8.35E+01
21		0.019	8.50E+01
22		0.02	8.65E+01
23		0.021	8.78E+01
24		0.022	8.89E+01
25		0.023	9.00E+01
26		0.024	9.09E+01



5.3. ｅｘｐ関数を使わない解き方（シミュレーション）

本項は余談です。興味がなければ読み飛ばすことができます。

この問題は下図のシートを使えば、exp 関数を使わずにシミュレーションという方法でも解くことができます。シミュレーションですから、入力電圧の変化も任意に設定できます。

E3　=E2+D2*(A3-A2)

	A	B	C	D	E	F
1	時間	入力電圧	抵抗の電圧	抵抗の電流	コンデンサの電荷	コンデンサの電圧
2	-0.004	0	=B2-F2	=C2/100000	0	=E2/0.0000001
3	-0.003	0	=B3-F3	=C3/100000	=E2+D2*(A3-A2)	=E3/0.0000001
4	-0.002	0	=B4-F4	=C4/100000	=E3+D3*(A4-A3)	=E4/0.0000001
5	-0.001	0	=B5-F5	=C5/100000	=E4+D4*(A5-A4)	=E5/0.0000001
6	0	100	=B6-F6	=C6/100000	=E5+D5*(A6-A5)	=E6/0.0000001
7	0.001	100	=B7-F7	=C7/100000	=E6+D6*(A7-A6)	=E7/0.0000001

Ａ列に時間（１ｍ秒ずつ増大）、Ｂ列に入力電圧（自由な変化が可能）を入力し、Ｅ２セルにコンデンサの電荷の初期値（ここでは０クーロン：空っぽ）を入力します。

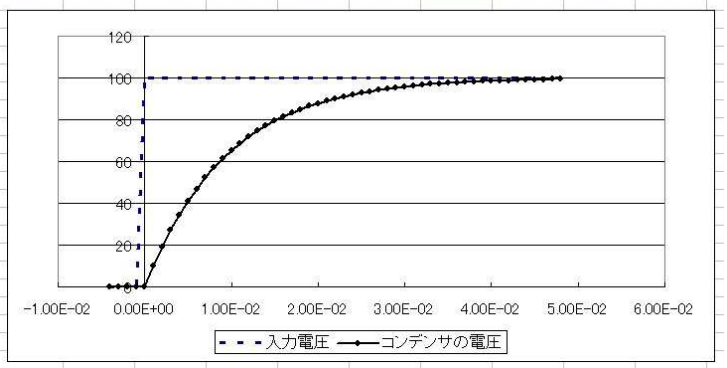
Ｃ列の抵抗の電圧は、入力電圧とコンデンサの電圧の差ですから、=B2-F2、Ｆ列のコンデンサの電圧はコンデンサ電荷／容量なので、=E2/0.1E-6と式を設定します。

ポイントはＥ３セルのコンデンサの電荷です。「コンデンサの電流×時間＝コンデンサに流れ込んだ電荷」という点と「流れ込んだ電荷の分、コンデンサの電荷は増える」という２点を考えて、電流のＤ２に（１行当たりの）時間（ここでは、Ａ３－Ａ２で１ｍ秒と）を掛けてコンデンサに流れ込んだ電荷を求め、さらに直前の電荷（真上のセルＥ２）に加えて、=E2+D2*(A3-A2)と入力します。

入力した値や式を下方向にコピーしてシートを完成し、計算してグラフを描かせると、下図に示すとおり、充電の様子が正しく計算されました。

電圧の変化に対して、１行当たりの時間が十分細かくないと正しく計算できませんから、ゆっくりと電圧や電流が変化する程度に、１行当たりの時間（ここでは１ｍ秒）を調節します。

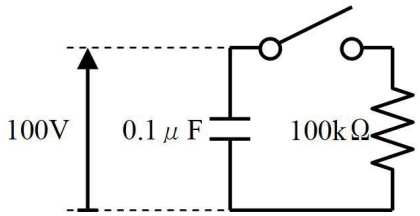
	A	B	C	D	E	F
1	時間	入力電圧	抵抗の電圧	抵抗の電流	コンデンサの電荷	コンデンサの電圧
2	-4.00E-03	0	0	0	0	0
3	-3.00E-03	0	0	0	0.00E+00	0
4	-2.00E-03	0	0	0	0.00E+00	0
5	-1.00E-03	0	0	0	0.00E+00	0
6	0.00E+00	100	100	0.001	0.00E+00	0
7	1.00E-03	100	90	0.0009	1.00E-06	10
8	2.00E-03	100	81	0.00081	1.90E-06	19
9	3.00E-03	100	72.9	0.000729	2.71E-06	27.1
10	4.00E-03	100	65.61	0.0006561	3.44E-06	34.39
11	5.00E-03	100	59.049	0.00059049	4.10E-06	40.951
12	6.00E-03	100	53.1441	0.00053144	4.69E-06	46.8559
13	7.00E-03	100	47.82969	0.0004783	5.22E-06	52.17031
14	8.00E-03	100	43.046721	0.00043047	5.70E-06	56.953279
15	9.00E-03	100	38.7420489	0.00038742	6.13E-06	61.2579511
16	1.00E-02	100	34.867844	0.00034868	6.51E-06	65.132156
17	1.10E-02	100	31.3810596	0.00031381	6.86E-06	68.6189404
18	1.20E-02	100	28.2429536	0.00028243	7.18E-06	71.7570464
19	1.30E-02	100	25.4186583	0.00025419	7.46E-06	74.5813417
20	1.40E-02	100	22.8767925	0.00022877	7.71E-06	77.1232075
21	1.50E-02	100	20.5891132	0.00020589	7.94E-06	79.4108868



実は、exp 関数を使うより、こちらの方が（四則演算しか出てきませんし、電流、電圧、電荷の単純な関係だけを入力すれば良いから）分り易いのです。このような簡単な計算から、ｅｘｐ関数の曲線が出てくるのは、私達の代わりに、Ｅｘｃｅｌが微分方程式を解いてくれているからです。（微分方程式は、フリコの構造を元に、フリコの振動を求めるような計算です）その上この方法、「倒立振子を安定させる制御を検討する」とか、相当すごい事までできるんです。

5.4. 練習

下図の回路の放電の様子をＥｘｃｅｌでシミュレーションし、コンデンサの電圧をグラフで表示してください。



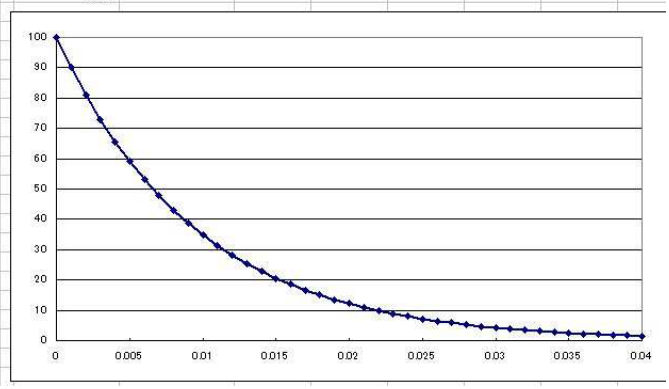
5.5. 答

コンデンサの電荷が、抵抗に流れる電流×時間ずつ減少することを考えて、次のようなシートを作成する。

	A	B	C	D	E	F	G
1	時間	コンデンサの電荷 前回の電荷－放電電荷	コンデンサの電圧 電荷／容量	抵抗の電流 電圧÷抵抗	放電電荷 時間×電流		時定数(参考)
2	0	=100*0.0000001	=B2/0.0000001	=C2/100000	=(A3-A2)*D2		=0.0000001*100000
3	0.001	=B2-E2	=B3/0.0000001	=C3/100000	=(A4-A3)*D3		
4	0.002	=B3-E3	=B4/0.0000001	=C4/100000	=(A5-A4)*D4		
5	0.003	=B4-E4	=B5/0.0000001	=C5/100000	=(A6-A5)*D5		
6	0.004	=B5-E5	=B6/0.0000001	=C6/100000	=(A7-A6)*D6		

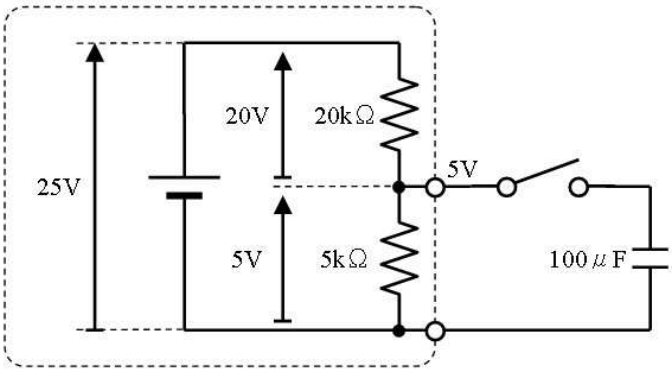
計算させてグラフを描くと下図のように放電の様子が表示される。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	時間	コンデンサの電荷 前回の電荷－放電電荷	コンデンサの電圧 電荷／容量	抵抗の電流 電圧÷抵抗	放電電荷 時間×電流		時定数(参考)							
2	0	0.00001	100	0.001	0.000001		0.01							
3	0.001	0.000009	90	0.0009	0.0000009									
4	0.002	0.0000081	81	0.00081	0.00000081									
5	0.003	0.00000729	72.9	0.000729	7.29E-07									
6	0.004	0.000006561	65.61	0.0006561	6.561E-07									
7	0.005	5.9049E-06	59.049	0.00059049	5.9049E-07									
8	0.006	5.31441E-06	53.1441	0.000531441	5.3144E-07									
9	0.007	4.78297E-06	47.82969	0.000478297	4.783E-07									
10	0.008	4.30467E-06	43.046721	0.000430467	4.3047E-07									
11	0.009	3.8742E-06	38.7420489	0.00038742	3.8742E-07									
12	0.01	3.48678E-06	34.86784401	0.000348678	3.4868E-07									
13	0.011	3.13811E-06	31.38105961	0.000313811	3.1381E-07									
14	0.012	2.8243E-06	28.24295365	0.00028243	2.8243E-07									
15	0.013	2.54187E-06	25.41865828	0.000254187	2.5419E-07									
16	0.014	2.28768E-06	22.87679245	0.000228768	2.2877E-07									
17	0.015	2.05891E-06	20.58911321	0.000205891	2.0589E-07									
18	0.016	1.85302E-06	18.53020189	0.000185302	1.853E-07									
19	0.017	1.66772E-06	16.6771817	0.00016772	1.6677E-07									
20	0.018	1.50095E-06	15.00946353	0.000150095	1.5009E-07									
21	0.019	1.35085E-06	13.50851718	0.000135085	1.3509E-07									
22	0.02	1.21577E-06	12.15766546	0.000121577	1.2158E-07									

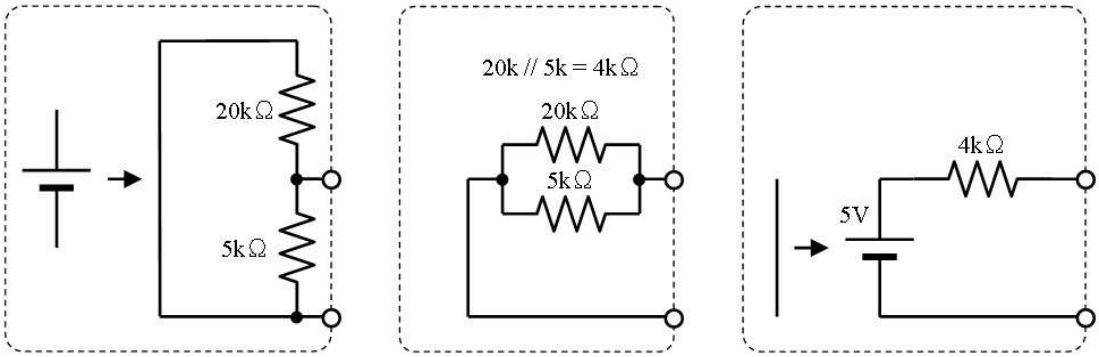


6. テブナンの定理

下図の回路でSWをONにすると、分圧の法則から、コンデンサは５Ｖを目指して充電されることは分ります。後は、時定数が計算できれば、充電の様子も分ります。



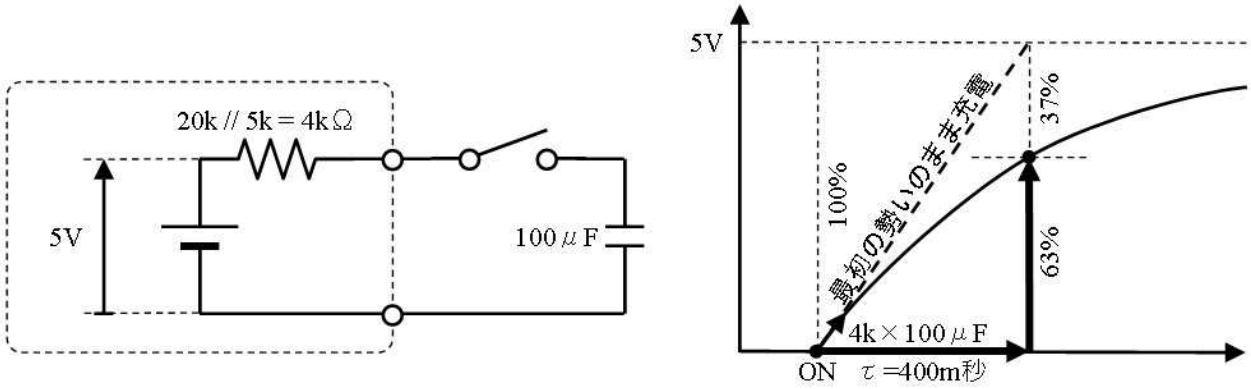
しかし、上図のままでは抵抗が２本あり、時定数が計算できません。そこで、上図の点線で囲んだ部分を、下図に示すテブナンの定理を使って、一本の抵抗に置き換えます。



（ａ）　（ｂ）　（ｃ）

先ず、上図（ａ）に示すように、電池を電線に置き換えます。すると、上図（ｂ）のように、右側から見た抵抗値は、２０ｋΩと５ｋΩが並列に見えるので、４ｋΩとなります。最後に、上図（ｃ）のように、端子に加わる電圧（５Ｖ）の電池を接続し直します。

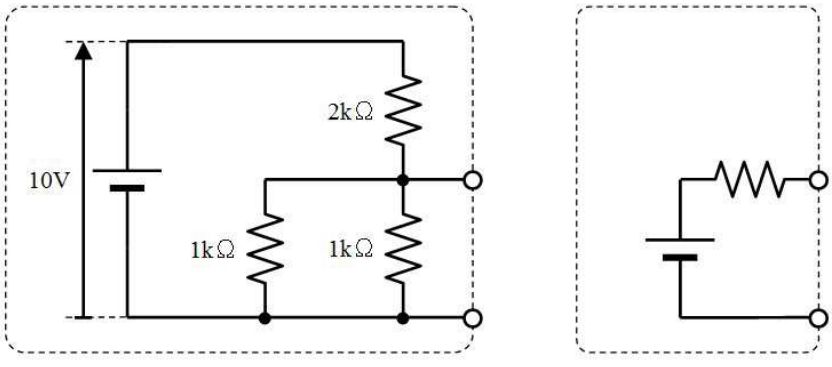
このように、電池と抵抗を複雑に組み合わせた回路も、１本の電池と抵抗の直列回路で表すことができます。これがテブナンの定理です。この置き換えを行うと、検討中の回路は下図のようになります。



上図の通り、４ｋΩを通して１００μＦを充電するので、時定数は４００ｍ秒で、充電の様子は上図右側のグラフのようになります。

6.1. 練習

下図（ａ）回路を端子から見た電圧と内部抵抗を、下図（ｂ）のように単純に置き換えると、電圧と抵抗はいくらになりますか。



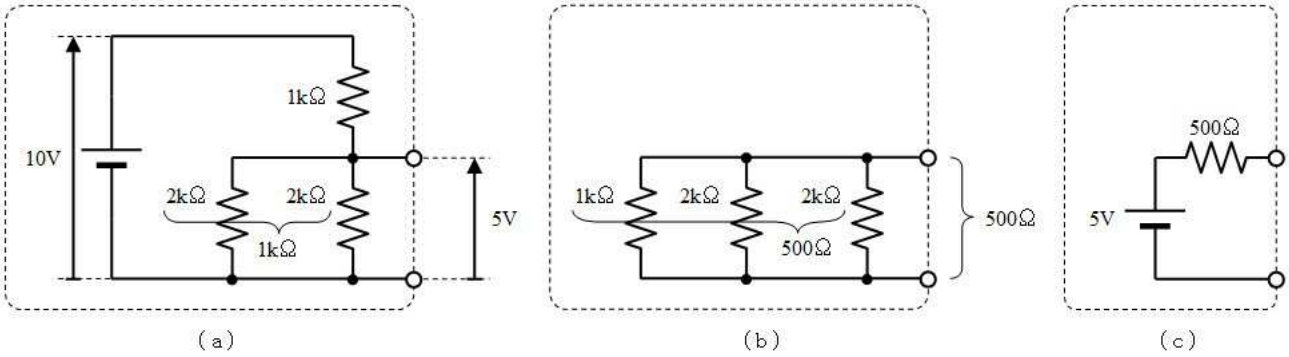
（ａ）　（ｂ）

電圧＿＿＿＿Ｖ　抵抗値＿＿＿＿Ω

6.2. 答

まず、端子の電圧を考える。下図（ａ）のとおり、下側の並列合成抵抗は１ｋΩ、従って電池の１０

Ｖが１ｋΩと１ｋΩで分圧されて、端子には５Ｖが出力される。



（a）　（b）　（c）

次に、電池を電線に置き換えると、上図（ｂ）の回路となり。入力端子から見た抵抗値は、３つの抵抗の並列合成抵抗で、５００Ωとなる。

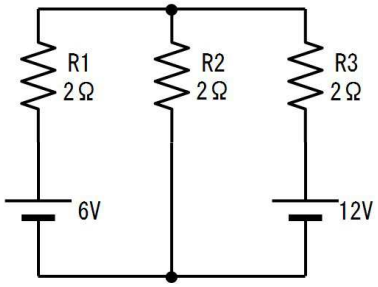
電圧 ５Ｖ　抵抗値 ５００Ω

７. 重ね合わせの原理

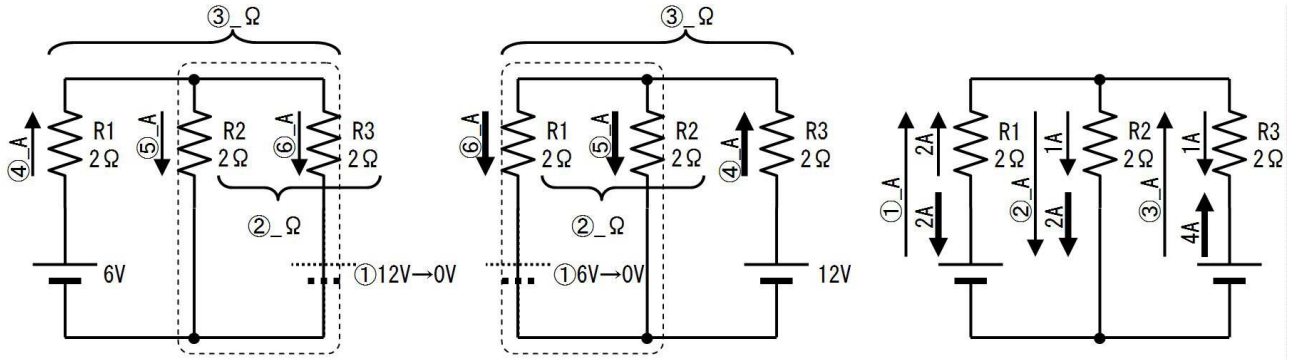
重ね合わせの原理は、電池が複数ある回路の電流を簡単に求める方法です。「複数の電池が働いている回路に流れる電流は、それぞれの電池が１つだけ働いて流れた電流を合計すれば計算できる」という考え方です。電圧と電流が比例する（つまり、オーム則が通用する）回路であればいつでも利用できます。

具体的にはまず、複数の電池のどれか１つだけに注目し、それ以外の電池は「導線」と考えて、各部の電流を求めます。次に、別の電池に注目し、それ以外の電池は「導線」と考えて、各部の電流を求めます。このように全ての電池に順に注目して電流を求めます。最後に、これまでに求めた電流を合計すれば、全ての電池が活動したときの電流が分ります。

下図の例では６Ｖと１２Ｖの２つの電池が働いています。ここでは、Ｒ１、Ｒ２、Ｒ３に流れる電流を重ね合わせの原理で求めます。



各部の電流は、下図（ａ）（ｂ）（ｃ）に示す３段階で考えます。まず（ａ）では６Ｖの電池に注目して、それ以外の（１２Ｖの）電池は導線であると考え、各部の電流を求めます。次に（ｂ）では１２Ｖの電池に注目して、それ以外の（６Ｖの）電池は導線であると考え、各部の電流を求めます。最後に（ｃ）で、（ａ）で求めた電流と（ｂ）で求めた電流を合計すれば、電池が２つとも活動しているときの各部の電流が計算できます。



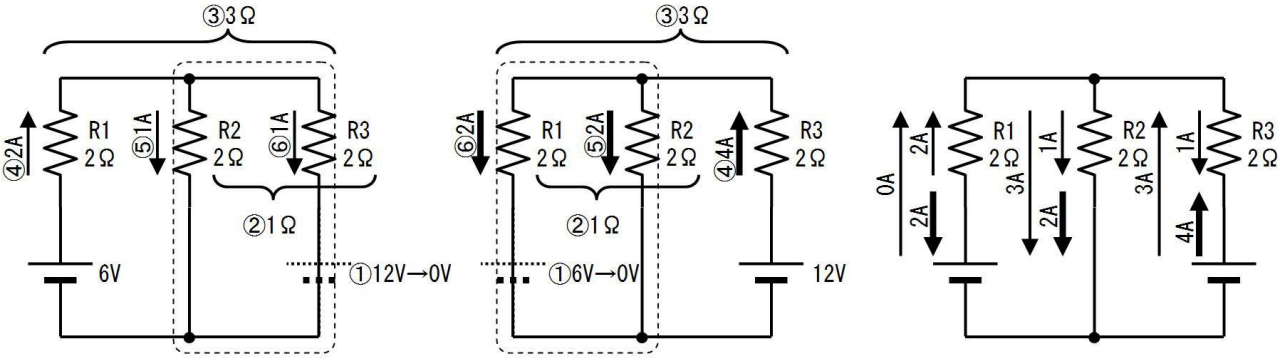
（ａ）右側の電池を導線に置き換える　　（ｂ）左側の電池を導線に置き換える　　（ｃ）２つの電流を合計する

7.1. 練習

上図を見ながら下表に記入して、電流を求めます。

番号	問題	答
（ａ）	①１２Ｖの電池を導線と考えます	－
②	Ｒ２とＲ３の並列合成抵抗値は、	Ω
③	電池から見た回路全体の抵抗値は、	Ω
④	Ｒ１に流れる電流は、	Ａ
⑤	Ｒ２とＲ３に流れる電流は、（分流で…）	Ａ
（ｂ）	①６Ｖの電池を導線と考えます	－
②	Ｒ１とＲ２の並列合成抵抗値は、	Ω
③	電池から見た回路全体の抵抗値は、	Ω
④	Ｒ３に流れる電流は、	Ａ
⑤	Ｒ２とＲ３に流れる電流は、（分流で…）	Ａ
（ｃ）	（ａ）と（ｂ）で求めた電流を合計します	－
①	Ｒ１に流れる電流は、	Ａ
②	Ｒ２に流れる電流は、	上向き・下向き Ａ
③	Ｒ３に流れる電流は、	上向き・下向き Ａ

7.2. 答

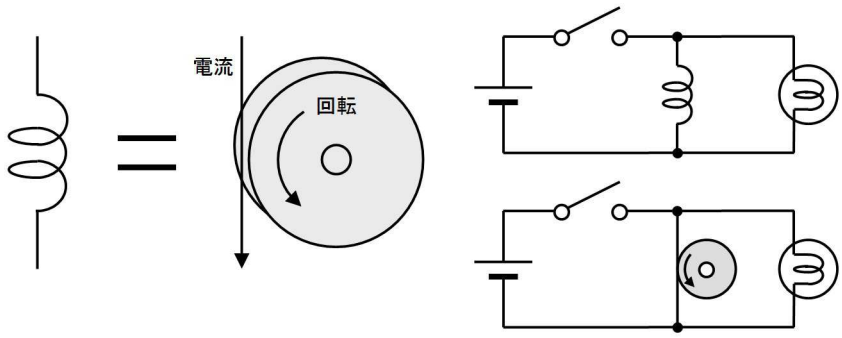


（ａ）右側の電池を導線に置き換える　（ｂ）左側の電池を導線に置き換える　（ｃ）２つの電流を合計する

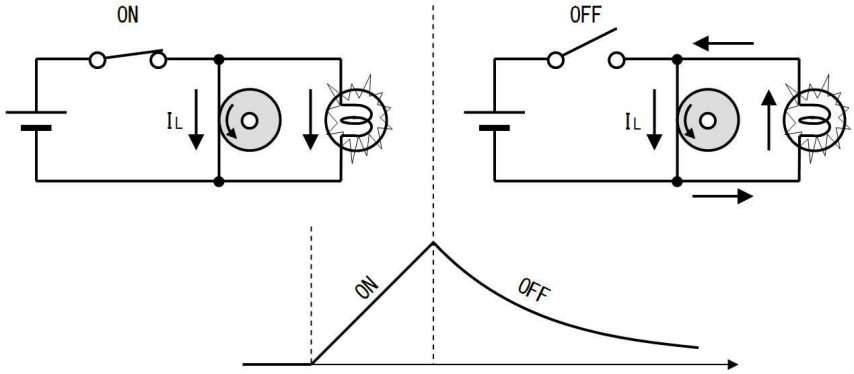
番号	問題	答
（ａ）	①１２Ｖの電池を導線と考えます	－
②	Ｒ２とＲ３の並列合成抵抗値は、	１Ω
③	電池から見た回路全体の抵抗値は、	３Ω
④	Ｒ１に流れる電流は、	２Ａ
⑤	Ｒ２とＲ３に流れる電流は、（分流で…）	１Ａ
（ｂ）	①６Ｖの電池を導線と考えます	－
②	Ｒ１とＲ２の並列合成抵抗値は、	１Ω
③	電池から見た回路全体の抵抗値は、	３Ω
④	Ｒ３に流れる電流は、	４Ａ
⑤	Ｒ２とＲ３に流れる電流は、（分流で…）	２Ａ
（ｃ）	（ａ）と（ｂ）で求めた電流を合計します	－
①	Ｒ１に流れる電流は、（２Ａ－２Ａ）	０Ａ
②	Ｒ２に流れる電流は、（２Ａ＋１Ａ）	上向き・[下向き] ３Ａ
③	Ｒ３に流れる電流は、（４Ａ－１Ａ）	[上向き]・下向き ３Ａ

8. コイル

コイルはコンデンサに比べると分かり難く感じる部品ですが、下図のように「電流で回るはずみ車」と考えると動作をイメージできます。



上図右側の回路でコイルの働きを説明します。下図左側のように、スイッチをＯＮにすると、コイルに電圧が加わり、はずみ車はゆっくりと回転を始めます。つまり、電流はゆっくりと増えてゆきます。



電流が増えたところで、上図右側のようにスイッチをＯＦＦにすると、はずみ車は勢いが付いているため、ＯＦＦ後も回転を続け、上図右側の経路で電流が流れて、電球が光り続けます。

電球にエネルギを供給しているため、はずみ車は次第に回転が遅くなり、回転のエネルギをすべて電球に送り込むと停止します。

コイルの大きさ（インダクタンス）は、はずみ車の重さに対応しています。ですから大きなコイルは電圧を掛けてもなかなか電流が増加せず、小さなコイルはすぐに電流が増加します。ですから、コイルの大きさは次のように計算します。

６Ｖの電圧を加えて、電流が３Ａに増えるまでに、２秒掛かれば、

コイルの大きさ ＝ ６Ｖ × ２秒 ÷ ３Ａ ＝ ４Ｈ

Ｅｘｃｅｌでは、=E1*T1/I1

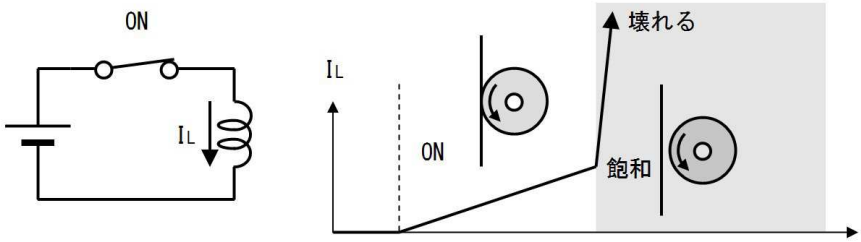
ですからコイルに流れる電流は、

コイルの電流 ＝ 電圧 × 時間 ÷ コイルの大きさ

Ｅｘｃｅｌでは、=E1*T1/L1

ところで、鉄やフェライトなどの磁性体の芯（コア）に線を巻くと、コイルを小形にできます。ただし、磁性体には「これ以上強い磁石には成れない」という限度があるので、大きな電流を流すと、その限度に達して「磁気飽和」という現象が起こります。

下図に示す通り、コアが磁気飽和すると「電流がそれ以上増えない」のではなく、「電流が急激に増加する」するので注意が必要です。



つまり、上図右側のグラフ上に示すように、はずみ車があまりに激しく回転すると電線から離れてしまい（コイルが、電線に変身して）電流が流れ放題になるというイメージです。

8.1. 練習

①５Ｖを加えると１μ秒で１０ｍＡに電流が増加しました。このコイルの大きさはいくらですか？

②５０ｍＨのコイルに１５Ｖの電圧を１ｍ秒加えました。電流は何Ａに増加しますか。

8.2. 答

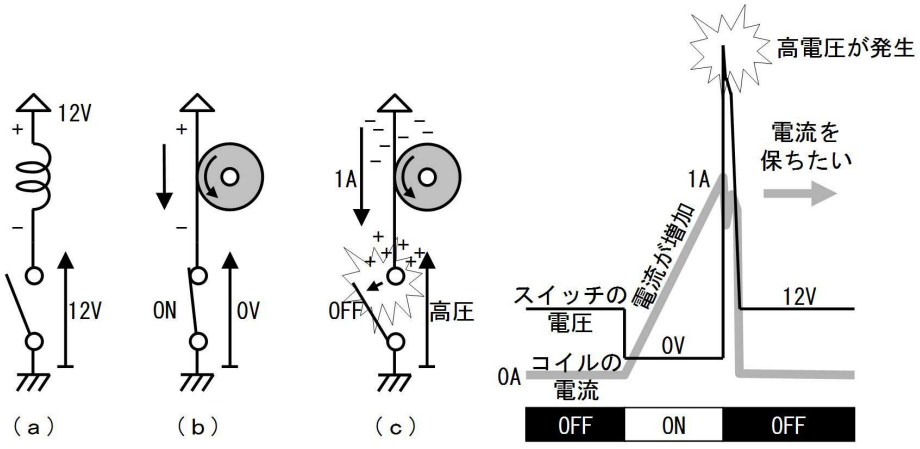
①コイルの大きさ ＝ ５Ｖ ÷ １０ｍＡ ÷ １μ秒 ＝ ５００μＨ =5*1E-6/10E-3

②コイルの電流 ＝ １５Ｖ × １ｍ秒 ÷ ５０ｍＨ ＝ ３００ｍＡ =15*1E-3/50E-3

9. フライバック

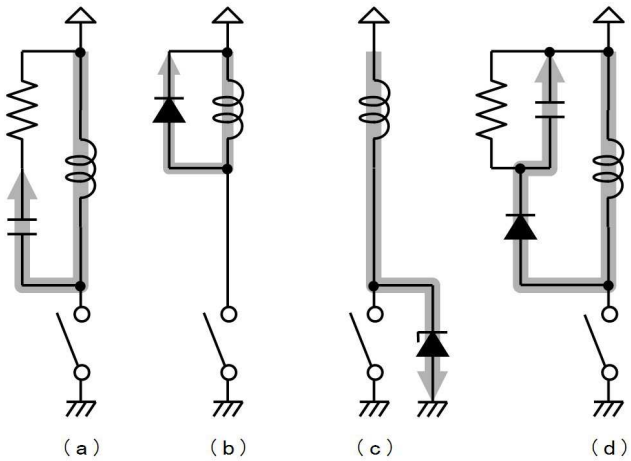
下図（ａ）の回路でスイッチをＯＮにすると、コイルの上側に＋の電圧が加わります。このため、同図（ｂ）のようにはずみ車の回転が次第に速くなり、下図右のグラフに灰色線で示すように電流が増加して行きます。

ここで例えば電流が１Ａに増加したときにスイッチをＯＦＦにすると、すでにはずみ車は勢い良く回っており、コイルはスイッチがＯＦＦであるにもかかわらず１Ａの電流を流し続けようとします。このためコイルの下側に高い＋の電圧が発生し、離れた接点を火花となって電流が流れます。接点に火花が発生すると（火花は高いエネルギーを消費するので）はずみ車の回転は短時間で停止し、電流は止まります。



このようにコイルに流れる電流を突然止めたとき、高い電圧が発生する現象を「フライバック」と呼び、発生する高い電圧を「フライバック電圧」、無理にスイッチを流れる電流を「フライバック電流」と呼びます。

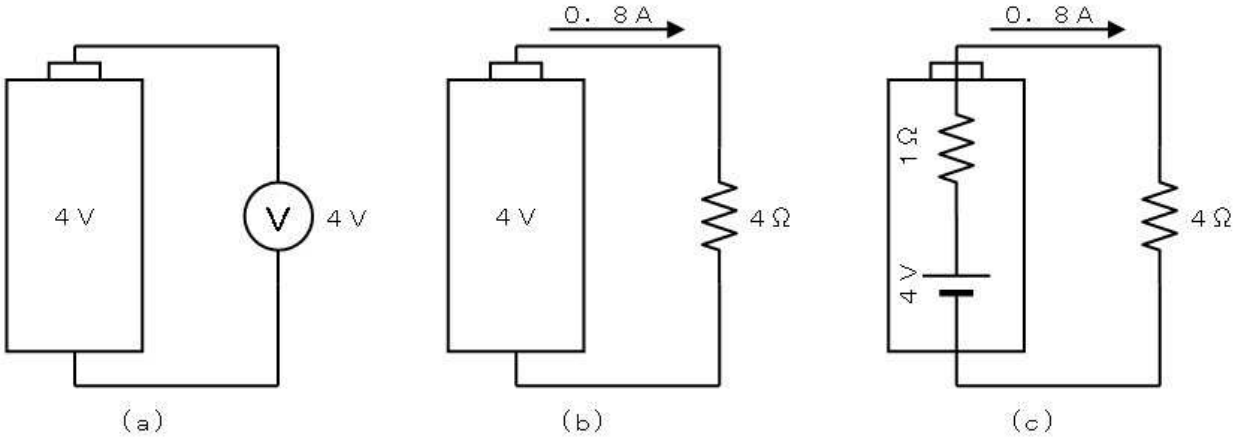
フライバックによって、接点が火花で傷みますし、半導体であれば破損します。このため下図に示すような、ＯＦＦ時の電流を吸収する回路（スナバ回路）を別に設け、火花の発生を止めます。



スナバ回路の働きについては、別途説明します。

１０．内部抵抗１

下図（ａ）のように、４Ｖと書かれた電池の電圧を測定すると、確かに４Ｖでした。そこで、下図（ｂ）のように、１Ａ流れる事を期待して、４Ωの抵抗（このように電流を流すための抵抗を「負荷抵抗」と呼びます）を接続すると、なぜか０．８Ａしか流れませんでした。



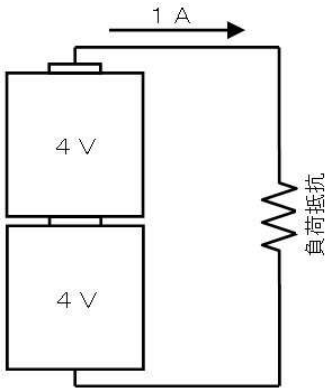
この理由は、上図（ｃ）に示すように、電池の内部に（隠された）抵抗があり、その結果、合計の抵抗値が５Ωとなり、電流が減少したためです。

このような、「（必要ないのに）素子に入っている抵抗」を「内部抵抗」と呼びます。大きな電流を流す回路では、内部抵抗を考えて設計しないと、電流が思ったより小さくなってしまいます。

もちろん電池メーカーは意地悪で内部抵抗を入れている訳ではありません、電池メーカーは内部抵抗を無くそうと努力しているのですが、構造上止むを得ず入ってしまう訳です。

１０.１．練習

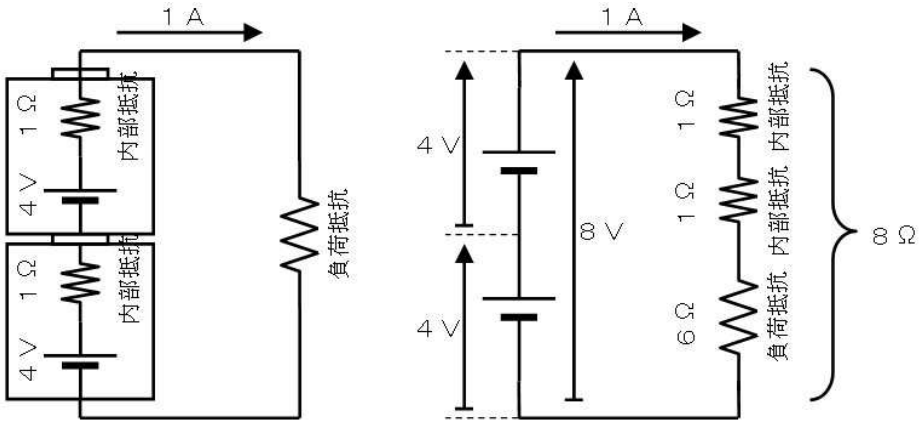
下図のように、内部抵抗１Ω、起電力４Ｖの電池を２本直列に接続し、１Ａの電流を取り出すためには、負荷抵抗は何Ωにすべきですか。



負荷抵抗：［　　］Ω

１０.２. 答

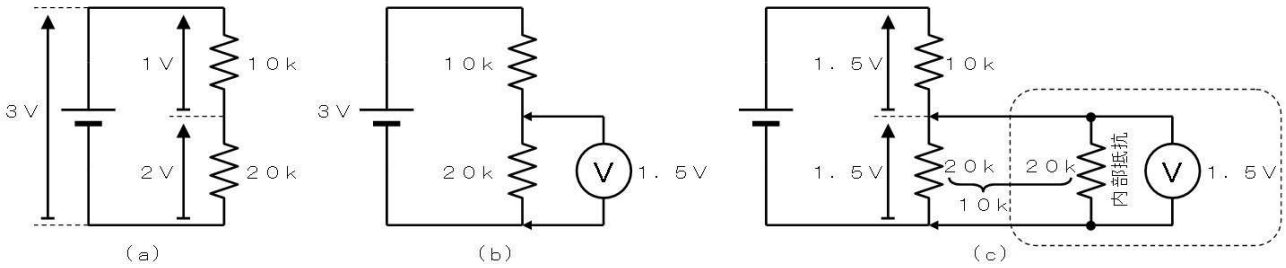
内部抵抗を考えると、回路は下図左のように、各１Ωの内部抵抗があります。また、起電力（電池の電圧）の合計は８Ｖです。ですから、１Ａ流すためには、回路全体の抵抗値を８Ωにする必要があります。このため、６Ωの負荷抵抗を接続すれば、回路に１Ａを流すことが出来ます。



負荷抵抗：［　６　］Ω

１１. 内部抵抗２

下図（ａ）のように、３Ｖの電源を１０ｋと２０ｋで分圧すると、２０ｋの両端には２Ｖが生じる筈です。そこで、同図（ｂ）のように２０ｋの両端電圧を測定すると、なぜか１．５Ｖしかありませんでした。



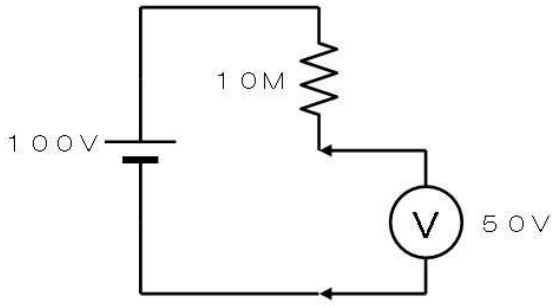
この現象も「内部抵抗」が原因です。上図（ｃ）に示すように、本来は電流を流さない筈の電圧計にも、「内部抵抗」（ここでは２０ｋ）があります。

このため、回路に電圧計を接続したことで、下側の２０ｋΩと電圧計の内部抵抗の２０ｋΩが並列接続され、両者が合わさって１０ｋとして作用します。結果として、上側の１０ｋと下側の１０ｋで分圧されたことになり、下側の２０ｋΩの両端には、電源の３Ｖの半分、つまり１．５Ｖが生じたのです。

もちろん計器メーカーは意地悪で内部抵抗を入れている訳ではありません、メーカーは内部抵抗を無くそうと努力しているのですが、構造上止むを得ず入ってしまう訳です。今日では（通常の用途であれば）全く電流が流れないと考えて良い電圧計も増えています。（内部抵抗が１ＴΩ以上あります）

１１.１. 練習

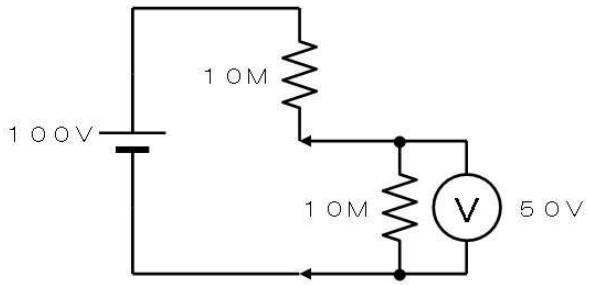
下図のように、１００Ｖの電源から、１０MΩを経由して電圧を測定すると、電圧計は５０Ｖを示しました。この電圧計の内部抵抗を答えてください。



内部抵抗［　　］Ω

１１.２. 答

１００Ｖが５０Ｖ（半分）に分圧されているので、上側の抵抗と下側の抵抗（内部抵抗）は同じです。このため内部抵抗は１０MΩです。



内部抵抗［　１０M　］Ω

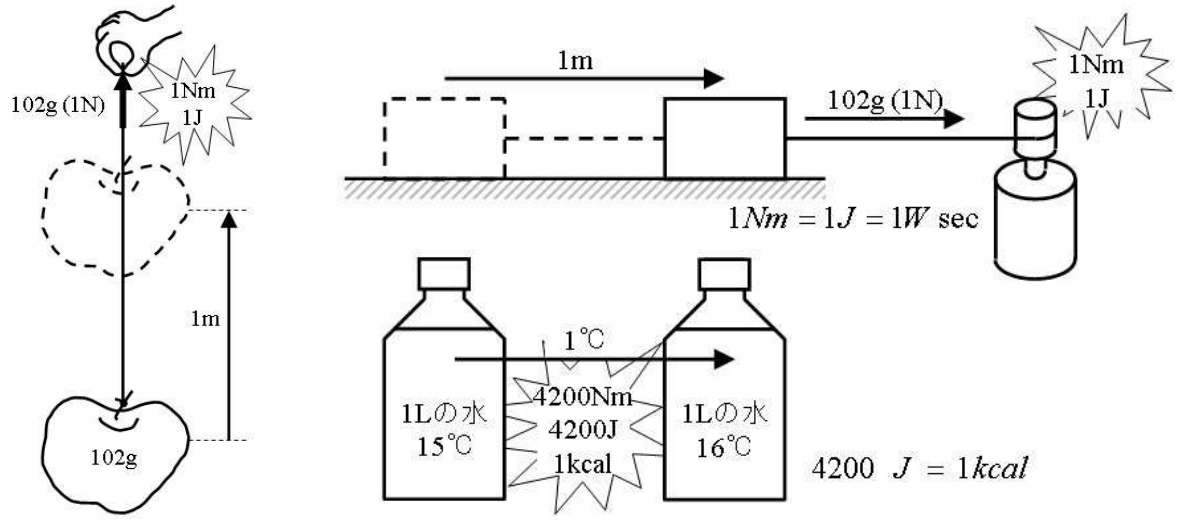
１２. エネルギと仕事

ここから説明する「仕事」や「仕事率」は、電気の世界と、現実の世界（温度や運動などの身近な事柄）を関連付ける上で役立ちます。たとえば「この機械には何Wくらいのモータが必要か？」などを、ざっくり計算できるようになります。ですから、エネルギや仕事については、練習もまじえてちょっと詳しく説明します。

尚、本書では分り易くするため「仕事」に関連する「良く似た」単位や考え方を「全く同じもの」として扱います。そのほうが簡単で、実用上何の問題も無いからです。

下図左側のように、１０２ｇのりんごを１m持ち上げる「仕事」が１Nm（ニュートンメートル）です。Nmの代わりに、J（ジュール）や、W秒（ワット秒）を使う事もできます。また、「仕事」は「エネルギ」とも呼びます。

持ち上げるのではなく、下図右上に示すとおり、荷物を１０２ｇ（１N）の 力 で、１m横に引き摺る仕事も１Nmです。



また、上図下部に示すとおり、４２００Nmのエネルギがあれば１リットルの水を１℃温めることができます。

１２.１. 練習

下表の仕事を求めて答欄に、各種の単位で記入してください。

番号	問題	答
①	３０６ｇの荷物を４m持ち上げる仕事は	Nm J W秒
②	２Ｌの水を５℃暖める仕事は	Nm J W秒

１２.２. 答

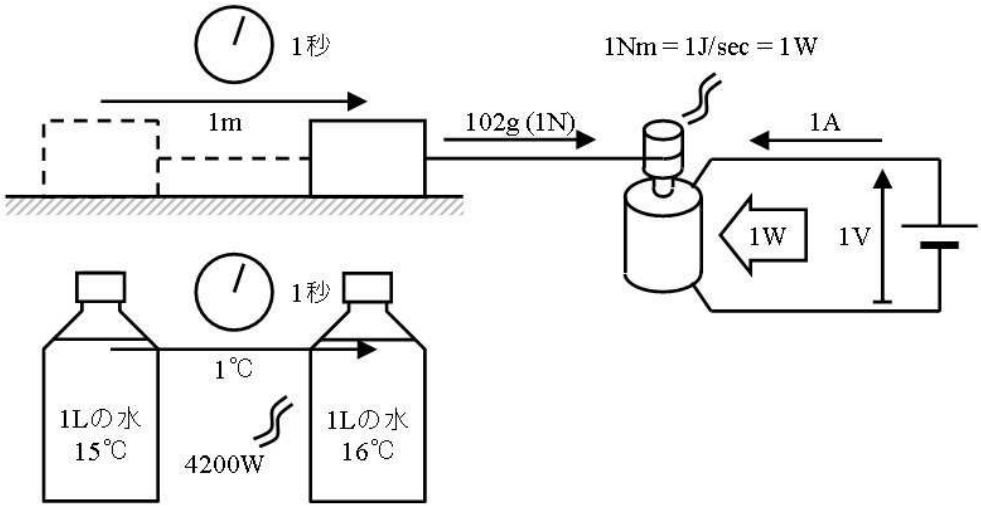
番号	問題	答
①	３０６ｇの荷物を４m持ち上げる仕事は ３０６ｇ÷１０２ｇ＝3N 3N×4m＝１２Nm	１２Nm １２J １２W秒
②	２Ｌの水を５℃暖める仕事は ４２００J×２L×５℃＝４２０００J	４２０００Nm ４２０００J ４２０００W秒

１３. 電力（仕事率）

仕事率は「１秒間にできる仕事の量」で、単位はNm／秒です。「１秒にできる」というところが、「仕事」との違いです。（Nm／秒の代わりに、J／秒や、Wを使う事もできます）

下図に示すとおり、荷物を１０２ｇ（１N）の 力 で引っ張り、１秒間あたり、１mずつ引きずるこ

とができれば、仕事率は１Nm／秒（ニュートンメートル毎秒）です。１秒間に１Nmの仕事ができますから。１０秒間待てば、１０Nmの仕事ができます。



また、上図右側にあるように、電圧１Ｖで１Ａの電流が流れているとき「１Ｗ（ワット）の電力が消費されている」と言います。

電力Wと仕事率Nm／秒（Ｊ／秒）は同じもので、１Wの電力を無駄なく使えば、１秒間に１Nmの仕事ができます。

電力は電圧と電流を掛けて、次のように計算して求めます。

電力　＝　電圧　×　電流

例えば　２０Ｖ　×　５Ａ　＝　１００Ｗ

オーム則によれば、電圧は電流×抵抗、電流は電圧÷抵抗ですから、電力は次の計算でも求めることができます。

電力　＝　電流^2　×　抵抗　　（電流^{2}は電流×電流の事です）

例えば　５Ａ^2　×　４Ω　＝　１００Ｗ

電力　＝　電圧^2　÷　抵抗

例えば　２０Ｖ^2　÷　４Ω　＝　１００Ｗ

１００Wの仕事率は、他の単位を使って表すこともできます。

１００Ｗ　＝　１００Ｊ／秒　＝　１００Nm／秒

（１０２ｇのりんごを、一秒で１００m持ち上げます）

このように仕事や仕事率では、複数の単位が、ほぼ同じ意味で使われます。それらの単位を下表に示します。

種類	単位	呼び名	意味
仕事	Nm	ニュートンメートル	１N（１０２ｇ）の力で１m引っ張る仕事
	Ｊ	ジュール	
	W秒	ワットセカンド	１Ｖで１Ａの電流を１秒間流す仕事
熱量	ｋｃａｌ	キロカロリー	１ｋｇの水を１℃温めるのに必要な熱量

			４２００Ｊ＝１ｋｃａｌ
仕事率	Nm／秒	ニュートンメートル毎秒	１Ｎ（１０２ｇ）の力で １秒あたり１m引っ張る仕事率
	Ｊ／秒	ジュール毎秒	
	W	ワット	１Ｖで１Ａの電流を流す仕事率

１３.１. 練習

下表の仕事を求めて答欄に、各種の単位で記入してください。但し、エネルギは目的のために無駄なく利用されると考えてください。

番号	問題	答
①	４秒間に５１０ｇの荷物を２０m持ち上げる仕事率は	Nm／秒 Ｊ／秒 W
②	１０分で３Ｌの水を５℃暖める仕事率は	Nm／秒 Ｊ／秒 W
④	３０Ｖ２Ａのモータの仕事率は	Nm／秒 Ｊ／秒 W
④	３０Ｖ２Ａのモータが、２０秒間動作して行う仕事は	Nm Ｊ W秒

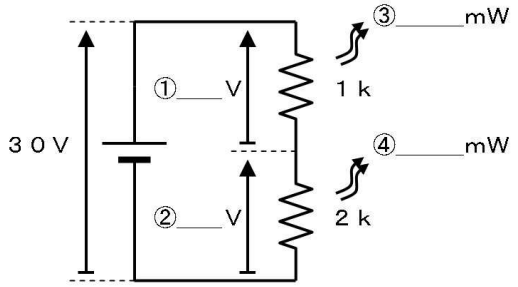
１３.２. 答

番号	問題	答
①	４秒間に５１０ｇの荷物を２０m持ち上げる仕事率は ５１０÷１０２＝5Ｎ 5Ｎ×２０m÷４秒＝２５	２５Nm／秒 ２５Ｊ／秒 ２５W
②	１０分で３Ｌの水を５℃暖める仕事率は ３Ｌ×５℃×４２００＝６３０００Ｊ ６３０００Ｊ÷６００秒＝１０５Ｊ／秒	１０５Nm／秒 １０５Ｊ／秒 １０５W
④	３０Ｖ２Ａのモータの仕事率は ３０Ｖ×２Ａ＝６０W	６０Nm／秒 ６０Ｊ／秒 ６０W
④	３０Ｖ２Ａのモータが、２０秒間動作して行う仕事は	１２０Nm

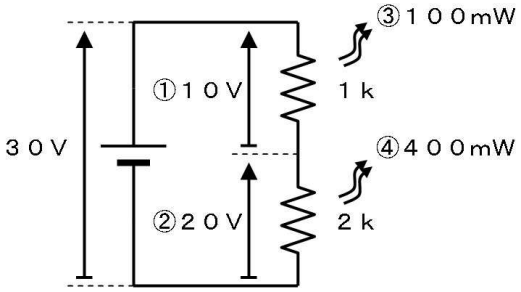
	３０Ｖ×２Ａ＝６０Ｗ ６０Ｗ×２０秒＝１２０Ｗ秒	１２０Ｊ １２０Ｗ秒

１３.３. 練習

下図の回路の①～④の電圧や電力を求めてください。



１３.４. 答



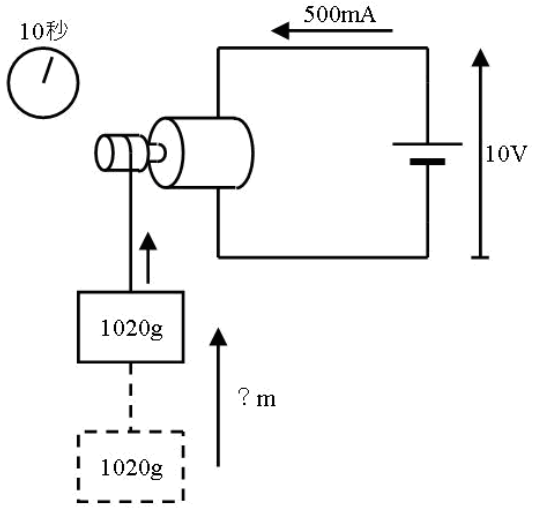
①②分圧の法則により、①は１０Ｖ、②は２０Ｖ

③１０Ｖ×１０Ｖ÷１ｋΩで、１００mW

④２０Ｖ×２０Ｖ÷１ｋΩで、４００mW

１３.５. 練習

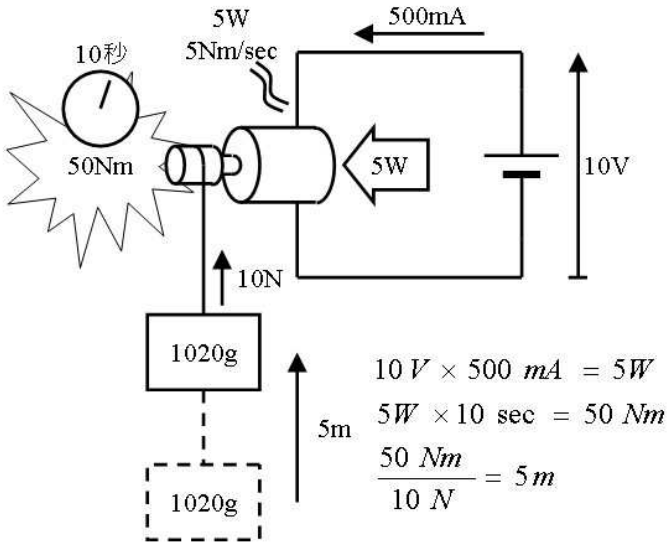
下図のように、１０Ｖ５００ｍＡでモータを駆動して１．０２ｋｇの荷物を持ち上げます。このモータを１０秒間動作させれば、何メートル持ち上げることができますか。下表右側の列に書き込んで答えてください。但し、モータに加えた電力は無駄なく荷物の持ち上げる事に使われるとします。



番号	項目	答

①	モータの消費電力	W
②	モータの１０秒間の仕事	Nm
③	荷物を引く力	N
④	荷物を引く距離	m

１３.6. 答

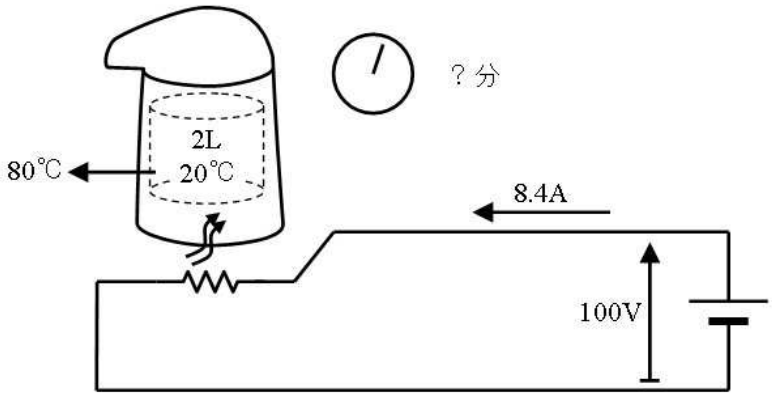


番号	項目	答	説明
①	モータの消費電力	５W	１０V×５００mA
②	モータの１０秒間の仕事	５０Nm	５W×１０秒 （５Nm／秒×１０秒）
③	荷物を引く力	１０N	１０２０ｇ／１０２＝１０N （１N＝１０２ｇw）
④	荷物を持ち上げる距離	５m	５０Nm／１０N

実際には様々なところでエネルギが（モータが発熱する等で）無駄になり、持ち上げる高さは小さくなります。

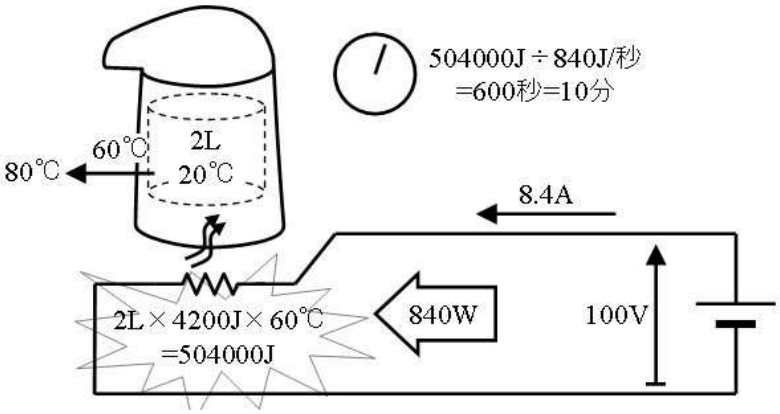
１３.7. 練習

下図のように、１００V、８．４Aのヒータを使って、電気ポットに入った２０℃の水２リットルを、８０℃まで温めるには、何分必要ですか。但し、熱は外に逃げないものとします。



番号	項目	答
①	暖めて上昇させる温度	℃
②	暖めるのに必要なエネルギー	J
③	ヒータの電力	W
④	暖める時間（秒）	秒
⑤	暖める時間（分）	分

１３.８. 答



番号	項目	答	説明
①	暖めて上昇させる温度	６０℃	８０℃－２０℃
②	暖めるのに必要なエネルギー	５０４０００Ｊ	２Ｌ×６０℃×４２００Ｊ
③	ヒータの電力	８４０Ｗ	１００Ｖ×８．４Ａ
④	暖める時間（秒）	６００秒	５０４０００÷８４０
⑤	暖める時間（分）	１０分	６００秒÷６０

１４. 電力量

電力量は、電力（仕事率）に時間を掛けて、使用した電気エネルギ（仕事）の量を求めたものです。

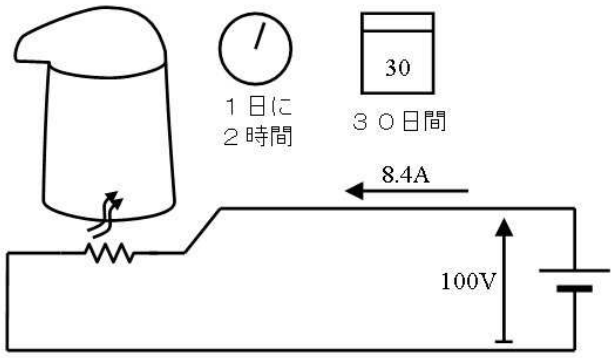
ですから電力量は、基本的にはＪ（ジュール）やW秒（ワットセコンド）と同じタイプ（仕事）の単位です。

ＪやW秒との違いは、時間に「秒」ではなく「時間」（アワー：ｈ）を使うところです。ですから単位も、Ｗｈ（ワットアワー）やｋＷｈ（キロワットアワー）です。１時間は３６００秒ですから、１Ｗｈは３６００W秒（３６００Ｊ）です。

私たちが支払う電力料金も、電力量を元に決められます。つまり、使ったエネルギーの分、代金を取られる訳です。

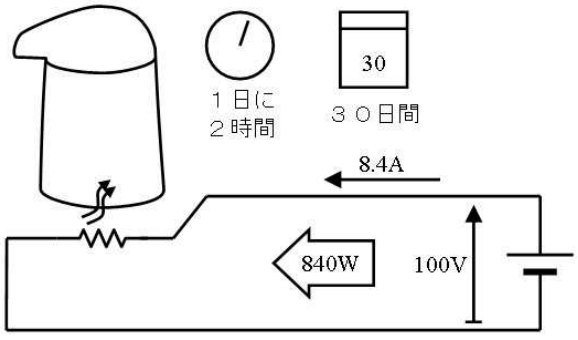
１４.１. 練習

下図の通り、１００Ｖ８．４Ａのヒータを、毎日２時間、３０日間動作させると、何ｋＷｈの電力量を消費しますか？



番号	項目	答
①	ヒータの電力	W
②	２時間動作時の電力量	ｋＷｈ
③	３０日間動作時の電力量	ｋＷｈ

１４.２. 答



840W×2h×30day=50.4kWh

番号	項目	答	説明
①	ヒータの電力	８４０W	電圧×電流
②	２時間動作時の電力量	１．６８ｋＷｈ	電力×時間
③	３０日間動作時の電力量	５０．４ｋＷｈ	一日電力量×３０

１５. デシベル（ｄＢ）

本書ではデシベルはしばらく（伝達関数のあたりまでは）出てきません。ややこしい割りには使う機会が少ないです。このため、本項は読み飛ばしておき、必要が生じてから読むこともできます。

さて、デシベルは「電力の倍率に付いているゼロの数を数えて１０倍したもの」を表す単位です。（あとで詳しく説明します）「電力の倍率」は「利得」や「ゲイン」とも呼びます。

電力の倍率は、たとえば下表①～③の灰色部で示すように、１Wが１００００Wに増加すれば「電力１００００倍」です。当然、倍率は次のように計算できます。

$$10000\text{ 倍} = \frac{10000\,W}{1W} \quad \text{つまり、電力の倍率} = \frac{\text{出力電力}}{\text{入力電力}}$$

ところが、「１００００倍」とゼロを沢山書くのは面倒ですから、下表④列のように、「ゼロの数」だけを書くことにして、「電力１００００倍」を「4[B]」（ベル）と呼びます。電力１００倍なら2[B]、電力１０００００００００倍でも9[B]と、短く書くことができます。

①	②	③	④	⑤
入力 電力	出力 電力	電力の 倍率	倍率の 0 の数 [B]ベル	0 の数の 10 倍 [dB]デシベル
1W	0.0001W	0.0001 倍	-4 [B]	-40 [dB]
	0.001W	0.001 倍	-3 [B]	-30 [dB]
	0.01W	0.01 倍	-2 [B]	-20 [dB]
	0.1W	0.1 倍	-1 [B]	-10 [dB]
	1W	1 倍	0 [B]	0 [dB]
	10W	10 倍	1 [B]	10 [dB]
	100W	100 倍	2 [B]	20 [dB]
	1000W	1000 倍	3 [B]	30 [dB]
	10000W	10000 倍	4 [B]	40 [dB]

しかし、あまり大きな倍率になると、ゼロの数を数える事さえ面倒です。このため「ゼロの数を数える関数」ｌｏｇ$_{10}$を使います。たとえば、Ｅｘｃｅｌでセルに=LOG(1000000000,10)と入力すると、「９」と表示されます。式で書くと、

ｌｏｇ$_{10}$（１０００００００００）＝９

です。ですから、電力の倍率のゼロの数[B]（ベルの値）は、ゼロを数える関数ｌｏｇ$_{10}$を使って、

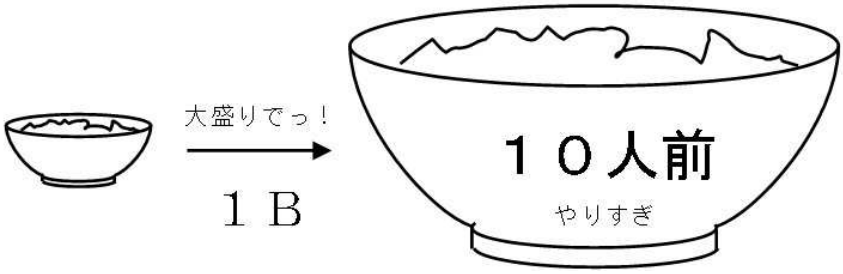
ｌｏｇ$_{10}$（電力１００００倍）＝４[B]

エクセルでは=LOG(10000,10)と入力すれば、4と表示される。

つまり、ベルの値＝ｌｏｇ$_{10}$（電力の倍率）[B]

のようにして計算できます。

ところで、1[B]増えるだけで、１０倍も大きくなるのは、ちょっと大胆すぎて使い難いです。たとえば、「1[B]大盛りにしてくれ」と頼むと、１０人前の大盛りが出てくる」訳です。



そこで、上表⑤列のように、１０[ｄＢ]で1[B]となる単位、[ｄＢ]（デシベル）を使います。１０倍にしただけですから、電力１００００倍の場合は次のように計算できます。

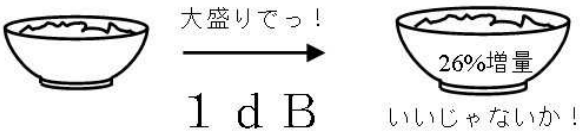
１０×ｌｏｇ$_{10}$（電力１００００倍）＝４０ｄＢ

エクセルでは=10*LOG(10000,10)と入力すれば 40 と表示される。

つまり、デシベルの値＝１０×ｌｏｇ$_{10}$（電力の倍率）[ｄＢ]

Ｂ（ベル）の代わりにｄＢ（デシベル）を使うのは、１．2[Ｌ]（リットル）と呼ぶ代わりに、値を１０倍して、１２[ｄＬ]（デシリットル）と呼ぶのと同じです。

1[B]は１０倍ですが、1[ｄＢ]は約１．２６倍です。1[ｄＢ]の大盛りは、２６％増量です。3[ｄＢ]なら2倍盛り、これなら、使い勝手が良さそうです。



１５.１. 練習

１mWを増幅器に入力したところ、１０Wが出力された、利得は何ｄＢか

１５.２. 答

エクセルで=10*LOG(10/1E-3,10)と入力して、利得は 40dB

（1E-3 は 1m の意味、1E3 なら 1k の意味）

１６. 半端な数のデシベル

さて、１００倍なら「ゼロ2つ」と数えられますが、例えば３０倍はどうでしょう。３０倍は、１０倍（１個）よりは大きいし、１００倍（２個）よりは小さいと思われます。幸い、ｌｏｇ$_{10}$はこのような場合にも答を出してくれます。

$\log_{10}(30)=1.477$

エクセルでは=LOG(30,10)と入力

つまり、３０倍のゼロの個数は１．５個程度で、確かに１より大きく２より小さいです。

１６.１. 練習

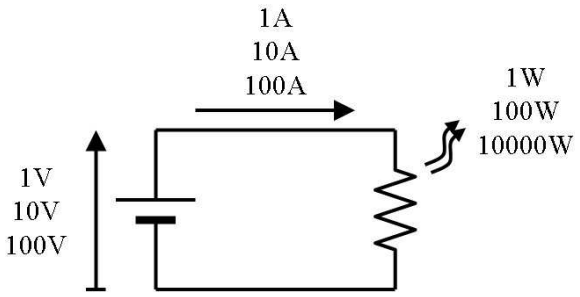
１．５mWを増幅器に入力したところ、１００Wが出力された、利得は何ｄＢか

１６.２. 答

エクセルで=10*LOG(100/1.5E-3,10)と入力して、利得は約 48.2dB

１７. 電圧のデシベル

下図の回路で、電圧を１０倍、１００倍、と大きくすると、電流も１０倍、１００倍と増加します。その結果、電力は、１００倍、１００００倍と電圧以上の勢いで大きくなります。



つまり、下表着色部で示すように、電圧の倍率のゼロの数が、１、２、３…と増加すると、電力の倍率のゼロの数（ベルの値）は、２、４、６…と２倍のペースで大きくなります。

電圧		電力		
倍率	倍率の 0 の数	倍率	倍率の 0 の数 [B]ベル	0 の数の 10 倍 [dB]デシベル
0.1 倍	-1	0.01 倍	-2[B]	-20[dB]
1 倍	0	1 倍	0[B]	0[dB]
10 倍	1	100 倍	2[B]	20[dB]
100 倍	2	10000 倍	4[B]	40[dB]
1000 倍	3	1000000 倍	6[B]	60[dB]

電圧の倍率が１０００倍のとき、電力の倍率は１０００００倍になります。このため電圧の倍率１００倍からベルの値を求めるには、ゼロの数を２倍して、

２×ｌｏｇ$_{10}$（電圧１０００倍）＝２×３＝６[Ｂ]

Ｅｘｃｅｌでは=2*log(1000,10)と入力すれば 6[B]と表示される。

つまり、ベルの値＝２×ｌｏｇ$_{10}$（電圧の倍率）[Ｂ]

と計算します。

電圧の倍率から「ｄＢの値」を求める場合は、「Ｂの値」を１０倍すれば良いので、

１０×２×ｌｏｇ$_{10}$（電圧１０００倍）＝１０×２×３＝６０[ｄＢ]

Ｅｘｃｅｌでは=20*log(1000/1,10)と入力すれば 60[dB]と表示される。

つまり、デシベルの値＝２０×ｌｏｇ$_{10}$（電圧の倍率）[ｄＢ]

と計算します。

このように、電圧からｄＢを求めるときに出てくる２０は、ベルにするための１０と、電圧比を電力比にするための２が合わさったものです。

１７.１. 練習

１．５ｍＶを増幅器に入力したところ、１００Ｖが出力された、利得は何ｄＢか

１７.２. 答

エクセルで=20*LOG(100/1.5E-3,10)と入力して、利得は約 96.5dB

１８. デシベルから電力の倍率を求める

たとえば電力１００００倍のゼロの個数（ベルの値）４は、次のように計算できました。

log_{10}（１００００倍）＝ゼロ４個

つまり、ベルの値＝log_{10}（電力の倍率）

逆に、ゼロの個数（つまり、４［B］）から、電力１００００倍は、

10^4＝１００００倍

エクセルでは、=10^4あるいは=POWER(10,4)と入力すれば 10000 倍と表示される。

つまり、電力の倍率＝$10^{ベルの値}$

で求めることができます。

さて、４０［ｄB］は４［B］でしたから、電力の倍率を４０［ｄB］から求めるときは、デシベルの値を１０で割って、ゼロの個数を求めて、

$10^{40÷10}$＝１００００倍

エクセルでは、=10^(40/10)あるいは=POWER(10,40/10)と入力すれば 10000 倍と表示される。

つまり、電力の倍率 ＝$10^{デシベルの値÷10}$

と計算できます。

１８.１. 練習

２６ｄBの利得のある増幅器に２２mWの信号を入力した、出力は何Wとなるか

１８.２. 答

電力の倍率を２６ｄBから求めて、２２mWに掛ければよい、つまりエクセルで=22E-3*10^(26/10)と入力して、約 8.76W

１９. デシベルから電圧の倍率を求める

４０［ｄB］（４［B］）なら電力は１００００倍、電圧は１００倍でした。つまり、電力のゼロの数を半分に減らすと電圧の倍率になりました。そのため、電力が４０［ｄB］のとき電圧の倍率は、

$10^{40÷10÷2}$＝電圧１００倍

エクセルでは、=10^(40/20)あるいは=POWER(10,40/20)と入力すれば 100 倍と表示される。

つまり、電圧の倍率＝$10^{デシベルの値÷20}$

と計算できます。

１９.１. 練習

２６ｄBの利得のある増幅器に２２mVの信号を入力した、出力は何Vとなるか

１９.２. 答

２６ｄBの電圧の倍率は、エクセルで=10^(26/20)倍、２２mVを入力したときの出力電圧は、エクセルで=22E-3*10^(26/20)と入力して、約 439mV

２０. デシベルの目安

下表のデシベル値は、切りの良い倍率になるので、目安として利用できます。

デシベル	電力	電圧
１ｄＢ	約１．２６倍	約１．１２倍
３ｄＢ	約2倍	約１．４１倍
６ｄＢ	約4倍	約2倍
７ｄＢ	約5倍	約２．２４倍
９ｄＢ	約8倍	約２．５１
１０ｄＢ	１０倍	約３．１６倍

１０、１００、１０００倍のデシベルは、１０、２０、３０と分るので、上表と組み合わせて様々な値で目安を知ることができます。

ｄＢの足算は、倍率の掛け算になり、倍率の掛け算は、ｄＢの足算になります。このため下表の例では、３３ｄＢの場合、３０ｄＢ＋３ｄＢと考えて、３０ｄＢ→１０００倍、上表より３ｄＢ→2倍ですから、１０００倍×3倍で２０００倍と概算できます。

デシベルの世界 たし算	３３ｄＢ		
	３０ｄＢ	＋	３ｄＢ
倍率の世界 掛け算	１０００倍	×	2倍
	２０００倍		

逆に、電力２０００倍の場合、2倍×１０００倍と考えて、2倍→３ｄＢ、１０００倍→３０ｄＢですから、３ｄＢと３０ｄＢを加えて、３３ｄＢと概算できます。

２０.１. 問題

次の表の［　　］に適切な概算値を記入して、表を完成して下さい。

デシベル	電力
３３ｄＢ	２０００倍
２９ｄＢ	［　　］倍
１６ｄＢ	［　　］倍
［　　］ｄＢ	５０倍
［　　］ｄＢ	８０００倍

２０.２. 答

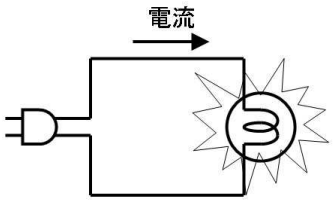
デシベル	電力	考え方
３３ｄＢ	２０００倍	３０＋３ｄＢ⇔１０００倍×２倍

２９ｄＢ	８００倍	２０＋９ｄＢ⇔１００倍×８倍
１６ｄＢ	４０倍	１０＋６ｄＢ⇔１０倍×４倍
１７ｄＢ	５０倍	１０＋７ｄＢ⇔１０倍×５倍
３９ｄＢ	８０００倍	３０＋９ｄＢ⇔１０００倍×８倍

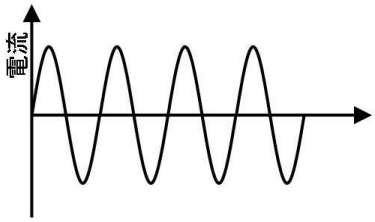
４．交流回路入門

１．交流回路

家庭のコンセントに電球を接続すると、下図に示すような、向きや大きさが（時と共に）単純な変化を繰り返す（ブルブル震えるような）電流が流れます。このような電流や電圧を「交流」と呼び、このような電流が流れる回路を「交流回路」と呼びます。



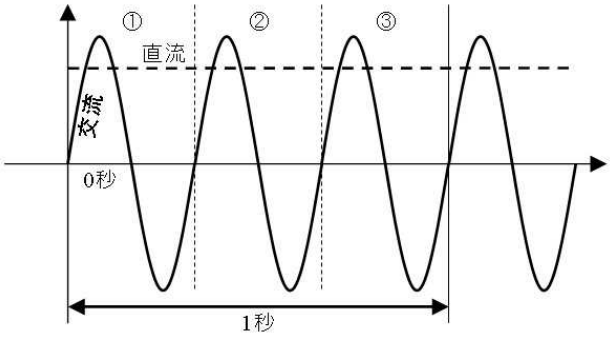
コンセントに接続した電球



電流の波形

２．交流と周波数

下図に直流（点線）と交流（実線）を示します。一定で変化しない電圧や電流が「直流」、単純な変化を繰り返す電圧や電流が「交流」です。

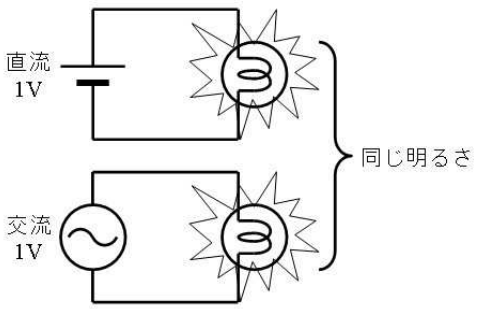


直流と交流

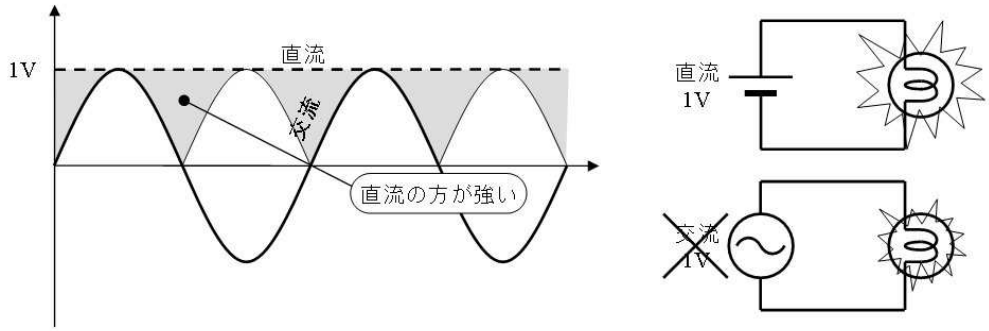
また、１秒間にやって来た波の数を「周波数」と呼び、単位はＨｚ（ヘルツ）です。上の図では１秒間に３個の波が来ているので、周波数は３Ｈｚです。

３．交流の強さ（交流電圧）

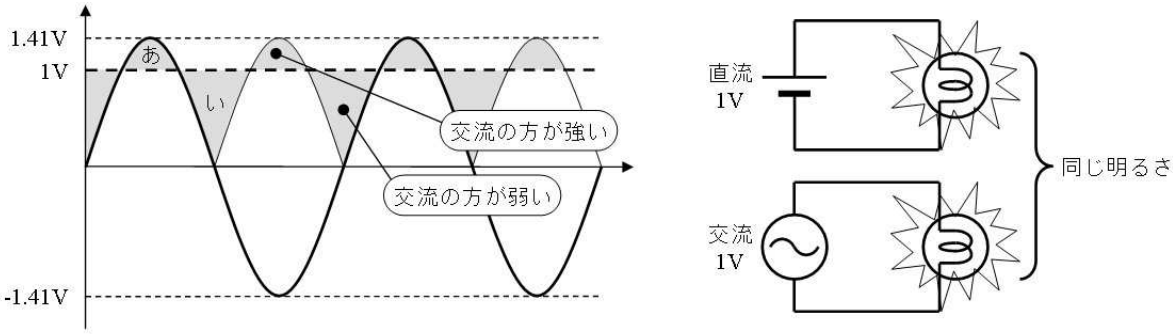
直流の１Ｖ（$1V_{DC}$）でも、交流の１Ｖ（$1V_{AC}$）でも、同じ１Ｖですから、電球が同じ明るさで光る筈です。



下図のように、交流の下側を、上側に折り返して、直流と強さを比べてみましょう。下図に示す、最大電圧が１Ｖの交流は、図に色を塗った部分が直流より弱く、その結果、電球は直流より暗く光ります。ですから、このような最大電圧１Ｖの交流は、１Ｖの交流とは呼べません。



そこで、２つの電球が同じ明るさで光るように交流の強さを調節すると、下図のようになりました。



上図「あ」の部分で、交流が直流より強く、交流が直流より弱い「い」の部分を打ち消して、直流と交流の強さが同じになります。

このとき、交流の最大電圧は１．４１Ｖ（つまり$\sqrt{2}$Ｖ）です。このような交流を「１Ｖの交流」と呼びます。

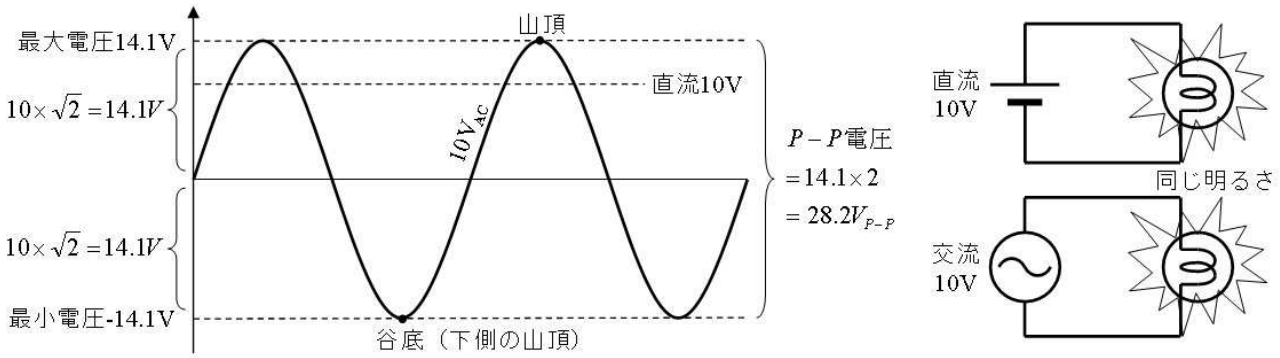
つまり、交流の電圧を、$\sqrt{2}$倍（１．４１倍）すると、交流の最大電圧を求めることができ、逆に、交流の最大電圧を、$\sqrt{2}$（１．４１）で割ると、交流の電圧を求めることができます。

交流の電圧には下表のように、複数の呼び方や書き方があります。

呼び方の 色々	交流電圧 ＡＣ電圧 実効値電圧
書き方の 色々	ＡＣ１０Ｖ $10V_{AC}$ $10V_{RMS}$

４. ピーク・トゥ・ピーク電圧

下図は１０Ｖの交流の例です。最大電圧は１４．１Ｖ、最小電圧は－１４．１Ｖです。

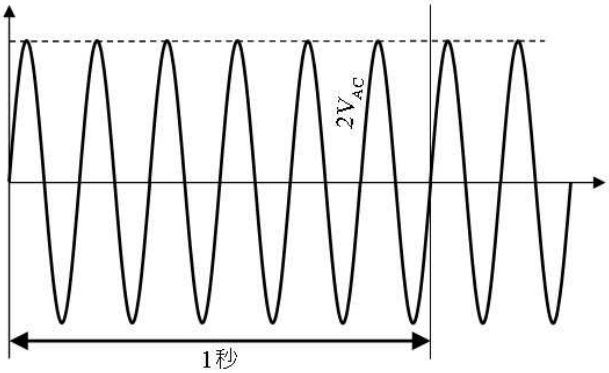


谷底（下側の山頂）から、山頂までの電圧は、（オシロ等で）簡単に測定できるので、好んで使用され、ピーク・トゥ・ピーク（山頂から山頂までの）電圧（Ｐ－Ｐ電圧）と呼ばれます。上図に示す１０V_{AC}の交流のピーク・トゥ・ピーク電圧は、２８．２V_{P-P}です。交流の電圧に、$2\times\sqrt{2}$ を掛けると（２．８２を掛けると）ピーク・トゥ・ピーク電圧を求めることができます。

電流の場合も電圧と同様に、１Ａと同じ強さの交流電流の最大値は、１．４１Ａ（つまり$\sqrt{2}$Ａ）、このときのＰ－Ｐ電流は２．８２Ａ（つまり $2\times\sqrt{2}$ Ａ）です。

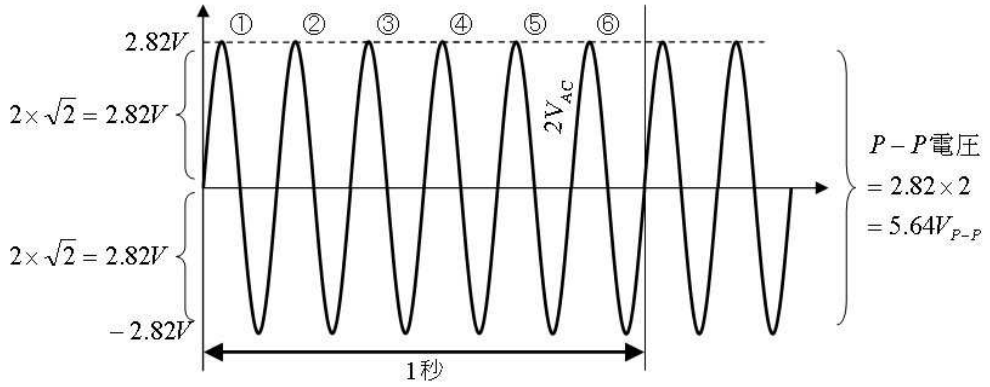
4.1. 練習（交流の周波数と電圧１）

下図は２Ｖの交流です。この交流の、周波数、最大電圧、最小電圧、Ｐ－Ｐ電圧を答えてください。



周波数［　　］Ｈｚ、最大電圧［　　］Ｖ、最小電圧［　　］Ｖ、Ｐ－Ｐ電圧［　　］V_{P-P}

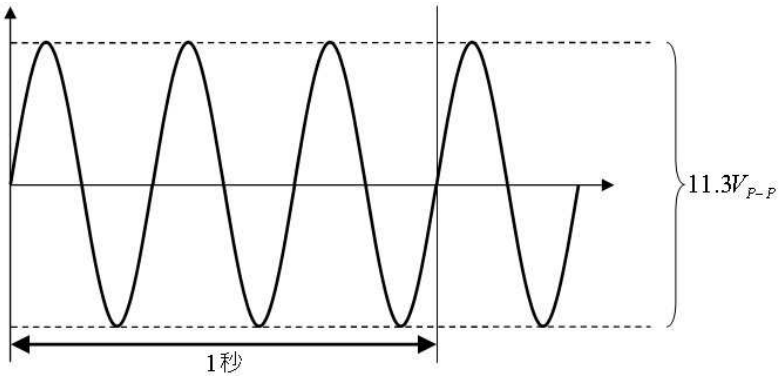
4.2. 答



周波数［　６　］Ｈｚ、最大電圧［　２．８２　］Ｖ、最小電圧［－２．８２］Ｖ、Ｐ－Ｐ電圧［　５．６４　］V_{P-P}

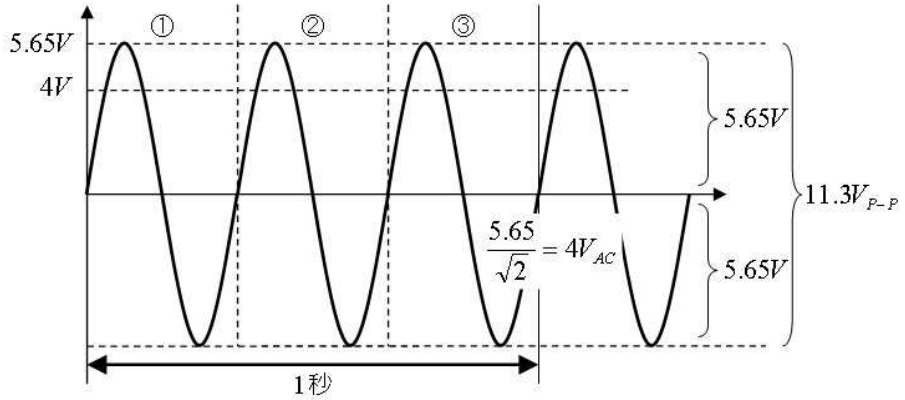
4.3. 練習（交流の周波数と電圧２）

下図は１１．３V_{P-P}の交流です。この交流の、周波数、最大電圧、最小電圧、交流の電圧を答えてください。



周波数［　　］Ｈｚ、最大電圧［　　］Ｖ、最小電圧［　　］Ｖ、交流の電圧［　　］V_{AC}

4.4. 答



周波数［　３］Ｈｚ、最大電圧［５．６５］Ｖ、最小電圧［－５．６５］Ｖ、交流の電圧［　４Ｖ］V_{AC}

5. 交流電圧や電流の計算

交流電圧には、最大電圧や交流電圧、Ｐ－Ｐ（ピーピー）電圧という複数の示し方があります。電流も同様です。電圧や電流を計算する場合は、同じ示し方に統一して計算します。例えば、

$$\frac{10V_{P-P}}{2\Omega} = 5A_{P-P}$$

$$5A_{AC} \times 2\Omega = 10V_{AC}$$

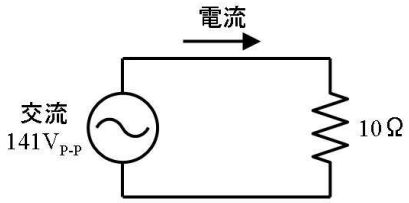
という感じです。ですから、

$$\frac{10V_{AC}}{2\Omega} = 5A_{P-P}$$ ←誤り

は間違いです。

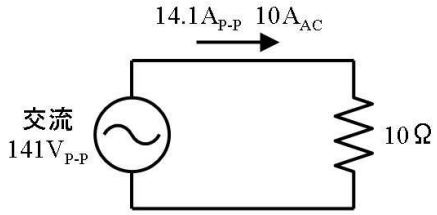
5.1. 練習（電圧と電流の単位）

下図の回路に流れるＰ－Ｐ電流と、ＡＣ電流を求めてください。



Ｐ－Ｐ電流［　　］、ＡＣ電流［　　］

5.2. 答

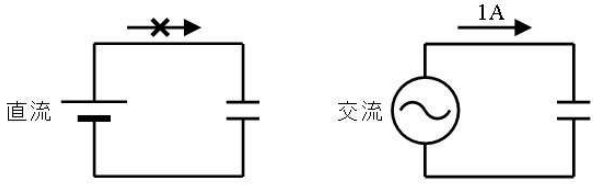


Ｐ－Ｐ電流 １４．１A$_{P-P}$、ＡＣ電流 １０A$_{AC}$

Ｐ－Ｐ電流は、（同じ仲間の）Ｐ－Ｐ電圧から直接求めることができます。ＡＣ電流はＰ－Ｐ電流を√２で割って求めます。

6. 交流の「流れ難さ」と「流れ易さ」

抵抗には、直流を加えても、交流を加えても、同じ大きさの電流が流れます。しかし、下図のコンデンサは、直流では電流は流れませんが、交流なら電流が流れます。このため、交流の「流れ難さ」や「流れ易さ」は、交流を使って測定し、直流で測定したもの（「抵抗」や「コンダクタンス」）と区別する必要があります。



そこで、下表に示すとおり、交流で測定した「流れ難さ」や「流れ易さ」を「インピーダンス」や「アドミタンス」と呼びます。

信号	直流		交流	
分類	流れ難さ	流れ易さ	流れ難さ	流れ易さ
名前	抵抗	コンダクタンス	インピーダンス	アドミタンス
単位	Ω（オーム）	S（ジーメンス）	Ω（オーム）	S（ジーメンス）
例	４Ω	０．２５S	４Ω	０．２５S
求め方	$\frac{電圧}{電流}$	$\frac{電流}{電圧}$	$\frac{電圧}{電流}$	$\frac{電流}{電圧}$

抵抗の逆数がコンダクタンスになったように、インピーダンスの逆数がアドミタンスになります。

6.1. 練習

下表の空欄部をに適切な内容を記入し、直流・交流の何れかと、流れ易さ・流れ難さの何れかを選んで下さい。

	抵抗	コンダクタンス	アドミタンス	インピーダンス
単位				
単位の呼び方				

求め方				
交直の別	直流・交流	直流・交流	直流・交流	直流・交流
流れの難易	易さ・難さ	易さ・難さ	易さ・難さ	易さ・難さ

6.2. 答

	抵抗	アドミタンス	インピーダンス	コンダクタンス
単位	Ω	S	Ω	S
単位の呼び方	オーム	ジーメンス	オーム	ジーメンス
求め方	$\frac{\text{電圧}}{\text{電流}}$	$\frac{\text{電流}}{\text{電圧}}$	$\frac{\text{電圧}}{\text{電流}}$	$\frac{\text{電流}}{\text{電圧}}$
交直の別	[直流]・交流	直流・[交流]	直流・[交流]	[直流]・交流
流れの難易	易さ・[難さ]	[易さ]・難さ	易さ・[難さ]	[易さ]・難さ

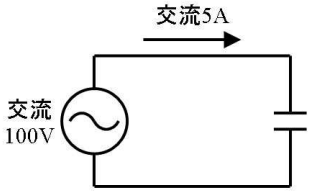
7. 交流とオームの法則

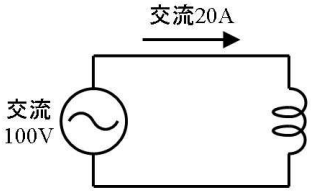
オームの法則は交流でもそのまま使えます。回路に加わる電圧を、回路に流れた電流で割れば、インピーダンスの大きさ（しばらくは、単に「インピーダンス」と呼びます）を求めることができます。

（交流の）インピーダンスには（直流の）抵抗とは違う、不思議な性質もありますが、この点は後で説明するとして、先ずは、直流と同じように考えることができる「インピーダンスの大きさ」について説明します。

7.1. 練習（交流とオームの法則）

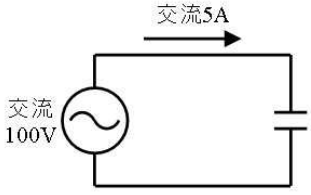
下図の回路の、コンデンサとコイルのインピーダンスを求めてください。

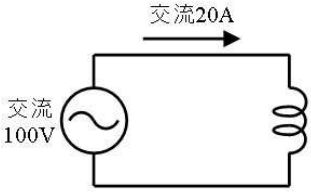




コンデンサ［　　］Ω　　コイル［　　］Ω

7.2. 答



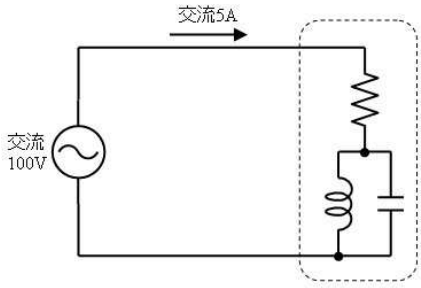


$\frac{100V}{5A} = 20\Omega$　　$\frac{100V}{20A} = 5\Omega$

コンデンサ［２０］Ω　　コイル［５］Ω

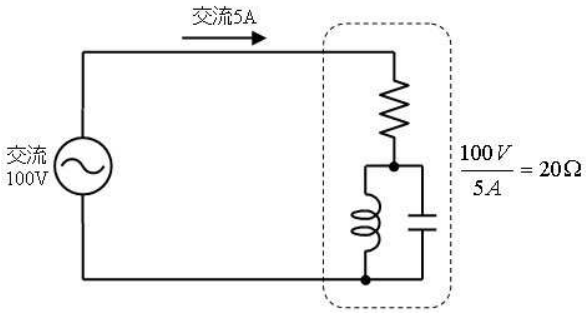
7.3. 練習（複雑な回路のインピーダンス）

下図の回路の点線で囲んだ部分のインピーダンスとアドミタンスを求めてください。



インピーダンス［　　］Ω、アドミタンス［　　］S

7.4. 答



インピーダンス［　２０　］Ω、アドミタンス［０．０５］S

回路の内部が複雑なものであっても、加えた電圧と流れた電流からインピーダンスを求めることができます。

8. ＬＣのインピーダンスとアドミタンス

部品店に行って「１０Ωのコンデンサを下さい」と言っても、「それは抵抗でしょう」と笑われるだけです。コンデンサをインピーダンスを（１０Ω等と）を指定して購入できないのは、同じ大きさのコンデンサでも周波数が変わるとインピーダンスが変わってしまうからです。コイルも同様です。

ですから、コイル（Ｌ）とコンデンサ（Ｃ）のインピーダンス（流れ難さ）やアドミタンス（流れ易さ）は、先に周波数を決めてから、コイルやコンデンサの大きさを元に計算する必要があります。

計算の方法を下表に示します。表中のＬは、コイルの大きさ[H]（ヘンリー）、Ｃはコンデンサの大きさ[F]（ファラド）、ｆは使用する周波数[Ｈｚ]です。

周波数とインピーダンス

	インピーダンス 交流の通し難さ	アドミタンス 交流の通し難さ
コンデンサＣ	$Z_C = \frac{1}{2\pi fC}$ [Ω] =1/2/PI()/F1/C1	$Y_C = 2\pi fC$ [S] =2*PI()*F1*C1

コイルL	$Z_L = 2\pi fL\ [\Omega]$ =2*PI()*F1*L1	$Y_L = \frac{1}{2\pi fL}[S]$ =1/2/PI()/F1/L1

例えば、周波数ｆ＝３１８Ｈｚ、コイルの大きさＬ＝１０ｍＨ（０．０１Ｈ）の場合、コイルのインピーダンス（交流の流れ難さ）Z_Lは

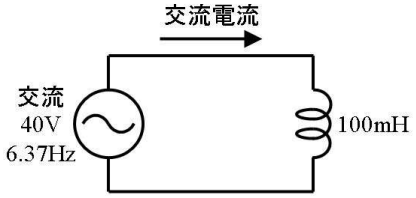
$Z_L = 2\pi fL = 2 \times 3.14 \times 318 \times 0.01 = 20[\Omega]$

=2*PI()*318*10E-3

と計算します。

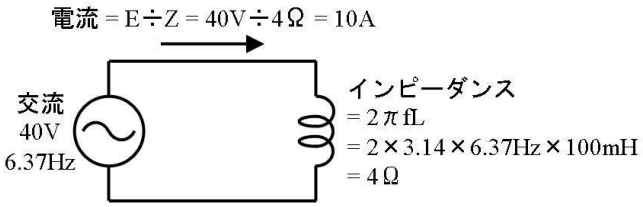
8.1. 練習（インピーダンスの大きさ）

コイルのインピーダンスと、回路に流れる交流電流を求めてください。ただし交流の周波数は６．３７Ｈｚとします。



インピーダンス［　　］Ω、回路に流れる交流電流［　　］A

8.2. 答



インピーダンス［　４　］Ω、回路に流れる交流電流［　１０］A

５．交流回路（周波数が一定の場合）前編

１．交流回路の知識は必要か

交流回路の知識（交流理論）なんて知らなくても、色々な電子回路が作れます。特にオペアンプを使った低周波の回路やマイコンを中心にした回路では、交流理論の知識はあまり必要ではありません。そのような場合は本章を読み飛ばして、一気に「アナログ回路入門」に進めば良いでしょう。

しかし、例えば無接点給電回路などのコイルや共振を利用する工作や、フィルタ、高周波を扱う工作では交流理論の知識が必要になります。また、マイコンを利用した制御装置では、交流理論を発展させた制御理論の知識が役立ちます。つまり、交流理論が分っていると「ちょっと輝く電子工作」が作れるようになります。

ところが、学校の教科書の交流理論は「正確すぎて分り難い」ため、（交流理論の理解は諦めて）交流理論が必要ない範囲で電子工作を楽しんでおられる方も多いと思います。

これに対して、学校の教科書に懲りて交流理論を諦めた方にも理解頂けるように工夫しています。「不正確でも分かり易い」説明を徹底し、身近な「たとえ話」を多用して、交流の振る舞いが感じられるように説明しています。

本書の不正確な説明であっても、それで一旦理解してしまえば勝ちで、大学の教科書だって「ああ、あの事か」「こんな事を、よくもまあ、こんなに難しく書いたもんだなぁ…」とスラスラ読めるようになります。

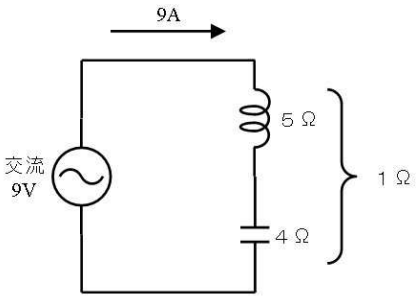
２．不思議な現象と交流理論の世界

さてここまでは、インピーダンスを使って、交流回路でも、直流回路と同様にオーム則が使える事を説明して来ました。

しかし、交流独特の不思議な現象も発生します。例えば、下図の回路では、５Ωのコイルと、４Ωのコンデンサを直列に繋いだところ、全体として１Ωとなり、９Ｖの交流を加えたら、９Ａもの電流が流れました。

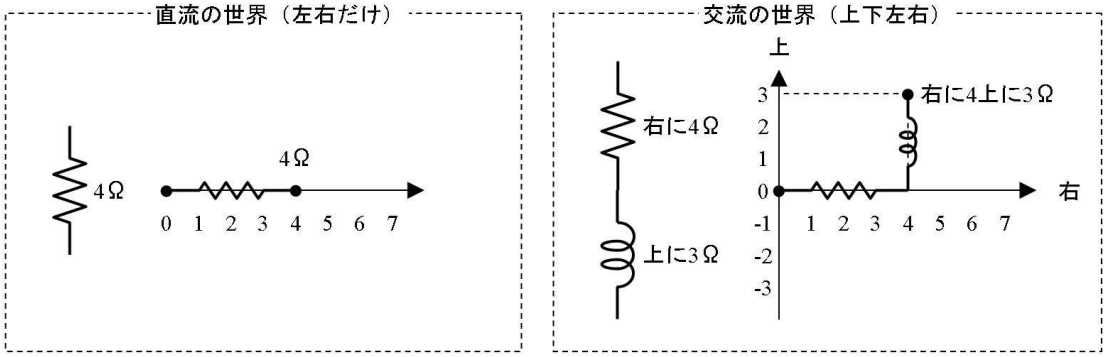
５Ωも、４Ωも、「通し難さ」なのに、２つ直列にすると、逆に「流れ易くなる」という不思議な現象が起きています。

ここで「直列回路のインピーダンスは $\sqrt{R^2+(Z_L-Z_C)^2}$ だから…」と理由を考えずに公式を持ち出しては先々応用が利かなくなってしまいます。それでは「公式を覚えているだけ」で、インピーダンスの正体を感じた事にはならないからです。（電子工作に応用して、面白い回路を発想するには「正体を感じる」事が大切です）



これまで考えてきた「インピーダンス（の大きさ）」だけではこの問題は解決できません。これから説明する交流理論は、このような不思議な現象を分り易く解決するための分野です。

まず、交流理論の基本の考え方を、直流理論と比較して説明します。直流理論では下図左側の通り、例えば「４Ω」のように、１つの値で「流れ難さ」を表します。しかし、交流理論では同じ「流れ難さ」を、下図右側の通り「右に４Ωで、上に３Ω」のように、２つの値で表します。



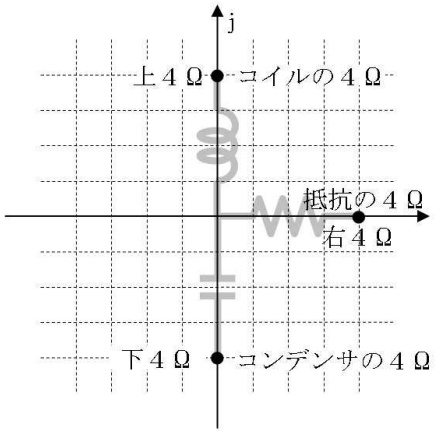
上図を見れば分るように、直流では「左右」（直線）しか無かった世界が、交流では「上下と左右」（平面）になります。ちょっとややこしくなりそうですが心配はありません。交流理論の世界は（平らな面の上の話なので）、図に書いて、目で見て確認できますから、簡単に理解できます。

交流理論の得意分野

交流理論は予め周波数が決まっている交流が得意です。たとえば放送局の電波や、コンセントに届けられる電力は周波数が決められていて、大きく変わることがありませんから、交流理論が得意な分野です。さらに、オーディオ信号のように複雑な信号であっても、沢山の交流が合わさったものと考えて、交流理論を応用して扱うことができます。逆に交流の強さや周波数が素早く変動するような回路は、交流理論には苦手な分野です。

３. 抵抗、コイル、コンデンサを区別する

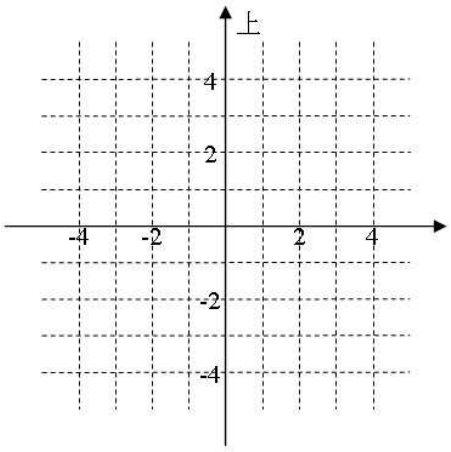
抵抗、コイル、コンデンサのインピーダンスは、何れも単位が「Ω」なので、一見同じ物に見えます。しかし部品の種類が違いますから、それぞれ別の性質がある筈です。そこで、方向で区別して、間違えないように工夫します。



上図のとおり、例えば、抵抗は右向きに４Ω、コイルは上向きに４Ω、コンデンサは下向きに４Ωと方向付きのインピーダンスで表現します。

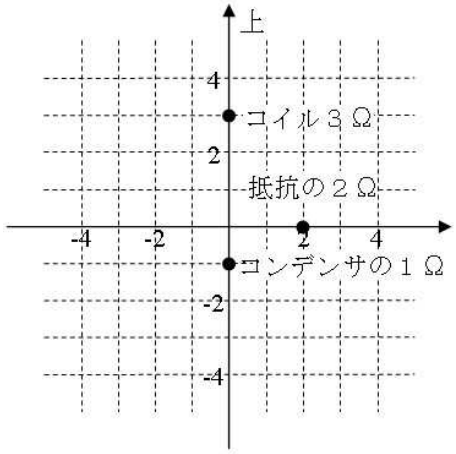
３.１. 練習（インピーダンスの方向）

抵抗の２Ω、コイルの３Ω、コンデンサの１Ωのインピーダンスを、下図のグラフに書き込んで下さい。また、「上５Ω」のように、方向を示してインピーダンスを答えてください。



抵抗[　　]Ω、コイル[　　]Ω、コンデンサ[　　]Ω

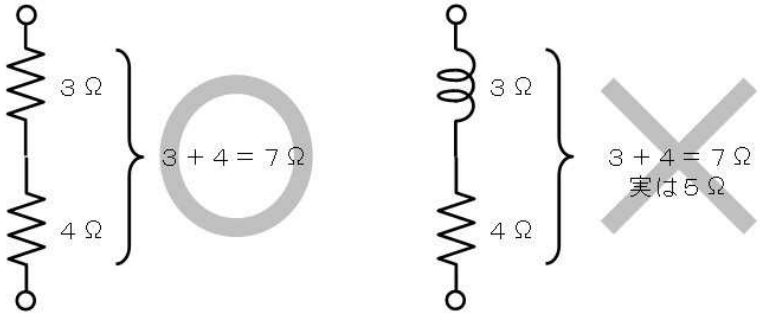
3.2. 答



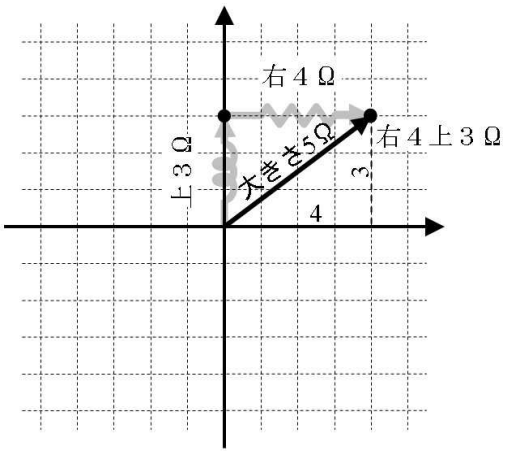
抵抗[右２]Ω、コイル[上３]Ω、コンデンサ[下１]Ω

4. 直列合成インピーダンス

下図左側のように、例えば３Ωと４Ωの抵抗を直列に繋ぐと、７Ωになりました。ところが、（既に述べた交流の不思議な現象によって）下図右側のように、インピーダンス３Ωのコイルと４Ωの抵抗を繋いでも、７Ωにはならず、５Ωになってしまいます。



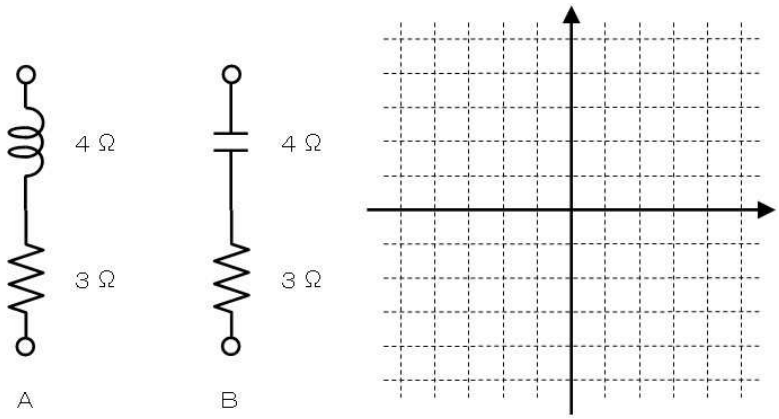
７Ωという誤った答が出たのは「方向を考えずに」インピーダンスを合計したからです。つまり、下図のようにインピーダンスの方向を考えて合計すると、正しく５Ωを求めることができます。



つまり、図の中心から出発して、上に３Ω（コイル）進み、さらに、右に４Ω（抵抗）進めば、最初の出発点（図の中心）から５Ω離れた場所（右４と上３）に到着する、と考えます。

４.１. 練習（直列合成インピーダンス）

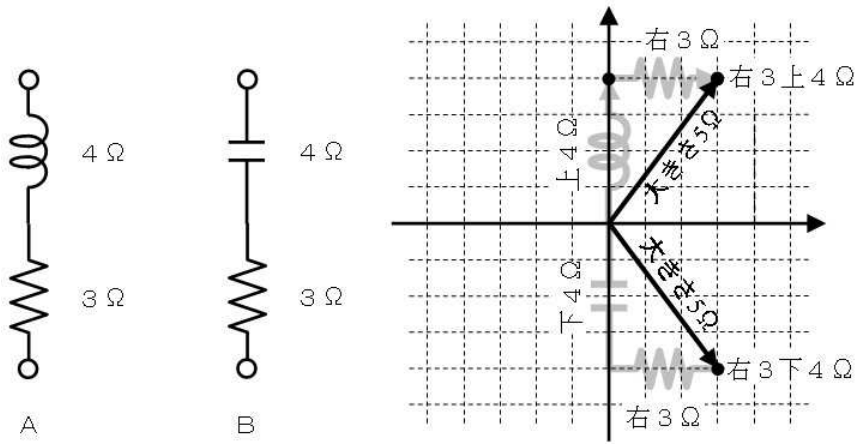
下図の２つの直列回路を、下図右側のグラフ上で方向を考慮して合計し、直列合成インピーダンスを方向付きで求めてください。



Ａの回路：方向付きインピーダンス　　と　　Ω、インピーダンスの大きさ　　Ω

Ｂの回路：方向付きインピーダンス　　と　　Ω、インピーダンスの大きさ　　Ω

４.２. 答



Ａの回路：方向付きインピーダンス　右3と上4　Ω、インピーダンスの大きさ　5　Ω

Ｂの回路：方向付きインピーダンス　右3と下4　Ω、インピーダンスの大きさ　5　Ω

5．複素インピーダンス（あるいは「鬼畜魔王」）

「複素インピーダンス」は交流理論に良く出てくる「実は簡単な癖に、名前だけ難しい奴」です。たとえば、「子犬」に「鬼畜魔王」と名前を付けると、名前だけ聞いた人は「恐ろしい奴に違いない」と誤解するでしょう。

交流理論が難しく感じられるのは、この「鬼畜魔王」的なネーミングの奴らが跳梁跋扈している上に、こともあろうに「鬼畜魔王」の名に相応しい、魔界チックなオドロオドロしい説明が展開されるからです。

例えば、（Ｗｉｋｉｐｅｄｉａより）

次の正弦信号 $s(t)$ を考える。

$$s(t) = A\sin(\omega t + \theta)$$

$s(t)$ は、オイラーの公式を使って、次のように書ける。

$$s(t) = \Im[S\exp(\mathrm{j}\omega t)] \qquad (1)$$

ここで、j は虚数単位、$S = A\ \exp(\mathrm{j}\theta)$ は絶対値が A で偏角が θ の複素数、$\Im[X]$ は複素数 X の虚部を表す。

このとき複素数 S を信号 $s(t)$ の**フェーザ表示**または**フェーザ**という[1]。

正確で短い素晴らしい記事ですが…本書の読者には「魔界チックなオドロオドロシイ説明」でしょう。いきなりこれを読んだら「フェーザは恐ろしい奴に違いない」と思うのは確実です。正弦信号、sin、オイラーの公式、複素数、虚数単位、絶対値、偏角、虚部、と鬼畜魔王の仲間達も跳梁跋扈しています。本書の「交流回路」を読み終えれば、上の説明が何を言いたいのか自然と分ります。

そこで本書では、名前はそのまま使いますが、説明は「子犬のお話」として、日常チックに説明します。（名前をそのまま使うのは、他人と回路の話をした時に、通じる方が楽しいからです）

今後も多数出没する「難しそうな名前の奴」は全て「名前だけ難しい奴」です。ですから「また鬼畜魔王が出たか…この子犬め！」と思ってナメて掛かってください。

さて、複素インピーダンスは、下表のとおり、「方向付きインピーダンス」の向きを「上」「下」と漢字で書く代わりに、「＋ｊ」「－ｊ」と記号で書いた物です。

方向付きインピーダンス表し方			
素子	抵抗	コイル	コンデンサ
漢字で書く	右４Ω	上４Ω	下４Ω
記号で書く （複素インピーダンス）	＋４Ω	＋ｊ４Ω	－ｊ４Ω

以上です。

5.1．練習（ＬＣの複素インピーダンス）

下表の複素インピーダンスを持つ素子が、それぞれ、コイル（Ｌ）、コンデンサ（Ｃ）、抵抗（Ｒ）のどれであるかを選択し、また、インピーダンスの方向を選んで下さい。

複素インピーダンス	素子の種類	インピーダンスの方向
４．７Ω	Ｌ・Ｃ・Ｒ	上・下・左・右
－ｊ６．８Ω	Ｌ・Ｃ・Ｒ	上・下・左・右
＋ｊ３．３Ω	Ｌ・Ｃ・Ｒ	上・下・左・右

5.2. 答（ＬＣの複素インピーダンス）

複素インピーダンス	素子の種類	インピーダンスの方向
４．７Ω	Ｌ・Ｃ・[R]	上・下・左・[右]
－ｊ６．８Ω	Ｌ・[C]・Ｒ	上・[下]・左・右
＋ｊ３．３Ω	[L]・Ｃ・Ｒ	[上]・下・左・右

6．ＬＣの複素アドミタンス

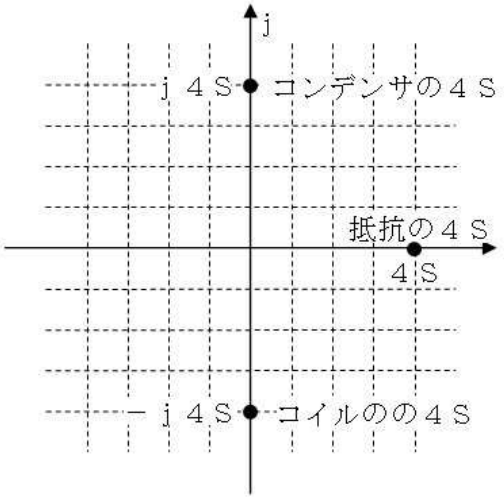
直流の場合と同様に、交流の流れ易さ（アドミタンス）は、交流の流れ難さ（インピーダンス）の逆数です。

例えば下表に示すとおり、上$\frac{1}{4}$Ωのコイルのアドミタンスは下４Ｓとなります。また、下$\frac{1}{4}$Ωのコンデンサのアドミタンスは上４Ｓとなります。

このように、インピーダンスは「コイルが上向き、コンデンサが下向き」でしたが、アドミタンスはその逆となり「コイルが下向き、コンデンサが上向き」となります。これは「逆数にすると上下が入れ代わる」性質があるからです。

名前	インピーダンス		アドミタンス
イメージ	交流の流れ難さ		交流の流れ易さ
コイル	上$\frac{1}{4}$Ω または ｊ$\frac{1}{4}$Ω	←逆数→	下４Ｓ または －ｊ４Ｓ
コンデンサ	下$\frac{1}{4}$Ω または －ｊ$\frac{1}{4}$Ω	←逆数→	上４Ｓまたは ｊ４Ｓ

それぞれ４Ｓの、コイル、抵抗、コンデンサのアドミタンス（通し易さ）を下図に示します。



6.1. 練習（ＬＣの複素アドミタンス）

下表のアドミタンスを持つ素子が、それぞれ、コイル（Ｌ）、コンデンサ（Ｃ）、抵抗（Ｒ）のどれであるかを選択し、また、アドミタンスの方向を選んで下さい。

複素アドミタンス	素子の種類	アドミタンスの方向

４．７Ｓ	Ｌ・Ｃ・Ｒ	上・下・左・右
－ｊ６．８Ｓ	Ｌ・Ｃ・Ｒ	上・下・左・右
＋ｊ３．３Ｓ	Ｌ・Ｃ・Ｒ	上・下・左・右

6.2. 答（ＬＣの複素アドミタンス）

複素アドミタンス	素子の種類	アドミタンス方向
４．７Ｓ	Ｌ・Ｃ・[Ｒ]	上・下・左・[右]
－ｊ６．８Ｓ	[Ｌ]・Ｃ・Ｒ	上・[下]・左・右
＋ｊ３．３Ｓ	Ｌ・[Ｃ]・Ｒ	[上]・下・左・右

6.3. 練習（ＬＣの複素インピーダンスとアドミタンス）

下表に記載の各素子の、複素インピーダンスと複素アドミタンスを記入し、方向を選んでください。

素子	１０Ωの抵抗	１０Ωのコイル	０．１Ωのコンデンサ
複素インピーダンス	[　　]Ω	[　　]Ω	[　　]Ω
複素インピーダンスの方向	上・下・左・右	上・下・左・右	上・下・左・右
複素アドミタンス	[　　]S	[　　]S	[　　]S
複素アドミタンスの方向	上・下・左・右	上・下・左・右	上・下・左・右

6.4. 答

素子	１０Ωの抵抗	１０Ωのコイル	０．１Ωのコンデンサ
複素インピーダンス	[　１０]Ω	[＋ｊ１０]Ω	[－ｊ０．１]Ω
複素インピーダンスの方向	上・下・左・[右]	[上]・下・左・右	上・[下]・左・右
複素アドミタンス	[　０．１]S	[－ｊ０．１]S	[＋ｊ１０]S
複素アドミタンスの方向	上・下・左・[右]	上・[下]・左・右	[上]・下・左・右

7．ＬＣの複素インピーダンス・アドミタンスの計算

コイルやコンデンサの複素インピーダンスは、次表のように計算できます。インピーダンス（の大きさ）の計算の前に、ｊやー ｊを付けて、方向を表しただけです。

	複素インピーダンス	複素アドミタンス
コイルL	$Z_L = +j2\pi fL\ [\Omega]$ [=COMPLEX(0,2*PI()*F1*L1)]	$Y_L = -j\frac{1}{2\pi fL}[S]$ [=COMPLEX(0,-1/2/PI()/F1/L1)]

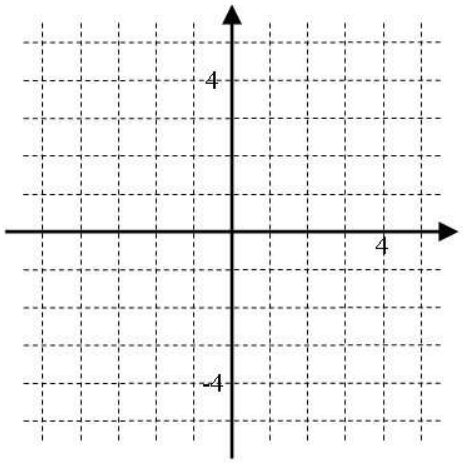
コンデンサC	$Z_C = -j\frac{1}{2\pi fC}[\Omega]$ =COMPLEX(0,-1/2/PI()/F1/C1)	$Y_C = +j2\pi fC\ [S]$ =COMPLEX(0,2*PI()*F1*C1)

例えば、ｆ＝３１８Ｈｚ、Ｌ＝１０ｍＨ（０．０１Ｈ）の場合、コイルのインピーダンスZ_Lは

Z_L＝ｊ２πｆＬ＝ｊ×３．１４×３１８×０．０１＝ｊ２０[Ω]（上向きの２０Ω）

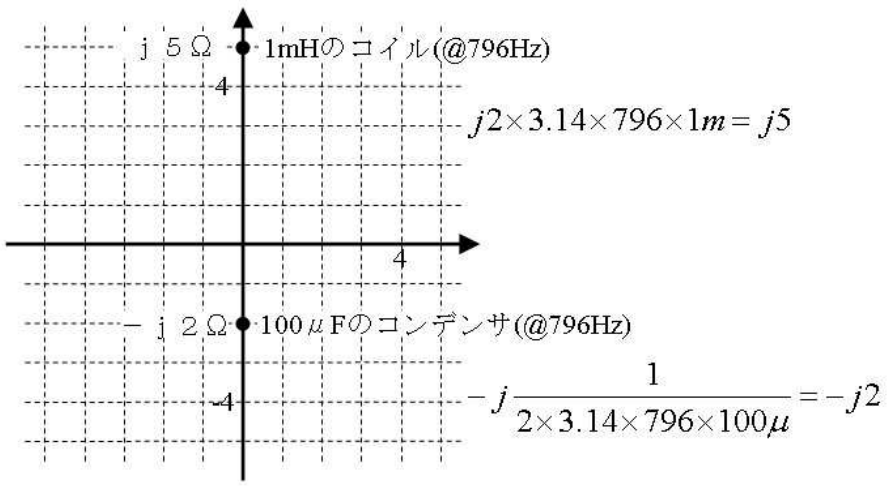
7.1. 練習

１ｍＨのコイルと、１００μＦのコンデンサの複素インピーダンスを求めて、下図に書き込んでください。ただし、周波数は７９６Ｈｚとします。



コンデンサの複素インピーダンス［　　］Ω、コイルの複素インピーダンス［　　］Ω

7.2. 答



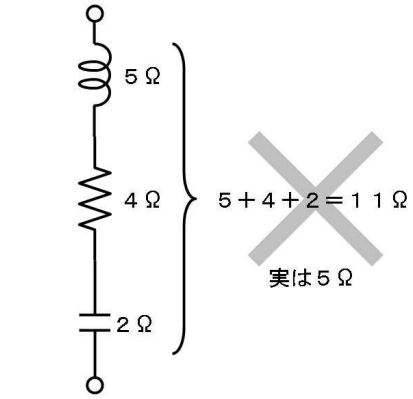
コンデンサの複素インピーダンス［　－ｊ２　］Ω、コイルの複素インピーダンス［　＋ｊ５　］Ω

8. ＬＣＲ直列回路

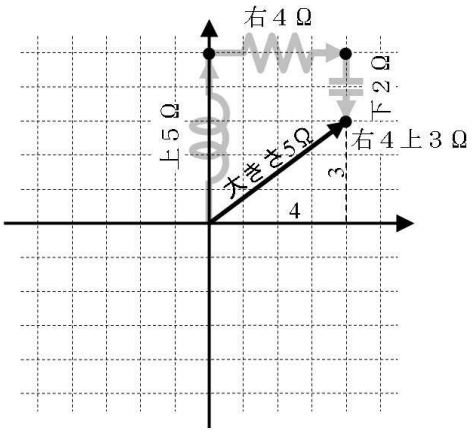
下図のように、コイルＬ、コンデンサＣ、抵抗Ｒを直列に繋いだ回路を「ＬＣＲ直列回路」と呼びます。（接続の順序が変わっても、全体の作用は同じです）この例では、５Ωのコイル、４Ωの抵抗、２Ωのコンデンサが接続されています。

さて、回路全体のインピーダンスを求めるために、抵抗と同様にインピーダンスを合計すると、５＋

４＋２＝１１Ωとなりますが、これは誤りで、実際には５Ωとなります。



このように、単純にインピーダンス（の大きさ）を合計しても正しい結果が得られないのは「インピーダンスの方向」を考えていなかったからでした。インピーダンスの方向は、コイルは上、抵抗は右、コンデンサは下でしたから、下図のように、方向を考えて地図の上で３つのインピーダンスを加えます。



最初にコイルは上に５Ωなので、中心から上に５つ進みます。次に、抵抗は右に４Ωなので、右に４つ進みます、最後に、コンデンサは下に２Ωなので、下に２つ進みます。この結果、上図に斜めの矢印で示すインピーダンス（右に４、上に３）がＬＣＲ直列回路の複素インピーダンスになります。

その結果、ＬＣＲ直列回路のインピーダンスの大きさ（出発地点からどれだけ離れたか）は、上図の斜め矢印の長さ（５Ω）となります。

図を描かずに考えるときは、上下を考慮して…

コイルと抵抗とコンデンサ
＝上５Ωと右４Ωと下２Ω
＝右４と（上５と下２）　　上下が打ち消しあって…
＝右４と上３Ω

あるいは「上」「下」の変わりに「＋ｊ」「－ｊ」を使って（複素インピーダンスとして）計算することもできます。

コイル＋抵抗＋コンデンサ
＝＋ｊ５Ω＋４Ω－ｊ２Ω
＝４＋（＋ｊ５－ｊ２）　　＋ｊと－ｊが打ち消しあって…
＝４＋ｊ３Ω

４と３が求まれば、次のように、ピタゴラスの定理で斜め部分の長さ（インピーダンスの大きさ）を

求めることができます。

Ｅｘｃｅｌで=SQRT(4^2+3^2)と入力して５Ω

複素インピーダンスを使っているときは、次のように「絶対値」という計算（Ｅｘｃｅｌなら IMABS 関数）で簡単に大きさを求めることができます。

※Ｅｘｃｅｌにちょっとした設定が必要です「Ｅｘｃｅｌで複素数を計算する」をご覧下さい

インピーダンスの大きさ

＝複素インピーダンスの絶対値

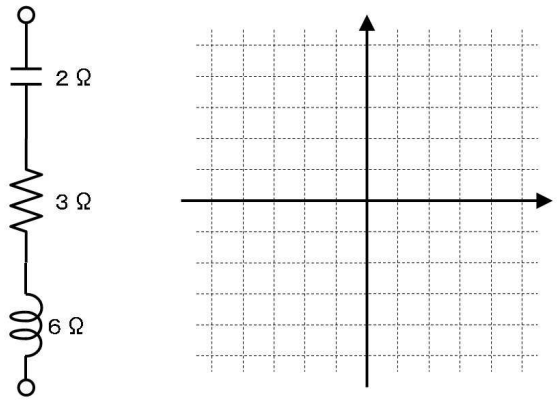
＝｜４＋ｊ３｜

Ｅｘｃｅｌで=IMABS("4+3i")と入力して、

＝５Ω

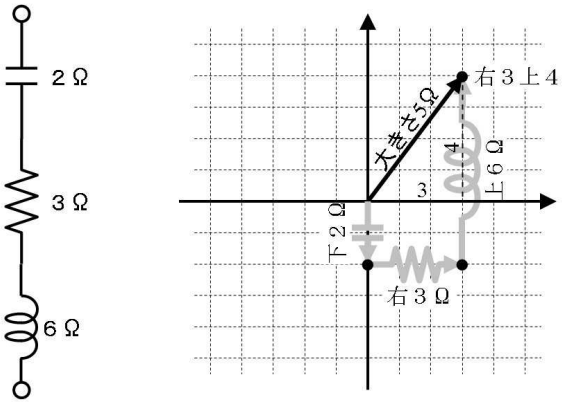
8.1. 練習（ＬＣＲ直列回路）

下図のＬＣＲ直列回路の合成インピーダンスを図を描いて求め、複素インピーダンスと、インピーダンスの大きさを答えてください。



複素インピーダンス［　　］Ω、インピーダンスの大きさ［　　］Ω

8.2. 答

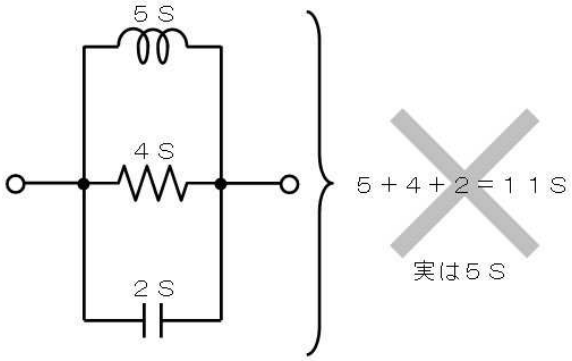


複素インピーダンス［ ３＋ｊ４ ］Ω、インピーダンスの大きさ［ ５ ］Ω

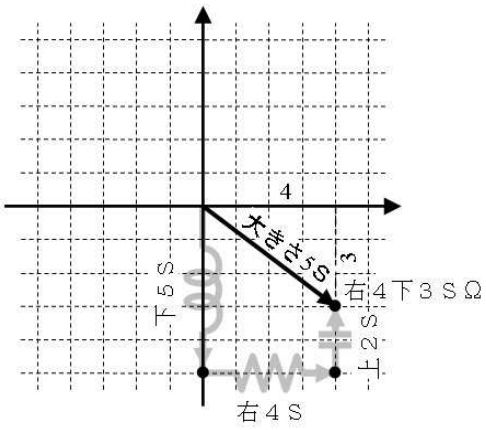
9. ＬＣＲ並列回路

下図のように、コイルＬ、コンデンサＣ、抵抗Ｒを並列に繋いだ回路を「ＬＣＲ並列回路」と呼びます。（接続の位置が変わっても、全体の作用は同じです）この例では、５Ｓのコイル、４Ｓの抵抗、２Ｓのコンデンサが接続されています。（並列なので「通し易さ」で考えています）

さて、回路全体のアドミタンス（交流の通りやすさ）を求めるために、抵抗と同様にアドミタンスを合計すると、５＋４＋２＝１１Ｓとなりますが、これは誤りで、実際には５Ｓとなります。



このように、単純にアドミタンス（の大きさ）を合計しても正しい結果が得られないのは「アドミタンスの方向」を考えていなかったからでした。アドミタンスの方向は、コイルは下、抵抗は右、コンデンサは上でしたから、下図のように、方向を考えて地図の上で３つのインピーダンスを加えます。



最初にコイルは下に５Ｓなので、中心から下に５つ進みます。次に、抵抗は右に４Ωなので、右に４つ進みます、最後に、コンデンサは上に２Ｓなので、上に２つ進みます。この結果、上図に斜めの矢印で示すアドミタンス（右に４、下に３）がＬＣＲ並列回路の複素アドミタンスになります。

その結果、ＬＣＲ直列回路のアドミタンスの大きさ（出発地点からどれだけ離れたか）は、上図の斜め矢印の長さ（５Ｓ）となります。

図を描かずに考えるときは、上下を考慮して…

下５Ｓと右４Ｓと上２Ｓ

＝右４と下３Ｓ

あるいは「上」「下」の変わりに「＋ｊ」「－ｊ」を使って（複素アドミタンスとして）計算することもできます。

－ｊ５Ｓ＋４Ｓ＋ｊ２Ｓ

＝４－ｊ３Ｓ

４と３が求まれば、次のように、ピタゴラスの定理で斜め部分の長さ（インピーダンスの大きさ）を求めることができます。

Ｅｘｃｅｌで=SQRT(4*4+3*3)と入力して５Ｓ

複素アドミタンスを使っているときは、次のように「絶対値」という計算（Ｅｘｃｅｌなら IMABS 関数）で簡単に大きさを求めることができます。

※Ｅｘｃｅｌにちょっとした設定が必要です「Ｅｘｃｅｌで複素数を計算する」をご覧下さい

｜４－ｊ３｜

=IMABS("4-3i)

＝５Ｓ

素子の値がアドミタンス［Ｓ］ではなく、インピーダンス［Ω］で分っているときは、まず逆数にしてアドミタンスに変換し、その後加えて並列接続した値を求めます。この答はアドミタンスで出てきますから、答をインピーダンスで出すときは、再度逆数にします。

つまり、並列合成複素インピーダンスの計算は、並列合成抵抗と同じで、

$$\dot{Z} = \frac{1}{\frac{1}{\dot{Z}_1} + \frac{1}{\dot{Z}_2} + \frac{1}{\dot{Z}_3}}$$

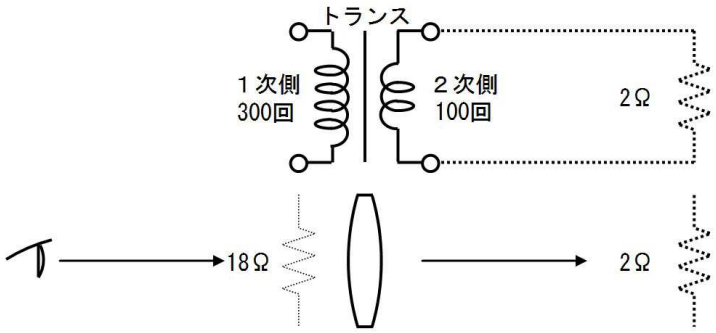
=IMDIV(1,IMSUM(IMDIV(1,Z1),IMDIV(1,Z2),(MDIV(1,Z3)))

と計算します。

１０．トランス

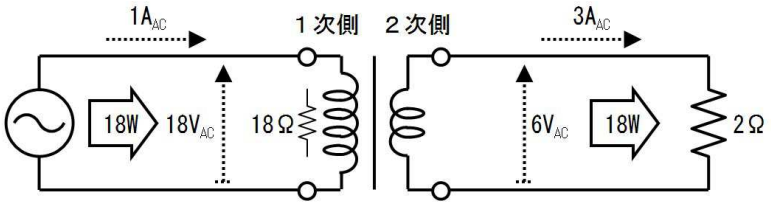
トランスは、一つの鉄心（コア）に２つ（以上）のコイルを巻いた部品で、下図上側のように、向かい合ったコイルの図記号で示します。図記号の中央の縦棒は鉄心を表しています。

このように、図記号がコイルと似ており、構造もコイルと同じですが（導線を巻き付けた部品ですが）、トランスの働きはコイルとはまるで異なり、理想的なトランスにはコイル成分（インダクタンス）がありません。



トランスはインピーダンスの虫眼鏡です。例えば上図のトランスの２次側に２Ωの抵抗を接続すれば１次側からは、まるで１８Ωの抵抗が接続されているように見えます。ですから、１次側に１８V_{AC}の電圧を加えると、１A_{AC}の電流が流れます。このとき２次側の２Ωの抵抗には、６V_{AC}の電圧が加わり、３A_{AC}の電流が流れています。

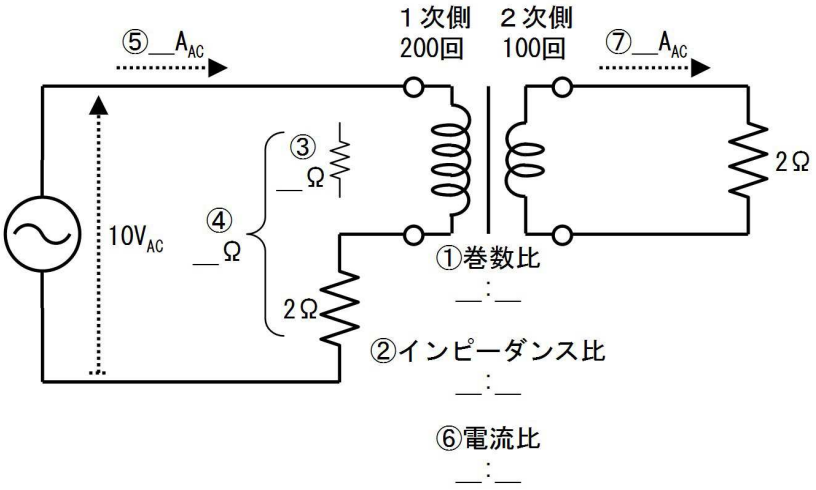
下図はトランスの電圧や電流を比較した図です。巻数が３：１なら、電圧も３：１となります。逆に電流は１：３となります。その結果、二次側に接続された２Ωの抵抗は、１次側からは（１８V_{AC}で１A_{AC}が流れるので）１８Ωに、つまり、９倍（巻数比^2＝３^2＝９倍）のインピーダンスに見えます。



巻数	300回:100回	
巻数比	3 : 1	
電力	18W : 18W	エネルギー保存の法則から、
電力比	1 : 1	電力は等しくなる。
電圧	$18V_{AC}$: $6V_{AC}$	電圧は巻数比と同じになる。
電圧比	3 : 1	
電流	$1A_{AC}$: $3A_{AC}$	電流は巻数比の逆になる。
電流比	1 : 3	
インピーダンス	18Ω : 2Ω	
インピーダンス比	9 : 1	インピーダンスの比は
	3^2 : 1^2	巻数比の二乗になる。

１０.１. 練習

下図は、１次側２００回で２次側１００回のトランスを使用した回路です。１次側には２Ωの抵抗を通じて１０V_{AC}の電圧を接続し、２次側に２Ωの負荷を接続しています。

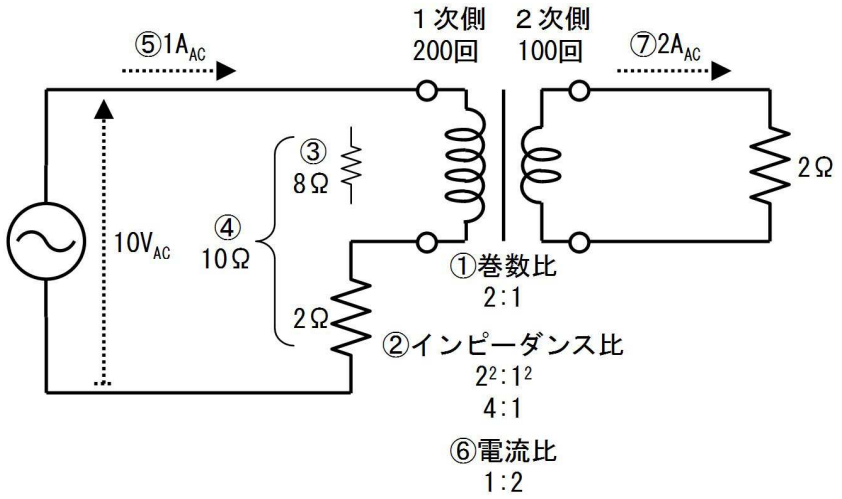


上図のトランスの１次側と２次側に流れる電流を、下表に記入しながら求めてください。

番号	質問	値
①	巻数比は、	:
②	インピーダンス比は、 （巻数比の二乗だから、）	:
③	２次側に接続された負荷の２Ωは、１次側からは何Ωに見えますか、	Ω
④	１次側のインピーダンスの合計は、	Ω
⑤	１次側の電流は、 （１次側の電圧は１０V_{AC}だから、）	A_{AC}

⑥	電流比は、	：
⑦	２次側の電流は、	A_{AC}

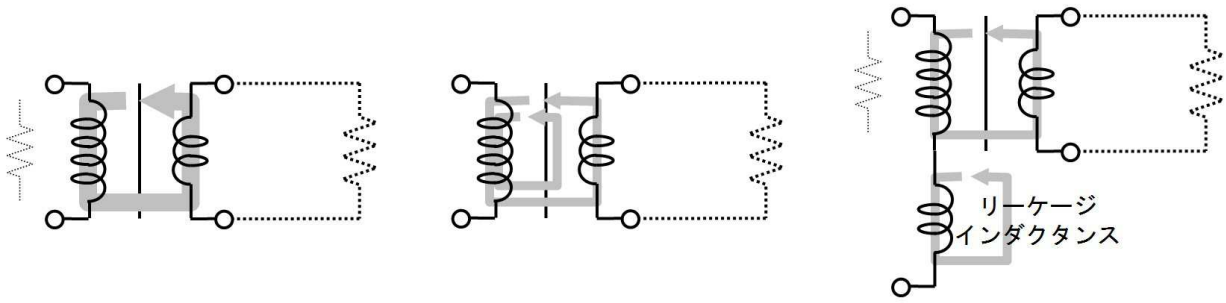
１０.２. 答



番号	質問	値
①	巻数比は、	２：１
②	インピーダンス比は、 （巻数比の二乗だから、）	４：１
③	２次側に接続された負荷の２Ωは、１次側からは何Ωに見えますか、	８Ω
④	１次側のインピーダンスの合計は、	１０Ω
⑤	１次側の電流は、 （１次側の電圧は１０V_{AC}だから、）	１A_{AC}
⑥	電流比は、	１：２
⑦	２次側の電流は、	２A_{AC}

１１. 漏れインダクタンス

下図（ａ）に示すとおり、理想的なトランスでは、２次側に抵抗を接続すれば、１次側からも抵抗に見えます。しかし、下図（ｂ）のように、１次側巻線で発生した磁気（磁束）が全て２次側巻線の中を通らない場合は、１次側から見るとコイルの成分（インダクタンス）が生じます。

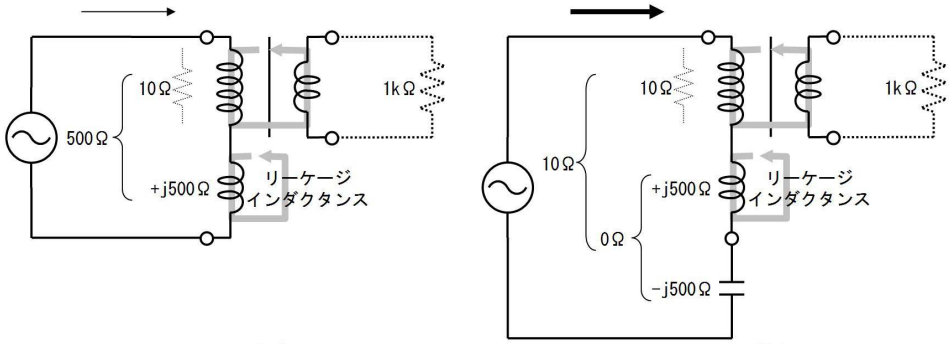


（ａ）　　（ｂ）　　（ｃ）

なぜなら、上図（ｃ）のように、（１次側巻線で発生し）２次側巻線を通った磁束はトランスとして働きますが、通らなかった磁束はコイルとして働くからです。

磁束が２次側の巻線に入らずに、漏れた分がコイルの成分（インダクタンス）を発生させたので、上図（ｃ）のコイル成分を「漏れインダクタンス」あるいは「リーケージインダクタンス」と呼びます。

無接点給電の１次側と２次側のように、磁束の大部分が２次巻線を通らない場合は、極めて大きな漏れインダクタンスが生じます。その結果、下図（ａ）に示すように、１次側巻線に電圧を加えても僅かな電流しか流れません。このような場合、下図（ｂ）に示すように、リーケージインダクタンスと同等な（インピーダンスの大きさを持つ）コンデンサを直流に接続することで、リーケージインダクタンスを打ち消して、１次巻線に電流を流すことができるようになります。

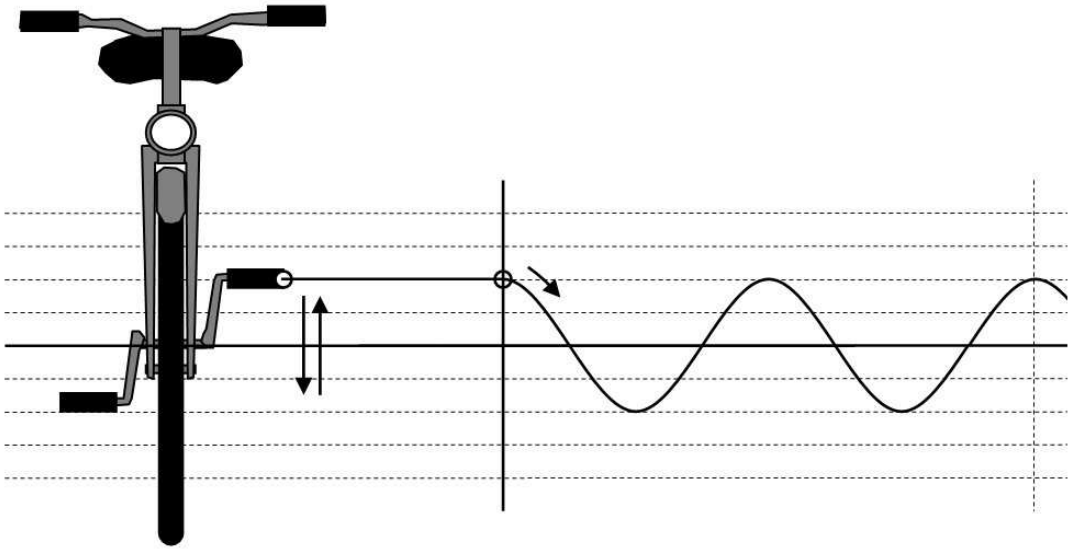


（ａ）　　（ｂ）

１２．交流と回転

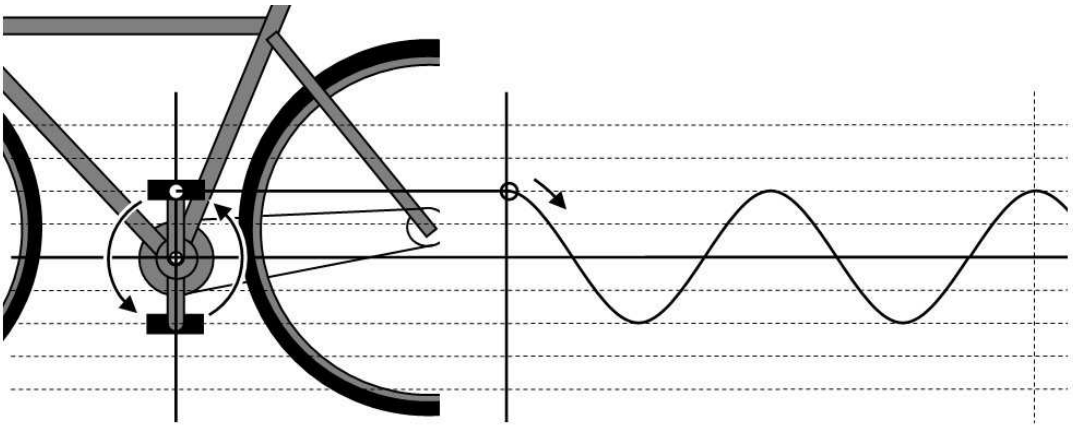
ここまで、コイルやコンデンサのインピーダンスを交流理論的に（平面上で）考えて来ました。ここからは、電流や電圧を交流理論的に（平面上で）考えてみます。

さて、走っている自転車を前から見ると、下図のように、ペダルが上下運動しているように見えます。ペダルの上下運動は、交流と全く同じ、単純な変化を繰り返します。



ペダルの上下運動は交流と同じ単純な変化

ところで、同じ自転車を横から見ると、下図のように、ペダルは上下しているのではなく、実は回転している事が分ります。

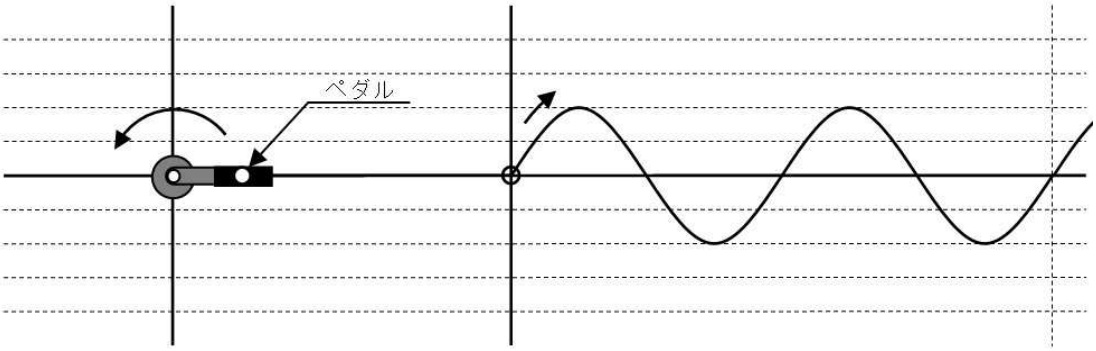


単純な変化はペダルの回転から生まれる

つまり、交流の正体は回転です。（交流の振動は、ペダルの回転を前から眺めたものです。）

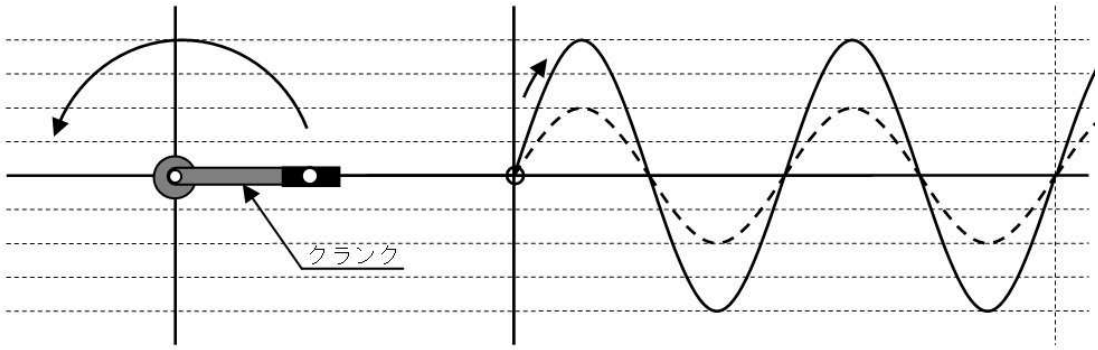
それでは、（交流の正体である）ペダルの回転を様々に変化させて、交流がどのように変化するか考えて見ましょう。

ここでは下図のように、ペダルは時計の３時の位置からスタートする事にします。ペダルは最初に上がり、次に下がります。その結果交流は、下図右側の波を描いて上下します。



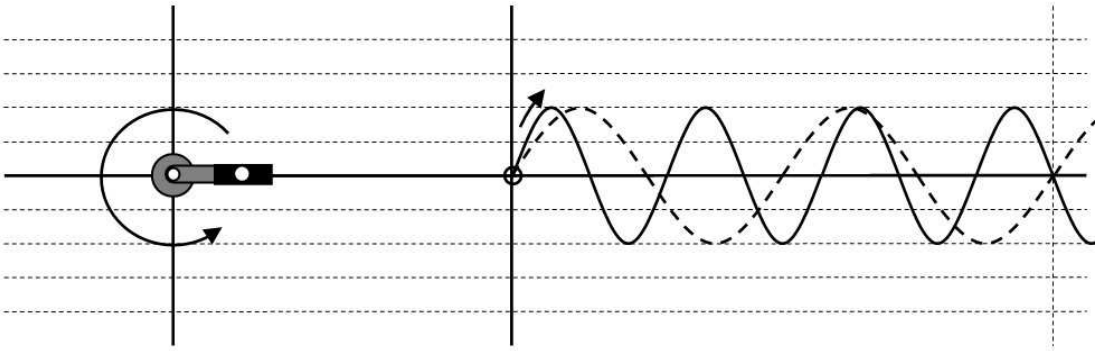
まず、下図のように、クランク（ペダルの付いている腕）が長いと、下図のように、大きな交流が生

まれます。



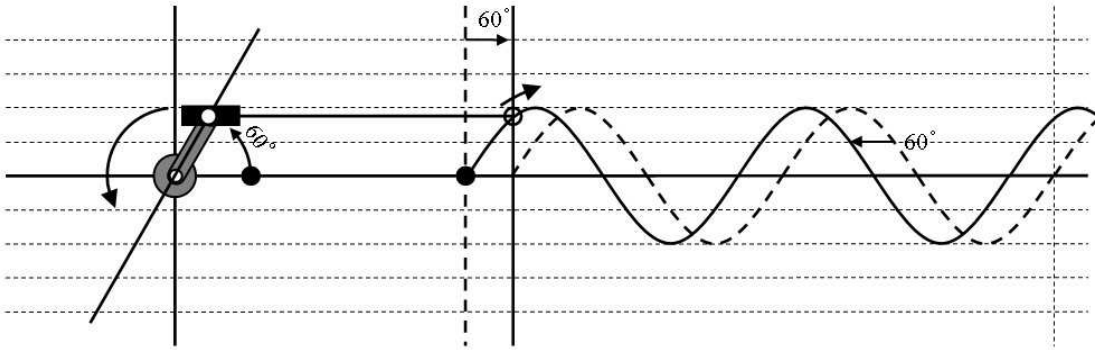
クランクの長さと交流の大きさ

また、下図のように、ペダルを早く回すと、周波数の高い交流が生まれます。



クランクの速さと交流の周波数

さらに、下図のように、ペダルの最初の位置が変わると、波がズレます。



ペダルを回すタイミングと交流のズレ（位相）

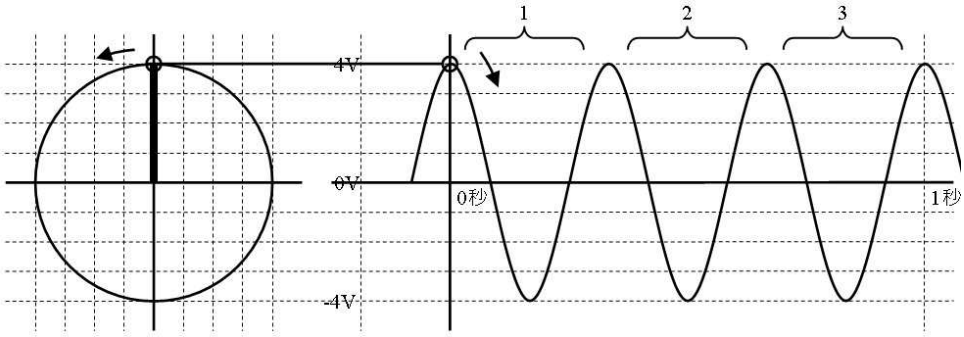
ペダルの最初に位置がキッチリ右向きの時を０°、上（反時計回り）にズレたらプラス（位相が進んでいる）、下（時計回り）にズレたらマイナス（位相が遅れている）と言います。上図の例では位相が６０°進んでいます。「位相」とは、ここでは「ペダルの最初の角度」という意味です。

このように、「交流は、クランクの長さ（大きさ）、最初の位置（位相）、回す早さ（周波数）の３つで表す事ができます」。つまり、上図左側のペダルの絵を書いて周波数を告げれば、上図右側の波の様子を書かなくても済むわけです。とても楽になるので、この方法が愛用されています。

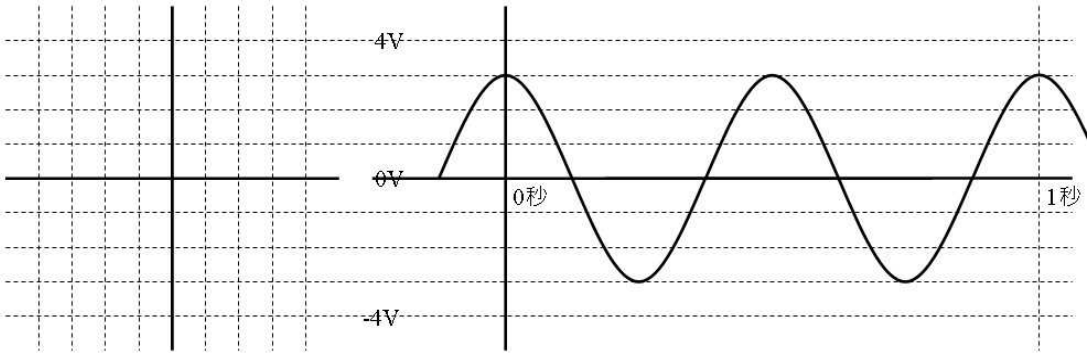
１２.１. 練習（大きさと周波数）

下図下側の交流に対応するペダルの最初の位置を、例に倣って書き込んでください。円の半径（最大電圧）は何ボルトですか。１秒にやって来る波の回数（周波数）は何ヘルツですか。

例

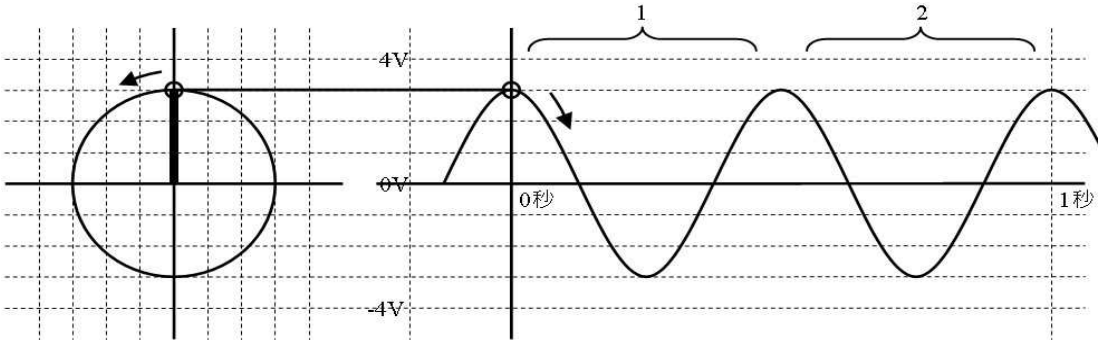


最大電圧（クランクの半径）４Ｖ　周波数（１秒にやって来る波の下図）３Ｈｚ



最大電圧（クランクの半径）［　　］Ｖ　周波数（１秒にやって来る波の下図）［　　］Ｈｚ

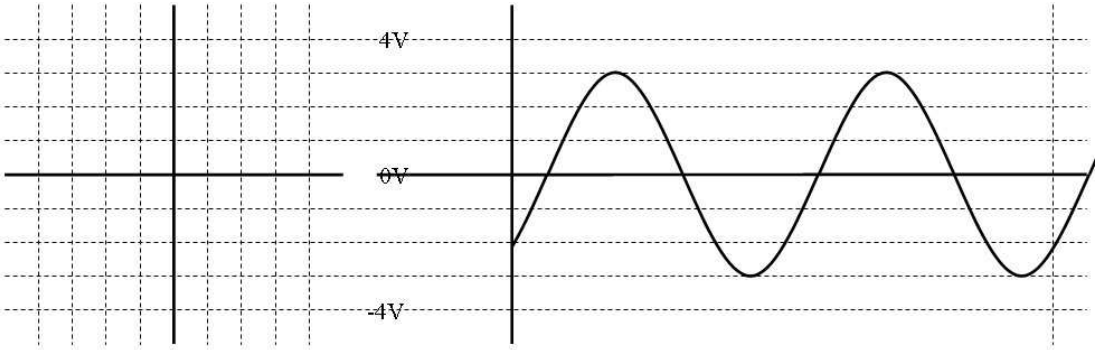
１２.２. 答



最大電圧（クランクの半径）［　３　］Ｖ　周波数（１秒にやって来る波の下図）［　２　］Ｈｚ

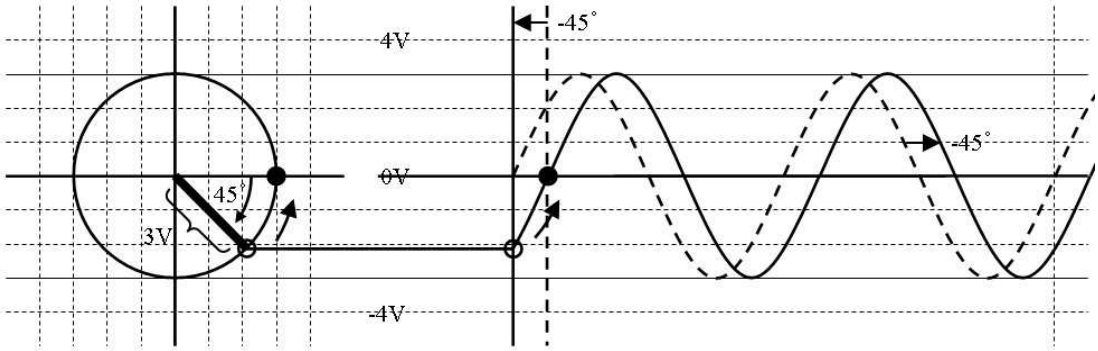
１２.３. 練習（位相）

下図の交流に対応するペダルの最初の位置を、書き込んでください。ペダルの最初の位置（位相）は真右向ききから何度ズレていますか。ズレはプラスですか、マイナスですか、それは、進んでいますか、遅れていますか。



角度のズレ（位相）　　度、プラス・マイナス、進んでいる・遅れている

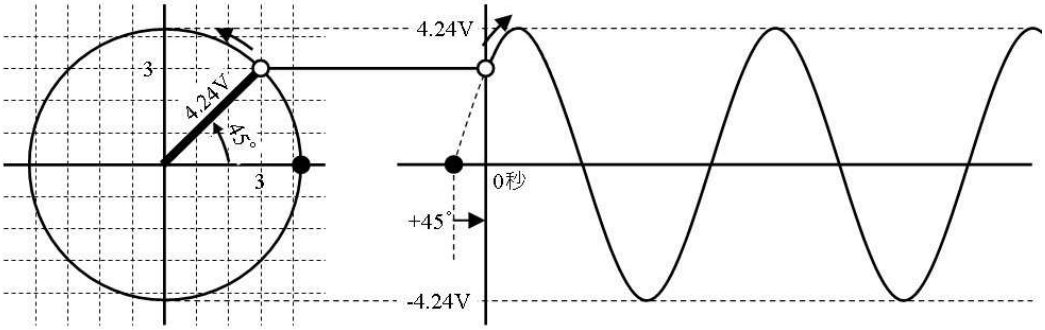
１２.４. 答



角度のズレ（位相）　４５　度、マイナス、遅れている

１３. フェーザ表示

「フェーザ表示」も、「名前だけ難しい奴」です。フェーザ表示とは、下図左側に示すとおり（これまで何度も練習した）「クランクの最初の位置（下図左）で交流を表したもの」です。



フェーザは図に描くだけではなく、下表のように、文字を使って書くこともできます。

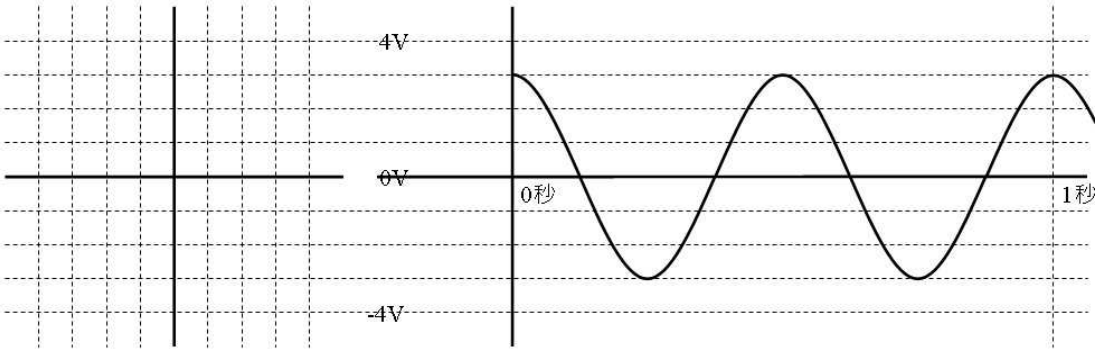
フェーザの書き方

大きさと角度	左右、上下	右を＋、上を＋ｊ
４．２４∠４５°	右３と上３	＋３、＋ｊ３

フェーザ表示は周波数を表していません。大きさとズレ（位相）だけを表しています。それなのに、交流の学問（交流理論）では良く使われます。その理由は、例えば、コンセントに供給される交流が５０Ｈｚや６０Ｈｚで一定であるように、最初から周波数が決まっている場合が多く、逆の言い方をすれば「大きさと位相だけ考えたい」場合が多いからです。

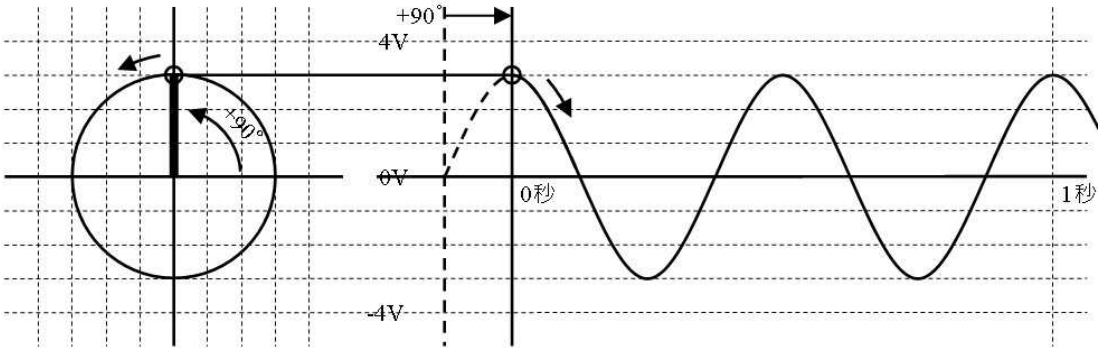
１３.１. 練習（大きさと位相１）

下図の交流の左側に、ペダルの最初の位置（フェーザ）を記入し、図の下に例えば４∠４５°Ｖのように、大きさと位相を記入してください。



フェーザの大きさと位相 [　　] Ｖ

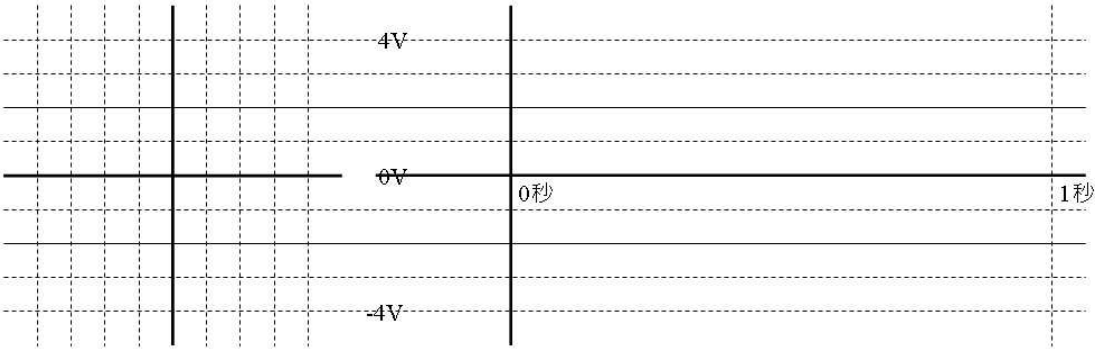
１３.２. 答



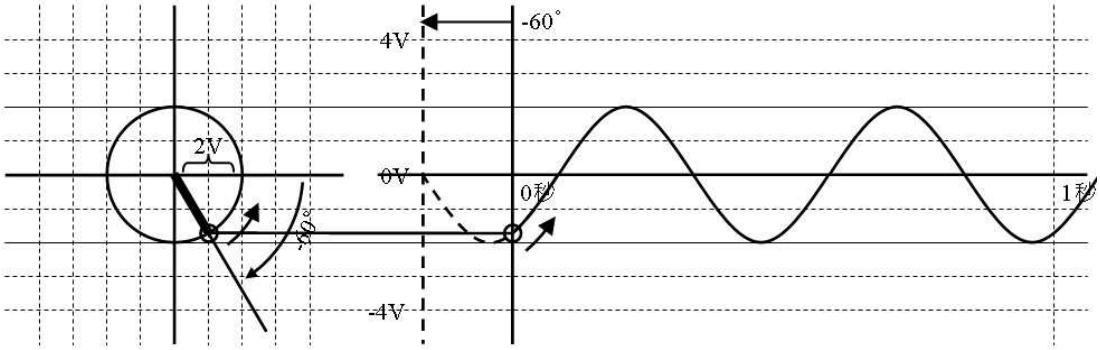
フェーザの大きさと位相 [３∠９０°] Ｖ

１３.３. 練習（大きさと位相２）

下図の左側に、フェーザ表示２∠－６０°Ｖのペダルの最初の位置を記入し、下図右側にその回転で生じる波形を記入してください。ただし、周波数は２Ｈｚとします。

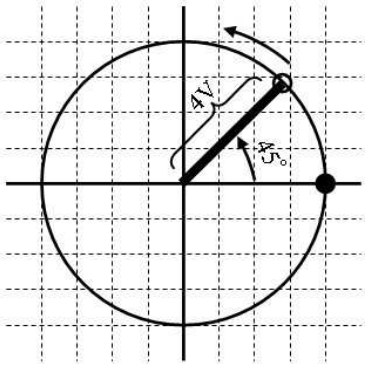


１３.４. 答



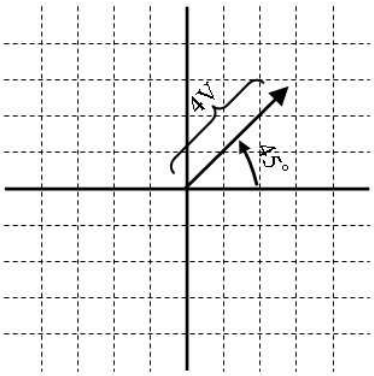
１４. フェーザの正体

ペダルが回転する様子を、下図のように描いて来ました。



ペダルが回転する様子

ところが、この図をもっと簡単に書くことができます。なぜなら、回転する方向は左回りと決まっているので、回転方向は不要、さらに、必ず円を描いて回転するので、回転を表す円は不要、このように不要な書き込みを省略すると、下図のように書くことができます。

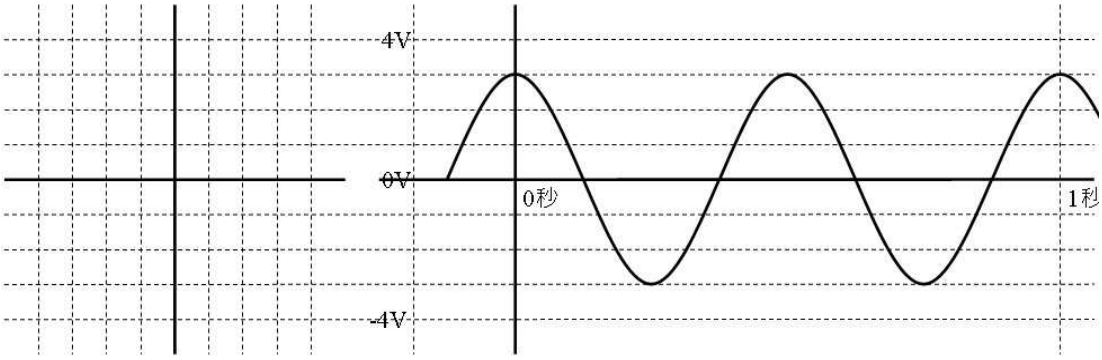


フェーザ

つまり、大きさと位相（最初の位置）の２つを表す矢印を一つ書けば交流を表すことができます。この矢印がフェーザの正体です。フェーザを図に描けば矢印になり、文字で書けば４∠４５°等となります。

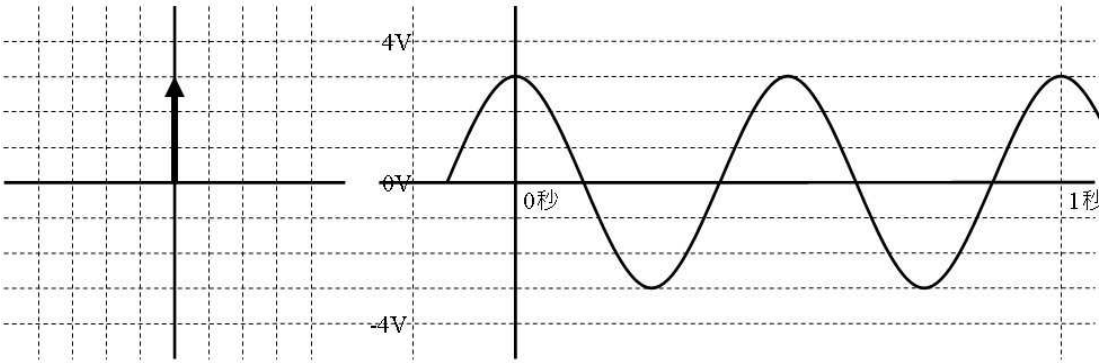
１４.１. 練習（フェーザ１）

下図右側に描かれた交流をのフェーザを、下図左側に矢印で記入し、図の下に大きさと位相を記入してください。



フェーザの大きさと位相［　　］V

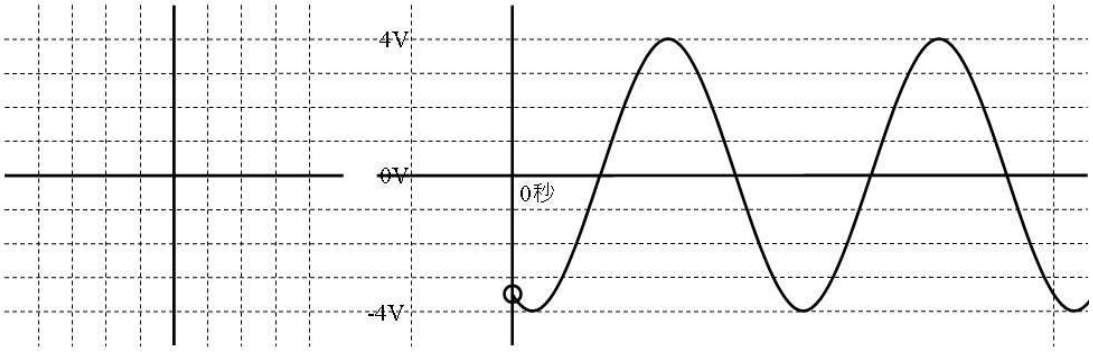
14.2. 答



フェーザの大きさと位相［ ３∠９０° ］V

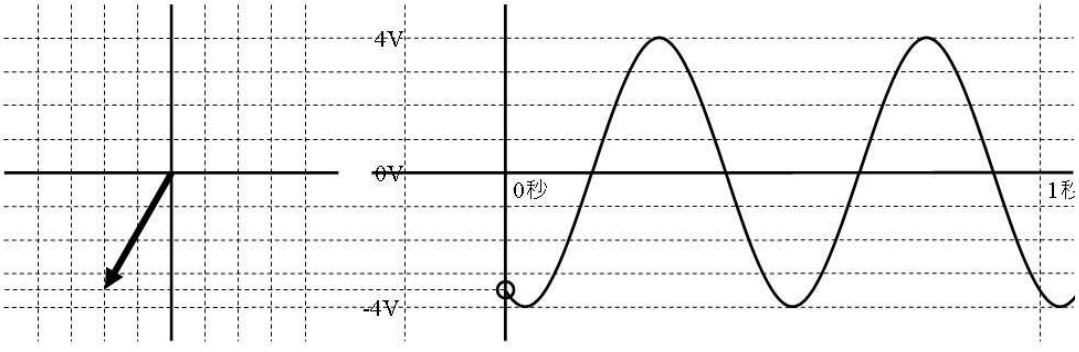
14.3. 練習（フェーザ2）

下図右側に描かれた交流のフェーザを、下図左側に記入し、図の下に大きさと位相記入してください。



フェーザの大きさと位相［　　］V

14.4. 答



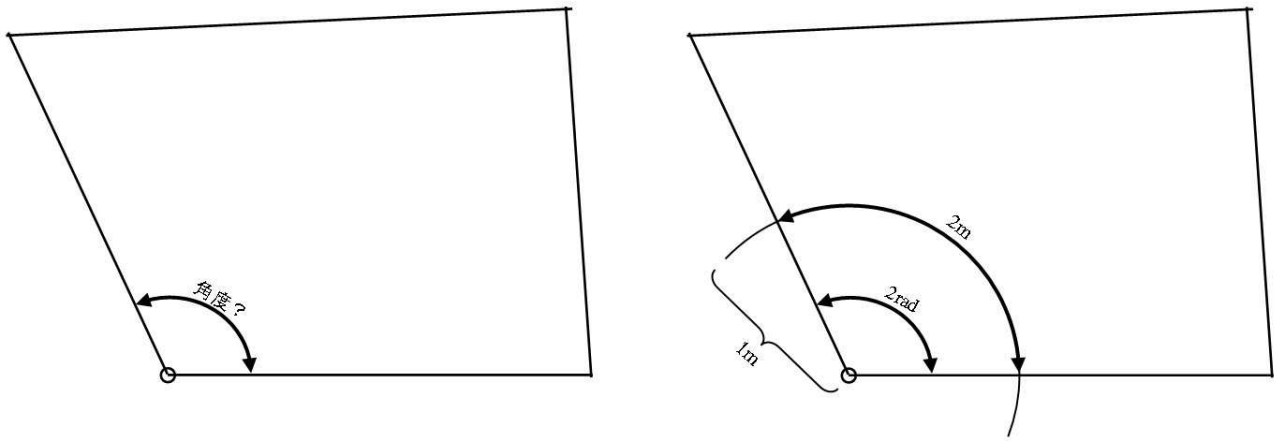
フェーザの大きさと位相［ ４∠－１２０° ］V

１５. ラジアン

日常生活では、角度を例えば「９０°」等と「度」で表します。ご存知の通り、一周が３６０°と決められています。ところが３６０と言う値には大した根拠がありません。（１年が３６５日なので、１日に地球が約１°公転する、という程度の理由で３６０に決めたようです）このように、根拠の無い値（３６０）が含まれていると、計算のツジツマが合わなくなります。何か、もっと根拠のはっきりした角度の表し方が必要です。

また、角度を測定するには分度器が必要です。「度」を使う限り、例えば土地を測量する場合「巻尺」と「分度器」を用意する必要があり面倒です。そこで、巻尺だけで角度を測定できる方法があれば便利です。

そこで巻尺だけで、下図左側の土地を測量してみます。ここでは、左下の角の角度を測ります。まず、下図右側のように、巻尺の一端を角の部分に固定して、半径１ｍの円を描きます。



次に、角度を求めたい部分の円弧の長さを巻尺で計ります。上図の場合円弧の長さが「２ｍ」でした。こような角度が「２ラジアン」です。円弧が「１ｍ」なら「１ラジアン」、「３ｍ」なら「３ラジアン」です。ラジアンはｒａｄとも書きます。

このように巻尺だけで角度を測定できました。そのうえ、ラジアンは「半径１ｍの円弧の長さ」という明確な根拠があるので、計算でもぴったりツジツマが合います。

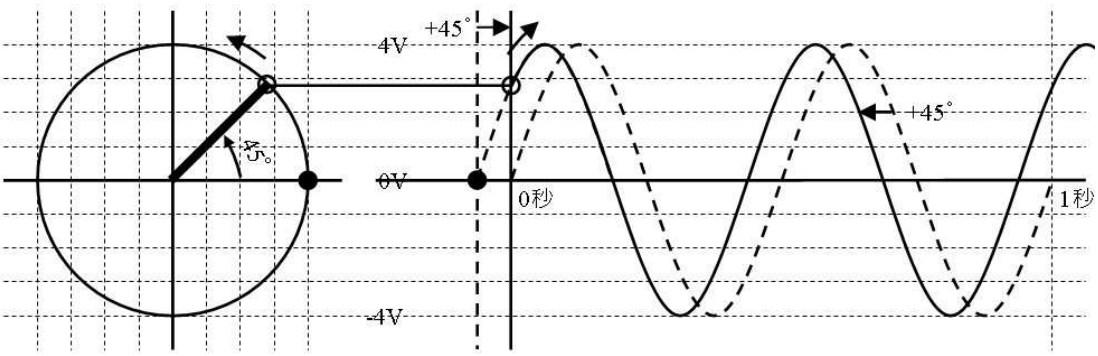
さて、３６０°をラジアンで表せば、半径１ｍの円の円周ですから、２πラジアンです。そこで、以下示すように、度に$\frac{\pi}{180}$を掛ければラジアンを、ラジアンに$\frac{180}{\pi}$を掛ければ度を求めることができます。

$$角度[rad] = 角度[°] \times \frac{\pi}{180}$$ =D1*PI()/180

$$角度[°] = 角度[rad] \times \frac{180}{\pi}$$ =D1*180/PI()

１６. 位相とラジアン

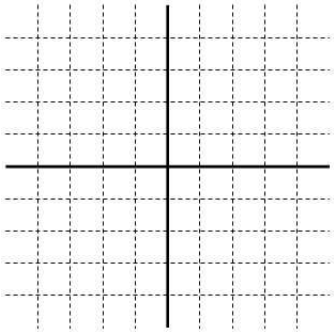
下図の交流は、大きさが4、位相が４５°進んだ交流電圧です。４∠４５°Ｖと書くことができました。



位相の４５°は、ラジアンを使って、０．２５π rad と書くことができます。したがって、ラジアンを使ってフェーザ表示を、４∠０．２５radＶと書くこともできます。

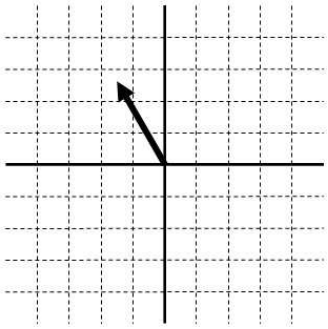
１６.１. 練習（ラジアンを使ったフェーザ）

３∠２．０９radＶの交流を下図にフェーザで矢印表示してください。



１６.２. 答

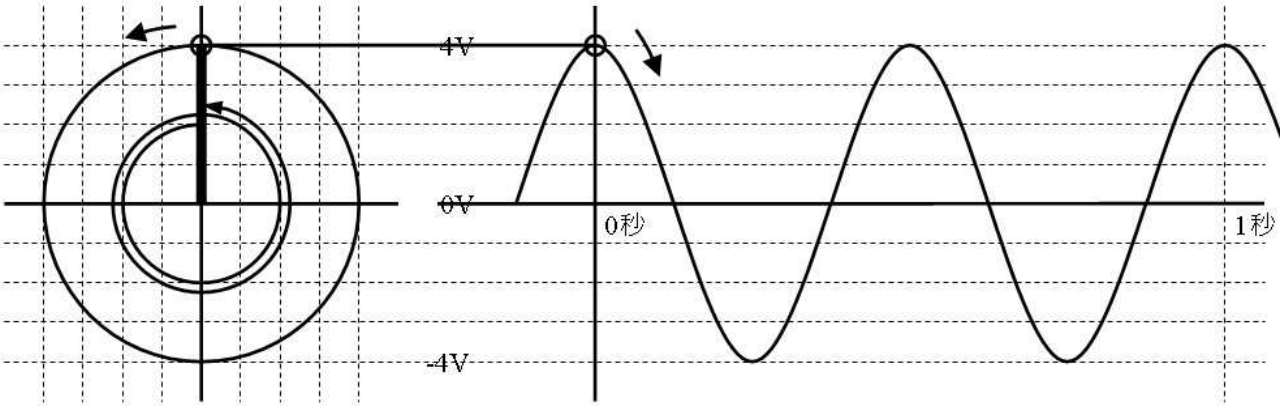
２．０９rad はだいたい１２０°なので。



１７. 周波数と角周波数

周波数は１秒間に来た波の下図を数えたものですが、角周波数は１秒間にペダルの回転した角度を（ラジアンで）測ったものです。

まず、下図の交流で、１秒間にペダルが何回転したか数えてください。



２回転しています。１秒間にペダルが２回転した結果、波が２つやって来たことが分ります。つまり、周波数の正体は１秒間のペダルの回転回数です。

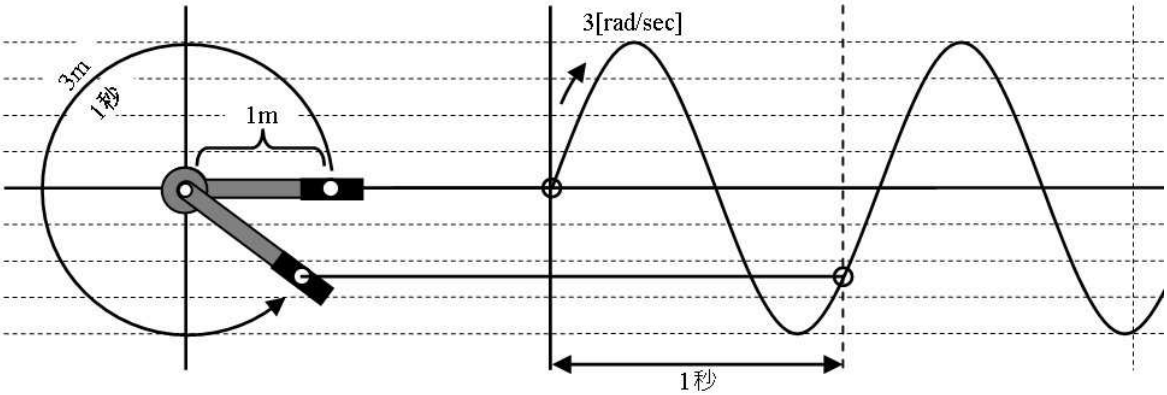
回転を「回数」ではなくて「角度」で表すこともできます。下表に示すとおり、２回転ですから、３６０°の２倍で、７２０°です。このため、周波数２[Ｈｚ]は、７２０[°/秒]と表すこともできます。さらに、角度をラジアンで示して、４π[rad/秒]（１２．６[rad/秒]）と表すこともできます。

周波数	１秒の回転回数	１秒の回転角度（度）	１秒の回転角度（rad）
２Ｈｚ	２ 回転／秒	７２０° ／秒	１２．６ rad／秒 (４πrad／秒)

特に、ラジアンで表した１秒間の回転角度（rad/秒）を使うと、計算が簡単になるので、「角周波数（ω）」と呼んで愛用されています。

さて、何となくツカミドコロの無い「角周波数（ω）」ですが、分かり易くイメージできます。つまり下図に示すとおり、角周波数（ω）とは「長さ１ｍのペダルが、１秒間に進んだ距離（描いた弧の長さ）」です。

例えば 3[rad/sec]の場合、下図のように、１秒間に長さ１ｍのペダルが、３ｍ（弧を描いて）進むような回転の速さ（から生まれる上下動の周波数）、と考えれば良い訳です。



３［ｒａｄ／秒］のイメージ

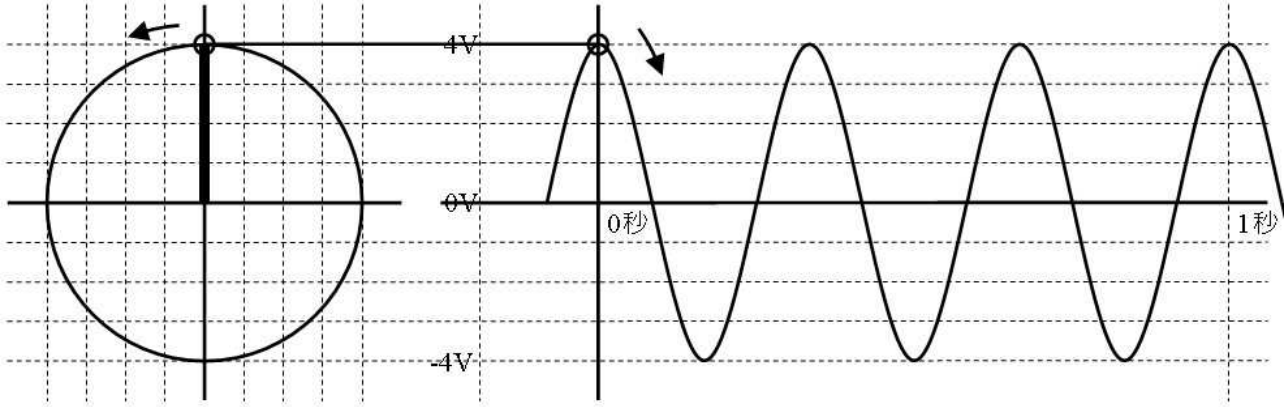
計算して求める場合は、周波数[Hz]に２π（つまり、６．２８）を掛けると角周波数[rad/秒]に、角周波数[rad/秒]を２πで割ると周波数[Hz]になります。

$$角周波数[rad/秒] = 周波数[Hz] \times 2\pi$$

$$周波数[Hz] = \times \frac{角周波数[rad/秒]}{2\pi}$$

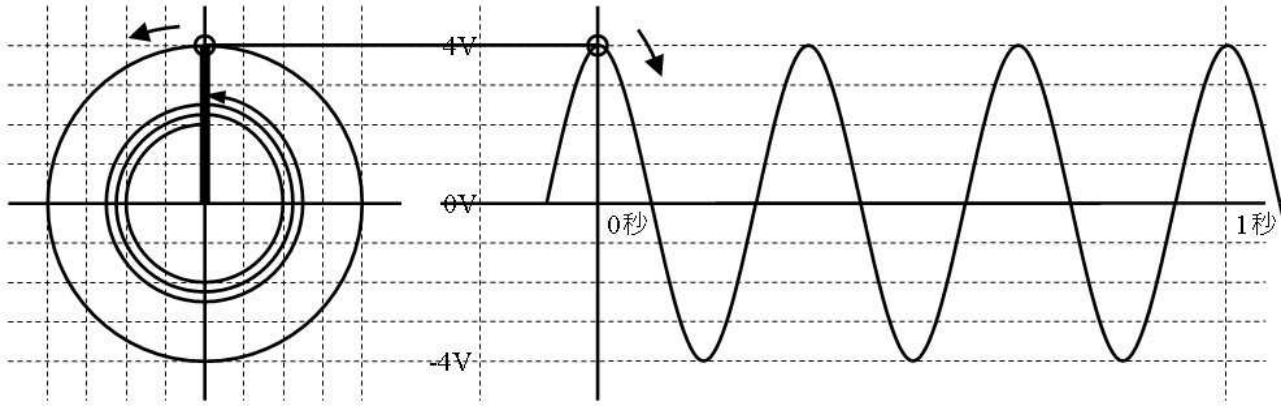
１７.１. 練習（角周波数）

下図の交流が１秒間に回転した様子をペダルの図に書き込み、１秒間に回転した回数と、回転した角度[d]を求めてください。



回転回数[　　][Hz]　回転角度[　　][rad/秒]

１７.２. 答え（角周波数）



回転回数[　３　][Hz]　回転角度[１８．８][rad/秒]

１７.３. 練習

下表上段の周波数に対応する角周波数を、下段に記入してください。

周波数	0.16[Hz]	160[Hz]	16[kHz]	1.6[MHz]
角周波数	[rad/sec]	[k rad/sec]	[k rad/sec]	[M rad/sec]

１７.４. 答

周波数	0.16[Hz]	160[Hz]	16[kHz]	1.6[MHz]
角周波数	1[rad/sec] =0.16/180*PI()	1 [k rad/sec] =1000/180*PI()	100[k rad/sec] =100E3/180*PI()	10[M rad/sec] =10E6/180*PI()

１８. 角周波数とＬＣのインピーダンス

コイルやコンデンサのインピーダンスの大きさは、周波数をＨｚではなく、角周波数 rad／sec で表すと、下表に示すとおり、式の中にあった「２π」が無くなり、計算が簡単になります。

角周波数とインピーダンス

	インピーダンス	アドミタンス
コンデンサC	$Z_C = \frac{1}{\omega C}[\Omega]$ =1/O1/C1	$Y_C = \omega C [S]$ =O1*C1
コイルL	$Z_L = \omega L [\Omega]$ =O1*L1	$Y_L = \frac{1}{\omega L}[S]$ =1/O1/L1

例えば、ｆ＝５０rad/sec（３１８Ｈｚ）、Ｌ＝１０ｍＨ（０．０１Ｈ）の場合、コイルのインピーダンスＺ$_L$は

Ｚ$_L$＝ωＬ＝５０×０．０１＝２０[Ω]

=50*10E-3

と計算します。

コイルやコンデンサの複素インピーダンスも、角周波数を使うと下表のように簡単になります。

	複素インピーダンス	複素アドミタンス
コイルL	$Z_L = j\omega L [\Omega]$ =IMAGINARY(0,O1*L1)	$Y_L = \frac{1}{j\omega L}[S]$ （$Y_L = -j\frac{1}{\omega L}[\Omega]$を変形） =IMDIV(1,IMAGINARY(0,O1*L1))
コンデンサC	$Z_C = \frac{1}{j\omega C}[\Omega]$ （$Z_C = -j\frac{1}{\omega C}[\Omega]$ を変形） =IMDIV(1,IMAGINARY(0,O1*C1))	$Y_C = j\omega C [S]$ =IMAGINARY(0,O1*C1)
上表中の変形は、たとえばコンデンサの複素インピーダンスの場合、 $Z_C = -j\frac{1}{\omega C} = -j\frac{1}{\omega C}\times\frac{j}{j} = -\frac{j\times j}{j\omega C} = \frac{1}{j\omega C}$ のように、ｊ／ｊを掛けてから、ｊ×ｊ＝－１を使っています。コイルの複素アドミタンスも同様に変形しています。		

６．複素数とＥｘｃｅｌ

ここでは電気の話を次のステップに進めるため、これまで既に使ってきた複素数を軽く復習して、Ｅｘｃｅｌで計算できるようにし、どのような性質があるか確認します。もちろん、学校の「複素数」とはまるで違いますから、数学が嫌いでもご安心ください。

インピーダンスの項で使ったように、「複素数」は簡単で便利なのに、（翻訳した人が）難しい名前を付けたので、イメージが悪いです。そのうえ、（Ｅｘｃｅｌでやれば一発だというのに）複素数の面倒な手計算計算を学校で散々やらされて、嫌いになった人も多いです。本書ではＥｘｃｅｌ一発でやりますから、計算の必要は殆どありません。（ｊ×ｊ＝－１でさえ、滅多に使いませんからご安心を）

１．本章が必要な人、不要な人

学校で習った複素数が普通に飲み込めて、sin や cos と関係していた事をうっすら覚えている、Ｅｘｃｅｌで複素数を計算した覚えもある、という方は本章を読む必要はありません。

ちょっと凝った交流の回路や周波数特性の正確な計算、高周波の回路をやってみたい、と言う方には本章が必要です。逆に、直流や簡単な交流の回路しか作らない、という方には本章は必要はありません。

とはいえ、複素数と交流はうまい具合に繋がっているので、複素数を理解すると交流が良く分かるようになり、電子工作を一層楽しめるようになります。

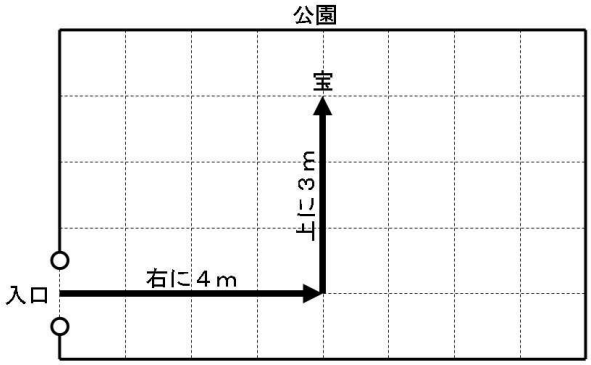
本章は「複素数を理解する」のではなくて「複素数が使えるようになる」ことだけに注目して（つまり、実用本位に、正確さは犠牲にして）簡素に解説していますから、数学で複素数の時間がイヤだった方も苦痛無く読んで頂ける内容です。（逆に、まともに複素数を理解している方は「なめとんか！」と腹を立てると思う…だって、使えたらええやん。）

２．なぜ複素数と呼ぶのか

さて「複素数」は、英語では「コンプレックス・ナンバー」と呼びます。例えばおなじみの「シネマ・コンプレックス」は「映画館（シネマ）がいくつかセットになった（コンプレックス）施設」ですが、複素数はもっとシンプルで「値が２つだけセットになった数」です。たとえば、４と３をセットにすれば、複素数が出来上がりです。シネコンと違ってたった２つだけのセットですから、超シンプルです。

「コンプレックス」を「複素」と、「ナンバー」を「数」と迷訳したのですが、その結果できた「複素数」には「素数」（２、３、５、７、、、）という、複素数とは関係の無い単語が一部含まれてしまい、余計に難しく感じてしまいます。

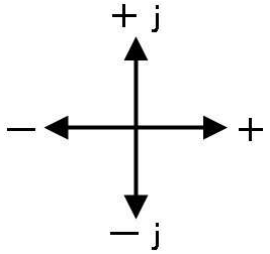
さて、数字を２つセットにすると、場所を表すことができます。たとえば、下の地図のように「入り口から、右に４、上に３」と言うように、「４」と「３」という２つの数字のセットで、あなたが公園に埋めた、宝の場所を示すことができます。



秘密の地図

しかし、「右に４、上に３」と漢字を使っていては、計算するときに面倒です。そこで、（インピーダンスの所で出てきたように）次の表のように漢字をより簡単な記号に置き換えます。

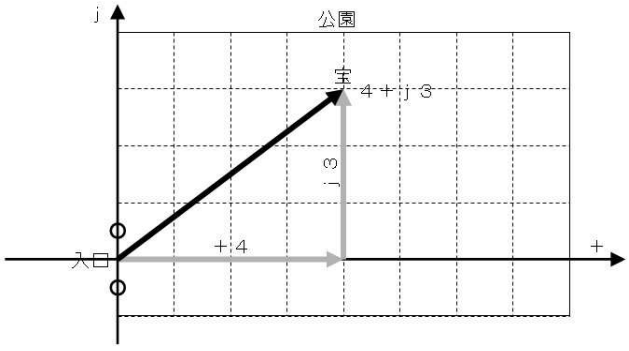
漢字を記号に置き換える



右	左	上	下
↓	↓	↓	↓
＋	－	＋ｊ	－ｊ

つまり右左を正負の方向、上下をｊの正負の方向、と決めた訳です。こうすれば、「右に4、上に3」は、「＋4、＋ｊ3」と書くことができます。

あとは、２つの数「＋４」と「＋ｊ３」を足して一つにまとめると、「４＋ｊ３」という複素数が完成です。こうすれば、下図のように、「４＋ｊ３」という１つの複素数で、宝の場所を示すことができます。



複素数「４＋ｊ３」は「１つの数」なのに、上図に太い斜めの矢印で示すような、宝の場所を一発で表すことができるスグレモノです。

３．実部と虚部

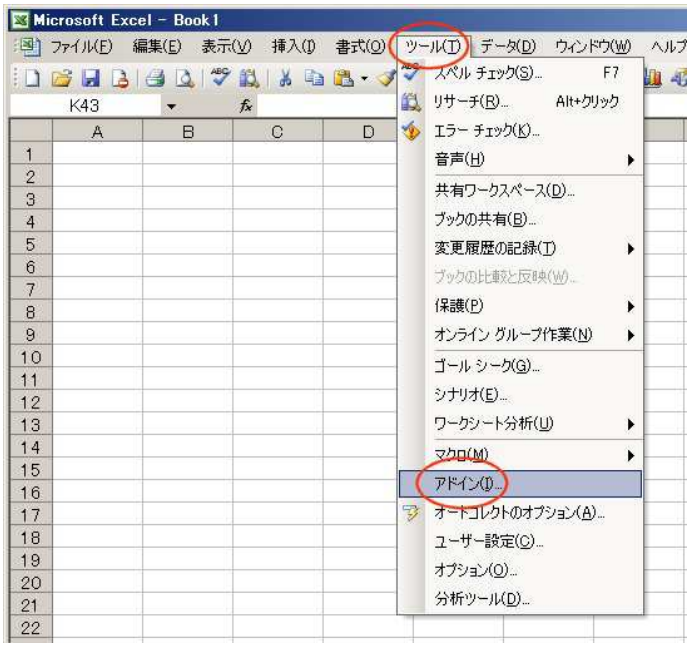
複素数に含まれる２つの値は、それぞれに名前を付けて区別しています。たとえば「４＋ｊ３」に含まれる「４」を「実の部分」（実部）、「３」を「虚の部分」（虚部）と呼びます。つまり、ｊの付いている方が虚部です。

４．Ｅｘｃｅｌで複素数を計算する

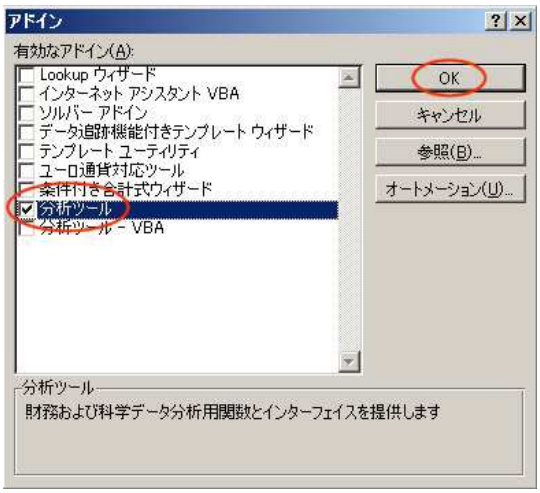
　Ｅｘｃｅｌは特別なオプションを購入することなく、簡単な設定を一度行なうだけで、複素数を計算することができます。

５．Ｅｘｃｅｌの設定

　次の設定を行えば、以後は複素数が利用できます。まず、Ｅｘｃｅｌを立ち上げて、メニューバーの「ツール」から「アドイン」を選択します。



　「アドイン」ダイアログボックスが表示されますから、「分析ツール」チェックボックスをＯＮにして、「ＯＫ」ボタンをクリックします。



　設定は完了です。

６．Ｅｘｃｅｌによる複素数の計算

　下表の関数を使って、複素数を計算します。主に IM～というのが複素数関連の関数です。

計算	関数の例	動作の例	結果

	呼び方		
複素数を入力	4+3i	複素数 4+j3 を作る（入力する）	4+3i
複素数を作る	=COMPLEX(4,3) コンプレックス	複素数 4+j3 を作る	4+3i
足し算（＋）	=IMSUM ("4+3i","3+4i") アイエム・サム	複素数 4+j3 と 3+j4 をたす	7+7i
引き算（－）	=IMSUB ("4+3i","3+4i") アイエム・サブ$_{トラクト}$	複素数 4+j3 から 3+j4 を引く	1-1i
掛け算（×）	=IMPRODUCT ("4+3i","3+4i") アイエム・プロダクト	複素数 4+j3 と 3+j4 を掛ける	25i
割り算（÷）	=IMDIV ("4+3i","3+4i") アイエム・ディビ$_{ジョン}$	複素数 4+j3 を 3+j4 で割る	0.96-0.28i
実部を取り出す	=IMREAL("4+3i") アイエム・リアル	複素数 4+j3 の実部を求める	4
虚部を取り出す	=IMAGINARY("4+3i") イマジナリー	複素数 4+j3 の虚部を求める	3
絶対値 （大きさ）	=IMABS("4+3i") アイエム・アブソリュート	複素数 4+j3 の絶対値（大きさ）を求める	5
偏角 （角度、ズレ）	=IMARGUMENT("4+3i") アイエム・オーギュメント	複素数 4+j3 の偏角（ズレ、位相）を求める　（答の単位は rad）	0.643...
共役	=IMCONJUGATE("4+3i") アイエム・コンジュゲート	共役な（虚部の符号が逆の）複素数を求める	4-3i
exp 関数	=IMEXP("4+3i") エイエム・エクスポ$_{ーネンシャル}$	e の 4+j3 乗を計算する	-54.05+7.704i

Ｅｘｃｅｌでは、複素数「ｊ３」は、「３ｉ」と表示されます（入力します）。これは数学の書き方（３ｉ）の方が、電気の書き方（ｊ３）より良く使われるからです。

また、Ｅｘｃｅｌでは複素数は「文字列」としてセルに入ります。このため関数の括弧の中に直接記入する場合は、”４＋３ｉ”のように、「　”　」（ダブルクォーテーション）で囲みます。

６.１. 練習（Ｅｘｃｅｌで複素数を計算）

下図のように、Ｂ１セルに４＋ｊ３、Ｃ１セルに３＋ｊ４を入力し、それぞれの、実部、虚部、絶対値、偏角、ＥＸＰ関数値、また、双方の和、差、積、除、を計算させてください。

	A	B	C
1	値	4+3i	3+4i
2	実部		
3	虚部		
4	絶対値		
5	偏角		
6	exp		
7	和		
8	差		
9	積		
10	除		

6.2. 答

最初の１回目だけは、ツールのアドインで分析をＯＮにします。（２回目からは不要です）セルに次のように入力します。

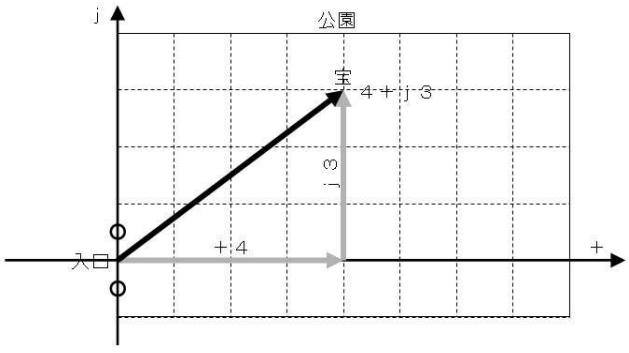
	A	B	C
1	値	4+3i	3+4i
2	実部	=IMREAL(B1)	=IMREAL(C1)
3	虚部	=IMAGINARY(B1)	=IMAGINARY(C1)
4	絶対値	=IMABS(B1)	=IMABS(C1)
5	偏角	=IMARGUMENT(B1)	=IMARGUMENT(C1)
6	exp	=IMEXP(B1)	=IMEXP(C1)
7	和	=IMSUM(B1,C1)	
8	差	=IMSUB(B1,C1)	
9	積	=IMPRODUCT(B1,C1)	
10	除	=IMDIV(B1,C1)	

結果は次のように表示されます。

	A	B	C
1	値	4+3i	3+4i
2	実部	4	3
3	虚部	3	4
4	絶対値	5	5
5	偏角	0.643501109	0.927295218
6	exp	-54.0517588610782+7.	-13.1287830814622-15
7	和	7+7i	
8	差	1-i	
9	積	25i	
10	除	0.96-0.28i	

7. 複素平面

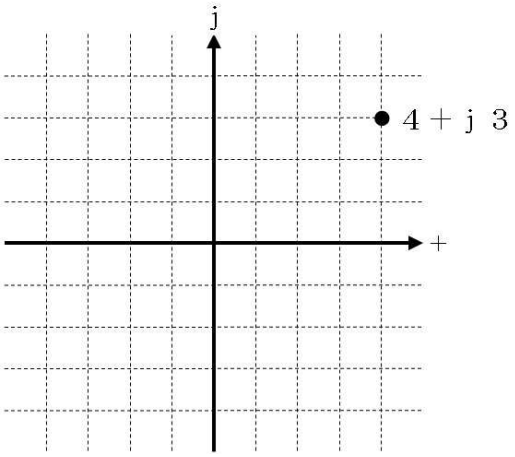
下図の公園の地図や、自転車のペダルを横から見た図のような、「右左が正負で、上下が j の正負」を表す図（グラフ）を「複素平面」と呼びます。



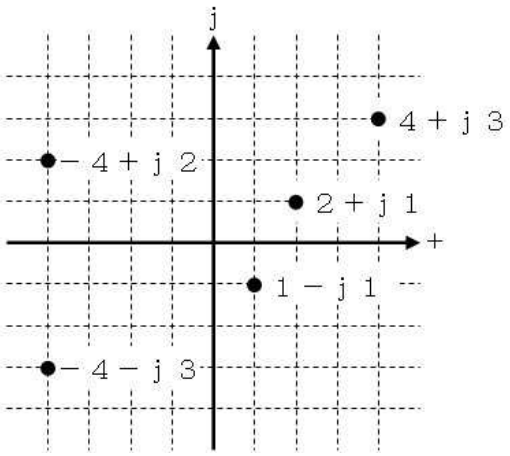
7.1. 練習（複素数）

例に倣って、下表の複素数を、下図の地図（複素平面）に書き込んで下さい。

例：４＋ｊ３	２＋ｊ１	－４＋ｊ２	１－ｊ１	－４－ｊ３

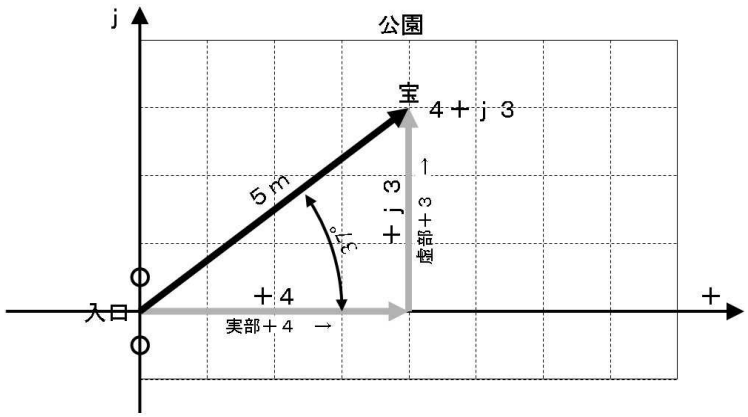


7.2. 答



8. 複素数の大きさ（絶対値）と偏角（角度）

今一度、宝の地図を見てみましょう。



上図に示すとおり、右に４m、上に３m進んだ宝のありかは、複素数で４＋ｊ３と表すことができました。このとき、入り口から宝までの距離は５mです。この５mを「複素数の大きさ」や「絶対値」と呼んで、２本の縦棒で囲んで示します。たとえば、４＋ｊ３の絶対値は、次のように書きます。（イン

ピーダンスの項でも触れました）

$|4+j3| = 5$

上の式は「右に４、上に３進んだ宝の位置は、入り口から５mの距離にある」という意味です。複素数の絶対値は「ピタゴラスの定理」を使って、次のように計算できます。

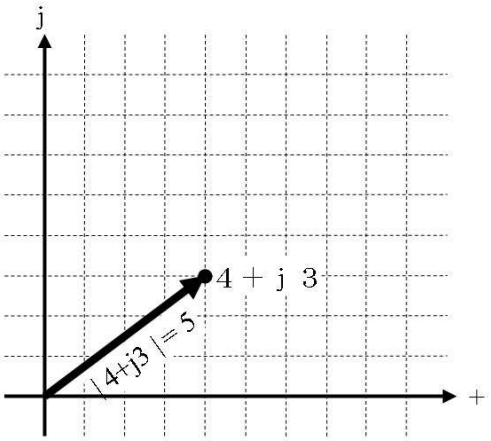
$|4 + j3| = \sqrt{4^2 + 3^2} = 5$　　（複素数(4 + j3)の絶対値は、5）

=IMABS("4+3i")

また上図では、入り口から約３７°の角度に宝があります。この角度を「偏角」と呼びます。例えば、４＋ｊ３の偏角は、ａｔａｎ（３÷４）で計算できますが、この方法は本書では必要ありません。なぜなら、Ｅｘｃｅｌを使って、ＩMARGUMENT（”４＋３ｉ”）と複素数から一発で計算できるからです。

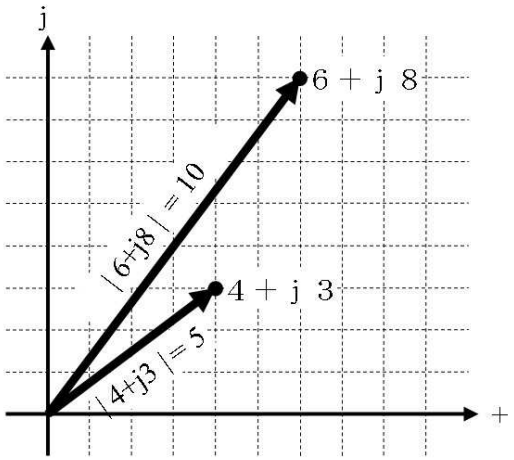
8.1. 練習（絶対値と偏角、実部と虚部）

例（４＋ｊ３）にならって、複素数６＋ｊ８を複素平面上に示し、Ｅｘｃｅｌを用いて、実部、虚部を、絶対値を求めてください。



実部：　　虚部：　　絶対値：　　偏角：　　°

8.2. 答



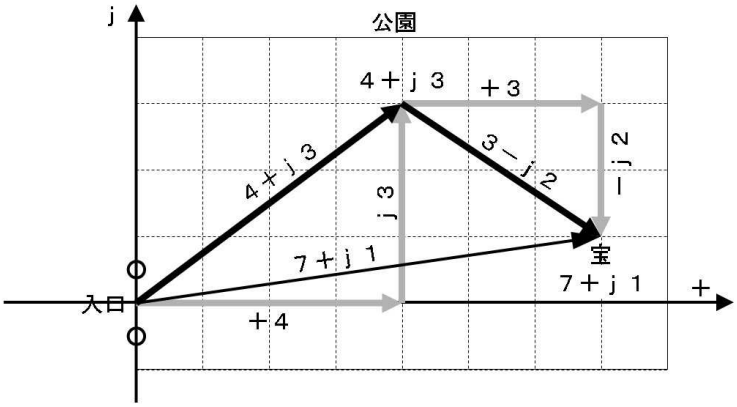
実部：６　虚部：８　絶対値：１０　偏角：５３．１　°

=IMREAL("6+8i")、=IMAGINARY("6+8i")、=IMABS("6+8i")、=IMARGUMENT("6+8i")/PI()*180

※偏角はラジアンで答がでるので、１８０／πを掛けます。

９．複素数の足し算

盗掘を防ぐために宝を移動させましょう。下図に示すように、現在の場所から、右に３、下に２進んだ場所に埋め直します。右に３、下に２ですから、３－ｊ２だけ移動させた事になります。



移動させた結果、宝は右に７、上に１の場所（７＋ｊ１）に隠されています。このように一度決めた場所から、さらに移動させた場所を求める事が、複素数の足し算です。つまり、

最初の場所 ＋ 移動した分 = 4+j3 + 3-j2 = (4+3) + (3-2)j = 7 + j1

のように、実部と実部、虚部と虚部を加えるだけです。

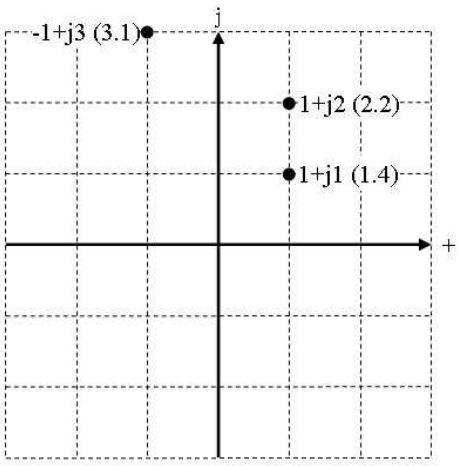
１０．複素数の掛け算

１＋１ｊと１＋２ｊを掛けると、結果は－１＋ｊ３となります。つまり、

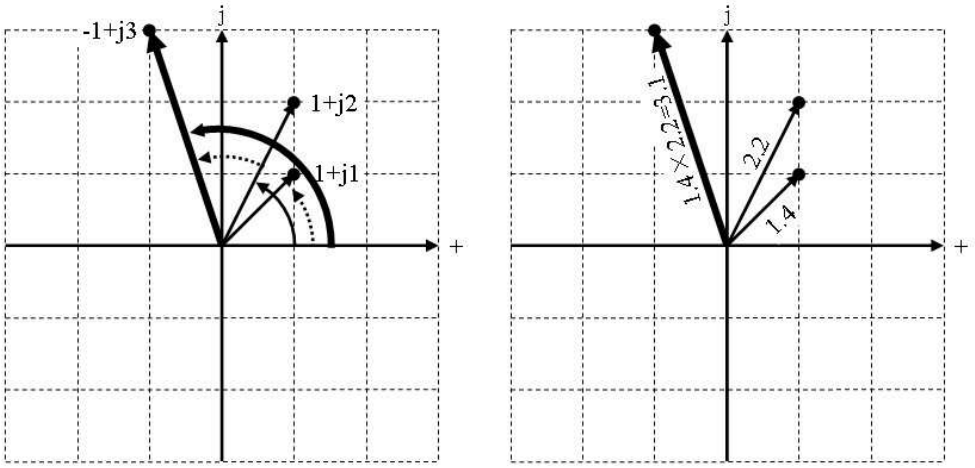
(1+ j 1) × (1+ j 2) = -1+ j 3

=IMPRODUCT("1+1i","1+2i")

となります。この計算を、複素平面上に書くと下図の通りです。



掛け算の元になった２つの数（１＋１ｊと１＋２ｊ）と、掛け算の結果得られた数（－１＋ｊ３）の場所には、何の脈絡も無いように見えます。そこで、角度や大きさ（絶対値）に注目すると、特徴があります。



上図の通り、元になった２つの数の角度（偏角）を加えたものが、掛け算で得られた数の角度となり、また、元になった２つの数の大きさ（絶対値）をかけたものが、掛け算で得られた数の大きさとなっています。つまり複素数の掛け算は、角度のたし算、大きさの掛け算、です。

複素数の計算はＥｘｃｅｌがやりますから、手計算する必要はありません。参考までにその方法は（分配の法則という奴を使って…）

（ａ＋ｊｂ）×（ｃ＋ｊｄ）

＝ａ×ｃ＋ａ×ｊｄ＋ｊｂ×ｃ＋ｊｂ×ｊｄ

＝ａ×ｃ－ｂ×ｄ ＋ ｊ（ａ×ｄ＋ｂ×ｃ）

となります。（ｊ×ｊ＝－１です）

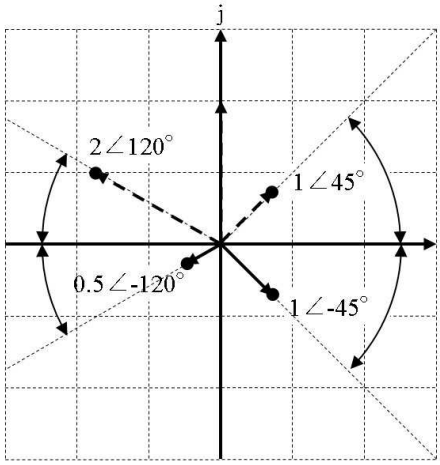
１１．複素数の逆数

複素数の逆数は、大きさ（絶対値）と偏角（角度）で書くと分り易く、例えば次表のようになります。

	例１		例２	
	元の値	逆数	元の値	逆数
複素数	$1\angle 45°$	$1\angle -45°$	$2\angle 120°$	$\frac{1}{2}\angle -120°$
絶対値	1	$\frac{1}{1}$	2	$\frac{1}{2}$
偏角	$45°$	$-45°$	$120°$	$-120°$

上図の例２で分るように、複素数の逆数では、「絶対値が逆数」になり（2 なら$\frac{1}{2}$になり）、「偏角は符号が逆」（120°なら-120°）になります。

下図の複素平面上に、上表の２つの例を示します。元の数と逆数は水平線（実軸）との角度は同じですが、上下が逆になります。



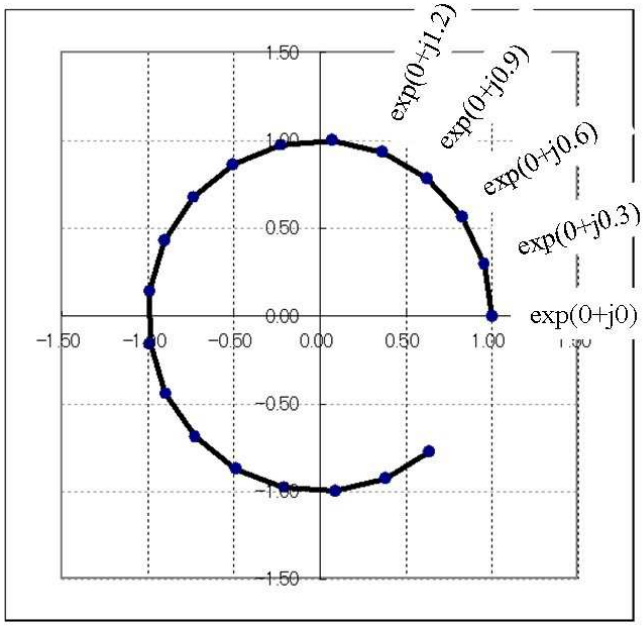
インピーダンスとアドミタンスは逆数の関係でした。ですから、インピーダンスが２∠１２０°Ωであれば、アドミタンスは０．５∠－１２０°Ｓとなります。

１２．複素数とｅｘｐ関数

exp（エクスポーネンシャル）という関数があります。コンデンサが放電するときの電圧をグラフにするとき、Ｅｘｃｅｌで、=E1*EXP(-T1/C1/R1)のように使用しました。

この exp 関数は複素数でも使えます。Ｅｘｃｅｌで（分析ツールアドインを有効にして）セルに「=IMEXP("3+4i")」等と入力します。（IMEXP は複素数でも使える exp 関数です）

さて、この IMEXP 関数に 0+2j のような「実部が０で、虚部だけがある数」を順に入力すると、下図に示すような、面白い事が起きます。



x	exp(x)
0 + j 0.00	1.00 + j 0.00
0 + j 0.30	0.96 + j 0.30
0 + j 0.60	0.83 + j 0.56
0 + j 0.90	0.62 + j 0.78
0 + j 1.20	0.36 + j 0.93
0 + j 1.50	0.07 + j 1.00
0 + j 1.80	−0.23 + j 0.97
0 + j 2.10	−0.50 + j 0.86
0 + j 2.40	−0.74 + j 0.68
0 + j 2.70	−0.90 + j 0.43
0 + j 3.00	−0.99 + j 0.14
0 + j 3.30	−0.99 − j 0.16
0 + j 3.60	−0.90 − j 0.44
0 + j 3.90	−0.73 − j 0.69
0 + j 4.20	−0.49 − j 0.87
0 + j 4.50	−0.21 − j 0.98
0 + j 4.80	0.09 − j 1.00
0 + j 5.10	0.38 − j 0.93
0 + j 5.40	0.63 − j 0.77

IMEXP に与える値の、虚部を少しずつ大きくして行くと、IMEXP で求めた結果は、上図に示すとおり、時計の３時の位置から、半径１の円を描いて回転して行きます。そして、与える値がｊ６．２８（つまり、ｊ２π）になると、ぐるりと一周して戻って来ます。

これは、交流を生み出したペダルの回転と全く同じものです。ですから、exp 関数（Ｅｘｃｅｌでは IMEXP）に虚の値を入れて出てくる結果は、まさに交流を表しています。時間 t が経てば経つほど、ペダルは回転して行きますから、

交流 = exp (j×時間) = exp(j t)

（t に j を掛けているのは、虚部だけの数を作るためです）

Ｅｘｃｅｌでは=IMEXP(COMPLEX(0,時間))

上の式では、６．２８秒で一周するペダルしか表せませんから、ペダルを回す速さをωとすれば、

交流 = exp (j×回転の速さ×時間) = exp(jωt)

Ｅｘｃｅｌでは=IMEXP(COMPLEX(0,周波数*時間))

と書くことができます。（ωが大きい程、ペダルが早く回転します）たとえば、最大電圧（ペダルの長さ）５Ｖで、１０Ｈｚ（１秒間に１０回転）の交流電圧であれば、

最大電圧５Ｖで１０Ｈｚの交流電圧 = 5 × exp (j×６２．８×t)［Ｖ］

Ｅｘｃｅｌでは=5*IMEXP(COMPLEX(0,62.8*時間)

（数学っぽく書けば「5 exp (j 62.8 t)」あるいは「$5\,e^{j\,62.8\,t}$」です）

という簡単な計算で交流を表すことができます。sin や cos 等の面倒な三角関数が出てこないので、とても楽に使えます。

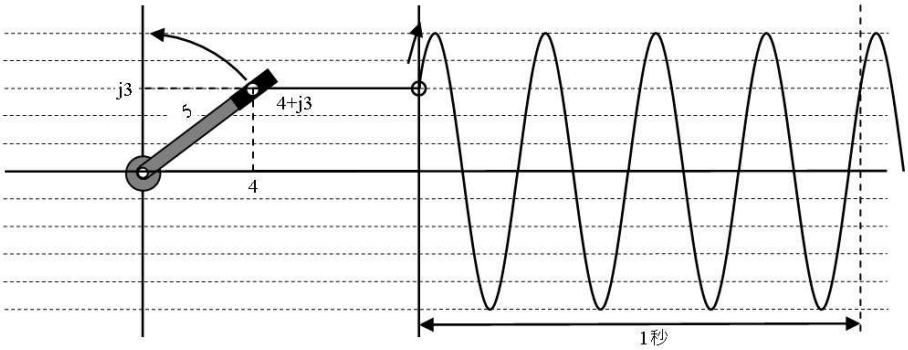
IMEXP 関数の結果から、sin の波を求めたいときは、IMAGINARY(IMEXP(～))と虚部を取り出し、cos の波を求めたいときは、IMREAL(IMEXP(～))と実部を取り出すだけです。

e の値は約２．７２で、e^{jt} は t が２πの時にきっちり一周します。e より小さい 2^{jt} では１一周できず、3^{jt} では１周以上回ってしまいます。このため e はπと並んで「宇宙の秩序を表す数」と考えらています。e^{jt} に比べれば、sin(t)や cos(t)などは「ザコ関数」と言えるでしょう。

７．交流回路中編（周波数が一定の場合）

１．Ｅｘｃｅｌでフェーザから波形を描く

例えば下図に示すとおり、４＋ｊ３というフェーザがあったとき、その波形を手書きで作図することができます。



もちろんとても手間が掛かります。この面倒な作図も、Ｅｘｃｅｌを使えば簡単に行えます。

実は、フェーザと、基本の回転を表す「ｅｘｐ（ｊｔ）」を掛けるだけで、フェーザが表す波形を求めることができるのです。つまり、

フェーザ × ｅｘｐ（ｊｔ） ＝ フェーザの表す交流の波の形

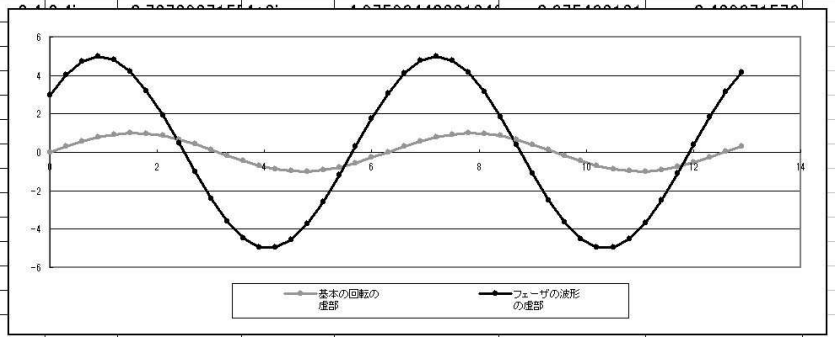
です。後は、ｔをだんだん大きくして計算してやれば、交流の波形が出てきます。Ｅｘｃｅｌで次のように値や式を入力してみましょう。

	A	B	C	D	E	F	G
1	時間 t	虚数 ｊｔ	基本の回転 imexp(ｊｔ)	フェーザ S	フェーザの波形 S×imexp(ｊｔ)	基本の回転の 虚部	フェーザの波形 の虚部
2	0	=COMPLEX(0,A2)	=IMEXP(B2)	4+3i	=IMPRODUCT(D2,C2)	=IMAGINARY(C2)	=IMAGINARY(E2)
3	0.3	=COMPLEX(0,A3)	=IMEXP(B3)	4+3i	=IMPRODUCT(D3,C3)	=IMAGINARY(C3)	=IMAGINARY(E3)
4	0.6	=COMPLEX(0,A4)	=IMEXP(B4)	4+3i	=IMPRODUCT(D4,C4)	=IMAGINARY(C4)	=IMAGINARY(E4)
5	0.9	=COMPLEX(0,A5)	=IMEXP(B5)	4+3i	=IMPRODUCT(D5,C5)	=IMAGINARY(C5)	=IMAGINARY(E5)
6	1.2	=COMPLEX(0,A6)	=IMEXP(B6)	4+3i	=IMPRODUCT(D6,C6)	=IMAGINARY(C6)	=IMAGINARY(E6)
7	1.5	=COMPLEX(0,A7)	=IMEXP(B7)	4+3i	=IMPRODUCT(D7,C7)	=IMAGINARY(C7)	=IMAGINARY(E7)
8	1.8	=COMPLEX(0,A8)	=IMEXP(B8)	4+3i	=IMPRODUCT(D8,C8)	=IMAGINARY(C8)	=IMAGINARY(E8)
9	2.1	=COMPLEX(0,A9)	=IMEXP(B9)	4+3i	=IMPRODUCT(D9,C9)	=IMAGINARY(C9)	=IMAGINARY(E9)
10	2.4	=COMPLEX(0,A10)	=IMEXP(B10)	4+3i	=IMPRODUCT(D10,C10)	=IMAGINARY(C10)	=IMAGINARY(E10)
11	2.7	=COMPLEX(0,A11)	=IMEXP(B11)	4+3i	=IMPRODUCT(D11,C11)	=IMAGINARY(C11)	=IMAGINARY(E11)
12	3	=COMPLEX(0,A12)	=IMEXP(B12)	4+3i	=IMPRODUCT(D12,C12)	=IMAGINARY(C12)	=IMAGINARY(E12)

Ａ列が時間で、少しずつ大きくなっています、Ｂ列は時間にｊを掛けて虚数にしたもの、Ｃ列はｅｘｐ（ｊｔ）を計算して、基本の回転（半径１で、偏角（波の左右ズレ）０）を求めたもの、Ｄ列は計算したい交流のフェーザ（４＋ｊ３）、Ｅ列はフェーザと基本の回転を掛けた「フェーザの波形」です。Ｆ列とG列は虚部を取り出して、波形を求めたものです。

計算結果は下図のようになります。

	A	B	C	D	E	F	G
1	時間 t	虚数 ｊｔ	基本の回転 imexp(ｊｔ)	フェーザ S	フェーザの波形 S×imexp(ｊｔ)	基本の回転の 虚部	フェーザの波形 の虚部
2	0	0	1	4+3i	4+3i	0	3
3	0.3	0.3i	0.955336489124	4+3i	2.9347853365184+4	0.295520207	4.048090294
4	0.6	0.6i	0.825335614904	4+3i	1.60741503945361+	0.564642473	4.734576738
5	0.9	0.9i	0.621609968274	4+3i	0.136459144200207	0.78332691	4.998137543
6	1.2	1.2i	0.362357754476	4+3i	-1.34668623999498	0.932039086	4.815229607
7	1.5	1.5i	7.07372016677	4+3i	-2.70953615314135	0.997494987	4.202191551
8	1.8	1.8i	-0.227202094	4+3i	-3.83035127140693	0.973847631	3.213784239
9	2.1	2.1i	-0.504846104	4+3i	-4.60901251834605	0.863209367	1.938299153
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21							
22							
23							



グラフには、基本の回転の波形（グレー：Ｆ列）と、フェーザが示交流の波形（黒：G列）を表示しています。グレーの波形は最大値が１で０から始まる基本の回転を示していることが分りますし、黒の波形は、最大値５で、約３７°位相が進んでいます。

つまり「基本の回転にフェーザを掛けるだけで、フェーザが表す回転が分る」「回転の虚部を取り出せば、波形が分る」のです。

実部ではなく、「虚部を取り出せば、波形が分る」ちょっと妙です。その理由は、自転車を前から見た状態を基本に考えたため（ペダルの上下の（虚部の）動きが波形に対応したから）です。もし、自転車を上から見た状態を基本に考えれば（ペダルの前後の（実部の）動きが波形に対応するので）「実部を取り出せば、波形が分る」ことになります。実部、虚部、どちらを選んでも、見方が違うだけで何れも正しい答です。（電気の世界では波形をｓｉｎ関数で表すことが好まれ、ｃｏｓ関数ではあまり表さない事とも関係があります）

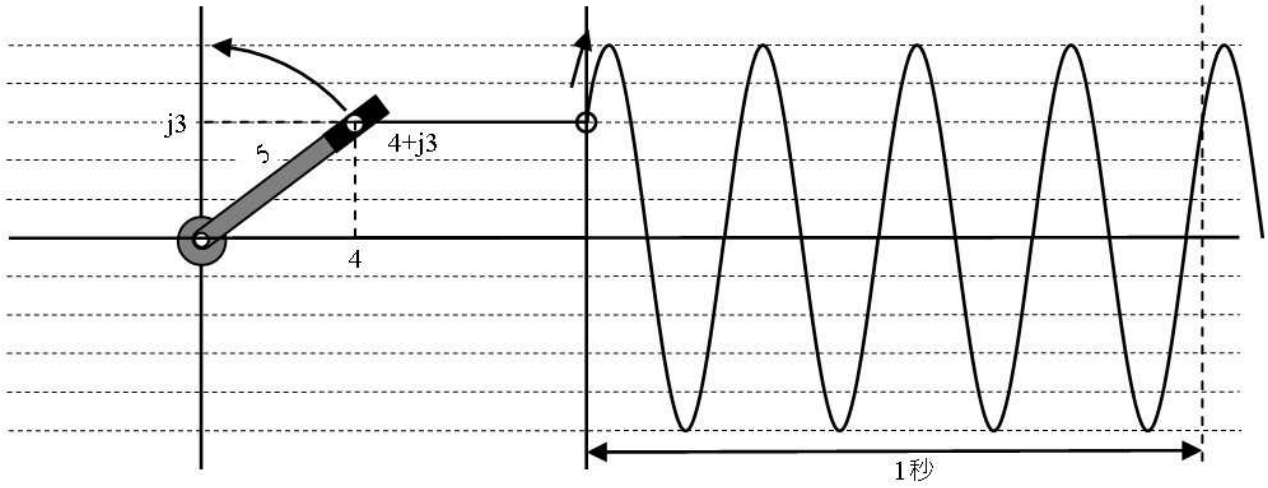
２．複素電圧、複素電流

ここまで来れば「複素電圧」や「複素電流」も、どうせ「鬼畜魔王」の仲間だな…と分るでしょう。つまり「名前だけ難しい奴」です。

複素電圧や複素電流は、電圧や電流を「ペダルの最初の位置（つまり、フェーザ）」で表したもの、です。言い方を少し変えると、フェーザで表した交流電圧が複素電圧、フェーザで表した交流電流が複

素電流です。

復習しましょう。交流は下図のように、ペダルの回転で発生していました。下図の交流は、クランクの長さが5、最初の位置が約３７°進んでいます。



この「ペダルの最初の位置」を、複素数（４＋ｊ３）で表したものが「フェーザ」でした。そして、フェーザで表した「電圧」が「複素電圧」、フェーザで表した「電流」が「複素電流」です。

上図の交流は、たとえば電圧 E であれば、フェーザ（ペダルの最初の位置）を使って、

$$\text{複素電圧} = \dot{E} = 4 + j3V$$

電流 I であれば、フェーザ（ペダルの最初の位置）を使って、

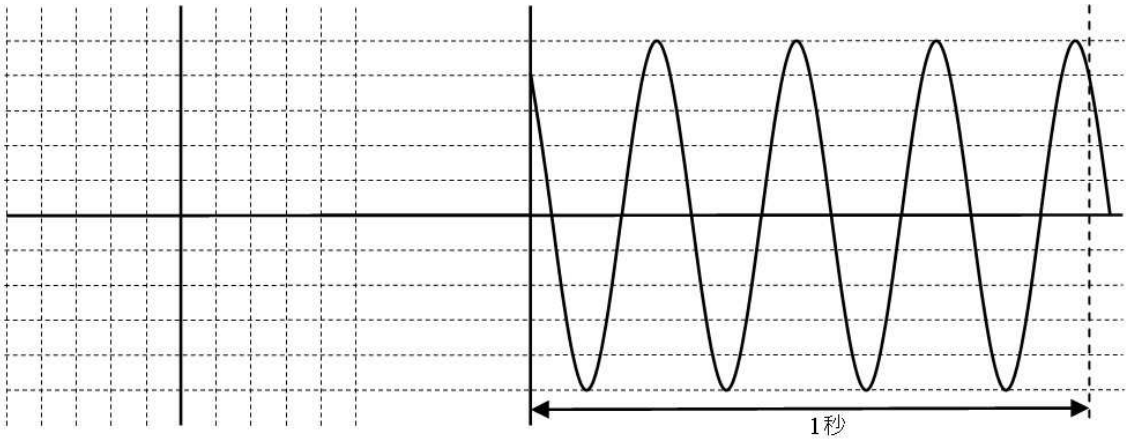
$$\text{複素電流} = \dot{I} = 4 + j3A$$

と表すことができます。E や I の上に付いている「・」は、「複素数ですよ」（つまり、向きがありますよ）というマークで、省略されることもあります。

複素電圧や電流は（フェーザと同一人物ですから）大きさと最初の角度（位相）は表していますが、周波数は表していません。

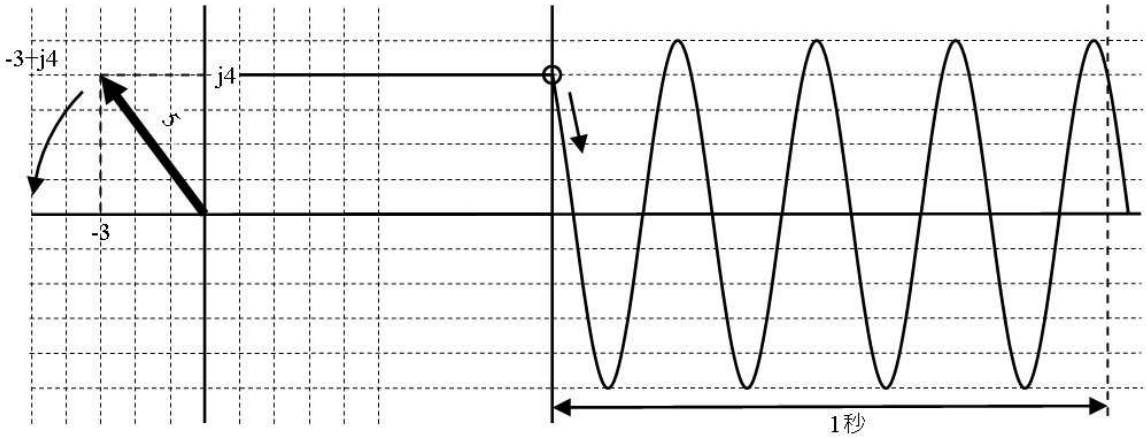
２.１. 練習（複素電圧）

下図の電圧波形に対応するフェーザを描き、複素電圧、最大電圧、周波数、を記入してください。（１目盛りを１Ｖとします）



複素電圧：＿＿＿＿Ｖ　最大電圧：＿＿Ｖ　周波数：＿＿Ｈｚ

2.2. 答



複素電圧：[－３＋ｊ４]Ｖ　最大電圧：[　５]Ｖ　周波数：[　４]Ｈｚ

最大電圧は、波形の最大値から求めることも、ペダルの長さから求めることも、。複素電圧（－３＋ｊ３）の絶対値（｜－３＋ｊ４｜＝５）を計算して求めることもできます。

３．複素電圧と電流のオーム則

下表のように、交流の電圧やインピーダンスは、シンプルにＡＣ１０Ｖ等と「大きさ」だけで表すこともできました。また、より詳しく、８＋ｊ６Ｖ（１０∠３７°Ｖ）と複素数を使って「大きさと向き」で表す事もできました。

項目	大きさだけ（値）		大きさと向き（複素数)	
	名称	値の例	名称	値の例
電圧	交流電圧 E	ＡＣ１０Ｖ	複素電圧 $\dot{E}$ （電圧フェーザ）	８＋ｊ６Ｖ １０∠３７°Ｖ
電流	交流電流 I	ＡＣ５Ａ	複素電流 $\dot{I}$ （電流フェーザ）	３＋ｊ４Ａ ５∠５３°Ａ
通し難さ	インピーダンス Z	２Ω	複素インピーダンス $\dot{Z}$	1.92－ｊ0.56Ω 2∠－16°Ω
通し難さ	アドミタンス Y	０．５Ｓ	複素アドミタンス $\dot{Y}$	0.48＋ｊ0.14Ｓ 0.5∠16°Ｓ
※分り易さのために、ＡＣ電圧と複素電圧の値を揃えてますが、実際の強さは異なります。ＡＣ電圧は実効値を示し、フェーザの大きさは最大電圧を示します。				

さて、交流でもオーム則が使えました。つまり、上表の「大きさだけ」部分にあるＡＣ１０Ｖ、ＡＣ５Ａ、２Ωの間で、

ＡＣ１０Ｖ　＝　ＡＣ５Ａ　×　２Ω

つまり、$E = IZ$

と、計算できます。

さらに上表の「大きさと向き」の部分にある複素電圧（８＋ｊ６Ｖ）、複素電流（３＋ｊ４Ａ）、複素インピーダンス（１．９２＋ｊ０．５６Ω）の間でオーム則を使って、

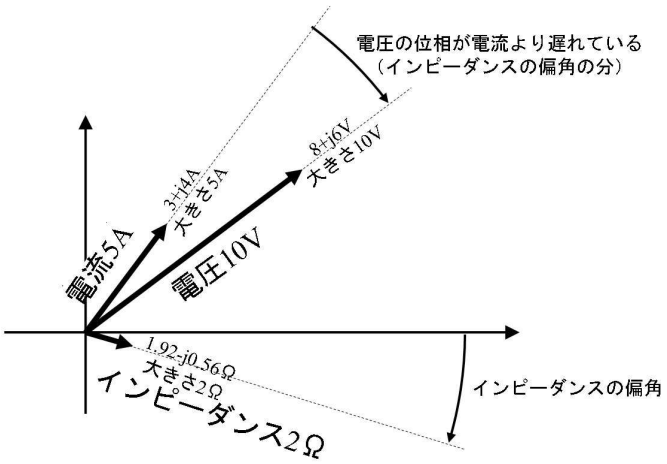
８＋ｊ６Ｖ　＝　（３＋ｊ４）Ａ　×　（１．９２－ｊ０．５６）Ω

つまり、$\dot{E} = \dot{I}\dot{Z}$

と、計算できます。

Ｅｘｃｅｌで「=IMPRODUCT("3+4i","1.92-0.56i")」と入力すると、「8+6i」と、上記の通りの結果が表示されます。

複素数を使ったオーム則の計算例を数に示します。このように、大きさだけではなく、位相（波のズレ：偏角）も計算できます。



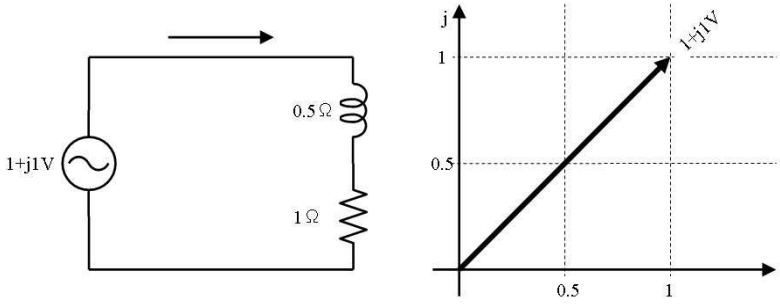
上図では、インピーダンスの偏角の分だけ、電流より電圧の位相が遅れていることが分ります。これは、複素数で電流とインピーダンスを掛けた結果、電流とインピーダンスの偏角の合計が電圧の偏角となった（複素数の掛け算では、偏角が足し算になる）ためです。

もちろん、複素電流、複素電圧、複素インピーダンス、それぞれの大きさ（絶対値）は、（方向のない）交流電流、インピーダンス、交流電圧の計算と一致します。

複素数電圧・電流でも使えるとは、オーム則はなかなかフトコロの広い法則です。

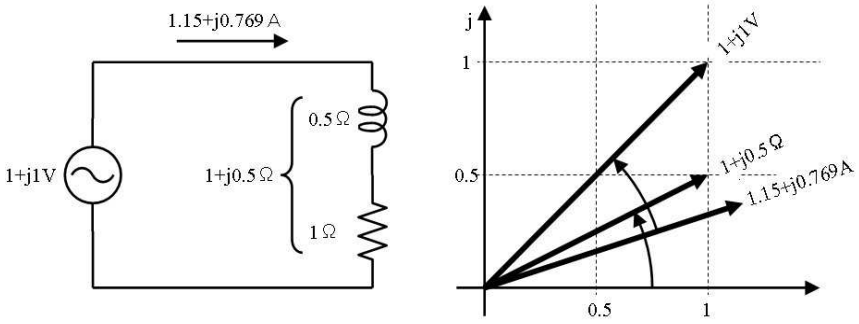
３.１. 練習（複素電圧のオーム則）

下図の回路のＬＲの複素インピーダンスと複素電流を求め、下図右側の図に書き込んでください。



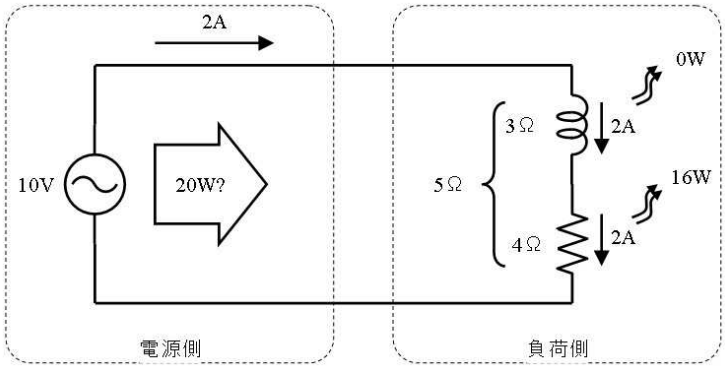
３.２. 答

Ｅｘｃｅｌで=IMDIV("1+1i","1+0.5")と計算して、1.15+0.768iと分る。これを下図のように記入する。



４．力率

下図の回路図は、３Ωのコイルと４Ωの抵抗が直列に接続されており、インピーダンスの大きさは５Ωです。電源が１０Ｖですから、２Ａの電流が流れます。



さて、上図左の電源側から見ると、１０Ｖで２Ａ流れているので、２０Wの電力を送り出しているように思えます。しかし、上図右の負荷側で見ると、（コイルは電流が流れても発熱しませんから）４Ωに２Ａ流れて、１６Wの電力を消費するだけです。

上図左側のように、電流と電圧を掛けて計算した（見かけの）電力を「皮相電力」と呼び、上図右側のように、本当に消費された電力を「有効電力」と呼んで、双方を区別します。（「皮相電力」とは難しい言い方ですが、英語の apparent power つまり「見た目の電力」を迷訳したものです。）

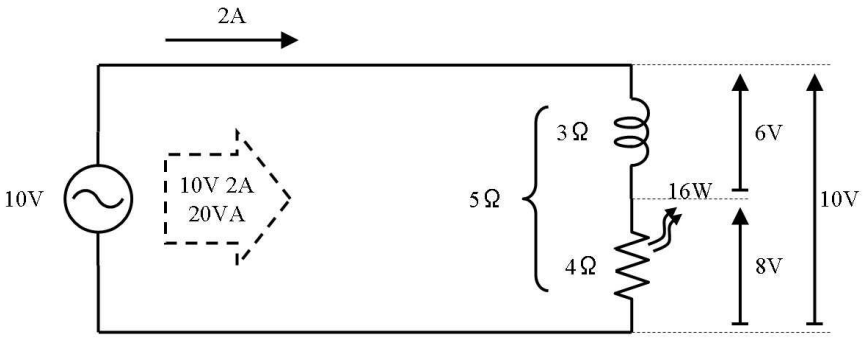
皮相電力や有効電力の意味や単位は次表のとおりです。

名前	意味	単位	単位の呼び方
皮相電力	電流と電圧の大きさを掛けた 見た目の電力	ＶＡ	ボルトアンペア あるいは　ブイエー
有効電力	本当に消費された電力	Ｗ	ワット

もちろん、皮相電力と有効電力の差が大きいと、電流や電圧は大きいのに、消費電力が少なくなり、不経済です。ですから、できるだけ皮相電力と有効電力が同じになるように工夫します。

その工夫の目安として、有効電力÷皮相電力の値を「力率」と呼んで使用します。力率が１（１００％）なら、有効電力＝皮相電力で、見た目の電力は、すべて有効に消費されています。力率が５０％なら、見た目の電力の半分しか有効活用されていません。

力率の計算には色々な方法があります。下図の回路を例に、下表で説明します。



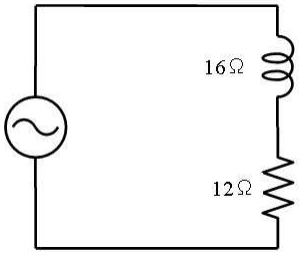
番号	力率の求め方	上図の例
①	有効電力 / 皮相電力	$\frac{16W}{20VA}=80\%$
②	抵抗の電圧 / 全体の電圧	$\frac{8V}{10V}=80\%$
③	抵抗値 / 全体のインピーダンス	$\frac{4\Omega}{5\Omega}=80\%$
④	cos(電圧と電流の位相差)	$\cos(\tan^{-1}(\frac{3\Omega}{4\Omega}))=80\%$

上表の①～④の中から「今、分っている値」「そのとき求めやすい値」が使える方法を選んで計算します。

ところで、④の方法は、この例では面倒なだけで論外です。それにも関わらず掲載したのは「力率」の事を「ｃｏｓθ」と呼ぶ人が多いからです。これは、「力率が、インピーダンスの偏角θのｃｏｓの値である」事から来た呼び名ですが、この呼び方では「θが何の角度なのか」分らないため、「力率」よりも不誠実な呼び方に思えます。（バイクの運転手を、単に「運転手」と呼んでいるようなものです。「運転手を連れてきてくれ」と頼んだのでは、自動車の運転手が来るかも知れません）それにもかかわらず、書籍でも使われる他、口頭でも「コサインシータを測定しといてくれ」等と使われています。

4.1. 練習

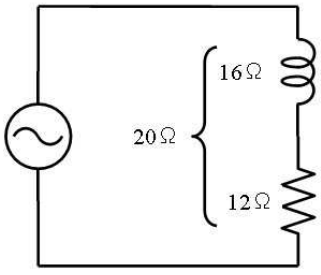
下図の回路の力率を求めて下さい。



力率［　　］%

4.2. 答

インピーダンスが分っているので、上表③の方法で計算します。



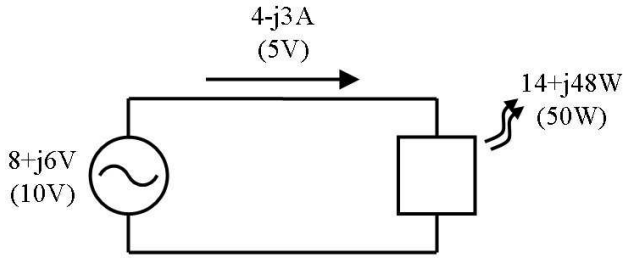
$$\text{全体のインピーダンス}=\sqrt{16^2+12^2}=20\Omega$$

$$\frac{\text{抵抗}}{\text{全体のインピーダンス}}=\frac{12\Omega}{20\Omega}=60\%$$

力率 ６０％ %

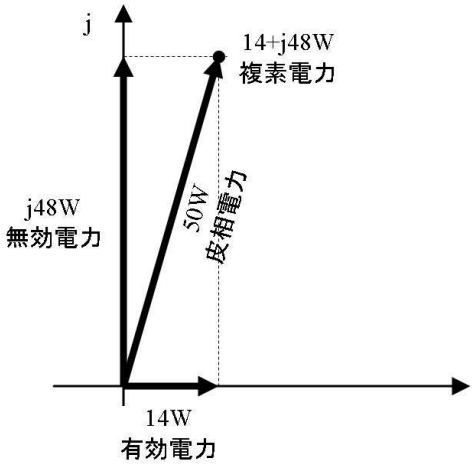
５．複素電力

複素電圧にオーム則が使えたように、複素電圧と複素電流から複素電力を求めることもできます。たとえば、下図のように８＋ｊ６Ｖで４－ｊ３Ａが流れた場合は、

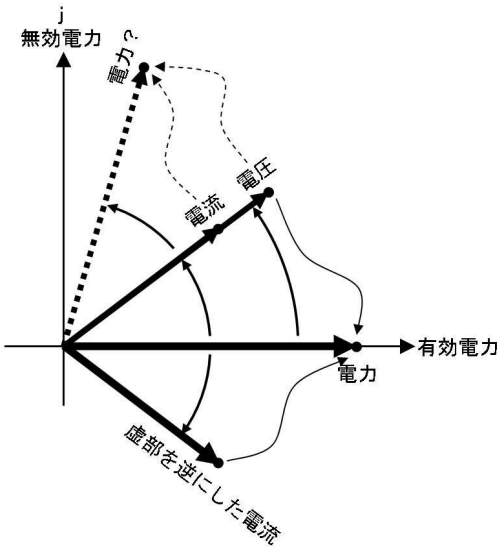


Ｅｘｃｅｌで、=IMPRODUCT("8+6i","4+3i")と入力する事で、複素電力が 14+58i と計算されます。電流の「３－ｊ４」のｊの部分（虚部）の符号を反転して「３＋ｊ４」と入力する点に注意します。（理由は後述します）

こうして求めた複素電力を下図に示します。図で分るように、複素電力は、有効電力（実部）も皮相電力（絶対値）も表現しています。さらに、複素電力の虚部は「無効電力」と呼ばれています。このように、複素電力は交流電力の色々な要素を一発で表すことができます。



さて、複素電力を求めるときに、電流の虚部を逆符号にしました。ちょっと不自然です。その理由は、下図のような、電流と電圧の位相が同じ場合を考えると理解できます。電流と電圧の位相が同じなら、有効電力だけが発生して、無効電力は発生しない（力率が１００%になる）筈です。



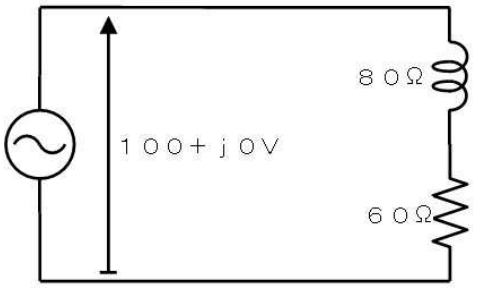
さて、電圧と電流の掛け算では、電流と電圧の偏角が合計されるため、そのまま掛けると上図に点線で示す電力のように、無効な成分（上向きの成分）が大半となります。

ところが、電流の虚部を逆符号にして計算してやると、電圧の偏角は上向き（＋）、電流の偏角は下向き（－）で、掛けると（掛け算は、偏角の足し算なので）打ち消しあって偏角がゼロとなり、上図に実線で示す電力のように、ちょうど右向きの有効電力だけになります。

つまり、複素電力を求めるときに電流の虚部を逆符号にする理由は、電圧と電流の位相が同じときに、有効電力だけが得られるようにするためです。

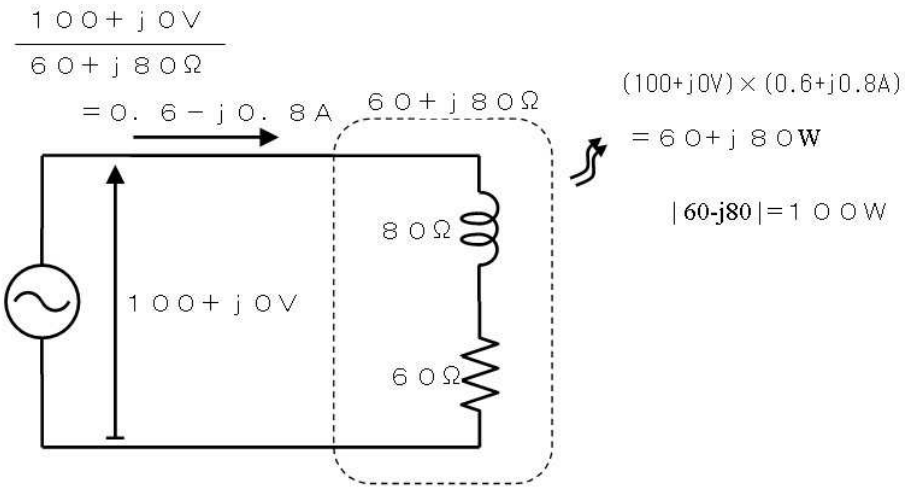
5.1. 練習

Ｅｘｃｅｌを用いて、下図の回路の負荷で発生する複素電力を求め、有効電力、無効電力、皮相電力を計算してください。



複素電力＿＿＿＿＿＿Ｗ　有効電力＿＿＿＿＿Ｗ　無効電力＿＿＿＿＿ＶＡ　皮相電力＿＿＿＿＿ＶＡ

5.2. 答



複素電力６０＋ｊ８０W　有効電力　　６０W　無効電力　　８０ＶＡ　皮相電力　１００ＶＡ

複素電流はＥｘｃｅｌで=IMDIV("100+0i","60+80i")で０．６－ｊ０．８Ａ

複素電力はＥｘｃｅｌで=IMPRODUCT("100+0i","0.6+0.8i")

あるいは、=IMPRODUCT("100+0i",IMCONJUGATE(IMDIV("100+0i","60+80i")))で６０＋ｊ８０W

尚、複素電力は電流を計算せずに、

$$\frac{\text{複素電圧}\times\text{複素電圧}^{+}}{\text{複素インピーダンス}}=\frac{\dot{E}\dot{E}^{*}}{\dot{Z}}$$

でも計算できます。

Ｅ*はＥの虚部の符号を逆にした（共役の）数です。Ｅｘｃｅｌでは IMCONJUGATE()です。

Ｅｘｃｅｌでは、=IMDIV(IMPRODUCT("100+0i",IMCONJUGATE("100+0i")),"80+80i")で計算できます。もちろん、この例では電圧の虚部がゼロなので、IMCONJUGATE がなくても同じ結果が出ます。

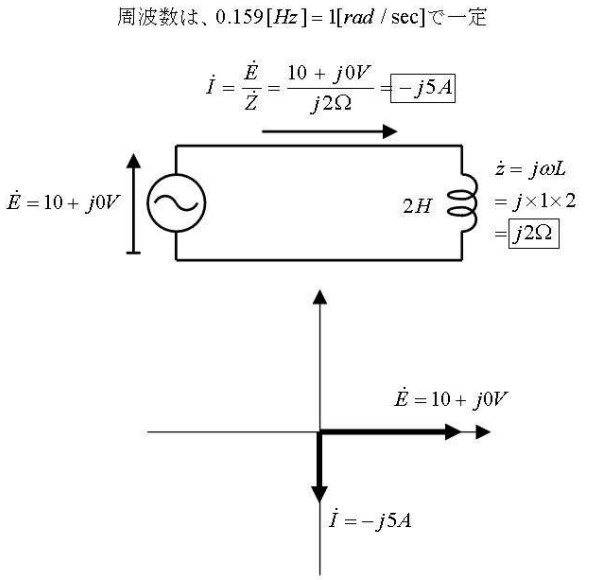
８．交流回路後編（周波数の変動を扱う場合）

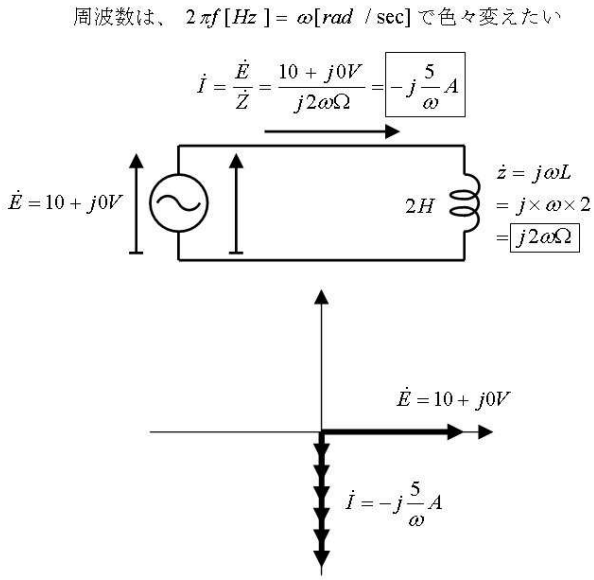
１．周波数は後で決める

周波数が一定の電力分野等であれば、例えば「このコイルはｊ２Ω」と、予め求めたインピーダンスで計算することができます。

例えば下図左側では、周波数が０．１５９Ｈｚと一定であり、２Ｈのコイルはｊ２Ωと決まっています。ですから、電圧が１０＋ｊ０Ｖであれば、回路に流れる電流は、図中の計算により、－ｊ５Ａと分ります。

その結果、同図左下のフェーザで示すように、電圧より９０°遅れて、大きさが５Ａの電流が流れると求めることができます。





ところがオーディオ回路等の「様々な周波数の交流を扱いたい」回路では、このように周波数を決め打ちすることができません。周波数は変数にしておいて、後で色々な周波数で計算したいからです。そこで、周波数を決め打ちせず、角周波数ωのまま残します。

角周波数ωの代わりに、周波数ｆを使っても良いのですが、角周波数ならωＬで済むところを、周波数では２πｆＬと書かなくてはならないため、手間を省くために角周波数が使われます。

ωを使うと、上図右側のように、コイルのインピーダンスはｊ２ωΩ、となり、その結果回路に流れる電流は、$-j\frac{5}{\omega}A$となります。

このようにして、一旦 $\dot{I} = -j\frac{5}{\omega}A$ を求めておけば、例えば角周波数ωが１０００rad/sec の場合（つまり１５９Ｈｚの場合）は、$\dot{I} = -j\frac{5}{1000}A = -j5mA$ と、周波数に応じて流れる電流を簡単に求めることができます。

２．実は数学は殆ど使いません

このように、周波数を後で決めるようにすると、式が入り組んで来ます。学校で数式に辟易した方は、

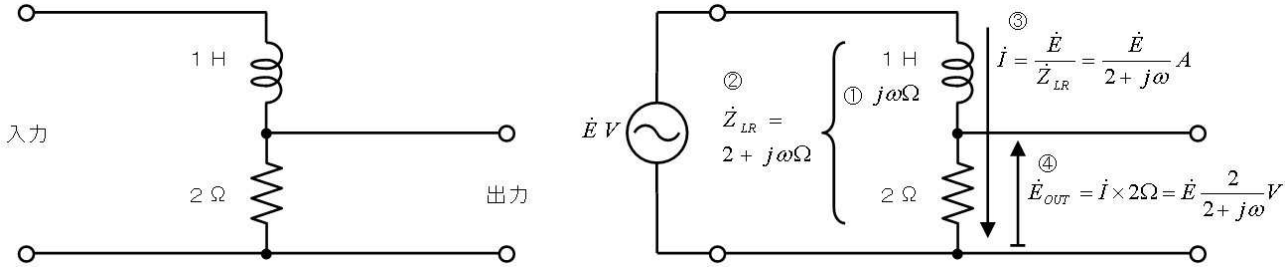
「数学が苦手だと苦しそうだな」と思うかもしれませんが、全くそんなことはありません。

まず、オーム則で電流や電流を求めたり、インピーダンスの足し算をしたりする計算が組み合わされているだけすから、「四則演算」しか出てきません。

さらに、「式が出てきたら、綺麗に変形して整理しなければならない」（学校でそう言われたから）と思い勝ちですが、その必要が無いのです。最初に作った形のままＥｘｃｅｌに入力して、結果を計算させれば良いからです。

３．回路の出力電圧を求める

下図左側の回路の入力に、フェーザ（大きさと位相）が $\dot{E}$ で、角周波数ωの交流を加えたときの出力を求めます。



上図右側の①②③…の順で考えます。

①１Ｈのコイルのインピーダンスは $j\omega\Omega$ です。（$Z_L = j\omega L[\Omega]$）

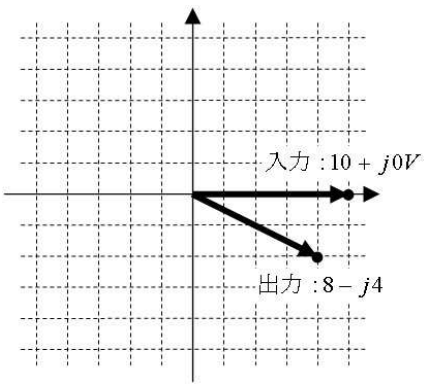
②コイルと抵抗の直列合成インピーダンスは、双方のインピーダンスを合計して $2 + j\omega[\Omega]$ です。

③入力に交流 $\dot{E}[V]$ を加えたときに、直列回路に流れる電流は、$\frac{\dot{E}}{2 + j\omega}[A]$ です。

上で求めた電流が、２Ωの抵抗に流れて発生する電圧が、「出力電圧」ですから、

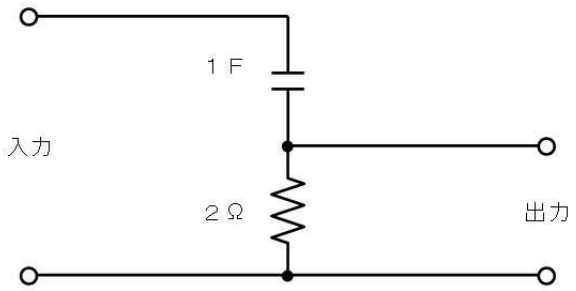
④出力電圧は $2\frac{\dot{E}}{2 + j\omega}[V]$、ちょっと変形して（必須ではありません）$\dot{E}\frac{2}{2 + j\omega}[V]$ となります。

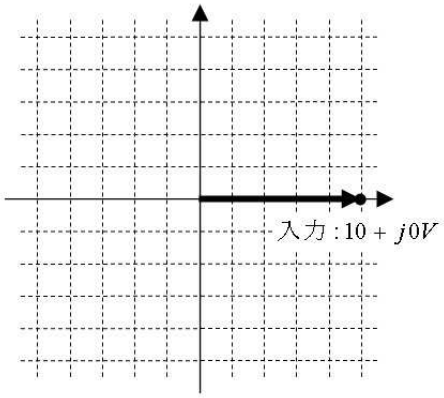
たとえば、角周波数ωが１rad/sec（０．１６Ｈｚ）で、入力が１０＋ｊ０ [V]の場合の出力電圧は、Ｅｘｃｅｌのセルに、=IMPRODUCT(2,IMDIV(10,"2+i"))、と入力すれば、８－ｊ４と表示されます。（複素数の計算はＥｘｃｅｌがやりますから、手計算はあまり必要ではありません。）



３.１. 練習

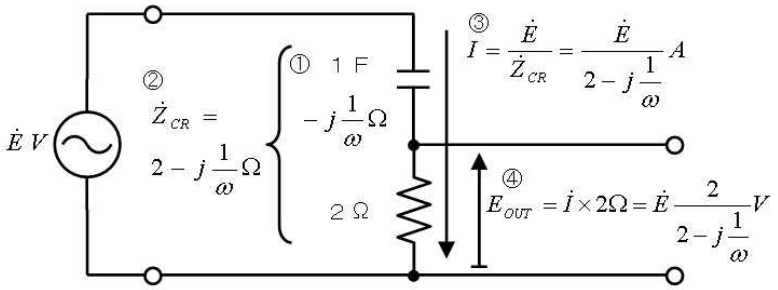
下図の回路の入力に、$\dot{E}[V]$（角周波数ω）を加えたときに、出力に現れる電圧を、下表の空欄を記入して考えてください。また、１０＋ｊ０Ｖを入力に加えた場合の出力電圧のフェーザを下図右側に書き込んで下さい。（この回路は「ＣＲ微分回路」と呼ばれています）

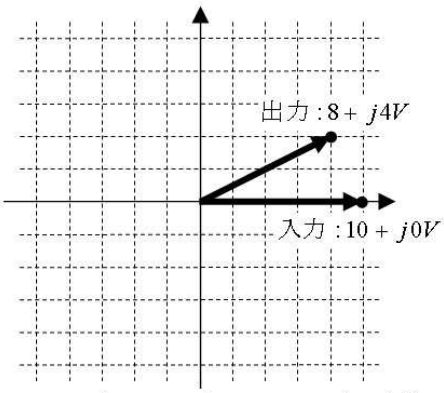




１Ｆのコンデンサの、角周波数ωでの複素インピーダンスは、 $Z_L = -j\frac{1}{\omega C}L[\Omega]$ より、	
コンデンサと抵抗の直列合成インピーダンスは、双方のインピーダンスを合計して、	
入力に交流 $\dot{E}[V]$ を加えたときに、直列回路に流れる電流は、	
上で求めた電流が、２Ωに流れて発生した電圧が出力電圧ですから、出力電圧は、	
たとえば、１０＋ｊ０Ｖ、角周波数１rad/sec（０．１６Ｈｚ）の電圧を入力した場合の出力は、Ｅｘｃｅｌを用いて、	

3.2. 答



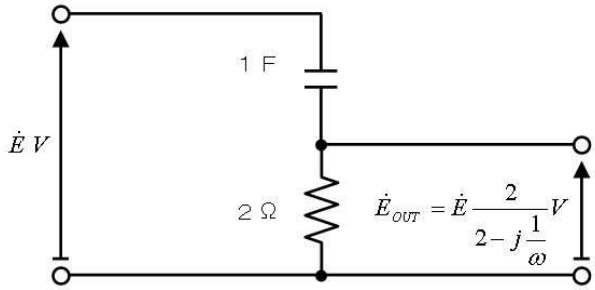


出力=IMPRODUCT(10,IMDIV(2,COMPLEX(2,-1/1)))=8+4i

１Ｆのコンデンサの、角周波数ωでの複素インピーダンスは、 $Z_L=-j\frac{1}{\omega C}L[\Omega]$ より、	$-j\frac{1}{\omega}[\Omega]$
コンデンサと抵抗の直列合成インピーダンスは、双方のインピーダンスを合計して、	$2-j\frac{1}{\omega}[\Omega]$
入力に交流 $\dot{E}[V]$ を加えたときに、直列回路に流れる電流は、	$\frac{\dot{E}}{2-j\frac{1}{\omega}}[A]$
上で求めた電流が、２Ωに流れて発生した電圧が出力電圧ですから、出力電圧は、	$\dot{E}\frac{2}{2-j\frac{1}{\omega}}[V]$
たとえば、１０＋ｊ０Ｖ、角周波数１rad/sec（０．１６Ｈｚ）の電圧を入力した場合の出力は、Ｅｘｃｅｌのセルに、 =IMPRODUCT(2,IMDIV(10,"2+i")) と入力して、	$8+j4[V]$

４．周波数による出力の変化

さて、周波数を決め打ちせずに、角周波数ωで表したのは「あとで周波数を変えて色々計算する」ためでした。それでは実際に、練習問題で扱った下図の回路に、様々な周波数（角周波数）の交流（フェーザは１０＋ｊ０Ｖ（大きさ１０Ｖで、ペダルは最初右向き）とします）を加えて、出力がどのように変化するか確認します。



練習問題の答から、出力は $\dot{E}\ \dfrac{2}{2-j\dfrac{1}{\omega}}[V]$ と分っています。この式は、Ｅｘｃｅｌで、

=IMPRODUCT(「入力」,IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",「ω」))))

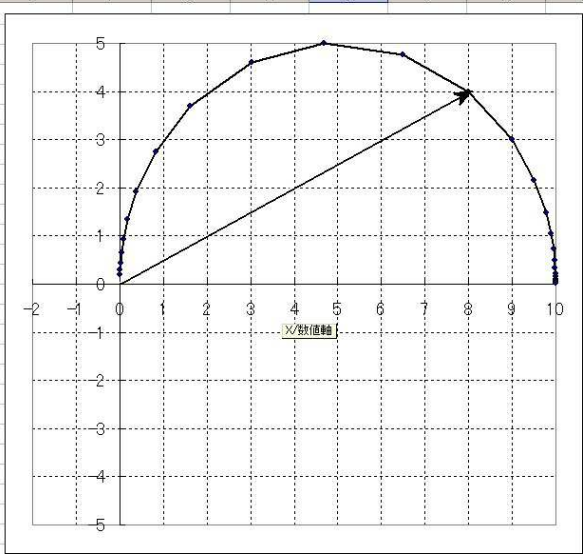
のように計算できます。あとは、「入力」（$\dot{E}$ ）を与えて、「ω」を少しずつ変えて結果を観察するだけです。ここでは入力は１０＋ｊ０（つまり=COMPLEX(10,0)）で、ωはＡ列で指定します。

ます、Ｅｘｃｅｌに下図のように入力します。Ａ列以外のセルは、一行入力して下向きにコピーするだけです。Ａ列（角周波数）のセルは最初の６行を入力し他の値、７行目を入力して（７行目だけを）下向きにコピーします。

	A	B	C	D
1	角周波数ω	出力	出力の実部	出力の虚部
2	0.01	=IMPRODUCT(COMPLEX(10,0),IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",A2))))	=IMREAL(B2)	=IMAGINARY(B2)
3	0.015	=IMPRODUCT(COMPLEX(10,0),IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",A3))))	=IMREAL(B3)	=IMAGINARY(B3)
4	0.022	=IMPRODUCT(COMPLEX(10,0),IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",A4))))	=IMREAL(B4)	=IMAGINARY(B4)
5	0.033	=IMPRODUCT(COMPLEX(10,0),IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",A5))))	=IMREAL(B5)	=IMAGINARY(B5)
6	0.047	=IMPRODUCT(COMPLEX(10,0),IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",A6))))	=IMREAL(B6)	=IMAGINARY(B6)
7	0.068	=IMPRODUCT(COMPLEX(10,0),IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",A7))))	=IMREAL(B7)	=IMAGINARY(B7)
8	=A2*10	=IMPRODUCT(COMPLEX(10,0),IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",A8))))	=IMREAL(B8)	=IMAGINARY(B8)
9	=A3*10	=IMPRODUCT(COMPLEX(10,0),IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",A9))))	=IMREAL(B9)	=IMAGINARY(B9)
10	=A4*10	=IMPRODUCT(COMPLEX(10,0),IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",A10))))	=IMREAL(B10)	=IMAGINARY(B10)
11	=A5*10	=IMPRODUCT(COMPLEX(10,0),IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",A11))))	=IMREAL(B11)	=IMAGINARY(B11)
12	=A6*10	=IMPRODUCT(COMPLEX(10,0),IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",A12))))	=IMREAL(B12)	=IMAGINARY(B12)
13	=A7*10	=IMPRODUCT(COMPLEX(10,0),IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",A13))))	=IMREAL(B13)	=IMAGINARY(B13)
14	=A8*10	=IMPRODUCT(COMPLEX(10,0),IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",A14))))	=IMREAL(B14)	=IMAGINARY(B14)
15	=A9*10	=IMPRODUCT(COMPLEX(10,0),IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",A15))))	=IMREAL(B15)	=IMAGINARY(B15)
16	=A10*10	=IMPRODUCT(COMPLEX(10,0),IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",A16))))	=IMREAL(B16)	=IMAGINARY(B16)
17	=A11*10	=IMPRODUCT(COMPLEX(10,0),IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",A17))))	=IMREAL(B17)	=IMAGINARY(B17)
18	=A12*10	=IMPRODUCT(COMPLEX(10,0),IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",A18))))	=IMREAL(B18)	=IMAGINARY(B18)
19	=A13*10	=IMPRODUCT(COMPLEX(10,0),IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",A19))))	=IMREAL(B19)	=IMAGINARY(B19)
20	=A14*10	=IMPRODUCT(COMPLEX(10,0),IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",A20))))	=IMREAL(B20)	=IMAGINARY(B20)
21	=A15*10	=IMPRODUCT(COMPLEX(10,0),IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",A21))))	=IMREAL(B21)	=IMAGINARY(B21)
22	=A16*10	=IMPRODUCT(COMPLEX(10,0),IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",A22))))	=IMREAL(B22)	=IMAGINARY(B22)
23	=A17*10	=IMPRODUCT(COMPLEX(10,0),IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",A23))))	=IMREAL(B23)	=IMAGINARY(B23)
24	=A18*10	=IMPRODUCT(COMPLEX(10,0),IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",A24))))	=IMREAL(B24)	=IMAGINARY(B24)
25	=A19*10	=IMPRODUCT(COMPLEX(10,0),IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",A25))))	=IMREAL(B25)	=IMAGINARY(B25)
26	=A20*10	=IMPRODUCT(COMPLEX(10,0),IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",A26))))	=IMREAL(B26)	=IMAGINARY(B26)
27	=A21*10	=IMPRODUCT(COMPLEX(10,0),IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",A27))))	=IMREAL(B27)	=IMAGINARY(B27)
28	=A22*10	=IMPRODUCT(COMPLEX(10,0),IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",A28))))	=IMREAL(B28)	=IMAGINARY(B28)

すると、計算結果は下図のようになります。出力の実部と出力の虚部を「散布図」でグラフに描いています。グラフの上に、過去の練習問題で計算した角周波数（ω＝１）の出力のフェーザ（８＋ｊ４）を書き加えています。

	A	B	C	D
1	角周波数ω	出力	出力の実部	出力の虚部
2	0.01	3.99840063974 41E-003+0.199920031987205i	0.003998401	0.199920032
3	0.015	8.99190728344489E-003+0.299730242781497i	0.008991907	0.299730243
4	0.022	1.93225914629277E-002+0.439149805975631i	0.019322591	0.439149806
5	0.033	4.33710755947095E-002+0.657137509010749i	0.043371076	0.657137509
6	0.047	8.75860893148139E-002+0.931766907604405i	0.087586089	0.931766908
7	0.068	0.181601105944451+1.33530224959155i	0.181601106	1.33530225
8	0.1	0.384615384615385+1.92307692307692i	0.384615385	1.923076923
9	0.15	0.825688073394495+2.75229357798165i	0.825688073	2.752293578
10	0.22	1.62198391420911+3.68632707774799i	1.621983914	3.686327078
11	0.33	3.03427138478685+4.59738088604068i	3.034271385	4.597380886
12	0.47	4.69101720110426+4.99044383096199i	4.691017201	4.990443831
13	0.68	6.49073554183042+4.77259966311061i	6.490735542	4.772599663
14	1	8+4i	8	4
15	1.5	9+3i	9	3
16	2.2	9.50884086444008+2.161100196466366i	9.508840864	2.161100196
17	3.3	9.77558348294434+1.481149012567 32i	9.775583483	1.481149013
18	4.7	9.88809310653536+1.051924795 56759i	9.888093107	1.051924799
19	6.8	9.946224994 6225+0.731340073134008i	9.946224995	0.731340073
20	10	9.97506234413965+0.498753117206983i	9.975062344	0.498753117
21	15	9.98890122086571+0.332963374028857i	9.988901221	0.332963374
22	22	9.99483737738771+0.22715539494063i	9.994837377	0.227155395
23	33	9.99770484278173+0.151480376405784i	9.997704843	0.151480376
24	47	9.99886839425144+0.106370940364377i	9.998868394	0.10637094
25	68	9.99945937179002+7.35254365572797E-002i	9.999459372	0.073525437
26	100	9.99975000624984+4.99987500312492E-002i	9.999750006	0.04999875
27	150	9.99988889012344+3.33329629670782E-002i	9.99988889	0.033332963



上図のグラフを見れば、周波数が変わると出力のフェーザがどのように変化するか分ります。つまり、周波数が低い（ωが小さい）ときは、出力もとても小さいですが、周波数が高くなるにつれて、半円を描いて時計回りに出力が大きくなって行き、ω＝１（練習問題で扱った場合）に、８＋ｊ４Ｖが出力されます。（大きさは約９Ｖ）。そして、周波数が十分高くなると、ほぼ１０Ｖが出力されると分ります。

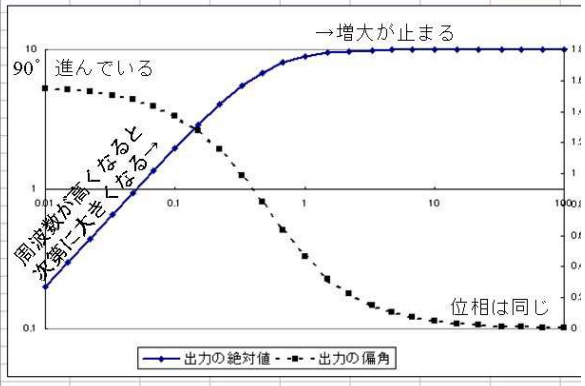
５. 出力の大きさ（絶対値）と位相（偏角）

上で作成したＥｘｃｅｌシートの一部（「出力の実部」と「出力の虚部」の部分）を変更して、下図のように「出力の絶対値」（大きさ）と「出力の偏角」（位相）を表示させます。

	A	B	C	D
1	角周波数ω	出力	出力の絶対値	出力の偏角
2	0.01	=IMPRODUCT(COMPLEX(10,0),IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",A2))))	=IMABS(B2)	=IMARGUMENT(B2)
3	0.015	=IMPRODUCT(COMPLEX(10,0),IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",A3))))	=IMABS(B3)	=IMARGUMENT(B3)
4	0.022	=IMPRODUCT(COMPLEX(10,0),IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",A4))))	=IMABS(B4)	=IMARGUMENT(B4)
5	0.033	=IMPRODUCT(COMPLEX(10,0),IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",A5))))	=IMABS(B5)	=IMARGUMENT(B5)

計算結果は下図のようになります。周波数を横軸（対数）に、絶対値（対数）と偏角を縦軸に、散布図グラフを作成しています。（グラフでは「対数」と「第２軸」の機能を使っています）

	A	B	C	D
1	角周波数ω	出力	出力の絶対値	出力の偏角
2	0.01	3.9984006397441E-003+0.19992003198720 5i	0.199960012	1.550798993
3	0.015	8.9919072834489E-003+0.29973024278149 7i	0.299865091	1.540805322
4	0.022	1.9322591462927 7E-002+0.43914980597563 1i	0.439574697	1.526824689
5	0.033	4.3371075594709 5E-002+0.65713750901 0749i	0.658567199	1.504891909
6	0.047	8.7586089314813 9E-002+0.93176690760440 5i	0.9358744	1.47707173
7	0.068	0.18160110594445 1+1.33530224958155i	1.347594546	1.435625628
8	0.1	0.38461538461538 5+1.92307692307692i	1.961161351	1.373400767
9	0.15	0.82568807339449 5+2.75229357798165i	2.873478856	1.279339532
10	0.22	1.62198391420911+3.68632707774799i	4.027386143	1.156289452
11	0.33	3.03427138478685+4.59738088604068i	5.508422083	0.98742332
12	0.47	4.69101720110426+4.99044383096199i	6.849100088	0.816316143
13	0.68	6.49073554183042+4.77259966311061i	8.056510126	0.63402272
14	1	8+4i	8.94427191	0.463647609
15	1.5	9+3i	9.486832981	0.321750554
16	2.2	9.50884086444008+2.16110019646366i	9.751328558	0.223476601
17	3.3	9.77558348294434+1.48114901256732i	9.887155042	0.150371428
18	4.7	9.88809310653536+1.05192479856759i	9.943889132	0.105984358
19	6.8	9.94622499462 25+0.73134007313400 8i	9.973076253	0.073397326
20	10	9.97506234413965+0.49875311720698 3i	9.987523389	0.049958396
21	15	9.98890122086571+0.33296337402885 7i	9.99444907	0.033320996
22	22	9.99483737738771+0.22715539494063i	9.997418355	0.022723361
23	33	9.99770484278173+0.15148037640578 4i	9.998852356	0.015150356
24	47	9.99886839425144+0.10637094036437 7i	9.999434181	0.010637897
25	68	9.99945937179002+7.35254365572797E-002i	9.999729682	0.007352809
26	100	9.99975000624984+4.99987500312492E-002i	9.999875002	0.004999958
27	150	9.99988889012344+3.33329629670782E-002i	9.999944445	0.003333321

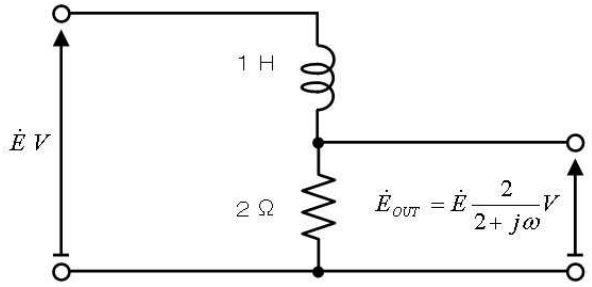


グラフを見ると、絶対値（出力電圧の大きさ）は、周波数が高くなると次第に大きくなりますが、ωが１のあたりで増大が止まり、それ以上周波数が高くなっても、殆ど変化しないことが分ります。

また位相は、周波数が低い場合は１．６rad 程度（９０°）進んでいますが、周波数が高くなると、ほぼ ０°（入力した電圧と同じ方向のフェーザが出力される）と分ります。

５.１. 練習

下図の回路に１０＋ｊ０Ｖの入力電圧を加え、ωを変化させたときの、出力フェーザの変化、出力の大きさ（絶対値）の変化、出力位相の変化を、Ｅｘｃｅｌを使ってグラフに表示してください。



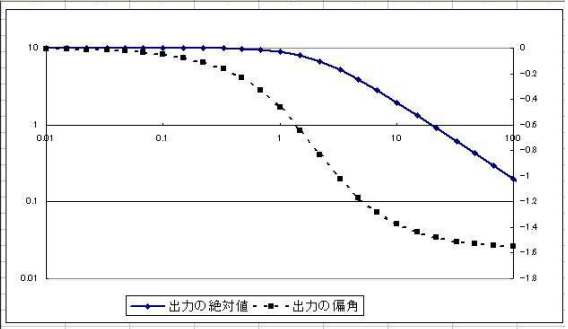
5.2. 答

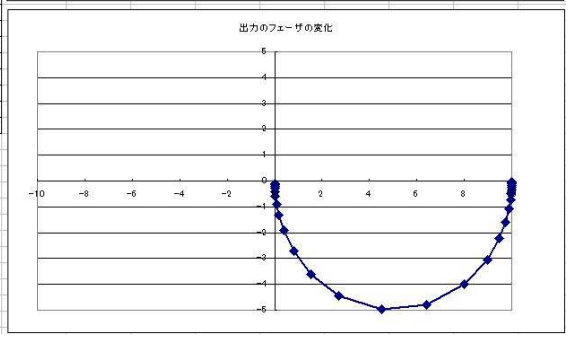
下図ようにＥｘｃｅｌに入力します。

	A	B	C	D	E	F
1	角周波数ω	出力	出力の実部	出力の虚部	出力の絶対値	出力の偏角
2	0.01	=IMPRODUCT(COMPLEX(10,0),IMDIV(2,COMPLEX(2,A2)))	=IMREAL(B2)	=IMAGINARY(B2)	=IMABS(B2)	=IMARGUMENT(B2)
3	0.015	=IMPRODUCT(COMPLEX(10,0),IMDIV(2,COMPLEX(2,A3)))	=IMREAL(B3)	=IMAGINARY(B3)	=IMABS(B3)	=IMARGUMENT(B3)
4	0.022	=IMPRODUCT(COMPLEX(10,0),IMDIV(2,COMPLEX(2,A4)))	=IMREAL(B4)	=IMAGINARY(B4)	=IMABS(B4)	=IMARGUMENT(B4)
5	0.033	=IMPRODUCT(COMPLEX(10,0),IMDIV(2,COMPLEX(2,A5)))	=IMREAL(B5)	=IMAGINARY(B5)	=IMABS(B5)	=IMARGUMENT(B5)
6	0.047	=IMPRODUCT(COMPLEX(10,0),IMDIV(2,COMPLEX(2,A6)))	=IMREAL(B6)	=IMAGINARY(B6)	=IMABS(B6)	=IMARGUMENT(B6)
7	0.068	=IMPRODUCT(COMPLEX(10,0),IMDIV(2,COMPLEX(2,A7)))	=IMREAL(B7)	=IMAGINARY(B7)	=IMABS(B7)	=IMARGUMENT(B7)
8	=A2*1.0	=IMPRODUCT(COMPLEX(10,0),IMDIV(2,COMPLEX(2,A8)))	=IMREAL(B8)	=IMAGINARY(B8)	=IMABS(B8)	=IMARGUMENT(B8)

計算結果は下図のようになります。

	A	B	C	D	E	F
1	角周波数ω	出力	出力の実部	出力の虚部	出力の絶対値	出力の偏角
2	0.01	9.99975000624984-4.99987500312492E-002i	9.99975001	-0.0499988	9.999875002	-0.005
3	0.015	9.99943753163884-7.49957814872913E-002i	9.99943753	-0.0749958	9.999718762	-0.0074999
4	0.022	9.99879014639229-0.109866691610315i	9.99879015	-0.1099867	9.999395055	-0.0109996
5	0.033	9.99727824099889-0.164955090976482i	9.99727824	-0.1649551	9.998639028	-0.0164985
6	0.047	9.99448054811173-0.234870292880757i	9.99448055	-0.2348703	9.997239893	-0.0234957
7	0.068	9.98845334792979-0.339607413829613i	9.98845335	-0.3396074	9.994225006	-0.0339869
8	0.1	9.97506234413965-0.498753117206983i	9.97506234	-0.4987531	9.987523389	-0.0499584
9	0.15	9.94406463642014-0.745804847731151i	9.94406464	-0.7458048	9.971993099	-0.0748598
10	0.22	9.88044659618615-1.086849125580481i	9.8804466	-1.0868491	9.940043559	-0.1095595
11	0.33	9.73496556255932-1.606269317822291i	9.73496556	-1.6062693	9.866592909	-0.1635266
12	0.47	9.47665189888412-2.227013196237771i	9.4766519	-2.2270132	9.734809653	-0.230812
13	0.68	8.96378630333453-3.047687343133741i	8.9637863	-3.0476873	9.467727448	-0.3277385
14	1	8-4i	8	-4	8.94427191	-0.4636476
15	1.5	6.4-4.8i	6.4	-4.8	8	-0.6435011
16	2.2	4.52488687782805-4.97737556561086i	4.52488688	-4.9773756	6.72672794	-0.8329813
17	3.3	2.68636668905306-4.43250503693754i	2.68636669	-4.432505	5.183017161	-1.0259324
18	4.7	1.53315446531238-3.60291299348409i	1.53315447	-3.602913	3.915551641	-1.1684752
19	6.8	0.796178343949045-2.70700636942675i	0.79617834	-2.7070064	2.82166324	-1.2847449
20	10	0.384615384615385-1.92307692307692i	0.38461538	-1.9230769	1.961161351	-1.3734008
21	15	0.174672489082969-1.31004366812227i	0.17467249	-1.3100437	1.321637201	-1.4382448
22	22	8.19672131147541E-002-0.901639344262295i	0.08196721	-0.9016393	0.90535746	-1.4801364
23	33	3.65965233302836E-002-0.603842634949468i	0.03659652	-0.6038426	0.604950604	-1.5102643
24	47	1.80750112968821E-002-0.424762765476728i	0.01807501	-0.4247628	0.425147166	-1.5282688
25	68	8.64304235090752E-003-0.293863439930856i	0.00864304	-0.2938634	0.293990516	-1.541393
26	100	3.9984006397441E-003-0.199920031987205i	0.0039984	-0.19992	0.19996012	-1.550799
27	150	1.77746178457163E-003-0.133309633842872i	0.00177746	-0.1333096	0.133321483	-1.5574638
28	220	8.26377985290472E-004-9.09015783819519E-00	0.00082638	-0.0909016	0.090905335	-1.5617057





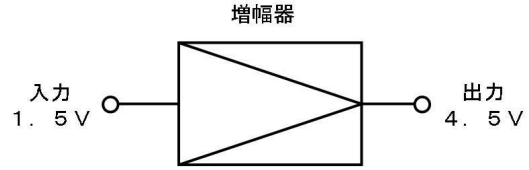
周波数が高くなると、出力が小さくなり、位相が遅れて行くことが分ります。

6. 周波数伝達関数

「周波数伝達関数」は誤解し易い名前です。「周波数を伝達する様子を表す関数」ではありません。「周波数で増幅率（つまり、入力の出力への伝達）が変化する様子を表す関数」という意味です。例えば「１００Ｈｚで増幅率は何倍ですか」と聞けば「３倍です」等と答えてくれる式のことです。

さて、下図に３倍の増幅器を示します。１．５Ｖを入力すると、３倍されて、４．５Ｖが出力されています。このように増幅器では、例えば「３倍」等と、「増幅率」が重要な性能です。逆に、増幅率が３倍と分っていれば、１０Ｖ入力すれば、３０Ｖが出力される（つまり、入力×倍率＝出力）と計算することもできます。

ところでこの「増幅率」は、出力を入力で割って求めたものです。つまり、出力を入力で割れば、その回路の重要な性質を表すことができるのです。



$$\frac{\text{出力}}{\text{入力}} = \frac{4.5V}{1.5V} = 3\text{倍}$$

入力や出力は、電圧でも電流でも構いません。例えば、電流を入力すれば、電圧を出力する回路もあります。しかしここでは「電圧を入力して、電圧を出力する」（良くある）回路だけを考えます。

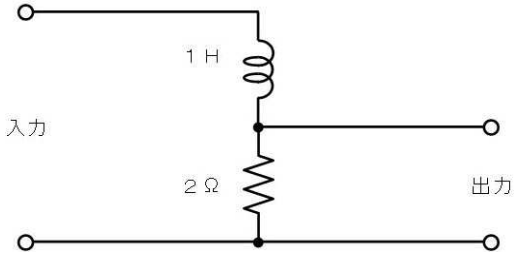
ところで、信号（入力や出力）には、直流や交流等の様々な種類があります。そこで次表に、各種の信号の種類毎に、出力を入力で割った値の例を示します。

出力÷入力の色々

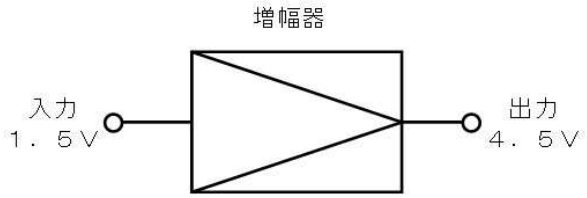
信号種類	直流電圧	交流		
		交流電圧（大きさ）	複素電圧（周波数固定）	複素電圧（後決め周波数ω）
入力の例	$1.5V_{DC}$	$1.5V_{AC}$	10+j0V	10+j0V
出力の例	$4.5V_{DC}$	$4.5V_{AC}$	8-j4V	$\frac{20+j0}{2+j\omega}V$
$\frac{出力}{入力}$	$\frac{4.5V_{DC}}{1.5V_{DC}}$ ＝3倍	$\frac{4.5VD_{AC}}{1.5V_{AC}}$ ＝3倍	$\frac{8-j4}{10+j4}$ $=0.55-j0.62$倍	$\frac{\frac{20+j0}{2+j\omega}}{10+j0}$ $=\frac{2}{2+j\omega}$倍
名前	直流電圧増幅率	交流電圧増幅率	(複素電圧増幅率？)	周波数伝達関数

上表一番右側の「周波数（ω）を後から決めて計算できる、複素電圧の増幅率（出力÷入力）を「周波数伝達関数」と呼びます。

尚、上表右側は練習問題で取り上げた、下図の回路を表しています。

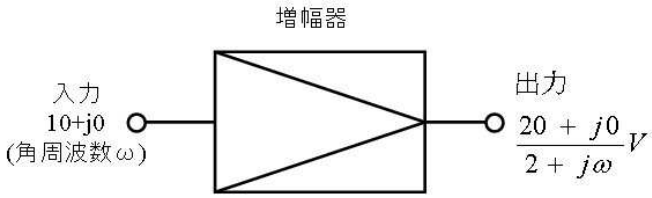


さて、「増幅率」も「伝達関数」も、出力÷入力で求める点では、同じ仲間でした。下図左側に「増幅率」、同図右側に「伝達関数」の例を示します。



$$増幅率 = \frac{出力}{入力} = \frac{4.5V}{1.5V} = 3倍$$

$$出力 = 入力 \times 増幅率 = 1.5V \times 3倍 = 4.5V$$



$$周波数伝達関数 = \frac{\frac{20+j0}{2+j\omega}}{10+j0} = \frac{2}{2+j\omega}倍$$

$$出力 = 入力 \times 周波数伝達関数 = 10+j0V \times \frac{2}{2+j\omega} = \frac{20+j0}{2+j\omega}V$$

上図左側の例では、出力の４．５Ｖを入力の１．５Ｖで割って、増幅率の３倍を求めています。逆に、入力の１．５Ｖに増幅率の３倍を掛けると、出力の４．５Ｖを計算できます。

上図右側の例では、出力の$\frac{20+j0}{2+j\omega}$Ｖを入力の$10+j0$Ｖで割って、伝達関数の$\frac{2}{2+j\omega}$を求めています。逆に、入力の$10+j0$Ｖに伝達関数の$\frac{2}{2+j\omega}$を掛けると、出力の$\frac{20+j0}{2+j\omega}$Ｖを計算できます。

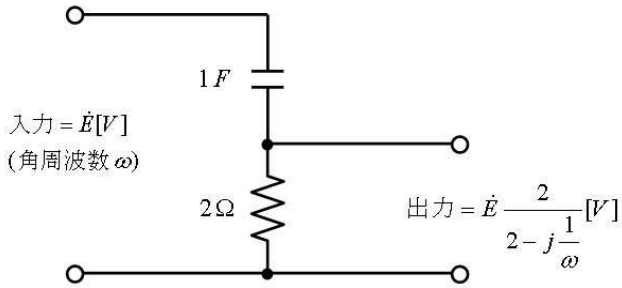
ここに登場するような複素数の分数をさらに変形して、見易く整理したいという欲望に駆られる方も多いでしょう。もちろんそれによってＥｘｃｅｌの入力は多少楽になりますが、変形の途中に間違える事を考えれば、式はあまり変形せずに、いきなりＥｘｃｅｌに入れるのもアリです。ここでは式の変形が嫌いな方のために、あえて殆ど変形せずに放置します。

つまり周波数伝達関数は、「増幅率」に、（１）周波数を後で決められるようにωで埋め込んで、（２）「大きさ（３倍とか）」だけではなく「位相（方向）」も埋め込んだ、ものです。言ってみれば「複素数で計算した増幅率」みたいなものです。

「周波数伝達関数」を「伝達関数」と略して呼ぶ場合もあり、（本書でもやっています）間違いではありませんが、本来の意味では少し違うものです。（今は違いはどうでもいいです）

６.１. 練習

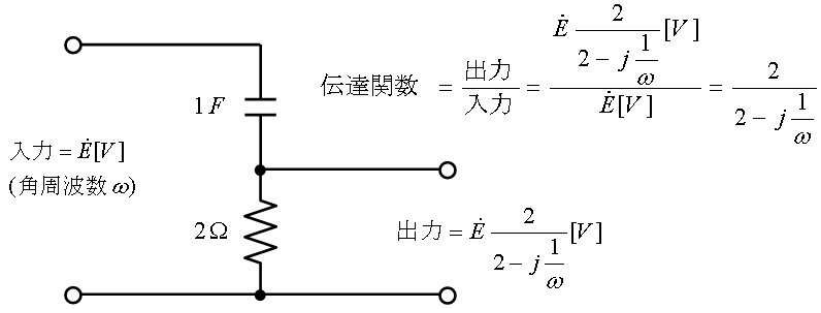
すでに練習問題で取り上げた下図の回路の伝達関数を求めてください。



周波数伝達関数 ［　　］

６.２. 答

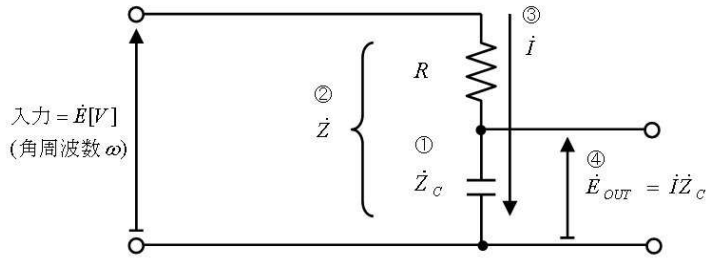
練習問題の答から、出力は$\dot{E}\frac{2}{2-j\frac{1}{\omega}}[V]$と分っています。そこで、周波数伝達関数は下図のように出力を入力で割って、計算できます。



周波数伝達関数 ［$\frac{2}{2-j\frac{1}{\omega}}$］　$\frac{1}{1+\frac{1}{2j\omega}}$と書く事もできます

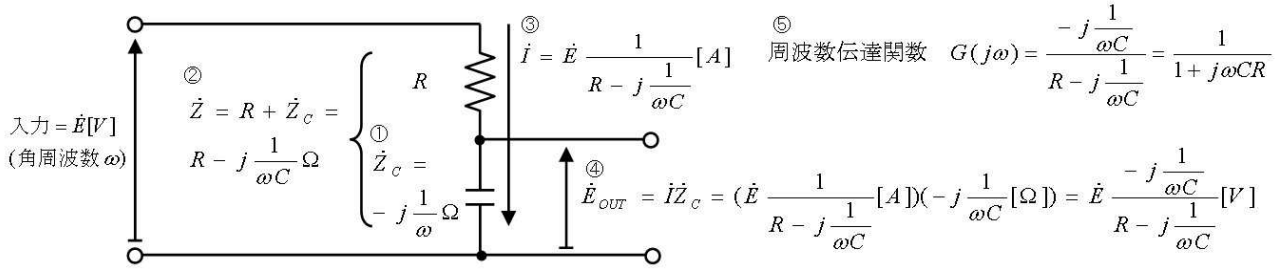
6.3. 練習

下図のＣＲ回路の周波数伝達関数を下表を埋めながら求めてください。



番号	質問	答
①	コンデンサの周波数ωにおける、複素インピーダンスは	$\dot{Z}_C =$ [Ω]
②	入力から見るとＲＣが直列なので、直列合成インピーダンスは	$\dot{Z} =$ [Ω]
③	ＲＣに流れる電流は入力電圧Ｅをインピーダンスで割って、	$\dot{I} =$ [A]
④	出力電圧は、流れる電流とコンデンサのインピーダンスを掛けて	$\dot{E}_{OUT} =$ [V]
⑤	伝達関数は１Ｖを入力したときの出力だから	$G(j\omega) =$ [倍]

6.4. 答



番号	質問	答
①	コンデンサの周波数ωでの複素インピーダンスは	$\dot{Z}_C = -j\frac{1}{\omega C}$ [Ω]
②	入力から見ると、ＲＣが直列なので、合成インピーダンスは	$\dot{Z} = R - j\frac{1}{\omega C}$ [Ω]
③	このため、ＲＣに流れる電流は入力電圧をインピーダンスで割って、	$\dot{I} = \frac{\dot{E}}{R - j\frac{1}{\omega C}}$ [A]

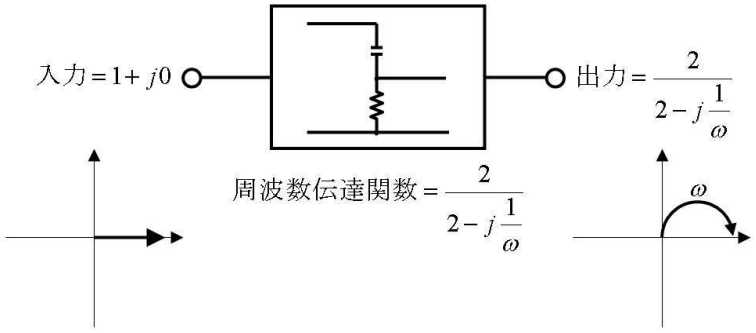
④	出力電圧は、電流とコンデンサのインピーダンスを掛けて	$\dot{E}_{OUT} = \dfrac{\dot{E}}{R-j\dfrac{1}{\omega C}}(-j\dfrac{1}{\omega C})$	[Ⅴ]
⑤	伝達関数は１Ⅴを入力したときの出力だから	$G(j\omega) = \dfrac{1}{R-j\dfrac{1}{\omega C}}(-j\dfrac{1}{\omega C})$	[倍]
	数学の得意な人は式を変形して、 （苦手な人は変形する必要はありません。変形しなくても、Ｅｘｃｅｌで計算できます）	$G(j\omega)=\dfrac{1}{1+j\omega CR}$	[倍]

７．周波数伝達関数の意味

伝達関数は増幅率の仲間で、入力×増幅率＝出力、であるのと同様に、入力×伝達関数＝出力、という関係がありました。

ですから入力が１Ⅴの場合を考えると、１×増幅率＝出力、１×伝達関数＝出力、つまり、入力が１の時の出力を計算すれば、それが伝達関数です。

さて同じ事を複素電圧で考えると、下図に示すとおり、伝達関数が $\dfrac{2}{2-j\dfrac{1}{\omega}}$ の回路に、$1+j0[V]$（つまり、１）の電圧を入力すると、出力は入力電圧と伝達関数を掛けて、$\dfrac{2}{2-j\dfrac{1}{\omega}}[V]$ となり、当然ながら、伝達関数と全く同じになります。



つまり伝達関数は、$1+j0[V]$ の（大きさ１で、偏角が０°の）信号（基本の交流）を加えたときの出力と考えることもできます。

ですから例えば、入力電圧 $\dot{E}$ から出力を求める式が、

$$\dot{E}\,\frac{2}{2-j\dfrac{1}{\omega}}[V]$$

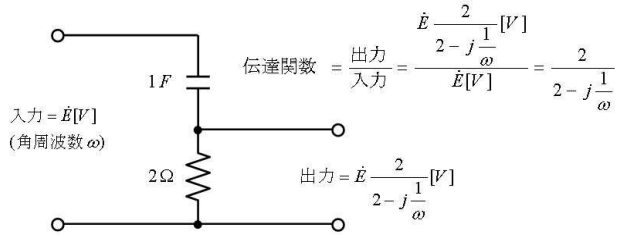
と分っている場合は、周波数伝達関数と、上の式の $\dot{E}$ を１に変えるだけで、

$$\frac{2}{2-j\dfrac{1}{\omega}}[V]$$

と簡単に計算できます。

８．周波数特性

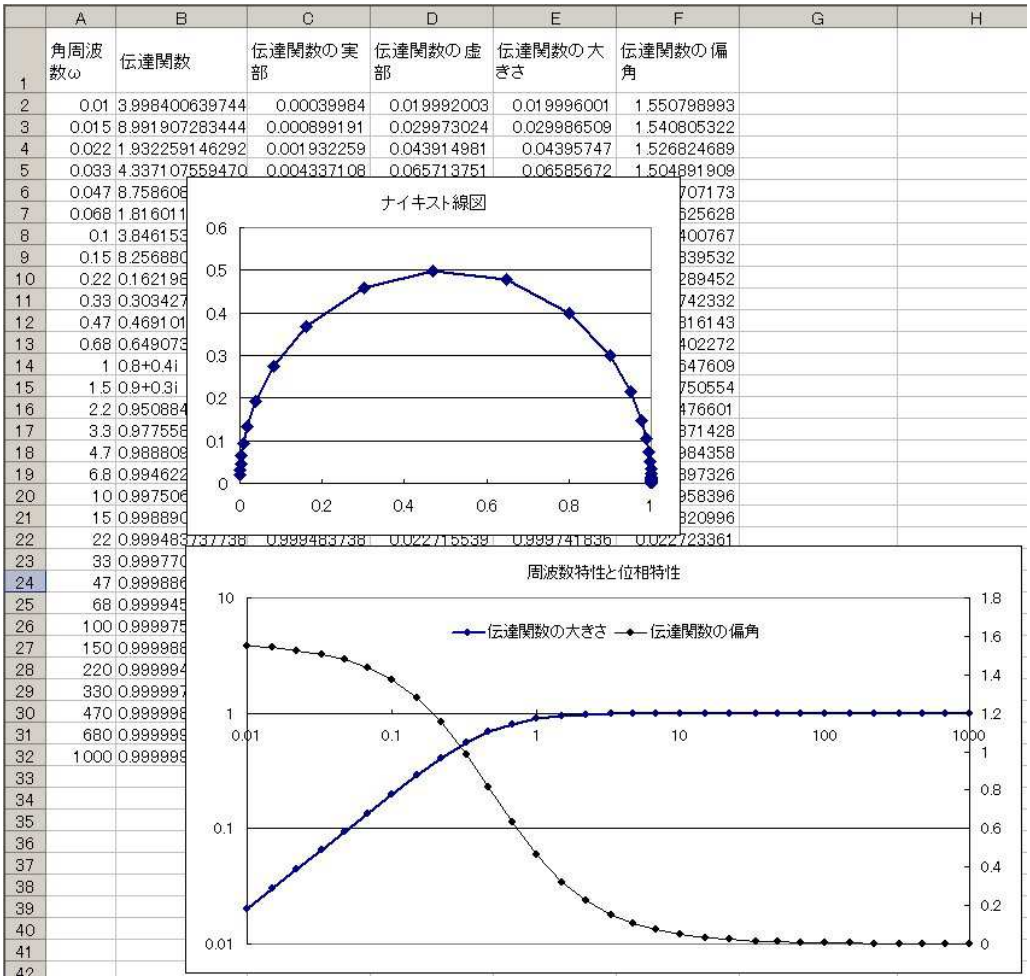
伝達関数は増幅率の仲間ですから、伝達関数に含まれる角周波数（ω）を様々に変えて、伝達関数の大きさ（絶対値）を計算すれば、「角周波数の変化による、増幅率の変化」を知ることができます。これが周波数特性です。計算の方法は出力電圧の計算と良く似ていますが、入力電圧を掛けなくても良いので多少簡単になります。（出力電圧の変化ではなく、増幅率の変化を計算するからです）



例えば既に説明した上図の回路の伝達関数 $\dfrac{2}{2-j\dfrac{1}{\omega}}$ を様々な角周波数ωで計算し、その実部、虚部、大きさ、偏角を計算するシートを作ると下図のようになります。

	A	B	C	D	E	F
1	角周波数ω	伝達関数	伝達関数の実部	伝達関数の虚部	伝達関数の大きさ	伝達関数の偏角
2	0.01	=IMDIV(2,COMPLEX(2,-1/A2))	=IMREAL(B2)	=IMAGINARY(B2)	=IMABS(B2)	=IMARGUMENT(B2)
3	0.015	=IMDIV(2,COMPLEX(2,-1/A3))	=IMREAL(B3)	=IMAGINARY(B3)	=IMABS(B3)	=IMARGUMENT(B3)
4	0.022	=IMDIV(2,COMPLEX(2,-1/A4))	=IMREAL(B4)	=IMAGINARY(B4)	=IMABS(B4)	=IMARGUMENT(B4)
5	0.033	=IMDIV(2,COMPLEX(2,-1/A5))	=IMREAL(B5)	=IMAGINARY(B5)	=IMABS(B5)	=IMARGUMENT(B5)
6	0.047	=IMDIV(2,COMPLEX(2,-1/A6))	=IMREAL(B6)	=IMAGINARY(B6)	=IMABS(B6)	=IMARGUMENT(B6)
7	0.068	=IMDIV(2,COMPLEX(2,-1/A7))	=IMREAL(B7)	=IMAGINARY(B7)	=IMABS(B7)	=IMARGUMENT(B7)
8	=A2*10	=IMDIV(2,COMPLEX(2,-1/A8))	=IMREAL(B8)	=IMAGINARY(B8)	=IMABS(B8)	=IMARGUMENT(B8)

計算結果は下図のようになります。



上図で、ω（対数）を横軸に、伝達関数の大きさ（対数）をグラフにしたものが「周波数特性」、ω（対数）を横軸に、伝達関数の偏角をグラフにしたものが「位相特性」です。周波数特性と位相特性を一つの図にかいて、ボーデ線図と呼ぶこともあります。また、伝達関数の実部と虚部をグラフにしたものを「ナイキスト線図」と呼びます。

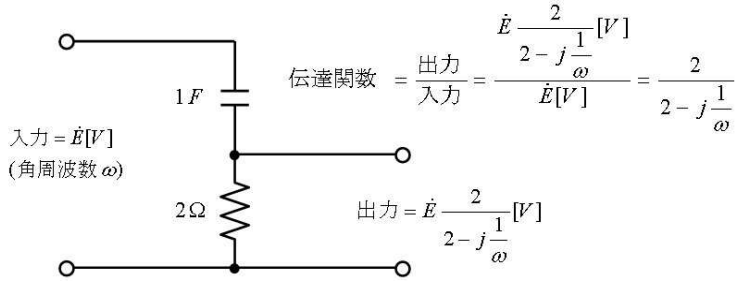
伝達関数から得られるこれらのグラフを下表に示します。

横軸	縦軸	表す内容	グラフの名前	
角周波数ω（対数）	伝達関数の絶対値（おおきさ）（対数）	周波数の大きさによる増幅率の変化	周波数特性	ボーデ線図
角周波数ω（対数）	伝達関数の偏角（位相）（対数）	周波数の大きさによる位相の変化	位相特性	
伝達関数の実部	伝達関数の虚部	増幅率と位相の関係（周波数は読み取り難い）	ナイキスト線図	

９．周波数特性とデシベル

データシート等の資料では、伝達関数の周波数を（ωではなく）Ｈｚで指定し、結果の絶対値を利得ｄＢで、偏角を（ラジアンではなく）度で表す方法が使われます。計算の方法は同じで、単位を変えて計算するだけです。

すでに説明した下図の回路で、周波数Ｈｚとｄ Ｂ、度を使った周波数・位相特性図（ボーデ線図）をＥｘｃｅｌで描きます。

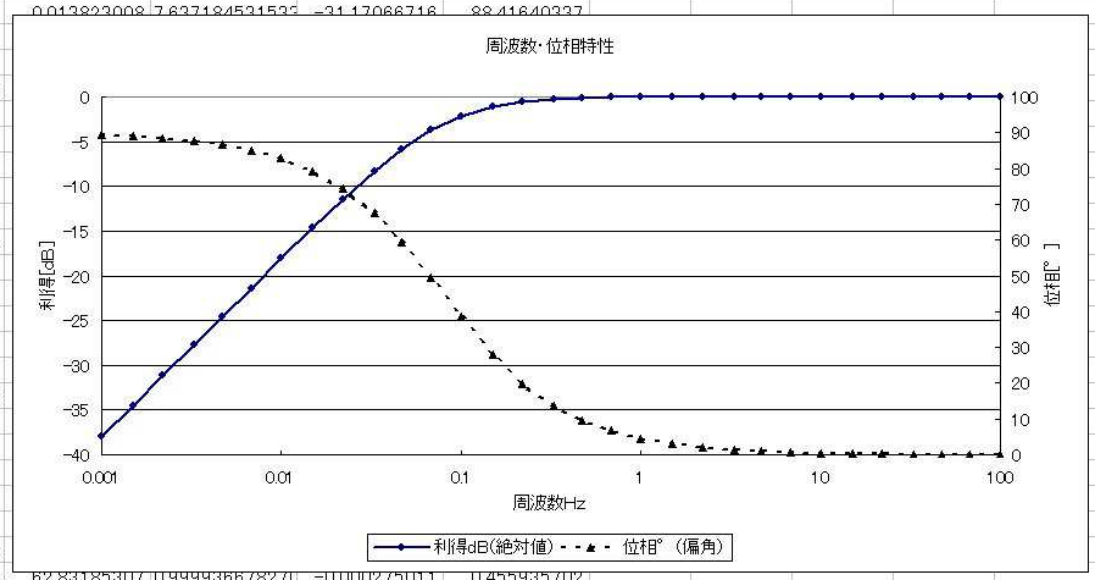


下図のＥｘｃｅｌシートでは、与えた周波数から角周波数ωを求め、そのωから伝達関数を計算して、その結果をｄＢと度に変換して表示しています。

	A	B	C	D	E
1	周波数Hz	角周波数ω	伝達関数	利得dB（絶対値）	位相°（偏角）
2		ω=2πf	2/(2-j(1/ω))		
3	0.001	=2*PI()*A3	=IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",B3)))	=20*LOG(IMABS(C3),10)	=IMARGUMENT(C3)/PI()*180
4	0.0015	=2*PI()*A4	=IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",B4)))	=20*LOG(IMABS(C4),10)	=IMARGUMENT(C4)/PI()*180
5	0.0022	=2*PI()*A5	=IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",B5)))	=20*LOG(IMABS(C5),10)	=IMARGUMENT(C5)/PI()*180
6	0.0033	=2*PI()*A6	=IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",B6)))	=20*LOG(IMABS(C6),10)	=IMARGUMENT(C6)/PI()*180
7	0.0047	=2*PI()*A7	=IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",B7)))	=20*LOG(IMABS(C7),10)	=IMARGUMENT(C7)/PI()*180
8	0.0068	=2*PI()*A8	=IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",B8)))	=20*LOG(IMABS(C8),10)	=IMARGUMENT(C8)/PI()*180
9	=A3*10	=2*PI()*A9	=IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",B9)))	=20*LOG(IMABS(C9),10)	=IMARGUMENT(C9)/PI()*180
10	=A4*10	=2*PI()*A10	=IMDIV(2,IMSUB(2,IMDIV("i",B10)))	=20*LOG(IMABS(C10),10)	=IMARGUMENT(C10)/PI()*180

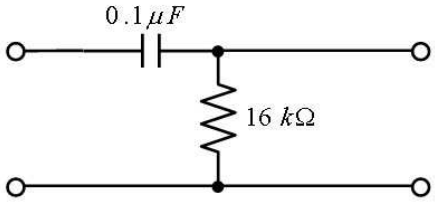
計算させ、グラフを描くと下図のようになります。

	A	B	C	D	E
1	周波数Hz	角周波数ω	伝達関数	利得dB(絶対値)	位相°（偏角）
2		ω=2πf	2/(2-j(1/ω))		
3	0.001	0.006283185	1.578887376273	-38.01648848	89.2800379
4	0.0015	0.009424778	3.551795610958	-34.49552034	88.92012788
5	0.0022	0.013823008	7.637184531523	-31.17066716	88.41640337
6	0.0033				
7	0.0047				
8	0.0068				
9	0.01				
10	0.015				
11	0.022				
12	0.033				
13	0.047				
14	0.068				
15	0.1				
16	0.15				
17	0.22				
18	0.33				
19	0.47				
20	0.68				
21	1				
22	1.5				
23	2.2				
24	3.3				
25	4.7				
26	6.8				



9.1. 練習

下図のＣＲ回路の周波数特性のグラフを、Ｅｘｃｅｌを使って描いてください。横軸は周波数Ｈｚとし、縦軸は利得ｄＢとしてください。



9.2. 答

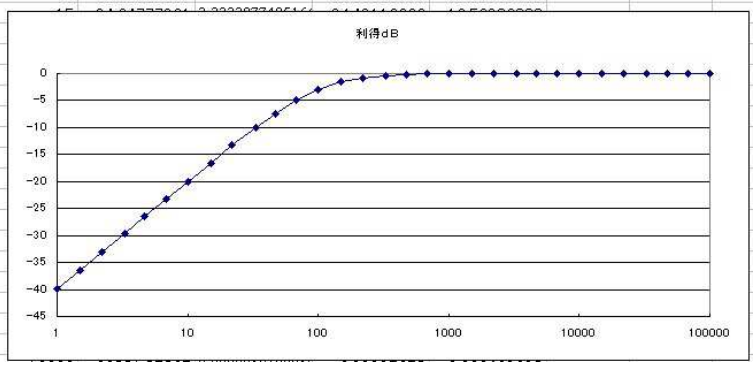
伝達関数は、$\dfrac{16k\Omega}{16k\Omega - j\dfrac{1}{\omega \times 0.1\mu F}}$ これを、

Ｅｘｃｅｌでは=IMDIV(16E3,IMSUB(16E3,COMPLEX(0,-1/B2/0.1E-6)))と入力するので、下記のようにＥｘｃｅｏに入力して、

	A	B	C	D	E
1	周波数Hz	角周波数ω	伝達関数	利得(倍)	利得dB
2	1	=2*PI()*A2	=IMDIV(16000,IMSUB(16000,COMPLEX(0,-1/B2/0.0000001)))	=IMABS(C2)	=20*LOG(D2,10)
3	1.5	=2*PI()*A3	=IMDIV(16000,IMSUB(16000,COMPLEX(0,-1/B3/0.0000001)))	=IMABS(C3)	=20*LOG(D3,10)
4	2.2	=2*PI()*A4	=IMDIV(16000,IMSUB(16000,COMPLEX(0,-1/B4/0.0000001)))	=IMABS(C4)	=20*LOG(D4,10)
5	3.3	=2*PI()*A5	=IMDIV(16000,IMSUB(16000,COMPLEX(0,-1/B5/0.0000001)))	=IMABS(C5)	=20*LOG(D5,10)
6	4.7	=2*PI()*A6	=IMDIV(16000,IMSUB(16000,COMPLEX(0,-1/B6/0.0000001)))	=IMABS(C6)	=20*LOG(D6,10)
7	6.8	=2*PI()*A7	=IMDIV(16000,IMSUB(16000,COMPLEX(0,-1/B7/0.0000001)))	=IMABS(C7)	=20*LOG(D7,10)
8	=A2*10	=2*PI()*A8	=IMDIV(16000,IMSUB(16000,COMPLEX(0,-1/B8/0.0000001)))	=IMABS(C8)	=20*LOG(D8,10)
9	=A3*10	=2*PI()*A9	=IMDIV(16000,IMSUB(16000,COMPLEX(0,-1/B9/0.0000001)))	=IMABS(C9)	=20*LOG(D9,10)
10	=A4*10	=2*PI()*A10	=IMDIV(16000,IMSUB(16000,COMPLEX(0,-1/B10/0.0000001)))	=IMABS(C10)	=20*LOG(D10,10)

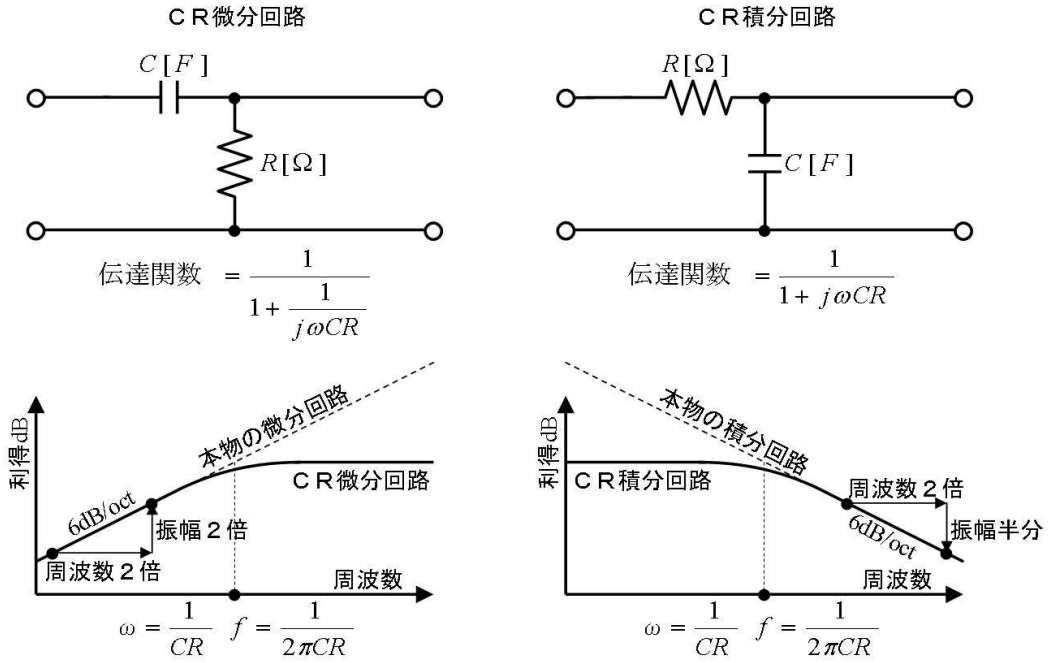
計算させ、グラフを描くと下図のように表示される。

	A	B	C	D	E
1	周波数Hz	角周波数ω	伝達関数	利得(倍)	利得dB
2	1	6.283185307	1.0105453601583	0.010052589	-39.95444188
3	1.5	9.424777961	2.2734398835904	0.015077931	-36.43316525
4	2.2	13.82300768	4.8891423143351	0.022111405	-33.10767321
5	3.3	20.73451151	1.0993851394247	0.033156977	-29.58850138
6	4.7	29.53097094	2.2275472623956	0.047196899	-26.52173073
7	6.8	42.72566009	4.6514964654466	0.06820188	-23.32407305
8	10	62.83185307	1.0005356027095	0.100026777	-19.99767453



１０．ＣＲ微分回路・積分回路

下図左側が既に説明したＣＲ微分回路、同図右側がＣＲ積分回路です。伝達関数はそれぞれ図に示す通りです。



伝達関数を元に周波数特性（利得）を描くと上図のようになります。ＣＲ微分回路は低い周波数では微分回路として働きますが、周波数が$\frac{1}{2\pi CR}[Hz]$より高くなると、平らな特性になってしまいます。

逆にＣＲ積分回路は、高い周波数では積分回路として働きますが、周波数が$\frac{1}{2\pi CR}[Hz]$より低くなると、平らな特性になってしまいます。

$\frac{1}{2\pi CR}[Hz]$より低い、あるいは高い周波数では、利得（信号の大きさが）が低下して行くので、$\frac{1}{2\pi CR}[Hz]$をカットオフ周波数（遮断周波数）と呼んでいます。

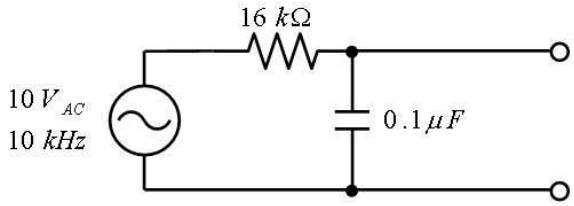
またいずれの回路も、微分回路や積分回路として働く範囲では、周波数が２倍になると振幅が２倍、あるいは半分になります。これを、６ｄＢ／ｏｃｔ（６デシベルオクターブ）の特性と呼びます。

つまり、オクターブ（周波数が２倍）になると、振幅が±６ｄＢ（振幅が２倍、あるいは半分に）増減するという事です。

６ｄＢ／ｏｃｔは、２０ｄＢ／ｄｅｃ（２０デシベルディケード）とも呼ばれます。周波数が１０倍になると、振幅±２０ｄＢ（つまり１０倍や１０分の１に）増減するという意味です。

１０.１. 練習

下図のＣＲ回路について、下表の問いに答えてください。

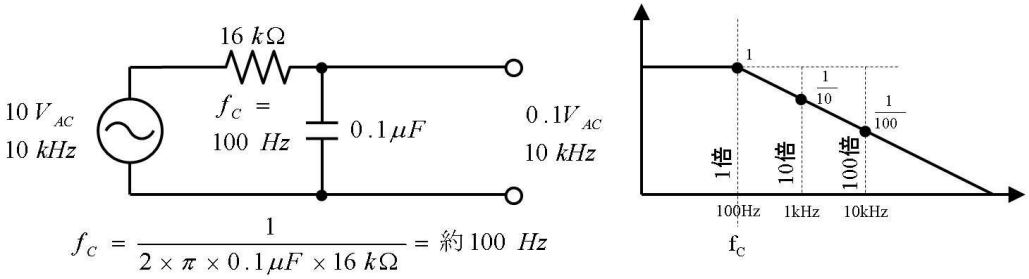


番号	質問	答
①	回路はＣＲ微分回路か、積分回路か	ＣＲ［　　］回路
②	カットオフ周波数は、	Ｈｚ

③	信号周波数はカットオフ周波数の何倍か、	倍
④	信号は何分の１に弱まるか、	分の１
⑤	出力信号は何V_{AC}か、	mV_{AC}

１０.２. 答

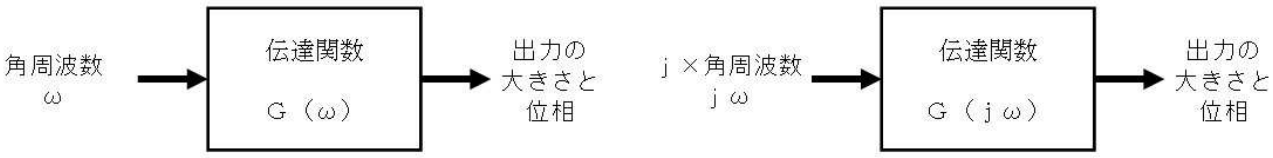
カットオフ周波数は下図の通り計算して、約１００Ｈｚ、加えている信号は１０ｋＨｚで、カットオフ周波数の１００倍、１０ｋＨｚはカットオフ周波数より十分大きいので、



番号	質問	答
①	回路はＣＲ微分回路か、積分回路か	ＣＲ積分回路
②	カットオフ周波数は、	１００Ｈｚ
③	信号周波数はカットオフ周波数の何倍か、	１００倍
④	信号は何分の１に弱まるか、	１００分の１
⑤	出力信号は何V_{AC}か、	１００mV_{AC}

１１. 学問的な周波数伝達関数

ここまで説明した周波数伝達関数のイメージは、下図左側のようなものでした。つまり「角周波数ωを与えると、その周波数での出力の大きさと位相が分る」という理解でした。



電子工作にはこの考え方が向いており、理解が簡単な上、実用上何の問題もありません。ただし、学問的には、伝達関数は「ｊωを与えると、その周波数での出力の大きさと位相が分る」と考えます。このように考えると、数学との繋がりが良くなる上、制御理論にもすんなり入れる（制御理論ではｊωの所を、σ＋ｊωに置き換える）ためです。

とはいえ、学問の考え方でも、伝達関数本体には何の違いもありません。違いは左側をG（ω）とするか、G（ｊω）とするか、という点だけです。

$$G(\omega)=\frac{2}{2-j\frac{1}{\omega}} \qquad G(j\omega)=\frac{2}{2-j\frac{1}{\omega}}$$

説明した周波数伝達関数　　学問の周波数伝達関数

学問の周波数伝達関数では、式の中に「jω」を作るために変形し、さらに「２」を一箇所にあつめて、

$$G(j\omega)=\frac{2}{2-j\frac{1}{\omega}}=\frac{1}{1+\frac{1}{j\omega 2}}$$

と書く場合が殆どです。もちろん、本書の目的は、数学の美しさを堪能する事ではありませんし、ましてや式の変形を練習することではありませんので、この変形ができる必要はありません。こんなものは、そのままＥｘｃｅｌに入れて計算できれば良いのです。

１２．（参考）伝達関数から（四則演算だけで）ステップ応答を計算する

周波数伝達関数は、周波数で振幅や位相がどのように変化するかを表しているので、交流以外の波形（たとえば、突然ポンと電圧が上がったとき：ステップ信号）を入力したときの出力波形（ステップ応答）を計算するのは苦手です。

とはいえ、Ｅｘｃｅｌを使って（四則演算だけで）このような場合の出力を計算することはできます。もちろん、留数や逆ラプラス変換は全く使いません。

このように、伝達関数からステップを計算する事はあまりありませんから、一例を紹介するだけに留めます。Ｅｘｃｅｌを使えば「伝達関数から四則演算だけでステップ応答が計算できるんだ」という事だけ知っておけば良いでしょう。

さて、たとえば「小遣いを貰うたびに、今まで貰った小遣いの総合計を計算する」と言う感じで、「これまでの値の合計」を求める計算を「積算」と呼びます。たとえば、１、３、２と来れば、積算値は１＋３＋２で６です。下図左側のシートのＢ列の値は、Ａ列を積算したものです。

	A	B
1	元の値	積算値
2	0	0
3	1	1
4	3	4
5	2	6
6	0	6
7	0	6
8	0	6
9	0	6

SUM =B5+A6

	A	B
1	元の値	積算値
2	0	=A2
3	1	=B2+A3
4	3	=B3+A4
5	2	=B4+A5
6	0	=B5+A6
7	0	=B6+A7
8	0	=B7+A8

例えば、Ｂ５セルの６はＡ２～Ａ５までの積算値です。積算の方法は簡単で、上図右側のＢ６セルに示すように、直ぐ上のセルと、直ぐ左のセルを足すだけです。（実はこの「足し算」つまり「積算」が、「積分」なんですけど…理屈はさておいて）

次に、伝達関数から入力Ｘと出力Ｙの関係を求めます。すでに説明したように、伝達関数に入力電圧を掛けると出力電圧になりましたから、たとえば、伝達関数

$$G(j\omega)=\frac{2}{2+j\omega}$$

では、入力電圧Ｘと出力電圧Ｙの関係は、

$$Y = X\frac{2}{2+j\omega}$$

で求めることができます。これを変形して、

$$j\omega Y = 2X - 2Y \quad \cdots \quad ①$$

とします。

さてここで、いささか風変わりな考えをします。つまり下表のように、「Y をjωで割ることは、Ｅｘｃｅｌで積算することだ」と考えるのです。

いささか風変わりな考え方の表

$(j\omega)^2 Y$	積算 →	$j\omega Y$	積算 →	Y	積算 →	$\frac{1}{j\omega}Y$	積算 →	$\frac{1}{(j\omega)^2}Y$

たとえば上表で太線で囲んだ部分なら、「Y は、$j\omega Y$ を積算したものだ」と考えます。つまり、$j\omega Y$ は「積算する前の出力 Y」、Y は「積算した後の出力 Y」です。これを、上の①式に反映すると、

積算する前の出力 Y ＝ ２×入力 X － ２×積算した後の出力 Y … ②

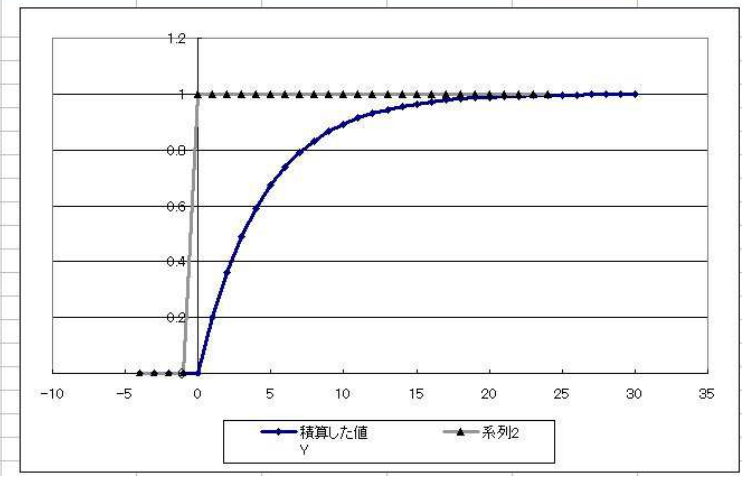
と考えることができるので、その通りに、Ｅｘｃｅｌで、下図のようなシートを作成します。

	A	B	C	D
1	時間 t	入力 X	積算の前 jωY	積算した値 Y
2	-4	0		=C2
3	-3	0	=(B2*2-D2*2)*0.1	=D2+C3
4	-2	0	=(B3*2-D3*2)*0.1	=D3+C4
5	-1	0	=(B4*2-D4*2)*0.1	=D4+C5
6	0	1	=(B5*2-D5*2)*0.1	=D5+C6
7	1	1	=(B6*2-D6*2)*0.1	=D6+C7
8	2	1	=(B7*2-D7*2)*0.1	=D7+C8
9	3	1	=(B8*2-D8*2)*0.1	=D8+C9
10	4	1	=(B9*2-D9*2)*0.1	=D9+C10
11	5	1	=(B10*2-D10*2)*0.1	=D10+C11

Ｃ列の=(B*2-D2*2)*0.1等が上の②式を計算している部分で、末尾の「*0.1」は、計算をゆっくり行うためのものです（値が小さいと値はゆっくり変化します）。この値は、時定数の１０分の１～１００分の１が目安で、 時定数が 0.1 秒の回路なら*00.1 程度に設定します。（この値によって１行あたりの時間が決まります）

計算させて、グラフを描くと下図のようにステップ応答が表示されます。

	A	B	C	D
1	時間 t	入力 X	積算の前 jωY	積算した値 Y
2	-4	0		0
3	-3	0	0	0
4	-2	0	0	0
5	-1	0	0	0
6	0	1	0	0
7	1	1	0.2	0.2
8	2	1	0.16	0.36
9	3	1	0.128	0.488
10	4	1	0.1024	0.5904
11	5	1	0.08192	0.67232
12	6	1	0.065536	0.737856
13	7	1	0.0524288	0.7902848
14	8	1	0.04194304	0.83222784
15	9	1	0.033554432	0.865782272
16	10	1	0.026843546	0.892625818
17	11	1	0.021474836	0.914100654
18	12	1	0.017179869	0.931280523
19	13	1	0.013743895	0.945024419
20	14	1	0.010995116	0.956019535



基本の考え方は、既にＣＲ回路で用いた「シミュレーション」と同じです。

さらに複雑な伝達関数では、上の②式を作るとき、最も積算の源流になっている項、つまり「いささか風変わりな考え方の表」で一番左にあるもの（ｊωの次数が高い項）、を左辺（左側）に単独で持ってくるように変形するのがポイントです。Ｅｘｃｅｌでは、今回のＣ列に相当する、左辺の値を示す列が計算の中心になります。この列に入力電圧や積算値を元に左辺の値を求める式を記入します。伝達関数によっては、積算した値を積算した値の列、積算した値を積算した値を積算した値の列、を作る場合もあります。

９．アナログ回路入門

１．オペアンプ

オペアンプは沢山の素子を内蔵することで、ほぼ理想的な性能を持たせた半導体部品です。理想的な分、癖が無くて設計も簡単です。

登場した当初は値段が高くて、ホイホイと使うことは出来ませんでした。しかし、現在は４つ入り２５円などと安価に販売されており、湯水のように使うことができます。

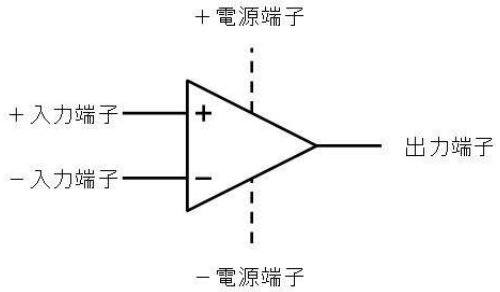
「理想的な性能」とは言っても、多少は「理想に届かない部分」もあります。そこでオペアンプ回路の設計は、まず、「理想的な性能」（理想オペアンプ）と考えて設計し、その後で「理想に届かない部分」による悪影響を検討する場合が多いです。

ここではまず「理想的な性能」と考えて設計する方法を説明します。今日のオペアンプは性能が向上しているので、このような設計でも、そのまま使える場合が相当あります。

とりわけ、レイル・トウ・レイル入出力が可能な、出力電流の比較的大きなＣＯＭＳオペアンプを使えば、周波数の低い回路なら、「理想的な性能」と考えて設計しても、概ね正しく動作します。オペアンプの基本だけを理解した段階でも（多少割高ですが）このようなオペアンプ（例えば、ＮＪＭ７０４４（２Ｖ～５Ｖ電源用）や、ＬＭＣ６４８４（５～１５Ｖ電源用））を使えば設計を楽しむことができるでしょう。そして、本書の説明が概ね理解できれば、目的に応じて割安なオペアンプを選ぶことも十分楽しめるでしょう。

２．オペアンプの端子と動作

下図に示すように、オペアンプには「＋入力端子」「－入力端子」「出力端子」（ここでは「＋入力」「－入力」「出力」と略します）の３本の信号端子と、「＋電源端子」「－電源端子」（ここでは「＋電源」「－電源」と略します）の２本の電源端子があります。



２本の電源端子は回路図ではしばしば省略されます。

オペアンプ は 十入力 と 一入力 の電圧の「差」を求めて、これを十分に増幅して 出力 に出します。つまり、

出力 ＝ （ 十入力 － 一入力 ）× 大きな増幅率

※「大きな増幅率」は例えば１０万倍等です

そして、引き算が正確で、増幅率が大きいので、次の項で説明する４つの性質が生じます。

３．理想的なオペアンプの性質

オペアンプの性質は沢山ありますが、下表の４つを理解すれば、９割の基本回路は理解することができます。

まず、オペアンプは「正確」で「大きな増幅率」の部品ですから、下表の番号②と③に示すように、

＋入力の電圧が、僅かでもー入力より高いだけで、出力は＋電源電圧までビュンと振り切ってしまいます。同様に、＋入力の電圧が、僅かでもー入力より低いだけで、出力はー電源電圧までビュンと振り切ってしまいます。

次に、増幅率が大きいため、下表①に示すように、＋入力がー入力と全く同じ時だけ「出力が振り切らない」状態になります。逆に、出力が振り切ってなければ、＋入力とー入力は同じ電圧であるとも言えます。

ここで気をつけることは、このような（①の）「振り切らない」状態となるのは、回路構成が、負帰還の（出力端子の電圧が入力端子に回り込んでいる）場合だけで、それ以外の回路では（②と③の）振り切った状態で動作するという点です。つまり、振り切って②③の動作をするか、振り切らずに①の動作をするかは、回路構成で決まると考えてください。（理由は後で説明します）

オペアンプ回路の重要な性質

番号	入力端子の状態		出力端子の状態	回路の構成
①	＋入力 ＝ ー入力	⇔	振り切らない	負帰還の回路 （出力端子の電圧が、入力端子に回り込んでいる）
②	＋入力 ＞ ー入力	⇔	＋に振り切る	負帰還でない回路 （出力端子の電圧が、入力端子に回り込んでいない）
③	＋入力 ＜ ー入力	⇔	ーに振り切る	
④	入力端子には電流が流れない			

最後に、上表の①～③の何れの場合でも、同表④に示すように入力端子には電流が流れません。

ですから、オペアンプの回路を読むときは、負帰還の有無を最初に判定して、次表のように考えます。

回路構成	利用する特徴
負帰還が掛かっている	①と④の性質で考える
負帰還はない	②と③と④の性質で考える

４. ユニティゲイン増幅器

では、重要な４つの性質を使ってオペアンプの回路を読みます。

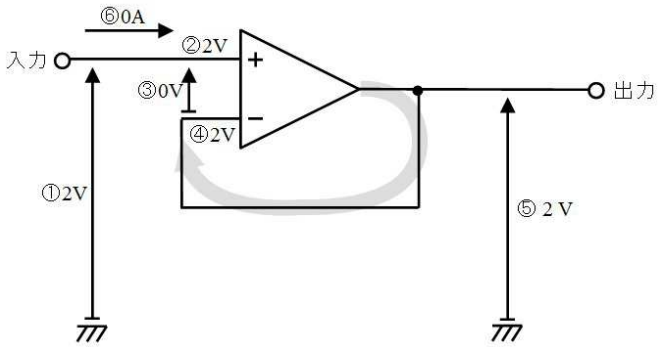
最初に取り上げる「ユニティゲイン増幅器（ユニティゲインバッファとも呼ばれます）」は、奇妙な名前ですが「１倍の増幅器」という意味です。つまり、入れた電圧がそのまま出てくる増幅器ですから、一見役に立たないように思えます。

しかし、重要な性質④により、入力端子には電流が流れませんから、たとえば、ユニティゲイン増幅器で、充電したコンデンサの電圧を測定しても、コンデンサが放電して電圧が低下することがありません。つまり、ユニティゲイン増幅器を使うと、測定される回路に影響を与えずに、正確に電圧を測定できるのです。

増幅器のような、入力電圧の大小で、出力電圧も滑らかに変化する回路は、（オペアンプを使った場合）かならず負帰還の掛かった回路です。

さて、下図がユニティゲイン増幅器の例です。左から電圧を与えると、右側に出力します。

下図に灰色矢印で示すように、出力端子の電圧が－入力に回り込んでいますから、負帰還の回路です。ですから、重要な性質の①と④を使って考えます。



４.１. 確認

上図を見て下表に書き込みながらユニティゲイン増幅器の動作を確認してください。

番号	質問	値
①	入力電圧は、	V
②	＋入力端子の電圧は、	V
③	重要な性質①によれば、（負帰還の回路では）２本の入力端子の電圧差は	V
④	－入力端子の電圧は、	V
⑤	出力電圧は、	V
⑥	重要な性質④によれば、入力に流れる電流は、	A

４.２. 答

番号	質問	値
①	入力電圧は、	２V
②	＋入力端子の電圧は、	２V
③	重要な性質①によれば、（負帰還の回路では）２本の入力端子の電圧差は	０V
④	－入力端子の電圧は、	２V
⑤	出力電圧は、	２V
⑥	重要な性質④によれば、入力に流れる電流は、	０A

上表の⑤で分るように、入力した電圧がそのまま出力されます。また、上表の⑥で分るように入力には電流が流れません。

５．オペアンプの電源

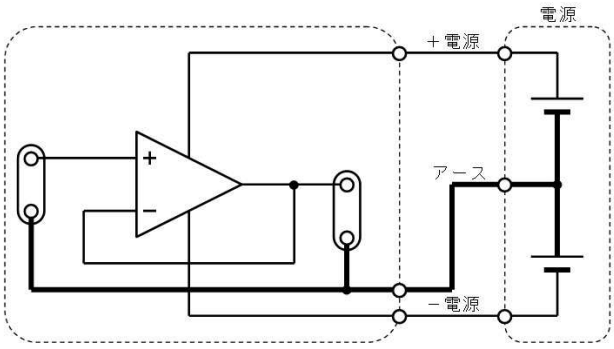
「電源」とは回路図に電池の図記号で示すような、回路を動作させるエネルギを供給する部分のことです。

元来オペアンプは、下図左側に示すように、＋電源と－電源の２電源（両電源）で使用するように設計されました。なぜなら、＋電源と－電源の真ん中あたり（つまり、０Ｖ付近）で安定して動作するからです。

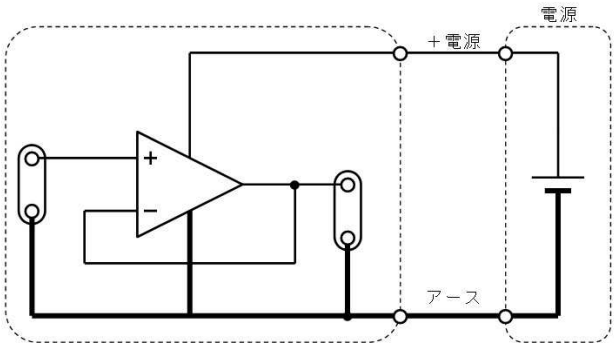
ところが、オペアンプの応用範囲が広がるにつれ、電源を１つしか搭載しないような、軽便な機器でも利用されるようになり、下図右側に示すような、単一電源で使用される機会が増えて来ました。

当初は、２電源用に設計されたオペアンプを、回路を工夫して単一電源で使用していましたが、その後、単一電源用のオペアンプも作られるようになりました。

回路の動作は２電源の方が説明し易い場合が多いので、本書では特に電源を示さない限り、２電源と考えて説明しています。



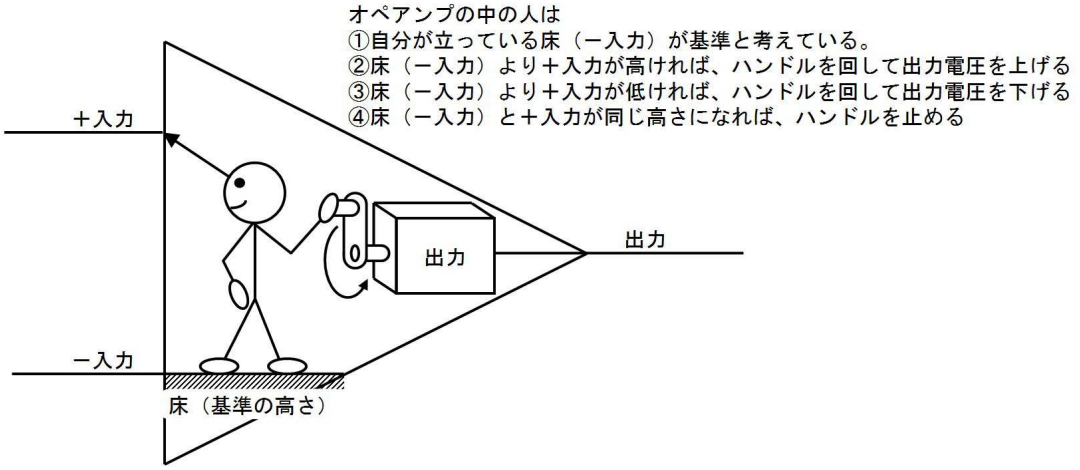
２電源方式によるオペアンプの駆動



単一電源方式によるオペアンプの駆動

６．オペアンプの中の人

さて、ユニティゲイン増幅器の働きは、重要な性質①「負帰還の回路なら、＋入力＝－入力」を、利用して考えました。ここでは、オペアンプを擬人化することで、なぜこの重要な性質①が生じるのか説明します。下図が擬人化したオペアンプです。



オペアンプの中の人は、上図のように「（自分が立つ）床（－入力）が基準」と考えています。そして、常に＋入力の電圧を気にしています。

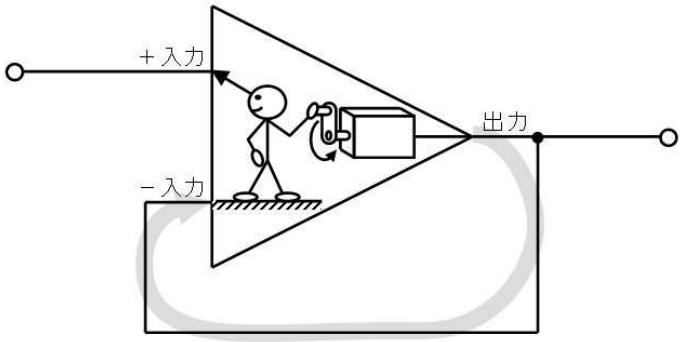
中の人は、＋入力の電圧が、床（－入力）より高ければ、ハンドルを回して出力を上げます。逆に、

＋入力が、床（－入力）より低ければ、逆にハンドルを回して出力電圧を下げます。

中の人は、床と＋入力の電圧に違いがある限り、ハンドルはいつまでも回し続けます。しかし、出力電圧が電源端子の電圧に達すると、（電源電圧を越える電圧は出力できませんから）それ以上ハンドルは回らなくなります。（これが後で説明するコンパレータの動作です）

7. 擬人化したユニテイゲイン増幅器

さて、下図は擬人化したユニティゲイン増幅器です。

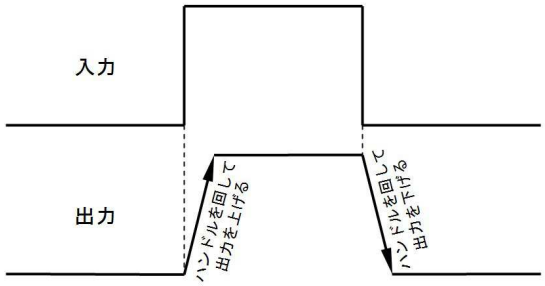


上図の回路では、出力電圧が－入力に回り込んで負帰還が掛かっています。このように負帰還に接続したことで、劇的な変化が起きます。つまり、中の人が「ハンドルを回して、自分の床の高さを上下できる」ようになるのです。

このため中の人は、＋入力が床より高ければ、ハンドルを回して床を上げて行きます。そして、床の高さが＋入力と同じになれば、ハンドルを回すのを止めます。その結果、出力電圧（－入力）が＋入力と等しくなるのです。

つまり負帰還を掛けることで、中の人が「自分が立つ床の高さを変える」ことを可能にし、その結果中の人が＋入力と同じ高さまで床を上げる（下げる）ために、オペアンプの重要な性質①、つまり「＋入力＝－入力（床）」が生まれるのです。

また、中の人はハンドルを回して電圧を上げ下げしますから、実は出力電圧は瞬時に上下できません。このため、ユニティゲイン増幅器に大きな振幅の信号を入れると、下図の下側に示すように、電圧が徐々に変化します。（後に詳しく説明します）これも実際のオペアンプで生じる（スルーレートと言う）現象です。



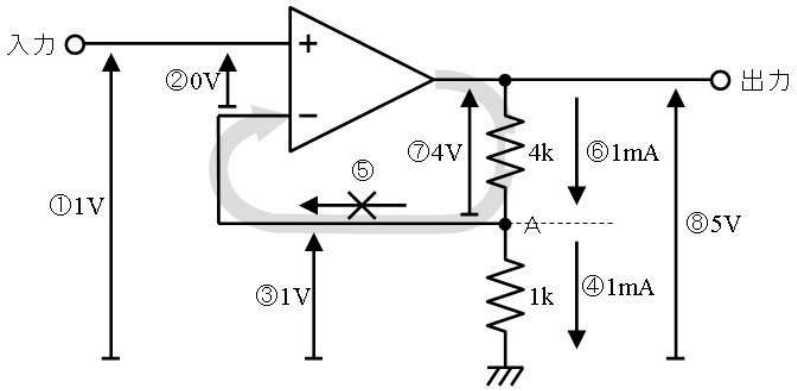
8. 非反転増幅回路

ここで取り上げる「非反転増幅回路」は変な名前ですが「反転しない増幅器」つまり、「入力が＋に振れたら、出力も＋に触れる」という「ありきたりの」増幅器です。（オペアンプ増幅器では、入出力が反転する場合が主流なので、あえて「非反転」と主張している訳です）

非反転増幅器は、ユニティゲイン増幅器とちがい、入力された電圧を大きくする作用があります。

下図が非反転増幅回路の例で、左から電圧を与えると、右側に出力します。

この回路は下図灰色矢印で示すように、出力端子の電圧が－入力に回り込んでいますから、負帰還の回路です。ですから、重要な性質の①と④を使って考えます。



8.1. 確認

上図を見て下表に書き込みながら非反転増幅回路の動作を確認してください。

番号	質問	値
①	＋入力に加わる電圧は	V
②	重要な性質①によれば、２本の入力端子の電圧差は	V
③	－入力端子の電圧は	V
④	１ｋΩに流れる電流は、	mA
⑤	重要な性質④によれば、１ｋΩの上側から、－入力端子に向かって流れる電流は、	mA
⑥	４ｋΩに流れる電流は、	mA
⑦	４ｋΩに生じる電圧（両端電圧）は、	V
⑧	出力端子の電圧は、	V

8.2. 答

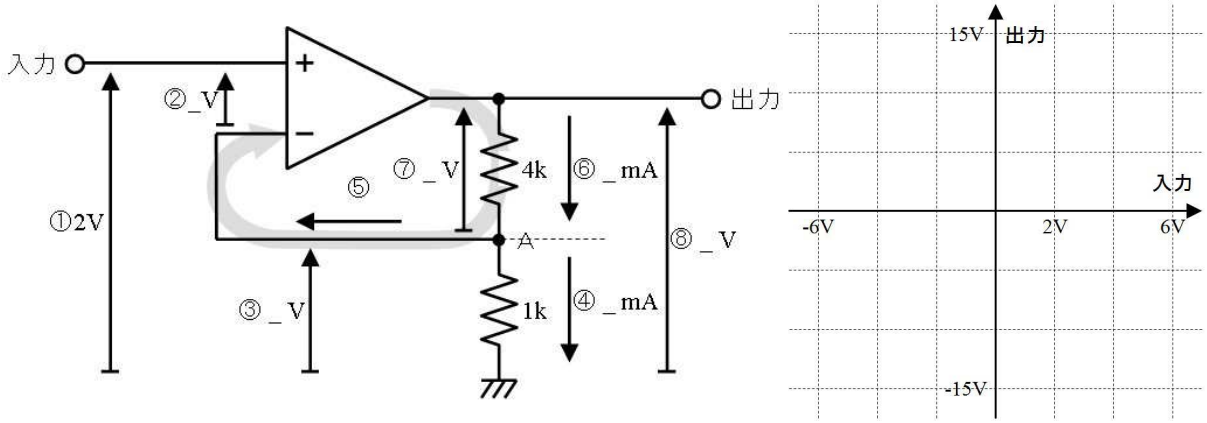
番号	質問	値
①	＋入力に加わる電圧は	１V
②	重要な性質①によれば、２本の入力端子の電圧差は ＋入力 ＝ －入力であるから、	０V
③	－入力端子の電圧は、＋入力と同じであるから、	１V
④	１ｋΩに流れる電流は、１Ｖで１ｋΩであるから、	１mA
⑤	重要な性質④によれば、１ｋΩの上側から、－入力端子に向かって流れる電流は、入力端子には電流が流れない	０mA

	から、	
⑥	４ｋΩに流れる電流は、キルヒホッフの法則をＡ点に使って、	１ｍＡ
⑦	４ｋΩに生じる電圧（両端電圧）は、	４Ｖ
⑧	出力端子の電圧は、１Ｖと４Ｖを加えて	５Ｖ

つまり、この回路は１Ｖを入れると５Ｖを出力します。５倍に増幅しているようです。しかし、ひょっとすると常に５Ｖ出力されて、実は増幅はされていないのかも知れません。そこで、入力を２Ｖに変更して、もう一度検討します。

８.３. 練習

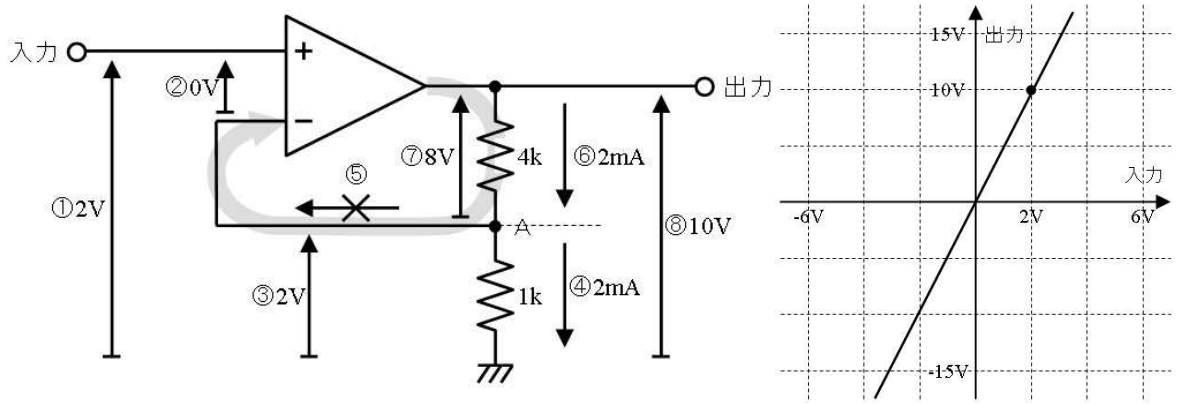
下図の回路図の各部の電圧・電流を下表に記入してください。また、増幅器の入力電圧と出力電圧の関係（入出力電圧特性）を下図右側のグラフに書き込んでください。



上図を見て下表に書き込みながら考えてください。

番号	質問	値
①	＋入力に加わる電圧は	Ｖ
②	重要な性質①によれば、２本の入力端子の電圧差は	Ｖ
③	－入力端子の電圧は	Ｖ
④	１ｋΩに流れる電流は、	ｍＡ
⑤	重要な性質④によれば、１ｋΩの上側から、－入力端子に向かって流れる電流は、	ｍＡ
⑥	４ｋΩに流れる電流は、	ｍＡ
⑦	４ｋΩに生じる電圧（両端電圧）は、	Ｖ
⑧	出力端子の電圧は、	Ｖ

8.4. 答



番号	質問	値
①	＋入力に加わる電圧は	２Ｖ
②	重要な性質①によれば、２本の入力端子の電圧差は ＋入力 ＝ －入力であるから、	０Ｖ
③	－入力端子の電圧は、＋入力と同じであるから、	２Ｖ
④	１ｋΩに流れる電流は、１Ｖで１ｋΩであるから、	２ｍＡ
⑤	重要な性質④によれば、１ｋΩの上側から、－入力端子に向かって流れる電流は、入力端子には電流が流れないから、	０ｍＡ
⑥	４ｋΩに流れる電流は、キルヒホッフの法則をＡ点に使って、	２ｍＡ
⑦	４ｋΩに生じる電圧（両端電圧）は、	８Ｖ
⑧	出力端子の電圧は、１Ｖと４Ｖを加えて	１０Ｖ

１Ｖを入力すると５Ｖを、２Ｖを入力すると１０Ｖを出力していますから、明らかに１０倍に増幅しています。入力と出力の関係を上図右側のグラフに示します。

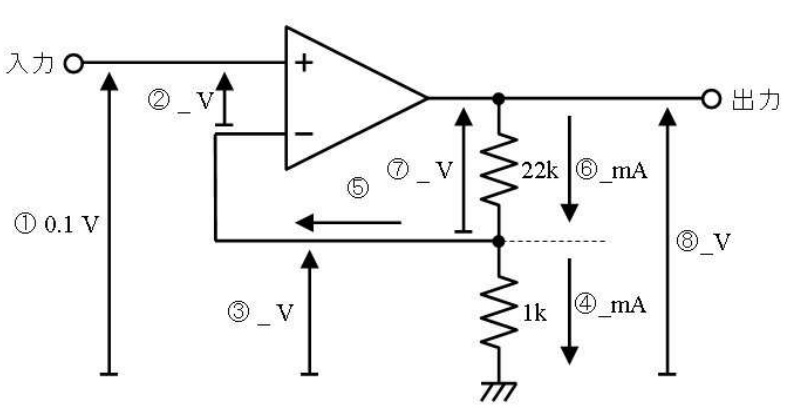
この増幅器の電圧増幅率A_Vは、２本の抵抗から次のように計算できます。

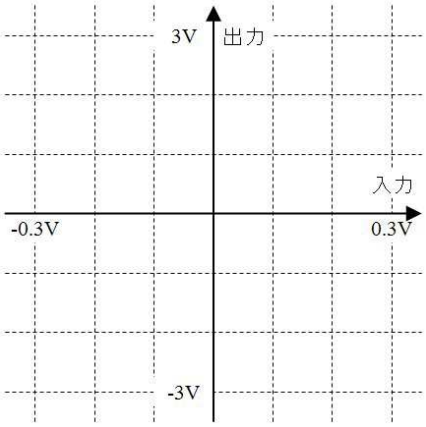
$$\text{電圧増幅率}A_V=\frac{1k+4k}{1k}=5\text{倍}$$

非反転増幅回路は、ユニティゲイン増幅器と同様、＋入力端子がそのまま増幅器の入力端子になっていますから、重要な性質④により、入力に電流が流れません。

8.5. 練習

下図の増幅回路の各部の電圧・電流と、電圧増幅率を求めてください。また、増幅器の入力電圧と出力電圧の関係（入出力電圧特性）を下図右側のグラフに書き込んでください。

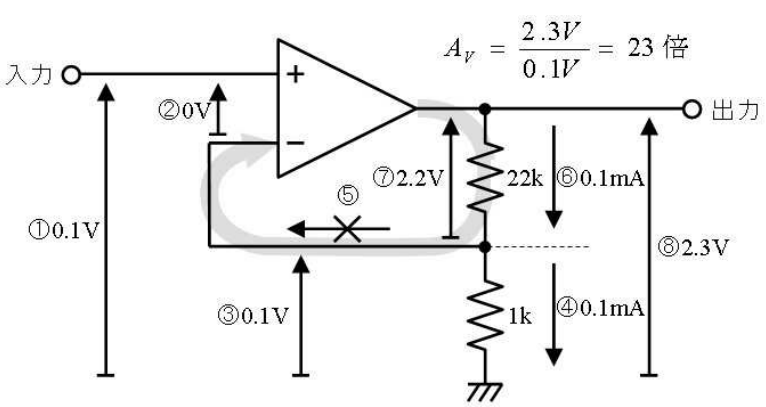


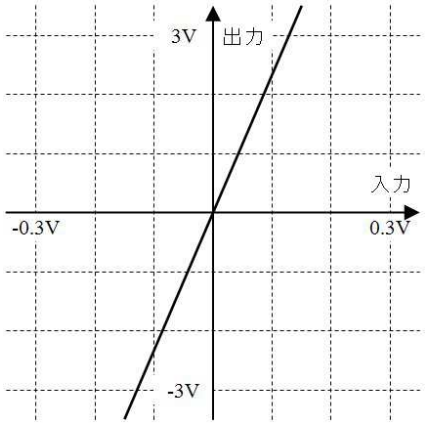


①　　V	②　　V	③　　V	④　　mA
⑤　　mA	⑥　　mA	⑦　　V	⑧　　V
⑨A_V ＝　　倍			

8.6. 答

下図灰色の経路で負帰還が掛かっているので、重要な性質①と④を使います。



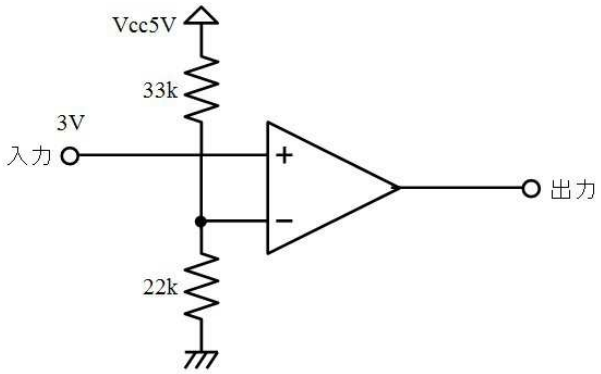


①　０．１Ｖ	②　０Ｖ	③　０．１Ｖ	④　０．１mA
⑤　０mA	⑥　０．１mA	⑦　２．２Ｖ	⑧　２．３Ｖ
⑨A_V ＝ ２３倍			

9. コンパレータ

コンパレータは「比べる回路」という意味で「比較回路」と訳されています。入力電圧がある電圧より「高いか」「低いか」を判別する働きがあります。このような出力の状態が「イチかバチか」という回路は、負帰還の掛かってない回路です。ですから、重要な性質の②③④を使って考えます。

下図にコンパレータの例を示します。（ここでは、５Ｖの単一電源で考えています）

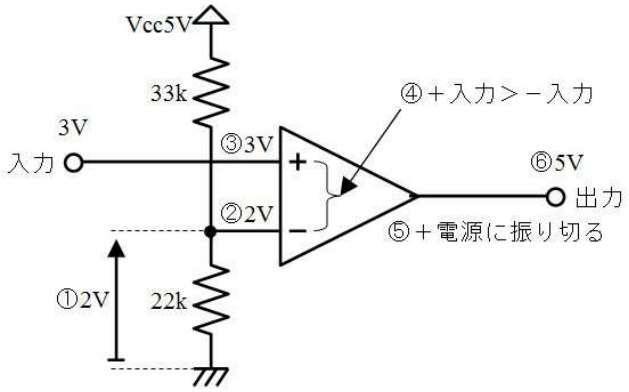


9.1. 練習

上図を見て下表に書き込みながら考えてください。

番号	質問	値
①	分圧の法則で、２２ｋの両端電圧は、	Ｖ
②	－入力端子の電圧は、	Ｖ
③	＋入力端子の電圧は、	Ｖ
④	＋入力と－入力端子の電圧の関係は、	＋入力□－入力
⑤	重要な性質②③より、オペアンプの出力端子の状態は、	
⑥	出力端子の電圧は、	Ｖ

9.2. 答



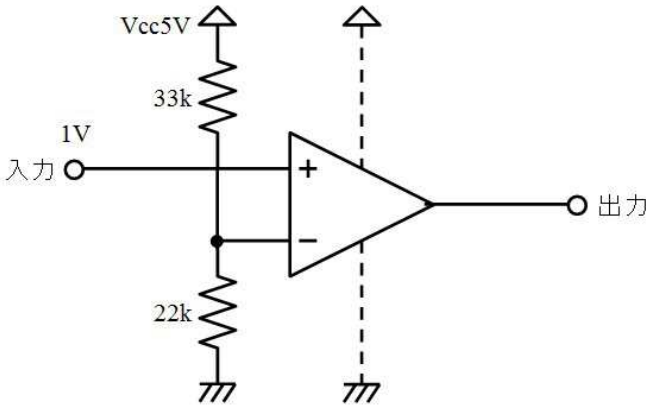
番号	質問	値
①	分圧の法則で、２２ｋの両端電圧は、 （重要な性質④で、－入力端子に電流が流れないので、分圧の法則が使えます）	２Ｖ
②	－入力端子の電圧は、	２Ｖ
③	＋入力端子の電圧は、	３Ｖ
④	＋入力と－入力端子の電圧の関係は、	＋入力＞－入力

⑤	重要な性質②③より、オペアンプの出力端子の状態は、	＋に振り切る
⑥	出力端子の電圧は、	５Ｖ

つまり、この回路に３Ｖを入力した場合、５Ｖが出力されます。

9.3. 練習

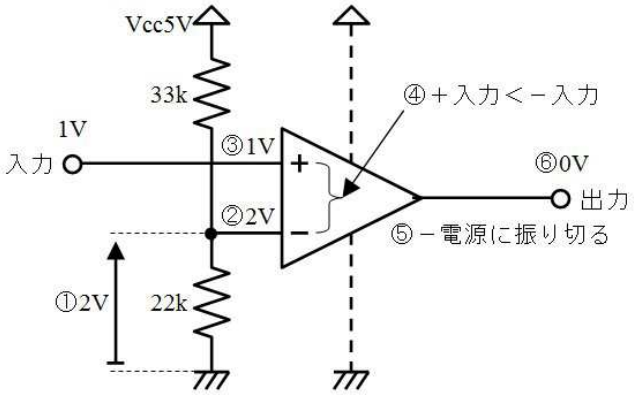
次に、このコンパレータに１Ｖを入力したときの回路の状態を考えます。



上図を見て下表に書き込みながら考えてください。

番号	質問	値
①	分圧の法則で、２２ｋの両端電圧は、	Ｖ
②	－入力端子の電圧は、	Ｖ
③	＋入力端子の電圧は、	Ｖ
④	＋入力と－入力端子の電圧の関係は、	＋入力□－入力
⑤	重要な性質②③より、オペアンプの出力端子の状態は、	
⑥	出力端子の電圧は、 （－電源は、この回路ではグラウンド（０Ｖ）に接続されています）	Ｖ

9.4. 答



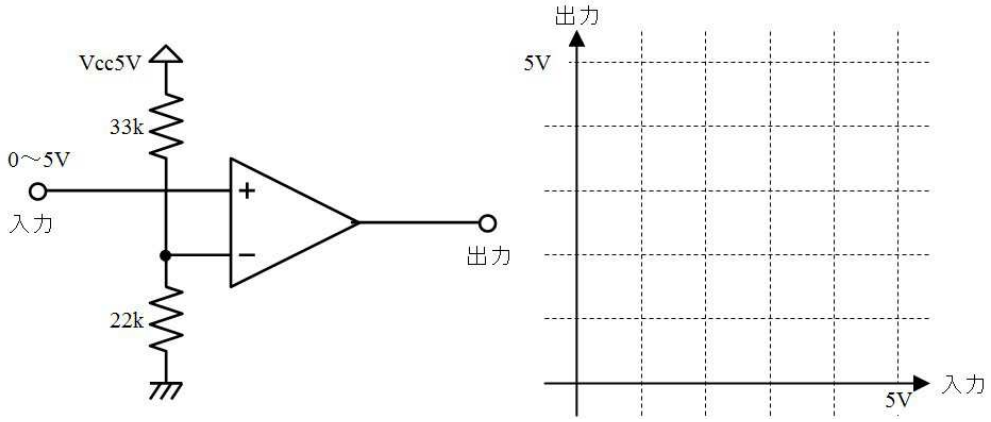
番号	質問	値

①	分圧の法則で、２２ｋの両端電圧は、 （重要な性質④で、－入力端子に電流が流れないので、分圧の法則が使えます）	２Ｖ
②	－入力端子の電圧は、	２Ｖ
③	＋入力端子の電圧は、	１Ｖ
④	＋入力と－入力端子の電圧の関係は、	＋入力＜－入力
⑤	重要な性質②③より、オペアンプの出力端子の状態は、	－に振り切る
⑥	出力端子の電圧は、 （－電源は、この回路ではグラウンド（０Ｖ）に接続されています）	０Ｖ

つまり、この回路に１Ｖを入力した場合、５Ｖが出力されます。

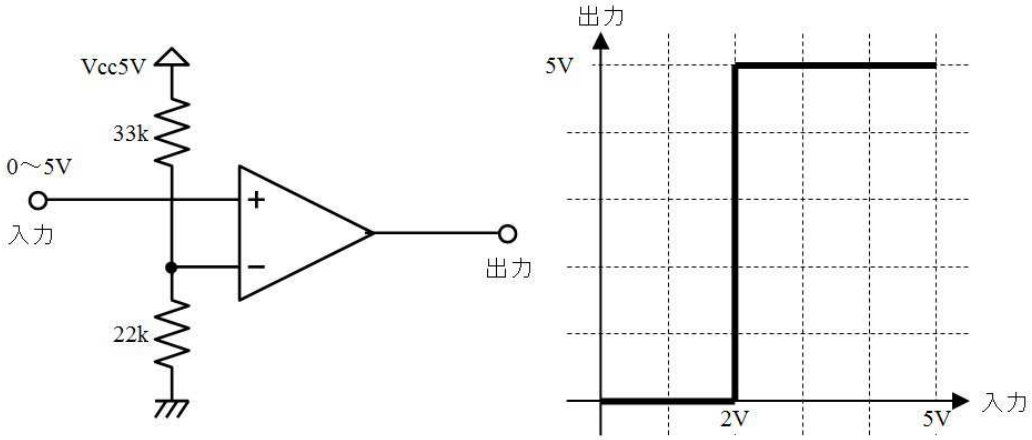
9.5. 練習

下図の回路の入力電圧を、０～５Ｖの範囲で変化させたときの、出力の電圧の様子を下図右側のグラフに記入して下さい。



9.6. 答

入力電圧２Ｖを境目に、それより入力が高いときは、出力は５Ｖ、それより入力が低いときは、出力は０Ｖとなります。このような境目の電圧を「スレッショルド(threshold)電圧」と呼びます。



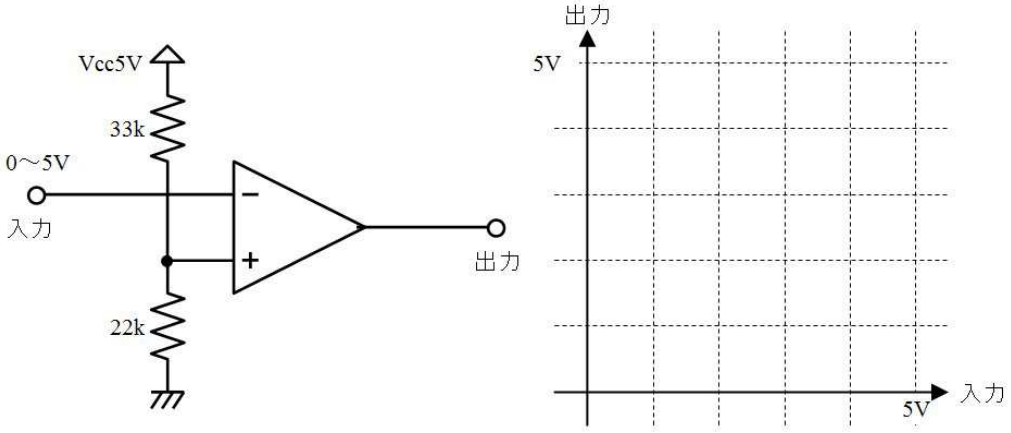
＋入力端子に入力を加えるコンパレータでは、－入力端子の電圧を基準に、入力が高ければ＋に振り

切り、入力が低ければ、－に振り切ります。

9.7. 練習

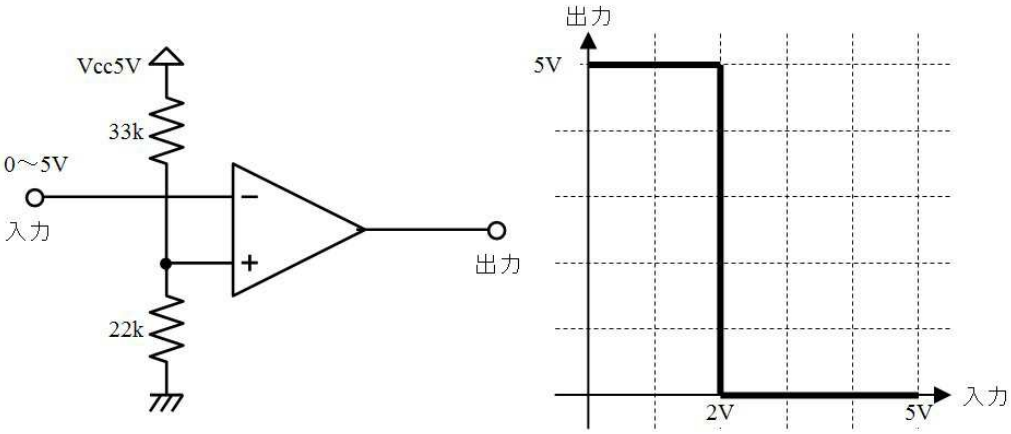
下図のコンパレータはこれまで検討してきた回路の＋入力と－入力を入れ替えています。

下図の回路の入力電圧を、0～5Vの範囲で変化させたときの、出力の電圧の様子を下図右側のグラフに記入して下さい。



9.8. 答

入力電圧２Vを境目に、それより入力が高いときは、出力は0V、それより入力が低いときは、出力は５Vとなります。



－入力端子に入力を加えるコンパレータでは、＋入力端子の電圧を基準に、入力が高ければ－に振り切り、入力が低ければ、＋に振り切ります。つまり、＋入力端子に入力を加えるタイプとは、出力の状態が逆になります。

入力に使う端子を選ぶことでコンパレータの動作を下表のように変えることができます。

コンパレータの入力端子と動作			
入力に使う端子	入力が高いとき	入力が低いとき	コンパレータのタイプ
＋端子	＋に振り切る	－に振り切る	非反転コンパレータ
－端子	－に振り切る	＋に振り切る	反転コンパレータ

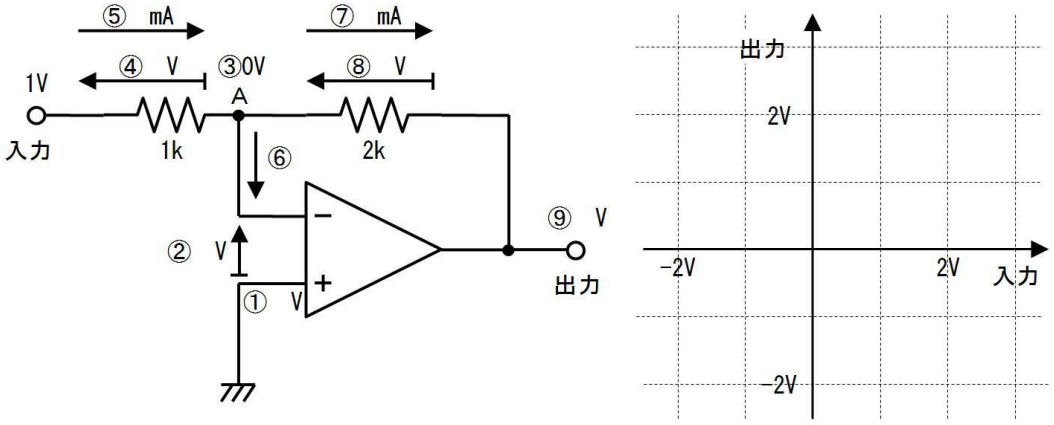
１０．アナログ回路前編

１．反転増幅回路

入力電圧が上がると、逆に出力電圧が下がるため、反転増幅器と呼ばれています。＋入力が接地されている事が特徴です。このタイプの回路は、素子の特性を素直に引き出すので、フィルタや非線形回路等、様々な応用回路に利用されます。

さて、下図に反転増幅回路を示します。出力端子の電圧が、２ｋΩを通じて－入力に回り込んでいますから、負帰還の回路です。

１.１．練習

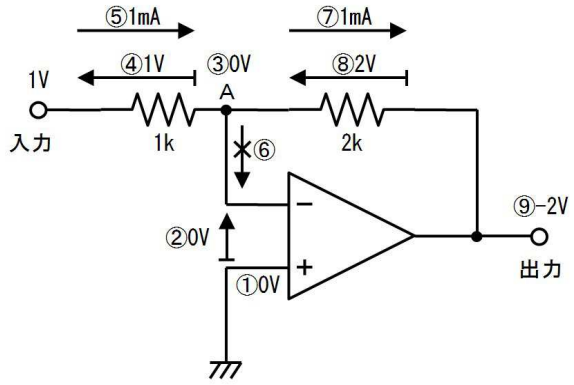


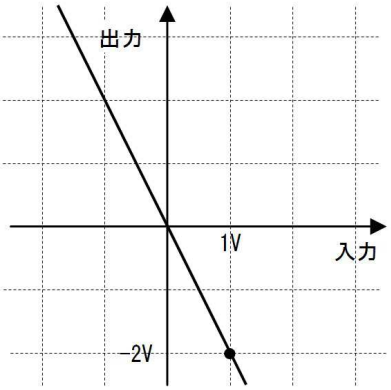
上図を見て下表に書き込みながら考え、上図右側のグラフに入出力特性を書き込んでください。

番号	質問	値
①	アースに接続されているので、＋入力端子の電圧は、	
②	負帰還の回路だから、＋入力と－入力の差は、	
③	このため、Ａ点の電圧は、	
④	入力電圧１ＶとＡ点の電圧の差から、１ｋΩの両端電圧は、	
⑤	オーム則より、１ｋΩに流れる電流は、	
⑥	重要な性質から、－入力端子に流れる電流は、	
⑦	Ａ点にキルヒ則をつかって、２ｋΩに流れる電流は、	
⑧	オーム則から、２ｋΩの両端電圧は、	
⑨	出力は、Ａ点より⑧の電圧だけ下がった電圧だから、	

１.２．答

入力に繋がった１ｋΩを「入力抵抗」、出力に繋がった２ｋΩを「帰還抵抗」と呼びます。

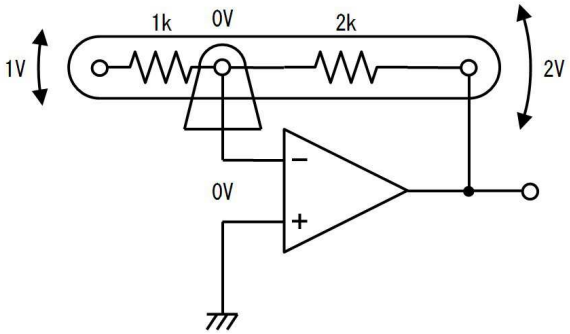




番号	質問	値
①	アースに接続されているので、＋入力端子の電圧は、	０Ｖ
②	負帰還の回路だから、＋入力と－入力の差は、	０Ｖ
③	このため、Ａ点の電圧は、	０Ｖ
④	入力電圧１ＶとＡ点の電圧の差から、１ｋΩの両端電圧は、	１Ｖ
⑤	オーム則より、１ｋΩに流れる電流は、	１ｍＡ
⑥	重要な性質から、－入力端子に流れる電流は、	０Ａ
⑦	Ａ点にキルヒ則をつかって、２ｋΩに流れる電流は、	１ｍＡ
⑧	オーム則から、２ｋΩの両端電圧は、	２Ｖ
⑨	出力は、Ａ点より⑧の電圧だけ下がった電圧だから、	－２Ｖ

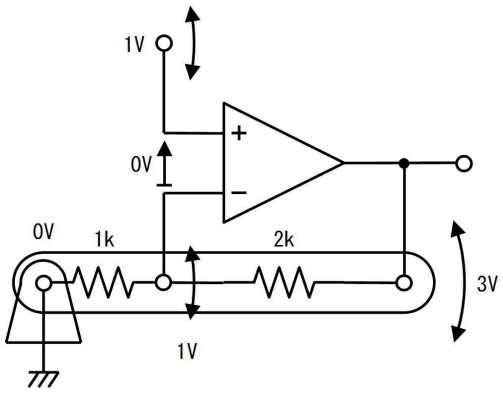
２．シーソーとオペアンプ

オペアンプを使った増幅器はシーソーにたとえることもできます。下図に反転増幅器の様子を示します。



－入力は＋入力と同じ電圧になるため、常に０Ｖです。このため、シーソーの中央の支点だと考えます。入力側が１ｋΩなので腕の長さが１ｍ、出力側が２ｋΩなので腕の長さが２ｍと考えます。支点が固定されているため、入力側が１Ｖ上がると、出力側が２Ｖ下がり、逆に入力側が１Ｖ下がると、出力側が２Ｖ上がります。

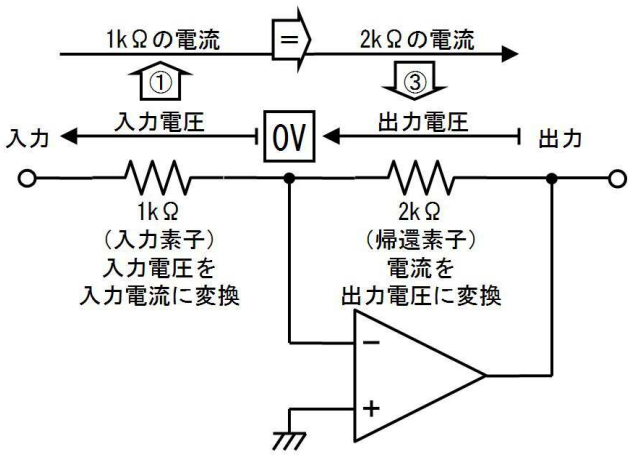
下図は非反転増幅回路の様子です。



１ｋΩの左側はアース（０Ｖ）に接続されているため、シーソーの左端を支点だと考えます。＋入力端子を１Ｖ上下させると、（＋入力＝－入力は同じ電圧なので）－入力端子も１Ｖ上下し、シーソーの働きで、出力端子は３Ｖ上下します。

３．反転増幅器の特徴

ユニティゲイン増幅器や、非反転増幅器は、（オペアンプの＋入力端子を、そのまま入力に使用していたため）入力に（殆ど）電流が流れませんでした。しかし、下図に示すように、反転増幅回路は入力側の１ｋΩに電流が流れて動作します。ですから、電圧計の入力部等には適しません。



しかし、上図の（＋入力が接地された）タイプの回路は、以下に説明する理由により、フィルタや変換回路等の（信号の性質を変化させるような）オペアンプらしい様々な用途に活用されます。

なぜならこの回路では、上図に示すように、まず、１ｋΩの右側（－入力端子）が０Ｖですから、入力電圧が正確に１ｋΩに加わります。その結果①１ｋΩには入力電圧に正確に対応した電流が流れます。次に、②１ｋΩに流れた電流は、（入力端子には電流が流れないので）全て２ｋΩに流れます。最後に、２ｋΩの左側が０Ｖですから、③２ｋΩに流れた電流で発生する電圧が、そのまま出力電圧となります。

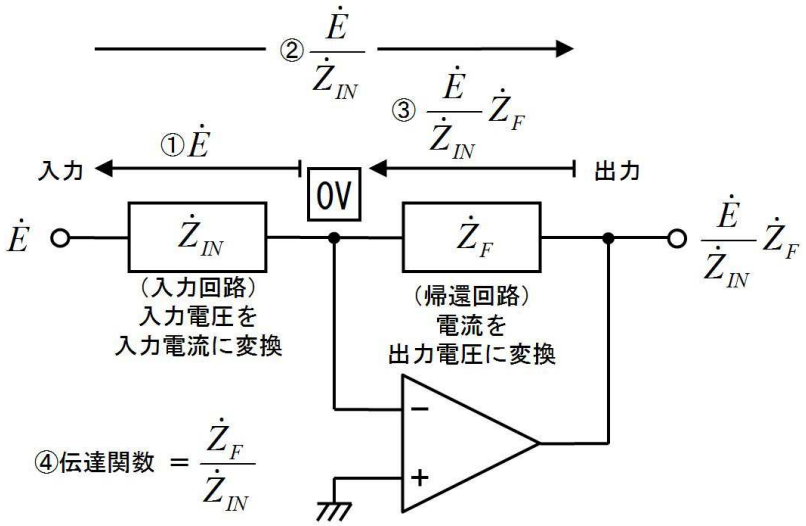
つまり、上図に示すように、１ｋΩが「入力電圧を電流に変換する素子」、２ｋΩが「電流を出力電圧に変換する素子」として作用します。この特徴により、１ｋΩ（入力素子）や２ｋΩ（帰還素子）の代わりに様々な素子や回路を使用することで、素子や回路の持つ電圧と電流の関係を、そのまま回路の特性として利用する事ができるのです。

４．理屈の寄り道（反転増幅器と交流理論）

ここでは、交流理論の考え方を使ってオペアンプを使った反転増幅回路を検討しています。回路の動

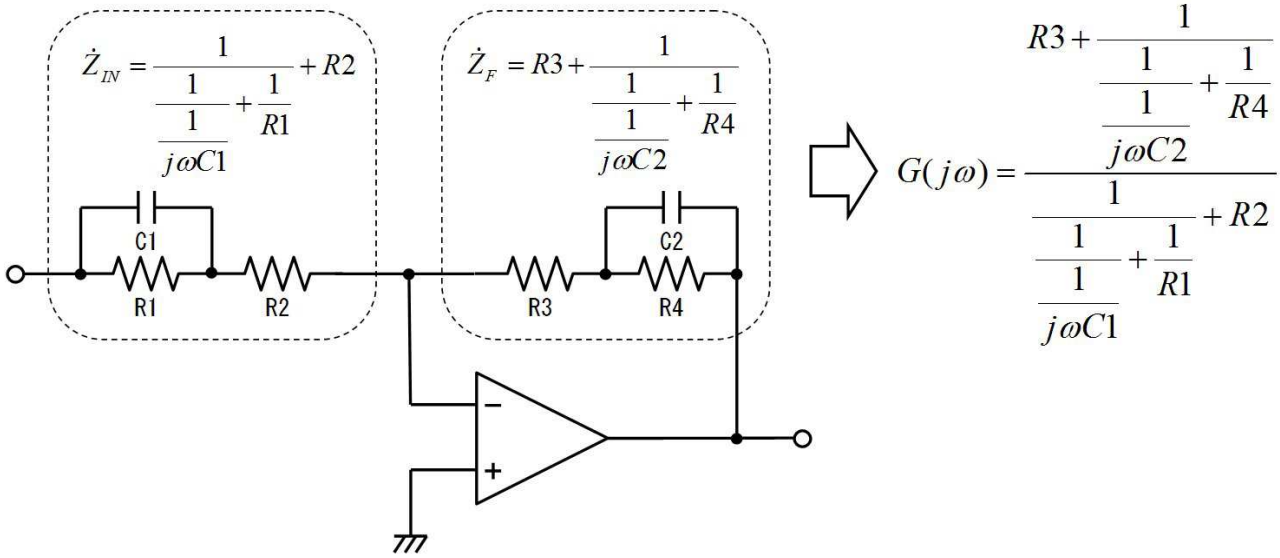
作を詳しく検討したい場合には便利な考え方ですが、知らなくても大きな問題はありませんから、興味がなければ読み飛ばすこともできます。内容的には、直流での電圧／電流が、複素電圧／複素電流に、増幅率が伝達関数に名前を変えただけです。

さて、反転増幅器を交流理論で考えると、抵抗Ｒをインピーダンスｚに書き換えて、下図のようになります。



入力に①交流電圧Ｅが加わると、②Ｅ／Ｚ$_{IN}$の電流が流れ、その電流がそのまま帰還回路にも流れるため、出力電圧は、③Ｅ×Ｚ$_{F}$／Ｚ$_{IN}$となります。出力／入力が伝達関数ですから、④伝達関数は、Ｚ$_{F}$／Ｚ$_{IN}$と極めてシンプルになります。（極性は無視しています）

このように、入力回路と帰還回路のインピーダンスの比が、そのまま回路の伝達関数になるため、思い通りの特性の回路を作ることができるのです。たとえば、後に説明する下図の回路は、



このように、並列インピーダンスと直列インピーダンスの計算だけ知っていれば、伝達間巣を求めることができます。そして、伝達関数さえ分れば、必要な特性をＥｘｃｅｌで表示させることができます。

図中の式を見ても「分数が沢山出てきて、ｊも入ってるし、難しそうだ」という心配は全くありません。出てきた数式を体裁よく変形するという（学校で専ら練習する作業の）必要は無くて、そのままＥｘｃｅｌに入力して値を求めれば良いのです。

上の伝達関数の値は、下図の簡単なＥｘｃｅｌシートで求める事ができます。下図のシートでは、画

面左上Ｂ２セルに、ωの値があり、この値を後で変化させて周波数特性を計算します。その２つ下のＢ４セルにはこのシートの計算結果である、ωに対応した伝達関数の値が表示されます。

	A	B	C	D
1	項目	値	インピーダンス	アドミタンス
2	ω	1		
3	jω	=COMPLEX(0,B2)		
4	G(jω)	=IMDIV(C17,C14)		
5				
6	R1	3300	=B6	=1/C6
7	R2	47000	=B7	=1/C7
8	R3	4000	=B8	=1/C8
9	R4	2000	=B9	=1/C9
10	C1	0.000000001	=IMDIV(1,D10)	=IMPRODUCT(B3,B10)
11	C2	0.000001	=IMDIV(1,D11)	=IMPRODUCT(B3,B11)
12				
13	C1//R2		=IMDIV(1,D13)	=IMSUM(D10,D7)
14	R1+(C1//R2)		=IMSUM(C6,C13)	
15				
16	C2//R3		=IMDIV(1,D16)	=IMSUM(D11,D8)
17	(C2//R3)+R4		=IMSUM(C16,C9)	
18				

Ｂ６～Ｂ１１は抵抗値やコンデンサ容量です。Ｃ６～Ｄ１１セルでは、使われる素子のインピーダンスやアドミタンスを表示させています。いずれか簡単な方（抵抗ならインピーダンス、コンデンサならアドミタンス）を計算し、他方は逆数を計算して表示させています。

これら素子の値を元に、Ｃ１３セル～Ｄ１４セルでは入力回路のインピーダンス、Ｃ１６セル～Ｄ１７セルは帰還回路のインピーダンスを計算しています。既に素子のインピーダンスとアドミタンスの両方が表示されているので、直列部分はインピーダンスを足し算、並列部分はアドミタンスを足し算するだけです。はっきり言って、一度式を立てて素子の値を代入するより、回路図から上のようなＥｘｃｅｌシートを作る方が余程楽です。

このようにして求めた、帰還回路のインピーダンスを、入力回路のインピーダンスで割れば、Ｂ４セルの伝達関数の値を求めることができます。

後は、周波数ωの値を様々に変化させてグラフを描くだけですが、手入力では手間が掛かりますから、マクロを使います。ここでは、標準モジュールに次のようなマクロを作っています。このマクロは、ω（Ｂ２セル）の値を次々と変化させて、その時のＧ（ｊω）（Ｂ４セル）の値を取り出し、Ｆ列とＧ列に並べて保存します。

```
Option Explicit


Public Sub 計算()
    Dim i As Long
    Dim omega As Double
    For i = 0 To 100
        omega = 10 ^ ((i - 50) / 5)
        Worksheets("Sheet1").Range("B2").Value = omega
        Worksheets("Sheet1").Cells(i + 2, 6) = omega
        Worksheets("Sheet1").Cells(i + 2, 7) = Worksheets("Sheet1").Range("B4").Value
```

```
        Next
End Sub
```

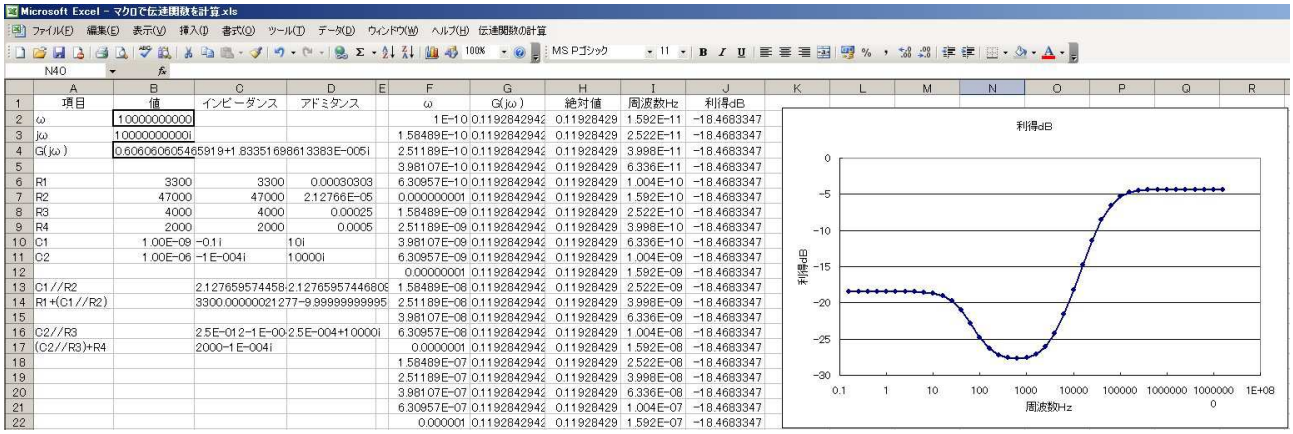
メニューバーから「計算」マクロを実行することもできますし、ツールバーにボタンを設けて、クリック一発で実行することもできます。

マクロの実行：「メニューバー」→「ツール」→「マクロ」→「マクロ」→（マクロを選択して）→「実行」

マクロのツールバーへの登録：「メニューバー」→「ユーザー設定」→「コマンド」タブの「分類」ボックスで「マクロ」選択し、「コマンド」ボックスに表示される「ユーザー設定のメニュー項目」を上部のツールバーにドラッグドロップした後、ドロップしてできた「ユーザー設定のメニュー項目」を右クリックして「マクロの登録」を選び、「計算」マクロを設定

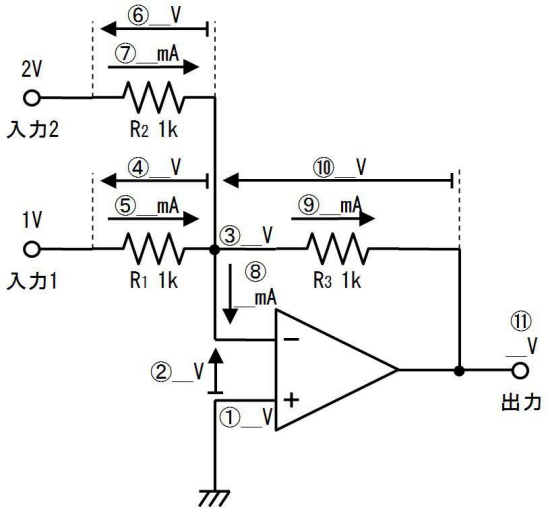
マクロを実行すると、F列にωの値が、G列にωに対応した伝達関数の値（$G(j\omega)$）が表示されますから、位相でも利得でも、好きな物を計算させてグラフに表示できます。下図はωから周波数を、$G(j\omega)$ から利得を計算して表示した例です。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	項目	値	インピーダンス	アドミタンス		ω	G(jω)	絶対値	周波数Hz	利得dB
2	ω	10000000000				0.00000000	0.11928429	=IMABS(G2)	=F2/2/PI()	=20*LOG(H2,10)
3	jω	=COMPLEX(0,B2)				1.58489319	0.11928429	=IMABS(G3)	=F3/2/PI()	=20*LOG(H3,10)
4	G(jω)	=IMDIV(C17,C14)				2.51188643	0.11928429	=IMABS(G4)	=F4/2/PI()	=20*LOG(H4,10)
5						3.98107170	0.11928429	=IMABS(G5)	=F5/2/PI()	=20*LOG(H5,10)
6	R1	3300	=B6	=1/C6		6.30957344	0.11928429	=IMABS(G6)	=F6/2/PI()	=20*LOG(H6,10)
7	R2	47000	=B7	=1/C7		0.00000000	0.11928429	=IMABS(G7)	=F7/2/PI()	=20*LOG(H7,10)
8	R3	4000	=B8	=1/C8		1.58489319	0.11928429	=IMABS(G8)	=F8/2/PI()	=20*LOG(H8,10)
9	R4	2000	=B9	=1/C9		2.51188643	0.11928429	=IMABS(G9)	=F9/2/PI()	=20*LOG(H9,10)
10	C1	0.000000001	=IMDIV(1,D10)	=IMPRODUCT(B3,B10)		3.98107170	0.11928429	=IMABS(G10)	=F10/2/PI()	=20*LOG(H10,10)



5. 加算回路

下図のように反転増幅器を応用して、複数の入力電圧の合計を出力することができます。

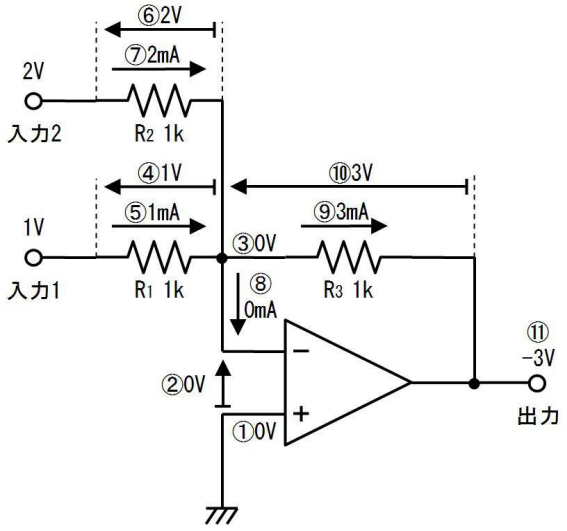


5.1. 練習

上図の回路の動作を、下表に書き込みながら検討してください。

番号	質問	値
①	＋入力の電圧は、（アースに接続されているから、）	V
②	＋入力と－入力の電圧差は、 （１ｋΩで負帰還が掛かっているから、）	V
③	－入力の電圧は、	V
④	R_1の両端電圧は、	V
⑤	R_1に流れる電流は、	mA
⑥	R_2の両端電圧は、	V
⑦	R_2に流れる電流は、	mA
⑧	－入力に流れる電流は、	mA
⑨	R_3に流れる電流は、 （⑤、⑦、⑧とキルヒ則から、）	mA
⑩	R_3の両端電圧は、	V
⑪	出力電圧は、	V

5.2. 答



番号	質問	値
①	＋入力の電圧は、（アースに接続されているから、）	０V
②	＋入力と－入力の電圧差は、 （１ｋΩで負帰還が掛かっているから、）	０V
③	－入力の電圧は、	０V

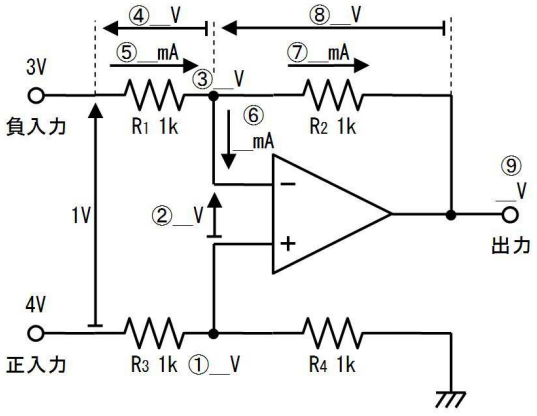
④	R_1の両端電圧は、	１Ｖ
⑤	R_1に流れる電流は、	１ｍＡ
⑥	R_2の両端電圧は、	２Ｖ
⑦	R_2に流れる電流は、	２ｍＡ
⑧	－入力に流れる電流は、	０ｍＡ
⑨	R_3に流れる電流は、 （⑤、⑦、⑧とキルヒ則から、）	３ｍＡ
⑩	R_3の両端電圧は、	３Ｖ
⑪	出力電圧は、	－３Ｖ

このように、入力１と入力２に加わった電圧の合計が、反転して出力されます。入力の下図はさらに増やすこともできます。また、入力抵抗の右側は０Ｖの－入力に接続されているため、入力１の信号が入力２に逆流することもありません。

６. 差動増幅回路

下図は「正入力」と「負入力」の差を出力する「差動増幅回路」です。このように、R_1～R_4の全抵抗に同じを使用すると、増幅率が１になります。

下図の例では、「負入力」には３Ｖ、「正入力」には（負入力より１Ｖ高い）４Ｖが加わっています。「正入力」と「負入力」の差は１Ｖです。



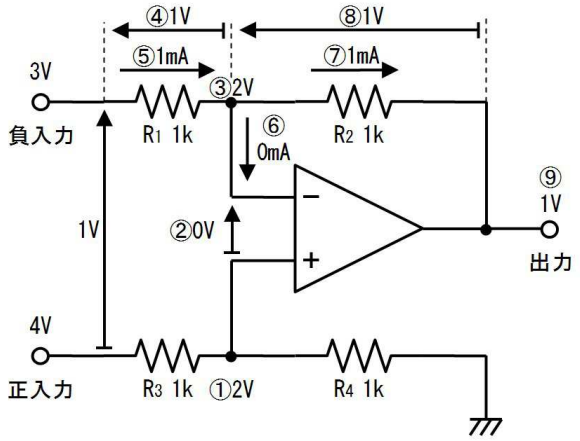
６.１. 練習

上図を参考に、下表に書き込んで差動増幅回路の動作を検討してください。

番号	質問	値
①	＋入力の電圧は、 （正入力の４ＶがR_3とR_4で分圧されているから、）	Ｖ
②	＋入力と－入力の間の電圧は、 R_2で負帰還が掛かっているから、	Ｖ

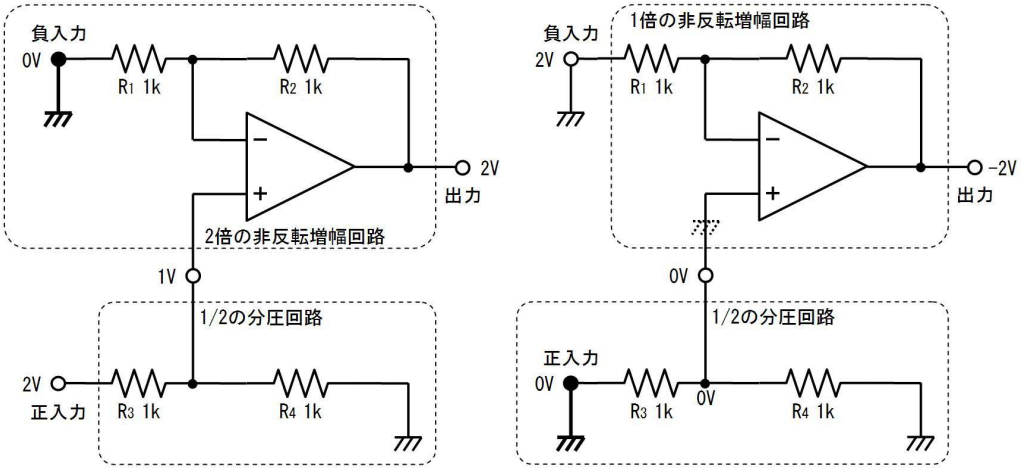
③	－入力の電圧は、	V
④	R_1の両端電圧は、	V
⑤	R_1に流れる電流は、	mA
⑥	－入力に流れる電流は、	mA
⑦	R_2に流れる電流は、（⑤、⑥とキルヒ則から、）	mA
⑧	R_2の両端電圧は、	V
⑨	出力電圧は、（⑥と⑧から、）	V

6.2. 答



番号	質問	値
①	＋入力の電圧は、 （正入力の４ＶがR_3とR_4で分圧されているから、）	２Ｖ
②	＋入力と－入力の間の電圧は、 R_2で負帰還が掛かっているから、	０Ｖ
③	－入力の電圧は、	２Ｖ
④	R_1の両端電圧は、	１Ｖ
⑤	R_1に流れる電流は、	１mA
⑥	－入力に流れる電流は、	０mA
⑦	R_2に流れる電流は、（⑤、⑥とキルヒ則から、）	１mA
⑧	R_2の両端電圧は、	１Ｖ
⑨	出力電圧は、（⑥と⑧から、）	１Ｖ

差動増幅回路は、下図（ａ）に示すとおり負入力をアースに接続すると、２倍の非反転増幅回路と、２分の１の分圧回路だと考えることができます。ですから、正入力に２Ｖを入力すれば、それが分圧されて１Ｖとなり、２倍に増幅されて２Ｖが出力されます。

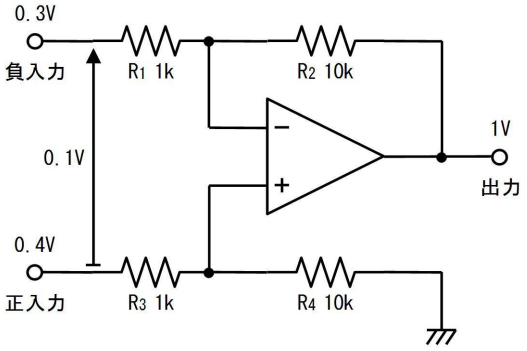


（ａ）負入力を接地した場合　　（ｂ）正入力を接地した場合

また、上図（ｂ）に示すとおり正入力をアースに接続すると、１倍の反転増幅回路と、２分の１の分圧回路だと考えることができます。ですから、負入力に２Ｖを入力すれば、それが反転されて－２Ｖが出力されます。

このように、正入力に加えた電圧は反転されずに出力され、負入力に加えた電圧は反転して出力されます。その結果、正入力と負入力の差が出力されます。

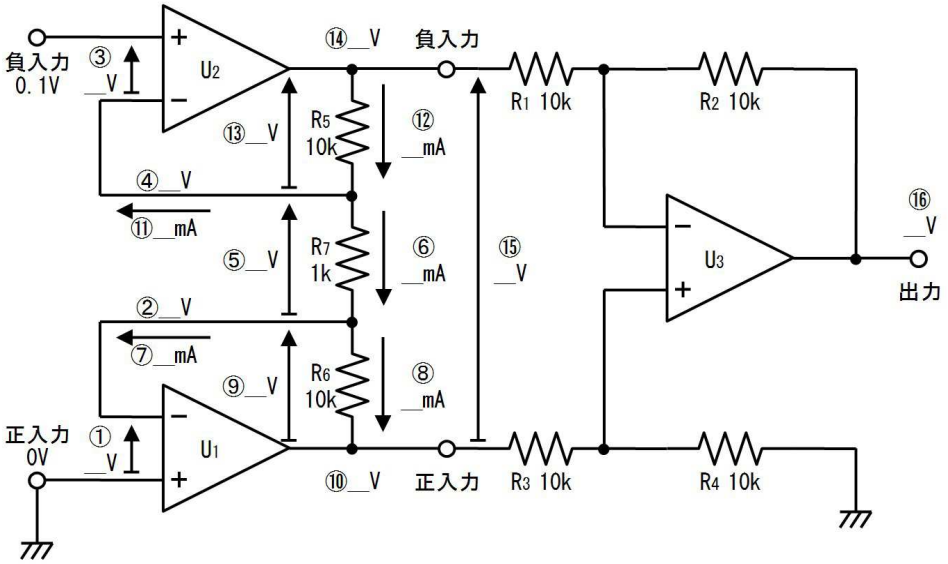
差動増幅回路で電圧差を増幅して出力する場合は、下図のように R_2 ＝ 増幅率 × R_1 とします。（R_1＝R_3、R_2＝R_4とします）ですから、下図の回路の増幅率は１０倍です。



差動増幅回路は入力端子に電流が流れて動作するため、測定する回路に影響を与えます。これを防止するには、次に説明する計測増幅回路を使います。

７．計装増幅回路

計装増幅回路（インスツルメンテーション・アンプ／計測装置増幅回路）は、下図に示すように、差動増幅回路の前段に反転増幅回路を追加し、入力に流れる電流を小さく（入力インピーダンスを高く）したものです。Ｒ５＝Ｒ６とし、Ｒ７で増幅率を設定できます。



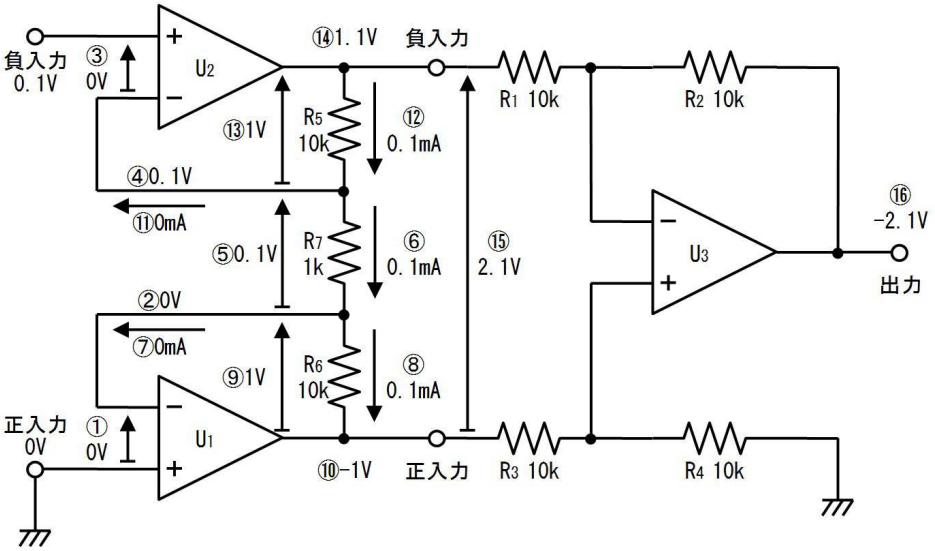
7.1. 練習

上図の計装増幅回路の正入力をアースに接続し、負入力に０．１Ｖを加えた場合の各部の電圧／電流を、下表に書き込みながら検討してください。

番号	質問	値
①	U_1の＋入力と－入力の電圧差は、 （R_6で負帰還が掛かっているので、）	V
②	U_1の－入力の電圧は、	V
③	U_2の＋入力と－入力の電圧差は、 （R_5で負帰還で掛かっているので、）	V
④	U_2の－入力の電圧は、	V
⑤	R_7の両端電圧は、 （②と④から、）	V
⑥	R_7に流れる電流は、	mA
⑦	U_1の－入力に流れる電流は、	mA
⑧	R_6に流れる電流は、 （⑥、⑦とキルヒ則から、）	mA
⑨	R_6の両端電圧は、	V
⑩	U_1の出力端子の電圧は、	V
⑪	U_2の－入力に流れる電流は、	mA
⑫	R_5に流れる電流は、 （④、⑥とキルヒ則から、）	mA
⑬	R_5の両端電圧は、	V

⑭	U_2の出力端子の電圧は、	V
⑮	U_1の出力端子から、U_2の出力端子までの電圧は、	V
⑯	U_3の出力電圧は、 （１倍の差動増幅回路だから、）	V

7.2. 答



番号	質問	値
①	U_1の＋入力と－入力の電圧差は、 （R_6で負帰還が掛かっているので、）	０V
②	U_1の－入力の電圧は、	０V
③	U_2の＋入力と－入力の電圧差は、 （R_5で負帰還で掛かっているので、）	０V
④	U_2の－入力の電圧は、	０．１V
⑤	R_7の両端電圧は、 （②と④から、）	０．１V
⑥	R_7に流れる電流は、	０．１mA
⑦	U_1の－入力に流れる電流は、	０mA
⑧	R_6に流れる電流は、 （⑥、⑦とキルヒ則から、）	０．１mA
⑨	R_6の両端電圧は、	１V
⑩	U_1の出力端子の電圧は、	－１V
⑪	U_2の－入力に流れる電流は、	０mA

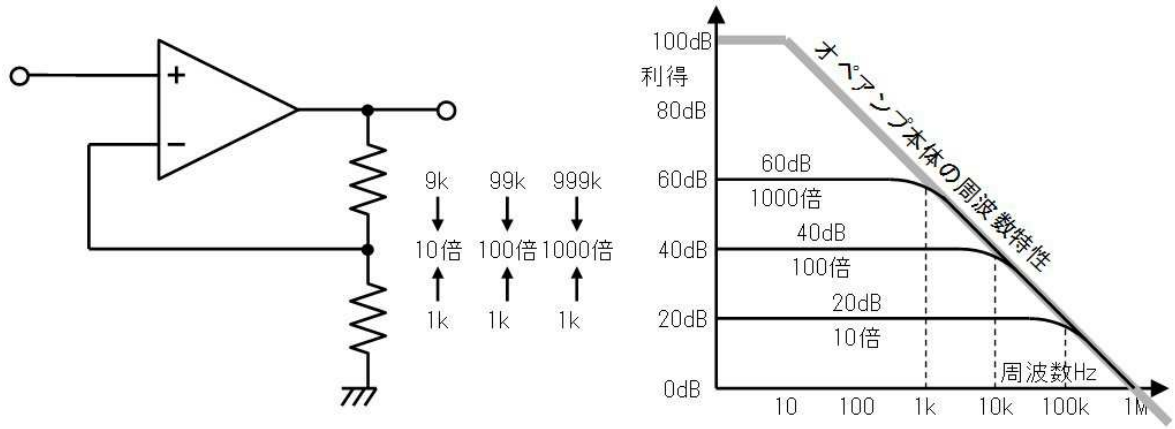
⑫	R_5に流れる電流は、 （④、⑥とキルヒ則から、）	０．１ｍＡ
⑬	R_5の両端電圧は、	１Ｖ
⑭	U_2の出力端子の電圧は、	１．１Ｖ
⑮	U_1の出力端子から、U_2の出力端子までの電圧は、	２．１Ｖ
⑯	U_3の出力電圧は、 （１倍の差動増幅回路だから、）	－２．１Ｖ

このように、前段の非反転増幅回路の差動信号増幅率は（R_5＋R_6）／R_7となります。

８．オペアンプと応用回路の周波数特性

下図右側に太い灰色線で示すように、オペアンプ本体の周波数（利得）特性は、右肩下がりです。これは、ハンドルを回して電圧を上げ下げするのに時間が掛かるためです。（ハンドルを回す速さは一定ですから、上げ下げの頻度が増すほど、少ししか回せなくなります）

下図左側に非反転増幅器を示します。同図に示すとおり、使用する抵抗によって増幅率を幅広く設定することができます。下図の例では、帰還抵抗を９ｋΩ、９９ｋΩ、９９９ｋΩと変更することで１０倍、１００倍、１０００倍と設定しています。



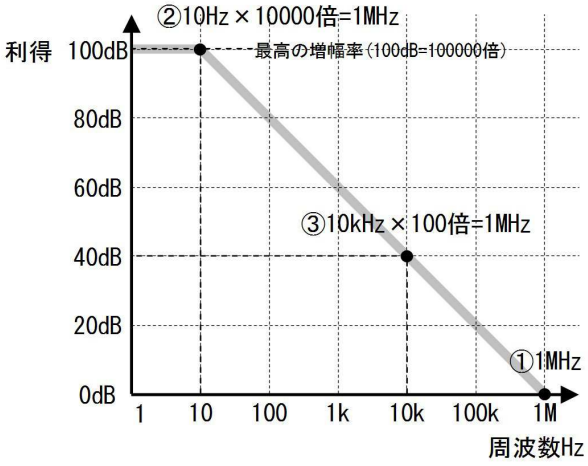
このように、抵抗値によっては高い増幅率を得ることができますが、上図右側のグラフに灰色線で示す「オペアンプ本体の周波数特性」より大きな増幅率は出せません。このため、増幅率を大きくするほど、遮断周波数（ここから増幅率が下がるぞ、という周波数）が低くなって行きます。上の例では、倍率を１０倍、１００倍、１０００倍と大きくすると、遮断周波数は１００ｋＨｚ、１０ｋＨｚ、１ｋＨｚと低くなっています。

このように回路を設計する上でオペアンプ本体の周波数特性は重要です。このためデータシートでは下表のような様々な方法で周波数特性が示されます。

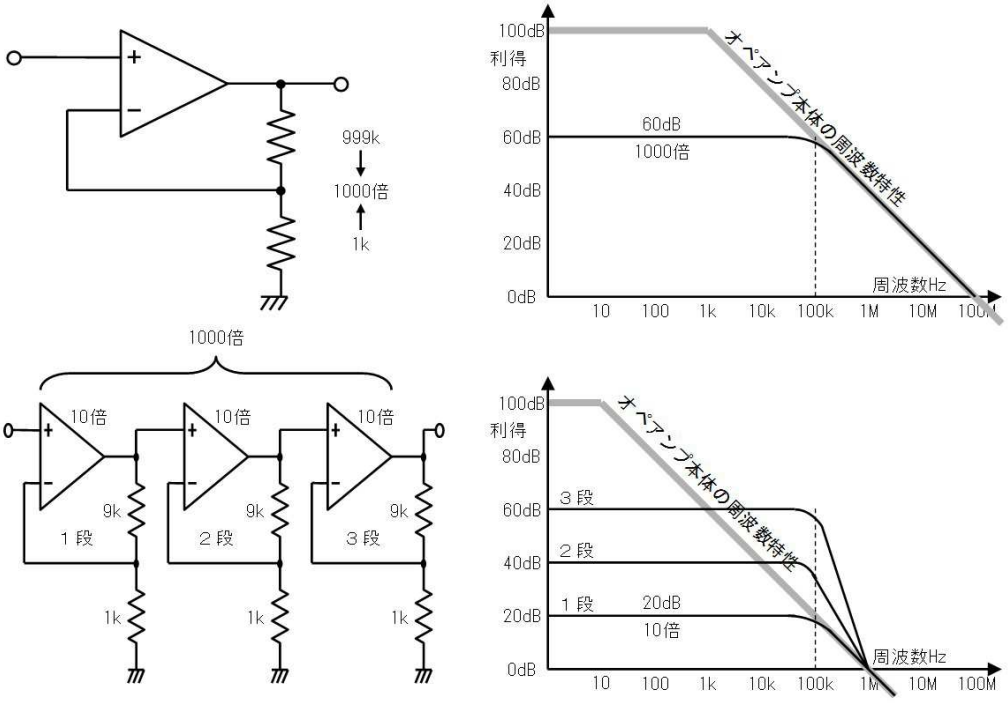
名称や単位	説明	上図の例
周波数特性図	グラフで図示される	上図右側灰色のグラフ
ユニティゲイン周波数 ［Ｈｚ］	（負帰還を掛けないときに）増幅率が１倍（利得がＯｄＢ）に	１ＭＨｚ

	なる周波数（下図①）	
ＧＢ積 ゲインバンドウィズ ［Ｈｚ］	（負帰還を掛けないときの）最高の増幅率と増幅率が下がり始める周波数の積（下図②）	１０Ｈｚ×１０万倍(100dB) ＝１ＭＨｚ
	ある周波数（任意）での周波数と増幅率の積（下図③）	１０ｋＨｚ×１００倍 ＝１ＭＨｚ

※最高の増幅率は、負帰還を掛けないときの直流の増幅率で「オープンループ（負帰還なしの）ゲイン」とも呼ばれます。



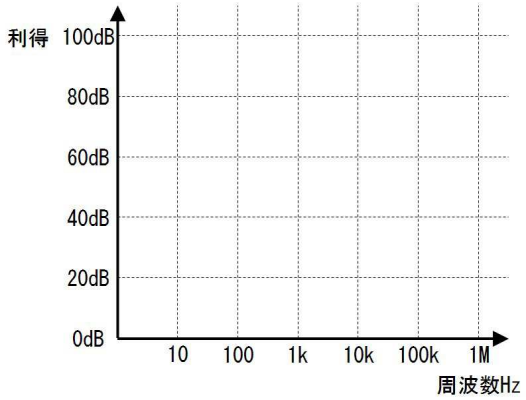
遮断周波数が高く、そのうえ増幅率も大きい増幅器を設計するには、下図上側のように、周波数特性の優れオペアンプを使うか、下図下側のように、増幅率を抑え（て遮断周波数を高め）た増幅回路を複数接続します。下図は上下共に、電圧増幅率１０００倍、遮断周波数１００ｋＨｚの増幅器の例です。



8.1. 練習

オープンループゲイン８０ｄＢ、ＧＢ積３００ｋＨｚのオペアンプの周波数特性を下図に点線で作図し、このオペアンプを使って作った１００倍の増幅器の周波数特性を実線で書き加え、増幅器の遮断周

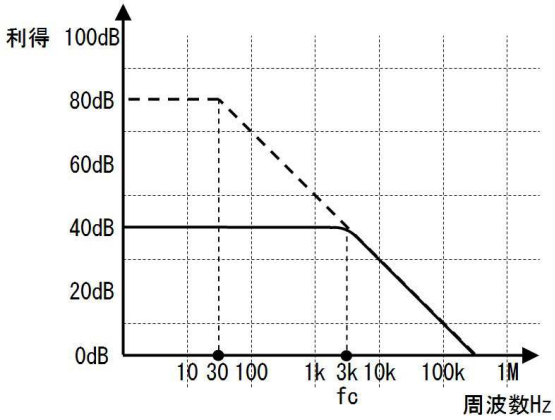
波数（カットオフ周波数）を答えてください。



カットオフ周波数（ｆ$_C$）　　ｋＨｚ

8.2. 答

８０ｄＢは電圧１００００倍の事である。ＧＢ積３００ｋＨｚを最大の増幅率１００００倍で割ると、３０Ｈｚとなるから、このオペアンプは３０Ｈｚ以上の周波数で利得が低下して行く。最大の利得が８０ｄＢであることを考えて、下図点線のように作図できる。

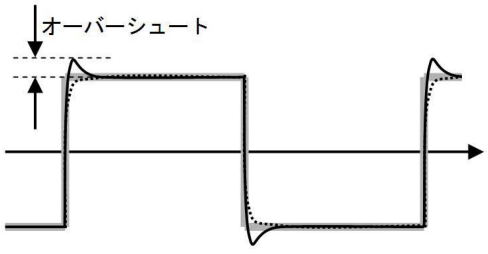


カットオフ周波数（ｆ$_C$）　３　ｋＨｚ

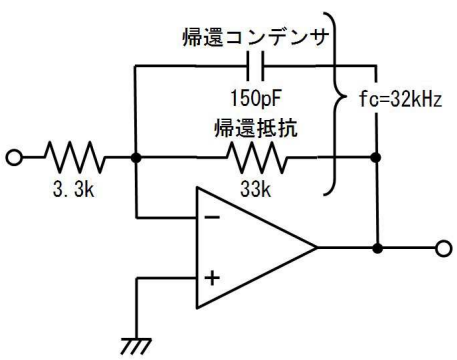
電圧１００倍は４０ｄＢだから、増幅器の利得はオペアンプ本体の利得を越えられない事を考えて、周波数特性は上図実線のようになり、図よりｆ$_C$は３ｋＨｚと分かる。

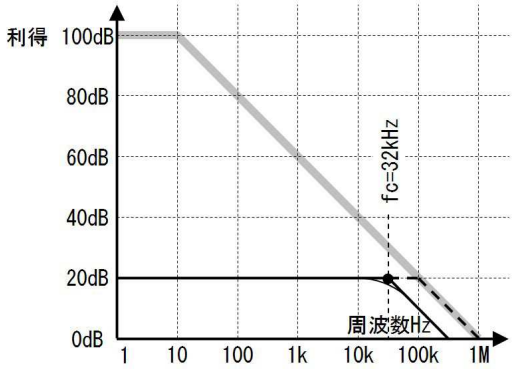
9. 帯域制限

必要以上に高い周波数まで増幅できると、ラジオの電波を受信して誤動作する場合がありますし、雑音も多くなります。また増幅率が低い場合は、下図に示すようなオーバーシュートが出る場合もあります。



このような場合、下図左側の回路図に示すとおり、帰還抵抗と並列に小さな容量の帰還コンデンサを接続すると、不要な高い周波数の増幅を抑え、オーバーシュートを無くすことができます。





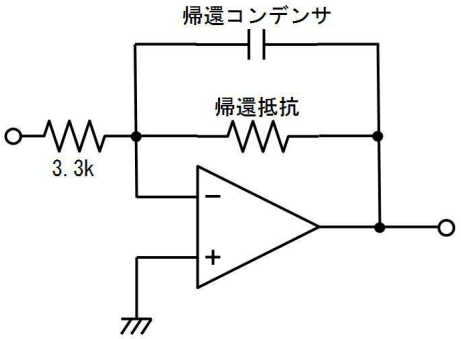
上図右側のグラフの点線がコンデンサの無い状態、実線がコンデンサを取り付けた場合の周波数特性です。３３ｋΩと１５０ｐＦで決まる周波数（f_C）より高い周波数で増幅率が下がって行きます。

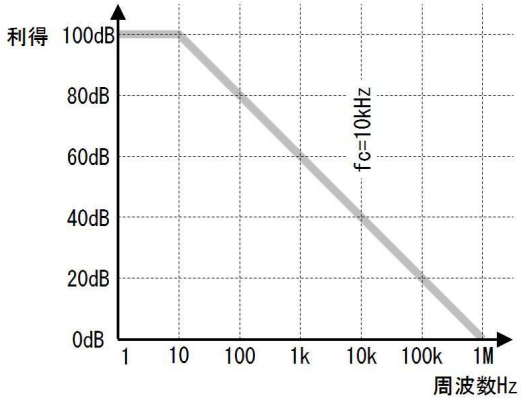
コンデンサの容量は、=1/2/PI()/F1/C1、上の例では=1/2/PI()/32E3/33E3 で求める事ができます。（f_C は=1/2/PI()/C1/R1 です）

使用する上限の周波数の２～５倍程度で帯域を制限しておくのが、安定動作のコツです。

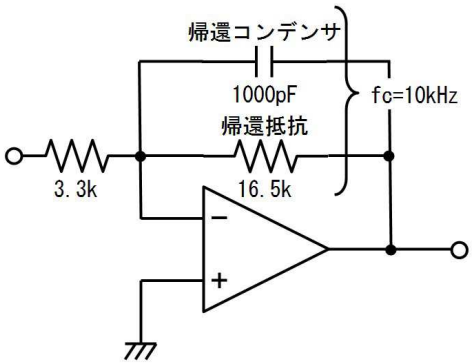
９.１. 練習

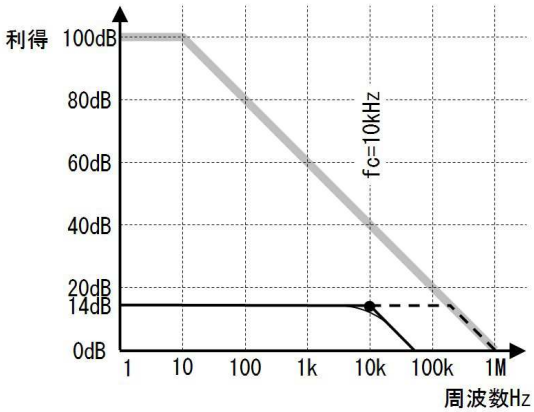
下図の反転増幅器の増幅率を５倍とし、帯域を１０ｋＨｚに制限できるよう、帰還抵抗と帰還コンデンサの値を決定し、増幅器の周波数特性をグラフに書き加えてください。





９.２. 答

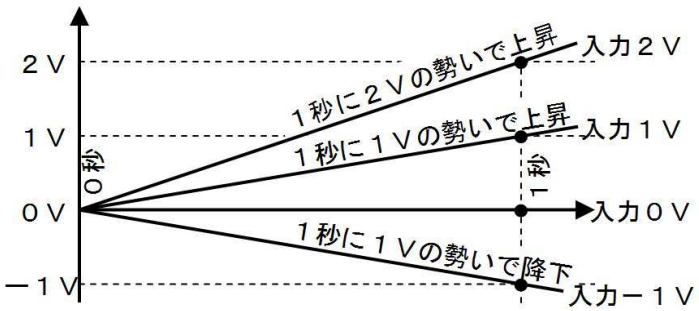




帰還抵抗は=5*3.3E3 で１６．５ｋΩ、 帰還コンデンサは=1/2/pi()/10E3/16.5E3 で、１０００ｐＦ。参考までに、電圧増幅率５倍は=20*LOG(5,10) で約１４ｄＢ。

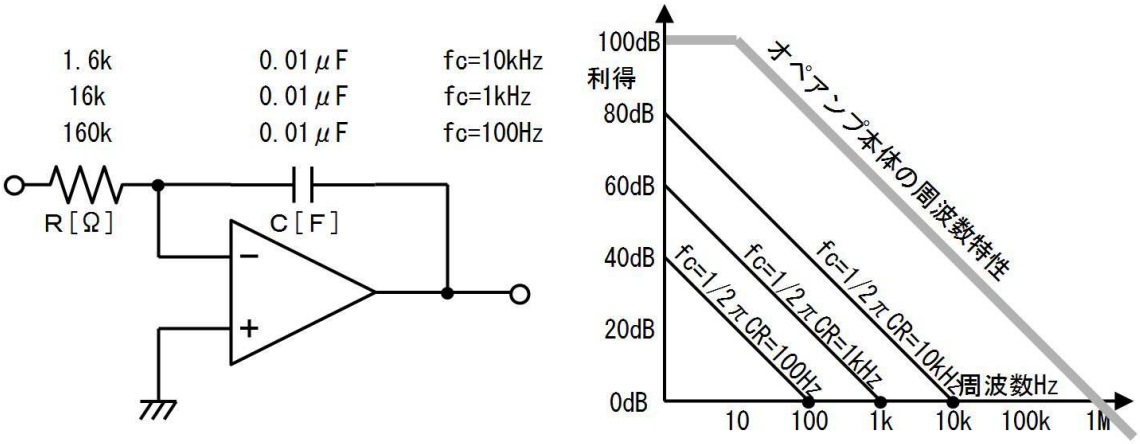
１０．積分回路

たとえば下図のように、１Ｖを入力すると１秒に１Ｖの勢いで、２Ｖを入力すると１秒に２Ｖの勢いで、出力が上昇し続ける回路を積分回路と呼びます。入力が０Ｖの場合は、出力電圧は変動しません。



デジタル計算機が無い時代には、シミュレーションをするために重要な回路で、オペアンプはこの回路を作るために開発されたとも言えます。

オペアンプを使った積分回路を下図に示します。



この回路は、入力電圧が高い程、出力電圧が勢い良く「下がる」ので、名前こそ「積分回路」と呼ばれていますが、働きは「反転積分回路」です。

動作のイメージは、入力電圧に比例した電圧がＲに流れ、その電流でＣが充電され、Ｃの電圧が（反転して）出力電圧になる。そのため、一定の電圧を加えると、一定のペースでＣが充電され、出力電圧が降下する、というものです。

今まで説明した、直流回路や交流回路の考え方を使って、電圧の変化や伝達関数を求める事ができますが、その詳細を説明するのは本書の主目的ではないので後回しにし、設計に必要な値の求め方を先に紹介します。

上図の回路の、抵抗Ｒやコンデンサ容量Ｃは、入力電圧と、出力電圧の降下速度から、次のように計算できます。

Ｃ × Ｒ ＝ 入力電圧［Ｖ］ ÷ 出力電圧の降下速度［Ｖ／秒］

また、この回路は上図右側のグラフのように、周波数が上昇すると増幅率が低下します。増幅率が低下して１倍（０ｄＢ）になる周波数から、ＣやＲは次のように計算できます。

Ｃ × Ｒ ＝ １ ／（２ π × 増幅率が１倍となる周波数［Ｈｚ］）

=1/2/pi()/F1［秒］

また逆に、

増幅率が１倍となる周波数［Ｈｚ］＝ １ ／（２ π ×Ｃ × Ｒ）

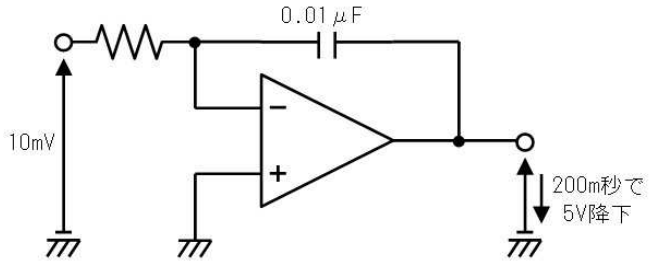
=1/2/pi()/C1/R1［Ｈｚ］

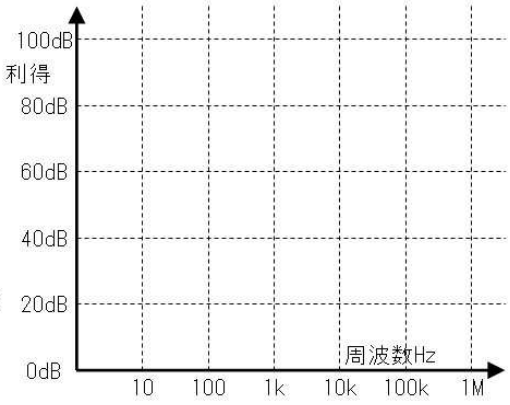
と、計算することができます。Ｃ × Ｒは時定数τ（タウ）と呼んでいるものです。

積分回路は安定動作する場合が多く、特に安定のための工夫せずに応用することができます。

ただし、数秒から数十秒を越える、極めてゆっくりと時間を掛けて動作する積分回路では、コンデンサの電荷が（小さな穴の開いたバケツのように）漏れてしまい、出力電圧が不正確になる場合があります。このような場合は、漏れ電流の少ないコンデンサ（ポリプロピレンフィルムコンデンサ等）を使い、空中に配線するなどの工夫をします。このような回路は、オペアンプやコンデンサ、それに基板が汚れているだけで（汚れを通して）電流が漏れてしまうので、フラックス除去液等で綺麗に清掃します。

１０.１. 練習

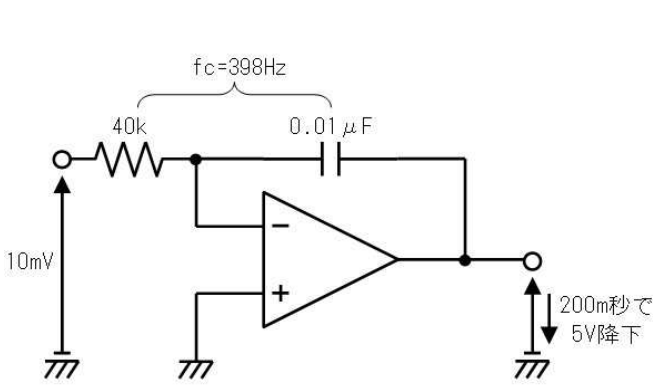


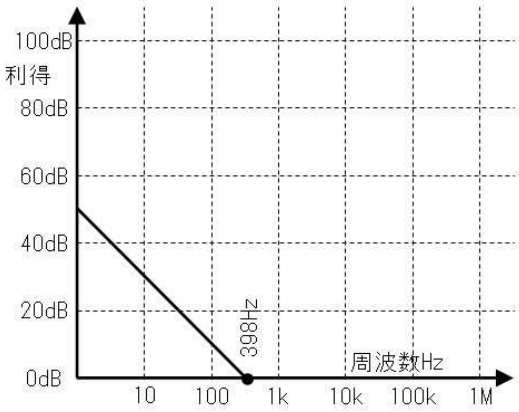


上図に示すとおり、０．０１μＦのコンデンサを使って、入力１０ｍＶを加えたとき、２００ｍ秒の間で、出力電圧が５Ｖ降下する積分回路を、下表に記入して設計してください。また、この積分回路の周波数特性を上図右側のグラフに記入してください。

番号	質問	値
①	出力電圧の降下速度は、	Ｖ／秒
②	このときの入力電圧は、	ｍＶ
③	Ｃ×Ｒの値（時定数）は、	μ秒
④	コンデンサは０．０１μＦだから抵抗の値は	ｋΩ
⑤	増幅率が１倍となる周波数は、	Ｈｚ

１０.２. 答





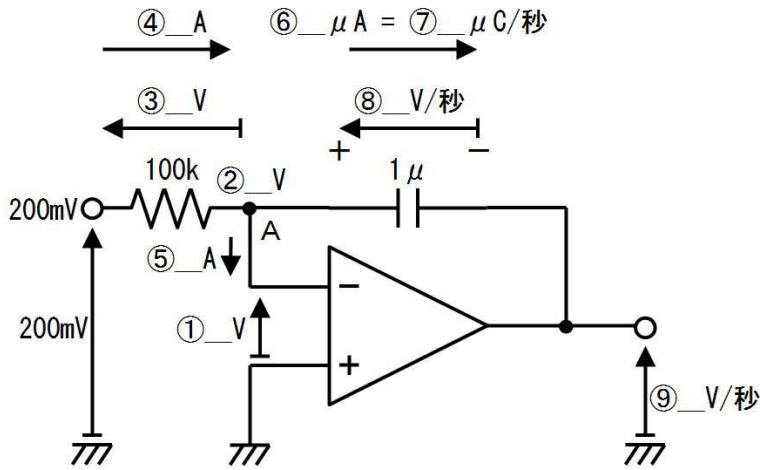
番号	質問	値
①	出力電圧の降下速度は、５Ｖ／２００m秒で、 =5/200E-3	２５Ｖ／秒
②	このときの入力電圧は、	１０mＶ
③	Ｃ×Ｒの値（時定数）は、１０mＶ÷２５Ｖ／秒で =10E-3/25	４００μ秒
④	コンデンサは０．０１μＦだから抵抗の値は ４００μ秒／０．０１μＦで=400E-6/0.01E-6	４０kΩ
⑤	増幅率が１倍となる周波数は、２／（２πＣＲ） =1/2/pi()/0.01E-6/40E3	３９８Ｈｚ

１０.３. 練習（積分回路の直流検討）

既に説明した方法で積分回路は設計できます。

ここでは、直流回路を復習するために、積分回路の動作を直流検討します。既に知っている回路を使うときは、このような検討は必要ありません。しかし、知らない回路に出会ったときは、直流回路を知識を使って、動作を考えることができます。

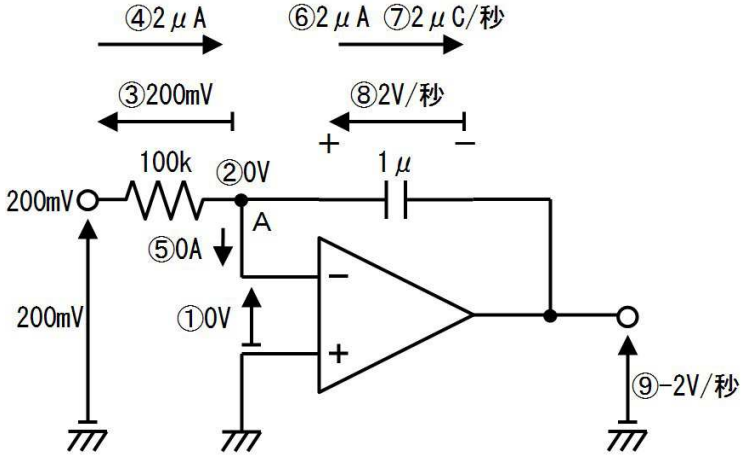
ただし、こういった説明は、教科書的で退屈な上、直ぐには役に立たないので、毎回このような検討を行うことは控えます。「知らない回路が出てきたら、直流理論と交流理論だ」とだけ覚えといて下さい。



さて、上図の積分回路は、帰還コンデンサを通じて、出力電圧が－入力端子に回り込んでいますから、負帰還の回路です。上図の回路を、下表の値欄に書き込んで直流検討してください。

番号	質問	値
①	＋入力と－入力の電圧は、負帰還だから、	＋入力□－入力
②	Ａ点の電圧は、	[Ｖ]
③	抵抗の両端電圧は、	[ｍＶ]
④	抵抗に流れる電流は、オーム則より、	[μＡ]
⑤	－入力端子に流れる電流は、	[Ａ]
⑥	コンデンサに流れる電流は、キルヒ則より、	[μＡ]
⑦	コンデンサに１秒に流れ込む電荷は、 （１Ａ＝１Ｃ／秒だから、）	[μＣ／秒]
⑧	コンデンサの電圧の１秒あたりの上昇は、 （コンデンサの電圧＝電荷[Ｃ]／容量[Ｆ]だから、コップに流れ込む水を想像して、）	[Ｖ／秒]
⑨	出力電圧の１秒あたりの変化は、 （コンデンサの電圧矢印の向きに注意して、）	[Ｖ／秒]

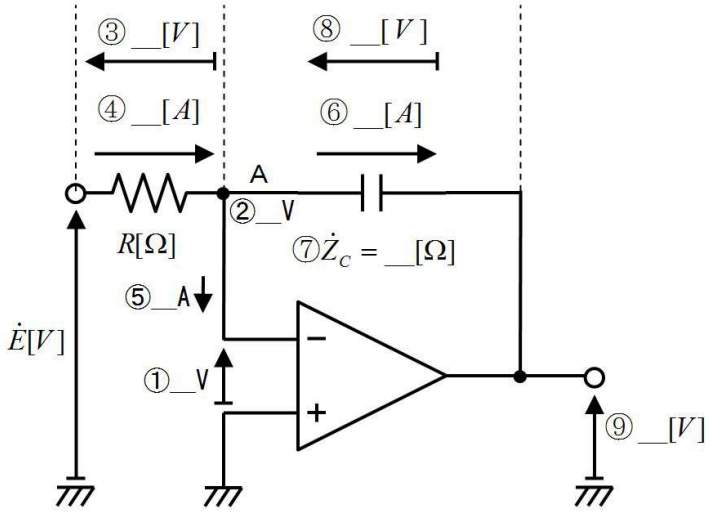
１０.４. 答



番号	質問	値
①	＋入力と－入力の電圧は、負帰還だから、	＋入力=－入力
②	Ａ点の電圧は、	０[Ｖ]
③	抵抗の両端電圧は、	２００[ｍＶ]
④	抵抗に流れる電流は、オーム則より、=200E-3/100E3	２[μＡ]
⑤	－入力端子に流れる電流は、	０[Ａ]
⑥	コンデンサに流れる電流は、キルヒ則より、	２[μＡ]
⑦	コンデンサに１秒に流れ込む電荷は、 （１Ａ＝１Ｃ／秒だから、）	２[μＣ／秒]
⑧	コンデンサの電圧の１秒あたりの上昇は、 （コンデンサの電圧＝電荷[Ｃ]／容量[Ｆ]だから、コップに流れ込む水を想像して、）=2E-6/1E-6	２[Ｖ／秒]
⑨	出力電圧の１秒あたりの変化は、 （コンデンサの電圧矢印の向きに注意して、）	－２[Ｖ／秒]

１０.５. 練習（積分回路の交流検討）

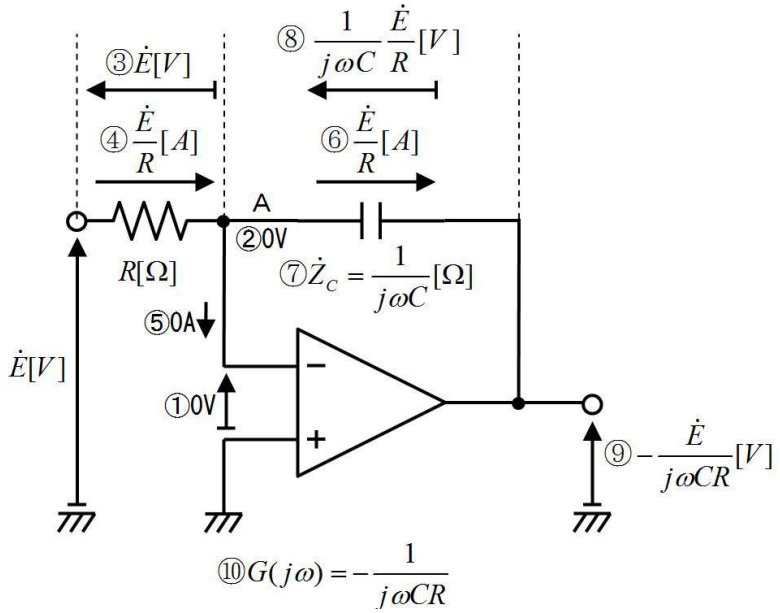
ここでは、交流回路を復習するために、積分回路の動作を交流検討します。



上図の回路に複素電圧 $\dot{E}$ を加えたと考えて、下表の答欄に、表の最下部にある候補から選んだ文字や式を書き込んで交流検討し、伝達関数を求めてください。

番号	質問	答
①	＋入力と－入力の電圧は、負帰還だから、	＋入力□－入力
②	Ａ点の電圧は、	[V]
③	抵抗の両端電圧は、	[V]
④	抵抗 R に流れる電流は、オーム則より、	[A]
⑤	－入力端子に流れる電流は、	[A]
⑥	コンデンサ C に流れる電流は、キルヒ則より、	[A]
⑦	コンデンサ C の複素インピーダンスは、	[Ω]
⑧	コンデンサの両端電圧は、オーム則より、	[V]
⑨	出力端子の電圧は、 コンデンサの電圧の矢印の向きを考えて、	[V]
⑩	伝達関数は、 （１＋ｊ０Ｖを入力したときの出力だから、）	
$\dot{E}$ $\frac{\dot{E}}{R}$ $-\frac{1}{j\omega CR}$ $-\frac{\dot{E}}{j\omega CR}$ $\frac{1}{j\omega C}$ $\frac{1}{j\omega C}\frac{\dot{E}}{R}$ ０ １ ＞ ＜ ＝		

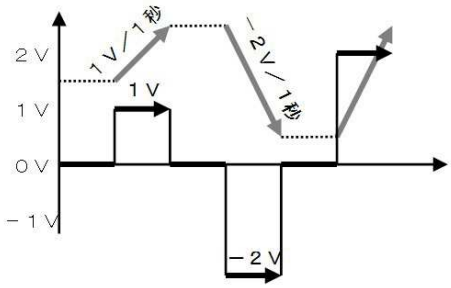
１０.６. 答



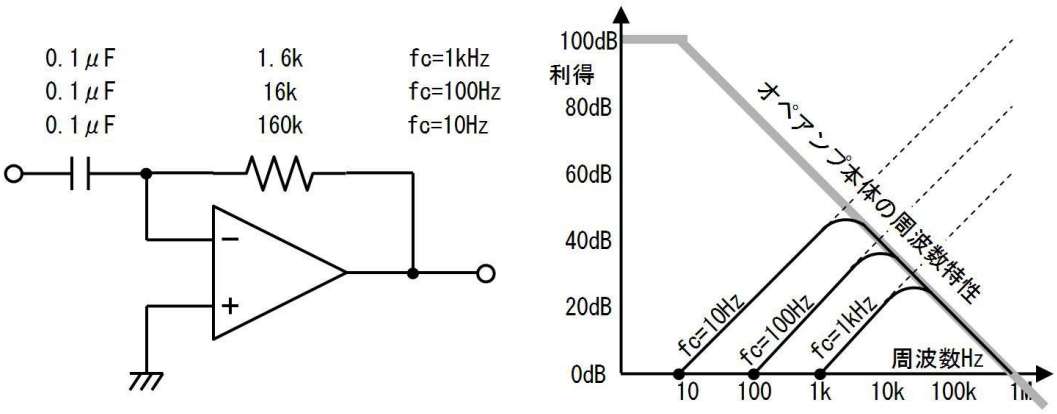
番号	質問	答
①	＋入力と－入力の電圧は、負帰還だから、	＋入力＝－入力
②	Ａ点の電圧は、	0[V]
③	抵抗の両端電圧は、	$\dot{E}$ [V]
④	抵抗に流れる電流は、オーム則より、	$\frac{\dot{E}}{R}$ [A]
⑤	－入力端子に流れる電流は、	0 [A]
⑥	コンデンサに流れる電流は、キルヒ則より、	$\frac{\dot{E}}{R}$ [A]
⑦	コンデンサの複素インピーダンスは、	$\frac{1}{j\omega C}$ [Ω]
⑧	コンデンサの両端電圧は、オーム則より、	$\frac{1}{j\omega C}\frac{\dot{E}}{R}$ [V]
⑨	出力端子の電圧は、 コンデンサの電圧の矢印の向きを考えて、	$-\frac{\dot{E}}{j\omega CR}$ [V]
⑩	伝達関数は、 （１＋ｊ０Ｖを入力したときの出力だから、）	$-\frac{1}{j\omega CR}$

１１. 微分回路

　たとえば下図のように、入力が１秒に１Ｖ上昇していると１Ｖを、１秒に２Ｖ低下していると－２Ｖを出力する回路を微分回路と呼びます。つまり、入力が上下する勢いを出力する回路です。



オペアンプを使った微分回路を下図に示します。



この回路は、入力電圧が勢い良く上昇する程、出力電圧が「低く」なるので、名前こそ「微分回路」と呼ばれてはいますが、働きは「反転微分回路」です。

動作のイメージは、入力電圧の変動に比例した電流がCに流れ、その電流がRに流れて、その結果Rに発生した電圧が（反転して）出力電圧になる。そのため、入力が一定速度で変動すると、Cに一定の電流が流れて、出力に一定の電圧が現れる、というものです。

出力電圧は、入力電圧の上昇速度、抵抗R、コンデンサ容量Cから次のように計算できます、

出力電圧［V］ ＝ 入力電圧の降下速度［V／秒］ × C × R

=E1*C1*R1［V］

逆にCやRの値は、

C × R ＝ 出力電圧［V］／ 入力電圧の降下速度［V／秒］

この回路は上図右側のように、周波数が下がると増幅率が低下します。増幅率が低下して１倍（０ｄB）となる周波数は、

増幅率が１倍となる周波数 ＝１／（２π × C × R）［Ｈｚ］

=1/2/pi()/C1/R1［Ｈｚ］

逆にCやRの値は、

C × R ＝ １／（２π × 増幅率が１倍となる周波数）

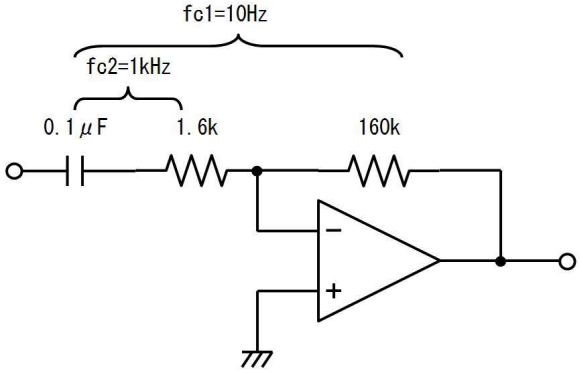
=1/2/pi()/F1

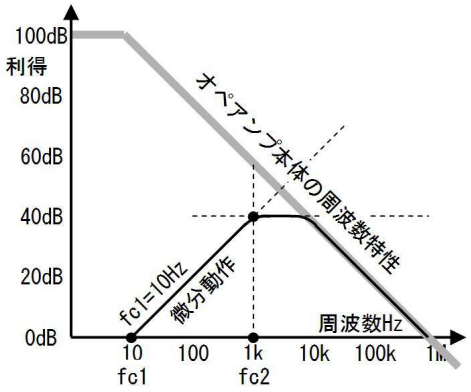
で計算することができます。

さて微分回路は、上図右のグラフに示すように、周波数が上がると増幅率も上昇（微分回路として動作）するものの、オペアンプ本来の周波数特性を越えて大きく増幅することはできず、高い周波数では、周波数が上がると増幅率が低下してしまいまうす。

このとき、オペアンプ本体の増幅率が下がって行く高い周波数で、上図のグラフに点線で示すように、

無理に増幅率を上げようとするため、微分回路は（発振する等）不安定になりやすく、安定させるために下図のように工夫して使います。

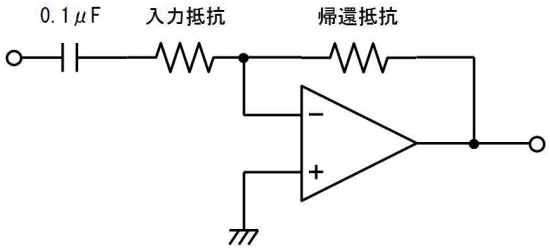


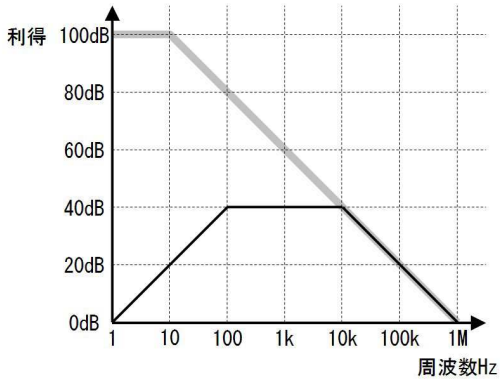


上図の回路では、入力に１．６ｋΩを追加することで、上図右側のグラフに示すように、１ｋＨｚ以上の周波数で増幅率が上がらないようにし（あるいは、増幅率の上限を１００倍に制限して）、周波数特性を平らにしています。これによって「無理に高い周波数の増幅率を上げようとする」ことがなくなり、回路が安定します。

１１.１. 練習

下図右の特性を持つ、下図左の微分回路を、下表に記入しながら設計してください。微分回路として動作する周波数は、どのような周波数の範囲ですか？

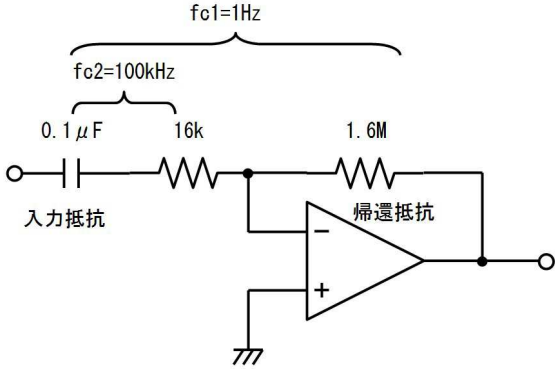


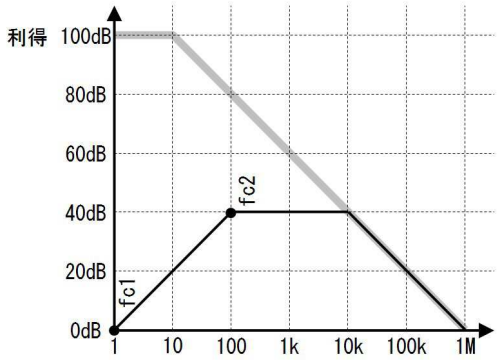


微分回路として動作する周波数の範囲［　　］Ｈｚ～［　　］Ｈｚ

番号	質問	値
①	帰還抵抗の値は、１Ｈｚで増幅率が１倍となり、コンデンサがＯ．１μＦだから、	ＭΩ
②	入力抵抗の値は、１００Ｈｚから上で、利得が平らになるから、	ｋΩ
③	周波数と共に増幅率が上昇する部分が微分回路として働いているから、微分回路として動作する上限の周波数は、	Ｈｚ

１１.２. 答





微分回路として動作する範囲［　　０］Ｈｚ～［　１００］Ｈｚ

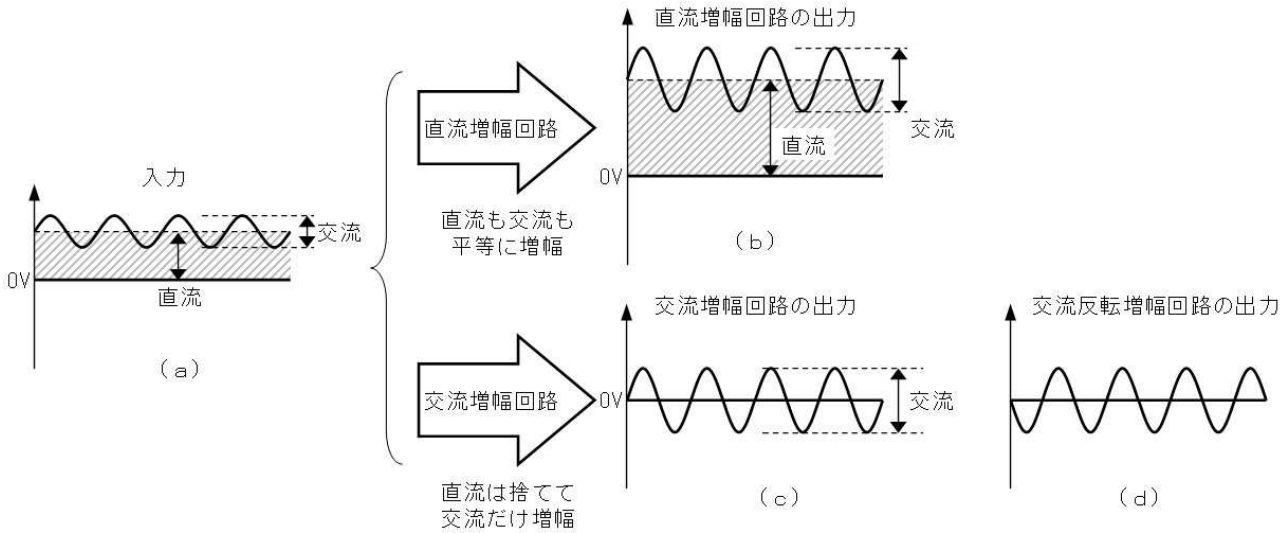
（０Ｈｚとは直流の事）

番号	質問	値
①	帰還抵抗の値は、１Ｈｚで増幅率が１倍となり、コンデンサが０．１μＦだから、[=1/2/pi()/1/0.1E-6]	１．６MΩ
②	入力抵抗の値は、１００Ｈｚから上で、利得が平らになるから、[=1/2/pi()/100/0.1E-6]	１６ｋΩ
③	周波数と共に増幅率が上昇する部分が微分回路として働いているから、微分回路として動作する上限の周波数は、（グラフには１Ｈｚ以下の部分は描かれていませんが、いくら低い周波数でも動作します）	１００Ｈｚ

１２. 交流増幅回路

非反転増幅器や反転増幅器は、直流も増幅できるので、下図上側（ｂ）のように、入力に含まれる直流まで増幅します。例えば、部屋の明るさを測定する場合等は、このように直流も増幅する回路が必要です。

逆にマイクで拾った音声を増幅する場合は、直流は全く必要がなく、逆に有害です。なぜなら、マイクの出力信号は、２Ｖ程度の直流の中に、１ｍＶ程度の小さい音声（交流）が入っている場合も多いのです。このため、そのまま１０００倍に増幅したのでは、２０００Ｖの直流の中に、１Ｖの交流が入っている状態となり、増幅器の出力は振り切ってしまいます。



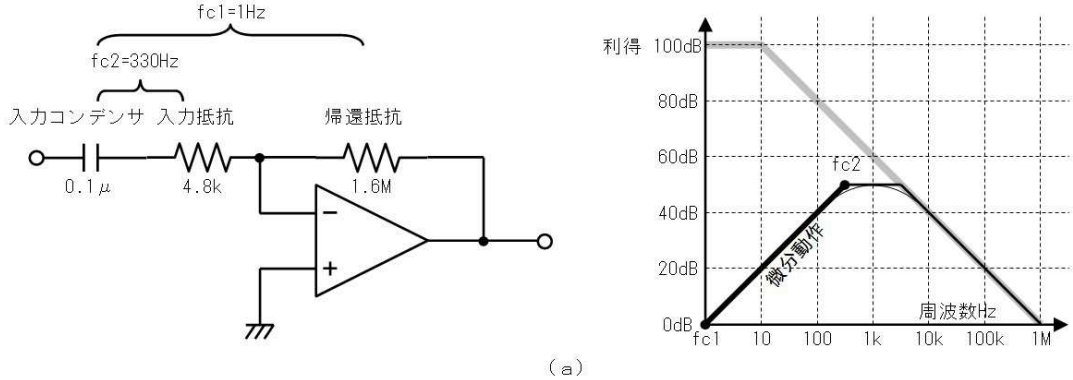
そこで、上図下側（ｃ）のように、直流は捨て去って、交流だけを増幅する回路が使用されます。これが交流増幅回路です。

上図（ｃ）や（ｄ）図を見ても、実にすっきりした出力信号が得られることが分ります。このように、直流が不要で、逆に有害な場合は多いので、交流増幅回路は頻繁に使用されます。

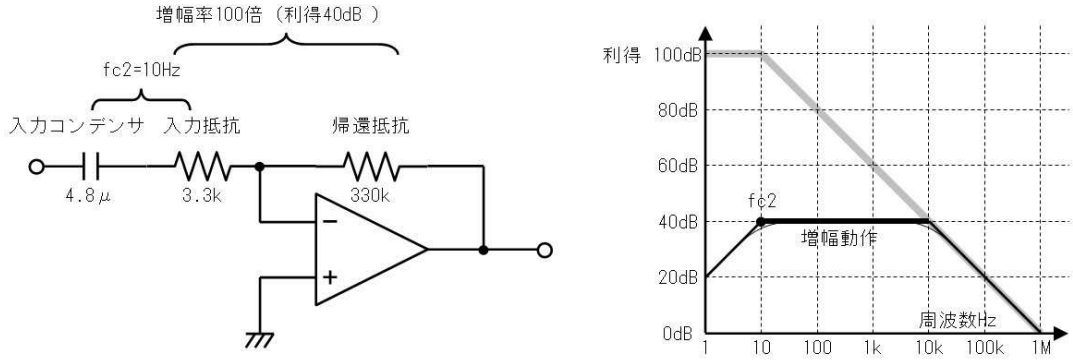
入力の波（上図（ａ））と同じタイミングで出力の波が上下する（上図（ｃ））タイプを「交流増幅回路」、逆のタイミングで出力の波が上下する（上図（ｄ））タイプが「交流反転増幅回路」です。交流増幅回路の場合、反転と非反転を区別しない場合もあります。

１３. 反転交流増幅器

下図下側（ｂ）に示す反転交流増幅回路は、下図上側（ａ）の微分回路と同じ構成です。両者の違いは、微分回路は下図（ａ）のグラフに太線で示す「周波数が上がると利得も上がる」部分（微分動作）を使用しますが、交流増幅器は（ｂ）のグラフに太線で示す「周波数が変わっても利得が一定」の部分（増幅動作）を使用する、という点です。



（a）



（b）

上図（ｂ）の交流反転増幅回路の、グラフの平らな部分（増幅動作の部分）の増幅率は、反転増幅回路と同じように考えて、

増幅率 ＝ 帰還抵抗 ／ 入力抵抗

３３０ｋ ／ ３．３ｋ ＝ １００倍（４０ｄＢ）

=330E3/3.3E3

と計算することができます。

また上図（ｂ）の、グラフの平らな部分の左端の周波数（f_{C2}）は、入力抵抗Ｒと入力コンデンサＣの値から、

平らな部分の左端の周波数 ＝ １／（２π × Ｃ × Ｒ）

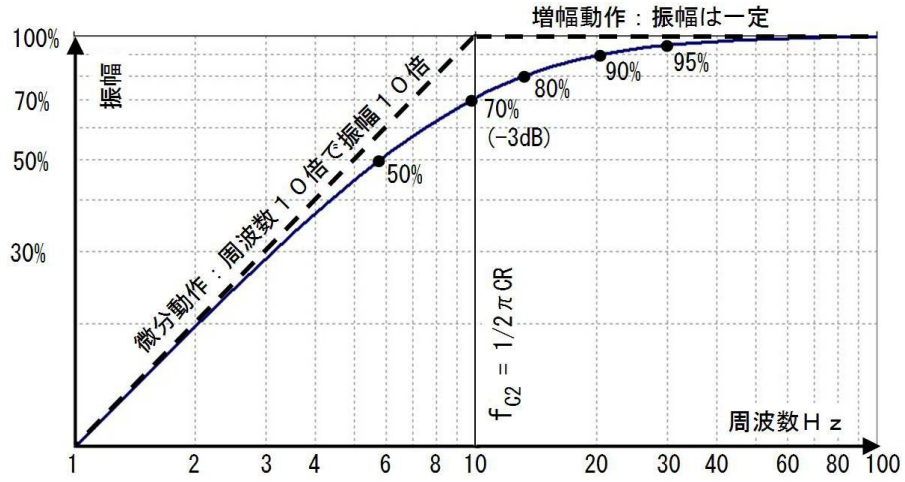
１ ／（２π × ４．８μＦ × ３．３kΩ） ＝ １０Ｈｚ

=1/2/PI()/4.8E-6/3.3E3

と計算することができます。

１０Ｈｚ以下では増幅率がどんどん下がって行きますから、増幅したい信号が、１０Ｈｚより高くなければいけません。

さて、この下限の周波数設定で注意する事があります。下図は１０Ｈｚ（f_{C2}）付近の増幅率のグラフを拡大したものです。



=100*IMABS(IMDIV(1,IMSUM(1,IMDIV(1,COMPLEX(0,F1/10)))))% F1：周波数

カットオフ周波数近傍での増幅率

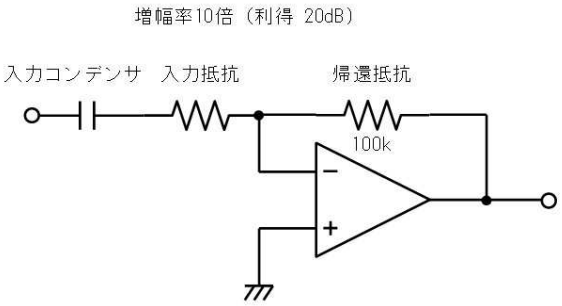
増幅率は、上図に点線で示すように、１０Ｈｚ以上ですぐに平らになるのではなく、実線で示すように（角に丸みが付いているため）１０Ｈｚでも振幅は７０%程度（－３ｄＢ）に小さくなっています。そして２０Ｈｚ、つまりf_{C2}の２倍の周波数になって、ようやく９０%になります。ですから、１０Ｈｚ以上の信号を増幅するときに、f_{C2}を１０Ｈｚに設定すると、１０Ｈｚの信号で増幅率が３割減となります。

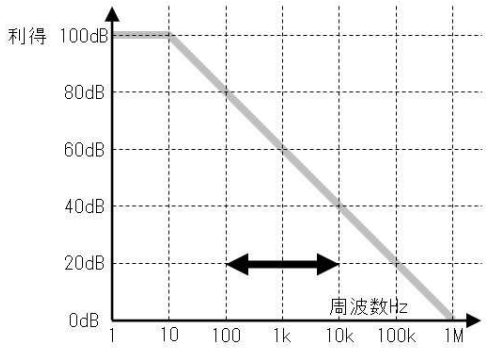
とはいえ、むやみに（０．０１Ｈｚ等と）f_{C2}を極めて低く設定すると（もちろん、低い周波数も確実に増幅できますが）電源を入れたりケーブルを接続してから、回路が安定するまで時間が掛かり、その間出力が振り切ったりしますから注意が必要です。

つまり普通の用途であれば、f_{C2}は「必要な信号が弱まらない範囲で、できるだけ高く」設定しておくと問題が少ないです。

１３.１. 練習

下図の回路を用いて、増幅率１０倍の交流反転増幅器を作ります。扱う信号は１００Ｈｚ以上ですが、１００Ｈｚの信号でも増幅率を９５%確保します。下表に書き込みながら、設計して下さい。

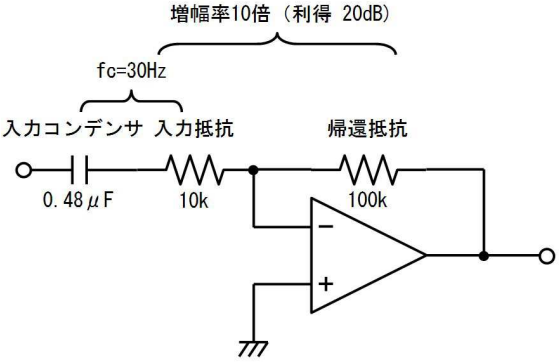


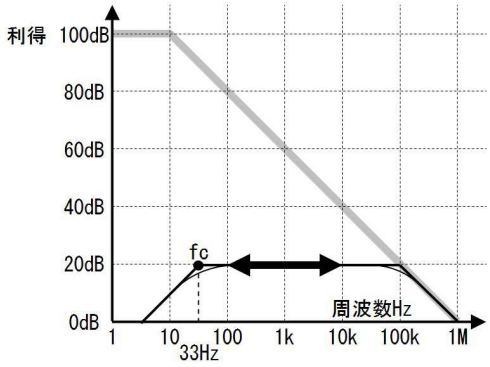


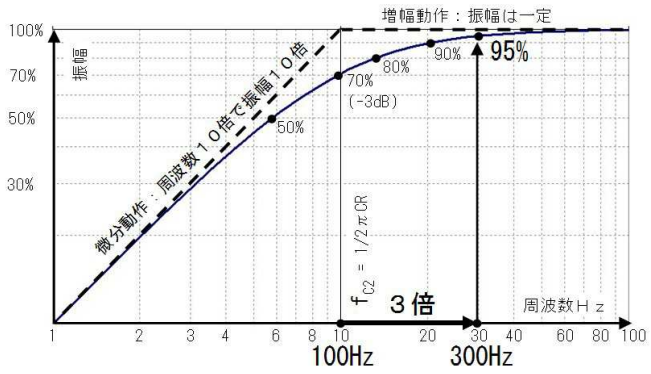
番号	質問	値
①	増幅率を１０倍にするためには、入力抵抗の値は、	ｋΩ
②	１００Ｈｚの信号で９５%の振幅を確保したいから、 上の「カットオフ周波数近傍での増幅率」のグラフより、 １００Ｈｚはf_Cの何倍となっているか、	倍

③	入力抵抗と入力コンデンサで決まるｆ$_C$の値は、	Ｈｚ
④	入力コンデンサの値は、	μＦ

１３.２. 答

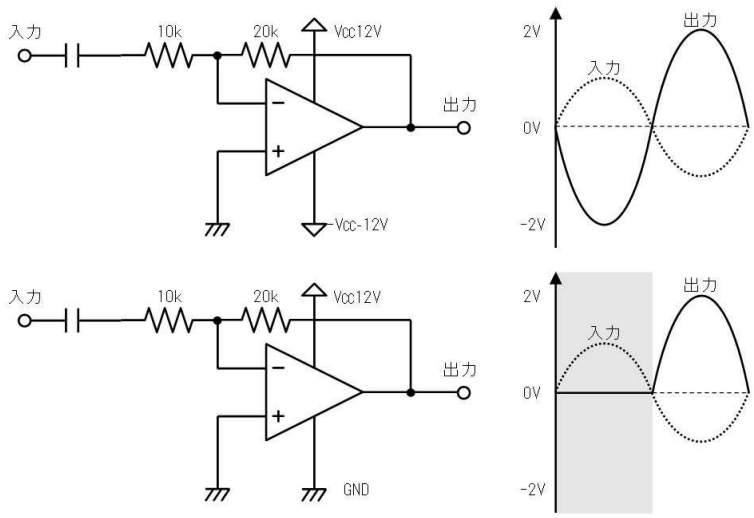




番号	質問	値
①	増幅率を１０倍にするためには、入力抵抗の値は、 =100E3/10	１０ｋΩ
②	１００Ｈｚの信号で９５％の振幅を確保したいから、 上の「カットオフ周波数近傍での増幅率」のグラフより、 １００Ｈｚはｆ$_C$の何倍となっているか、 既出の「カットオフ周波数近傍での増幅率」のグラフより、３倍  	３倍
③	入力抵抗と入力コンデンサで決まるｆ$_C$の値は、 １００Ｈｚ÷３＝３３Ｈｚ	３３Ｈｚ
④	入力コンデンサの値は、 =1/2/PI()/10E3/300	０．４８μＦ

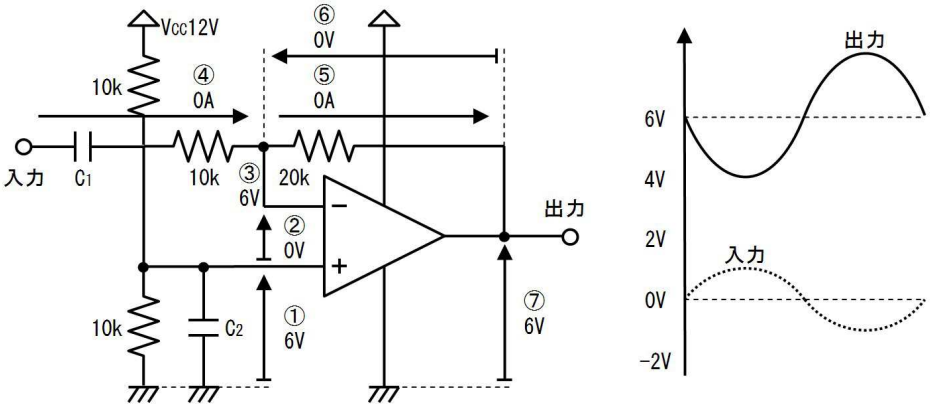
１４. 単一電源の交流反転増幅回路

下図上側は２電源の２倍の交流反転増幅回路です。入力がプラスのときは出力がマイナスに、入力がマイナスのときは出力がプラスになり、正常に動作しています。



上図下側は、同じ増幅器を単電源で使用した様子です。単電源ではマイナスの電圧が出力できないため、入力がプラスのときは出力に信号が現れません。

単一電源で交流反転増幅回路を正しく動作させるために、下図に示すような「＋入力端子に電圧を加える」回路が良く利用されます。このとき加える電圧を「バイアス電圧」と呼びます。



１４.１. 確認

バイアスを加えた単一電源の交流反転増幅回路の無信号時の出力電圧を、上図を参考に下表に書き込んで確認してください。

番号	質問	値
①	＋入力端子の電圧は、 （電源電圧を２本の１０ｋΩで分圧しているから、）	V
②	＋入力と－入力の電圧差は、 （負帰還の回路だから、）	V
③	－入力端子の電圧は、	V
④	入力抵抗に流れる直流は、 （コンデンサは直流を通さないから、）	A
⑤	帰還抵抗に流れる直流は、	A

	（オペアンプの入力には電流が流れないから、）	
⑥	帰還抵抗の両端電圧は、	Ｖ
⑦	無心号時の出力電圧（出力バイアス電圧）は、	Ｖ

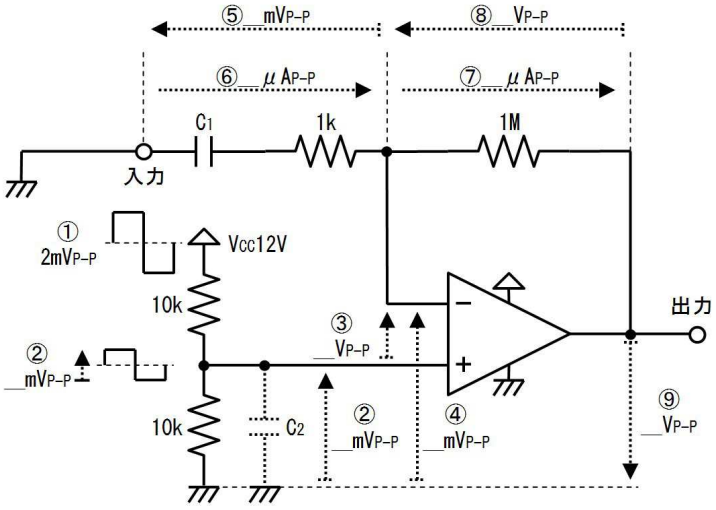
１４.２. 答

番号	質問	値
①	＋入力端子の電圧は、 （電源電圧を２本の１０ｋΩで分圧しているから、）	６Ｖ
②	＋入力と－入力の電圧差は、 （負帰還の回路だから、）	０Ｖ
③	－入力端子の電圧は、	６Ｖ
④	入力抵抗に流れる直流は、 （コンデンサは直流を通さないから、）	０Ａ
⑤	帰還抵抗に流れる直流は、 （オペアンプの入力には電流が流れないから、）	０Ａ
⑥	帰還抵抗の両端電圧は、	０Ｖ
⑦	無心号時の出力電圧（出力バイアス電圧）は、	６Ｖ

このように、＋入力にバイアス電圧を加える交流反転増幅回路では、出力端子の電圧は加えたバイアス電圧と同じになります。

１４.３. 練習

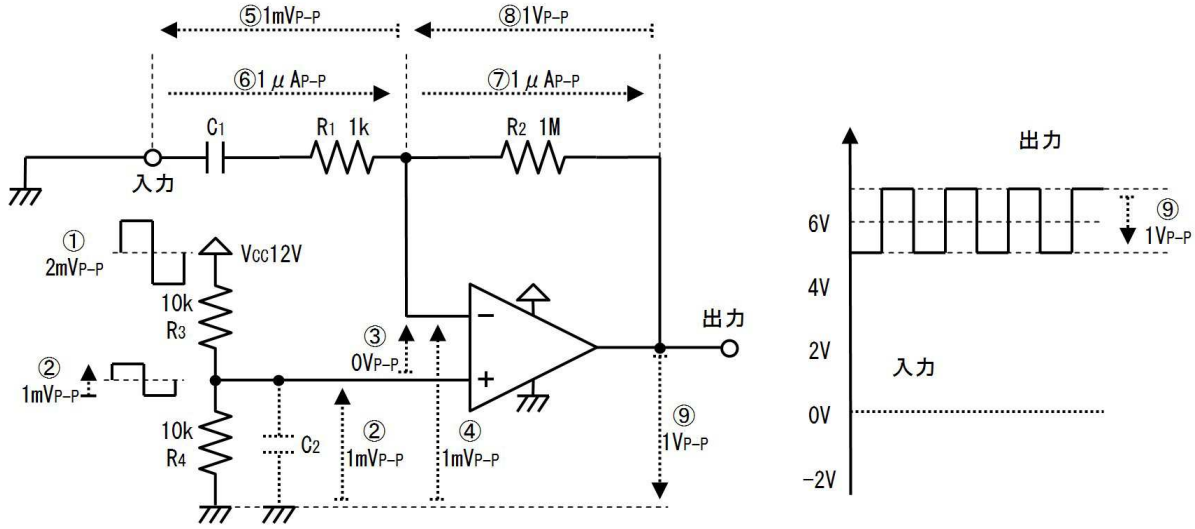
C_2が無いと、電源電圧の僅かな変動が増幅されて、出力に大きくなって現れます。下図は、電源電圧に２ｍＶの変動のある１０００倍の単電源交流反転増幅器です。下図を参考に下表に書き込んで、出力電圧の変動を求めてください。



番号	質問	値

①	電源電圧の変動が２mV$_{P-P}$あるとします。	－
②	C$_2$は無いと考えて、＋入力の電圧変動は、 （電源を２本の１０kΩで分圧しているから、）	mV$_{P-P}$
③	＋入力端子と－入力端子の電圧差は、	V
④	－入力端子の電圧変動は、	mV$_{P-P}$
⑤	入力抵抗の両端電圧の変動は、 （無信号、つまり入力はアースに接続されているから、）	mV$_{P-P}$
⑥	入力抵抗（１k）に流れる電流の変動は、 （C$_1$は十分大きいとして、）	μA$_{P-P}$
⑦	帰還抵抗（１M）に流れる電流の変動は、 （オペアンプの入力には電流が流れないから、）	μA$_{P-P}$
⑧	帰還抵抗の両端電圧の変動は、	V$_{P-P}$
⑨	出力電圧の電圧変動は、	V$_{P-P}$

１４.４. 答



番号	質問	値
①	電源電圧の変動が２mV$_{P-P}$あるとします。	－
②	C$_2$は無いと考えて、＋入力の電圧変動は、 （電源を２本の１０kΩで分圧しているから、）	１mV$_{P-P}$
③	＋入力端子と－入力端子の電圧差は、	０V
④	－入力端子の電圧変動は、	１mV$_{P-P}$
⑤	入力抵抗の両端電圧の変動は、 （無信号、つまり入力はアースに接続されているから、）	１mV$_{P-P}$

⑥	入力抵抗（１ｋ）に流れる電流の変動は、 （C_1は十分大きいとして、）	１μA_{P-P}
⑦	帰還抵抗（１Ｍ）に流れる電流の変動は、 （オペアンプの入力には電流が流れないから、）	１μA_{P-P}
⑧	帰還抵抗の両端電圧の変動は、	１V_{P-P}
⑨	出力電圧の電圧変動は、	１V_{P-P}

このように、バイアス電圧の変動は、増幅されて出力に現れます。ですから、増幅率が大きい場合は、容量の大きなC_2を取り付けて、バイアス電圧の変動を小さくします。

たとえ安定化電源を使っていても、電源から回路までの配線の（電線の抵抗値の）影響等で、数mVの変動はしばしば生じます。ですから、増幅率が大きい場合は、R_3／／R_4とC_2で決まる時定数τが、０．１～１秒になるようにC_2を決める場合が大半です。（それ以上大きいと、回路が安定するまでに時間が掛かります）

τ ＝（ R_3 ／／ R_4 ）× C_2 ＝ ０．１ ～ １　（「／／」は並列合成抵抗のマーク）

Ｅｘｃｅｌでは、`=1/(1/R3+1/R4)*C2` が ０．１～１秒

C_2の容量は、

C_2 ＝ ０．１～１ ÷ （ R_3 ／／ R_4 ）

Ｅｘｃｅｌでは、`=T1*(1/R3+1/R4)`

１４.５. 練習

上図の回路で、時定数τが１秒になるように、C_2を決定して下さい。

番号	質問	値
①	R_3とR_4の並列合成抵抗は、	ｋΩ
②	時定数が１秒とするから、C_2の値は、	μＦ

１４.６. 答

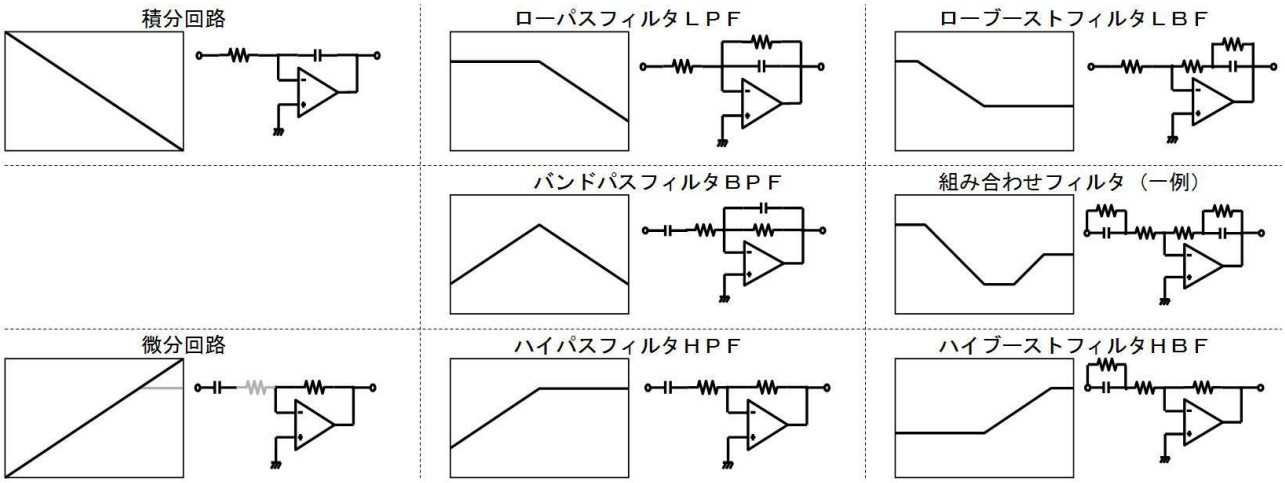
番号	質問	値
①	R_3とR_4の並列合成抵抗は、 `=1/(1/10E3+1/10E3)`	５ｋΩ
②	時定数が１秒とするから、C_2の値は、 `=1/5E3`	２００μＦ

１５. １次のフィルタ

周波数によって利得等が変化する回路をフィルタと呼びます。不要な周波数の信号を取り除いたり、希望の信号だけを選択したり、波形を整えたり、様々な用途で使われます。

既に説明した積分回路、微分回路、帯域制限、交流増幅回路も、１次のフィルタの一種です。このように１次のフィルタには、多くの種類がありますが、殆どの場合１つのオペアンプで構成できます。下

図に代表的な１次フィルタの回路と周波数特性を示します。

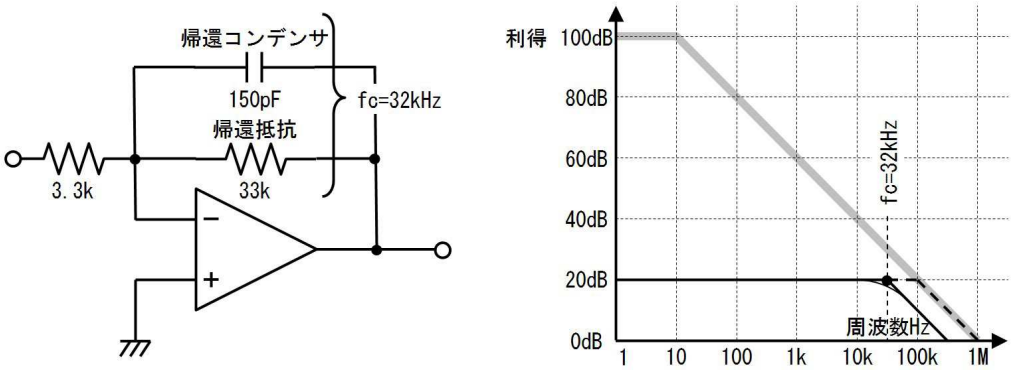


上図の上段が積分系のフィルタ、下段が微分系のフィルタで、中段は積分と微分双方の性質を備えたフィルタです。左から右に行くに従って素子が追加され、それによって周波数特性の折れ曲がり箇所が増えてゆきます。

１次のフィルタは、いずれも６ｄＢ／ｏｃｔ（周波数１０倍で増幅率１０倍（あるいは１０分の１））の割合でしか、増幅率が変化しません。これ以上急激に変化させたいときは、１次のフィルタを複数接続したり、２次以上のフィルタを利用します。

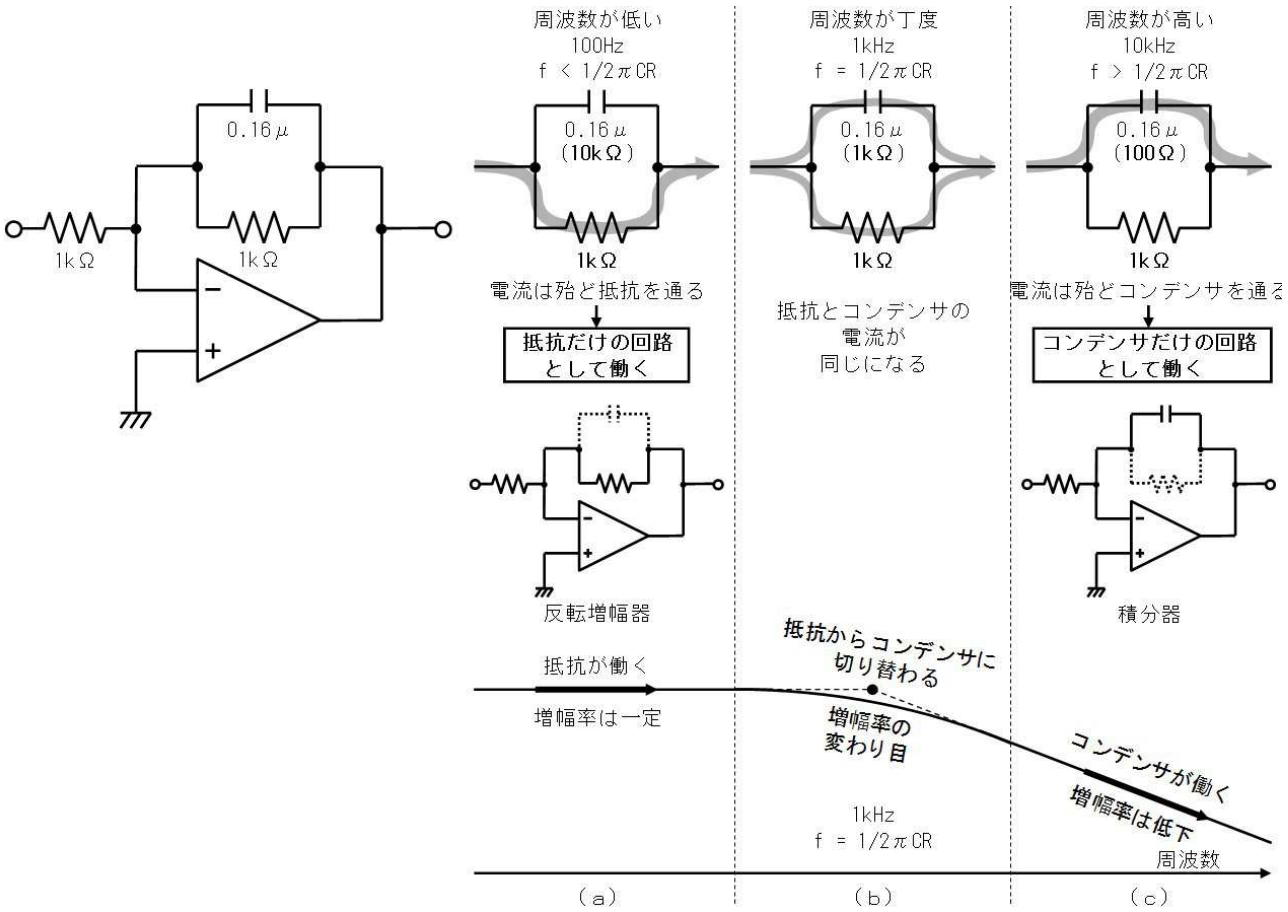
１６．１次ローパスフィルタＬＰＦ

すでに説明した下図の「帯域制限」の回路が、実は１次ローパスフィルタです。



上の回路では、帰還回路（後ろ側）のＣとＲで決まる周波数１／２πＣＲ［Ｈｚ］より高い周波数で、増幅率が低下して行きました。

下図を用いて、その理由を説明します。下図では帰還回路のＣとＲで決まる周波数は１ｋＨｚです。



上図（ａ）に示す、周波数が１００Ｈｚと低い場合は、抵抗（１ｋΩ）に比べてコンデンサは１０ｋΩと大きいので、電流は殆ど抵抗を通ります。このため、コンデンサは無いと考えてもかまいません。従って、この周波数では抵抗だけの回路となり、（反転増幅回路として動作して）増幅率は周波数によらず一定です。

上図（ｃ）に示す、周波数が１０ｋＨｚと高い場合は、抵抗（１ｋΩ）に比べてコンデンサが１００Ωと小さいので、電流は殆どコンデンサを通ります。このため、抵抗は無いと考えてもかまいません。従って、この周波数ではコンデンサだけの回路となり、（積分回路として動作して）増幅率は周波数が高い程減少して行きます。

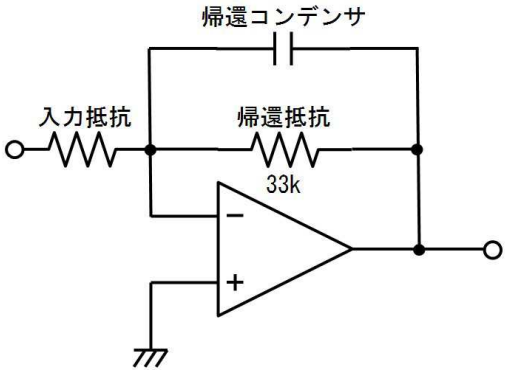
（ａ）と（ｃ）の変わり目が、上図（ｂ）です。このとき、抵抗とコンデンサのインピーダンス（の大きさ）が等しくなり、抵抗とコンデンサに同じ電流が流れます。

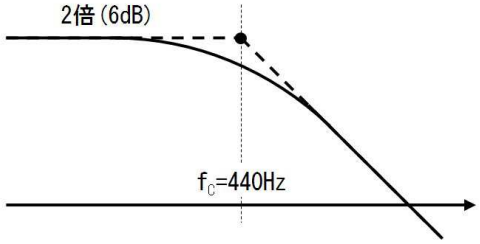
抵抗のインピーダンスはＲ［Ω］で、コンデンサのインピーダンス（の大きさ）が１／２πｆＣ［Ω］でしたから、両方が同じになるとき、つまりＲ＝１／２πｆＣとなる周波数はｆ＝１／２πＣＲと計算することができます。

このように、周波数が変化して、コンデンサのインピーダンスが抵抗より十分大きく、あるいは十分小さくなると、どちらか一方だけに電流が流れ、そうでない方は「無い」と考えても良い状態になります。これによって、まるで回路を切り替えたようになり、反転増幅器だった動作が、高い周波数では積分回路の動作に切り替わるのです。

１６.１. 練習

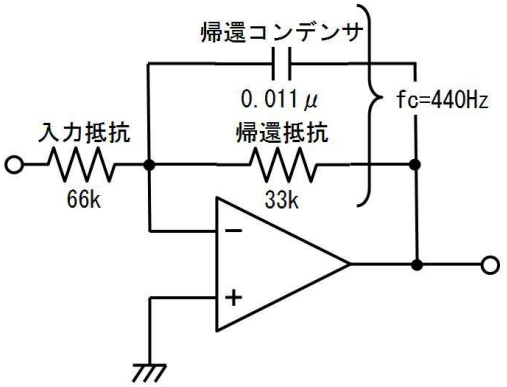
下図の、遮断周波数ｆ$_C$４４０Ｈｚ、増幅率２倍の１次ローバスフィルタのＣＲの値を、下表に記入しながら決定してください。

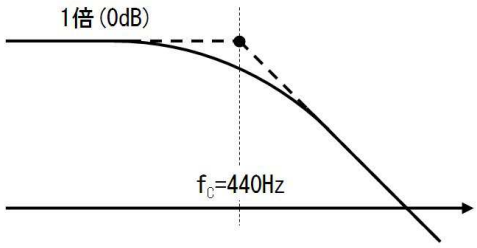




番号	質問	値
①	増幅率を２倍にするためには、入力抵抗の値は、	ｋΩ
②	遮断周波数ｆ$_C$を４４０Ｈｚにするために、帰還コンデンサの値は、	μＦ

１６.２. 答

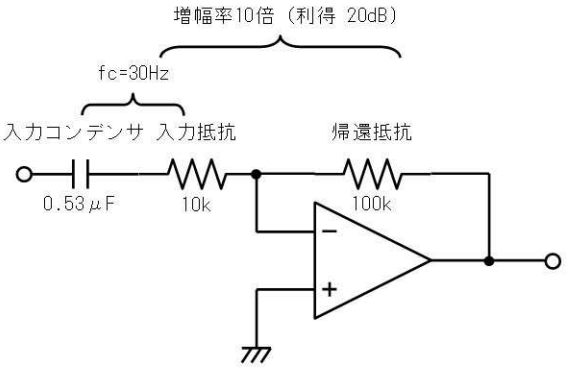


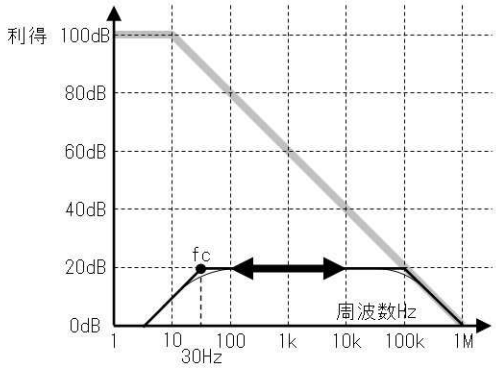


番号	質問	値
①	増幅率を２倍にするためには、入力抵抗の値は、	６６ｋΩ
②	遮断周波数ｆ$_C$を４４０Ｈｚにするために、帰還コンデンサの値は、 =1/2/PI()/33E3/440	０．０１１μＦ

１７．１次ハイパスフィルタＨＰＦ

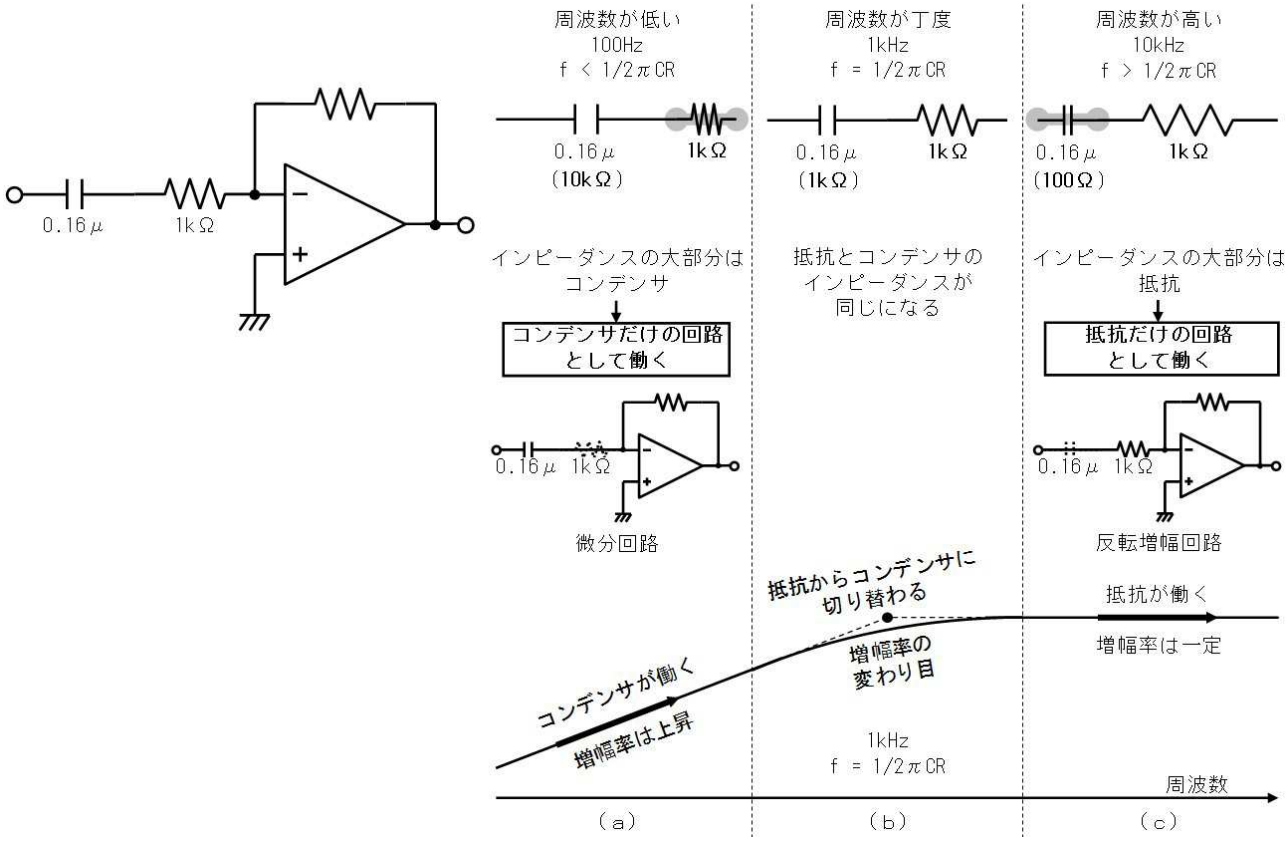
すでに説明した下図の「交流反転増幅回路」が、実は１次ハイパスフィルタです。





上の回路では、入力回路（前側）のＣとＲで決まる周波数１／２πＣＲ［Ｈｚ］より低い周波数で、周波数が下がる程増幅率が低下（周波数が上がる程増幅率が上昇）して行きました。

動作の仕組みはＬＰＦと同様に前側の（入力回路の）抵抗とコンデンサのインピーダンスを比べて考えることができます。下図を用いて説明します。下図では入力回路のＣとＲで決まる周波数は１ｋＨｚです。



上図（ａ）に示す、周波数が低い場合は、抵抗に比べてコンデンサのインピーダンスが大きくなり、抵抗はショートしていると考えることができ、「無い」と考えてかまいません。従って、この周波数ではコンデンサだけの回路となり、（微分回路として動作して）周波数が上がると増幅率が上昇して行きます。

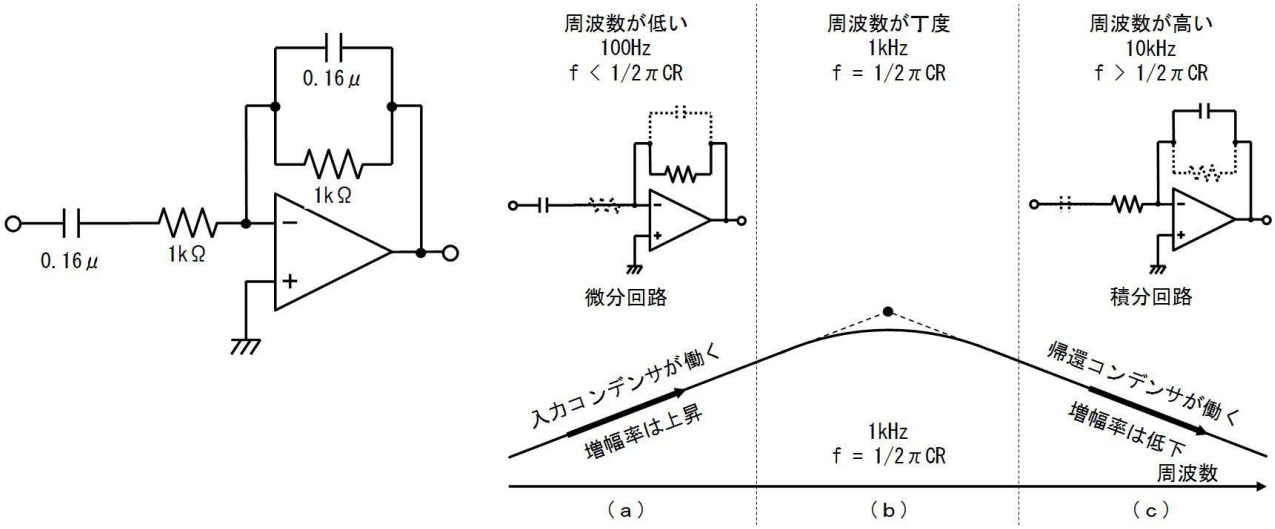
上図（ｃ）の周波数が高い場合は、抵抗に比べてコンデンサのインピーダンスが小さいので、コンデンサはショートしていると考えることができ、「無い」と考えてかまいません。従って、この周波数では抵抗だけの回路となり、（反転増幅回路として動作して）増幅率は周波数が変化しても一定です。

抵抗値とコンデンサのインピーダンスが同じになる、上図（ｂ）場合が、微分回路が反転増幅回路に切り替わる境目です。このとき、Ｒ［Ω］＝１／２πｆＣ［Ω］となり、境目の周波数は、ｆ＝１／２

πＣＲと計算することができます。

１８．１次バンドパスフィルタＢＰＦ

下図に示すとおり、１次バンドパスフィルタ（ＢＰＦ）は、１次ＬＰＦと１次ＨＰＦを組み合わせたものです。



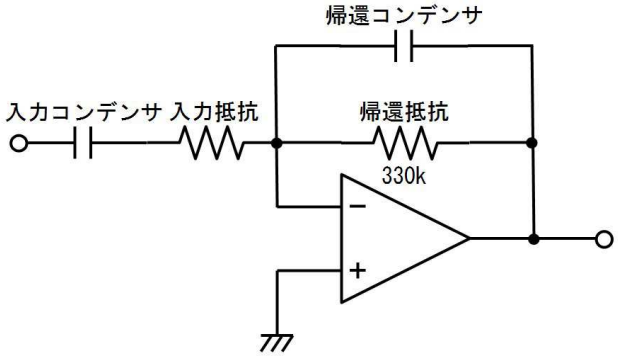
上図（ａ）に示すように周波数の低い範囲では、入力回路（ＣＲ直列）では、抵抗に比べてコンデンサのインピーダンスが高く、抵抗はショートしていると考えることができ、入力コンデンサのみの回路と見ることができます。また帰還回路（ＣＲ並列）では、コンデンサのインピーダンスが高く、電流の大半は抵抗に流れるため、抵抗のみの回路と見ることができます。このため、周波数の低い部分では微分回路として動作し、周波数の上昇に伴って増幅率が上昇して行きます。

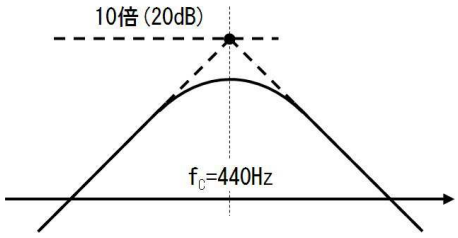
上図（ｃ）に示すように周波数の高い範囲では、入力回路（ＣＲ直列）では、コンデンサのインピーダンスが低く、ショートしていると考えることができ、入力抵抗のみの回路と見ることができます。また、帰還回路（ＣＲ並列）では、コンデンサのインピーダンスが低く、電流の大半はコンデンサに流れるため、コンデンサのみの回路と見ることができます。このため、周波数の高い部分では積分回路として動作し、周波数の上昇に伴って増幅率が低下して行きます。

入力回路と帰還回路の双方で、抵抗値とコンデンサのインピーダンスが同じになる、上図（ｂ）ときが、微分回路が積分回路に切り替わる境目です。このとき入力回路と帰還回路の各ＣＲが同じインピーダンス、つまり、Ｒ［Ω］＝１／２πｆＣ［Ω」となり、これより、境目の周波数は、ｆ＝１／２πＣＲと計算することができます。

１８.１．練習

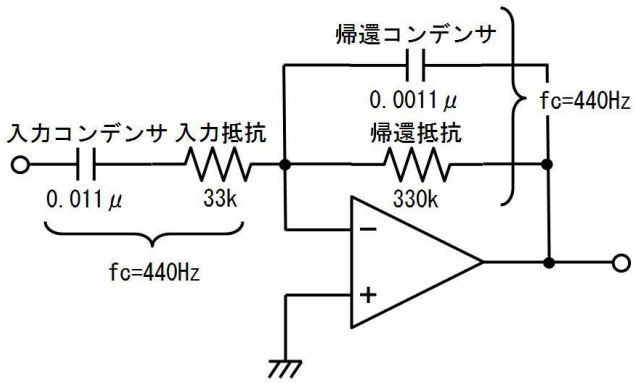
下図の、中心周波数ｆ$_{C}$４４０Ｈｚ、増幅率１０倍の１次バンドパスフィルタのＣＲの値を、下表に記入しながら決定してください。

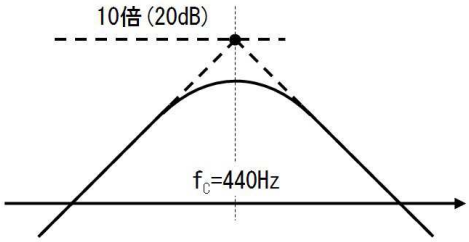




番号	質問	値
①	増幅率を１０倍にするためには、入力抵抗の値は、	ｋΩ
②	中心周波数ｆ$_C$を４４０Ｈｚにするために、帰還コンデンサの値は、	μＦ
③	中心周波数ｆ$_C$を４４０Ｈｚにするために、入力コンデンサの値は、	μＦ

１８.２. 答



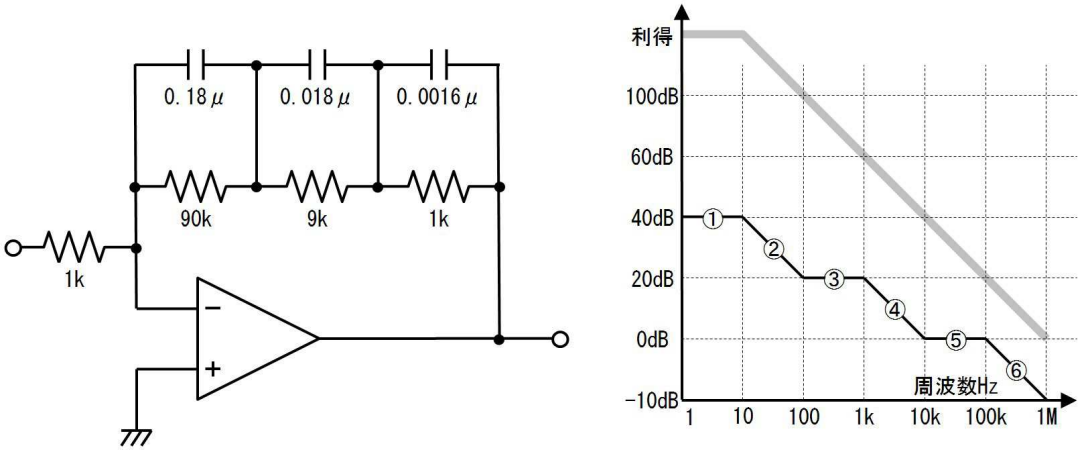


番号	質問	値
①	増幅率を１０倍にするためには、入力抵抗の値は、 =33E3*10	３３ｋΩ
②	中心周波数ｆ$_C$を４４０Ｈｚにするために、帰還コンデンサの値は、 =1/2/PI()/330E3/440	０．００１１μＦ
③	中心周波数ｆ$_C$を４４０Ｈｚにするために、入力コンデンサの値は、 =1/2/PI()/33E3/440	０．０１１μＦ

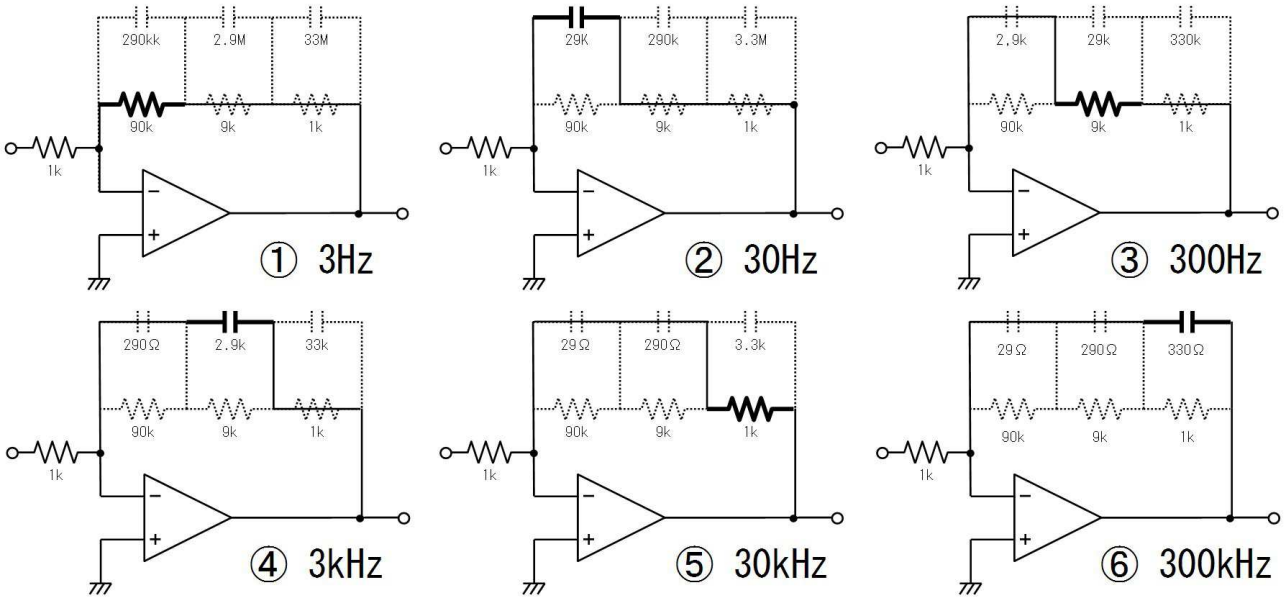
１９．１次組み合わせフィルタ（動作のイメージ）

組み合わフィルタは、入力回路や帰還回路に、より多くのＣＲが使用され、周波数特性に複数の折れ曲がりがある回路です。ここでは、正確な計算の方法ではなく、動作のイメージを説明します。

下図のように、帰還側にＣＲ回路を設けて、周波数特性が何度も折れ曲がりつつ、右下りとなるフィルタもオペアンプ１つで作ることができます。

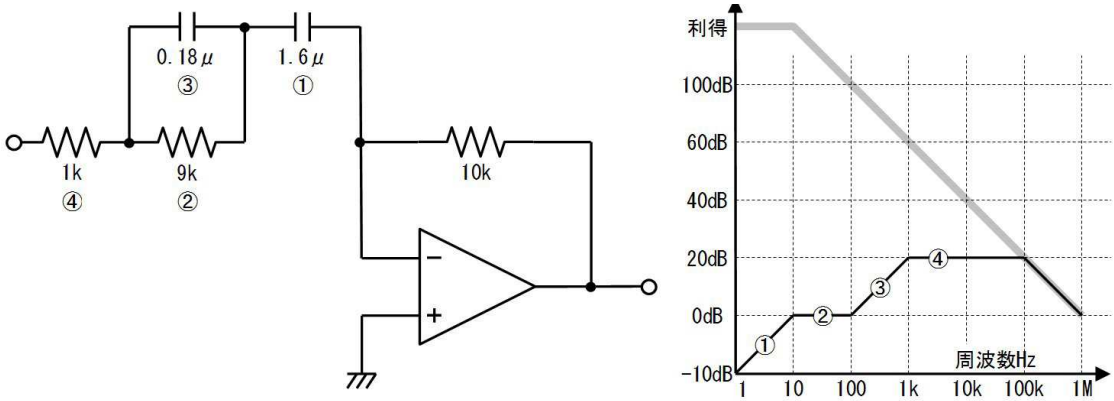


上図右側のグラフに①～⑥に示す、それぞれの周波数でのコンデンサのインピーダンスを、下図①～⑥に示します。



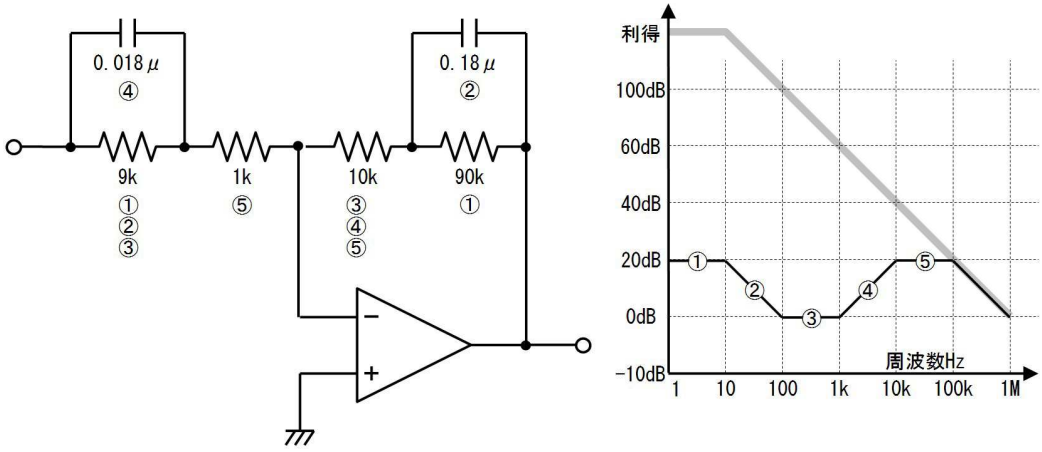
上図に太線で示すように、インピーダンスの変化によって、主役として作用する素子が交代し、増幅回路としての動作と、積分回路としての動作が交互に切り替わります。

これとは別に下図のように、入力側にＣＲ回路を設けて、周波数特性が何度も折れ曲がりつつ、右上りとなるフィルタもオペアンプ１つで作ることができます。



上図では、周波数が高くなるに従って、①②③④の順で主役になる素子が切り替わり、上図右側のグラフに示す周波数特性が得られます。

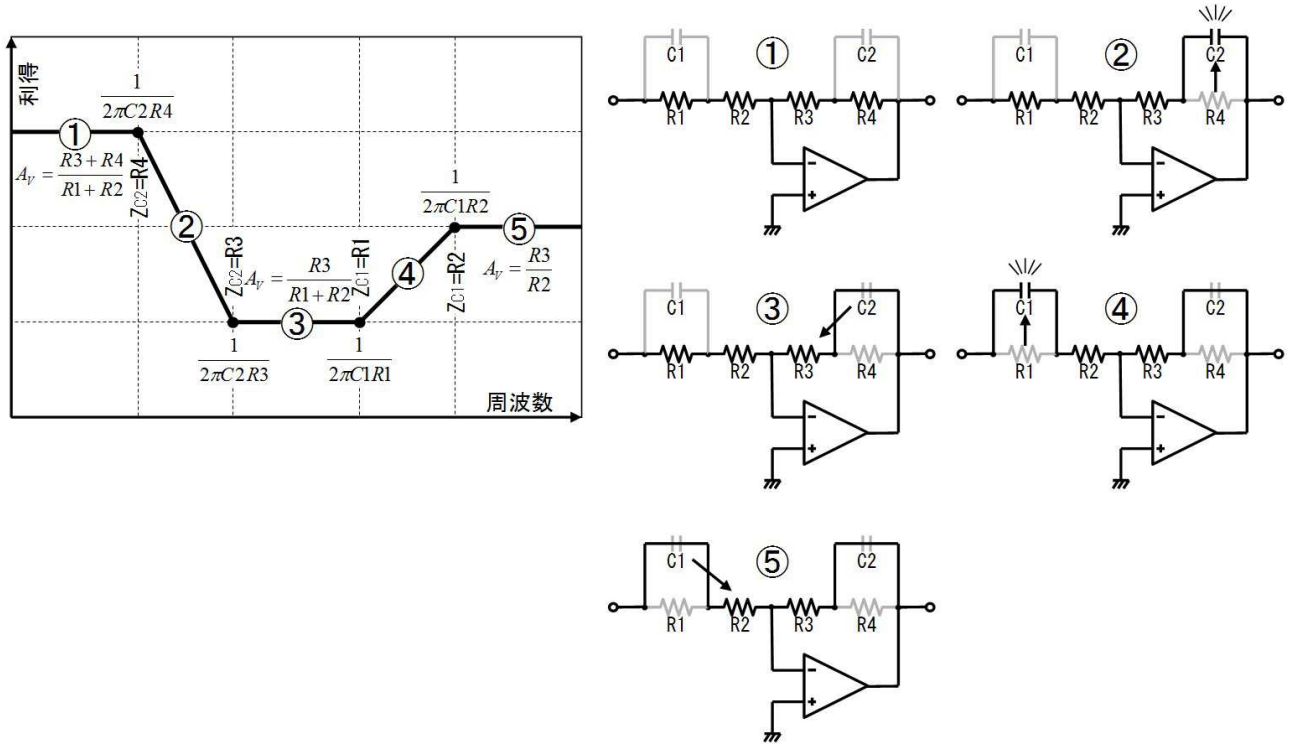
さらに別の回路では、下図のように、入力側にも帰還側にもＣＲ回路を設けて、周波数特性が何度も折れ曲がりつつ、上下するフィルタもオペアンプ１つで作ることができます。主役となる素子が変化して、反転増幅回路、微分回路、積分回路に動作が切り替わります。



上図のような組み合わせフィルタは一見複雑に見えますが、機能する素子が順に切り替わるだけで、動作は単純です。

下図左側の周波数特性を持つ、下図右側の組み合わせフィルタを例に、素子の切り替わりと回路の動作を、周波数の低い場合①から、周波数の高い場合⑤へと向かって、下表で説明します。

周波数が高くなると（Ｃのインピーダンスが次第に高くなるため）、ＣとＲが並列な部分では「Ｃが主に電流を流すため、Ｒを無視できる」また、ＣとＲが直列な部分では「Ｃが短絡するため、Ｒだけが機能する」と考えます。

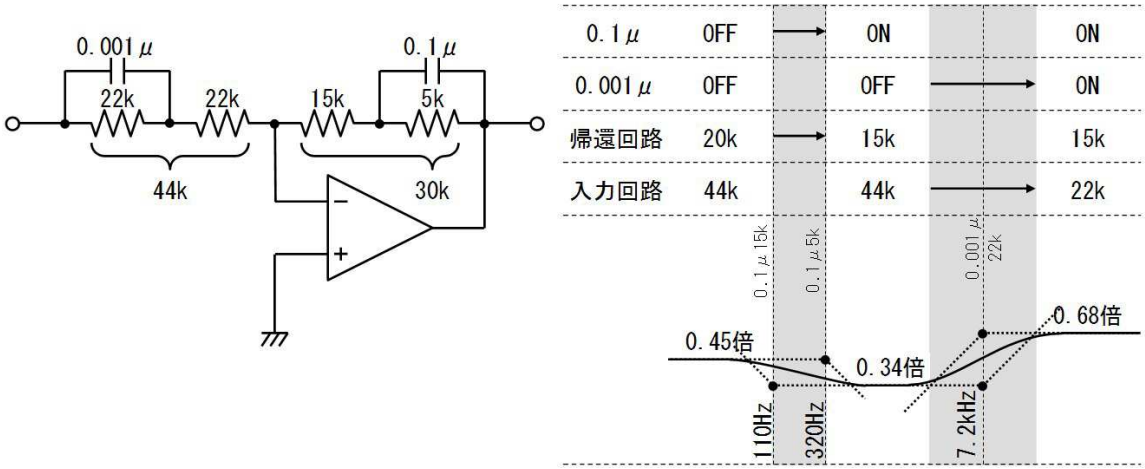


番号	①	②	③	④	⑤

周波数	低い	→	→	→	高い
素子のインピーダンス	C2＞R4	C2＜R4	C2＜R4	C2＜R4	C2＜R4
	C2＞R3	C2＞R3	C2＜R3	C2＜R3	C2＜R3
	C1＞R1	C1＞R1	C1＞R1	C1＜R1	C1＜R1
	C1＞R2	C1＞R2	C1＞R2	C1＞R2	C1＜R2
説明	周波数が十分低い時、Ｃ１Ｃ２は殆ど電流を流しません。このため回路図①のように、抵抗だけの増幅回路として動作し、周波数特性はグラフ①のように平らになります。	Ｃ２のインピーダンスがＲ４より小さくなると、電流は主にＣ２を流れ、回路図②のように帰還回路にＣの入った積分回路として動作し、周波数特性はグラフ②のように、右下りとなります。	Ｃ２のインピーダンスがＲ３より小さくなると、帰還回路の主なインピーダンスはＲ３となり、回路図③のように増幅回路として動作し、周波数特性はグラフ③のように平らになります。	Ｃ１のインピーダンスがＲ１より小さくなると、電流は主にＣ１を流れ、回路図④のように入力回路にＣの入った微分回路として動作し、周波数特性はグラフ④のように、右上りとなります。	Ｃ１のインピーダンスがＲ２より小さくなると、入力回路の主なインピーダンスはＲ２となり、回路図⑤のように増幅回路として動作し、周波数特性はグラフ⑤のように平らになります。
動作	増幅回路	積分回路	増幅回路	微分回路	増幅回路
増幅率[倍]	(R3+R4)/(R1+R2)		R3/(R1+R2)		R3/R2
周波数[Hz]	―	1 / (2πC2R4)	1 / (2πC2R3)	1 / (2πC1R1)	1 / (2πC1R2)	―

２０．１次組み合わせフィルタ（事例検討）

実際の回路では、主役になる素子がはっきり切り替わらず、微妙な感じで移行して行く場合も多いです。例えば下図は、安物オーディオで低音と高音を増強する目的で利用した回路です。（出物のカナル型イヤホンで（音色は素敵なのに）低音と高音が弱かったので作りました）



0.1μ	OFF	ON	ON
0.001μ	OFF	OFF	ON
帰還回路	20k	15k	15k
入力回路	44k	44k	22k

さて上図左側の回路図を見ると、入力回路の２本の抵抗が同じ値ですし、帰還回路の２本の抵抗も３倍程度しか差がありません。そのため、「動作のイメージ」で説明したように、周波数によって素子を無視する訳に行きません。

このような場合、まず、上図右側の表のように、コンデンサを周波数でＯＮ／ＯＦＦするスイッチだと考えて増幅率を計算します。

つまり、コンデンサがどちらもＯＦＦ（とても低い周波数）では増幅率は０．４５倍、周波数が少し

上がって０．１μがＯＮになると０．３４倍、さらに周波数が上がって両方ともＯＮになると０．６８倍、と求めます。

その後で、コンデンサと抵抗で決まる周波数をそれぞれ計算し、（３２０Ｈｚ、１１０Ｈｚ、７．２ｋＨｚ、７．２ｋＨｚ）増幅率が変化を始める周波数として、上図右下のように、グラフに書き込みます。

帰還回路では、「変化を始める周波数」が３２０Ｈｚ，「変化を終える周波数」が１１０Ｈｚと、「始め」と「終り」の値が逆になっています。これは、増幅率の段差が小さいためです。

入力回路でも、「変化を始める周波数」が７．２ｋＨｚ，「変化を終える周波数」が７．２ｋと同じですが、これも、（帰還回路程では無いけれど）増幅率の段差が小さいためです。

このようにしてグラフに書き込んだ増幅率の直線の間を通るように、なだらかに曲線を描けば、大体の周波数特性を知ることができます。

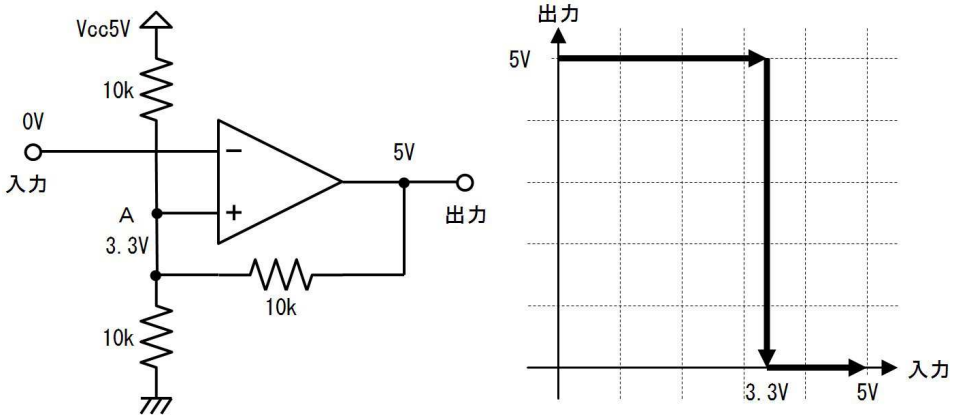
もちろん、交流回路の知識を使って伝達関数を求め、Ｅｘｃｅｌで正確無比な周波数特性を描くこともできます。しかし、学校のレポート以外では、それ程の精密さが求められた事はありません。

２１．シュミット・トリガ（反転）

シュミットトリガは発明者の（オットー・シュミットさん）にちなんだ名前です。神経の研究をしていたシュミットさんは、刺激が一定のレベルを超えないと反応（トリガ）しないという神経の性質を電子回路で模倣するために、この回路を発明しました。

下図にシュミットトリガの例を示します。（ここでは５Ｖ単一電源で考えています）－入力に信号が入力された反転コンパレータの回路と似ていますが、シュミットトリガでは、出力から＋入力に向かって「正帰還」抵抗が追加されています。

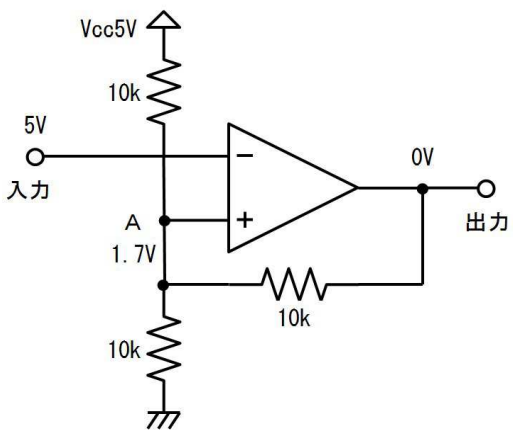
－入力に出力電圧が回り込む「負帰還」では、＋入力と－入力の電圧が等しくなりましたが、正帰還ではこの現象は生じません。

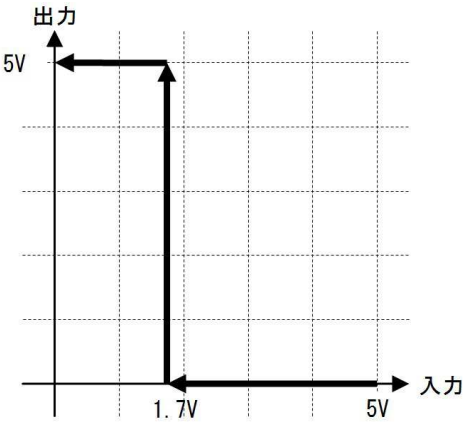


さて最初の状態を、上図のように入力が０Ｖで出力が５Ｖとします。このとき、Ａ点の電圧は「中点の電圧」で計算して、３．３Ｖです。

入力電圧が次第に上昇して行き３．３Ｖを越えると（コンパレータと同様に）出力が反転して０Ｖとなります。（上図右のグラフ）

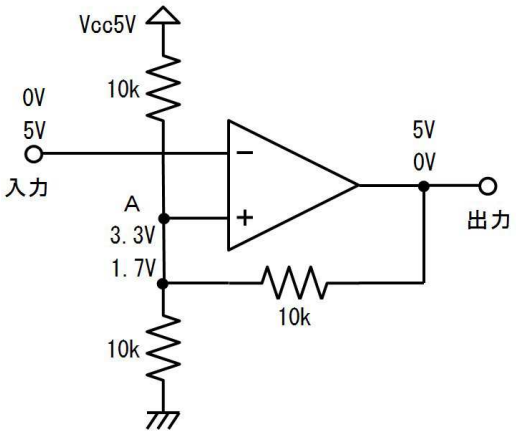
下図は、反転後の回路の状態です。出力は０Ｖ、Ａ点の電圧は１．７Ｖです。

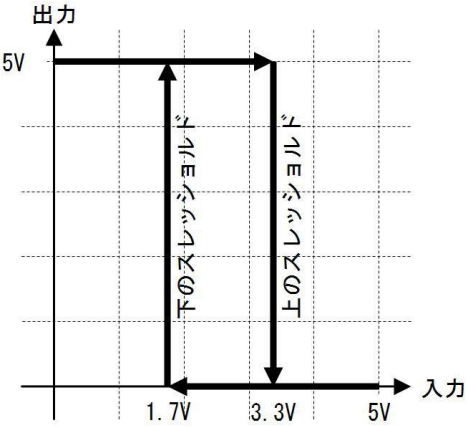




さて次に、入力電圧が次第に降下して行き、１．７Ｖを超えると、出力が反転して５Ｖとなります。（上図右のグラフ）

シュミットトリガとコンパレータの違いは、コンパレータでは１つしかなかったスレッショルド電圧（閾値電圧）が、シュミットトリガでは下図に示すように２つに増えることです。

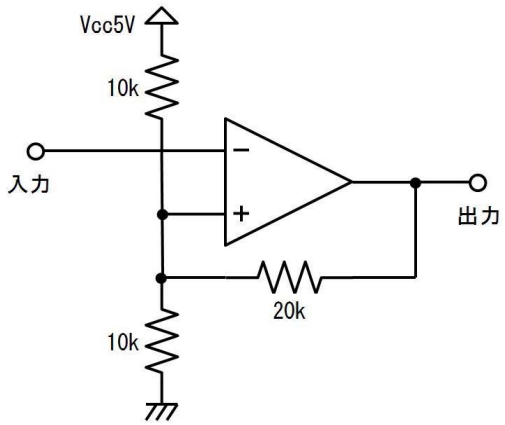


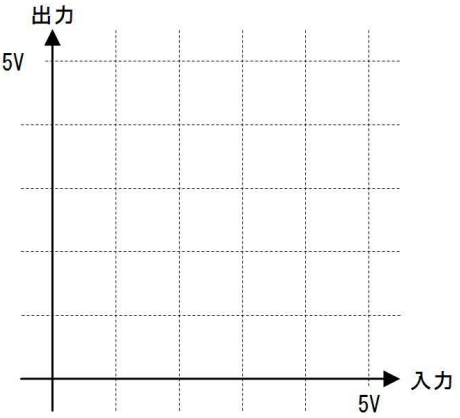


２つのスレッショルドを「上のスレッショルド」（３．３Ｖ）、「下のスレッショルド」（１．７Ｖ）と呼んで区別します。

２１.１. 練習

下図のシュミットトリガの上のスレッショルドと下のスレッショルドを求めて、入出力電圧特性をグラフに記入してください。但し、オペアンプの－電源端子はアースに接続されているとします。





上のスレッショルド［　　］Ｖ　下のスレッショルド［　　］Ｖ

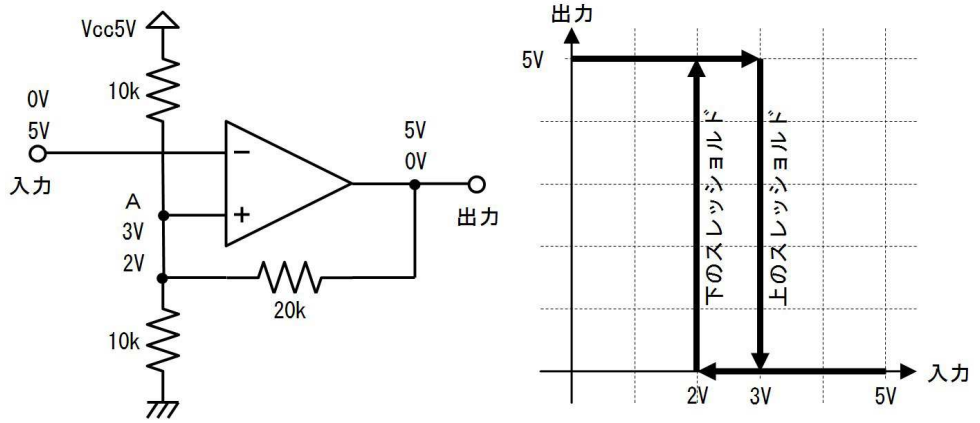
２１.２. 答

たとえば、下図のシートで中点（Ａ）の電圧を計算する。

	A	B	C	D	E	F	G
1	出力が5				出力が0		
2	電源	A	5		電源	A	5
3	GND	B	0		GND	B	0
4	出力	C	5		出力	C	0
5		a	10			a	10
6		b	10			b	10
7		c	20			c	20
8	中点	Abc+aBc+abC	=C2*C6*C7+C5*C3*C7+C5*C6*C4		中点	Abc+aBc+abC	=G2*G6*G7+G5*G3*G7+G5*G6*G4
9		bc+ac+ab	=C6*C7+C5*C7+C5*C6			bc+ac+ab	=G6*G7+G5*G7+G5*G6
10		中点電圧	=C8/C9			中点電圧	=G8/G9

	A	B	C	D	E	F	G
1	出力が5Vのとき				出力が0Vのとき		
2	電源	A	5		電源	A	5
3	GND	B	0		GND	B	0
4	出力	C	5		出力	C	0
5		a	10			a	10
6		b	10			b	10
7		c	20			c	20
8	中点	Abc+aBc+abC	1500		中点	Abc+aBc+abC	1000
9		bc+ac+ab	500			bc+ac+ab	500
10		中点電圧	3			中点電圧	2

上図の通り、上のスレッショルドは３Ｖ、下のスレッショルドは２Ｖと分る。従って、入出力特性は、下図の通りになる。

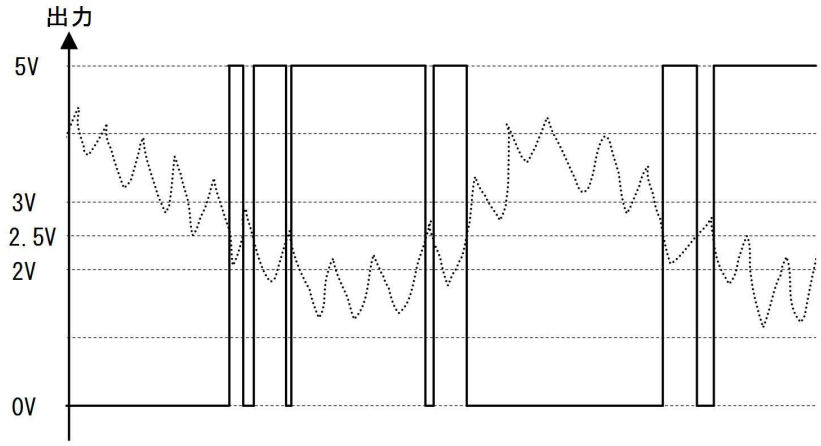


上のスレッショルド［ ３ ］Ｖ　下のスレッショルド［ ２ ］Ｖ

２１.３. 練習

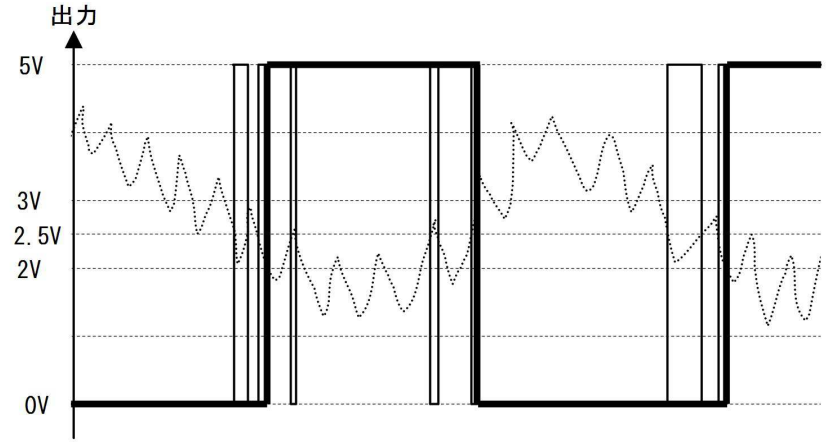
スレッショルド２．５Ｖの反転コンパレータに、下図に点線で示す信号を入力すると、下図に実線で示す信号を出力しました。

上の練習で考えたシュミットトリガ（上のスレッショルド３Ｖ、下のスレッショルド２Ｖ）に、同じ信号を入力した場合の出力信号を、下図に書き加えてください。また、コンパレータとシュミットトリガの出力信号の違いを説明してください。



出力信号の違い

２１.４. 答



出力信号の違い

コンパレータの出力は、入力信号がスレッショルド（２．５Ｖ）を横切るとき、出力信号が頻繁に反転を繰り返す。しかしシュミットトリガは、入力信号の大まかな上下を反映して、ゆっくりと反転する。

このように、シュミットトリガは振幅の小さな雑音の影響を抑えて、信号の大まかな変化を捉えて反転することができるため、雑音にる誤動作を防止したい場合にも用いられます。

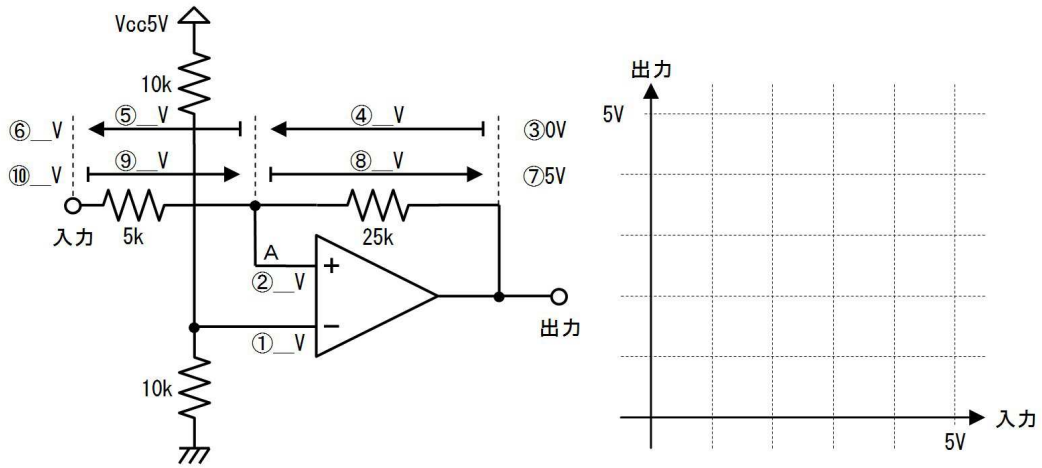
２２. 非反転シュミットトリガ

入力電圧が上昇すると出力が＋に反転し、入力電圧が降下すると出力がーに反転する（つまり反転しない）シュミットトリガです。

２２.１. 練習

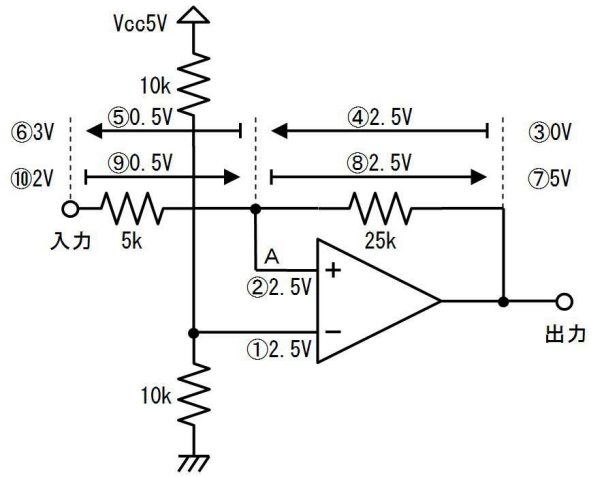
下図が非反転シュミットトリガの回路例です。下表に書き込みながら、下図の回路の動作を考え、下

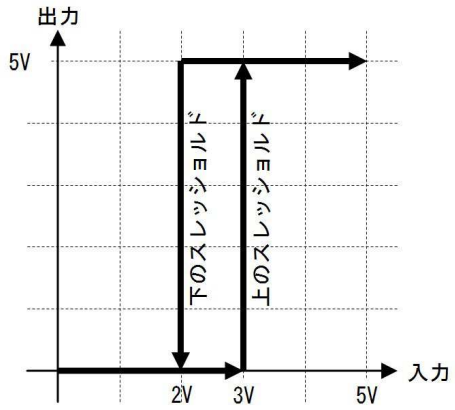
図のグラフに入出力電圧特性を書き込んでください。（ここでは５Ｖ単一電源で考えています）



番号	質問	値
①	１０ｋΩで電源の５Ｖを分圧しているため、－入力端子の電圧は、	Ｖ
②	このオペアンプが反転する時の、＋入力端子の電圧の電圧は、	Ｖ
④	以下では、上の②で考えた、オペアンプが反転する瞬間の各部の電圧を考える。つまり、＋入力端子が上の②で考えた電圧として考える。 出力が③０Ｖのとき、２５ｋΩの両端電圧は、	Ｖ
⑤	５ｋΩには２５ｋΩと同じ電流が流れているから、その両端電圧は、	Ｖ
⑥	入力電圧は、	Ｖ
⑧	また、出力が⑦５Ｖのとき、２５ｋΩの両端電圧は、	Ｖ
⑨	５ｋΩには２５ｋΩと同じ電流が流れているから、その両端電圧は、	Ｖ
⑩	入力電圧は、	Ｖ
⑪	下のスレッショルドは、	Ｖ
⑫	上のスレッショルドは、	Ｖ

２２.２. 答





番号	質問	値
①	１０ｋΩで電源の５Ｖを分圧しているため、－入力端子の電圧は、	２．５Ｖ
②	このオペアンプが反転する時の、＋入力端子の電圧の電圧は、	２．５Ｖ
④	以下では、上の②で考えた、オペアンプが反転する瞬間の各部の電圧を考える。つまり、＋入力端子が上の②で考えた電圧として考える。 出力が③０Ｖのとき、２５ｋΩの両端電圧は、	２．５Ｖ
⑤	５ｋΩには２５ｋΩと同じ電流が流れているから、その両端電圧は、	０．５Ｖ
⑥	入力電圧は、	３Ｖ
⑧	また、出力が⑦５Ｖのとき、２５ｋΩの両端電圧は、	２．５Ｖ
⑨	５ｋΩには２５ｋΩと同じ電流が流れているから、その両端電圧は、	０．５Ｖ
⑩	入力電圧は、	２Ｖ
⑪	下のスレッショルドは、	２Ｖ
⑫	上のスレッショルドは、	３Ｖ

２３. 無安定マルチバイブレータ

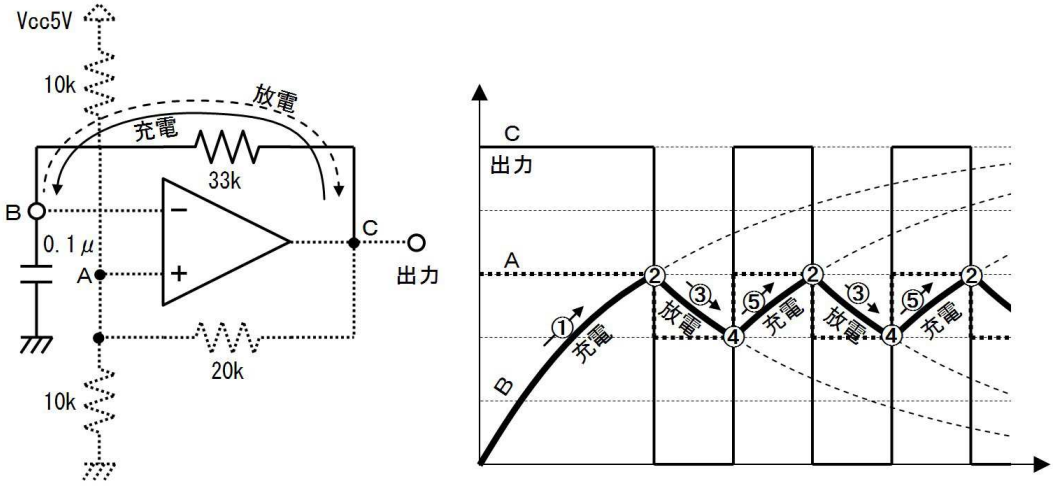
「無安定」とは聞き慣れない言葉ですが、下表に示す「２つの状態がある回路の種類」で、「無安定」に分類される回路、つまり「２つ（ここでは、＋に振り切ったとき、－に振り切ったとき）の状態の何れでも安定せず、交互に入れ替わりを繰り返す回路」という意味です。

２つの状態がある回路の種類

邦名	英名	意味
双安定	ｂｉｓｔａｂｌｅ バイ・ステーブル	どちらの状態でも留まることができる
単安定	ｍｏｎｏｓｔａｂｌｅ モノ・ステーブル	どちらか一方でだけで留まることができ、他方に切り替えても、しばらくすると元に戻る
無安定	ａｓｔａｂｌｅ ア・ステーブル ｎｏｎｓｔａｂｌｅ ノン・ステーブル	どちらの状態にも留まることができず、２つの状態を交互に繰り返す

さて、下図は無安定マルチバイブレータの回路です。点線で示す反転シュミットトリガに、抵抗とコンデンサが追加されています。（ここでは５Ｖ単一電源で考えています）

点線部はシュミットトリガとして動作しますから、下図Ｂ点（シュミットトリガの入力）の電圧が、上のスレッショルド（３Ｖ）を超えれば出力は０Ｖに反転し、下のスレッショルド（２Ｖ）を下回れば出力は５Ｖに反転します。



上図右側のグラフは回路図中のＡ、Ｂ、Ｃ点の電圧変化を示します。このように、回路は次の②③④⑤（上図右側グラフの番号と対応しています）の動作を繰り返して、出力が５Ｖの状態と、出力が０Ｖの状態を交互に繰り返します。

①（最初の一回だけ）コンデンサは、最初の０Ｖから出力電圧（Ｃ点）の５Ｖを目指して、上図左側回路図の実線矢印の経路で充電されて行く。このためＢ点の電圧は次第に上昇する。

②Ｂ点の電圧が上のスレッショルド（３Ｖ）を超えると、出力電圧（Ｃ点）が０Ｖに反転する。（Ａ点の電圧は２Ｖとなる）

③コンデンサは、３Ｖから出力電圧（Ｃ点）の０Ｖを目指して、上図左側回路図の点線矢印の経路で放電されて行く。このためＢ点の電圧は次第に降下する。

④Ｂ点の電圧が下のスレッショルド（２Ｖ）を下回ると、出力電圧（Ｃ点）が５Ｖに反転する。（Ａ点の電圧は３Ｖとなる）

⑤コンデンサは、２Ｖから出力電圧（Ｃ点）の５Ｖを目指して、上図左側回路図の実線矢印の経路で充電されて行く。このためＢ点の電圧は次第に上昇する。→②に戻り繰り返す

さて、②から④に放電するのに掛かる時間は、「ＣＲ回路の放電」で説明した方法で計算できます。

②での電圧が３Ｖ（最初）、④での電圧が２Ｖですから、Ｅｘｃｅｌで=-0.1E-6*33E3*ln(2/3)と計算して、１．３m秒と求めることができます。

今回の回路では、０Ｖを目指して放電したために、３Ｖと２Ｖを直接計算に使うことができましたが、たとえば０．５Ｖを目指して放電する（実際のオペアンプでは良くある）場合は、２．５Ｖ（３Ｖ－０．５Ｖ）から、１．５Ｖ（２Ｖ－０．５Ｖ）まで放電する、と考えて計算します。つまり「目指す電圧との差」を使って計算します。

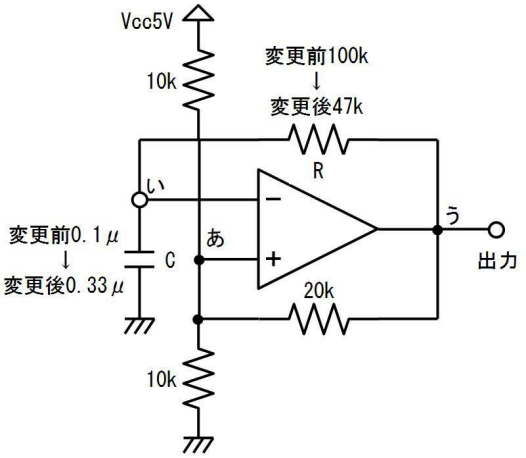
この回路では、充電と放電の波形が上下対称で、放電時間と充電時間が同じですから、発振の周期は２倍の２．６m秒となり、周波数は=1/2.6E-3と計算して、約３８０Ｈｚです。

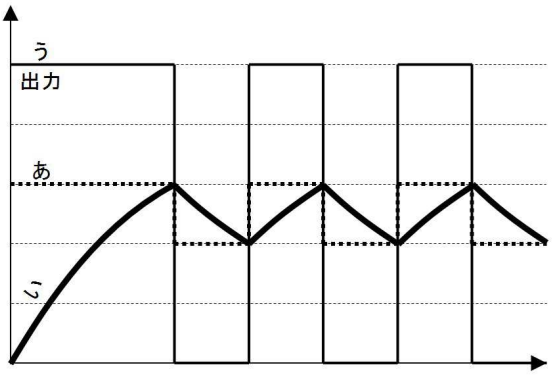
実際には、充電と放電の波形が上下対象にならない場合が良くあります。

この回路の動作時間は、Ｃ×Ｒの値、つまり０．１μと３３ｋΩで決まる時定数τに比例します。

２３.１. 練習

下図の無安定マルチバイブレータが変更前の設定では１３２Ｈｚで発振しました。その後、この回路の抵抗とコンデンサを下図に示すように変更しました。変更前の発振周期と、変更後の周期と周波数を、下表に書き込みながら求めてください。





変更前の周期＿＿＿＿m秒　変更後の周期＿＿＿＿m秒　変更後の周波数＿＿＿＿Ｈｚ

番号	質問	値
①	変更前の周期は、周波数の逆数だから、	m秒
②	ＣとＲで動作時間が決まる回路では、 （動作時間を決めているＣとＲ以外の設定が同じなら） 回路の動作時間は、Ｃ×Ｒの値（つまり、時定数τ）に比例します。つまり、 $\text{変更後の動作時間} = \text{変更前の動作時間} \times \frac{\text{変更後のC×R}}{\text{変更前のC×R}}$ と計算できます。 今回の変更では、動作時間を決めているＣやＲ以外の設定（電源電圧や動作時間を決めていない抵抗の値）は同じですか、	同じ・違う
④	変更前のＣ×Ｒの値は、	m秒
⑤	変更後のＣ×Ｒの値は、	m秒

⑥	変更後の周期は、	m秒
⑦	変更後の周波数は周期の逆数で、	Ｈｚ

２３.２. 答

番号	質問	値
①	変更前の周期は、周波数の逆数だから、 Ｅｘｃｅｌで=1/132と計算して、	７．６m秒
②	ＣとＲで動作時間が決まる回路では、 （動作時間を決めているＣとＲ以外の設定が同じなら） 回路の動作時間は、Ｃ×Ｒの値（つまり、時定数τ）に比例します。つまり、 $\text{変更後の動作時間} = \text{変更前の動作時間} \times \frac{\text{変更後のC×R}}{\text{変更前のC×R}}$ と計算できます。 今回の変更では、動作時間を決めているＣやＲ以外の設定（電源電圧や動作時間を決めていない抵抗の値）は同じですか、	同じ・違う
④	変更前のＣ×Ｒの値は、 =0.1E-6*100E3と計算して、	１０m秒
⑤	変更後のＣ×Ｒの値は、 =0.33E-6*47E3と計算して、	１６m秒
⑥	変更後の周期は、 =7.6E-3*16/10と計算して、	１２m秒
⑦	変更後の周波数は周期の逆数で、 =1/12E-3と計算して、 あるいはより正確には、全体を通じて、 =1/(1/132*0.33E-6*47E3/0.1E-6/100E3)と計算して、	８３Ｈｚ （８５Ｈｚ）

従って、

変更前の周期 ７．６ m秒　変更後の周期 １２ m秒　変更後の周波数 ８５ Ｈｚ

となります。

２４. 電流電圧変換回路

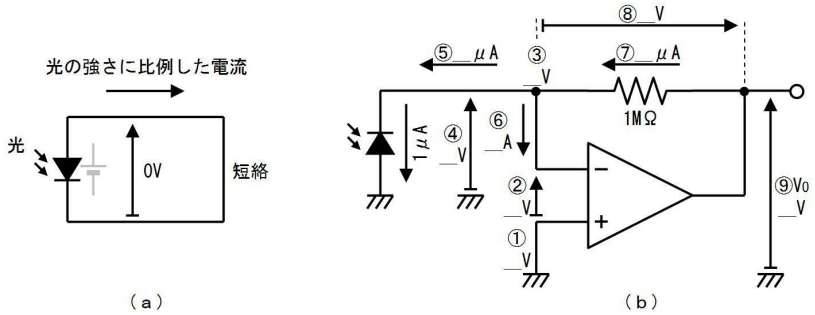
下図（ａ）に示すように、フォトダイオード等のセンサは、両端を短絡（ショート）したときに、光の強さに比例した電流が流れます。このように素子の両端を短絡した状態で、流れる電流を測定できるのが、下図（ｂ）に示す電流電圧変換回路（トランスコンダクタンスアンプ）です。

ここではフォトダイオードを太陽電池のように発電させる状態で使用しています。（フォトボルティックモード／光電地モード）この

ほかに、フォトダイオードに逆電圧（V_R）を加えておき、流れる逆電流（I_R）を検出する（フォトコンダクティブモード／光導電モード）もあります。前者は直線性が良好で（６桁にも及ぶ直線性）、後者は応答速度が高くなります。

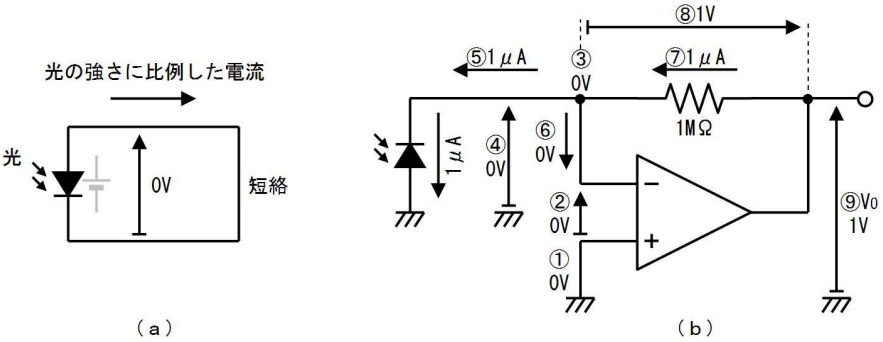
２４.１. 練習

上図（ｂ）を参考に下表に記入しながら、電流電圧変換回路の動作を検討してください。



番号	質問	値
①	＋入力の電圧は、 （アースに接続されているから、）	V
②	＋入力とー入力の間の電圧は、 （１MΩで負帰還が掛かっているから、）	V
③	ー入力の電圧は、	V
④	ダイオードの両端電圧は、	V
	④から、ダイオードは短絡した状態となることが分かります。	
⑤	入力部を左に向かって流れる電流は、 （ダイオードの光電流が１μAだから、）	μA
⑥	ー入力に流れる電流は、	A
⑦	帰還抵抗（１MΩ）に流れる電流は、 （⑤⑥とキルヒ則から、）	μA
⑧	帰還抵抗の両端電圧は、 （オーム則より、）	V
⑨	出力電圧は、	V

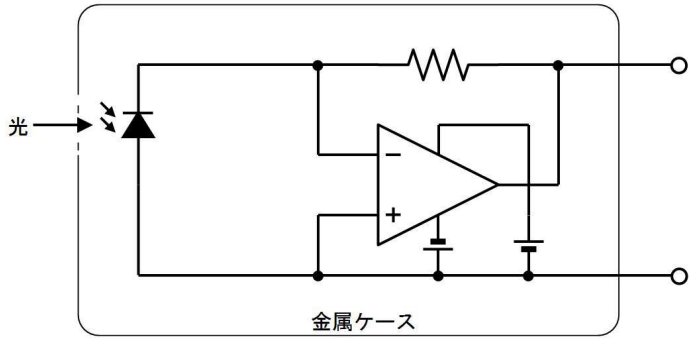
２４.２. 答



番号	質問	値
①	＋入力の電圧は、 （アースに接続されているから、）	０Ｖ
②	＋入力とー入力の間の電圧は、 （１ＭΩで負帰還が掛かっているから、）	０Ｖ
③	ー入力の電圧は、	０Ｖ
④	ダイオードの両端電圧は、	０Ｖ
	④から、ダイオードは短絡した状態となることが分かります。	
⑤	入力部を左に向かって流れる電流は、 （ダイオードの光電流が１μＡだから、）	１μＡ
⑥	ー入力に流れる電流は、	０Ａ
⑦	帰還抵抗（１ＭΩ）に流れる電流は、 （⑤⑥とキルヒ則から、）	１μＡ
⑧	帰還抵抗の両端電圧は、 （オーム則より、）	１Ｖ
⑨	出力電圧は、	１Ｖ

このように、電流電圧変換回路を使用することで、ダイオードの両端を短絡した（０Ｖにした）状態で、ダイオードに流れた電流に比例した電圧を出力することができます。

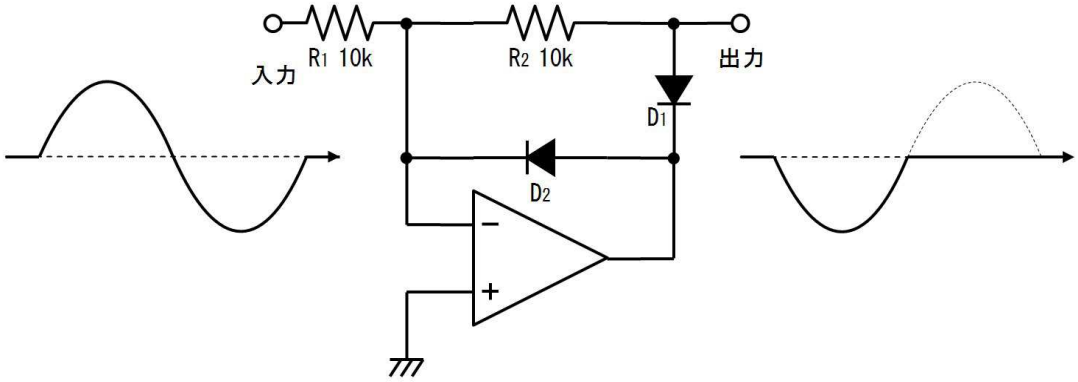
極弱い光を測定する場合は、下図に示すように、回路全体をシールドケースに入れて、測定光をケースに設けた金網等からダイオードに照射します。



上図のように、電源に電池を用いてシールドケースの中に入れると、電源に起因するノイズも防ぐことができます。

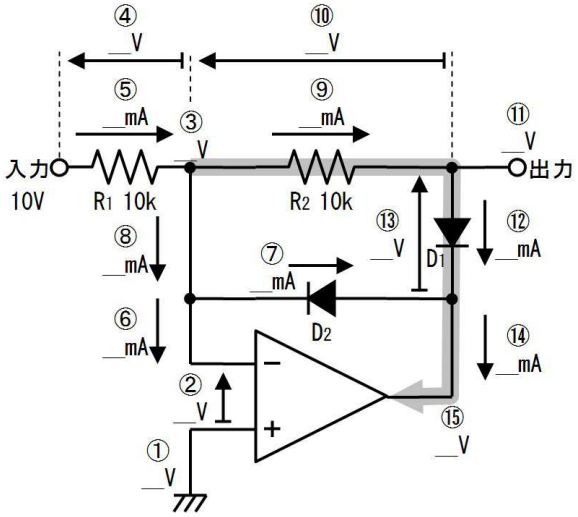
２５. 半波整流回路

下図の回路は、入力がプラスの場合は反転して出力されますが、入力がマイナスの場合は出力は０Ｖのままで変化しません。このような回路を半波整流回路と呼びます。



２５.１. 練習

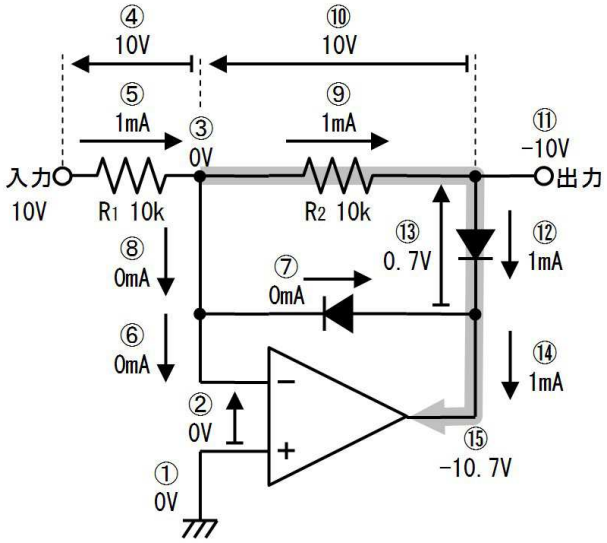
上図の半波整流回路に＋１０Ｖを加えた場合の各部の電圧／電流を、下表に書き込みながら検討してください。



番号	質問	値
①	＋入力の電圧は、	Ｖ

	（アースに接続されているから、）	
②	＋入力と－入力の電圧差は、 （抵抗やダイオードで負帰還が掛かっているから、）	V
③	＋入力の電圧は、	V
④	R_1の両端電圧は、	V
⑤	R_1に流れる電流は、	mA
⑥	オペアンプの入力に流れる電流は、	mA
⑦	D_2を右向きに流れる電流は、 （逆方向だから、）	mA
⑧	R_1の右側から－入力に向かって流れる電流は、 （⑦、⑥から、）	mA
⑨	R_2に流れる電流は、 （⑤、⑧から、）	mA
⑩	R_2の両端電圧は、	V
⑪	出力電圧は、	V
⑫	D_1に流れる電流は、 （⑨から、）	mA
⑬	D_1の両端電圧は、	V
⑭	オペアンプの出力端子に流れ込む電流は、	mA

25.2. 答



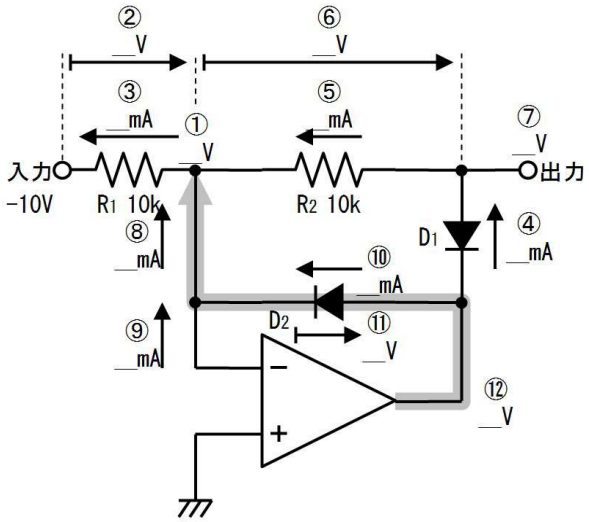
番号	質問	値

①	＋入力の電圧は、 （アースに接続されているから、）	０Ｖ
②	＋入力とー入力の電圧差は、 （抵抗やダイオードで負帰還が掛かっているから、）	０Ｖ
③	＋入力の電圧は、	０Ｖ
④	R_1の両端電圧は、	１０Ｖ
⑤	R_1に流れる電流は、	１ｍＡ
⑥	オペアンプの入力に流れる電流は、	０ｍＡ
⑦	D_2を右向きに流れる電流は、 （逆方向だから、）	０ｍＡ
⑧	R_1の右側からー入力に向かって流れる電流は、 （⑦、⑥から、）	０ｍＡ
⑨	R_2に流れる電流は、 （⑤、⑧から、）	１ｍＡ
⑩	R_2の両端電圧は、	１０Ｖ
⑪	出力電圧は、	－１０Ｖ
⑫	D_1に流れる電流は、 （⑨から、）	１ｍＡ
⑬	D_1の両端電圧は、	０．７Ｖ
⑭	オペアンプの出力端子に流れ込む電流は、	１ｍＡ

このように入力電圧がプラスのときは、入力電圧が反転して出力に現れます。

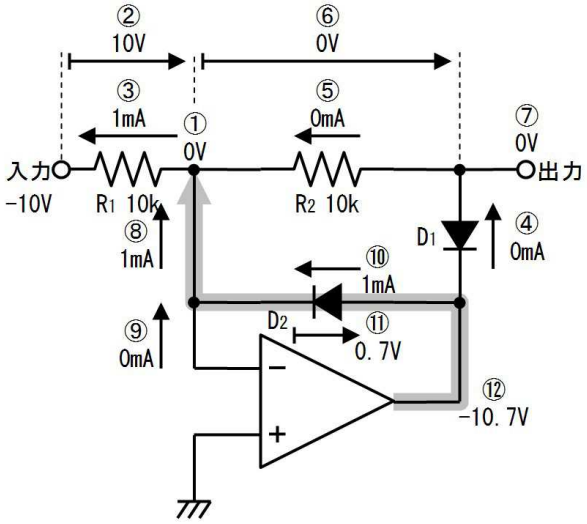
２５.３. 練習

上図の半波整流回路に－１０Ｖを加えた場合の各部の電圧／電流を、下表に書き込みながら検討してください。



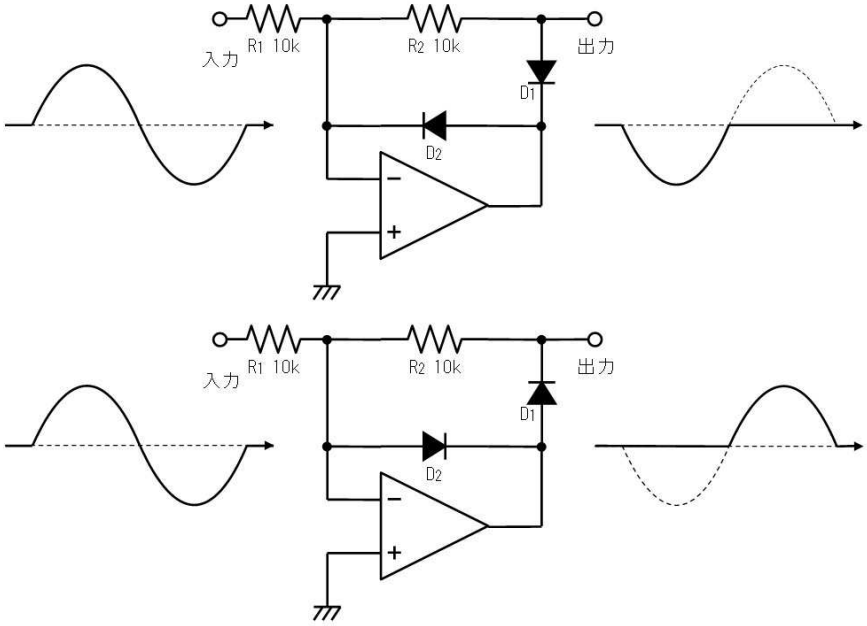
番号	質問	値
①	－入力の電圧は、	V
②	R_1の両端電圧は、	V
③	R_1に流れる電流は、	mA
④	D_1を上向きに流れる電流は、 （逆方向だから、）	mA
⑤	R_2を流れる電流は、	mA
⑥	R_2の両端電圧は、	V
⑦	出力電圧は、	V
⑧	R_1の右側に向かって登る電流は、	mA
⑨	－入力に流れる電流は、	mA
⑩	D_2を左向きに流れる電流は、	mA
⑪	D_2の両端電圧は、	V
⑫	オペアンプの出力端子の電圧は、	V

２５.４. 答



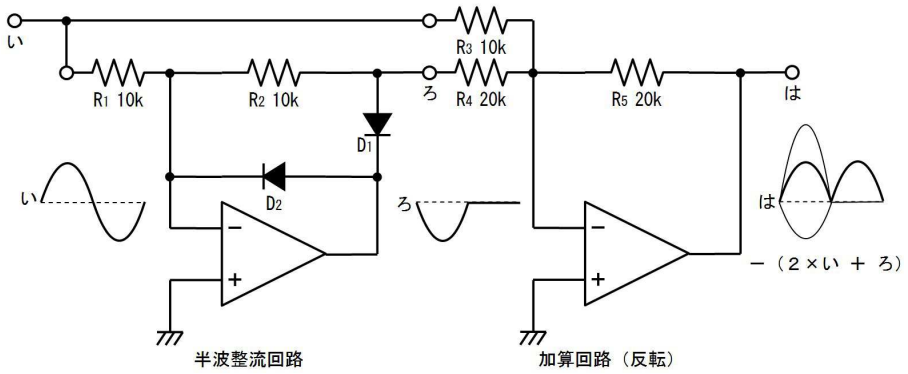
番号	質問	値
①	－入力の電圧は、	０Ｖ
②	R_1の両端電圧は、	１０Ｖ
③	R_1に流れる電流は、	１ｍＡ
④	D_1を上向きに流れる電流は、 （逆方向だから、）	０ｍＡ
⑤	R_2を流れる電流は、	０ｍＡ
⑥	R_2の両端電圧は、	０Ｖ
⑦	出力電圧は、	０Ｖ
⑧	R_1の右側に向かって登る電流は、	１ｍＡ
⑨	－入力に流れる電流は、	０ｍＡ
⑩	D_2を左向きに流れる電流は、	１ｍＡ
⑪	D_2の両端電圧は、	０．７Ｖ
⑫	オペアンプの出力端子の電圧は、	－１０．７Ｖ

このように入力電圧がマイナスの場合は、出力電圧は０Ｖで変化しません。下図のようにダイオードの向きを逆にするとこで、入力がマイナスの場合に出力が出る回路に変更できます。



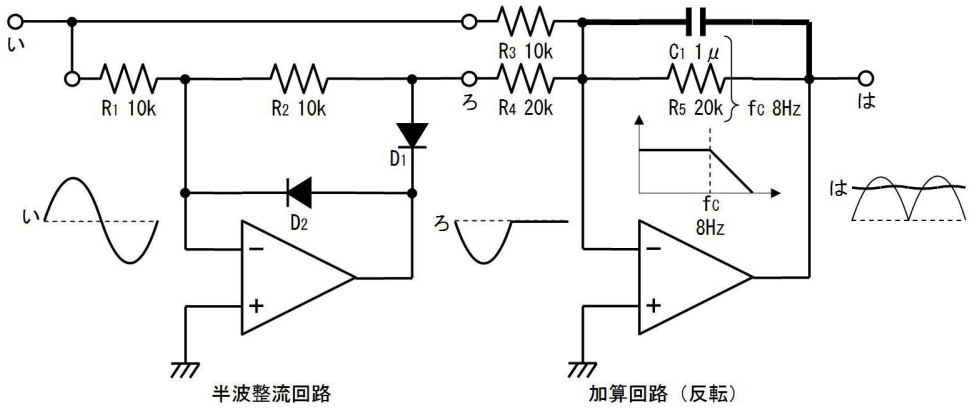
２６. 絶対値回路

下図のように半波整流回路の出力（ろ）と、入力信号（い）を２：１の割合で加えると、全波整流波形（は）を出力できます。



上図の回路は、プラスの電圧が入力されても、マイナスの電圧が入力されても、プラスの電圧が出力されるので、絶対値回路と呼ばれます。

下図のようにコンデンサC_1を追加すると、出力波形をなめらかにして（平滑して）、平均電圧を出力することができます。

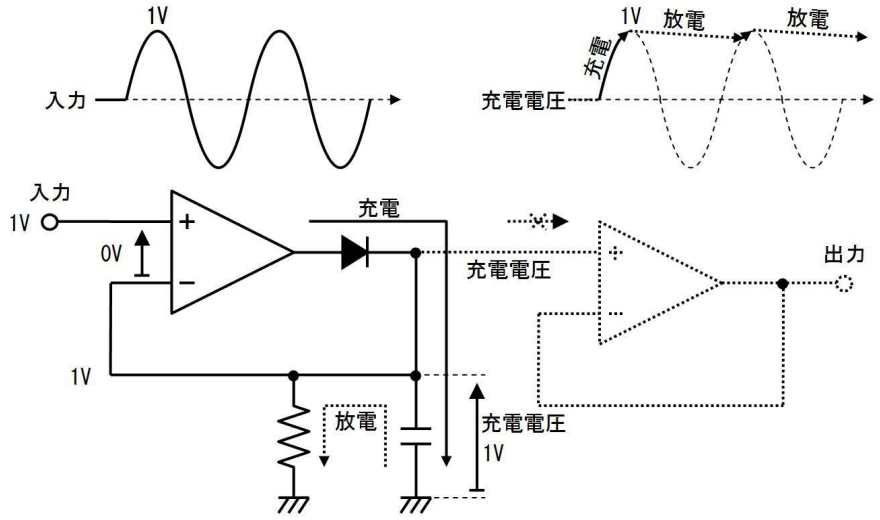


上図の回路の平滑の時定数は=C1*R5 で、カットオフ周波数は=1/2/pi()/C1/R5 で計算できます。カッ

トオフ周波数が、信号周波数の１００分の１程度であれば、信号成分を殆ど含まない滑らかな平均電圧が出力されます。

２７．最大値検波回路

下図は最大値検波回路です。＋入力に１Ｖを加えると、－入力電圧が１Ｖになるまでダイオードを通じてコンデンサが充電されます（下図実線矢印の経路）。その後＋入力電圧が下がってもダイオードが逆電圧になるためオペアンプはコンデンサを放電することができません。放電は抵抗を通じてゆっくりと行われます（下図点線矢印の経路）。



その結果、コンデンサは入力電圧の最大値に速やかに充電され、ゆっくりと放電されます。コンデンサの電圧に影響を与えないように、上図に点線で示す「ユニティゲイン増幅器」を設けて、出力を取り出します。

１１．アナログ回路中篇

これまで、オペアンプが「理想的な性能」を持っていると考えて（理想オペアンプと考えて）回路の働きを説明して来ました。

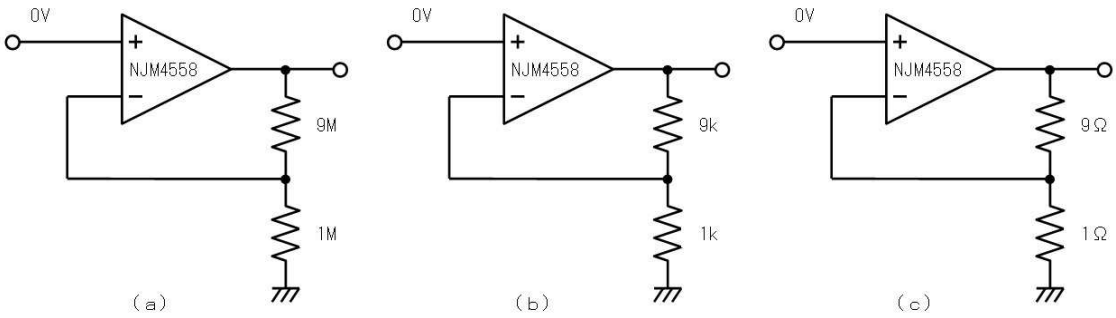
既に述べたように、オペアンプの性能はかなり向上していますから、回路の種類やオペアンプの品種によっては「理想的な性能」と考えても問題ない場合も増えています。しかし、理想的とは言えない部分を理解することで、同じオペアンプでも、より高い性能が引き出せたり、より安価なオペアンプで済ますことができるようになります。

ここでは、オペアンプの「理想的でない」部分を説明し（理想的ではないために）回路の動作にどのような影響が出るのか考え、必要があれば対策の方法を解説します。

１．入力バイアス電流

下図の３回路はいずれも１０倍の非反転増幅回路ですが、抵抗の値がそれぞれ異なります。理想オペアンプであれば、どの回路も正しく動作する筈です。

使用する抵抗値が高い程、流れる電流が減り、発熱や消費電力が少なくなりますから、何の問題も無ければ、抵抗値の最も高い（ａ）の回路を使いたいところです。



この回路ではオペアンプの「理想的でない」部分の中で「入力バイアス電流」が問題になります。

オペアンプの重要な性質④に「入力端子には電流が流れない」がありました。ところが実際には僅かな電流が入力端子に流れます。この電流が入力バイアス電流です。通常、入力バイアス電流は、入力電圧に関係なく常に一定の大きさで流れます。

下表にＮＪＭ４５５８のデータシートの一部を示します。表の３行目に「入力バイアス電流」の値が記載されています。

NJM4558

■ **電気的特性** (V^+/V^-=±15V,Ta=25°C)

項目	記号	条件	最小	標準	最大	単位
入力オフセット電圧	V_{IO}	R_S≦10kΩ	-	0.5	6	mV
入力オフセット電流	I_{IO}		-	5	200	nA
入力バイアス電流	I_B		-	25	500	nA
入力抵抗	R_{IN}		0.3	5	-	MΩ
電圧利得	A_V	R_L≧2kΩ,V_O=±10V	86	100	-	dB
最大出力電圧1	V_{OM1}	R_L≧10kΩ	±12	±14	-	V
最大出力電圧2	V_{OM2}	R_L≧2kΩ	±10	±13	-	V
同相入力電圧範囲	V_{ICM}		±12	±14	-	V
同相信号除去比	CMR	R_S≦10kΩ	70	90	-	dB
電源電圧除去比	SVR	R_S≦10kΩ	76.5	90	-	dB
消費電流	I_{CC}		-	3.5	5.7	mA
スルーレート						
NJM4558	SR		-	1	-	V/μs
NJM4559	SR		-	2	-	V/μs
入力換算雑音電圧	V_{NI}	RIAA,R_S=2.2kΩ,30kHz LPF	-	1.4	-	μVrms
利得帯域幅積	GB					
NJM4558				3		MHz
NJM4559				6		MHz

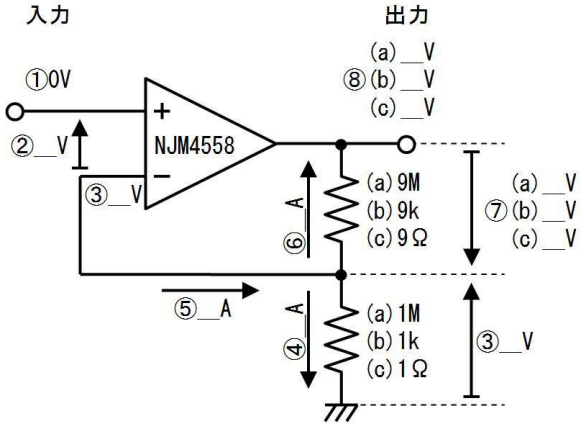
ＮＪＭ４５５８の入力バイアス電流は２５～５００ｎＡです。単位が「ｎＡ」ですから、確かに非常に小さな電流ですが、これでも回路によっては影響があります。

ＮＪＭ４５５８の位置付け

ここでは「理想オペアンプと現実のオペアンプの違い」を強調するためにＮＪＭ４５５８を取り上げます。つまり４５５８は、オフセットやバイアス電流が多く、出力スイングが小さく、高い周波数は増幅できない等と、理想オペアンプからは程遠い性能です。性能はイマイチですが、安価であり、また、性質を活かした使い方が確立しているため、永らく利用されました。電源電圧が低いと使い難いので、今後は淘汰されて行くでしょう。

オペアンプは１９６０年代中ごろからμＡ７０２、７０９と進歩し、６８年の７４１で非常に使いやすくなりました。ＲＣ４５５８は、１９７０年代にレイセオン社が７４１を改良して（初段をＰＮＰに変更）低雑音化したしたオペアンプで、ＮＪＭ４５５８はそのセカンドソース（そっくりさん）です。低雑音の特性を活かしてオーディオ機器に多用されました。

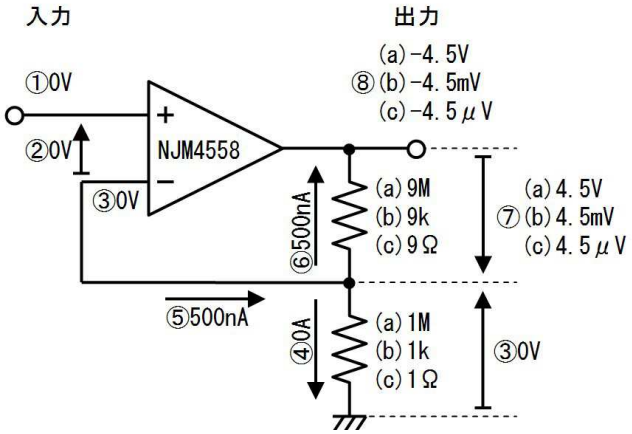
1.1. 練習（入力バイアス電流の影響）



では、上図を見ながら下表に記入して、最初の３つの回路で入力バイアス電流を影響を考えます。

	質問	答		
①	入力電圧は	０Ｖ		
②	負帰還の回路だから＋入力と－入力の間の電圧は、	Ｖ		
③	－入力端子の電圧は、	Ｖ		
④	下側の抵抗に流れる電流は、	Ａ		
⑤	ＮＵＭ４５５８の入力バイアス電流（最大値）は、	Ａ		
⑥	上側の抵抗に流れる電流は、	Ａ		
⑦	上側の抵抗に発生する電圧は、	（ａ）の場合	（ｂ）の場合	（ｃ）の場合
		Ｖ	Ｖ	Ｖ
⑧	出力電圧は、	Ｖ	Ｖ	Ｖ

1.2. 答



	質問	答

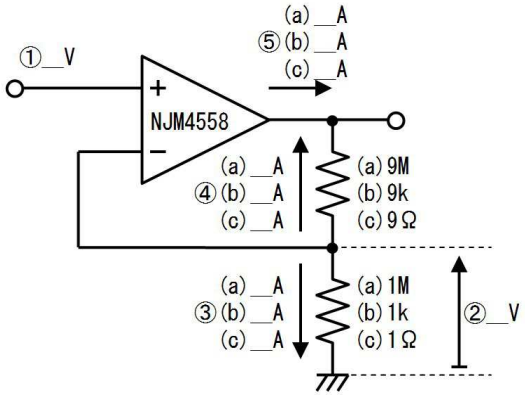
①	入力電圧は			０Ｖ
②	負帰還の回路だから＋入力と－入力の間の電圧は、			０Ｖ
③	－入力端子の電圧は、			０Ｖ
④	下側の抵抗に流れる電流は、			０Ａ
⑤	ＮＵＭ４５５８の入力バイアス電流（最大値）は、			５００ｎＡ
⑥	上側の抵抗に流れる電流は、			５００ｎＡ
⑦	上側の抵抗に発生する電圧は、	（ａ）の場合	（ｂ）の場合	（ｃ）の場合
		４．５Ｖ	４．５ｍＶ	４．５μＶ
⑧	出力電圧は、	－４．５Ｖ	－４．５ｍＶ	－４．５μＶ

つまり、本来であれば入力の０Ｖの１０倍、つまり０Ｖが出力される筈ですが、例えば（ａ）では－４．５Ｖが出力されています。これは使えそうにありません。

（ｂ）であれば、－４．５ｍＶとかなり小さくなり、（ｃ）では－４．５μＶと測定が難しいほど小さくなっています。ですから、入力バイアス電流の影響を避けるためには（ｂ）か（ｃ）を選ぶべきです。

1.3. 練習（回路電流）

このような入力バイアス電流の検討と平行して、回路に流す電流も検討します。４５５８等の汎用オペアンプを使った回路は、主に最大１～１０ｍＡ程度の電流で動作させます。（オペアンプの品種によっては、１０～１００μＡで動作させる事も可能です）

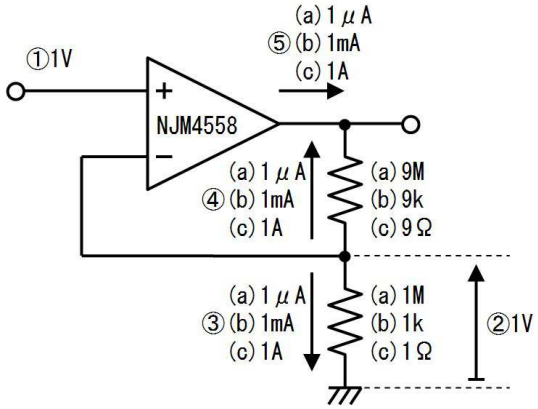


上図を見ながら下表に書き込み、入力に１Ｖを加えた場合の、回路に流れる電流を検討してください。（入力バイアス電流の影響は無視して検討してください）

	質問	（ａ）の場合	（ｂ）の場合	（ｃ）の場合
①	入力電圧は、	Ｖ	Ｖ	Ｖ
②	下側の抵抗の電圧は、	Ｖ	Ｖ	Ｖ
③	下側の抵抗の電流は、	Ａ	Ａ	Ａ

④	上側の抵抗の電流は、	A	A	A
⑤	オペアンプが出力する電流は、	A	A	A

1.4. 答



	質問	（ａ）の場合	（ｂ）の場合	（ｃ）の場合
①	入力電圧は、	１Ｖ	１Ｖ	１Ｖ
②	下側の抵抗の電圧は、	１Ｖ	１Ｖ	１Ｖ
③	下側の抵抗の電流は、	１μＡ	１ｍＡ	１Ａ
④	上側の抵抗の電流は、	１μＡ	１ｍＡ	１Ａ
⑤	オペアンプが出力する電流は、	１μＡ	１ｍＡ	１Ａ

（ａ）の回路は抵抗値が高いため、僅かな（１μＡ）な電流しか流れていません。省電力の携帯機器では、入力バイアス電流の小さなオペアンプを使用して、この程度の電流で動作させることも良くあります。（もちろん、ＮＪＭ４５５８では無理です）

（ｃ）の回路は抵抗値がとても小さく、例えば１Ｖを入力したときにオペアンプは１Ａをの電流を出力する必要があります。しかし、４５５８が出力できるのは、たかだか１０～２０ｍＡですから、１Ａはとても無理です。電源電流も１Ａ以上消費することになり、発熱も大きくなります。

そこで（ｂ）の回路であれば、回路電流は１ｍＡと、ＮＵＭ４５５８が出力できる大きさに収まっています。

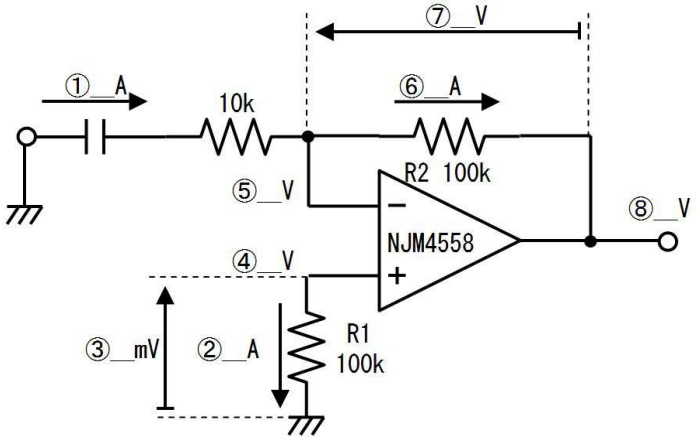
このように回路電流は、下表に示すとおり、（１）入力バイアス電流に比べれば十分大きく、（２）オペアンプの出力電流よりは小さい範囲に設定します。

オペアンプの仕様 ＮＪＭ４５５８の例	大小関係	回路電流
入力バイアス電流 （最大５００ｎＡ）	＜＜	入力バイアス電流より十分大きくする
		精度の求められない回路でも、入力バイアス電流の最低１００倍以上 （５０μＡ以上）

		精度の求められる回路では１０００倍かそれ以上 （０．５ｍＡ以上）
オペアンプの最大出力電流 （１０ｍＡ） 許容できる電源の消費電流より小さくする	＞	発熱が限度内であれば、ぎりぎりまで使用できる （１０ｍＡ以下）

1.5. 入力バイアス電流を打ち消す回路

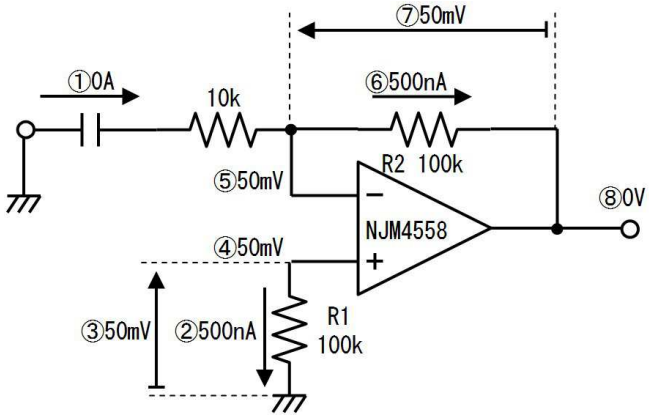
回路によっては、たとえ入力バイアス電流が流れても、その影響が相殺して影響を小さくすることができます。下図はバイアス電流の影響を相殺した交流反転増幅回路の例です。



上図を見ながら、下表に記入して入力バイアス電流の影響が相殺される様子を検討します。

番号	質問	値
①	入力コンデンサを通して流れ込んでくる直流電流は、	Ａ
②	ＮＪＭ４５５８の最大入力バイアス電流は、	ｎＡ
③	入力バイアス電流によってＲ１に発生する電圧は、	ｍＶ
④	＋入力端子の電圧は、	ｍＶ
⑤	負帰還が掛かっているから、－入力端子の電圧は、	ｍＶ
⑥	Ｒ２に流れる最大入力バイアス電流は、	ｎＡ
⑦	入力バイアス電流によってＲ２に発生する電圧は、	ｍＶ
⑧	出力電圧は、	Ｖ

1.6. 答

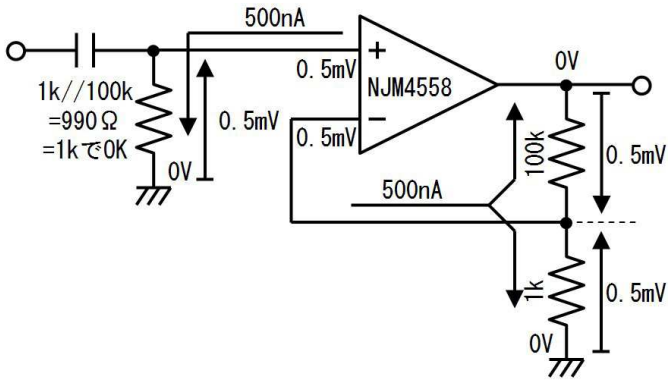


番号	質問	値
①	入力コンデンサを通して流れ込んでくる直流電流は、	０Ａ
②	ＮＪＭ４５５８の最大入力バイアス電流は、	５００ｎＡ
③	入力バイアス電流によってＲ１に発生する電圧は、	５０ｍＶ
④	＋入力端子の電圧は、	５０ｍＶ
⑤	負帰還が掛かっているから、－入力端子の電圧は、	５０ｍＶ
⑥	Ｒ２に流れる最大入力バイアス電流は、	５００ｎＡ
⑦	入力バイアス電流によってＲ２に発生する電圧は、	５０ｍＶ
⑧	出力電圧は、	０Ｖ

入力バイアス電流は同じ品種でも個体毎に異なりますし、温度でも変化します。しかし、＋入力と－入力のバイアス電流はほぼ同じであるため、上図の回路で影響を打ち消すことができます。

帰還抵抗（上図のＲ２）の値が大きく、入力バイアス電流がＲ２に流れて発生する電圧が、正常な回路の動作（どこまでが正常かは、回路の用途で決まります）を狂わせる場合は、上図Ｒ１のような対策を施します。ただし、ＣＭＯＳオペアンプのような入力バイアス電流の小さなオペアンプでは、Ｒ１は不要です。

非反転増幅回路の場合も、下図のように入力バイアス電流で発生する電圧を＋入力と－入力で等しくすることで、影響を相殺できます。



２．入力バイアス電流の小さなオペアンプ

ＣＭＯＳオペアンプでは、入力バイアス電流は「本当に無い」と言える程小さくなり、高い抵抗値の回路を使用しても（バイアス電流の）影響が出なくなります。

下表にＣＭＯＳオペアンプ、ＮＪＭ７０４４のデータシートの一部を示します。表の３行目に「入力バイアス電流」の値が記載されています。

NJU7044

■ 電気的特性

●ＤＣ特性 (V_{DD}=5V, Ta=25°C)

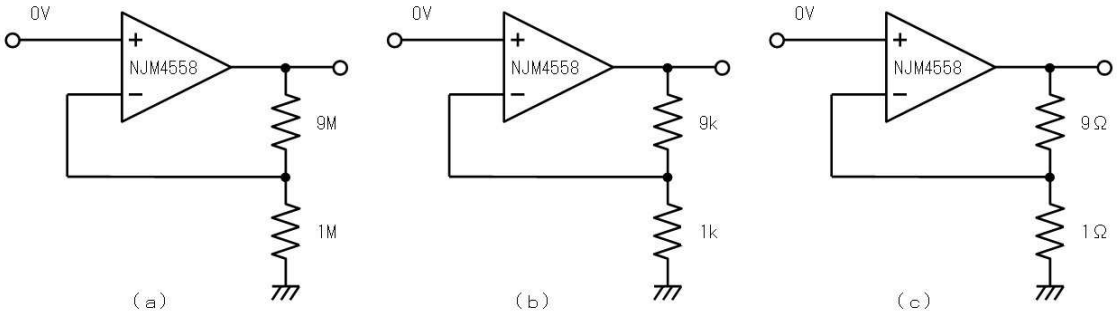
項目	記号	条件	最小	標準	最大	単位
消費電流	I_{DD}	無信号時	-	1.8	2.8	mA
入力オフセット電圧	V_{IO}		-	-	10	mV
入力バイアス電流	I_B		-	1	-	pA
入力オフセット電流	I_{IO}		-	1	-	pA
電圧利得	A_V	R_L=10kΩ to 2.5V, Vo=2.5V±2.4V	70	90	-	dB
同相信号除去比	CMR	CMR+: 2.5V ≤ V_{CM} ≤ 5V CMR-: 0V ≤ V_{CM} ≤ 2.5V （注 6）	44	60	-	dB
電源電圧除去比	SVR	4.0V ≤ V_{DD} ≤ 5.5V, V_{CM}=V_{DD}/2	55	85	-	dB
最大出力電圧 1	V_{OH}1	R_L=10kΩ to 2.5V	4.95	-	-	V
	V_{OL}1	R_L=10kΩ to 2.5V	-	-	0.05	V
最大出力電圧 2	V_{OH}2	R_L=600Ω to 2.5V	4.88	-	-	V
	V_{OL}2	R_L=600Ω to 2.5V	-	-	0.12	V
出力流出電流	I_{SOURCE}	V_O=3.5V (注 7)	50	-	-	mA
出力流入電流	I_{SINK}	V_O=1.5V (注 7)	50	-	-	mA
同相入力電圧範囲	V_{ICM}	CMR ≥ 44dB	0	-	5	V

入力バイアス電流は１ｐＡと非常に小さくなっています。１ｐＡであれば、１０ＭΩの抵抗に流れても、１０μＶの電圧しか生じません。入力バイアス電流の影響を「無い」と考えて設計できます。（さらにＬＭＣ６６０では３ｆＡまで小さくなっています）

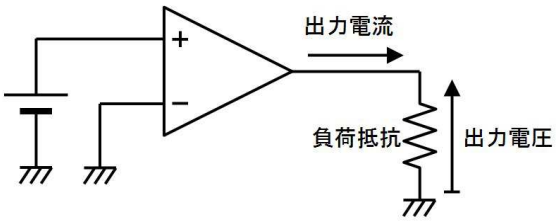
但し高抵抗の回路は、別途説明する「熱雑音」や「ストレイ容量」の影響により、雑音が増え、高い周波数が増幅できなくなるため、回路の目的を考えて、問題の無い範囲で高抵抗を使用します。

３．最大出力電流

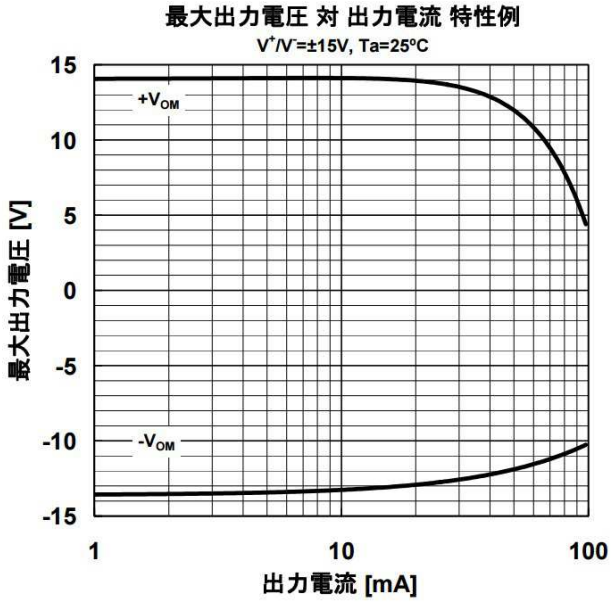
入力バイアス電流の項で、下図（ｃ）の回路は出力電流が大きくなりすぎて使えない事に触れました。ここではこのように、オペアンプが出力できる最大の電流について説明します。



さて、下図のようにオペアンプの出力を振り切らせ、出力に接続した抵抗の値を小さくすると、オペアンプから出力される電流が増加します。



下図はＮＪＭ４５８０を±１５Ｖの２電源で使用した場合の、最高／最低出力電圧と出力電流のグラフです。プラス側に注目すると、電流が１ｍＡの場合は１４Ｖ程度の電圧が出せますが、４０ｍＡでは１３Ｖ、９０ｍＡでは６Ｖしか出力できないことが分ります。

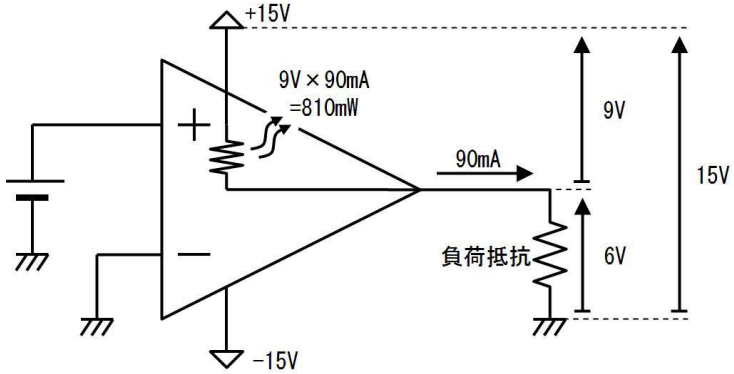


この状況を整理した下表に示します。つまり、オペアンプには電流を流す能力に限界があり、無理に出力電流を増やそうとすると、オペアンプが負けて、出力電圧が下がってしまいます。

下表から一見、最高出力電圧さえ我慢すれば、より大きな出力電流を流すことができるようにも思えます。ところが、オペアンプが過熱するため、そのような使い方には注意が必要です。

出力電流	最高出力電圧	負荷抵抗	消費電力
１ｍＡ	１４Ｖ	１４Ｖ÷１ｍＡ＝１４ｋΩ	１Ｖ×１ｍＡ＝１ｍＷ
４０ｍＡ	１３Ｖ	１３Ｖ÷４０ｍＡ＝３３０Ω	２Ｖ×４０ｍＡ＝８０ｍＷ
９０ｍＡ	６Ｖ	６Ｖ÷９０ｍＡ＝６６Ω	９Ｖ×９０ｍＡ＝８１０ｍＷ

なぜなら例えば、９０ｍＡの出力電流を取り出しているとき、下図に示すように、オペアンプ内部の素子は抵抗として働いています。そして、この抵抗で消費する電力でオペアンプが発熱します。下図の例では、６Ｖを出力しているとき、内部の抵抗（素子）には９Ｖの電圧が加わり、９０ｍＡの電流が流れているため、８１０ｍＷの電力が消費されています。このような、出力電流毎の消費電力を上表の「消費電力」の列に示します。



オペアンプは消費電力が大きくなると次第に激しく発熱し、ついには熱で壊れてしまいます。下図はＮＪＭ４５８０の絶対最大定格です。

NJM4580

■ **絶対最大定格** (Ta=25°C)

項目	記号	定格	単位
電源電圧	V^+/V^-	±18	V
同相入力電圧	V_{ICM}	±15 (注 1)	V
差動入力電圧	V_{ID}	±30 (注 1)	V
消費電力	P_D	DIP8, SIP8 : 800 DMP8, EMP8 : 300 SSOP8 : 250 VSP8 : 400 (注 2)	mW
動作温度	Topr	-40~+85	°C
保存温度	Tstg	-40~+125	°C

(注 1) 電源電圧が±15V 以下の場合は、電源電圧と等しくなります。
(注 2) 消費電力は EIA/JEDEC 仕様基板(114.3×76.2×1.57mm、2 層、FR-4)実装時

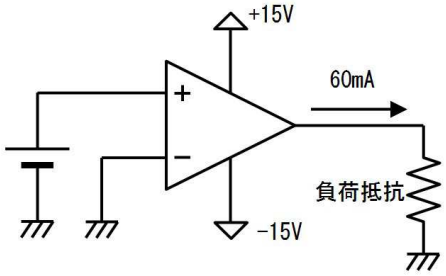
上表によれば、ＤＩＰ８形パッケージの場合、８００mWの電力を一瞬でも消費させると「いつ壊れても知らん」と記載されています。

従って、既に述べた９０mA出力電流を取り出した場合の８１０mWの消費電力は、絶対最大定格を超えているため一瞬たりとも許されません。つまり、９０mAの出力電流は、「流す能力はあるが、流すと壊れる」事が分ります。

このように、オペアンプの最大出力電流は、データシートに記載された「最大出力電流」の値が限界ではありますが、（オペアンプが過熱して壊れないように）消費電力が定格を十分下回ることも確認して利用します。また、１つのパッケージに複数のオペアンプが入っている場合、全てのオペアンプの消費電力の合計が定格を十分下回るように検討します。

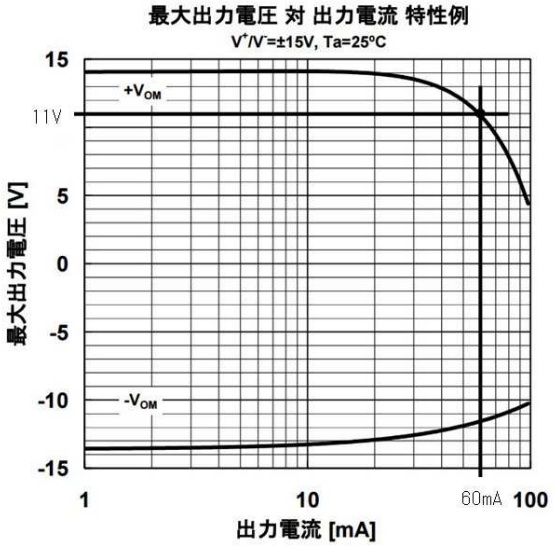
3.1. 練習

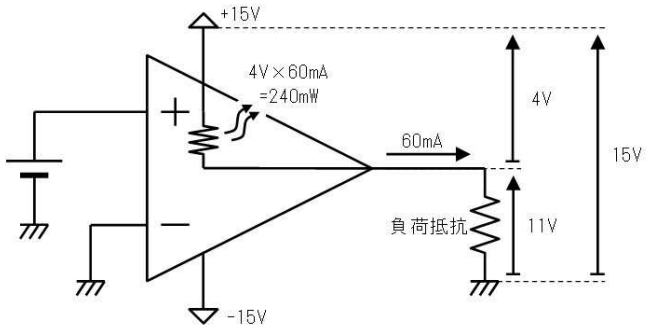
下図のように、ＮＪＭ４５８０を±１５Ｖ電源で使用し、出力を＋側に振り切らせて、６０mAの電流を取り出ししました。既出のグラフを利用して、出力電圧を求め、消費電力を計算してください。



出力電圧＿＿＿＿Ｖ　消費電力＿＿＿＿mW

3.2. 答





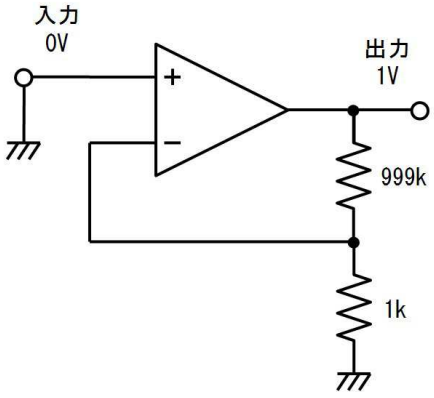
出力電圧 １１ V　消費電力 ２４０ mW

上記のグラフから、６０ｍＡ時の＋側出力電圧を読み取ると１１Ｖ。オペアンプの内部素子には４Ｖの電圧が加わっており、６０ｍＡの電流が流れているから、２４０mWの電力が消費されている。

４. 入力オフセット電圧

下図の回路は、理想オペアンプであれば、正確に０Ｖを出力する筈です。ところが下図では、１Ｖが出力されています。

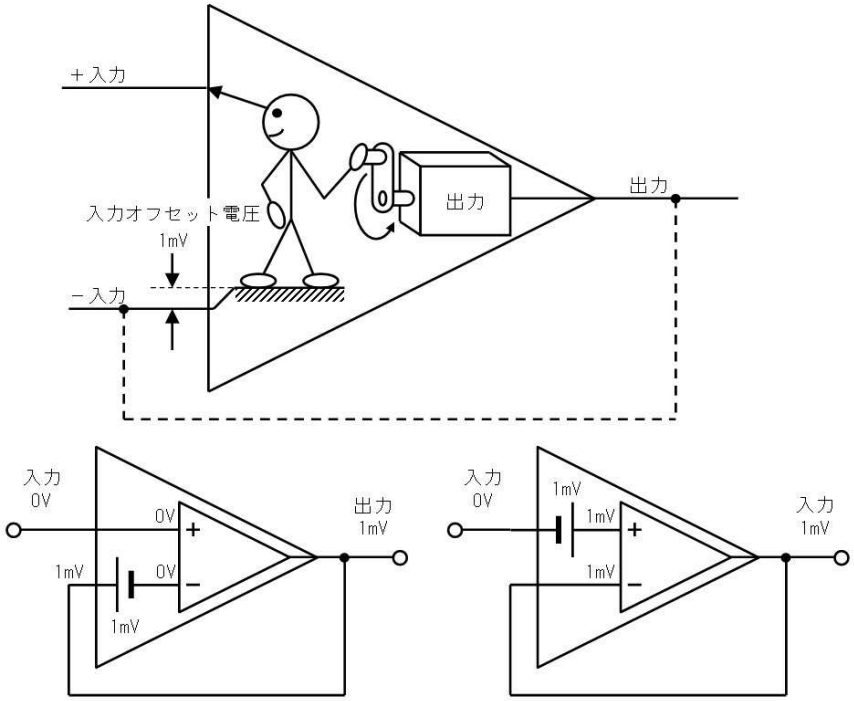
電圧増幅率１０００倍の回路



この回路ではオペアンプの「理想的でない」部分の中で「入力オフセット電圧」（以下、オフセット）が問題になります。

さて、オペアンプの重要な性質①に「負帰還の回路では、＋入力と－入力の電圧は同じ」がありました。ところが実際には、＋入力と－入力の間に僅かな電圧の差が生じます。この電圧がオフセットです。

オフセットは、下図に示すように、中の人が立つ床に生じた「段差」のようなものです。中の人は床の高さを＋入力にぴったりあわせたつもりでも、外から見ると、－入力と＋入力の間には差が生じてしまいます。



回路図では、オフセットを上図下側のように、入力端子に挿入された電池で表すことができます。電池は－入力に挿入しても、＋入力に挿入してもかまいません。また電池の極性も、どちら向きでも構いません。

上図では１ｍＶの電池が挿入された（１ｍＶのオフセットがあった）ために、本来０Ｖとなる増幅器の出力がに１ｍＶが出力されています。

５．入力オフセット電圧の特徴

さて、オフセットには、個体差がある、温度で変化する、という２つの特徴があります。

下表は「ＮＪＭＯＰＡ２７７」（特にオフセットを小さくした品種です／ＯＰＡ２７７のセカンドソース（そっくりさん））のオフセット電圧です。（Ｆグレード品の）標準値で１０μＶと小さく抑えられているのが分ります。

JRC　**NJMOP277 / NJMOP2277**

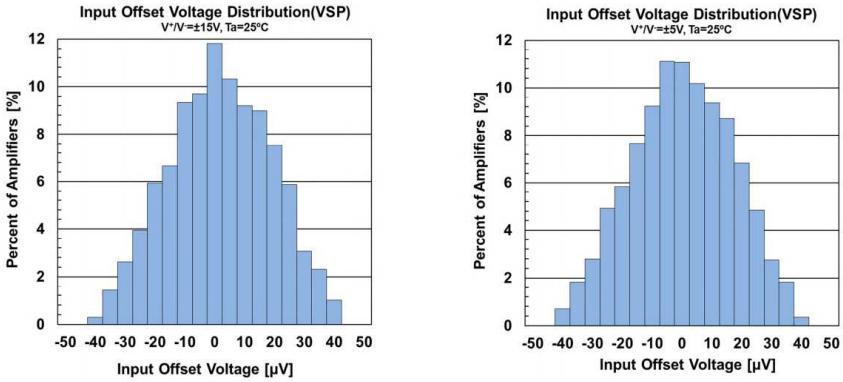
■電気的特性

（指定なき場合には $V^+ / V^- = \pm5V$ to $\pm15V$, Ta=25ºC, V_{COM}=0V）

項目	記号		条件	最小	標準	最大	単位
入力特性							
入力オフセット電圧	V_{IO}	F-Grade	V_{COM}=0V、Rs=50Ω	-	10	20	μV
			Ta = -40ºC to 125ºC	-	-	50	μV
		G-Grade	V_{COM}=0V、Rs=50Ω	-	20	50	μV
			Ta = -40ºC to 125ºC	-	-	100	μV
入力オフセット電圧温度ドリフト	$\Delta V_{IO}/\Delta T$	F-Grade	V_{COM}=0V、Rs=50Ω、Ta = -40ºC to 125ºC	-	0.1	0.15	μV/ºC
		G-Grade		-	0.1	0.6	μV/ºC

下図は同オペアンプのオフセット電圧の個体差です。同図のグラフを見るとオフセット電圧は個体毎に－４０μＶ～＋４０μＶの範囲で様々に異なることが分ります。

■特性例



つまり、標準のオフセット電圧が１０μＶしかない（Ｆグレードの）ＮＪＭＯＰＡ２７７を購入しても、運が悪いとオフセットが４０μＶ発生する場合もあることが分ります。（逆に運が良ければ、殆どゼロという場合もあります）もちろん不良品ではありません。これがオフセット電圧の個体差です。

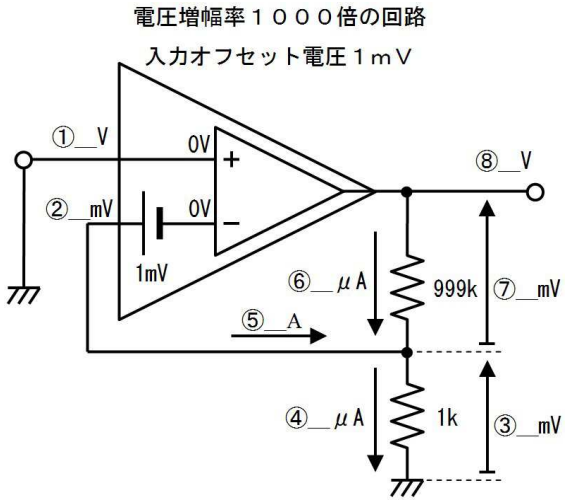
また最初の表には、入力オフセット電圧温度ドリフト（以下、温度ドリフト）も示されています。温度ドリフトとは、温度によるオフセットの変化です。

同表によれば、（Ｆグレード品で）温度が１℃変化すると、最大で入力オフセットが０．１５μＶ変化することがわかります。たとえば、温度が４０℃変化すると、最悪で６μＶ程度のオフセット電圧の変化があります。

６．入力オフセット電圧の影響と対策

このように、オフセットは小さな値ですが、下図のように大きな増幅率を持つ回路では、オフセットも増幅されるため、影響が大きくなります。下図は１０００倍の増幅器を、オフセット１ｍＶのオペアンプで作った例です。

６.１．練習（オフセットの影響）

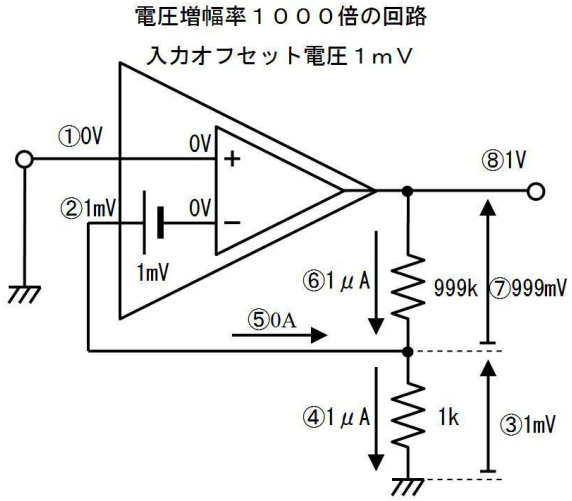


上図の回路について、オフセット電圧の影響を調べます。下表に書きながら、０Ｖを入力した場合の出力電圧を考えてください。

番号	質問	値

①	入力電圧は、	０Ｖ
②	負帰還の回路だから、＋入力と－入力の電圧は同じになる筈だが、１ｍＶのオフセットがあるため、マイナス入力端子の電圧は、	ｍＶ
③	１ｋΩの両端電圧は、	ｍＶ
④	１ｋΩに流れる電流は、	μＡ
⑤	オペアンプの入力端子に流れる電流は、 （ここでは入力バイアス電流を無視して）	Ａ
⑥	９９９ｋに流れる電流は、	μＡ
⑦	９９９ｋに発生する電圧は、	ｍＶ
⑧	出力電圧は、	Ｖ

6.2. 答



番号	質問	値
①	入力電圧は、	０Ｖ
②	負帰還の回路だから、＋入力と－入力の電圧は同じになる筈だが、１ｍＶのオフセットがあるため、マイナス入力端子の電圧は、	１ｍＶ
③	１ｋΩの両端電圧は、	１ｍＶ
④	１ｋΩに流れる電流は、	１μＡ
⑤	オペアンプの入力端子に流れる電流は、 （ここでは入力バイアス電流を無視して）	０Ａ
⑥	９９９ｋに流れる電流は、	１μＡ
⑦	９９９ｋに発生する電圧は、	９９９ｍＶ

⑧	出力電圧は、	１Ｖ

このように、高い精度が必要な回路や、高倍率の増幅器、小さな電圧を扱う回路等では、オフセットの影響が大きく現れるので、対策が必要になります。

オフセット対策には次表に示すように「回路で対策する」と「オペアンプで対策する」の２タイプがあります。最近は、オフセットの小さなオペアンプも妥当な価格で手に入るので「オペアンプで対策する」が主流です。

方法	回路で対策する	オペアンプで対策する
概要	オフセット電圧を調節する回路を追加する。	オフセット電圧の小さなオペアンプを利用する。
費用	調節回路の費用が必要	割高なオペアンプが必要
手間	調整が必要	調整は不要

既に説明したように、オフセットは同じ品種でも個体差で大きく異なります。このため、回路で対策する場合は、あらかじめ値を見越して（決め打ちで）対策しておくことはできず、半固定抵抗を用いて、個別に調整する必要があります。

７. 入力オフセット電圧温度ドリフト

オフセット電圧を、回路で対策して調整しても、温度が変化すると温度ドリフトが発生して、調整がズレてしまい、オフセットの影響が再発します。特に装置の電源を投入した後は、最初は室温であった素子が、流れる電流によって温まるので、温度ドリフトが目立ちます。

温度ドリフトの対策は「温度ドリフトの小さなオペアンプを選ぶ」ことで行います。

過去には温度ドリフトの影響を打ち消す回路を設けたり、オペアンプを一定の温度に保つ「ＩＣオーブン」を使用したりしましたが、温度ドリフトの小さなオペアンプが妥当な価格になったため、あまり利用されません。

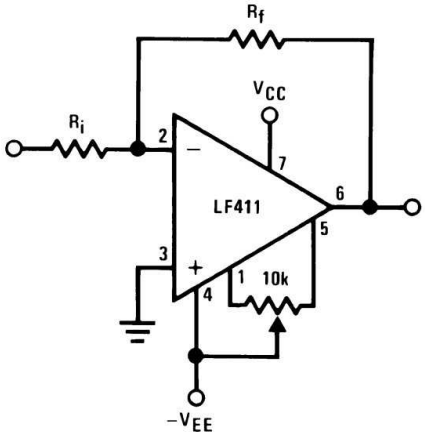
８. 回路によるオフセット対策

オフセットと温度ドリフトの少ないオペアンプを選ぶことで、オフセットの影響を無くすのが、現在は一般的です。しかし、電子工作では「手持ちの部品で試してみたい」「とりあえず動くかチェックしたい」という場合も多く、外付けの回路でオフセットを調整する方法を説明します。

９. オフセット調整端子のある場合

オペアンプは１つのパッケージに、１つ入り、２つ入り、４つ入り、と複数内蔵したものが作られています。１つ入りのオペアンプの中には「オフセット調整（オフセットヌル）端子」を備えているものがあります。

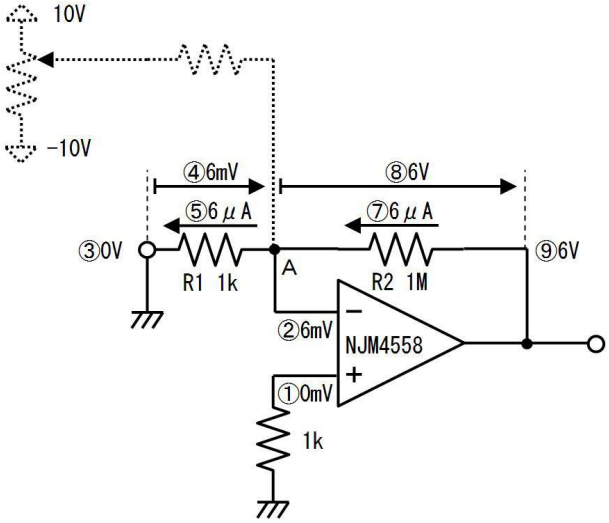
下図はＬＦ４１１のピン接続図の例で、１番ピンと５番ピンが「オフセット調整端子」です。調整を行わない場合は、なにも接続せず、行うときはデータシートの指示にしたがって半固定抵抗等を接続します。



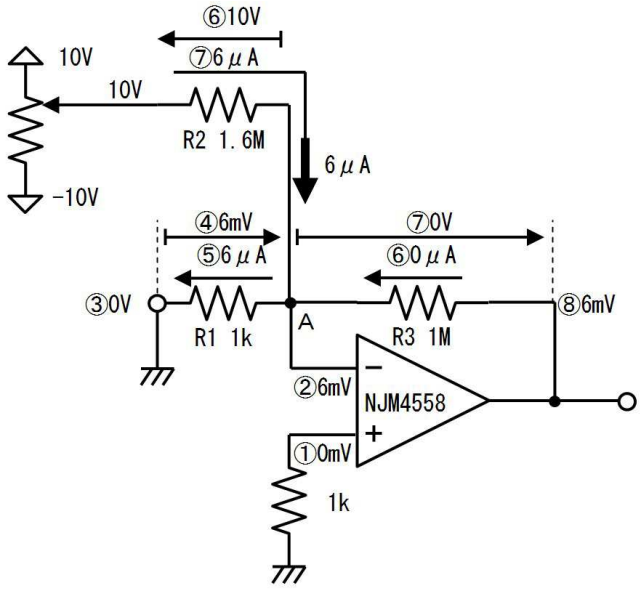
オフセットの少ないオペアンプの充実、部品点数の削減、調整コストの低減等の理由で、オフセット調整端子のあるオペアンプは減っていますし、利用の機会も少なくなっています。

１０. 外付け回路による場合

下図に点線で示す回路が、オフセット調整回路です。点線の回路が動作していない場合、０Ｖを入力しても、６ｍＶのオフセットが１０００倍に増幅されて、６Ｖが出力されます。



そこで、下図に、オフセット対策回路を動作させた状態を示します。

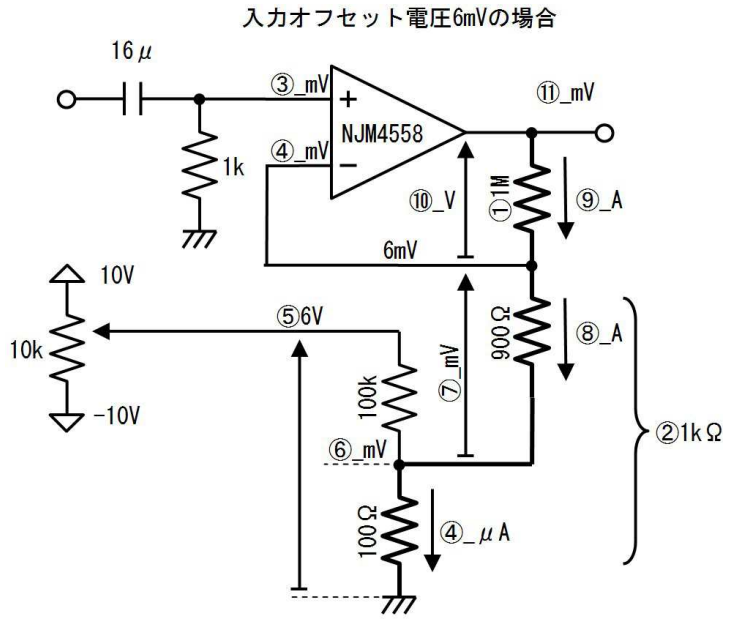


６ｍＶのオフセットが原因となり、Ｒ１は上図Ａ点から、６μアンペアの電流を吸い込みます。そこで、Ｒ２からＡ点に向かって、同じ６μＡを流し込むことで、Ｒ３に流れる電流をゼロに調整できます。（キルヒ電流則をＡ点に使います）

また、非反転増幅回路の場合は、下図の方法でオフセットを調整します。

１０.１. 練習

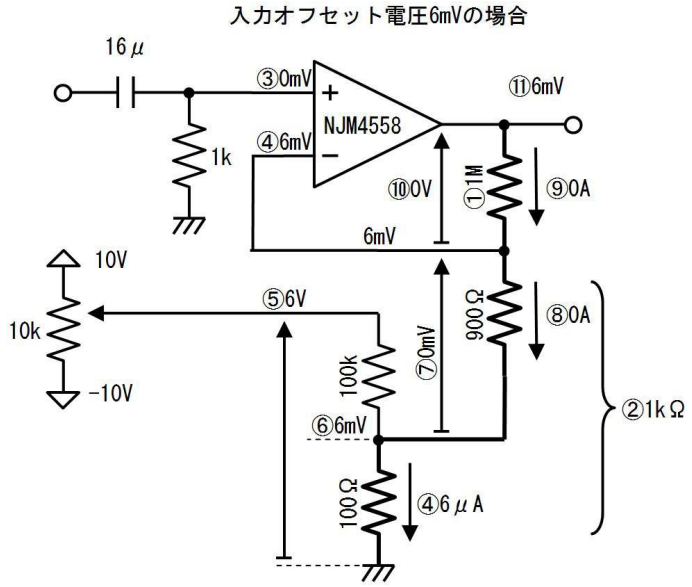
下図を見ながら下表に書き込み、オフセット調整の方法を考えます。



番号	質問	値
①②	帰還抵抗の分圧比は①と②より、	約１０００分の１
	このため上図の回路の増幅率は、	約１０００倍
③	＋入力端子は１ｋΩで接地されているので、 入力バイアス電流の影響を考えなければ、	ｍＶ

④	負帰還の回路だから＋入力と－入力は同じ電圧になる筈だが、６ｍＶのオフセットがあるとして、－入力端子の電圧は（＋の電圧が現れたとすると）	ｍＶ
⑤	半固定抵抗から取り出した電圧は、	６Ｖ
⑥	上の⑤の電圧が１００ｋと１００Ωで分圧されて、１００Ωの上側の電圧は、	約　　ｍＶ
⑦	９００Ωの両端電圧は、	Ｖ
⑧	９００Ωに流れる電流は、	ｍＡ
⑨	１ＭΩに流れる電流は、	ｍＡ
⑩	１ＭΩの両端電圧は、	Ｖ
⑪	出力電圧は、	ｍＶ

１０.２. 答



番号	質問	値
①②	帰還抵抗の分圧比は①と②より、	約１０００分の１
	このため上図の回路の増幅率は、	約１０００倍
③	＋入力端子は１ｋΩで接地されているので、 入力バイアス電流の影響を考えなければ、	０ｍＶ
④	負帰還の回路だから＋入力と－入力は同じ電圧になる筈だが、６ｍＶのオフセットがあるとして、－入力端子の電圧は（＋の電圧が現れたとすると）	６ｍＶ
⑤	半固定抵抗から取り出した電圧は、	６Ｖ
⑥	上の電圧が１００ｋと１００Ωで分圧されて、１０	約６ｍＶ

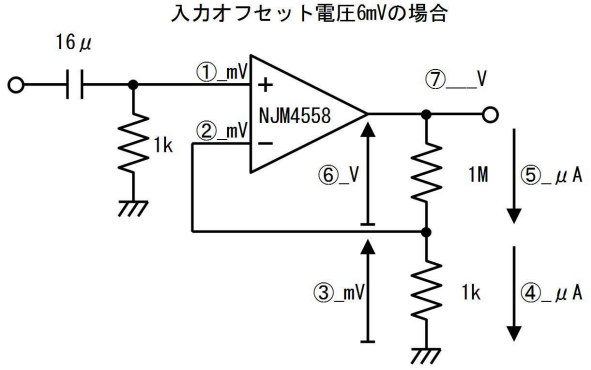
	０Ωの上側の電圧は、	
⑦	９００Ωの両端電圧は、	０Ｖ
⑧	９００Ωに流れる電流は、	０ｍＡ
⑨	１ＭΩに流れる電流は、	０ｍＡ
⑩	１ＭΩの両端電圧は、	０Ｖ
⑪	出力電圧は、	６ｍＶ

１１．交流増幅回路のオフセット対策

オフセットの大きなオペアンプでも、交流増幅回路であれば、無調整でオフセットの影響を抑えることができます。下図は、対策を行っていない交流増幅回路です。

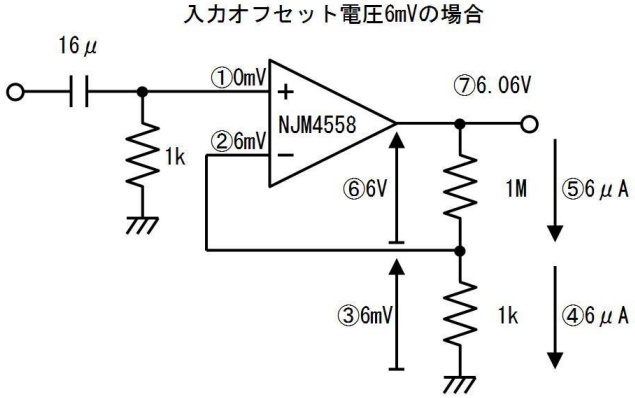
１１.１．練習

下図の回路の動作を、下表に記入しながら考え、出力オフセット電圧を求めて下さい。



番号	質問	値
①	＋入力電圧は、１ｋΩを通じてアースされているから、	Ｖ
②	本来負帰還回路では＋入力と－入力の電圧は等しいが、 このオペアンプの最大オフセット電圧は６ｍＶだから、 仮に－入力に正のオフセット電圧が現れるとすれば、	ｍＶ
③	１ＭΩの下側にある、１ｋΩの両端電圧は、	ｍＶ
④	この１ｋΩに流れる電流は、	μＡ
⑤	入力バイアス電流を無視すれば、１ＭΩに流れる電流は、	μＡ
⑥	１ＭΩの両端電圧は、	Ｖ
⑦	出力電圧は、	Ｖ

１１.２. 答



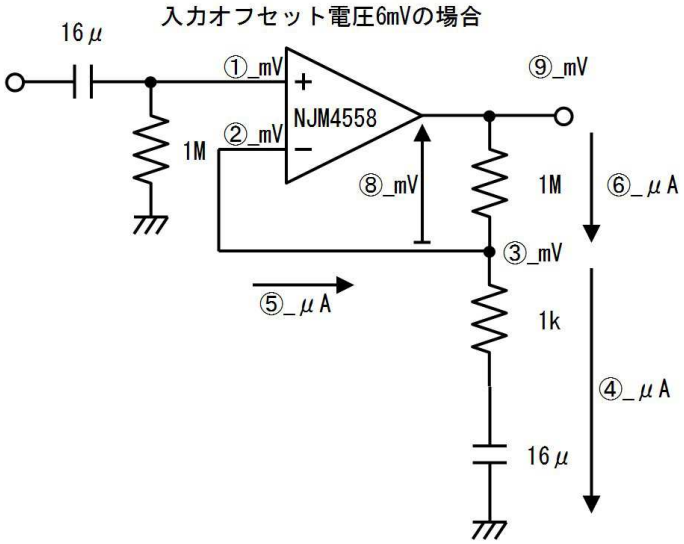
番号	質問	値
①	＋入力電圧は、１ｋΩを通じてアースされているから、	０Ｖ
②	本来負帰還回路では＋入力と－入力の電圧は等しいが、 このオペアンプの最大オフセット電圧は６ｍＶだから、 仮に－入力に正のオフセット電圧が現れるとすれば、	６ｍＶ
③	１ＭΩの下側にある、１ｋΩの両端電圧は、	６ｍＶ
④	この１ｋΩに流れる電流は、	６μＡ
⑤	入力バイアス電流を無視すれば、１ＭΩに流れる電流は、	６μＡ
⑥	１ＭΩの両端電圧は、	６Ｖ
⑦	出力電圧は、	６．００６Ｖ

となり、オフセットが約１０００倍に拡大されて、６Ｖとなって出力にあらわれました。

交流回路の場合「直流は増幅しなくて良い」という抜け道がありますから、下図のような回路を用いて、交流では１０００倍、直流では１倍、という具合に、直流の増幅率だけを下げることで、出力電圧のオフセットを小さくします。

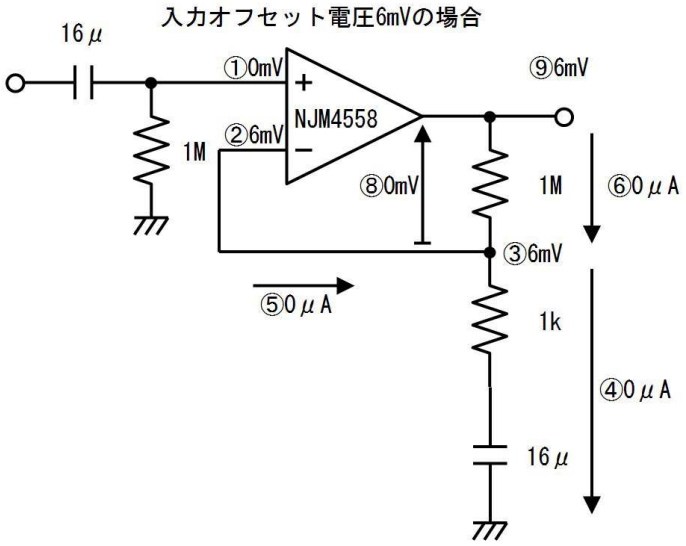
１１.３. 練習

では、下図を見ながら、下表に書き込んで、回路の動作を考えます。



番号	質問	値
①	＋入力電圧は、１ＭΩを通じてアースされているから、	Ｖ
②	本来負帰還回路では＋入力と－入力の電圧は等しいが、 このオペアンプの最大オフセット電圧は６ｍＶだから、 仮に－入力に正のオフセット電圧が現れるとすれば、	ｍＶ
③	１ＭΩの下側にある、１ｋΩと１６μＦの直列回路に加わる電圧は、	ｍＶ
④	コンデンサは直流を通さないから、１ｋと１６μの直列回路に流れる電流は、	μＡ
⑤	入力バイアス電流を無視すれば、－入力から流れる電流は、	μＡ
⑥	１ＭΩに流れる電流は、	μＡ
⑥	１ＭΩの両端電圧は、	Ｖ
⑦	出力電圧は、	ｍＶ

１１.４. 答



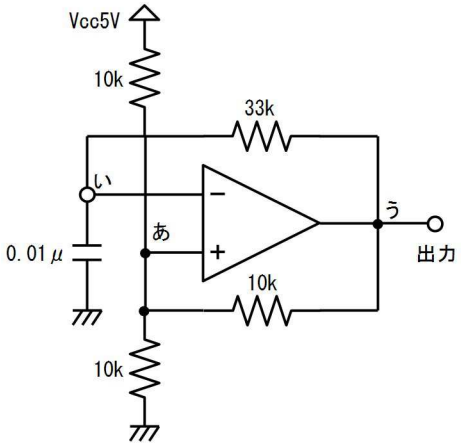
番号	質問	値
①	＋入力電圧は、１MΩを通じてアースされているから、	０V
②	本来負帰還回路では＋入力と－入力の電圧は等しいが、このオペアンプの最大オフセット電圧は６mVだから、仮に－入力に正のオフセット電圧が現れるとすれば、	６mV
③	１MΩの下側にある、１ｋΩと１６μＦの直列回路に加わる電圧は、	６mV
④	コンデンサは直流を通さないから、１ｋと１６μの直列回路に流れる電流は、	０μA
⑤	入力バイアス電流を無視すれば、－入力から流れる電流は、	０μA
⑥	１MΩに流れる電流は、	０μA
⑥	１MΩの両端電圧は、	０V
⑦	出力電圧は、	６mV

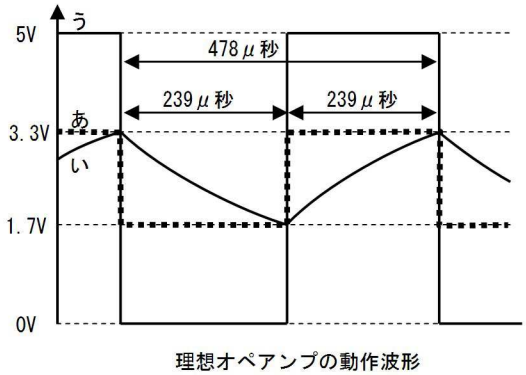
このように、帰還回路にコンデンサを使うことで、直流の増幅率を１に下げ、オフセット電圧も１倍でしか出力に影響しないように改善できます。この増幅器は１／（２π×１ｋ×１６μＦ）以下の周波数では僧服率が下がって行きます。

１２. 最高／最低出力電圧

オペアンプの重要な性質に、②＋入力 ＞ －入力なら、出力は＋電源まで振り切る、また、③＋入力 ＜ －入力なら、出力は－電源まで振り切る、というのがありました。

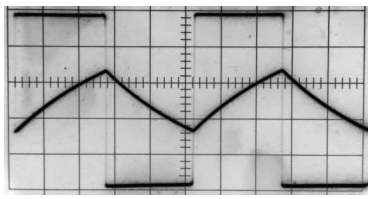
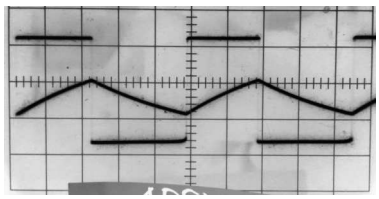
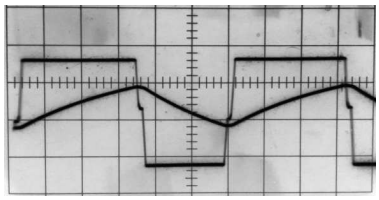
下図左は無安定マルチバイブレータの回路、右は理想オペアンプの動作波形です。





理想オペアンプの動作波形

ところが、実際に上図の回路を作って動作させると、下図に示すとおり、オペアンプの品種によって波形が異なります。同図では、「い」のコンデンサの電圧波形と、「う」の出力波形を表示しています。

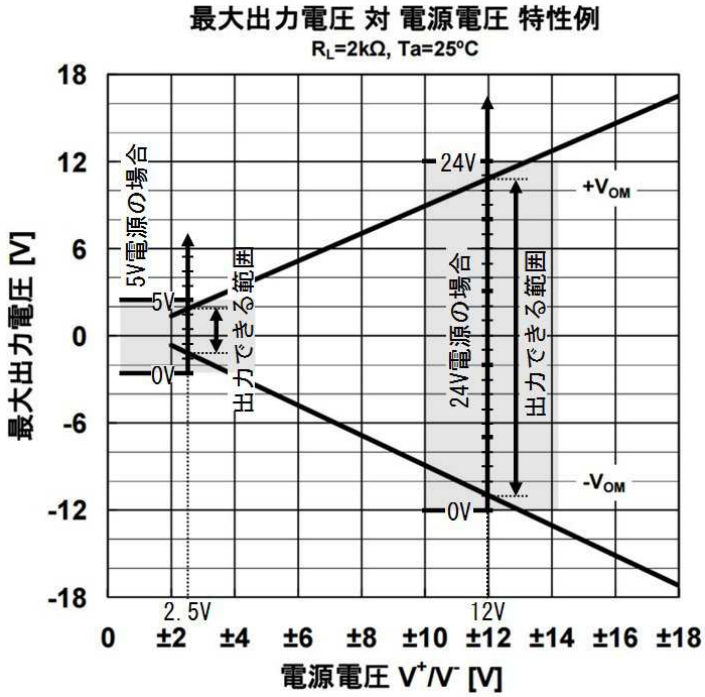
①レイル・トゥ・レイルタイプ	②汎用タイプ	③汎用単電源タイプ
		
ＬＭＣ６４８２	ＮＪＭ４５８０	ＬＭ３５８

「う」の出力波形に注目すると、①のレイルトゥレイルタイプではほぼ理想通りに０Ｖ～５Ｖまで振れていますが、汎用タイプでは１．３～４．２Ｖ程度、汎用単電源タイプでは０．７～３．６Ｖ程度しか振れていません。

このようにオペアンプは品種や条件によって、出力できる最高の電圧と最低の電圧が制限されます。この電圧を、最高出力電圧（V_{OH}）、最低出力電圧（V_{OL}）と呼んでいます。（この２つを総じて、最大出力電圧と呼ぶこともあります）

出力電圧は電源電圧を越えることはできませんから、最高／最低出力電圧は、下図に示すように、電源電圧で決まります。（その他、温度や出力する電流によって多少変化します）

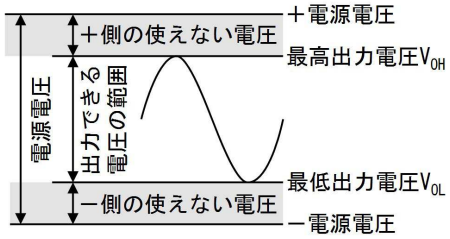
下図はＮＪＭ４５８０の電源電圧と最高／最低出力電圧の関係です。±電源を使用した場合のグラフですから、たとえば５Ｖ単一電源の場合±２．５Ｖと考えてグラフを使います。



目盛りが荒くて見難いですが、上図左側に灰色で示す電源電圧５Ｖ単一（上のグラフでは±２．５Ｖに相当）の部分では、最高／最低出力電圧は１．３～４．２Ｖ程度で、その差（出力できる振幅）は２．７Ｖと辛うじて読むことができます。電源電圧が５Ｖで出力振幅が２．７Ｖですから、電源電圧の５８％程度の振幅しか取れない事が分ります。

逆に、上図右側に灰色で示す電源電圧２４Ｖ単一（上のグラフでは±１２Ｖに相当）の部分では、最高／最低出力電圧は、１．２～２２．８Ｖ程度で、その差は２１．６Ｖあり、電源電圧の９０％程度の振幅が取れる事がわかります。

つまり、電源電圧が高いと、利用できる割合が大きくなります。この現象は下図に示すように、オペアンプの品種毎に「＋側の使えない電圧」と「－側の使えない電圧」があり、これらは、電源電圧や負荷で多少は変化するけれども、だいたい一定と考えると分り易いです。



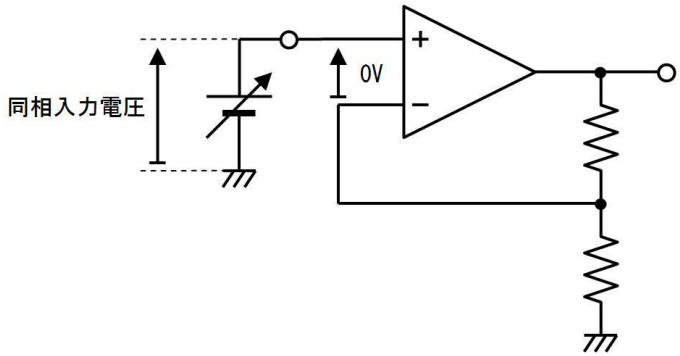
さて再度この項の最初に示した３枚の写真に戻ると、最高／最低出力電圧の影響で、上のスレッショルドや下のスレッショルドも変化し、その結果、発振周期にも影響していることが分ります。

ですから、正確な動作を計算するときには「②＋入力 ＞ －入力なら、出力は最高出力電圧まで振り切る、また、③＋入力 ＜ －入力なら、出力は最低出力電圧まで振り切る」と考えます。

１３. 同相入力電圧範囲

出力できる電圧に範囲があるように、入力できる電圧にも範囲があります。入力できる電圧の制限には２種類あります。同相入力電圧範囲と差動入力電圧範囲です。さらに、入力しても壊れない範囲（絶対最大定格）と正常に動作する範囲（電気的特性）があります。

下図のような負帰還の回路が正常に動作しているとき、＋入力端子と－入力端子は同じ電圧になります。このような状態で入力に加える電圧が、同相入力電圧です。



つまり、負帰還の掛かった回路のように、＋入力と－入力が同じ電圧の場合に場合に、入力できる（正しく動作する）入力電圧の範囲が同相入力電圧範囲です。

下表はＮＪＭ２１１４の電気的特性です。±１５Ｖの２電源の場合、表の５行目によれば、最低±１２Ｖつまり、－１２Ｖ～＋１２Ｖの間であれば、正しく動作することが分ります。

NJM2114

■ **電気的特性** (V^+/V^-=± 15V, Ta=25°C)

項目	記号	条件	最小	標準	最大	単位
消費電流	I_{CC}		−	9	16	mA
入力オフセット電圧	V_{IO}		−	0.2	3	mV
入力オフセット電流	I_{IO}		−	0.01	0.3	uA
入力バイアス電流	I_B		−	0.5	1.8	uA
同相入力電圧範囲	V_{ICM}		±12	±13	−	V
同相信号除去比	CMR	V_{ICM}=12V	70	100	−	dB
電源電圧除去比	SVR	V^+/V^-=± 22→± 11V	80	100	−	dB
電圧利得 1	A_{V1}	R_L≧2kΩ, V_O=± 10V	88	110	−	dB
電圧利得 2	A_{V2}	R_L≧600Ω, V_O=± 10V	83	104	−	dB
最大出力電圧 1	V_{OM1}	R_L≧600Ω	±12	+14/−13	−	V
最大出力電圧 2	V_{OM2}	R_L≧600Ω, V^+/V^-=± 18V	±15	+17/−16	−	V
入力抵抗	R_I		−	100	−	kΩ

下表は同じく２１１４の絶対最大定格です。絶対最大定格は「一瞬でも越えたらいつ壊れても知らん、いや、恐らく壊れる」というギリギリ一杯の数値ですから注意が必要です。

下表２行目に示すように、２１１４の同相入力電圧の絶対最大定格は電源電圧です。つまり、±１５Ｖの２電源で使用しているとき、一瞬でも－１５Ｖを下回る、あるいは、一瞬でも＋１５Ｖを越えると「壊れても知らん」と言う訳です。＋５Ｖの単一電源で使用している場合は、＋５Ｖを超えることはもちろん、一瞬でも負の（０Ｖ以下の）入力が加われば「壊れても知らん」と記載されている訳ですから、単一電源での入力には注意が必要な事が分ります。

NJM2114

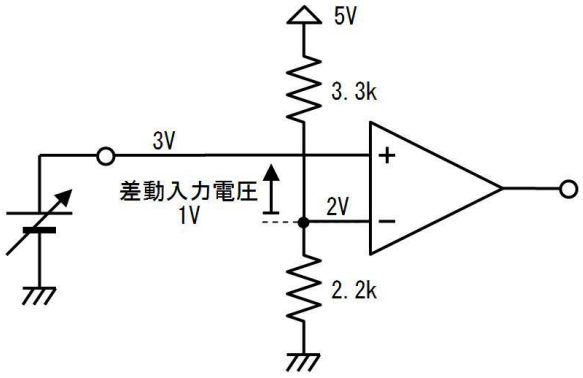
■ **絶対最大定格** (Ta=25°C)

項目	記号	定格	単位
電源電圧	V^+/V^-	±22	V
同相入力電圧	V_{IC}	V^+/V^-	V
差動入力電圧	V_{ID}	±0.5	V
消費電力	P_D	（D,Lタイプ）800 （Mタイプ）600（注）	mW
動作温度	T_{opr}	−20～+75	°C
保存温度	T_{stg}	−40～+125	°C

（注）セラミック基板（10×20×0.635mm）実装時

１４．差動入力電圧範囲

下図のコンパレータは－入力に２Ｖを加え、スレッショルド電圧２Ｖとしています。コンパレーターの入力として＋入力端子に加えた電圧（３Ｖ）と－入力端子の電圧（２Ｖ）には（負帰還の回路とは異なり）電圧が（１Ｖ）生じています。このように、＋入力と－入力の間に加える電圧が差動入力電圧です。



上表によれば、ＮＪＭ２１１４の差動入力電圧範囲の絶対最大定格は僅か０．５Ｖです。つまりＮＪＭ２１１４は上図の回路では使用できません。（事実上コンパレータには使用できません）これは２１１４が（汎用で無く）低雑音のオーディオ専用オペアンプだからです。

逆に汎用のオペアンプＮＪＭ４５５８では、±１５Ｖ電源で使用したときの差動入力電圧範囲の絶対最大定格は±３０Ｖとなっており、＋入力を＋電源に、－入力を－電源に接続しても（その逆であっても）壊れません。（実際には「今にも壊れそう」「殆ど壊れる」が正解です）

NJM4558

■ **絶対最大定格** (Ta=25°C)

項目	記号	定格	単位
電源電圧	V^+/V^-	±18	V
差動入力電圧	V_{ID}	±30	V
同相入力電圧	V_{IC}	±15 (注)	V
消費電力	P_D	(Dタイプ)500 (Mタイプ)300 (Eタイプ)300 (Vタイプ)250 (Lタイプ)800	mW
動作温度	T_{opr}	-40～+85	°C
保存温度	T_{stg}	-40～+125	°C

(注) 電源電圧が±15V以下の場合は、電源電圧と等しくなります。

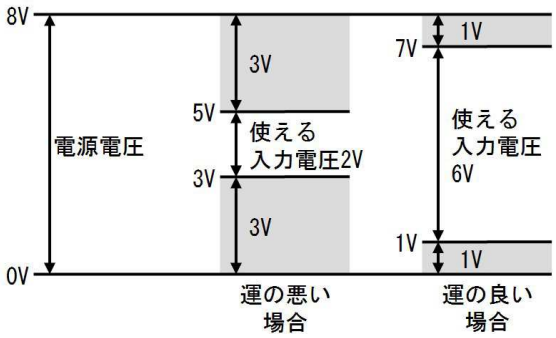
正常に動作するか否かは電気的特性で確認します。下表に示すとおり、４５５８の同相入力電圧範囲は（±１５Ｖの２電源の場合）標準で±１４Ｖ（電源電圧より上下共に１Ｖ小さい範囲）、運が悪いと（最小）±１２Ｖ（電源電圧より上下共に３Ｖ小さい範囲）が動作する範囲です。

NJM4558

■ 電気的特性 (V^+/V^-=± 15V,Ta=25°C)

項目	記号	条件	最小	標準	最大	単位
入力オフセット電圧	V_{IO}	R_S≦10kΩ	-	0.5	6	mV
入力オフセット電流	I_{IO}		-	5	200	nA
入力バイアス電流	I_B		-	25	500	nA
入力抵抗	R_{IN}		0.3	5	-	MΩ
電圧利得	A_V	R_L≧2kΩ,V_O=± 10V	86	100	-	dB
最大出力電圧 1	V_{OM1}	R_L≧10kΩ	± 12	± 14	-	V
最大出力電圧 2	V_{OM2}	R_L≧2kΩ	± 10	± 13	-	V
同相入力電圧範囲	V_{ICM}		± 12	± 14	-	V
同相信号除去比	CMR	R_S≦10kΩ	70	90	-	dB
電源電圧除去比	SVR	R_S≦10kΩ	76.5	90	-	dB
消費電流	I_{CC}		-	3.5	5.7	mA
スルーレート						
NJM4558	SR		-	1	-	V/μs
NJM4559	SR		-	2	-	V/μs
入力換算雑音電圧	V_{NI}	RIAA,R_S=2.2kΩ,30kHz LPF	-	1.4	-	μVrms
利得帯域幅積	GB					
NJM4558				3		MHz
NJM4559				6		MHz

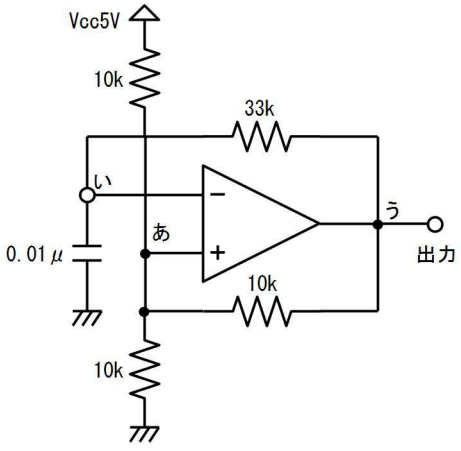
額面どおりに上記の同相入力電圧範囲を受け止めると、下図で示すとおり、例えば４５５８を８Ｖ単一電源で使用した場合、運が良ければ１～７Ｖの６Ｖの入力電圧範囲で動作するものの、運が悪ければ２～５Ｖの２Ｖの入力電圧範囲でしか正常動作しないとわかります。（温度や素子の個体差による）

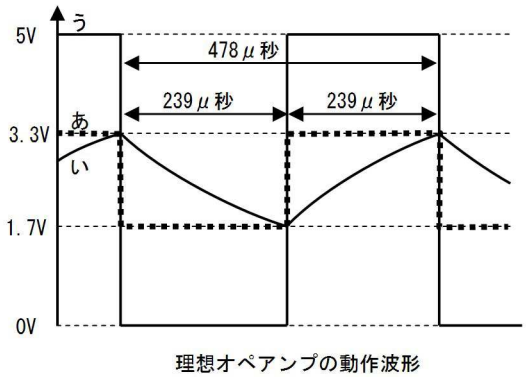


さらに、最初にあげたコンパレータ回路のように、５Ｖ単一電源であれば、運の悪い場合に使える入力電圧の範囲が無くなってしまいますから「４５５８は５Ｖで使えない」となります。（実際には何とか動く場合が大半ですが…）

１５．理想と現実の違い４（スルーレイト）

下図左側の無安定マルチバイブレータを検討したとき、下図右側のグラフのように、オペアンプの出力は「一瞬で反転する」と考えました。



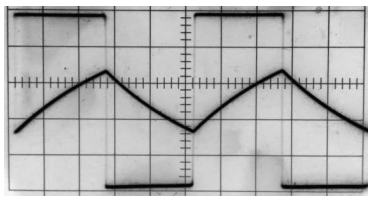
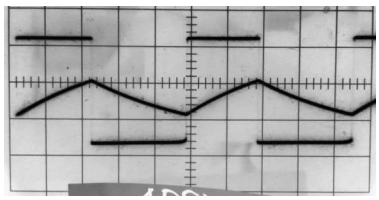
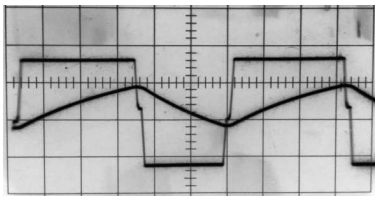
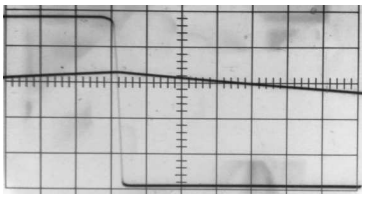
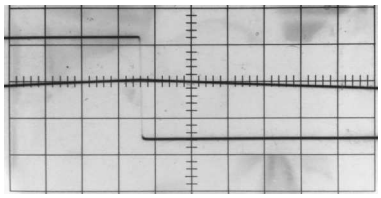
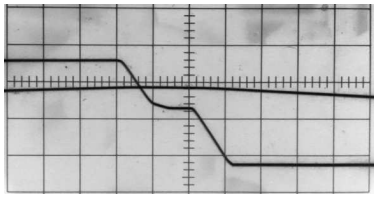


理想オペアンプの動作波形

ところが、実際に上図の回路を作って動作させると、一瞬では反転せず、時間とともに出力が変化し

て行きます。下図上段の写真では分かり難い場合もありますが、下図下段のように、反転する瞬間を時間方向に拡大すると、時間を掛けて反転する様子がはっきり分ります。下図下段では、横１目盛りが１０μ秒です。

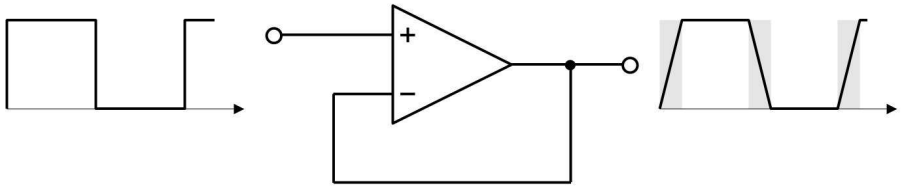
反転に要する時間は、①は４μ秒程度、②はかなり早くて１μ秒以下、③は３０μ秒程度要する上、途中で一回休憩しています。

①レイルトゥレイルタイプ	②汎用タイプ	③汎用単電源タイプ
		
		
ＬＭＣ６４８２	ＮＪＭ４５８０	ＬＭ３５８

このように「出力が反転する早さ」を「１μ秒に何Ｖ変化できるか」という尺度で表したのが、スルーレート（ＳＲ）と呼ぶ値です。（この回路の反転時間は、正確なスルーレートではなく、ゲインバインドウィズも関係しています）たとえば、上の３つのオペアンプのスルーレートは、下表のように計算することができます。

	ＬＭＣ６４８２	ＮＪＭ４５８０	ＬＭ３５８
変化に要する時間	４μ秒	１μ秒	３０μ秒
変化した電圧	５Ｖ	２．９Ｖ	２．９Ｖ
スルーレート （変化の速度）	５Ｖ／４μ秒 ＝１．６Ｖ／μ秒	２．９Ｖ／１μ秒 ＝２．９Ｖ／μ秒	２．９Ｖ／３０μ秒 ＝０．１Ｖ／μ秒
データシートの値	０．７Ｖ／μ秒	５Ｖ／μ秒	０．３Ｖ／μ秒

但し、データシートのスルーレートは、下図のようにユニティゲイン増幅器に大きな信号を入れて測定する（増幅させないで測定する）きまりなので、コンパレータとして利用している時の値より、大きな（良い）値が記載されている場合が大半です。



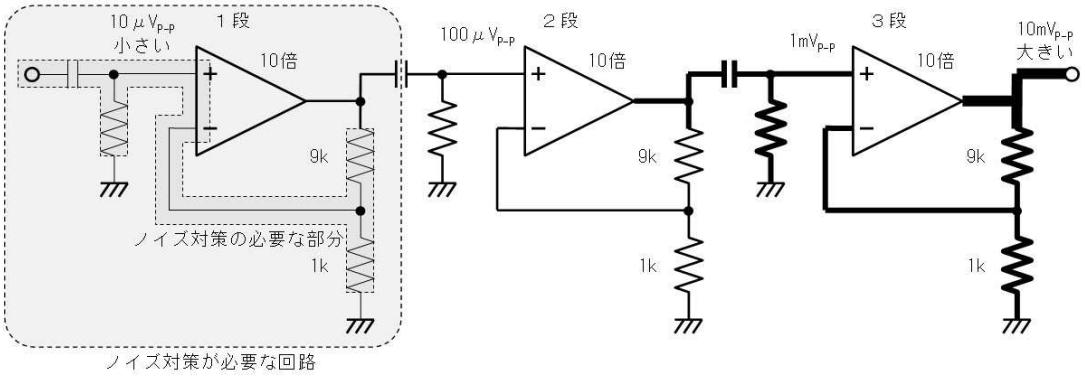
１６．雑音

ここでは、オペアンプ等の部品が発生させる雑音を説明します。増幅率の高い増幅器では、信号を入

れていないときも、出力をイヤホン等でモニタすれば「ザー」と雨のような音が聞こえます。これが部品が出す雑音です。小さな信号を増幅して利用したい場合には、雑音を小さくする工夫が必要です。

１７. 雑音対策の必要な部分

下図に３段の増幅器の回路図を示します。「信号の大きさ」を「線の太さ」で示しています。信号が大きければ（線が太ければ）雑音が混入しても無視できますから、雑音に注意するのは、細い線で示す小さな信号を扱う部分です。



たとえば上図の場合は、三段の増幅器の内、（通常は）図中で薄い灰色に塗った、１段目に雑音対策が必要です。さらに、１段目の中でも、濃い灰色に塗った、オペアンプの入力端子と、入力端子に繋がる部品が雑音に影響します。逆に同じ１段目でも、オペアンプの出力端子では、既に信号が大きくなっているので、雑音への影響は殆どありません。

ですから、オペアンプの内部で発生する雑音も「入力端子で発生している」と考えます。オペアンプの入力端子では、雑音電圧（入力端子に加わる雑音の電圧）と雑音電流（入力端子に流れる雑音の電流）の２種類の雑音が発生します。

１８. データシートと雑音

雑音についての記載はオペアンプの品種により様々です。雑音性能を重視したオペアンプでは詳しく、そうでないオペアンプでは簡素に説明されています。雑音を全く気にしない用途のオペアンプでは、雑音性能が記載されていない場合さえあります。

データシートに登場する主な雑音性能を下表に示します。

分類	名称	単位	意味
雑音電圧	①入力換算雑音電圧 Input voltage noize	V_{RMS} V_{P-P}	そのオペアンプが主に利用される周波数の範囲で、入力に発生する雑音の電圧
	②入力換算雑音電圧密度 Input voltage noize density	V/√Hz	１Ｈｚあたりの雑音電圧
	③入力換算雑音電圧スペクトラム密度 Input Voltage Noise Spectral Density	Hz と V/√Hz グラフ	１Ｈｚあたりの雑音電圧の周波数による変化の様子
雑音電流	④入力換算雑音電圧 Input current noize	A_{RMS} A_{P-P}	そのオペアンプが主に利用される周波数の範囲で、入力に発生する雑音の電流
	⑤入力換算雑音電圧密度	A/√Hz	１Ｈｚあたりの雑音電流

	Input current noize density		
	⑥入力換算雑音電圧スペクトラム密度 Input currnet noize spectral density	Hz と A/√Hz グラフ	１Ｈｚあたりの雑音電流の周波数による変化の様子

①と④は簡便な表し方で、たとえば「耳で聞こえる周波数の範囲」といった感じで、周波数の範囲を予め決めて測定した雑音の電圧です。そのまま入力に加わる雑音の大きさ（電圧や電流）として利用できます。ただし、使用する周波数の範囲が測定条件と違う場合は、雑音の大きさが正確に分りません。

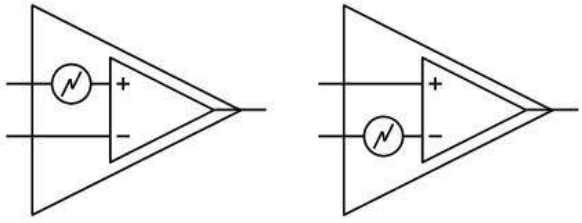
②と⑤は多少詳しい表し方で、データシートの値（雑音密度）に、自分が使用する周波数の範囲（をルートした値を）掛けて、雑音の大きさを求めます。使用する周波数の範囲が広い場合に、ちゃんと雑音も大きく求めることができます。ただし、周波数による雑音の大きさの変化は分りません。

③と⑥は詳しい表し方で、周波数による雑音の大きさの変化も含めて、自分の使用する周波数の範囲での雑音の大きさを正確に求めることができます。

１９. 雑音電圧

雑音電圧は、下図に丸印で示す「雑音電圧源」（雑音電圧を発生する部品）が、入力端子と直列に入っていると考えて回路への影響を検討します。このとき、下図に示すように「＋入力に入っている」と考えても「－入力に入っている」と考えても同じ結果になりますから、どちらでも考え易い方に挿入して検討します。

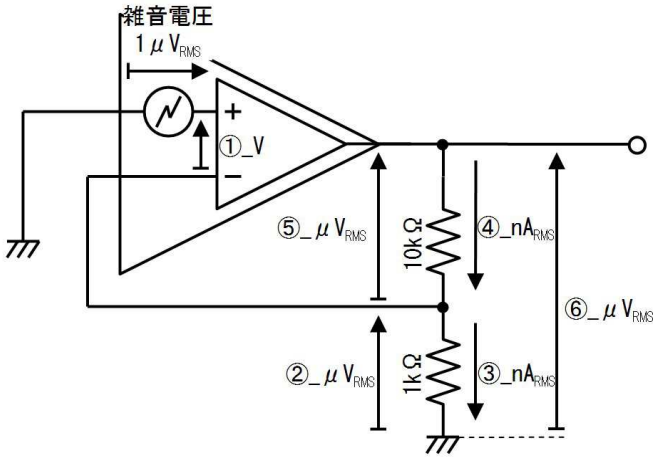
このように、雑音電圧をオフセット電圧と似た方法で考えて良いのは、雑音がオフセット電圧の不規則な変化とも言えるからです。



このように入力で発生していると考えた雑音電圧を「入力換算雑音電圧」と呼び、たとえば「入力換算雑音電圧１μV_{RMS}」と示します。

雑音電圧に使われている単位、実効値電圧（V_{RMS}）は、交流電圧（V_{AC}）と殆ど同じ意味です。つまり、実効値電圧１V_{RMS}は（交流電圧１V_{AC}と同様に）直流１Ｖと同じ明るさで電球を光らせることができる電圧です。ただ、V_{AC}は単純な振動を繰り返す交流を表すための単位なので、複雑に変化する雑音を表すのには最適とは言えず、「直流１Ｖと同じ威力だが、波形は不明な信号」という意味のV_{RMS}を使用しています。

では、入力換算雑音電圧の影響で、増幅器の出力にどのような雑音が現れるか検討します。下図は１１倍の非反転増幅回路に、入力換算雑音電圧１μV_{RMS}のオペアンプを使った例です。

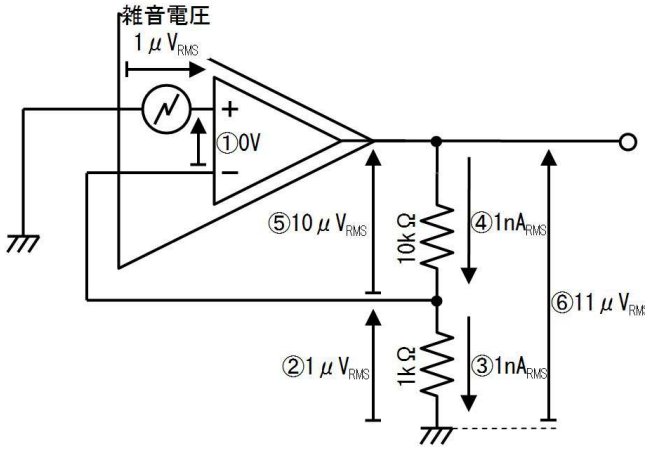


１９.１. 練習

上図を見ながら、下表に書き込んで出力に現れる雑音電圧を計算します。

番号	質問	値
	＋入力端子に加わる雑音電圧は１μV_{RMS}です。	-
①	負帰還の回路のため、＋入力と－入力は間の電圧は、	V
②	１ｋΩの両端の雑音電圧は、	μV_{RMS}
③	１ｋΩに流れる雑音電流は、	ｎA_{RMS}
④	１０ｋΩに流れる雑音電流は、	ｎA_{RMS}
⑤	１０ｋΩの両端の雑音電圧は、	μV_{RMS}
⑥	出力端子の雑音電圧は、	μV_{RMS}

１９.２. 答



番号	質問	値
	＋入力端子に加わる雑音電圧は１μV_{RMS}です。	-
①	負帰還の回路のため、＋入力と－入力は間の電圧は、	０V
②	１ｋΩの両端の雑音電圧は、	１μV_{RMS}
③	１ｋΩに流れる雑音電流は、	１ｎA_{RMS}
④	１０ｋΩに流れる雑音電流は、	１ｎA_{RMS}
⑤	１０ｋΩの両端の雑音電圧は、	１０μV_{RMS}
⑥	出力端子の雑音電圧は、	１１μV_{RMS}

このように増幅回路では、入力換算雑音電圧が（概ね）増幅率で拡大されて出力に現れます。

下表は低雑音オペアンプＮＪＭ２１２２の電気的特性です。

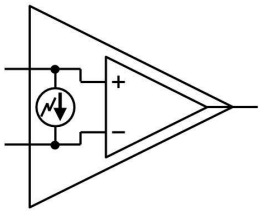
■ **電気的特性** (V^+/V^-=±2.5V, Ta=25°C)

項目	試験条件	記号	規格値			単位
			最小	標準	最大	
動作電源電圧範囲 1	DIP パッケージ	Vope1	±2.0	−	±10.0	V
動作電源電圧範囲 2	DMP パッケージ	Vope2	±2.0	−	±7.0	V
消費電流	V_{IN}=0V, R_L=∞Ω	I_{CC}	−	7.0	9.5	mA
入力オフセット電圧	R_S=500Ω	V_{IO}	−	1.0	6.0	mV
入力オフセット電流		I_{IO}	−	0.45	1.5	μA
入力バイアス電流		I_B	−	3.6	8.0	μA
電圧利得	R_L≧10kΩ	A_V	80	100	−	dB
最大出力電圧	R_L≧2.5kΩ	V_{OM}	±2.0	±2.2	−	V
同相入力電圧範囲		V_{ICM}	±0.7	±1.0	−	V
同相信号除去比		CMR	60	74	−	dB
電源電圧除去比		SVR	60	80	−	dB
スルーレート	G_V=20dB, V_{IN}=±0.1V	SR	−	2.4	−	V/μs
利得帯域幅積		GB	-	12	−	MHz
入力換算雑音電圧 1	R_S=10Ω, f=1kHz	Ve_{n1}	−	1.5	−	nV/√Hz
入力換算雑音電圧 2	付図1	Ve_{n2}	−	0.56	0.75	μVrms
チャンネルセパレーション	f=1kHz	CS	−	90	−	dB
全高調波歪率	V_O=1Vrms, f=1kHz, G_V=20dB, R_L=2.5kΩ	THD	−	0.003	−	%

下から３行目に入力換算雑音電圧の標準値、０．５６μV_{RMS}が記載されています。

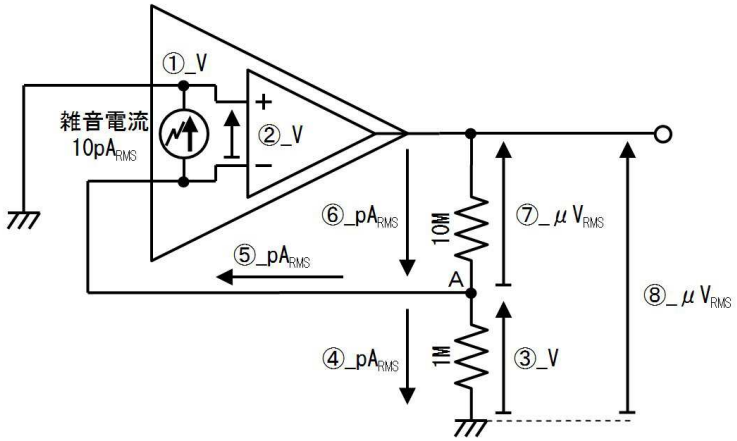
２０．雑音電流

雑音電流は、雑音電圧程は頻繁に利用しませんが、抵抗値の高い回路では重要な場合があります。雑音電流は、下図に丸印で示す「雑音電流源」（雑音電流を発生する部品）が、入力端子と並列に入っていると考えて回路への影響を検討します。



このように入力で発生していると考えた雑音の電流を「入力換算雑音電流」と呼び、たとえば「入力換算雑音電流１０ｐA_{RMS}」と示します。

では、入力換算雑音電流の影響で、増幅器の出力にどのような雑音が発生するか検討します。下図は１１倍の非反転増幅回路に、入力換算雑音電流１０ｐA_{RMS}のオペアンプを使った例です。

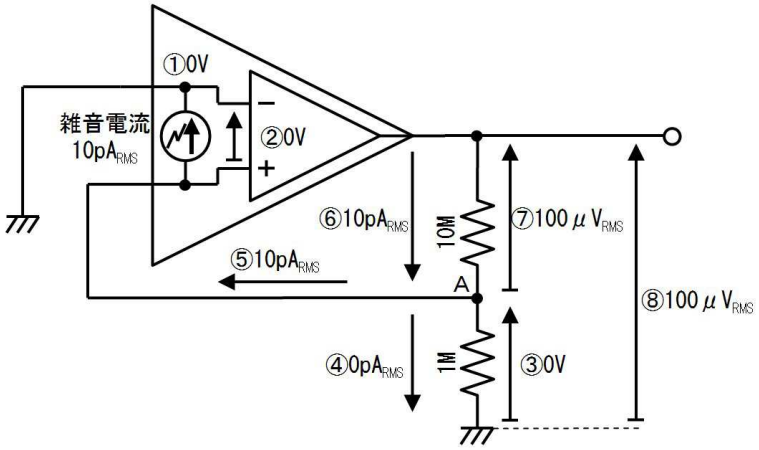


２０.１．練習

上図を見ながら、下表に書き込んで出力に現れる雑音電圧を計算します。

番号	質問	値
①	＋入力の電圧は、 （アースに接続されているから）	Ｖ
②	負帰還の回路だから、＋入力とー入力の電圧差は、	Ｖ
③	１ＭΩの両端電圧は、	Ｖ
④	１ＭΩに流れる電流は、	ｐＡ$_{RMS}$
⑤	雑音電流が１０ｐＡだから、帰還回路に流れる雑音電流は、	ｐＡ$_{RMS}$
⑥	１０ＭΩに流れる電流は、	ｐＡ$_{RMS}$
⑦	１０ＭΩの両端電圧は、	μＶ$_{RMS}$
⑧	出力される雑音電圧は、	μＶ$_{RMS}$

２０.２. 答



番号	質問	値
①	＋入力の電圧は、 （アースに接続されているから）	０Ｖ
②	負帰還の回路だから、＋入力とー入力の電圧差は、	０Ｖ
③	１ＭΩの両端電圧は、	０Ｖ
④	１ＭΩに流れる電流は、	０ｐＡ$_{RMS}$
⑤	雑音電流が１０ｐＡだから、帰還回路に流れる電流は、	１０ｐＡ$_{RMS}$
⑥	１０ＭΩに流れる電流は、	１０ｐＡ$_{RMS}$
⑦	１０ＭΩの両端電圧は、	１００μＶ$_{RMS}$
⑧	出力される雑音電圧は、	１００μＶ$_{RMS}$

つまりこの回路では、オペアンプの雑音電流が１０ＭΩに流れて生じる電圧が、増幅器の出力雑音電

圧になります。このように、値の大きい抵抗を使用した回路で雑音電流が問題になります。

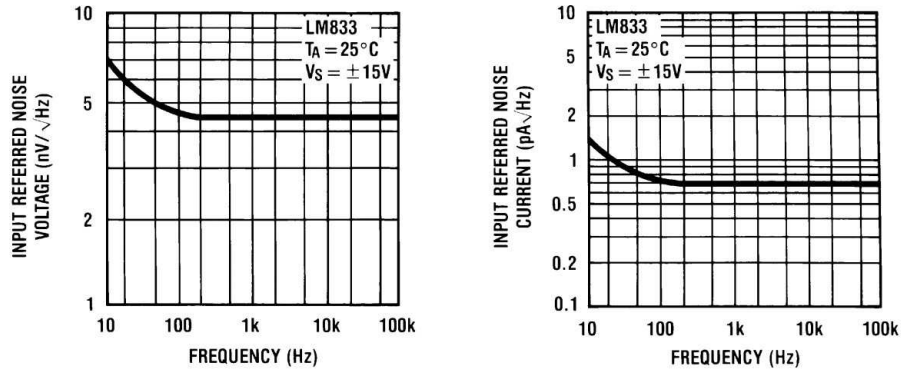
２１．雑音と周波数

雑音は様々な周波数の信号が乱雑に入り混じったものです。雑音の強さは周波数によって変化し、その変化の様子もオペアンプの品種によって違います。ですから、自分が使用する周波数の範囲で雑音が少ないオペアンプを選ぶ必要があります。

このために（雑音性能を重視したオペアンプの）データシートには、横軸を周波数、縦軸を雑音の大きさ、として描いたグラフが掲載されています。イメージ的には雑音の周波数特性のようなものです。

このグラフの正式名称は「入力換算雑音電圧スペクトラム密度 対 周波数」input reffered noize voltage spectral density vs frequency という長い名前ですが、データシートには「入力換算雑音電圧」等と適当に名前を短縮して掲載されています。

下図は、ＬＭ８３３の入力換算雑音電圧スペクトラム密度（左側）と入力換算雑音電流スペクトラム密度（右側）のグラフです。（このデータシートでも名前は短縮されています）



各周波数での雑音の大きさは、nV/√Hz や、pA/√Hz といった風変わりな単位で表示されます。上図によれば、電圧雑音も電流雑音も、高い周波数では周波数によらず一定ですが、１００Ｈｚ以下の周波数では増加することがわかります。多くのオペアンプがこのような傾向を持っています。

さて、グラフが平らになっている範囲の周波数を利用する場合は、簡単な計算で入力雑音電圧を求めることができます。たとえば、１００Ｈｚ～１０ＫＨｚの信号を利用する場合、上図左のグラフから、電圧雑音が４．５ｎＶ／√Ｈｚ程度で一定と読み取れますから、次のように入力換算雑音電圧を計算します。

$$\text{雑音電圧} = \text{グラフから読み取った電圧} \times \sqrt{\text{使用する周波数の幅}}$$

$$4.5[nV/\sqrt{Hz}] \times \sqrt{10000[Hz] - 100[Hz]} = 448[nV]$$

=4.5E-9*SQRT(10E3-100)

周波数の幅に√を付けるのは、「雑音は電力で足し算する」必要があるからです。雑音の足し算については、別途説明します。また、グラフが平らで無い周波数の範囲についても、別途説明します。

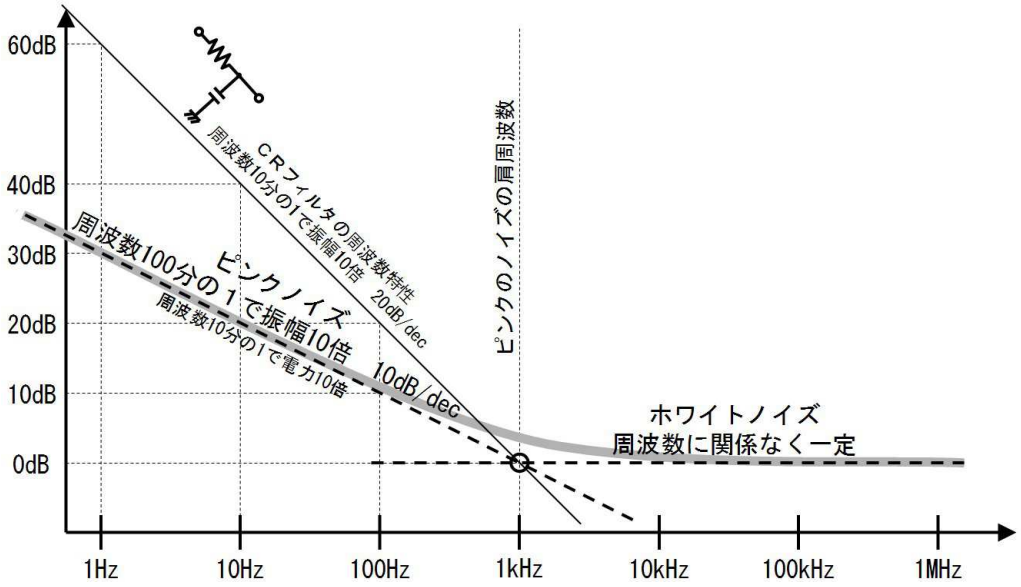
２２．雑音の分布

下図は典型的なオペアンプの雑音スペクトラム密度の例です。雑音には「どのような周波数にも満遍なく分布する」ホワイト雑音（水平な点線）と、「低い周波数で大きくなる」ピンク雑音（斜めの点線）があります。それぞれ別の原因で発生している雑音です。

ホワイト雑音はショット雑音、ピンク雑音は１／ｆ（エフブンノイチ雑音）、フリッカ雑音とも呼ばれます。

ピンク雑音は、周波数が１００分の１になると、振幅が１０倍に大きくなります。参考のために下図に細線で示したＣＲフィルタ（積分回路）の特性では、周波数が１０分の１になると、振幅が１０倍に大きくなります。ですから、ピンク雑音の増加の勢いは、ＣＲ回路より穏やかです。

通常のオペアンプでは、図に灰色の太線で示すように、ピンク雑音とホワイト雑音の合計が、雑音として現れます。



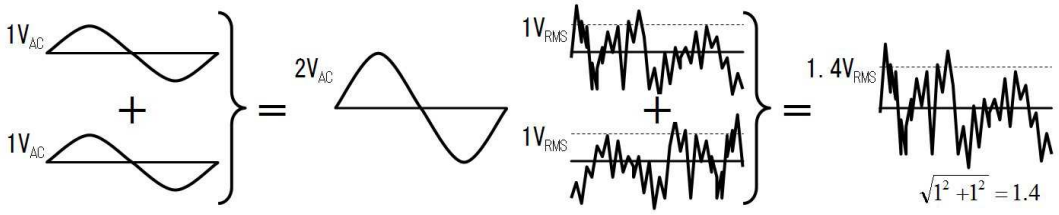
平らなホワイト雑音の点線と、斜めのピンク雑音の点線が交わる周波数を、ピンク雑音の肩周波数と呼びます。ホワイト雑音の大きさが同じなら、ピンク雑音の肩周波数が低ければ低いほど、ピンク雑音が小さいことを示します。

ピンク雑音の肩周波数は、ピンク雑音の接線周波数、ピンク雑音のコーナー、ピンク雑音タンジェントと、様々な名前で呼ばれます。

温度センサーのような極めて周波数の低い（直流に近い）信号を扱う場合には、ピンクの雑音が問題になります。このような場合は、ピンク雑音の小さなオペアンプを、つまり、ピンク雑音の肩周波数の低いオペアンプを選びます。

２３．雑音の足し算

下図（ａ）のように、１V_{AC}の交流と１V_{AC}の交流を加えると、２V_{AC}の交流になります。



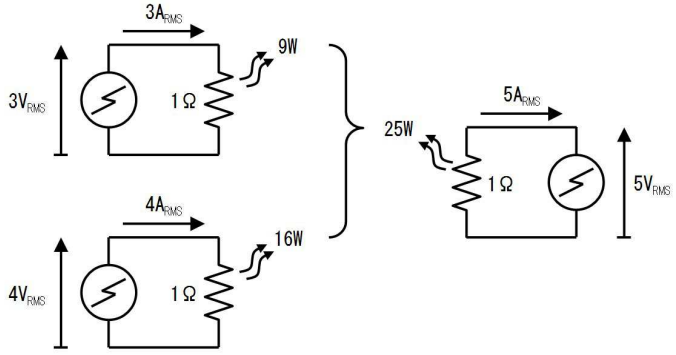
（ａ）交流の足し算　１＋１＝２　　（ｂ）ノイズの足し算　１＋１＝１．４

ところが雑音の場合、上図（ｂ）のように、１V_{RMS}の雑音と、１V_{RMS}の雑音を加えると、１．４V_{RMS}になります。これは、交流がお互いに息を合わせて波打っている（コヒーレントな）のに対して、雑音が不揃いに変化している（インコヒーレントな）ためです。このような現象は雑音以外でも生じます。たとえばＡさんの声１V_{RMS}とＢさん声１V_{RMS}を加えても、１．４V_{RMS}にしかなりません。Ａさん声の波形と、Ｂさんの声の波形が（音色は似ていても）違う形だからです。

では、雑音電圧を足し算する方法を考えます。たとえ雑音のように不揃いな信号でも、エネルギーは保存されます。つまり電力が１Ｗの雑音と２Ｗの雑音を加えると、３Ｗの雑音となります。そこで、電

力に注目して電圧の足し算を考えます。

下図左側に、$3V_{RMS}$と$4V_{RMS}$の雑音によって、１Ωの抵抗に発生する電力を示します。$3V_{RMS}$なら$3A_{RMS}$の電流が流れて９Wの電力が生じ、$4V_{RMS}$なら１６Wの電力が生じます。つまり、合計２５Wの電力が生じます。



3Vで発生する電力と4Vで発生する電力は合計で25W　　25Wは5Vで発生する電力

上図右側では、同じ１Ωの抵抗に２５Wの電力が生じる様子を示します。電圧が$5V_{RMS}$のとき、$5A_{RMS}$の電流が流れる結果、２５Wが生じます。

つまり、電力に注目すると、$3V_{RMS}$（９W）と$4V_{RMS}$（１６W）を加えると合計$5V_{RMS}$（２５W）となります。この考え方を使うと、A [V_{RMS}]とB [V_{RMS}]の２つの雑音の足し算の方法は、

Aで生じる電力＝A^2　　（A [V_{RMS}]で、A [A_{RMS}]だから）

Bで生じる電力＝B^2　　（B [V_{RMS}]で、B [A_{RMS}]だから）

合計の電力＝A^2+B^2

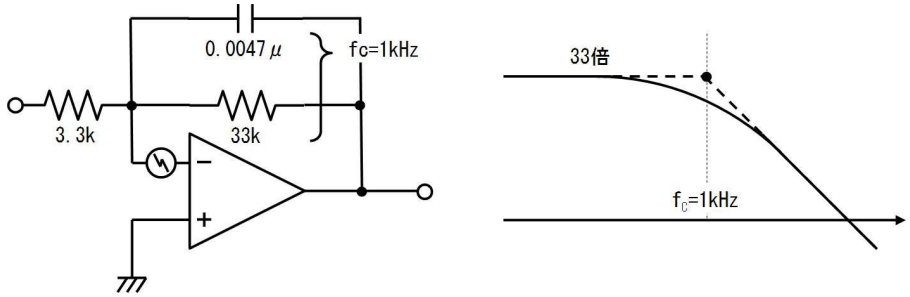
合計の電力を発生させる電圧＝$\sqrt{A^2+B^2}$

と、雑音の合計は「二乗してから合計して、合計してからルートを取る」ことで計算できます。

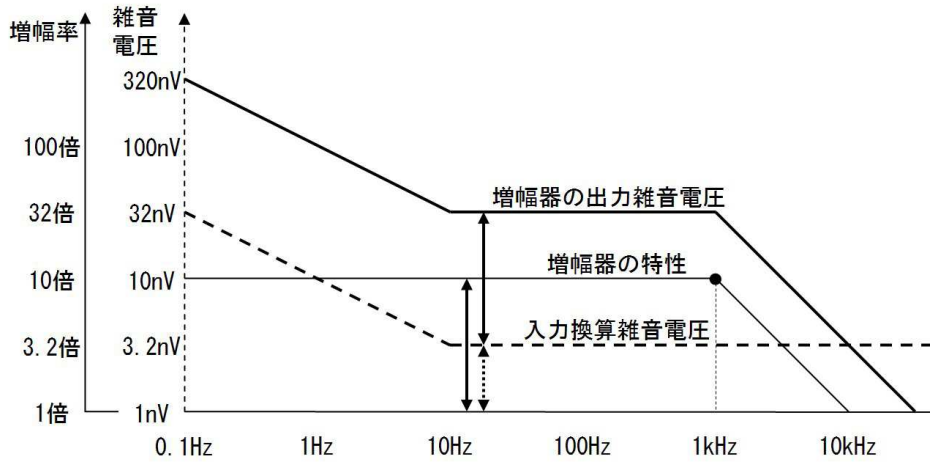
２４. 増幅器の雑音スペクトラム密度を求める

オペアンプの雑音スペクトラム密度と、増幅器の特性が分れば、図の上で足し合わせるだけで、増幅器の出力の雑音スペクトラム密度を求めることができます。

下図に１ｋＨｚで帯域制限した１０倍の反転増幅回路とその周波数特性を示します。



上図の回路に、下図に点線で示す入力換算雑音電圧（正しくは、入力換算雑音電圧スペクトラム密度）のオペアンプを使用した場合、増幅器の出力雑音電圧は、下図に太線で示す特性となります。



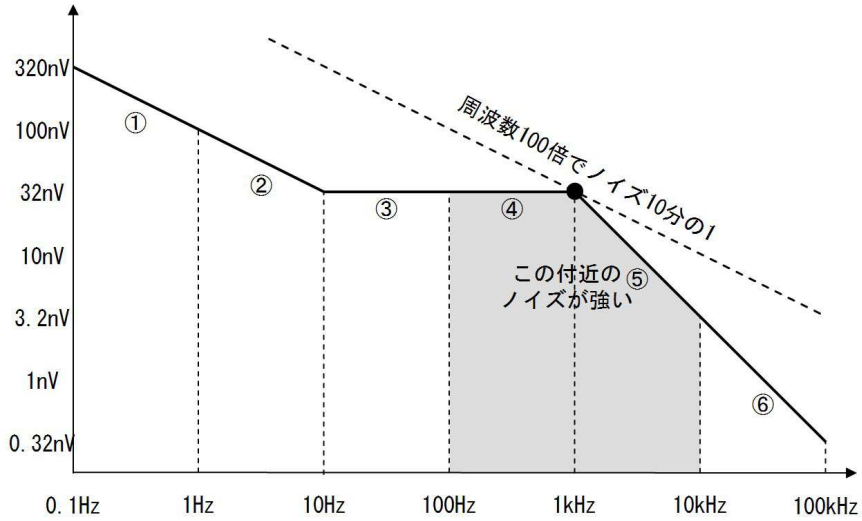
入力換算雑音電圧が増幅率の分大きくなりますから、１ｋＨｚ以下の範囲では入力換算雑音電圧は１０倍されて出力に現れます。（上にシフトします）。また、１ｋＨｚ以上の範囲では、増幅率が「周波数１０倍で振幅１０分の１」の勢いで低下して行くため、入力に加わる雑音の大きさは変化しませんが、増幅器の出力にあらわれる雑音は「周波数１０倍で振幅１０分の１」の勢いで低下します。

増幅率１倍を最低値（一番下）にして対数グラフを描くと、入力換算雑音電圧と増幅器の特性の高さを加えるだけで、増幅器の出力雑音電圧を求めることができます。

２５．雑音スペクトラム密度から雑音電圧を求める

回路の出力信号の雑音スペクトラム密度から、その回路はどの周波数での雑音が大きいか、簡単に知ることができます。

下図に点線で示すように（周波数が１００倍になると雑音電圧が１０分の１に減少する傾きの）斜線を、雑音特性と接するように描きます。雑音特性と斜線が接する付近が、雑音の大きい周波数です。下図の場合、黒丸の部分で接するため、１ｋＨｚ周辺の灰色に塗った部分で雑音が多いことが分ります。ですから、このあたりの雑音は慎重に計算する必要があると分ります。



では、この回路の雑音出力電圧を計算します。雑音は、１Ｈｚ、１０Ｈｚ、１００Ｈｚと１０倍区切りに計算すると楽ですから、最初に、上図の①～⑥のように区間を設けます。区間はグラフの傾斜によって次のように分類できます。

区間	傾斜の特徴	区間の特徴	掛ける値

①と②	周波数が１００倍になると雑音電圧が１０分の１に減る	ピンク雑音の区間	２．４
③と④	周波数に関係なく、雑音電圧が一定	ホワイト雑音の区間	０．９５
⑤と⑥	周波数が１０倍になると雑音が１０分の１に減る	増幅回路が積分動作している区間	１．５

上表の「掛ける数」は後で説明する各区間の雑音電圧の計算で利用します。

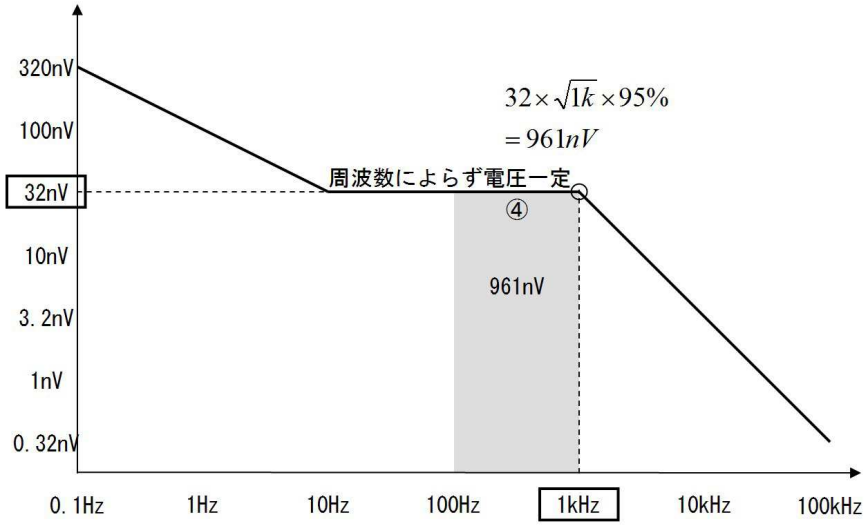
実際の回路では、雑音特性の折れ曲がり点が、ちょうど区間の切れ目に来ることはありません。雑音は素子による個体差が大きく、正確に計算する意味はそれ程ありませんから、１０倍区切りに合うように、雑音特性を多少修正して計算します。

２６. ホワイト雑音の区間

ホワイト雑音の区間は、下図に示すように周波数に関係なく雑音電圧が一定になります。このような場合、１区間あたりの雑音電圧は、

$$\text{区間のノイズ電圧} = \text{区 間上側のノイズ密度} \times \sqrt{\text{区間の上側の周波数}} \times 0.95$$

で計算できます。下図の例では、=32E-9*SQRT(1000)*0.95と計算して、961nV と分ります。

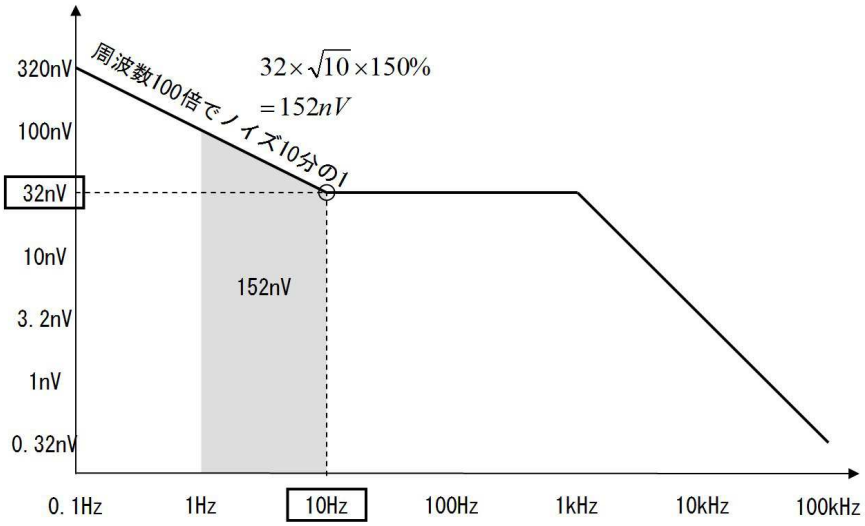


２７. ピンク雑音の区間

ピンク雑音の区間は、下図に示すように周波数が１００倍になると、雑音電圧が１０分の１に減少します。（３ｄＢ／ｏｃｔ、１０ｄＢ／ｄｅｃ）このような場合、１区間あたりの雑音電圧は、

$$\text{区間のノイズ電圧} = \text{区 間上側のノイズ密度} \times \sqrt{\text{区間の上側の周波数}} \times 1.5$$

で計算できます。下図の例では、=32E-9*SQRT(10)*1.5と計算して、152nV と分ります。

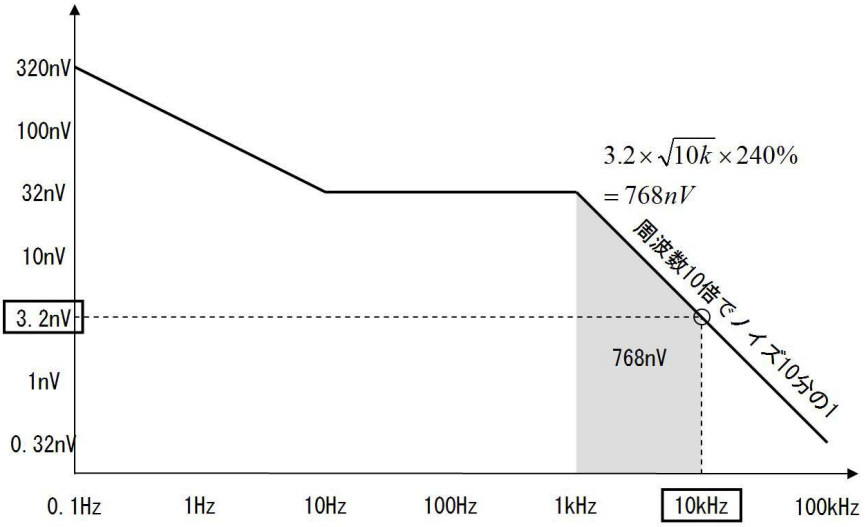


２８. 増幅回路が積分動作している区間

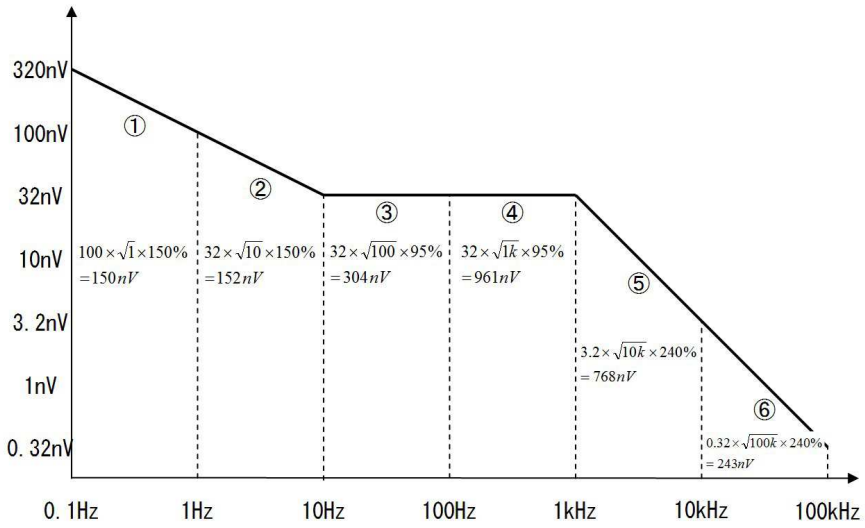
増幅回路が積分動作している区間は、下図に示すように周波数が１０倍になると、雑音電圧が１０分の１に減少します。（６ｄＢ／ｏｃｔ、２０ｄＢ／ｄｅｃ）このような場合、１区間あたりの雑音電圧は、

$$区間のノイズ電圧＝区\ 間上側のノイズ密度\ \times\sqrt{区間の上側の周波数}\ \times2.4$$

で計算できます。下図の例では、=32E-9*SQRT(10E3)*2.4と計算して、768nV と分ります。



このようにして求めた各区間の雑音電圧を下図に示します。



２９．各区間の雑音電圧を合計する

①～⑥の区間それぞれの雑音電圧は下表のＥｘｃｅｌシートで求めることができます。

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	区間	ノイズ密度	周波数(上)	倍率	ノイズ電圧	電圧の2乗		
2		nV/√Hz	Hz	%	nV			
3	①	100	1	150	=B3*SQRT(C3)*D3/100	=E3*E3		
4	②	32	10	150	=B4*SQRT(C4)*D4/100	=E4*E4		
5	③	32	100	95	=B5*SQRT(C5)*D5/100	=E5*E5	電圧の2乗の	雑音出力電圧
6	④	32	1000	95	=B6*SQRT(C6)*D6/100	=E6*E6	合計	(合計の√)
7	⑤	3.2	10000	240	=B7*SQRT(C7)*D7/100	=E7*E7		nV
8	⑥	0.32	100000	240	=B8*SQRT(C8)*D8/100	=E8*E8	=SUM(F3:F8)	=SQRT(G8)

シートのＥ列に各区間の雑音電圧が表示されます。全ての区間の雑音電圧の合計は「雑音の足し算」で説明したように「二乗してから合計して、合計してからルートを取る」方法で計算します。Ｆ列で各区間の雑音電圧を２乗し、Ｇ列にその合計を、Ｈ列に合計をルートした値を表示しています。

上のシートを計算すると、下表のようになります。

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	区間	ノイズ密度	周波数(上)	倍率	ノイズ電圧	電圧の2乗		
2		nV/√Hz	Hz	%	nV			
3	①	100	1	150	150	22500		
4	②	32	10	150	152	23040		
5	③	32	100	95	304	92416	電圧の2乗の	雑音出力電圧
6	④	32	1000	95	961	924160	合計	(合計の√)
7	⑤	3.2	10000	240	768	589824		nV
8	⑥	0.32	100000	240	243	58982	1710922	1308

全区間の雑音電圧の合計は、１３０８ｎＶ（１．３μＶ）と分ります。各区間の雑音電圧を下図に示します。

３０．抵抗が発生する雑音

抵抗も雑音を発生します。雑音密度はどの周波数でも一定で、使用する周波数の範囲と抵抗値から、雑音電圧と雑音電圧密度は次のように計算できます。

$$抵抗が発生する雑音電圧[nV] = 0.13 \times \sqrt{抵抗値[\Omega] \times 周波数の範囲[Hz]}$$

$$抵抗が発生する雑音電圧密度[nV/\sqrt{Hz}] = 0.13 \times \sqrt{抵抗値[\Omega]}$$

たとえば、１０MΩの抵抗は２０～２０ｋＨｚの周波数の範囲では、

=0.13*SQRT(10E6*(20E3-20)) [nV]

=0.13*SQRT(10E6) [nV/√Hz]

と入力して、雑音電圧５８０００ｎＶ（５８μＶ)、雑音電圧密度４１０ｎＶと計算できます。

また、抵抗が発生する雑音電流と雑音電流密度は、

$$抵抗が発生する雑音電流[nA]=0.13\times\sqrt{\frac{周波数の範囲[Hz]}{抵抗値[\Omega]}}$$

$$抵抗が発生する雑音電流密度[nA]=0.13\times\sqrt{\frac{1}{抵抗値[\Omega]}}$$

たとえば、１０MΩの抵抗は２０～２０ｋＨｚの周波数の範囲では、

=0.13*SQRT((20E3-20)/10E6) [nV]

=0.13*SQRT(1/10E6) [nA/√Hz]

と入力して、雑音電流０．００５８ｎＡ（５．８ｐＡ)、雑音電流密度０．０４１ｐＡ／√Ｈｚと計算できます。

下表に各種の抵抗で発生する雑音の一覧を示します。抵抗の雑音が使用するオペアンプの入力雑音より１桁以上小さければ、気にする必要はありません。

抵抗	雑音電圧 20～20kHz	雑音電圧密度	雑音電流 20～20kHz	雑音電流密度
1 Ω	18 nV	0.13 nV/√Hz	18 nA	130 pA/√Hz
3.2 Ω	33 nV	0.23 nV/√Hz	10 nA	73 pA/√Hz
10 Ω	58 nV	0.41 nV/√Hz	5.8 nA	41 pA/√Hz
32 Ω	104 nV	0.74 nV/√Hz	3.2 nA	23 pA/√Hz
100 Ω	184 nV	1.30 nV/√Hz	1.8 nA	13 pA/√Hz
320 Ω	329 nV	2.33 nV/√Hz	1.0 nA	7.3 pA/√Hz
1 k	581 nV	4.11 nV/√Hz	581 pA	4.1 pA/√Hz
3.2 k	1.04 μV	7.35 nV/√Hz	325 pA	2.3 pA/√Hz
10 k	1.84 μV	13.0 nV/√Hz	184 pA	1.3 pA/√Hz
32 k	3.29 μV	23.3 nV/√Hz	103 pA	727 fA/√Hz
100 k	5.81 μV	41.1 nV/√Hz	58 pA	411 fA/√Hz
320 k	10.4 μV	73.5 nV/√Hz	32 pA	230 fA/√Hz
1 M	18.4 μV	130 nV/√Hz	18 pA	130 fA/√Hz
3.2 M	32.9 μV	233 nV/√Hz	10 pA	73 fA/√Hz
10 M	58.1 μV	411 nV/√Hz	5.8 pA	41 fA/√Hz
32 M	104 μV	735 nV/√Hz	3.2 pA	23 fA/√Hz
100 M	184 μV	1.3 μV/√Hz	1.8 pA	13 fA/√Hz
320 M	329 μV	2.3 μV/√Hz	1.0 pA	7.3 fA/√Hz
1 G	581 μV	4.1 μV/√Hz	0.58 pA	4.1 fA/√Hz
3.2 G	1.04 mV	7.4 μV/√Hz	0.32 pA	2.3 fA/√Hz
10 G	1.84 mV	13 μV/√Hz	0.18 pA	1.3 fA/√Hz

抵抗の雑音がオペアンプの入力雑音に近い、あるいは大きい場合は、抵抗値を小さくできないか、帯域を狭くできないかを検討します。

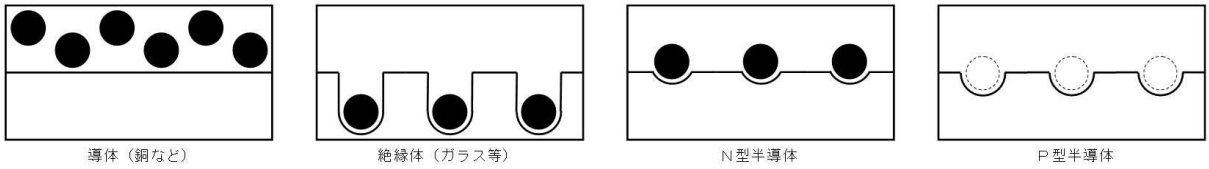
１２．半導体回路入門

詳細はともかく、とりあえず、だいたいのイメージを把握することが理解の早道です。ここでは、半導体の働きと応用回路の大雑把な雰囲気を説明します。

１．似非半導体物性

半導体素子の説明に先立って、「半導体物性」の説明を行うのが世間のお約束です。しかし、現実には「半導体の中で何が起こっているのか」を知らなくてもダイオードやトランジスタは使えます。逆に「半導体の中で起こっている事」を正確に説明しようとすると（神はどのように世界を設計したかという話になり）話が極めて長くなります。そこで本書では、半導体の性質とダイオードやトランジスタの動作を、安易なたとえ話で手短に説明します。

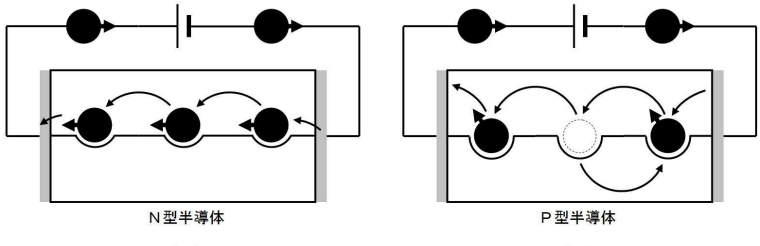
２．導体・絶縁体・半導体



上図（ａ）に示すように、銅などの導体（電気を良く流す物質）には、豊富に移動可能な電子（黒丸）が存在し（電子が移動して電流を運ぶので）電流が良く流れます。ところが、上図（ｂ）に示すように、ガラス等の絶縁体（電気を流さない物質）では、電子が深い穴の底に固定されていて、移動することができず、電流が流れません。

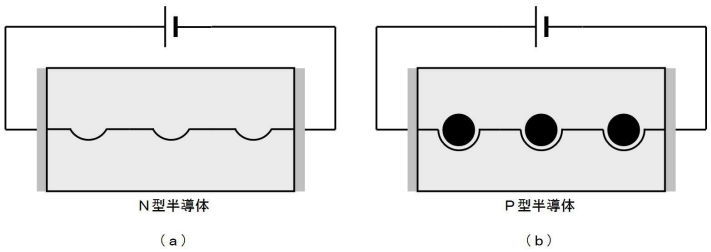
さて、Ｎ型半導体は上図（ｃ）のように、少しだけ移動可能な電子がある物質で、Ｐ型半導体は上図（ｄ）のように、電子が出入りできる浅い穴のある物質です。

Ｎ型半導体では、下図（ａ）のように、電子が移動して電流が流れます。このように、電子が電気を運んでいるように見えるので、Ｎ型半導体では電子を「キャリア」（運び屋）と呼びます。また、Ｐ型半導体は、下図（ｂ）のように、所々に浅い穴があるので、電子が穴伝いに渡り歩いて電流が流れます。



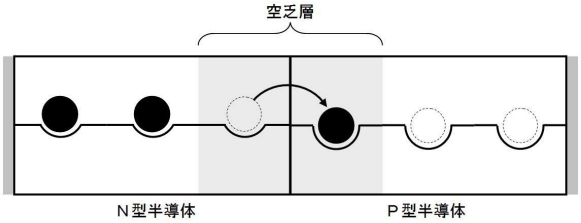
見方を変えると、Ｐ型半導体では電子が移動する方向とは逆向きに（空の）穴が移動しているように見えます。そこで、Ｐ型半導体では空の穴（ホール）を「キャリア」と呼びます。

なんらかの理由で、Ｎ型半導体の電子がどこかへ行ってしまうと（下図（ａ））キャリア（電子）がなくなって絶縁性となり、電流が流れなくなります。同様に、Ｐ型半導体のホールが電子で埋まってしまうと（下図（ｂ））キャリア（空の穴）が無くなって絶縁性となり、電流が流れなくなります。

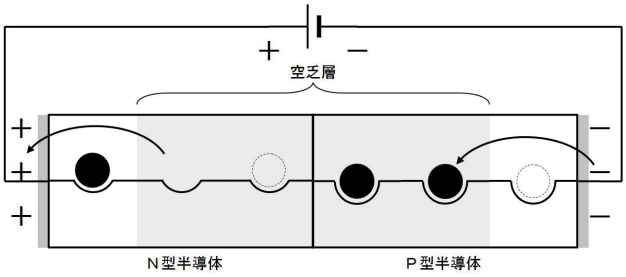


３．ＰＮ接合の整流作用

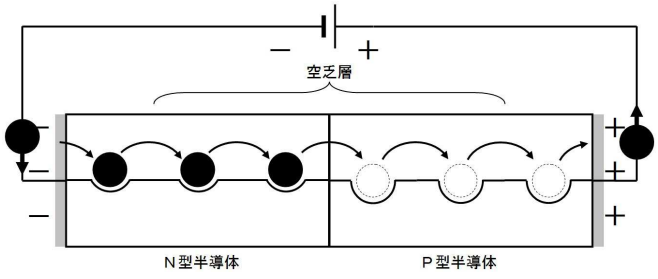
Ｎ型半導体とＰ型半導体をぴったりくっつけることを「ＰＮ接合」と呼びます。くっつけた面（接合面）では、下図中央部に示すように、Ｎ型半導体の電子がＰ型半導体のホールに移動して結合し、灰色で示す絶縁性の層ができます。この層を空乏層（キャリアの無い導電性の乏しい層）と呼びます。



このＰＮ接合の、Ｎ型側に＋の、Ｐ型側にーの電圧を掛けると、下図に示すとおり、Ｎ型の側では（左端の＋電圧に引かれて）電子が奪われて、Ｐ型の側では穴が（右側から入り込んだ）電子で埋められて、絶縁性の空乏層が広がるばかりで、電流が流れません。



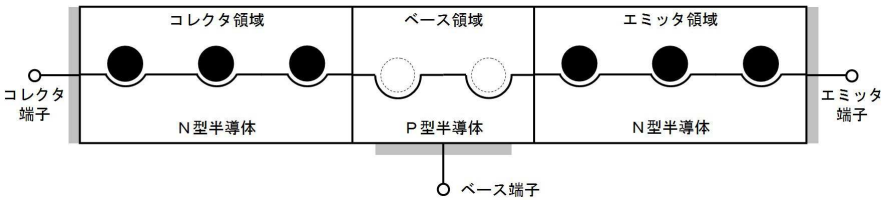
逆に、Ｎ型側にーの、Ｐ型側に＋の電圧を掛けると、下図に示すとおり、Ｎ型の側では（左側から）電子が供給され、Ｐ型の側では穴から（右側へ）電子が取り除かれて、空乏層が消失し、電流が流れます。



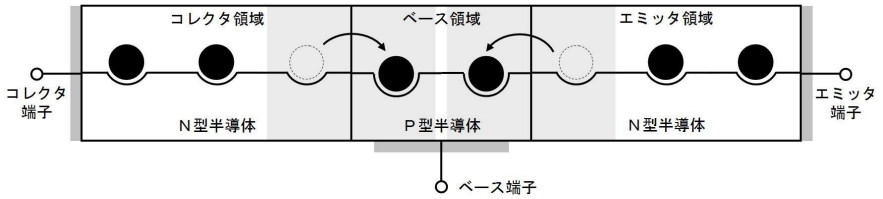
このように一方向にだけ電流を流す作用を「整流作用」と呼びます。

４．ＮＰＮ接合の増幅作用

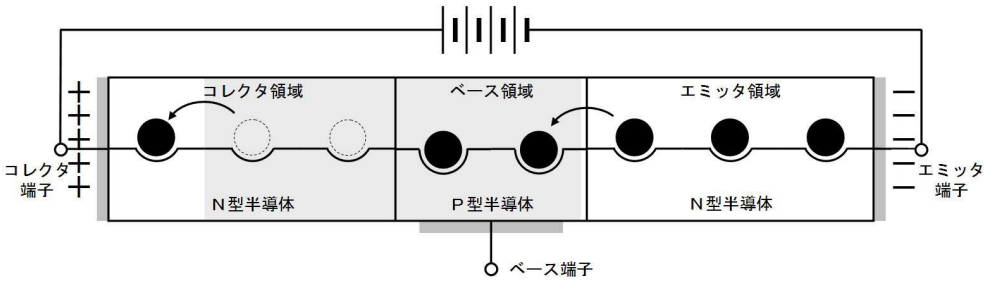
下図のようにＮ型、Ｐ型、Ｎ型とサンドイッチ状に半導体を接合した素子が、（バイポーラ）トランジスタです。（ＰＮＰと接合したものもあります）



ダイオードと同様に、N型領域の電子が、P型領域のホールと結合し、下図に灰色で示すように、ベースの左右に絶縁性の空乏層が生じます。



さて、下図のようにコレクタに＋、エミッタにーの高い電圧を加えると、ベース領域の穴が（エミッタから入り込んだ）電子で埋められてベースが絶縁性となり、また、コレクタ側の電子は左側の＋電圧に引かれて空乏層が広がり、電流が流れません。

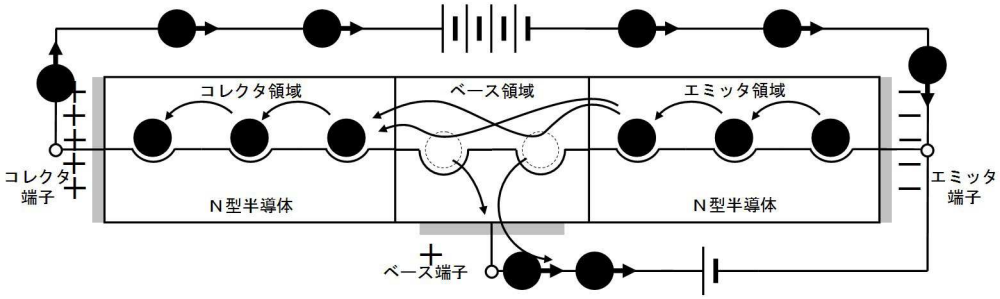


ここで下図のように、ベースに僅かな＋の電圧を加えます。

すると、この＋の電圧に引かれて、ベースの穴を埋めていた電子が抜き取られ、ベース領域に穴（キャリア：ホール）ができます。さらに、この穴に引かれて（穴に入ろうとして）、エミッタからベースへ、次々と電子が飛び込んできます。

ところが、ベースが薄いため飛び込んできた電子の大部分は穴に入ることができず、コレクタ領域に入ってしまいます。そして、一旦コレクタに入ったが最後、電子はコレクタに加えられた高い電圧に引かれて、一気に左へ進み、コレクタ端子から外へ出て行きます。

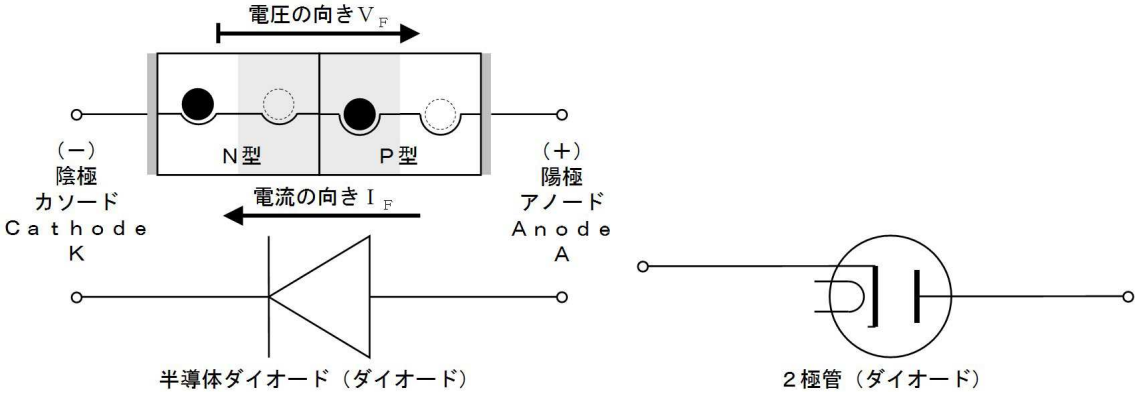
エミッタから飛び込んで来た電子のほんの一部だけが、ベースの穴に入りますから、ベースから抜き取る電子は僅かですみます。



この結果、ベースから僅かな電子を抜き取るだけで、その何倍もの電子がエミッタからコレクタに流れます。あたかも、ベースに流した僅かな電流が大きくなって、コレクタに流れたように見えますから、このような働きを「増幅作用」と呼びます。

５. ダイオード

ＰＮ接合には下図に示すような、整流作用（１方向にだけ電流を流す作用）がありました。電流はＰ型からＮ型に向かってだけ流れます。このような電流を「順電流（順方向電流）」I_F、このとき加えている電圧を「順電圧（順方向電圧）」V_Fと呼びます。（流れない向きに無理流した電流を逆電流I_R、その時の電圧を逆電圧V_Rとも呼びます）

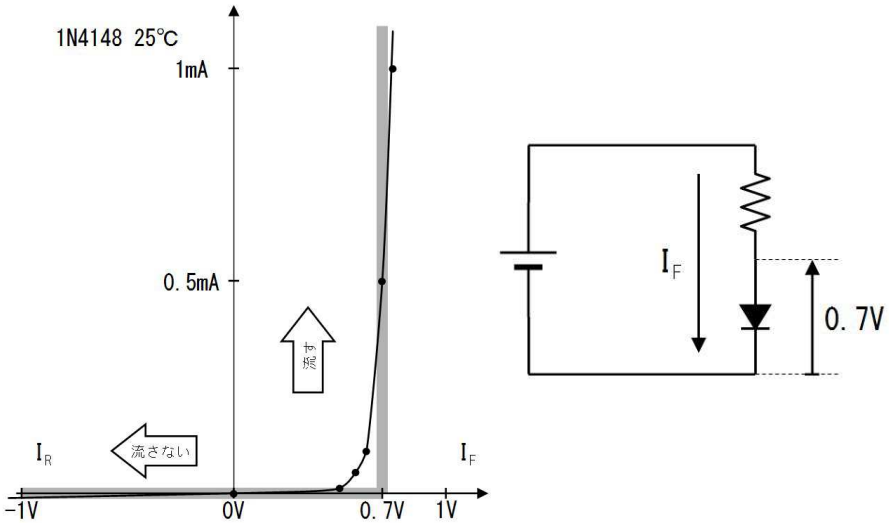


半導体が現れる以前、このような用途には上図右側の、２極管（ダイオード）が利用されていました。このため、半導体で作った整流素子（上図左）も、半導体ダイオード（略して、ダイオード）と呼ばれます。

２極管にならってＰ型の端子をアノード（Ａ）、Ｎ型の端子をカソード（Ｋ）と呼びます。カソードの綴りは主に「Ｃａｔｈｏｄｅ」ですが、略語が「Ｋ」なのは「Ｋａｔｈｏｄｅ」とも綴り得るからです。

６. ダイオードの順電圧

さて、下図左側のグラフに示すとおり、ダイオードに僅かでも順電流（I_F）を流すと、ダイオードの両端には０．７Ｖ程度の順電圧（V_F）が生じ、電流を増やしても、順電圧は少ししか上昇しません。



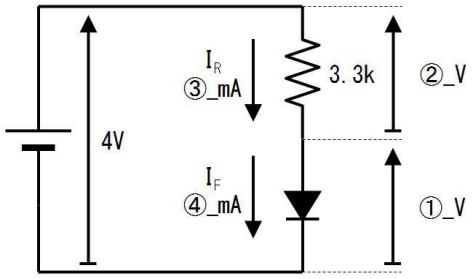
そこで大雑把な回路設計では、「順電流が流れているシリコンダイオードには０．７Ｖの順電圧が発生している」（上図右側）と考えます。つまり、本当は滑らかな曲線を描いているダイオードの特性を、上図に灰色の太線で示す逆Ｌ型に簡略化して（楽に）扱います。

シリコンダイオードの順電圧は温度が１℃上昇すると、２ｍＶ減少します。つまり、常温で約０．７Ｖの順電圧は、５０℃上昇すれば約０．６Ｖに、１００℃上昇すれば約０．５Ｖに低下します。このた

め、広い温度範囲で動作させる回路、電流が多く流れて素子の温度が上昇する回路、正確に動作させる回路、等では順電圧の変化が影響しないように工夫を行います。

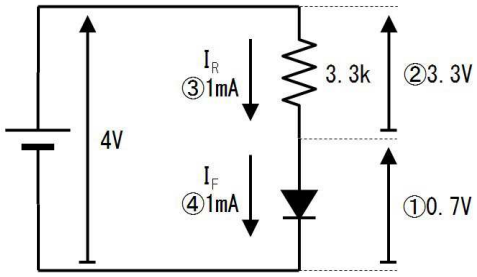
6.1. 練習

下図の回路でダイオードに流れる順電流を、下表に書き込みながら求めてください。



番号	質問	値
①	電流の流れているダイオードの順端電圧は、	V
②	電池が４Ｖだから、抵抗の両端電圧は、	V
③	抵抗に流れる電流は、	mA
④	ダイオードに流れる順電流Ｉ$_F$は、	mA

6.2. 答



番号	質問	値
①	電流の流れているダイオードの順電圧は、	０．７Ｖ
②	電池が４Ｖだから、抵抗の両端電圧は、	３．３Ｖ
③	抵抗に流れる電流は、	１mA
④	ダイオードに流れる順電流Ｉ$_F$は、	１mA

ダイオードの順電圧は温度が１℃上がると、約２mＶ下がります。０．７Ｖと考えている順電圧が、温度が５０℃温度が上がると、０．６Ｖに減少しますから「多少順電圧が変化しても大丈夫」な回路を作ります。

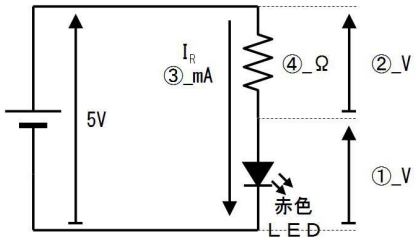
7. 発光ダイオード（ＬＥＤ）

シリコンダイオードに順電流が流れると約０．７Ｖの電圧が発生しました。材料の違うダイオードでは、それぞれ次のような順電圧が発生します。

ダイオードの種類	順電圧（V_F）
ゲルマニウムダイオード	約０．２Ｖ
ショットキバリアダイオード	約０．３Ｖ
シリコンダイオード	約０．７Ｖ
赤外線ＬＥＤ	約１．２Ｖ
赤色・黄色ＬＥＤ 低輝度緑色ＬＥＤ	約２Ｖ
青色・白色ＬＥＤ 高輝度緑色ＬＥＤ	約３．５Ｖ

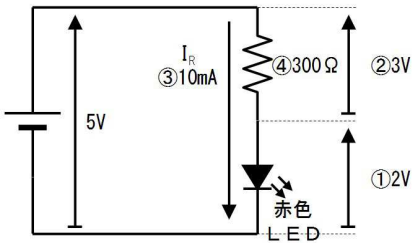
7.1. 練習

下図の回路で赤色ＬＥＤに１０ｍＡの電流を流して点等したい。下表に書き込みながら、抵抗値を決めてください。



番号	質問	値
①	赤色ＬＥＤに電流が流れたとき、順電圧は、	Ｖ
②	電源が５Ｖだから、抵抗の両端電圧は、	Ｖ
③	抵抗に流れる電流は（ＬＥＤと等しいから)、	ｍＡ
④	抵抗値は（オーム則より)、	Ω

7.2. 答



番号	質問	値
①	赤色ＬＥＤに電流が流れたとき、順電圧は、	２Ｖ
②	電源が５Ｖだから、抵抗の両端電圧は、	３Ｖ
③	抵抗に流れる電流は（ＬＥＤと等しいから)、	１０ｍＡ

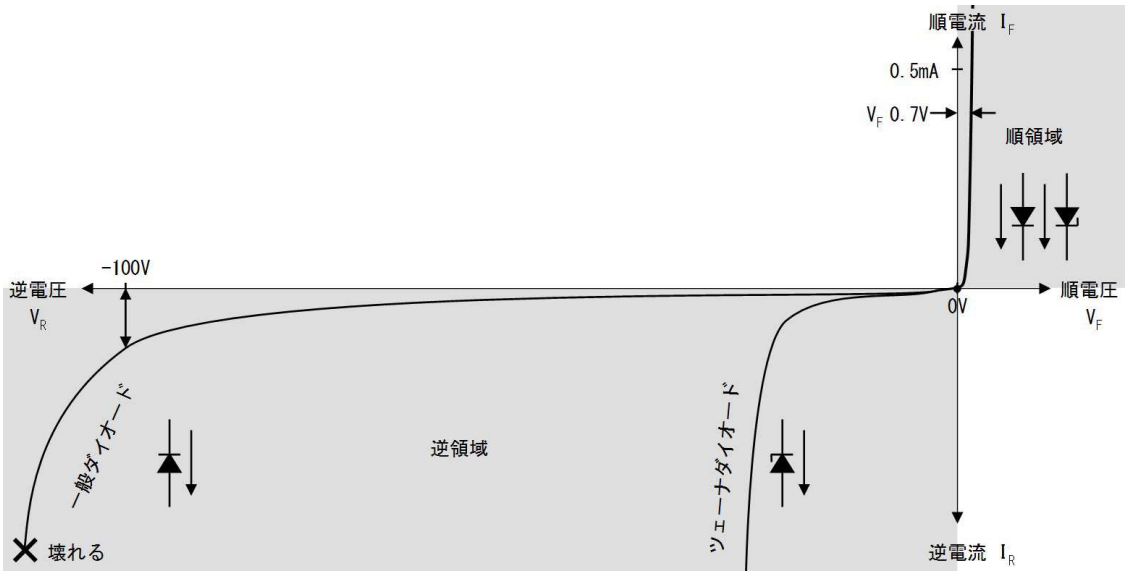
④	抵抗値は（オーム則より)、	３００Ω

８. ダイオードの逆電圧

ダイオードに順電流を流すと、下図グラフ右端に示すように、例えば０．７Ｖ程度の順電圧を生じました。（下図のグラフでは（幅広い電圧を表すために）電圧の目盛が左右に圧縮されています）

ところでダイオードに逆電圧を加えても逆電流は殆ど流れません。下図のグラフを詳しく見ると、逆電圧を加えても、極僅かな電流が漏れるだけです。この電流が逆電流Ｉ$_R$です。

そして、逆電圧をどんどん高めて行くと、下図に「一般ダイオード」のグラフで示すように、とうとうダイオードの耐電圧を超えて電流が流れ始めます。この現象をブレークダウン（降伏）と呼びます。ブレークダウンを起こすと激しく発熱するため、下図左下に×印で示すように破損します。このような破損に至る可能性がある逆電圧が「逆電圧の絶対最大定格」です。

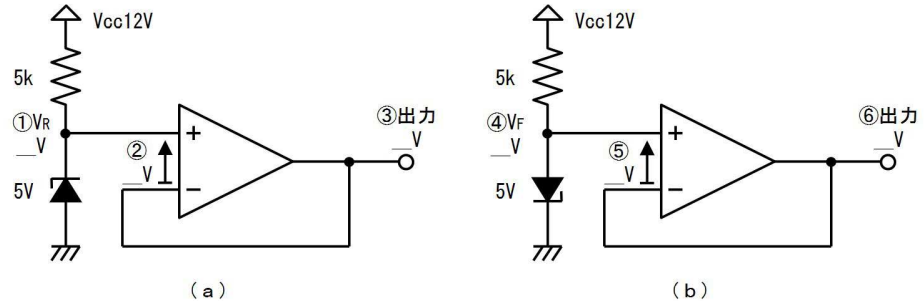


また、低い（正確な）電圧で安全にブレークダウンするように製造したダイオードが、上図に示す「ツェーナダイオード」です。ツェーナダイオードは低い電圧でブレークダウンする以外は一般ダイオードと殆ど同じ性質を持っています。

上図から分るようにツェーナダイオードから所定の電圧を取り出す場合は、逆電圧を加えます。順電圧を加えると一般ダイオードと同じ０．７Ｖの電圧が得られるだけです。

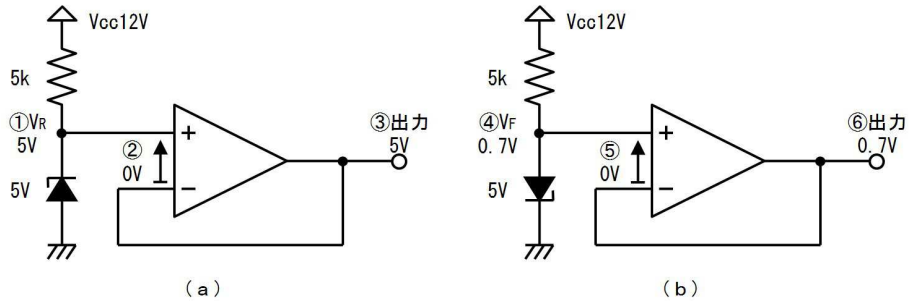
８.１. 練習

ツェーナ電圧５Ｖのツェーナダイオードを使って下図の回路を作りました。それれぞれの回路の出力電圧を、下図を参考に下表に書き込みながら求めてください。



番号	質問	値
①	ツェーナダイオードの両端電圧は、 （ツェーナダイオードには逆電圧が加わっているから、）	V
②	＋入力と－入力の間の電圧は、 （負帰還が掛かっているから、）	V
③	出力電圧は、	V
④	ツェーナダイオードの両端電圧は、 （ツェーナダイオードには順電圧が加わっているから、）	V
⑤	＋入力と－入力の間の電圧は、 （負帰還が掛かっているから、）	V
⑥	出力電圧は、	V

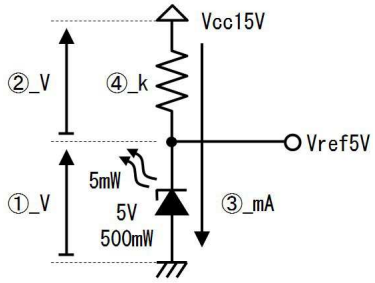
8.2. 答



番号	質問	値
①	ツェーナダイオードの両端電圧は、 （ツェーナダイオードには逆電圧が加わっているから、）	５V
②	＋入力と－入力の間の電圧は、 （負帰還が掛かっているから、）	０V
③	出力電圧は、	５V
④	ツェーナダイオードの両端電圧は、 （ツェーナダイオードには順電圧が加わっているから、）	０．７V
⑤	＋入力と－入力の間の電圧は、 （負帰還が掛かっているから、）	０V
⑥	出力電圧は、	０．７V

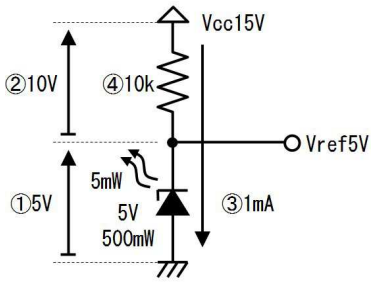
8.3. 練習

ツェーナ電圧５Ｖ、定格損失５００mWのツェーナダイオードを５mWで動作させ、５Ｖの基準電圧を作ります。下表に記入しながら抵抗の値を決定してください。



番号	質問	値
①	ツェーナダイオードのブレークダウン電圧は、	Ｖ
②	抵抗の両端電圧は、	Ｖ
③	ツェーナダイオードの発熱を５mWとするためには、ツェーナダイオードの逆電流は、	mA
④	抵抗の値は、	kΩ

8.4. 答

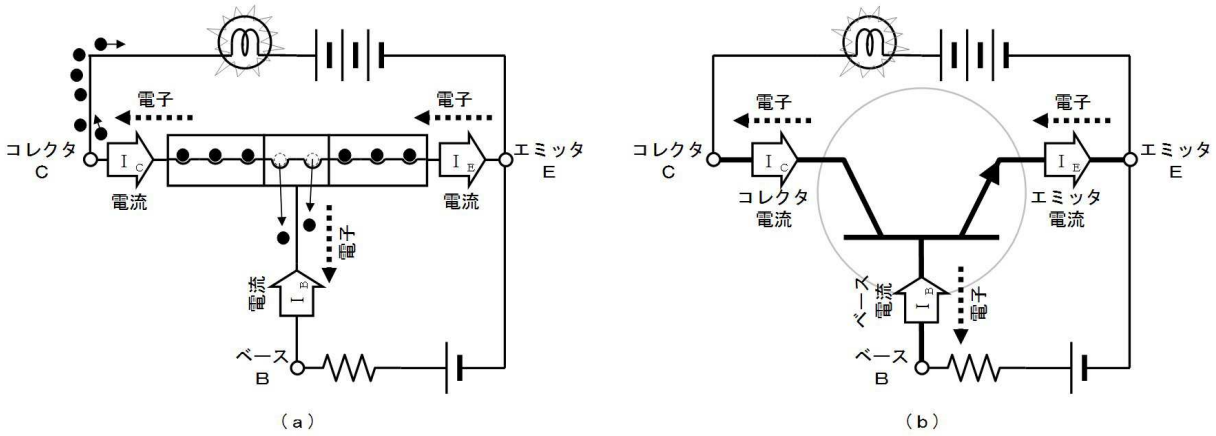


番号	質問	値
①	ツェーナダイオードのブレークダウン電圧は、	５Ｖ
②	抵抗の両端電圧は、	１０Ｖ
③	ツェーナダイオードの発熱を５mWとするためには、ツェーナダイオードの逆電流は、	１mA
④	抵抗の値は、	１０kΩ

9. トランジスタ

トランジスタにはいくつかの種類があります。ここでは、理解し易い「バイポーラ・トランジスタ」を「トランジスタ」と呼んで取り上げます。バイポーラで考え方を掴めば、他のトランジスタも（ひと工夫することで）容易に理解できます。

さて、すでに「ＮＰＮ接合の増幅作用」で説明した下図の素子がトランジスタです。下図（ａ）は模式図で、下図（ｂ）は図記号で、トランジスタを示します。

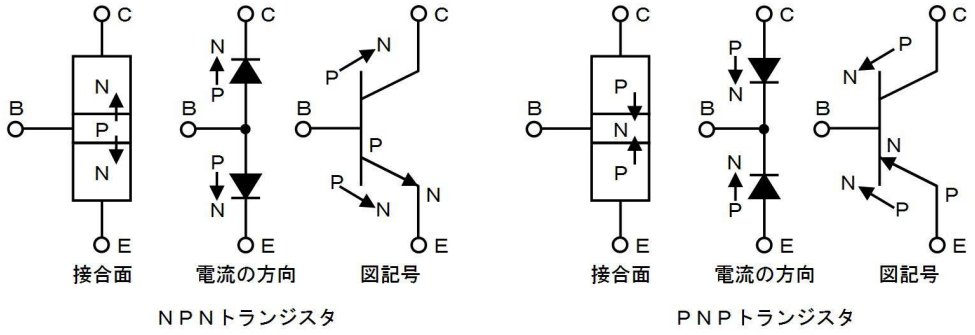


上図（ａ）の太い点線矢印で示すとおり、（ＮＰＮ型の）トランジスタでは、ベースから電子を引き抜くと、コレクタに沢山の電子が流れ出て行きました。

普通は「電子が流れる」とは言わず「電流が流れる」と説明します。電流は電子と反対の方向に流れますから、トランジスタの働きは、上図にブロック矢印で示すとおり「ベースに電流を流し込むと、コレクタに大量に電流が流れ込む」と説明できます。

１０. ＮＰＮとＰＮＰ

トランジスタには既に説明したＮＰＮ型（下図左側）の他にＰＮＰ型（下図右側）があります。

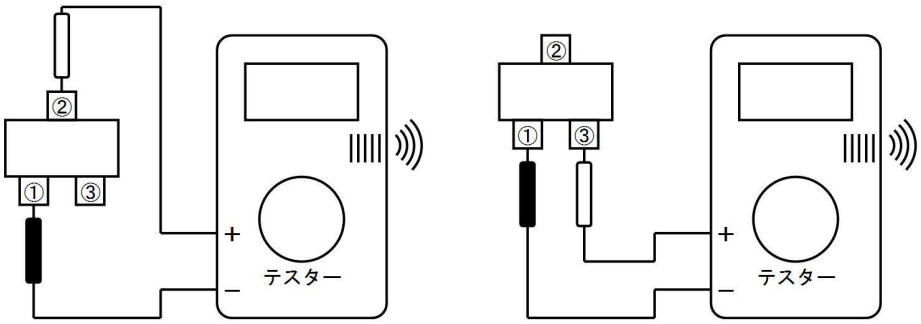


接合面ではＰ型からＮ型に向かって電流が流れます。ですから、上図で分るように、ダイオードでもトランジスタでも、図記号の三角や矢印はＰ→Ｎの向きに描かれます。

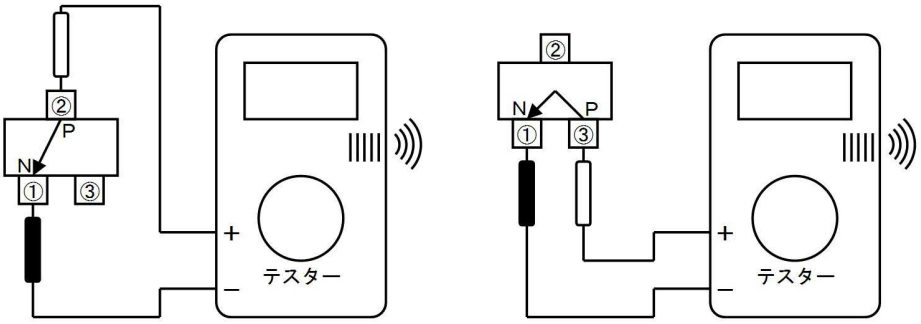
上図左側で分るように、ＮＰＮトランジスタでは、ベース→エミッタ、ベース→コレクタの２方向に電流が流れます。逆にＰＮＰトランジスタでは、ベース←エミッタ、ベース←コレクタの２方向に電流が流れます。この性質を使えば、導通を検査することで、ＮＰＮかＰＮＰかを、また、どの端子がベースであるか、を見つけることができます。

１０.１. 練習

チップトランジスタをテスタで導通検査したところ、下図の２つの接続で電流が流れました。白いプローブが＋側とすれば、ベース端子は①②③のどれですか。また、このトランジスタのタイプはＮＰＮですか、ＰＮＰですか。



１０.２. 答



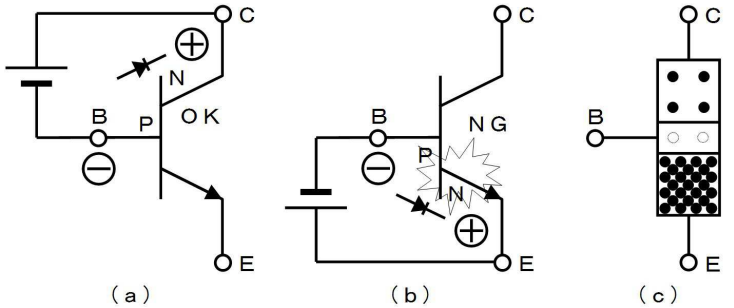
端子①は、②からも、③からも電流が流れ込んでいるからベースである。ベースに電流が流れ込むためには（接合面に電流の流れる方向は、Ｐ→Ｎであると考えると）コレクタとエミッタがＰ型、ベースがＮ型半導体であるから、このトランジスタはＰＮＰ型である。

１１. エミッタの特徴とＢ－Ｅ間の逆電圧

トランジスタには２つの接合面があり、ＮＰＮトランジスタの場合は、Ｂ→ＣとＢ→Ｅの向きに電流が流れました。もちろんその逆には電流が殆ど流れません。しかし注意することがあります。

下図（ａ）に示すとおり、コレクタとベースの間（Ｃ－Ｂ間）に逆電圧を掛けても僅かな電流が漏れるだけで、問題ありません。

ところが、下図（ｂ）に示すように、エミッタとベースの間（Ｂ－Ｅ間）に逆電圧を掛けると、電圧が低い場合は微かな電流しか漏れず問題ありませんが、電圧が５Ｖ程度になると（ブレークダウンが発生し）電流が流れてトランジスタが壊れてしまします。



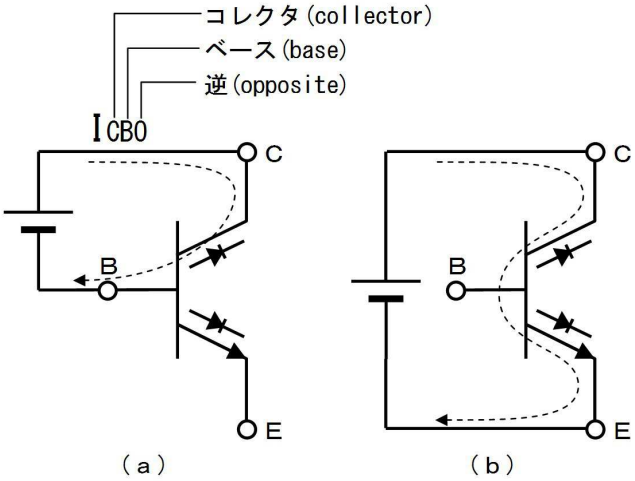
このように、Ｂ－Ｅ間のＰＮ接合は極めて逆電圧に弱いので、回路を考えるときも注意が必要です。

実はこの弱点は、トランジスタの性能（増幅作用）を高めるために生じています。というのも、トランジスタの増幅作用を高めるには、ベースに穴（キャリア）が出来たとき、できるだけ多くの電子がエミッタから飛び込んで来なければいけません。そのために、上図（ｃ）のように、エミッタには（普通のダイオードに比べて）極めて沢山の電子を含ませてあります。あまりにも多くの電子が含まれている

ため、Ｂ－Ｅ間の空乏層は絶縁性が悪くなり、逆電圧が大きくなると電流が流れてしまうのです。

１２．コレクタの特徴とＣ－Ｂ間の逆電圧

逆に、上図右側に示すように、コレクタに含まれている電子は少ないので、Ｃ－Ｂ間はダイオードと同様に、逆電圧を加えても平気で、逆電圧を加えて使用します。とはいえ、これもダイオードと同様に、下図（ａ）に示すように、僅かな逆電流が漏れます。この逆電流はトランジスタの動作に悪影響を与える場合があるので、I_{CBO}と呼んでデータシートに値が記載されています。

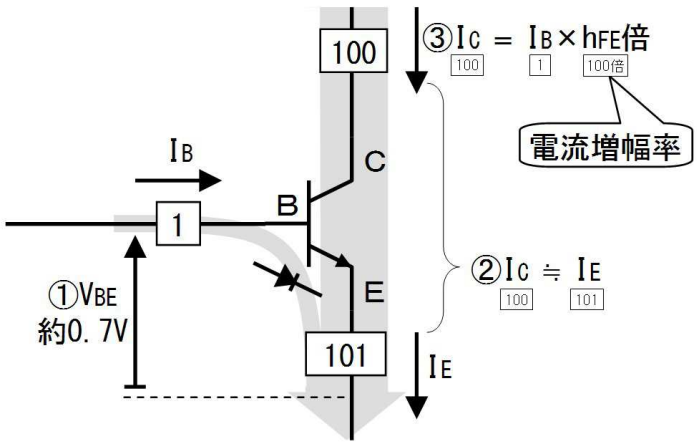


（ａ）　　（ｂ）

また、上図（ｂ）のように、（ベースに何も接続せず）Ｃ－Ｅ間に電圧を加えた場合もI_{CBO}が流れます。コレクタからベースに流れたI_{CBO}は、ベースからエミッタに流れて行きます。

１３．トランジスタの重要な性質

下図はＮＰＮトランジスタのベースに僅かな（1の）電流を流したところ、コレクタに沢山の（１００の）電流が流れた様子です。



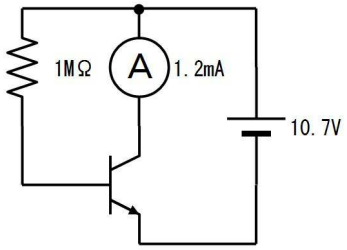
上図の中に大雑把な設計で利用する、下表に示す「トランジスタの重要な性質」が全て含まれています。

トランジスタの重要な性質

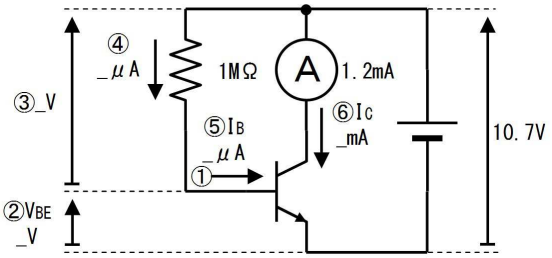
番号	ポイント	説明
①	V_{BE} ≒ ０．７Ｖ	ベースとエミッタの間は（耐圧は低いとは言え）ＰＮ接

		合ですから、ダイオードと同様に、電流が流れると（電流により多少の変化はあるものの）約０．７Ｖの電圧が発生します。
②	$I_C \fallingdotseq I_E$	上図ではI_Cが［１００］流れたとき、I_Eが［１０１］流れます。違いは１％です。大雑把な回路設計では両者が同じと考えて問題ありません。
③	$I_C = I_B \times h_{FE}$	ベースI_B電流が増幅されてコレクタ電流I_Cになります。上図では１００倍に増幅されていますが品種によって異なるので、この倍率（増幅率）をh_{FE}と呼びます。

１３.１．練習

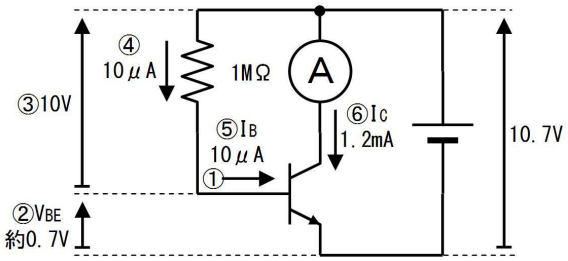


上図の回路で電流計が１．２ｍＡを示しました。トランジスタのh_{FE}は何倍ですか。下図を参考に、下表に書き込みながら考えてください。



番号	質問	値
①	１MΩがあるため、ベース電流は、 （選んでください）	流れている 流れていない
②	ベース電流が流れているとき、ベースエミッタ間電圧V_{BE}は、	約　　Ｖ
③	電源電圧が１０．７Ｖだから、１MΩの両端電圧は、	Ｖ
④	１MΩに流れる電流は、	μＡ
⑤	ベース電流は、	μＡ
⑥	コレクタ電流は、	ｍＡ
⑦	h_{FE}は、	倍

１３.２. 答



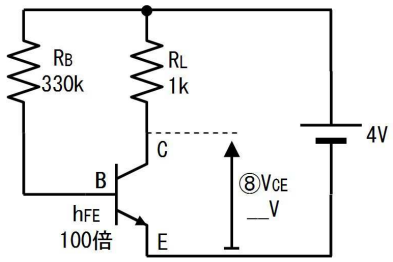
⑦hFE = 1.2mA ÷ 10μA = 120倍

番号	質問	値
①	１MΩがあるため、ベース電流は、	[流れている] 流れていない
②	ベース電流が流れているとき、V_{BE}は、	約０．７Ｖ
③	電源電圧が１０．７Ｖだから、１MΩの両端電圧は、	１０Ｖ
④	１MΩに流れる電流は、	１０μＡ
⑤	ベース電流は、	１０μＡ
⑥	コレクタ電流は、	１．２mＡ
⑦	h_{FE}は、	１２０倍

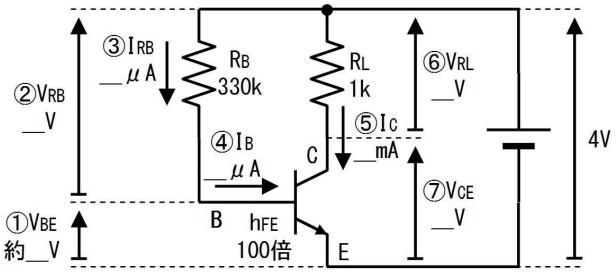
つまり、上図の簡単な回路でh_{FE}の値を知ることができます。（測定している間にトランジスタが発熱して、値が変動する場合があります）

このようにトランジスタを動作させるために、一定の電流を流すことを「トランジスタをバイアスする」と呼び、流している電流を「バイアス電流」と呼びます。端子の名前を付けて「コレクタバイアス電流」等と使うこともあります。もちろん「コレクタバイアス電流」は「コレクタ電流」と呼んでも間違いではありません。しかし、センサが発した信号等で、一時的にトランジスタに電流が流れた場合等は、（一定の電流がしばらく続いても）バイアス電流とは呼びません。

１３.３. 練習

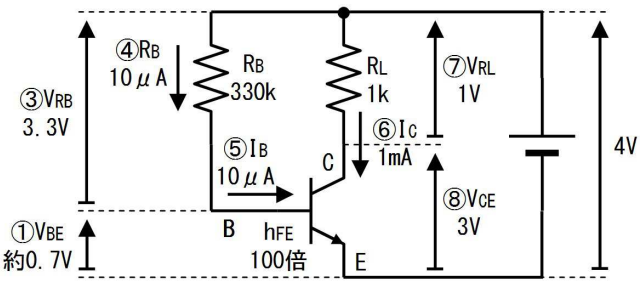


上図の回路のコレクタエミッタ間電圧（V_{CE}）を、下図を参考に、下表に書き込みながら求めて下さい。



番号	質問	値
①	トランジスタのV_{BE}は、	V
②	ベース抵抗R_Bの両端電圧V_{RB}は、	V
③	ベース抵抗R_Bに流れる電流I_{RB}は、	μA
④	ベース電流I_Bは、	μA
⑤	h_{FE}が１００だから、コレクタ電流I_Cは、	mA
⑥	負荷抵抗R_Lの両端電圧V_{RL}は、	V
⑦	コレクタエミッタ間電圧V_{CE}は、	V

１３.４. 答



番号	質問	値
①	トランジスタのV_{BE}は、	約０．７V
②	ベース抵抗R_Bの両端電圧V_{RB}は、	３．３V
③	ベース抵抗R_Bに流れる電流I_{RB}は、	１０μA
④	ベース電流I_Bは、	１０μA
⑤	h_{FE}が１００だから、コレクタ電流I_Cは、	１mA
⑥	負荷抵抗R_Lの両端電圧V_{RL}は、	１V
⑦	コレクタエミッタ間電圧V_{CE}は、	３V

※コレクタに接続された負荷抵抗R_Lは、コレクタ抵抗R_Cと呼ばれる場合もあります。

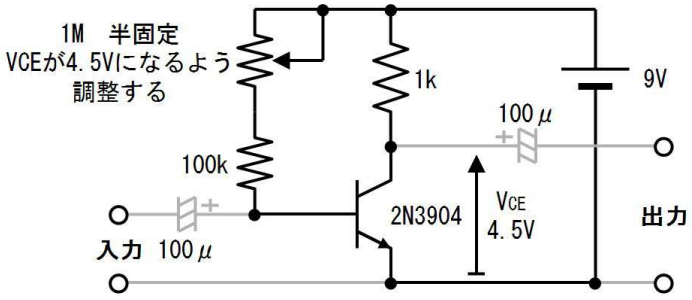
このように、電源から抵抗一本でベースに電流を流す方法を「固定バイアス」と呼びます。回路が簡単で、ベース電流は一定ですが、欠点があります。

欠点の１つ目は、回路の個体差です。同一品種のトランジスタでも、素子毎にh_{FE}が大きくばらつきます。（たとえば、７０～３００倍の範囲で「運任せ」という場合もあります）このため、コレクタ電流を一定にするには、ベース抵抗R_Bの値を１台１台の調整する必要があります。

欠点の２つ目は、h_{FE}は温度でも変化するので、電源を入れて素子が温まるとコレクタ電流が変化します。特に大きな電流を流す場合は発熱が大きく電流の変化が目立ちます。

従って、下図のようにベース電流を調節できるようにすれば（温度による電流の変化は多少あるけれど)、本練習の回路で信号を増幅することができます。電圧増幅率も１５０倍程度とかなり大きいです。

（増幅率の求め方は後で説明します）



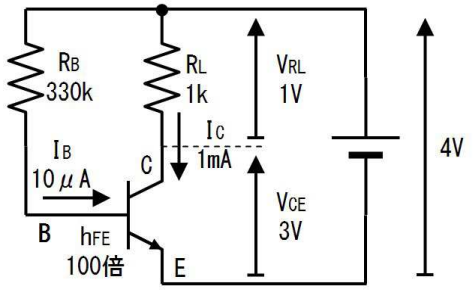
とはいえ、このような調節は現実的ではありませんから、後で説明するような、h_{FE}がバラついても、その影響を受けずに動作する回路が用いられます。

１４. 定電流特性

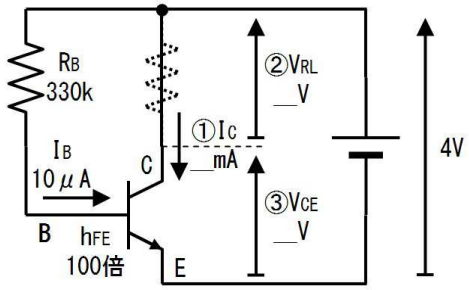
トランジスタには抵抗と違い、オーム則には従わず、電圧が変化しても一定の電流を流そうとする性質（定電流特性）があります。この定電流特性は様々な半導体素子で現れます。

１４.１. 練習

先に演習した下図（ａ）の回路では、コレクタ電流I_Cが１ｍＡ流れていました。この回路の負荷抵抗R_Lをショートし、下図（ｂ）の回路に変更すると、コレクタ電流I_Cとコレクタエミッタ間電圧V_{CE}はどのように変化しますか。下表に記入しながら求めてください。



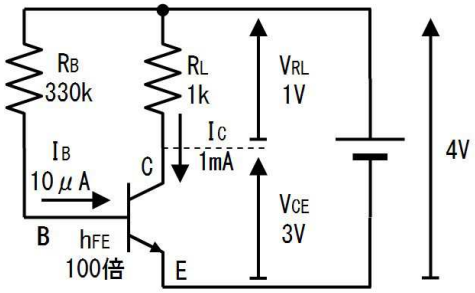
（ａ）



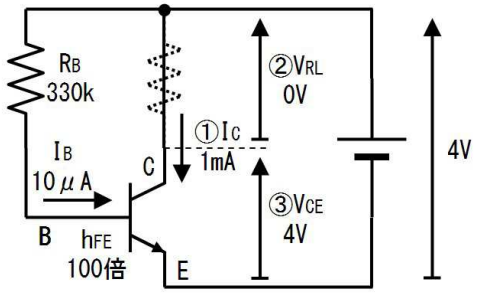
（ｂ）

番号	質問	値
①	ベース電流とh_{FE}から、I_Cは、	ｍＡ
②	ショートしたV_{RL}の両端電圧は、	Ｖ
③	電源電圧４Ｖだから、V_{CE}は、	Ｖ

１４.２. 答



（ａ）

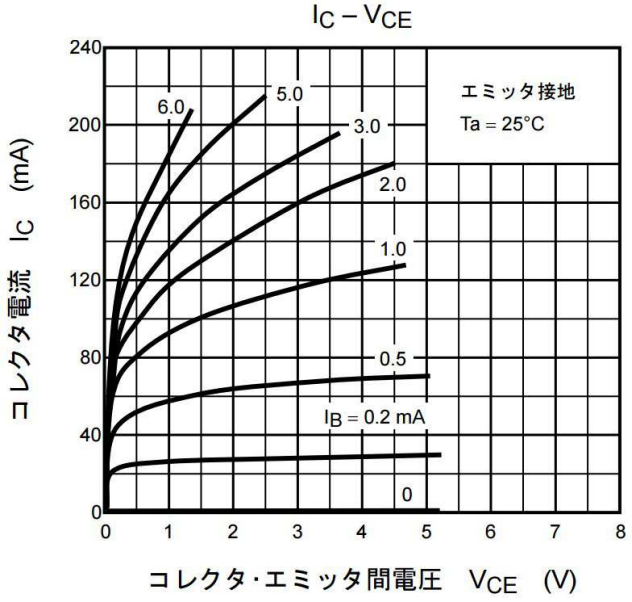


（ｂ）

番号	質問	値
①	ベース電流とh_{FE}から、I_Cは、	１mA
②	ショートしたV_{RL}の両端電圧は、	０V
③	電源電圧４Vだから、V_{CE}は、	４V

このように、負荷（R_L）が変化し、V_{CE}が変化（３V→４V）しても、流れる電流（I_C）は変化せず一定です。このような性質を「定電流特性」と呼びます。

下図に示すデータシートのV_{CE}－I_C特性図はこの様子を表したグラフで、様々なベース電流で、V_{CE}を変化させたときのI_Cとの関係をグラフに描いたものです。



たとえば、上図下から２番目のI_B＝０．２mAのグラフでは、V_{CE}が０．５V～５Vの範囲でグラフが水平で、I_Cは３０mA程度で殆ど変化がありません。この水平な（電圧が変わっても電圧が変わらない）部分が定電流特性を示しています。但し、I_B＝３mAの例で分るように、コレクタ電流が電流が大きくなると定電流特性が不完全となって、グラフが傾きます。

１５．h_{FE}分類

h_{FE}の値は同じ品種でも大きく異なります。下表のように、例えば２Ｎ３９０４をI_Cを１mAので使用したときのh_{FE}は７０～３００倍と、最大４倍以上の開きがあります。

Electrical Characteristics T_a = 25°C unless otherwise noted

2N3904 / MMBT390

Symbol	Parameter	Test Condition	Min.	Max.	Units
ON CHARACTERISTICS*					
h_{FE}	DC Current Gain	I_C = 0.1mA, V_{CE} = 1.0V	40		
		I_C = 1.0mA, V_{CE} = 1.0V	70		
		I_C = 10mA, V_{CE} = 1.0V	100	300	
		I_C = 50mA, V_{CE} = 1.0V	60		
		I_C = 100mA, V_{CE} = 1.0V	30		

このようなh_{FE}の大きなバラツキを緩和するために、品種やメーカーによっては、下表のように、品番に「h_{FE}分類」を追加して、分類（選別）して販売している場合もあります。

電気的特性 (Ta = 25°C)

項目	記号	測定条件	最小	標準	最大	単位
コレクタしゃ断電流	I_{CBO}	V_{CB} = 60 V, I_E = 0	—	—	0.1	μA
エミッタしゃ断電流	I_{EBO}	V_{EB} = 5 V, I_C = 0	—	—	0.1	μA
直流電流増幅率	h_{FE} (注)	V_{CE} = 6 V, I_C = 2 mA	70	—	700	—
コレクタ・エミッタ間飽和電圧	$V_{CE\ (sat)}$	I_C = 100 mA, I_B = 10 mA	—	0.1	0.25	V
トランジション周波数	f_T	V_{CE} = 10 V, I_C = 1 mA	80	—	—	MHz
コレクタ出力容量	C_{ob}	V_{CB} = 10 V, I_E = 0, f = 1 MHz	—	2.0	3.5	pF
雑音指数	NF	V_{CE} = 6 V, I_C = 0.1 mA, f = 1 kHz, R_G = 10 kΩ	—	1	10	dB

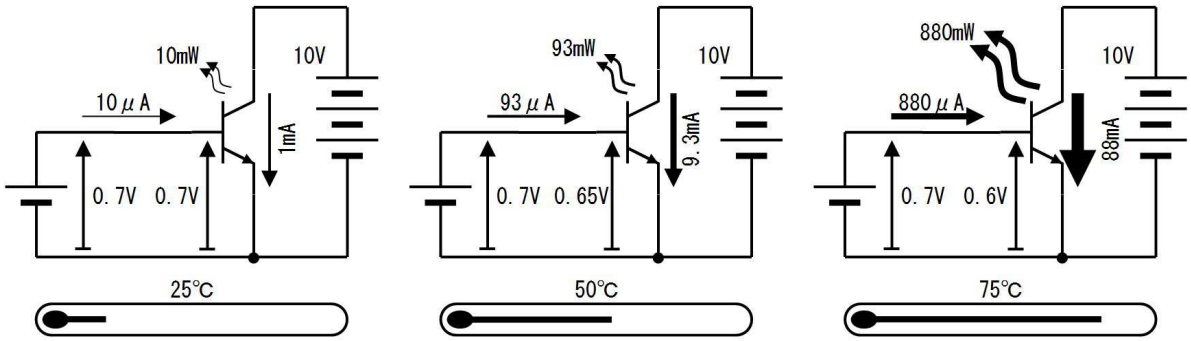
注: h_{FE} 分類　O (O): 70~140, Y (Y): 120~240, GR (G): 200~400, BL (L): 350~700
( ) 内は現品表示記号

上表欄外に記載の「h_{FE}分類」がこれを表し、たとえば２ＳＣ２７１２－Ｙならh_{FE}分類は「Ｙ」で、h_{FE}の値は１２０～２４０倍と、２倍程度の開きに収まるように分類されています。

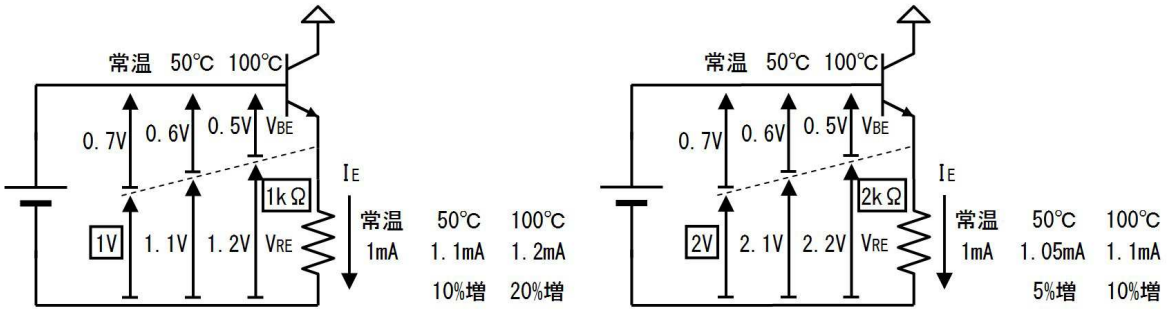
分類の名前は、Ｏ（オレンジ）、Ｙ（ホワイト）、ＧＲ（グリーン）、ＢＬ（ブルー）と色に関係している場合があります。手作業で分類していた時代に、細筆を使って色ペンキで小さな点を付け、分類を表示していた名残です。

１６. エミッタ電流の安定化

下図のように、ベースに一定の電圧を加える回路では、（V_{BE}が温度で低下するため）温度が上昇するとベース電流やエミッタ電流が増加します。



一旦電流が増えると、「（増えた電流で）トランジスタが発熱して温度が上昇し、（V_{BE}が低下して）さらに電流が増える」という連鎖が発生し、ついにはトランジスタが破損します。これを熱暴走と呼びます。熱暴走は下図のように、エミッタに抵抗を挿入すると防止できます。



上図左ではエミッタに１ｋΩを挿入し（抵抗の両端電圧を１Ｖとして）５０度の温度上昇で、電流の増加を１０％増に抑えています。同図右では、２ｋΩを挿入し（抵抗の両端電圧を２Ｖとして）電流の増加を５％に抑えています。

このように、エミッタ抵抗を大きくして、抵抗の両端電圧を高くすると、エミッタ電流の安定性が高まります。しかしエミッタ抵抗を大きくすると増幅率が下がりますから、小さな電圧を扱う回路では、

エミッタ抵抗の両端電圧を１Ｖ程度に選ぶのが一般的です。

この回路ではエミッタ電流I_Eが増加すると（エミッタ抵抗の両端電圧が上昇して）ベース電流I_Bが減少します。つまり、電流I_E増加→電流I_B減少、という負帰還で（バイアス電流を）安定させているので「電流帰還バイアス回路」と呼びます。

「電流帰還バイアス回路」は日本独自の呼び名で、英語では「エミッタ・デジェネレーション」（エミッタの抑制）と別の名前で呼ばれます。日本語を直訳して「カレント・フィードバック・バイアス・サーキット」と言っても、まるで通じません。

さらにこの回路では、h_{FE}が変動しても（I_Bは変動しますが）I_EやI_Cは殆ど変化しません。なぜなら、h_{FE}が大きくてI_Eが多く流れると、エミッタ抵抗の両端電圧が増えて、ベース電流が減るからです。

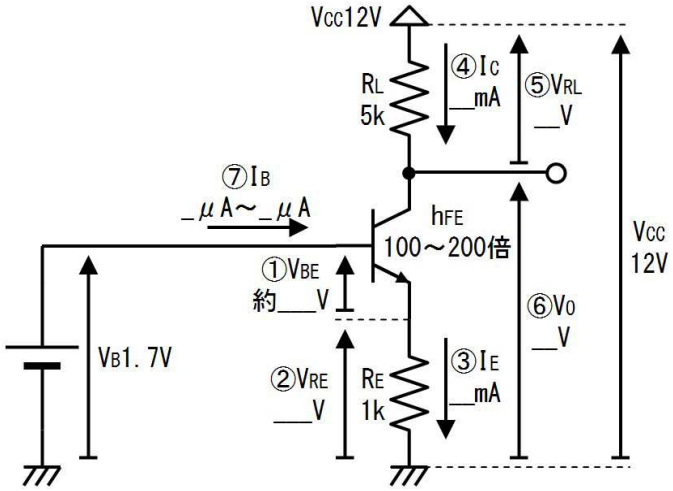
つまり、エミッタ抵抗を挿入する事によって、V_{BE}の温度変化やh_{FE}のバラツキの双方を抑制して、安定したエミッタ電流を流すことができます。

１７. エミッタ抵抗

トランジスタは一定の電流が流れるように工夫して、安定動作させます。既に説明したベースに一定の電流を流す方法では、h_{FE}のばらつきでエミッタ電流もばらつく欠点がありました。

そこで下図のように、ベースに一定の電圧を加え、エミッタに抵抗R_Eを取り付けると（増幅率は下がりますが）（温度でV_{BE}が変化しても、h_{FE}のばらついても）安定したエミッタ電流を流すことができました。

この回路のように、ベースに加える一定の電圧を、ベースバイアス電圧と呼びます。では、この回路について検討します。



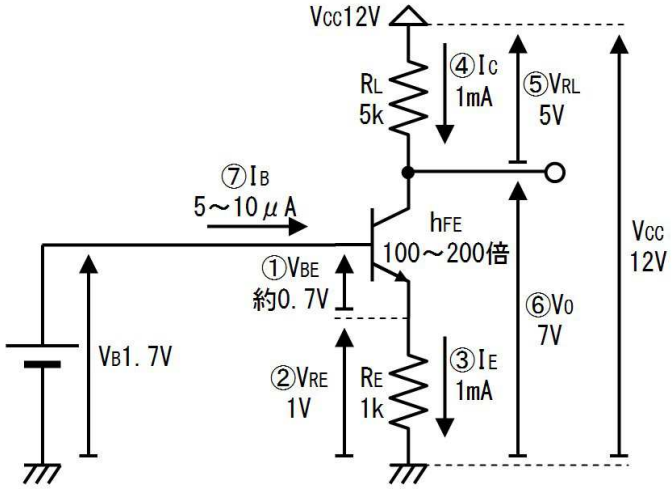
１７.１. 練習

上図を見ながら下表に記入して、各部の電流、電圧を求めて下さい。

番号	質問	値
①	トランジスタのV_{BE}は、 （トランジスタの重要な性質①より）	V
②	エミッタ抵抗R_Eのの両端電圧V_{RE}は、	V
③	エミッタ電流I_Eは、	A

④	コレクタ電流I_Cは、 （「トランジスタの重要な性質②」によれば）	A
⑤	負荷抵抗R_Lの両端電圧V_{RL}は、	V
⑥	電源電圧が１２Ｖだから、出力電圧V_Oは、	V
⑦	ベース電流I_Bの範囲は、 （「トランジスタの重要な性質③に」によれば）	μA～ μA

１７.２. 答

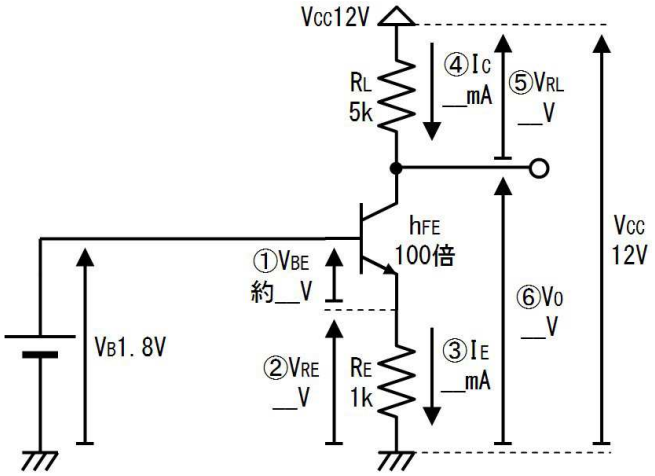


番号	質問	値
①	トランジスタのV_{BE}は、 （トランジスタの重要な性質①より）	約０．７Ｖ
②	エミッタ抵抗R_Eのの両端電圧V_{RE}は、	１Ｖ
③	エミッタ電流I_Eは、	１ｍA
④	コレクタ電流I_Cは、 （「トランジスタの重要な性質②」によれば）	１ｍA
⑤	負荷抵抗R_Lの両端電圧V_{RL}は、	５Ｖ
⑥	電源電圧が１２Ｖだから、出力電圧V_Oは、	７Ｖ
⑦	ベース電流I_Bの範囲は、 （「トランジスタの重要な性質③に」によれば）	５μA～ １０μA

このように、エミッタ抵抗R_Eを追加し、ベースに（一定の電流を流すのではなく）一定の電圧V_Bを加えることで、V_{BE}の温度変化やh_{FE}のバラツキの影響をあまり受けずに、安定したコレクタ電流を流すことができます。

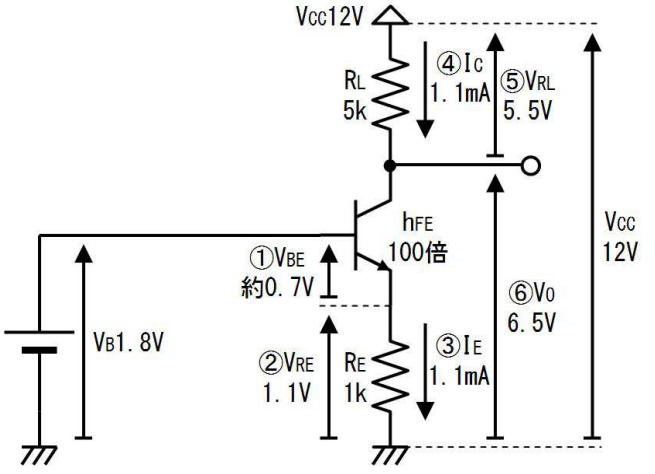
１７.３. 練習

下図は上で練習した回路の、ベース電圧V_Bを０．１Ｖだけ増やしています。ベース電圧増加の影響による出力電圧V_Oの変化を、下表に書込みながら求めてください。



番号	質問	値
①	トランジスタのV_{BE}は （トランジスタの重要な性質①より）	V
②	エミッタ抵抗R_Eのの両端電圧V_{RE}は、	V
③	エミッタ電流I_Eは、	mA
④	コレクタ電流I_Cは、 （「トランジスタの重要な性質②」によれば）	mA
⑤	負荷抵抗R_Lの両端電圧V_{RL}は、	V
⑥	電源電圧が１２Ｖだから、出力電圧V_Oは、	V
⑦	ベース電圧V_Bが１．７Ｖから、１．８Ｖに、 ０．１Ｖ増加した影響による、出力電圧V_Oの変化は、	－ V
⑧	入力電圧の変化は何倍になって出力電圧に現れているか。（この回路の増幅率は）	－ 倍
⑨	負荷抵抗R_L÷エミッタ抵抗R_Eの値は、	

１７.４. 答

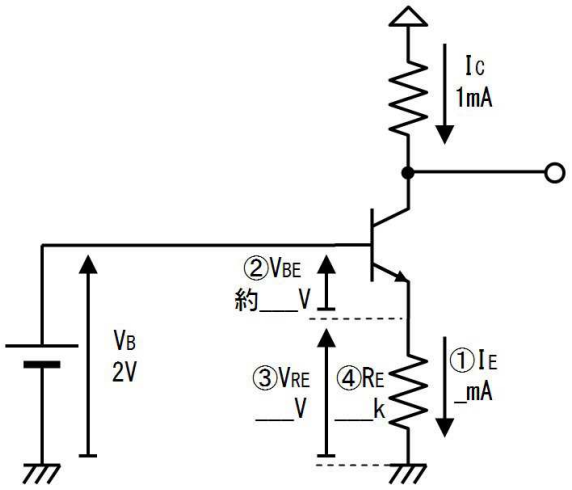


番号	質問	値
①	トランジスタのV_{BE}は、 （トランジスタの重要な性質①より）	約０．７Ｖ
②	エミッタ抵抗R_Eのの両端電圧V_{RE}は、	１．１Ｖ
③	エミッタ電流I_Eは、	１．１ｍＡ
④	コレクタ電流I_Cは、 （「トランジスタの重要な性質②」によれば）	１．１ｍＡ
⑤	負荷抵抗R_Lの両端電圧V_{RL}は、	５．５Ｖ
⑥	電源電圧が１２Ｖだから、出力電圧V_Oは、	６．５Ｖ
⑦	ベース電圧V_Bが１．７Ｖから、１．８Ｖに、 ０．１Ｖ増加した影響による、出力電圧V_Oの変化は、	－０．５Ｖ
⑧	入力電圧の変化は何倍になって出力電圧に現れているか。（この回路の増幅率は）	－５倍
⑨	負荷抵抗R_L÷エミッタ抵抗R_Eの値は、 ５ｋ÷１ｋ＝５	５

このように、エミッタ抵抗のある回路の増幅率（の目安）は、負荷抵抗R_L÷エミッタ抵抗R_Eで求めることができます（コレクタ抵抗R_C÷エミッタ抵抗R_Eで求めることができます）。

１７.５. 練習

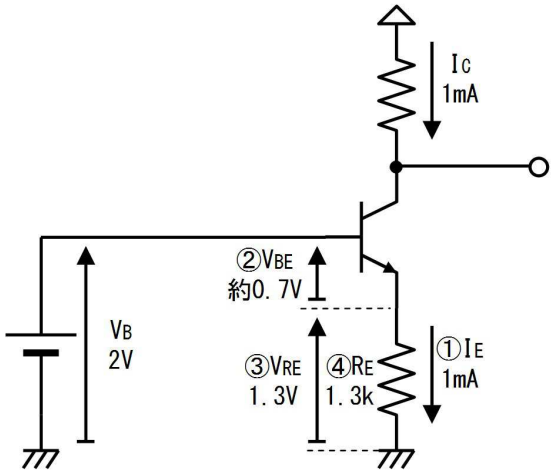
下図の回路を、コレクタ電流I_Cを１ｍＡで動作させたいです。（「コレクタ電流の動作点を１ｍＡにしたい」「コレクタバイアス電流を１ｍＡにしたい」とも言われます）下表に書き込みながら、エミッタ抵抗I_Eの値を決定してください。



番号	質問	値
①	エミッタ電流は、 （「トランジスタの重要な性質②」によれば）	ｍＡ

②	ベースエミッタ間電圧V_{BE}は、 （トランジスタの重要な性質①より）	V
③	エミッタ抵抗の両端電圧V_{RE}は、	V
④	エミッタ抵抗の値R_Eは、	kΩ

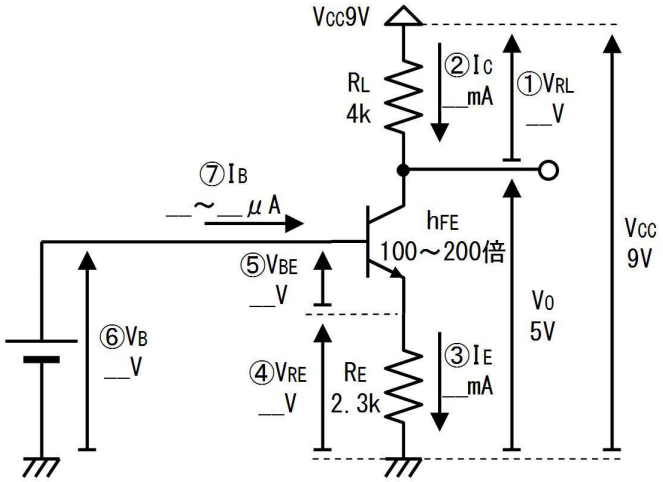
17.6. 答



番号	質問	値
①	エミッタ電流は、 （「トランジスタの重要な性質②」によれば）	１mA
②	ベースエミッタ間電圧V_{BE}は、 （トランジスタの重要な性質①より）	約０．７V
③	エミッタ抵抗の両端電圧V_{RE}は、	１．３V
④	エミッタ抵抗の値R_Eは、	１．３kΩ

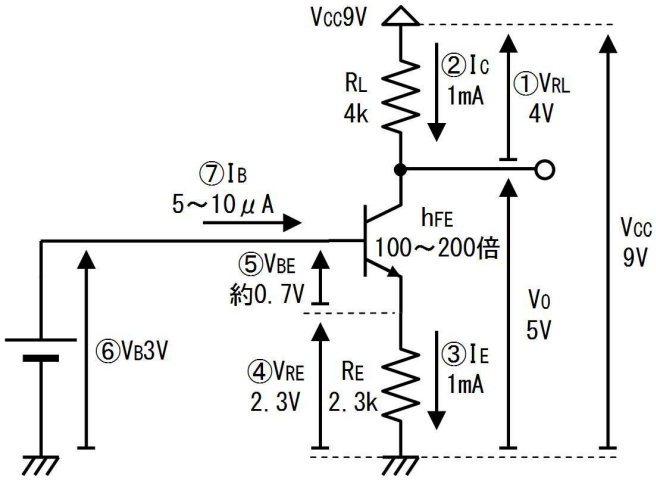
17.7. 練習

下図の回路で出力電圧V_Oが５Vとなるように、下表に書き込みながら、ベース電圧V_Bを決定してください。またベース電流I_Bの値の範囲を求めて下さい。



番号	質問	値
①	負荷抵抗R_Lの両端電圧は、（V_{CC}とV_Oから）	V
②	コレクタ電流I_Cは、（オーム則より）	mA
③	エミッタ電流I_Eは、 （トランジスタの重要な性質②によれば、）	mA
④	エミッタ抵抗の両端電圧V_{RE}は、（オーム則より）	V
⑤	ベースエミッタ間電圧V_{BE}は、 （トランジスタの重要な性質①より）	V
⑥	ベース電圧V_Bは、（キルヒ電圧則より）	V
⑦	ベース電流I_Bは、 （トランジスタの重要な性質③より）	μA～　　μA

17.8. 答



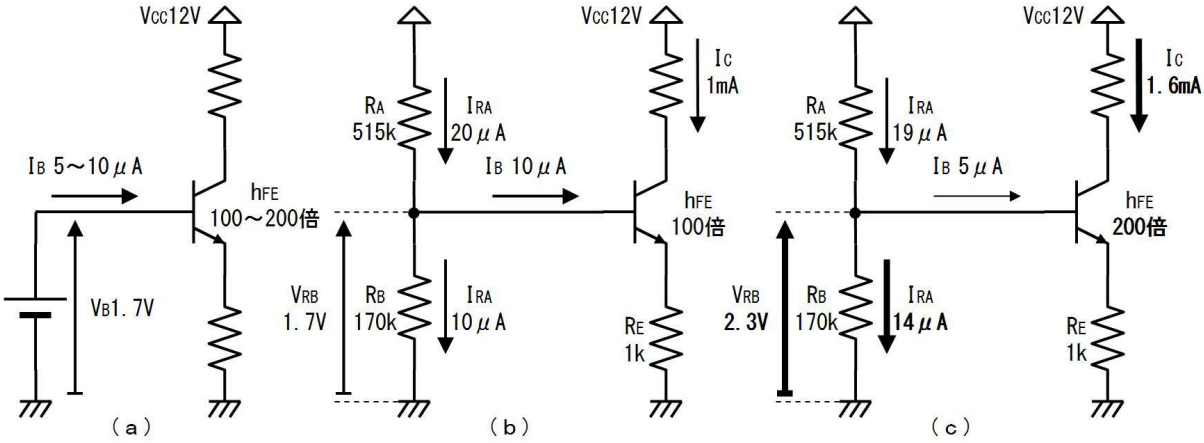
番号	質問	値
①	負荷抵抗R_Lの両端電圧は、（V_{CC}とV_Oから）	４V
②	コレクタ電流I_Cは、（オーム則より）	１mA
③	エミッタ電流I_Eは、 （トランジスタの重要な性質②によれば、）	１mA
④	エミッタ抵抗の両端電圧V_{RE}は、（オーム則より）	２．３V
⑤	ベースエミッタ間電圧V_{BE}は、 （トランジスタの重要な性質①より）	約０．７V
⑥	ベース電圧V_Bは、（キルヒ電圧則より）	３V
⑦	ベース電流I_Bは、（トランジスタの重要な性質③より）	５μA～１０μA

	１mA／２００＝５μＡ　１mA／１００＝１０μＡ	

１８. 分圧バイアス

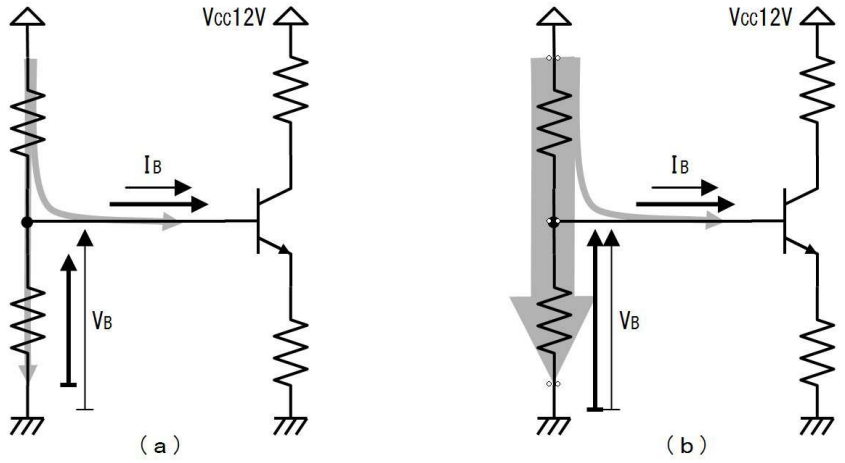
下図（ａ）のように、ベースに電圧を加えて電流帰還バイアス回路を利用することで、V_{BE}やh_{FE}が変化しても、コレクタ電流を一定に保つことができました。しかしこの回路はバイアス電圧に電池を使用しており、（割高で、消耗するため）実用的ではありません。

そこで下図（ｂ）のように、抵抗を使った分圧回路で１．７Ｖを発生させれば、電池を使わずに済みます。下図の回路は、ベース電流が１０μＡ流れることも考慮して、ベースに１．７Ｖのバイアス電圧が加わるように工夫し、また、R_AやR_Bの値は出来るだけ大きくし、回路の消費電流も節約したつもりです。



ところがh_{FE}には２倍以上のばらつきがあるため、例えばh_{FE}が上図（ｂ）の１００倍から、上図（ｃ）の２００倍に変わった場合は、ベース電流が１０μＡから、５μＡに減少し、その結果、ベースに加わるバイアス電圧が１．７Ｖから、２．３Ｖと大きくなってしまいます。

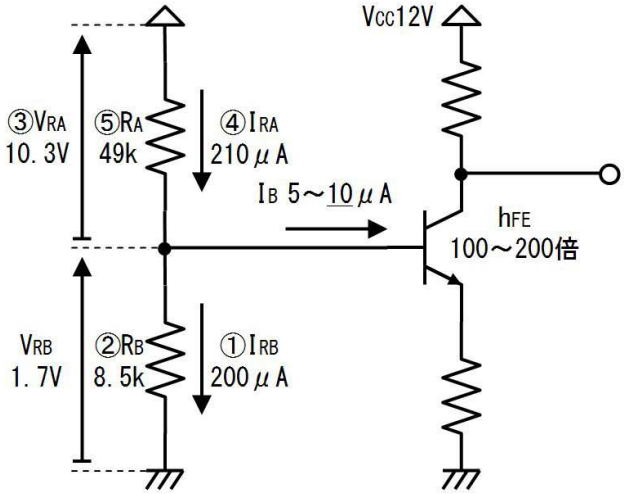
このように、下図（ａ）のようにR_A、R_Bに流す電流を過度に節約すると、ベース電流の（h_{FE}による）変化で（R_A、R_Bの電流が変化して）ベースの電圧が変化してしまいます。そこで下図（ｂ）に示すように、R_A、R_Bにはベース電流の１０倍～１００倍程度の十分な電流を流し、ベース電流が変化してもR_A、R_Bの電流が影響を受けないようにします。（大きな川なら、少しぐらい水を汲んでも、川の流れに影響しないのと同じです）



１８.１. 練習

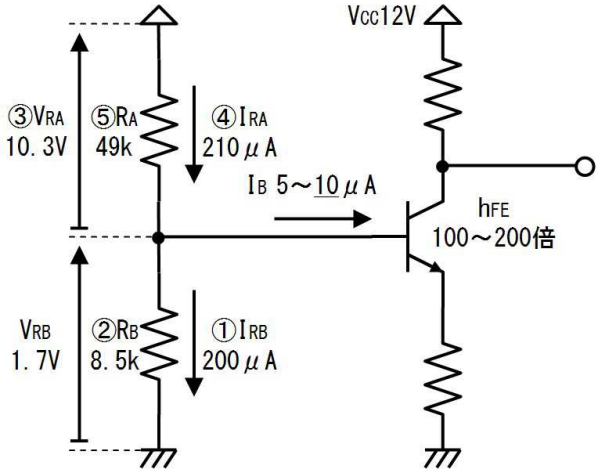
下図の回路で、分圧回路の電流I_{RB}を、ベース電流の最大値の２０倍に設定して、ベースバイアス電

圧を１．７Ｖ与えます。下表に記入しながら、R_AとR_Bの値を決定して下さい。



番号	質問	値
①	I_Bの最大値の２０倍に設定するから、I_{RB}は、	μＡ
②	V_B（V_{RB}）を１．７Ｖにするために、R_Bは、	ｋΩ
③	電源電圧が１２Ｖだから、V_{RA}は、	Ｖ
④	I_{RA}は、	μＡ
⑤	R_Aは、	ｋΩ

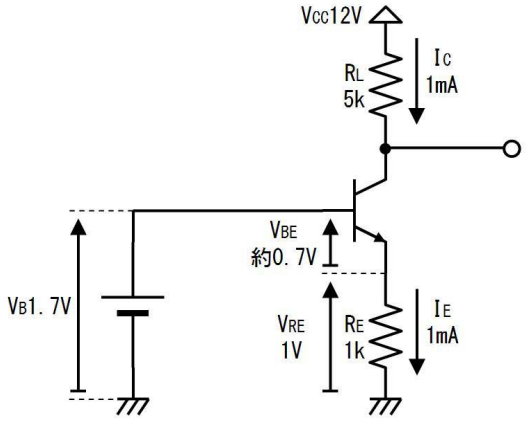
１８.２. 答



番号	質問	値
①	I_Bの最大値の２０倍に設定するから、I_{RB}は、	２００μＡ
②	V_B（V_{RB}）を１．７Ｖにするために、R_Bは、	８．５ｋΩ
③	電源電圧が１２Ｖだから、V_{RA}は、	１０．３Ｖ
④	I_{RA}は、 （I_Bを無視し、I_{RB}＝I_{RA}＝２００μＡとしても良い）	２１０μＡ

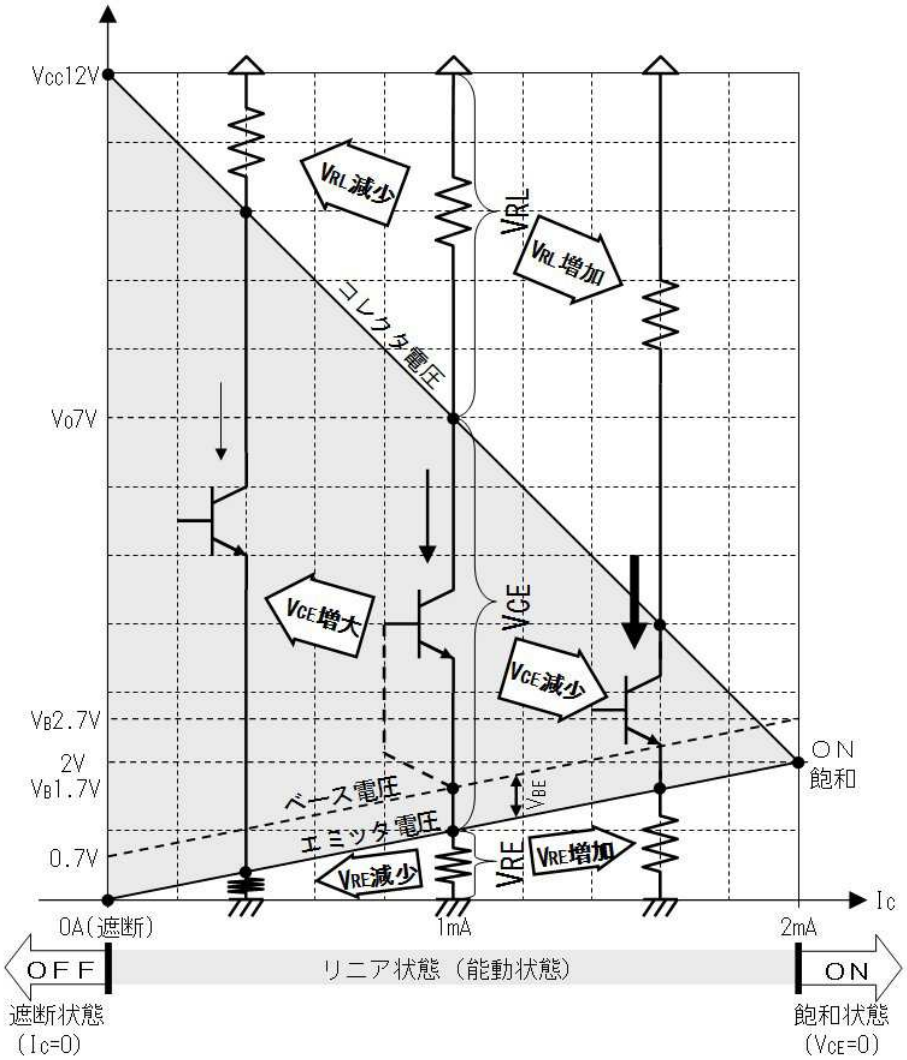
⑤	R_Aは、 （$I_{RB}=I_{RA}$＝２００μＡとした場合は、５２ｋΩ）	４９ｋΩ

１９．トランジスタの状態



練習で取り上げた上図の回路で、ベース電圧V_B（上図では１．７Ｖ）を様々に変化させて、各部の電圧を測定すると、下図のように変化します。このグラフは、グラフの上に対応する部品を書き加えると分り易くなります。

ベース電圧（グラフ上の点線）を高くするとI_Cが増加して、V_{CE}が小さくなり、回路はグラフ上を右に移動します。ベース電圧が２．７Ｖになると（コレクタ電流が２ｍＡになると）V_{CE}が０Ｖになり、トランジスタはショートした状態になります。この状態をＯＮ状態（飽和状態）と呼びます。



逆に、ベース電圧（グラフ上の点線）を低くするとI_Cが減少して、V_{CE}が大きくなり、回路はグラフ上を左に移動します。ベース電圧が0．７VになるとI_Cが0Vになり、トランジスタは電流を流さない状態になります。この状態をＯＦＦ状態（遮断状態）と呼びます。

ＯＮでもＯＦＦでもない、中央の部分がリニア状態（能動状態）で、電圧や電流を滑らかに変化させることができます。増幅器に使うのはこの状態です。

１３．半導体回路

１．主なトランジスタの種類

次の表に示す通り、増幅作用のある半導体は殆ど「～トランジスタ」と呼ばれます。これらトランジスタ族の中でも、一番最初に開発された「バイポーラ・トランジスタ」が、日本では単に「トランジスタ」と呼ばれます。本書でも単に「トランジスタ」と呼ぶ場合は「バイポーラ・トランジスタ」を指します。

トランジスタの色々

トランジスタの種類	頭文字	よくある呼び方
バイポーラ・トランジスタ (あるいは)バイポーラ・ジャンクション・トランジスタ	ＢＪＴ	トランジスタ
ジャンクション・フィールド・エフェクト・トランジスタ	ＪＦＥＴ	エフイーティー
メタル・オキサイド・セミコンダクター・フィールド エフェクト・トランジスタ	ＭＯＳＦＥＴ	モス モスエフイーティー
アイソレーテッド・ゲート・バイポーラ・トランジスタ	ＩＧＢＴ	アイジービーティー

２．スイッチング回路

照明を点灯／消灯する等、電流を「流す」「流さない」だけを行えばよい用途が沢山あります。このような動作をスイッチングと呼びます。

スイッチで照明をＯＮ／ＯＦＦしても、スイッチが過熱しないように、スイッチングで動作する回路は、効率が良く発熱が少ないので、多用されます。

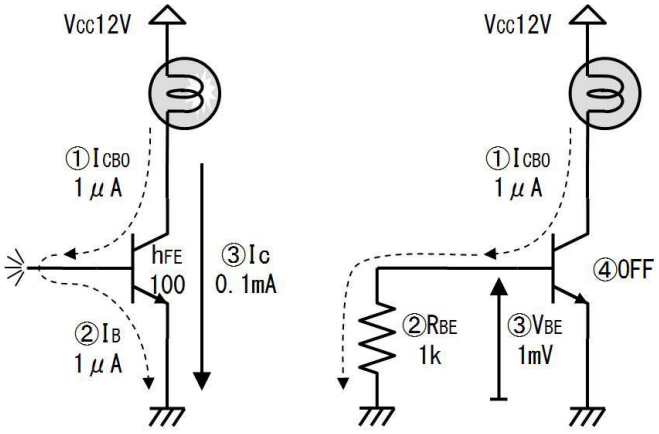
「トランジスタの状態」で説明したように、トランジスタには「電流を流さないＯＦＦ状態」と、V_{CE}がＯＶになって「導通するＯＮ状態」がありますから、この２つの状態を利用すればスイッチングができます。

３．トランジスタをＯＦＦさせる

下図（ａ）は負荷（電球）と直列にトランジスタを接続したスイッチング回路です。まずトランジスタをＯＦＦさせて、電球を消灯する方法を考えます。

下図（ａ）のようにベースに電流を流さなければ、コレクタにも電流が流れず、トランジスタはＯＦＦになる筈です。ところが、このままではトランジスタは次にように動作して、完全にはＯＦＦになりません。

つまり、①コレクタからベースに向かって僅かなI_{CBO}が（漏れて）流れます。ベースがどこにも接続されずに放置されているため、②I_{CBO}はベースからエミッタへ流れます。ここで、トランジスタはベースに流れ込んだ電流をh_{FE}倍してコレクタに流しますから、たとえI_{CBO}が僅か１μＡと僅かであっても、③コレクタにはＯ．１ｍＡの電流が流れてしまいます。

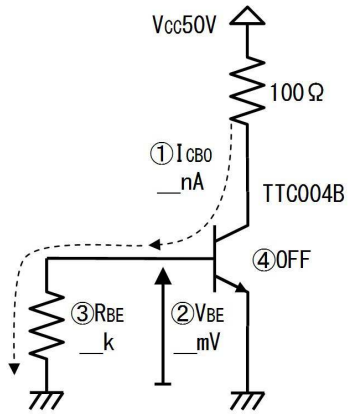


そこで上図（ｂ）のようにベースエミッタ間に抵抗（R_{BE}）を接続します。そうすれば、①コレクタからベースに向かってI_{CBO}が１μＡ流れて来ても、②R_{BE}を１ｋΩ等と小さくすれば、③R_{BE}の両端には（オーム則により）V_{BE}は１ｍＶしか発生しません。電流の流れるトランジスタではV_{BE}が０．７Ｖ程度発生しますから、このようにV_{BE}が１ｍＶと小さければ、④トランジスタを完全にＯＦＦすることができます。

つまり、上図（ｂ）のように、R_{BE}を接続し、I_{CBO}で発生する電圧を１ｍＶ程度に小さくするように値を選べば、トランジスタをＯＦＦできます。

３.１. 練習

下表のデータシートの抜粋を参考に、下図の回路が完全にＯＦＦするように、下表に書き込みながらR_{BE}の値を決定してください。



TOSHIBA TTC004B

5. 電気的特性

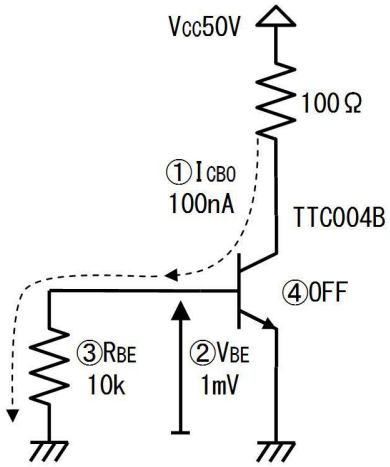
5.1. 静的特性 (特に指定のない限り, T_a = 25 ℃)

項目	記号	測定条件	最小	標準	最大	単位
コレクタしゃ断電流	I_{CBO}	V_{CB} = 160 V, I_E = 0 A	—	—	100	nA
エミッタしゃ断電流	I_{EBO}	V_{EB} = 6 V, I_C = 0 A	—	—	100	
コレクタ・エミッタ間降伏電圧	$V_{(BR)CEO}$	I_C = 10 mA, I_B = 0 A	160	—	—	V
直流電流増幅率	$h_{FE(1)}$	V_{CE} = 5 V, I_C = 1 mA	80	—	—	—
	$h_{FE(2)}$	V_{CE} = 5 V, I_C = 0.1 A	140	—	280	
コレクタ・エミッタ間飽和電圧	$V_{CE(sat)}$	I_C = 0.5 A, I_B = 50 mA	—	—	0.5	V
ベース・エミッタ間飽和電圧	$V_{BE(sat)}$	I_C = 0.5 A, I_B = 50 mA	—	—	1.3	

番号	質問	値

①	データシートより、I_{CBO}の値は、	ｎＡ
②	トランジスタを完全にＯＦＦさせるためには、V_{BE}は、	ｍＶ以下
③	I_{CBO}が流れても、V_{BE}を十分低く保つには、	ｋΩ

3.2. 答

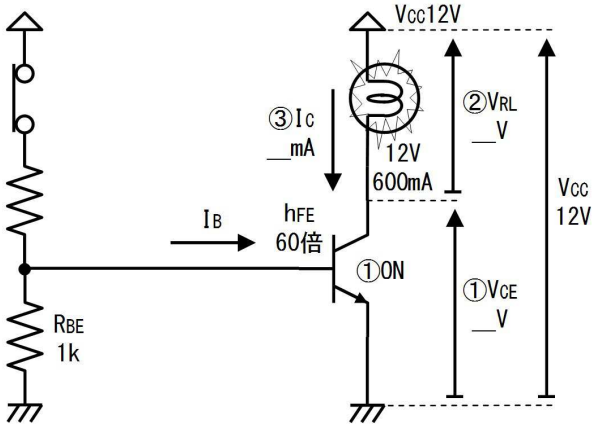


番号	質問	値
①	データシートより、I_{CBO}の値は、	１００ｎＡ
②	トランジスタを完全にＯＦＦさせるためには、V_{BE}は、	１ｍＶ以下
③	I_{CBO}が流れても、V_{BE}を十分低く保つには、 １ｍＶ÷１００ｎＡ＝１０ｋΩ	１０ｋΩ

I_{CBO}が小さければ、R_{BE}を大きくする（無駄な消費電流を減らす）ことができます。大電流を流すことのできる大型のトランジスタや、設計の古いトランジスタは、I_{CBO}が大きくなる傾向があります。

4. トランジスタをONさせる

トランジスタをＯＦＦさせる（R_{BE}を取り付けた）回路に、下図のようにスイッチとR_Bを追加すれば、スイッチを押すことで（ベースに電流が流れて）トランジスタをＯＮする回路を作ることができます。まず、トランジスタがＯＮしているときの、コレクタ電流を求めます。

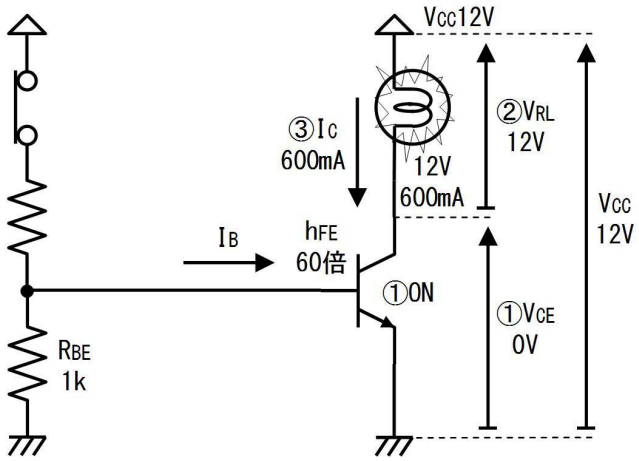


4.1. 練習

上図を参考に、下表に書き込みながらコレクタ電流を求めて下さい。

番号	質問	値
①	電球を点灯するために、トランジスタはＯＮしています。	―
②	ＯＮしているトランジスタのV_{CE}は、	Ｖ
③	電源電圧が１２Ｖですから、負荷（電球）に加わる電圧は、	Ｖ
④	電球の仕様から、コレクタ電流は、	ｍＡ

4.2. 答



番号	質問	値
①	電球を点灯するために、トランジスタはＯＮしています。	―
②	ＯＮしているトランジスタのV_{CE}は、	０Ｖ
③	電源電圧が１２Ｖですから、負荷（電球）に加わる電圧は、	１２Ｖ
④	電球の仕様から、コレクタ電流は、	６００ｍＡ

このようにトランジスタがＯＮすると、コレクタには６００ｍＡの電流が流れます。

さて、コレクタに６００ｍＡ流すためには、（仮にh_{FE}を６０とすれば）ベースには１０ｍＡ流せばよい筈です。ところが、トランジスタがＯＮするとh_{FE}が低下するため、実際にはベースに３０ｍＡ流す必要があります。

ではトランジスタの特性図を使って「h_{FE}の低下」を説明します。下図はトランジスタの$V_{CE}-I_C$特性の一例です（I_Bが１０ｍＡの場合に注目しています）。グラフの左端が、V_{CE}が０ＶとなりトランジスタがＯＮになる点です。

もしh_{FE}がV_{CE}に関係なく（例えば６０倍で）一定であれば、I_Bが１０ｍＡなら、I_Cは常に６００ｍＡ流れてグラフは水平となる筈です。確かにV_{CE}が０．５Ｖ以上であれば、グラフ中央から右側で

見られるように、コレクタ電流は６００ｍＡでほぼ一定で水平です。

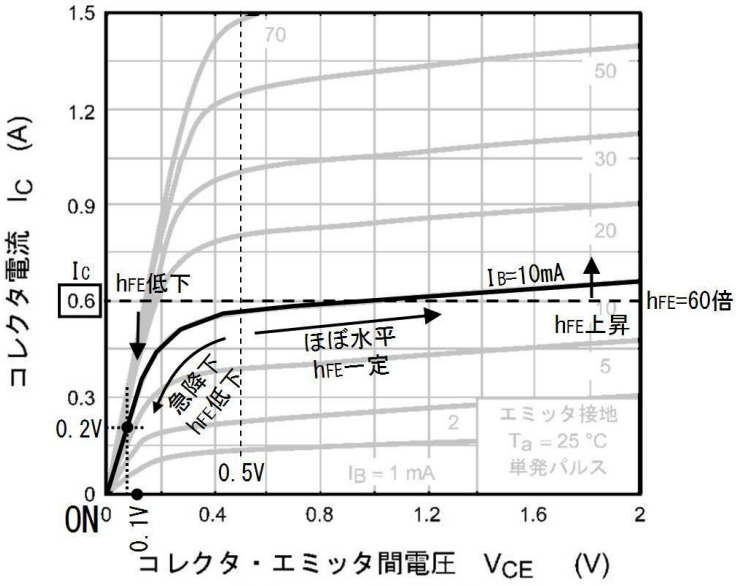


図 7.1　I_C - V_{CE}

東芝製ＴＴＣ００３Ｂ

ところが、V_{CE}が０．５Ｖより低くなると、グラフの左端で見られるように、h_{FE}が低下しI_Cが急低下します。つまり、トランジスタがＯＮに近づくとh_{FE}が低下します。

ここでトランジスタを十分にＯＮにする方法を考えます。上図のグラフで、トランジスタが十分にＯＮになり、V_{CE}が０．１Ｖ以下に低下する点を調べると、I_Bは同じく１０ｍＡ流しているのに、I_Cが２００ｍＡに減少し、h_{FE}は最初の約３分の１の２０倍程度まで低下しています。ですから、トランジスタがＯＮになれば、h_{FE}は約３分の１に低下すると考えて、その分多めに３倍のベース電流を流せば、トランジスタをＯＮにできます。

このように、スイッチング回路ではベース電流を多めに流す必要があります。多めに流す割合（通常３倍程度）を「オーバードライブ」と呼びます。

また、h_{FE}には個体差があるので、ベース電流が不足しないように、（使用するランクの）h_{FE}の最小値を使って計算します。たとえば、１２０～２４０倍であれば、１２０倍として計算します。

５．スイッチング回路のポイント

ここまで説明した「ＯＦＦの方法」「ＯＮの方法」をまとめると、トランジスタによるスイッチング回路では、次表のポイントに注意して検討すれば良いと分かります。

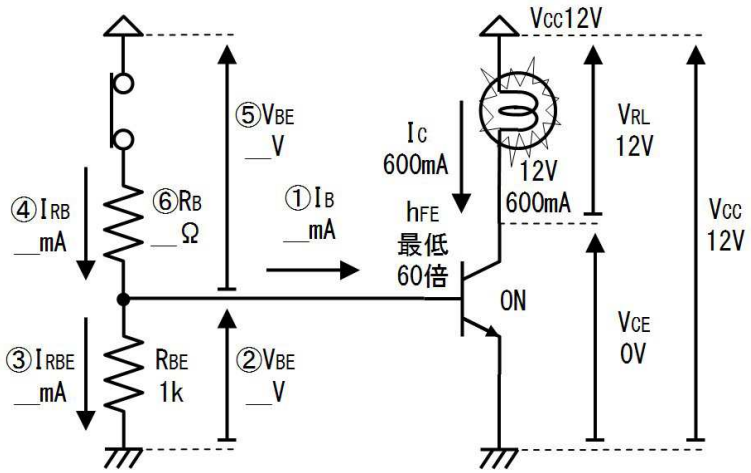
状態	ＯＦＦさせる	ＯＮさせる
検討のポイント	I_{CBO}を受け止める回路を設けて、V_{BE}を１ｍＶ程度に低くする。	$I_C \div h_{FE}$の値にオーバードライブ（約３倍）を掛けてI_Bを求める。
		I_Bが不足しないように、計算にはh_{FE}の最小値を使用する。
具体例	R_{BE}を取り付ける。 I_{CBO}が１μＡなら、R_{BE}は１ｋΩ	$I_B = 3 \times I_C / h_{FE}$（最低）

	程度	

ＯＦＦさせる具体的な方法は、上表以外にもいくつかあります。

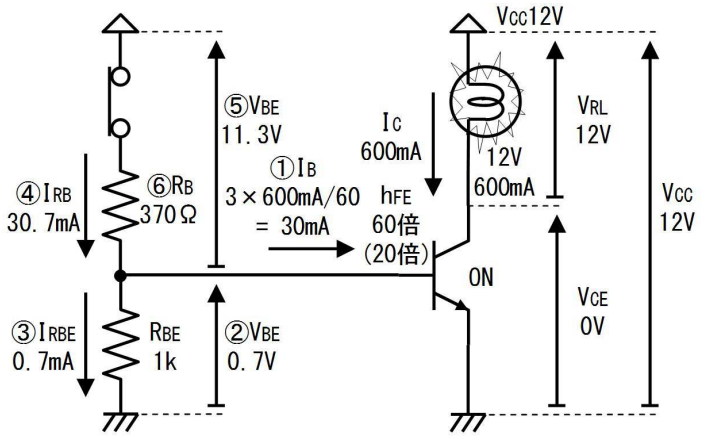
5.1. 練習

下表に書き込みながら、トランジスタがＯＮになるとh_{FE}が３分の１に減少すると考え、ベース電流を３倍流す（３倍のオーバードライブをする）よう、下図の回路を検討して下さい。



番号	質問	値
	電球の仕様でコレクタ電流は、６００ｍＡ流れます。	－
①	トランジスタがＯＮになるとh_{FE}が３分の１に減少し、ベース電流は３倍必要だから、ベース電流は、	ｍＡ
②	電流が流れているトランジスタのV_{BE}は、	Ｖ
③	（オーム則より）R_{BE}に流れる電流I_{RBE}は、	ｍＡ
④	（キルヒ則より）R_Bに流れる電流I_{RB}は、	ｍＡ
⑤	R_Bに加わる電圧は、	Ｖ
⑥	ＲＢの値は、	Ω

5.2. 答



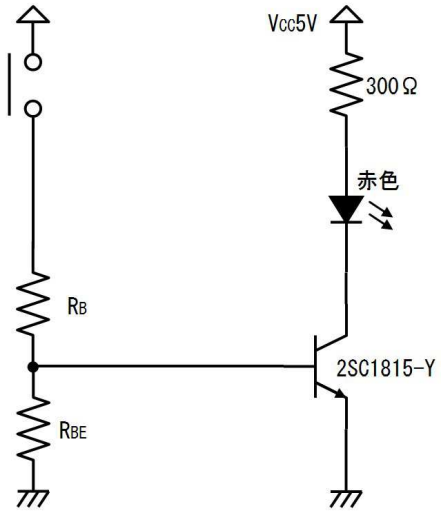
番号	質問	値

	電球の仕様でコレクタ電流は、６００ｍＡ流れます。	－
①	トランジスタがＯＮになるとh_{FE}が３分の１に減少し、ベース電流は３倍必要だから、ベース電流は、 ６００ｍＡ÷６０倍×オーバードライブ３倍	３０ｍＡ
②	電流が流れているトランジスタのV_{BE}は、	０．７Ｖ
③	（オーム則より）R_{BE}に流れる電流I_{RBE}は、	０．７ｍＡ
④	（キルヒ則より）R_Bに流れる電流I_{RB}は、	３０．７ｍＡ
⑤	R_Bに加わる電圧は、	１１．３Ｖ
⑥	ＲＢの値は、	３７０Ω

電球を負荷に使用する回路では、点灯する瞬間だけ定格の数倍～１０倍の電流が流れるため、これを見越した設計を行います。（今回は行っていません）

5.3. 練習

下図はスイッチをＯＮにするとＬＥＤが点灯し、ＯＦＦにすると消灯する回路です。

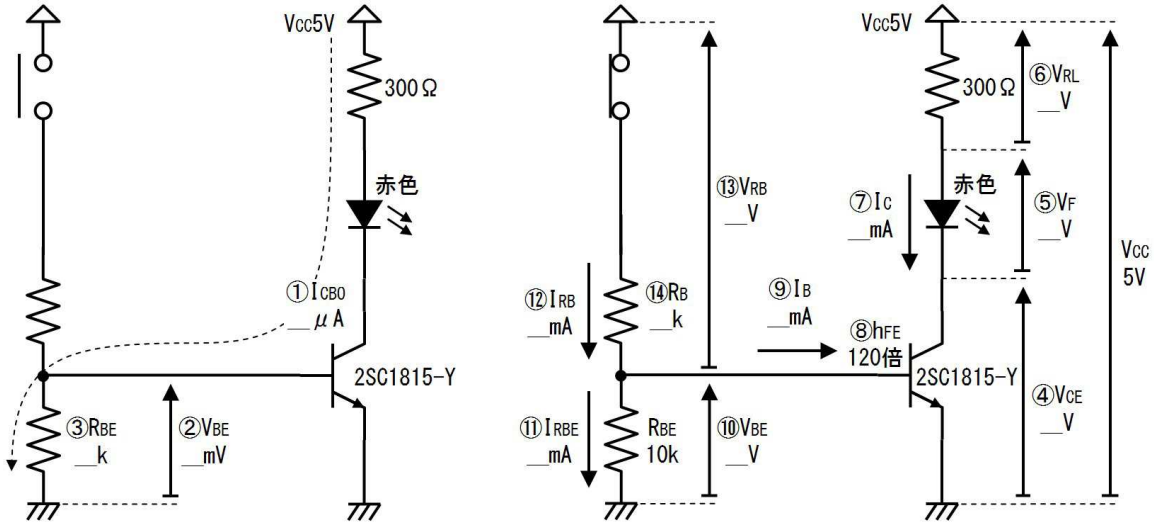


上図の回路のR_{BE}とR_Bを、下図左（ＯＦＦの場合）と下図右（ＯＮの場合）や、下のデータシートを参考に下表に記入して決定してください。

電気的特性 (Ta = 25°C)

項目	記号	測定条件	最小	標準	最大	単位
コレクタしゃ断電流	I_{CBO}	V_{CB} = 60 V, I_E = 0	—	—	0.1	μA
エミッタしゃ断電流	I_{EBO}	V_{EB} = 5 V, I_C = 0	—	—	0.1	μA
直流電流増幅率	$h_{FE\ (1)}$(注)	V_{CE} = 6 V, I_C = 2 mA	70	—	700	
	$h_{FE\ (2)}$	V_{CE} = 6 V, I_C = 150 mA	25	100	—	
コレクタ・エミッタ間飽和電圧	$V_{CE\ (sat)}$	I_C = 100 mA, I_B = 10 mA	—	0.1	0.25	V
ベース・エミッタ間飽和電圧	$V_{BE\ (sat)}$	I_C = 100 mA, I_B = 10 mA	—	—	1.0	V
トランジション周波数	f_T	V_{CE} = 10 V, I_C = 1 mA	80	—	—	MHz
コレクタ出力容量	C_{ob}	V_{CB} = 10 V, I_E = 0, f = 1 MHz	—	2.0	3.5	pF
ベース拡がり抵抗	$r_{bb'}$	V_{CE} = 10 V, I_E = −1 mA, f = 30 MHz	—	50	—	Ω
雑音指数	NF	V_{CE} = 6 V, I_C = 0.1 mA, f = 1 kHz, R_G = 10 kΩ	—	1	10	dB

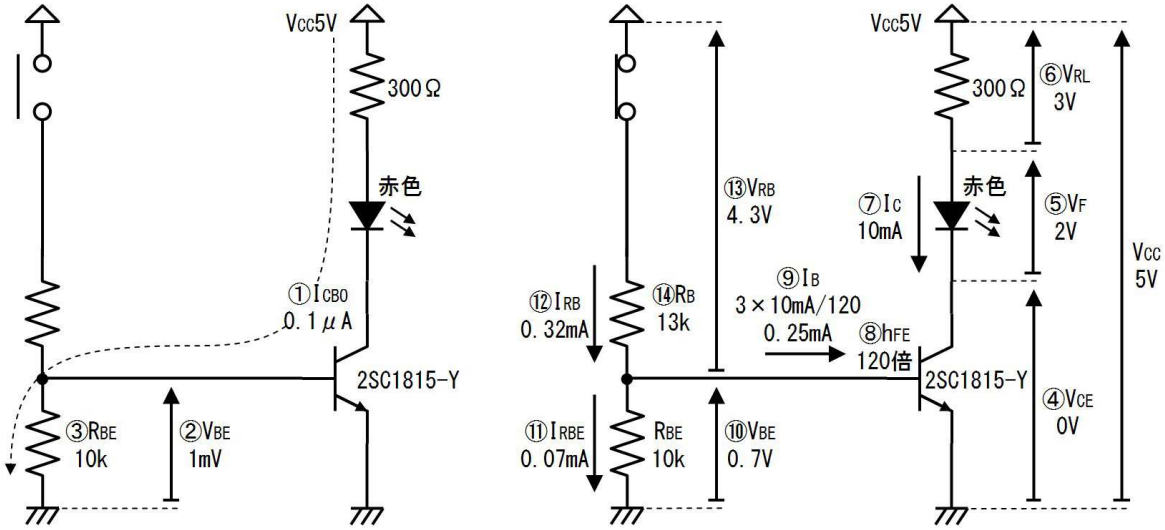
注: $h_{FE\ (1)}$ 分類　O: 70~140,　Y: 120~240,　GR: 200~400,　BL: 350~700



番号	質問	値
	トランジスタがＯＦＦの場合を考えます。	―
①	データシートよりI_{CBO}は、	μＡ
②	トランジスタを完全にＯＦＦするためには、V_{BE}は、	ｍＶ以下
③	ＶＢＥを小さくするために、R_{BE}は、	ｋΩ
	トランジスタがＯＮの場合を考えます。	―
④	ＯＮになったトランジスタのV_{CE}は、	Ｖ
⑤	赤色ＬＥＤのV_Fは２Ｖと考えます。	２Ｖ
⑥	負荷抵抗R_Lの両端電圧は、	Ｖ
⑦	（オーム則より）コレクタ電流は、	ｍＡ
⑧	データシート下部より（分類Ｙの）h_{FE}の最低値は、	倍
⑨	オーバードライブを３倍とすると、I_Bは、	ｍＡ

	３×１０mA÷１２０＝０．２５mA	
⑩	電流を流しているトランジスタのV_{BE}は、	V
⑪	R_{BE}に流れる電流は、	mA
⑫	キルヒ則より、R_Bに流れる電流は、	mA
⑬	R_Bの両端電圧は、	V
⑭	R_Bの値は、	kΩ

5.4. 答

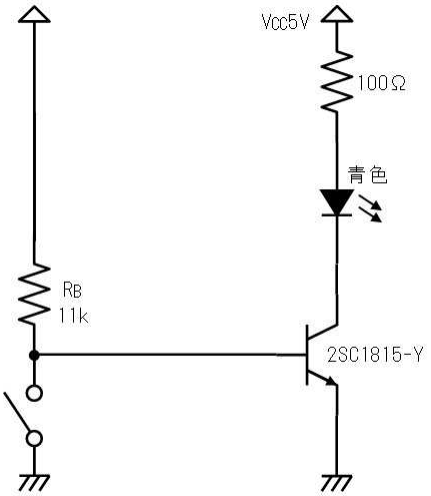


番号	質問	値
	トランジスタがＯＦＦの場合を考えます。	－
①	データシートよりI_{CBO}は、	０．１μA
②	トランジスタを完全にＯＦＦするためには、V_{BE}は、	１mV以下
③	ＶＢＥを小さくするために、R_{BE}は、	１０kΩ
	トランジスタがＯＮの場合を考えます。	－
④	ＯＮになったトランジスタのV_{CE}は、	０V
⑤	赤色ＬＥＤのV_Fは２Vと考えます。	２V
⑥	負荷抵抗R_Lの両端電圧は、	３V
⑦	（オーム則より）コレクタ電流は、	１０mA
⑧	データシートより（分類Ｙの）h_{FE}の最低値は、	１２０倍
⑨	オーバードライブを３倍とすると、I_Bは、 ３×１０mA÷１２０＝０．２５mA	０．２５mA
⑩	電流を流しているトランジスタのV_{BE}は、	０．７V

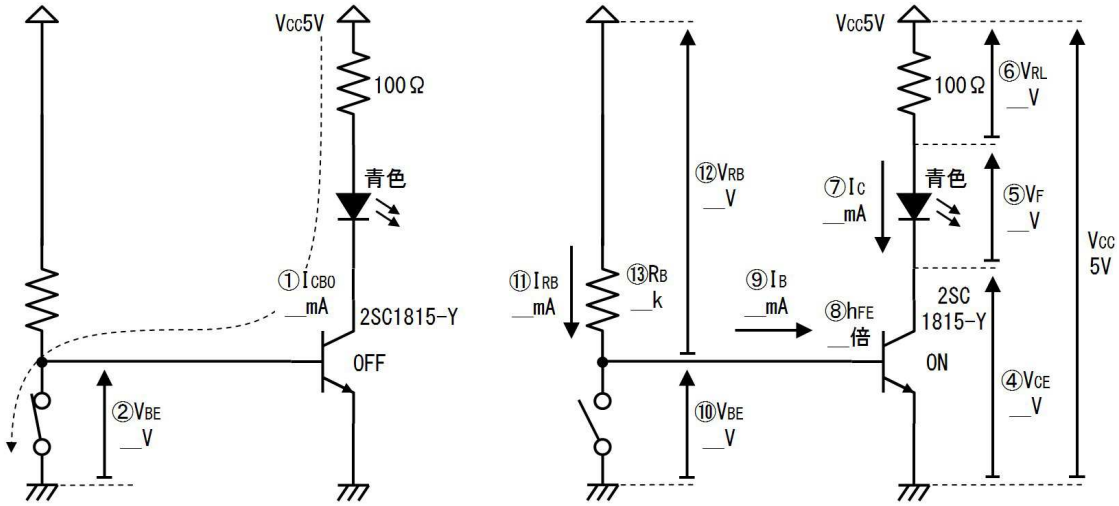
⑪	R_{BE}に流れる電流は、	０．０７ｍＡ
⑫	キルヒ則より、R_Bに流れる電流は、	０．３２ｍＡ
⑬	R_Bの両端電圧は、	４．３Ｖ
⑭	R_Bの値は、	１３ｋΩ

5.5. 練習

下図はスイッチのＯＮになるとＬＥＤが消灯し、ＯＦＦになると点灯する回路です。



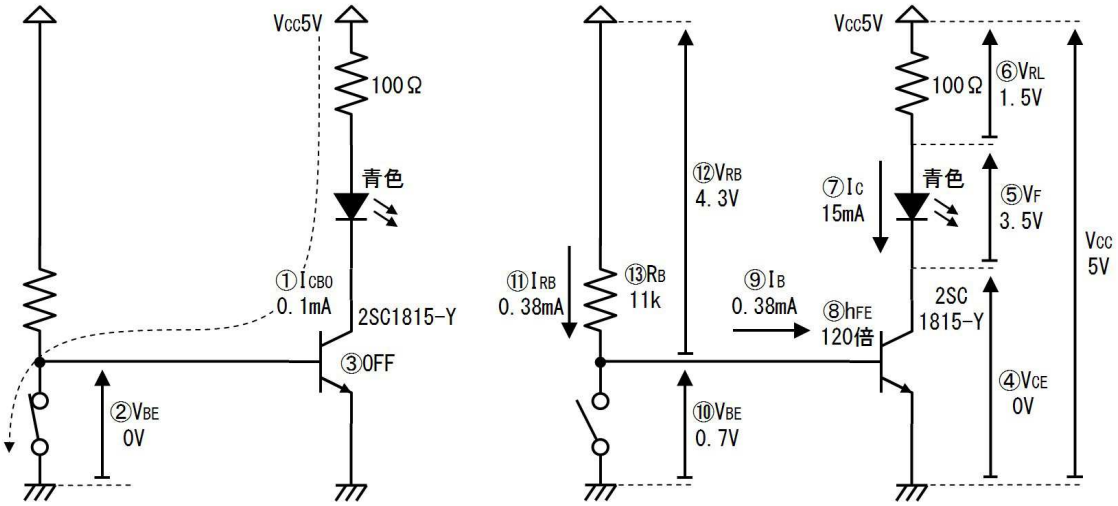
上図の回路のR_Bを、下図左側（ＯＦＦのとき）と下図右側（ＯＮのとき）や、既載のデータシートを参考に下表に記入して決定してください。



番号	質問	値
	トランジスタがＯＦＦの場合を考えます。	－
①	データシートよりI_{CBO}は、	μＡ
②	スイッチがＯＮならV_{BE}は、	Ｖ
③	トランジスタは、（選んで下さい）	ＯＮ・ＯＦＦ
	トランジスタがＯＮの場合を考えます。	－

④	ONになったトランジスタのV_{CE}は、	V
⑤	青色ＬＥＤのV_Fは３．５Ｖと考えます。	V
⑥	負荷抵抗R_Lの両端電圧は、	V
⑦	（オーム則より）コレクタ電流は、	mA
⑧	データシートより（分類Ｙの）h_{FE}の最低値は、	倍
⑨	オーバードライブを３倍とすると、I_Bは、 ３×１５mA÷１２０＝０．２５mA	mA
⑩	電流を流しているトランジスタのV_{BE}は、	V
⑪	R_Bに流れる電流は、	mA
⑫	R_Bの両端電圧は、	V
⑬	R_Bの値は、	kΩ

5.6. 答



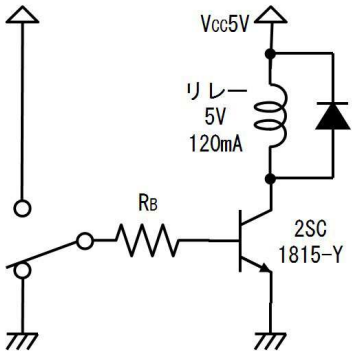
番号	質問	値
	トランジスタがＯＦＦの場合を考えます。	－
①	データシートよりI_{CBO}は、	０．１μＡ
②	スイッチがONならV_{BE}は、	０Ｖ
③	トランジスタは、（選んで下さい）	ＯＮ・ＯＦＦ
	トランジスタがONの場合を考えます。	－
④	ONになったトランジスタのV_{CE}は、	０Ｖ
⑤	青色ＬＥＤのV_Fは３．５Ｖと考えます。	３．５Ｖ
⑥	負荷抵抗R_Lの両端電圧は、	１．５Ｖ

⑦	（オーム則より）コレクタ電流は、	１５ｍＡ
⑧	データシートより（分類Ｙの）h_{FE}の最低値は、	１２０倍
⑨	オーバードライブを３倍とすると、I_Bは、 ３×１５ｍＡ÷１２０＝０．２５ｍＡ	０．３８ｍＡ
⑩	電流を流しているトランジスタのV_{BE}は、	０．７Ｖ
⑪	R_Bに流れる電流は、	０．３８ｍＡ
⑫	R_Bの両端電圧は、	４．３Ｖ
⑬	R_Bの値は、	１３ｋΩ

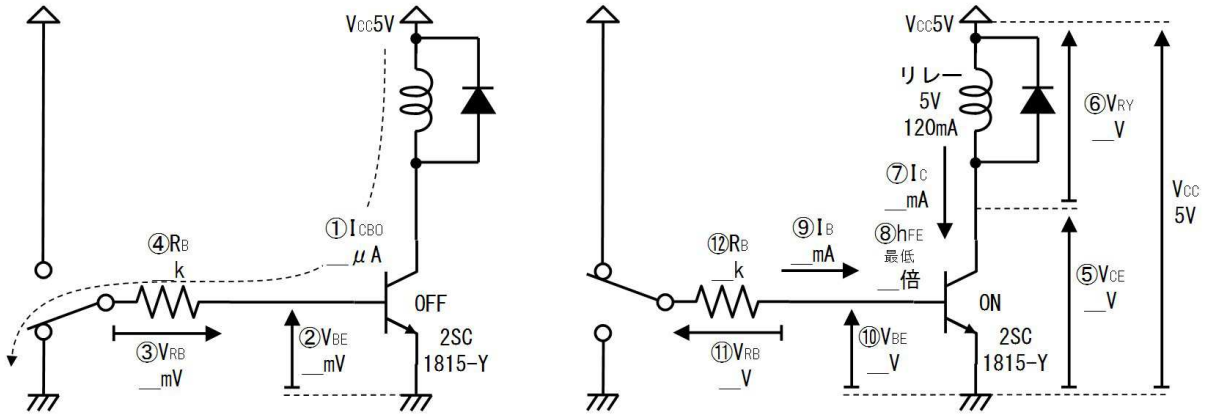
このように、トランジスタをＯＦＦさせるとき、R_{BE}の代わりにI_{CBO}が流れる経路がある回路では、R_{BE}が不要です。

5.7. 練習

下図はスイッチを切り替えて、リレーをＯＮ／ＯＦＦする回路です。リレーと並列に接続したダイオードは、次の項で説明する、フライバック電圧の吸収用です。



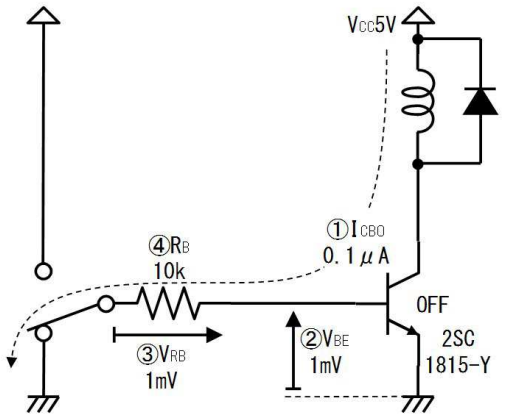
上図の回路のR_Bを、下図左側（ＯＦＦのとき）と下図右側（ＯＮのとき）や、既載のデータシートを参考に下表に記入して決定してください。

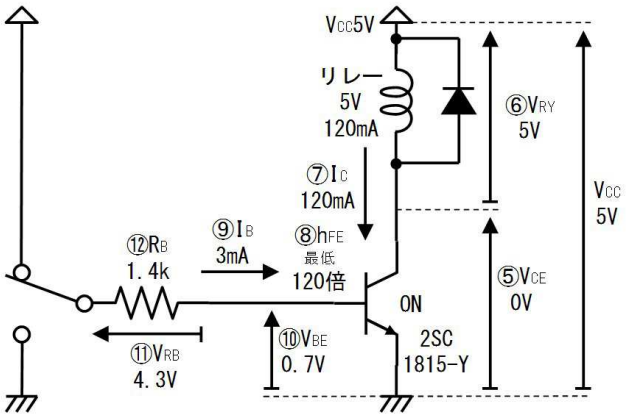


番号	質問	値
	トランジスタがＯＦＦの場合を考えます。	―
①	データシートより、I_{CBO}は、	μＡ

②	トランジスタを完全にＯＦＦするためには、V_{BE}は、	ｍＶ以下
③	R_Bの両端電圧V_{RB}は、	ｍＶ以下
④	R_Bの値は、	ｋΩ以下
	トランジスタがＯＮの場合を考えます。	
⑤	ＯＮになったトランジスタのV_{CE}は、	Ｖ
⑥	リレーの両端電圧V_{RY}は、	Ｖ
⑦	リレーの仕様から、コレクタ電流は、	ｍＡ
⑧	データシートから、（Ｙ分類の）h_{FE}の最低値は、	倍
⑨	オーバードライブを３倍以上とすると、I_Bは、	ｍＡ以上
⑩	電流が流れるトランジスタのV_{BE}は、	Ｖ
⑪	R_Bの両端電圧V_{RB}は、	Ｖ
⑫	ＲＢの値は、	ｋΩ以下
⑬	上の④と⑫の双方を満足するR_Bの値は、	ｋΩ

5.8. 答



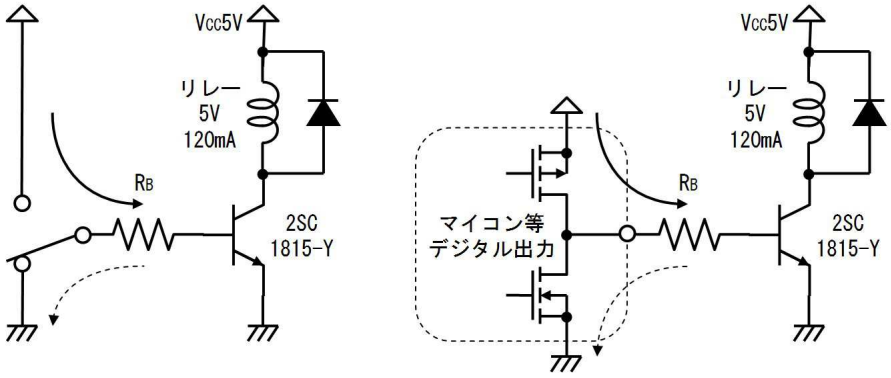


番号	質問	値
	トランジスタがＯＦＦの場合を考えます。	－
①	データシートより、I_{CBO}は、	０．１μＡ
②	トランジスタを完全にＯＦＦするためには、V_{BE}は、	１ｍＶ以下
③	R_Bの両端電圧V_{RB}は、	１ｍＶ以下
④	R_Bの値は、	１０ｋΩ以下
	トランジスタがＯＮの場合を考えます。	
⑤	ＯＮになったトランジスタのV_{CE}は、	０Ｖ

⑥	リレーの両端電圧V_{RY}は、	５Ｖ
⑦	リレーの仕様から、コレクタ電流は、	１２０ｍＡ
⑧	データシートから、（Ｙ分類の）h_{FE}の最低値は、	１２０倍
⑨	オーバードライブを３倍以上とすると、I_Bは、	３ｍＡ以上
⑩	電流が流れるトランジスタのV_{BE}は、	０．７Ｖ
⑪	R_Bの両端電圧V_{RB}は、	４．３Ｖ
⑫	ＲＢの値は、	１．４ｋΩ以下
⑬	上の④と⑫の双方を満足するR_Bの値は、	１．４ｋΩ

このように、一本の抵抗がR_{BE}とR_B双方の役割を果たす場合は、双方の条件に合う抵抗値を選びます。

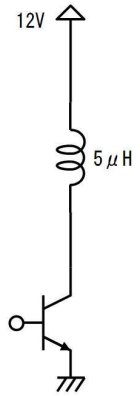
このタイプの回路は、下図のように、マイコン等のＣＭＯＳデジタル出力（上の練習の例では出力電流３ｍＡ以上のタイプが必要）でトランジスタをＯＮ／ＯＦＦする場合に利用できます。

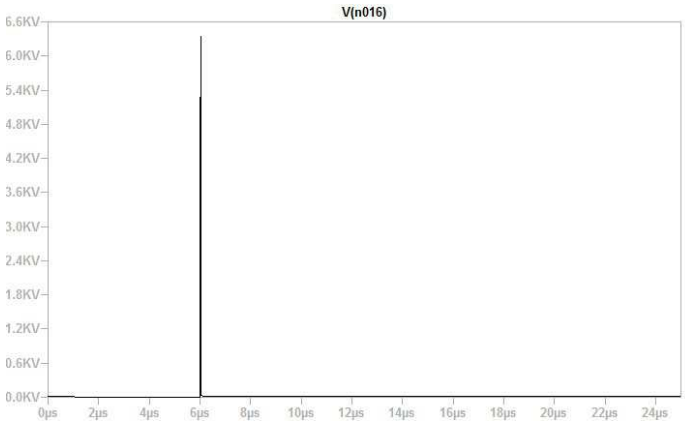


６．誘導負荷とスナバ回路

上の練習で取り上げたリレーのようなコイル成分を持った負荷を「誘導負荷」と呼びます。誘導負荷では、「フライバック」の項で説明したように、ＯＦＦ時に高い電圧が生じてトランジスタを破壊します。

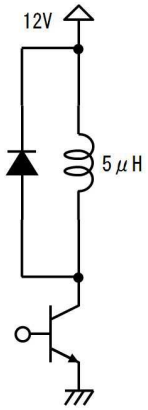
下図はフライバック電圧の一例で、５μＨのコイルを負荷に接続して、トランジスタを５μ秒間ＯＮにした後、グラフ上の６μ秒の時点でＯＦＦにしています。電源電圧は１２Ｖですが、一瞬６０００Ｖ程度のフライバック電圧が発生しています。

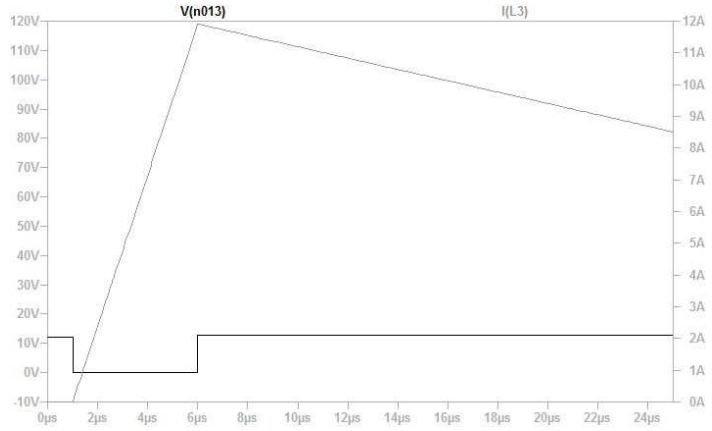




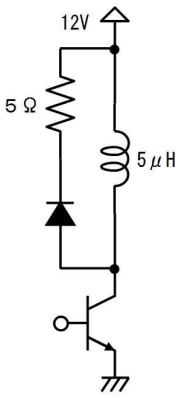
このフライバック電圧を抑えるために、フライバック電流を吸収するスナバ回路を追加します。

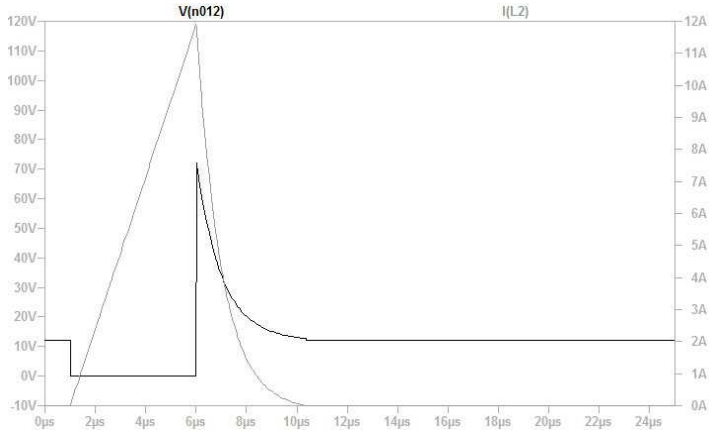
下図は前項で利用したダイオードを使用したスナバ回路です。この回路は下図に黒線で示すように、フライバック電圧を完全に抑えることができます。しかし、コイルの電流は灰色線で示すようにゆっくりと減少するため、すばやくＯＮ／ＯＦＦを繰り返すことができません。このため、秒単位でゆっくり動作するリレーやソレノイド（電磁石）で利用されます。



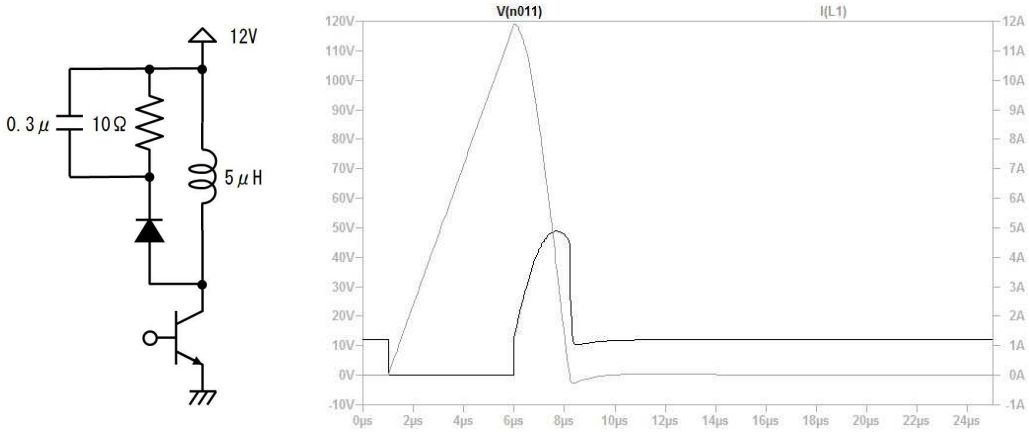


下図に示すように、ダイオードと直列に抵抗を入れることで、フライバック電圧はかなり発生しますが、（抵抗でコイルに蓄えられたエネルギが熱となって発散し）電流が素早く減少するようになります。

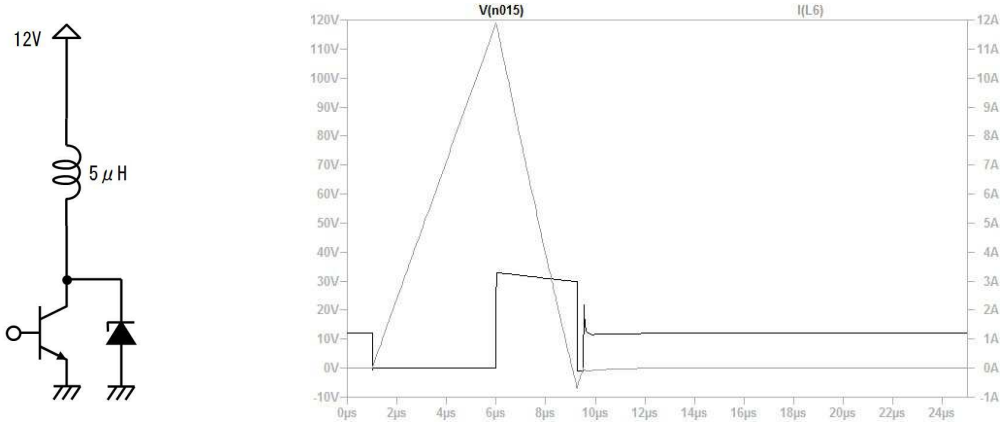




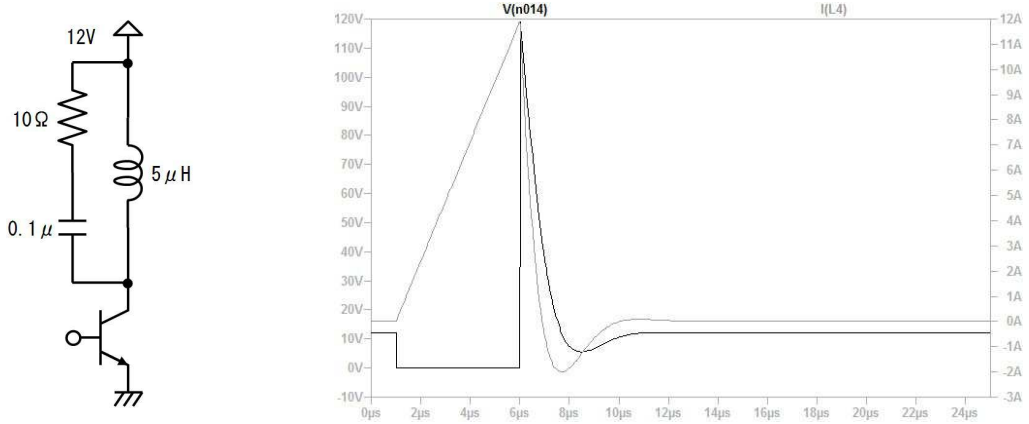
下図に示すように、抵抗と並列にコンデンサを入れると、フライバック電流がコンデンサに吸収され、フライバック電圧をかなり小さくできます。（コンデンサに蓄えられたコイルのエネルギは、抵抗で放出されます）フライバック電圧が低くなり、コイルの電流も比較的素早く減少するので、スイッチング電源等でよく利用されます。



下図に示すように、トランジスタと並列にツェーナダイオードを入れると、フライバック電圧をツェーナ電圧以下に抑えることができます。ツェーナダイオードはフライバック電流に耐える品種が必要です。後で説明するＭＯＳＦＥＴにはツェーナダイオードとしても動作できる品種（アバランシェ耐量の大きな品種）もあるので、そのような場合に利用されます。

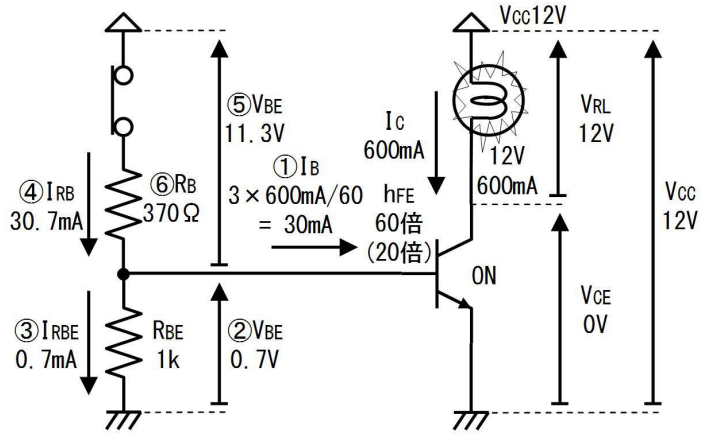


下図はより単純なＣＲによるスナバ回路です。ダイオードが不要ですがフライバック電圧はかなり大きくなります。

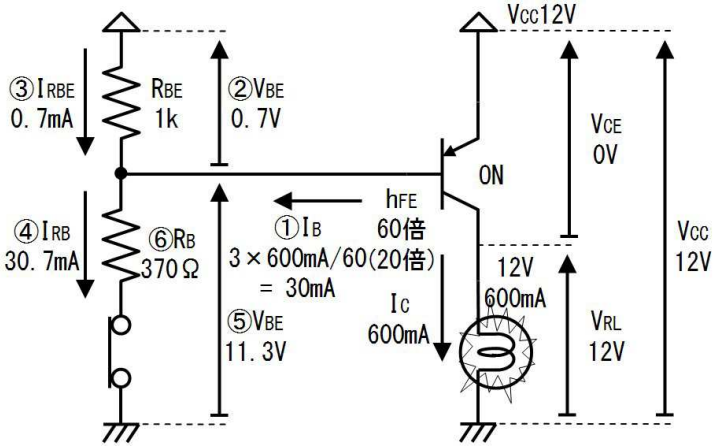


７．ＮＰＮとＰＮＰ

ＮＰＮトランジスタを使った回路は、簡単にＰＮＰを使った回路に変更できます。下図はすでに練習で扱ったスイッチング回路です。



上図の回路ではＮＰＮトランジスタを使っています。回路図の上下を逆にして、電流の向きを逆方向にすれば、ＰＮＰトランジスタの回路になります。



上図の回路では、負荷（電球）の片側をアースに接続することができる（電球が消えていれば、端子に触っても感電しない）という利点があります。

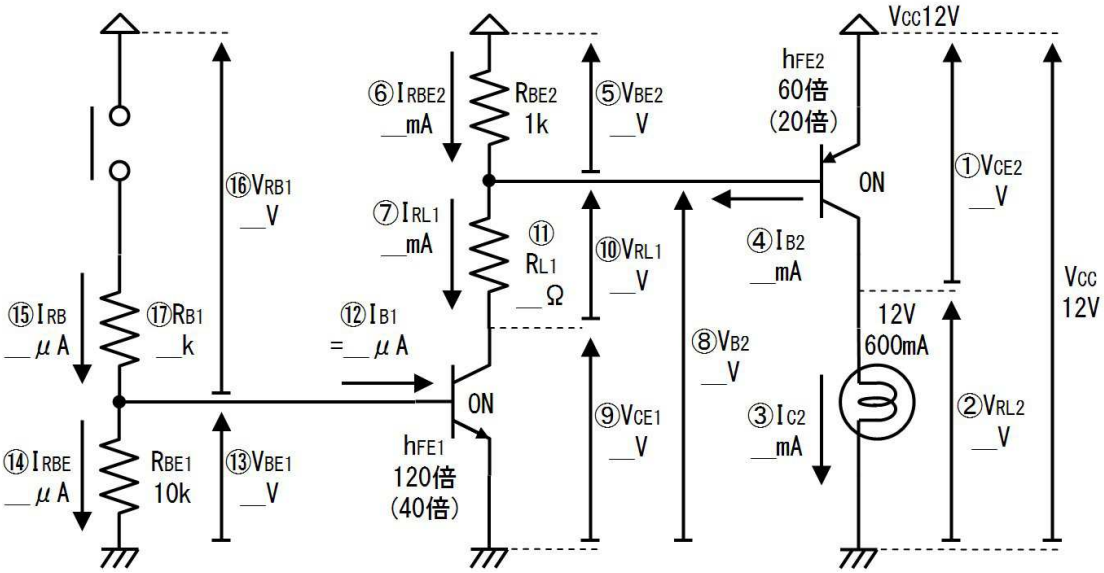
スイッチング回路でも、増幅回路でも、トランジスタを使った回路であれば、同じ方法でＮＰＮとＰＮＰを置き換えることができます。

ＰＮＰトランジスタはホール（空の穴）が電気を運ぶため、（動き易い電子が電気を運ぶ）ＮＰＮトランジスタより動作が遅くなる傾向があり、使用される頻度はＮＰＮより少ないです。とはいえ、ＮＰＮとＰＮＰを組み合わせて活用した回路もあり、ＰＮＰトランジスタの出番も完全には無くなりません。

下図は、ＰＮＰトランジスタとＮＰＮトランジスタを組み合わせた、２段のスイッチング回路です。回路を二段にすることで、極僅かな電流で負荷をＯＮ／ＯＦＦできます。

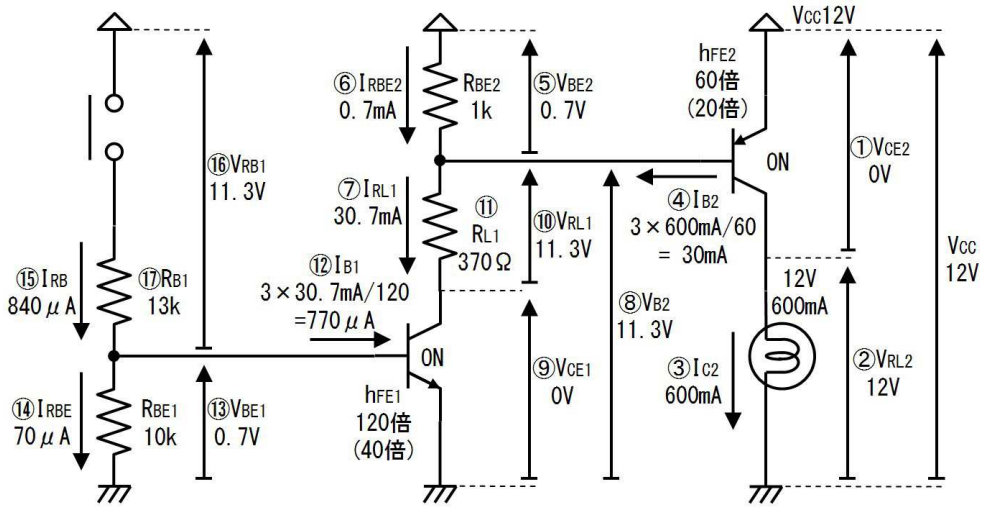
７.１. 練習

下図を参考に下表に記入して、下図の回路の抵抗値を決定してください。



番号	質問	値
①	ONになっているトランジスタQ_2のV_{CE2}は、	V
②	Q_2の負荷R_{L2}の両端電圧は、	V
③	電球の定格より、Q_2のコレクタ電流I_{C2}は、	mA
④	3倍のオーバードライブを掛けて、Q_2のベース電流I_{B2}は、	mA
⑤	Q2のベースエミッタ間電圧V_{BE2}は、	V
⑥	R_{BE2}に流れる電流I_{RBE2}は、	mA
⑦	Q_1の負荷抵抗R_{L1}に流れる電流は、 （⑥と④よりキルヒ則で）	mA
⑧	Q_2のベース電圧V_{B2}は、	V
⑨	ONになっているQ_1のV_{CE1}は、	V
⑩	Q_1の負荷抵抗R_{L1}の両端電圧は、	V
⑪	Q_1の負荷抵抗R_{L1}の抵抗値は、	Ω
⑫	3倍のオーバードライブを掛けて、Q_1のベース電流I_{B1}は、	μA
⑬	電流の流れているQ_1のV_{BE1}は、	V
⑭	Q_1のR_{BE1}に流れる電流I_{RBE1}は、	μA
⑮	Q_1のベース抵抗R_{B1}に流れる電流I_{RB1}は、 （⑬と⑭よりキルヒ則で）	μA
⑯	Q_1のベース抵抗R_{B1}の抵抗値は、	kΩ

7.2. 答

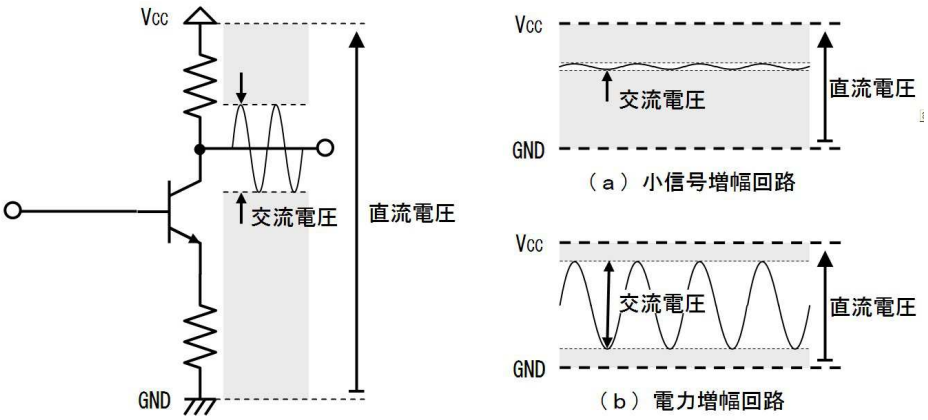


番号	質問	値
①	ONになっているトランジスタQ_2のV_{CE2}は、	０V
②	Q_2の負荷R_{L2}の両端電圧は、	１２V
③	電球の定格より、Q_2のコレクタ電流I_{C2}は、	６００mA
④	３倍のオーバードライブを掛けて、Q_2のベース電流I_{B2}は、	３０mA
⑤	Q２のベースエミッタ間電圧V_{BE2}は、	０．７V
⑥	R_{BE2}に流れる電流I_{RBE2}は、	０．７mA
⑦	Q_1の負荷抵抗R_{L1}に流れる電流は、 （⑥と④よりキルヒ則で）	３０．７mA
⑧	Q_2のベース電圧V_{B2}は、	１１．３V
⑨	ONになっているQ_1のV_{CE1}は、	０V
⑩	Q_1の負荷抵抗R_{L1}の両端電圧は、	１１．３V
⑪	Q_1の負荷抵抗R_{L1}の抵抗値は、	３７０Ω
⑫	３倍のオーバードライブを掛けて、Q_1のベース電流I_{B1}は、	７７０μA
⑬	電流の流れているQ_1のV_{BE1}は、	０．７V
⑭	Q_1のR_{BE1}に流れる電流I_{RBE1}は、	７０μA
⑮	Q_1のベース抵抗R_{B1}に流れる電流I_{RB1}は、 （⑬と⑭よりキルヒ則で）	８４０μA
⑯	Q_1のベース抵抗R_{B1}の抵抗値は、	１３kΩ

８．小信号増幅回路

スイッチング回路（ＯＮ状態とＯＦＦ状態で動作する）とは違い、リニア回路はリニア状態（能動状態）で動作する回路で、入力の変化に対応して、出力も滑らかに変化します。リニア回路には、小さな振幅を扱う小信号増幅回路と、大きな振幅を扱う電力増幅回路があります。

小信号増幅回路とは、下図（ａ）に示すように、回路に加わる直流電圧（バイアス電圧）に比べて、交流電圧（信号電圧）が十分に小さい回路です。つまり信号によって回路の電圧が変化しても、直流電圧が増減したと考える必要の無い（程に小さな信号しか扱わない）回路です。小信号増幅回路では、直流と交流を（バイアスと信号を）まったく別々に計算して回路を設計することができ、設計が容易になります。



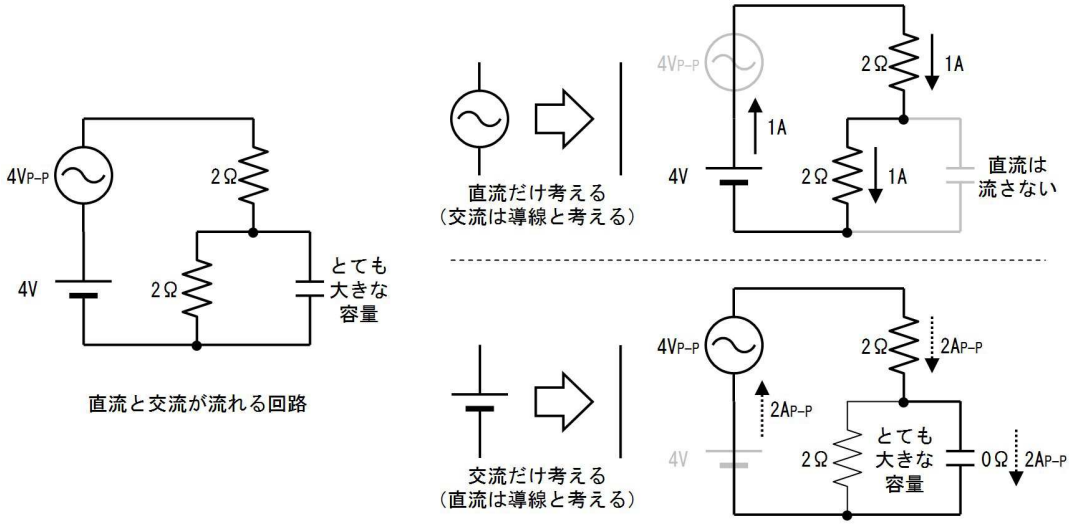
ところが、上図（ｂ）のように信号が大きくなると、信号が大きく振れた部分では回路の電圧が変化したと考えて計算する必要があります。このような回路は電力増幅回路と呼ばれます。既に説明したスイッチング回路は電力増幅回路の一つです。

電力増幅回路では直流と交流を別々に考えることは出来ず、「回路の電圧が様々に変化する」と考えて設計します。スイッチング回路で「ＯＮの場合」と「ＯＦＦの場合」を別々に考えて設計したのもこのためです。

９．直流と小信号

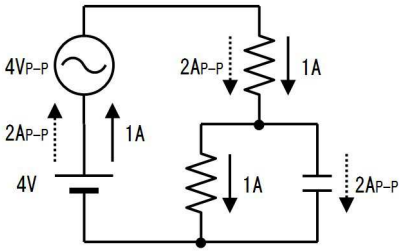
増幅回路には直流電流や信号（交流）電流が入り混じって流れているため、直流と交流を同時に考えると面倒です。しかし、小信号増幅回路では「先に直流を検討して、後で交流を検討する」というように、（「重ね合わせの原理」を直流と交流に応用して）直流と交流を別々に検討することができます。

たとえば下図の回路で、直流だけを考える場合は、下図上側のように、交流電源を導線だと考えます。また、コンデンサは直流を流しませんから「付いてない」と考えます。そうすると、２Ωが２本直列となり、１Ａの直流が流れます。



また、交流だけを考える場合は、上図下側のように、直流電源（電池）を導線だと考えます。また、十分大きな容量のコンデンサは０Ωと考えます。そうすれば、２Ωの抵抗に２Ａの電流が流れると分ります。

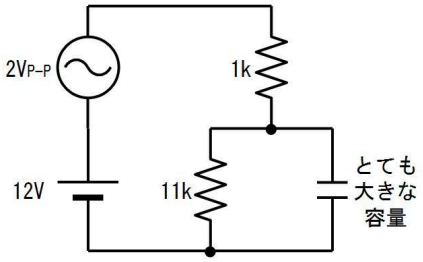
このように直流と交流を別々に検討した結果を合わせれば、回路に流れる直流と交流を下図のように知ることができます。複雑な増幅回路の働きも、容易に検討することができます。



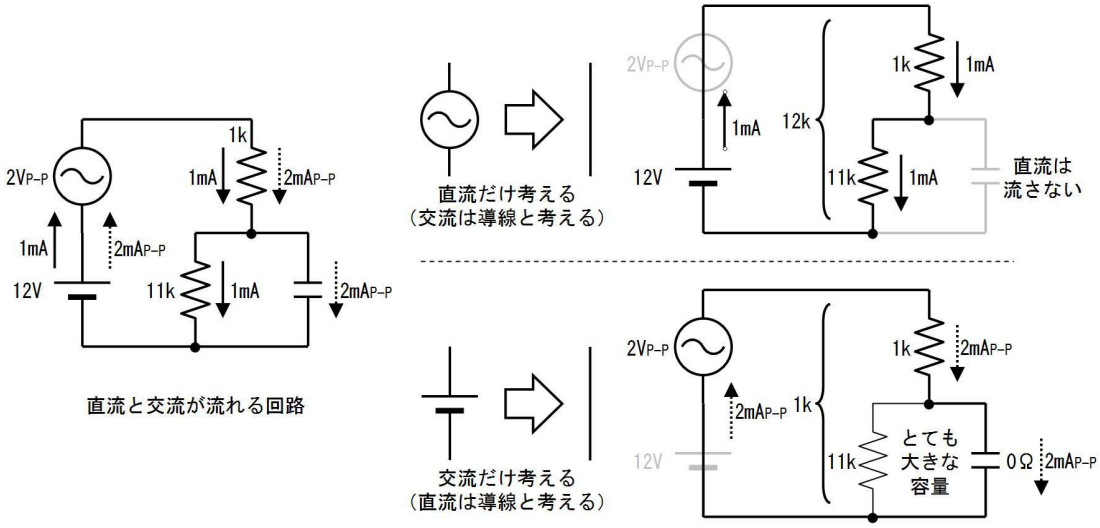
直流と交流が流れる回路

9.1. 練習

下図の回路の各素子に流れる直流と交流の向きと大きさを求めて下さい。

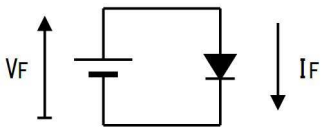


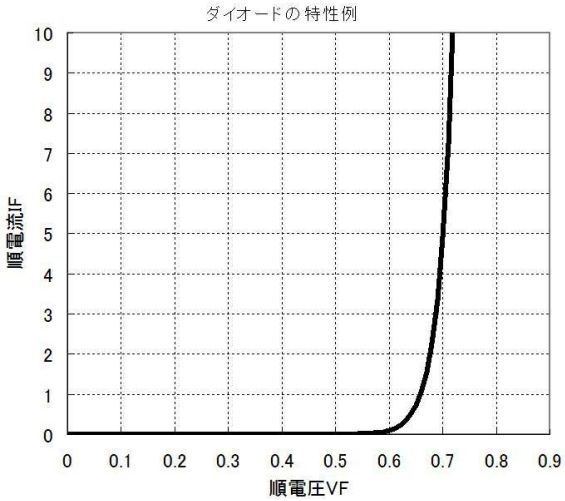
9.2. 答



１０. 小信号とダイオード

既に説明したように、下図左側の回路でダイオードに加える電圧V_Fを変えると、流れる電流I_Fは、例えば、下図右側の特性図のように変化しました。（この特性図は Excel で=1E-11*(EXP(E1/0.026)-1)を計算して散布図に描いたものです。）

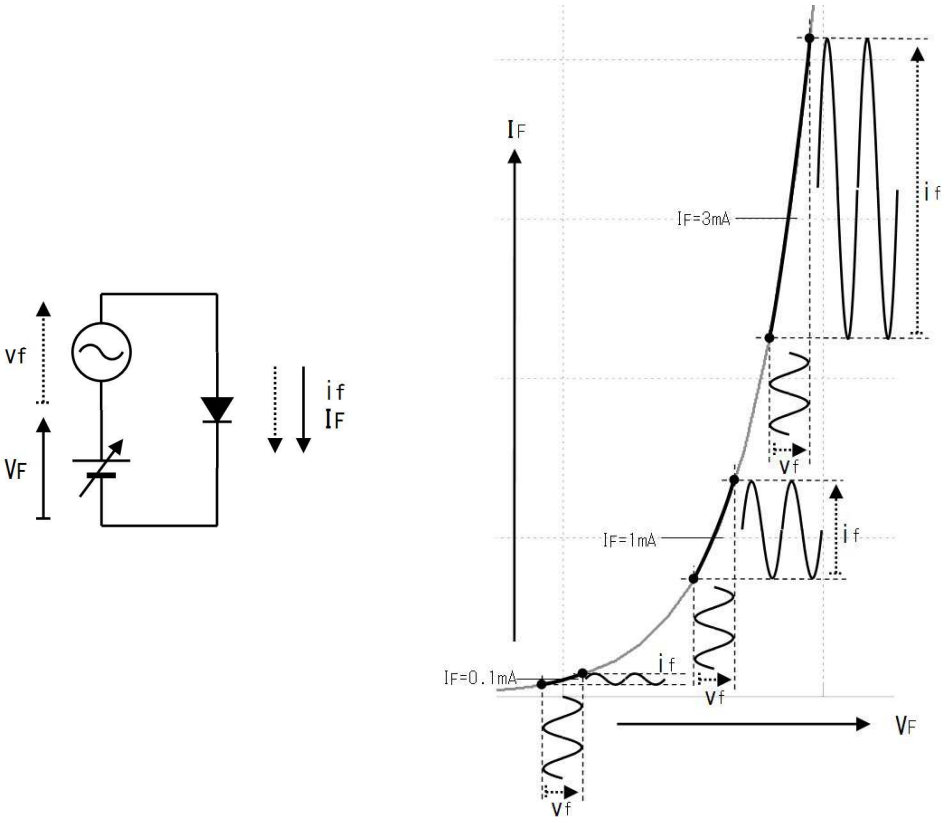




上図から分るように、ダイオードは（オーム則に従って）抵抗のように電圧と電流が比例しません。電圧が高くなり、電流が増えれば増える程、電流が流れ易くなり（見かけの抵抗値が小さくなり）、僅かな電圧の増加で電流が大きく増えるようになります。このため、V_Fが０．７Ｖを超えた辺りから、急激に電流が増加します。

次に、下図左側の回路でダイオードに直流と交流を同時に加えた場合を考えます。ダイオードはオーム則に従わない部品なので、重ね合わせの原理をそのまま使う事はできません。そこで、電圧ー電流特性図の曲線を使って考えます。

下図右側の特性図は、上の特性図の０．７Ｖ付近を拡大したものです。この特性図に、ダイオードに（一定の小さな交流電圧v_fを加えながら）流れる直流I_Fを０．１ｍＡ、１ｍＡ、３ｍＡと変化させたときの様子を示します。



上の特性図から、同じ大きさの交流電圧ｖ$_f$が加わっていても、流れている直流電流Ｉ$_F$が多い程、流れる交流電流ｉ$_f$が多くなることが分ります。つまりダイオードは、直流電流が増すと交流が流れ易くなる（交流の抵抗値（インピーダンス）が小さくなる）と分ります。

（このように、直流電流I_Fが増えると小さくなる）ダイオードのインピーダンスZ_Dは次の式で計算できます。

$$\text{ダイオードの交流抵抗}\quad Z_D = \frac{26[mV]}{\text{直流電流 } I_F[A]}$$

Ｅｘｃｅｌでは、=26E-3/I1

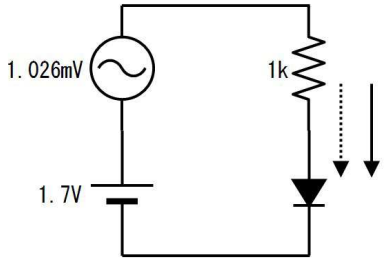
上の式に登場する２６ｍＶは、ダイオードの材料がシリコンである事から決まる値で、シリコンダイオードならいつも同じです。例えば、１ｍＡの直流が流れている時のダイオードのインピーダンスは、

$$\frac{26[mV]}{1[mA]} = 26\Omega$$

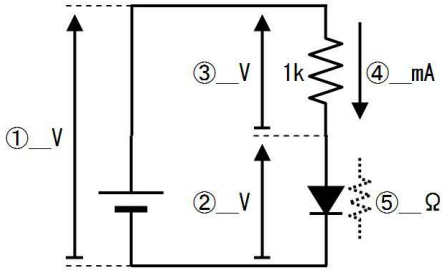
と計算することができます。

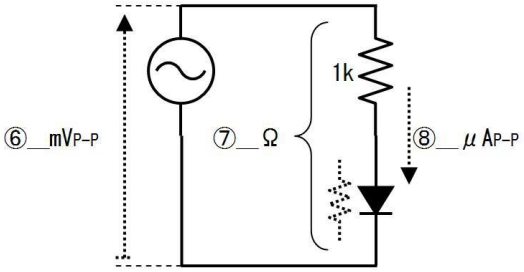
但し、このように考えて良いのは、上の特性図から分るように、直流に比べて交流が十分小さい場合（小信号回路の場合）だけです。つまり、交流の振幅が小さければ、「曲線」で出来た特性図の一部分を「直線」と考えて、そのときの交流抵抗（インピーダンス）を計算することができますが、交流の振幅が大きくなると、「曲線」の広い範囲を使用してしまうため、もはや「直線」と考えることが出来なくなり（オーム則が成り立つ、つまり、直線であることが前提の）インピーダンスが計算できなくなります。

１０.１. 練習



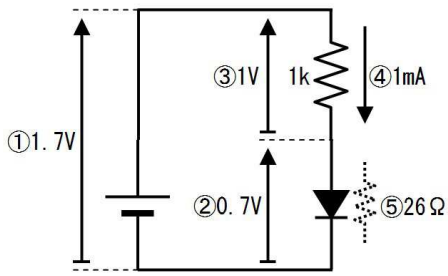
上図の回路に流れる直流電流と交流電流を、下図を参考に、下表に書き込んで検討してください。

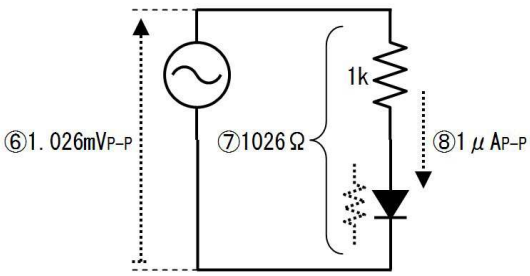




①	回路に加わる直流電圧は、	V
②	電流が流れているダイオードの順電圧V_Fは、	V
③	１ｋΩの両端電圧は、	V
④	１ｋΩに流れる電流は、	mA
⑤	ダイオードのインピーダンスは、 ２６mV÷１mA＝２６Ω	Ω
	交流について考えます。	―
⑥	回路に加わる交流電圧は、	mV
⑦	ダイオードのインピーダンスと抵抗を合計して、	Ω
⑧	回路に流れる交流電流は、	μA

１０.２. 答



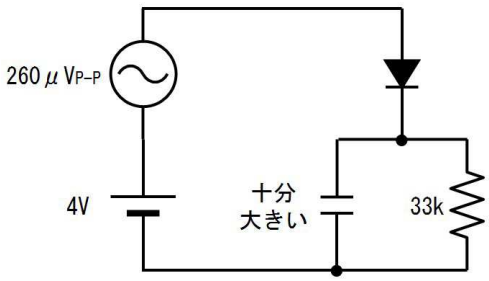


番号	質問	値
	直流について考えます。	―

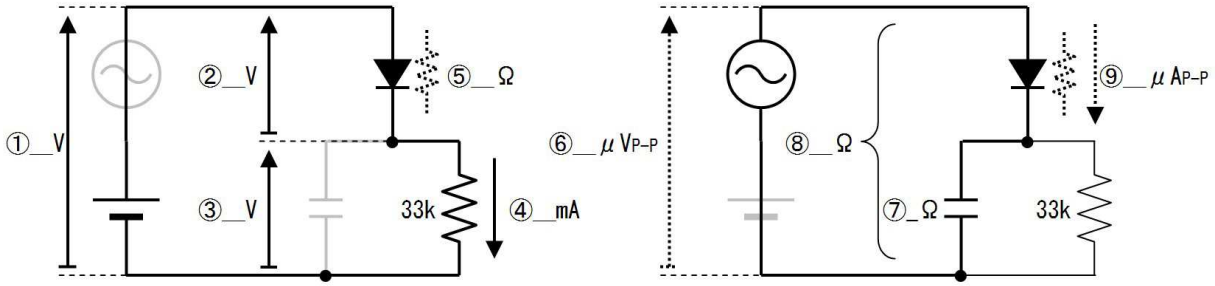
①	回路に加わる直流電圧は、	１．７Ｖ
②	電流が流れているダイオードの順電圧V_Fは、	０．７Ｖ
③	１ｋΩの両端電圧は、	１Ｖ
④	１ｋΩに流れる電流は、	１ｍＡ
⑤	ダイオードのインピーダンスは、 ２６ｍＶ÷１ｍＡ＝２６Ω	２６Ω
	交流について考えます。	－
⑥	回路に加わる交流電圧は、	１．０２６ｍＶ
⑦	ダイオードのインピーダンスと抵抗を合計して、	１０２６Ω
⑧	回路に流れる交流電流は、	１μＡ

このように、ダイオードはオーム則に従わない部品なので、そのままでは（重ね合わせの原理を使って）直流と交流を別々に考えることができません。しかし、（交流が直流に比べて十分小さければ、つまり、小信号回路であれば）直流と交流を別々に考えることができます。そのため、先に直流について考え、流れる直流からインピーダンスを求めて、次に求めたインピーダンスを使って交流について考えることができます。

１０.３. 練習



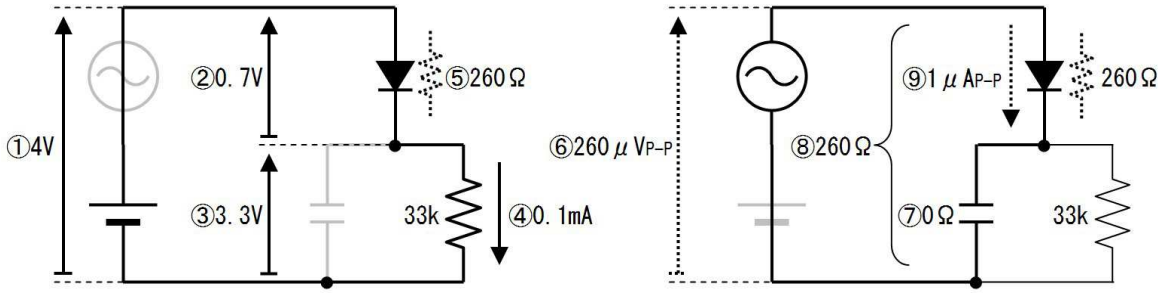
上図の回路に流れる直流電流と交流電流を、下図を参考に、下表に書き込んで検討してください。



番号	質問	値
	直流について考えます。	－
①	回路に加わる直流電圧は、	４Ｖ
②	電流が流れているダイオードの順電圧V_Fは、	０．７Ｖ
③	３３ｋΩの両端電圧は、	３．３Ｖ

④	３３ｋΩに流れる電流は、	０．１ｍＡ
⑤	ダイオードのインピーダンスは、 ２６ｍＶ÷０．１ｍＡ＝２６０Ω	２６０Ω
	交流について考えます。	－
⑥	回路に加わる交流電圧は、	２６０μV_{P-P}
⑦	十分大きなコンデンサのインピーダンスは、	０Ω
⑧	ダイオードとコンデンサの直列インピーダンスは、	２６０Ω
⑨	回路に流れる交流電流は、	１μA_{P-P}

１０.４. 答



番号	質問	値
	直流について考えます。	－
①	回路に加わる直流電圧は、	４Ｖ
②	電流が流れているダイオードの順電圧V_Fは、	０．７Ｖ
③	３３ｋΩの両端電圧は、	３．３Ｖ
④	３３ｋΩに流れる電流は、	０．１ｍＡ
⑤	ダイオードのインピーダンスは、 ２６ｍＶ÷０．１ｍＡ＝２６０Ω	２６０Ω
	交流について考えます。	－
⑥	回路に加わる交流電圧は、	２６０μV_{P-P}
⑦	十分大きなコンデンサのインピーダンスは、	０Ω
⑧	ダイオードとコンデンサの直列インピーダンスは、	２６０Ω
⑨	回路に流れる交流電流は、	１μA_{P-P}

１１. 直流と小信号の区別

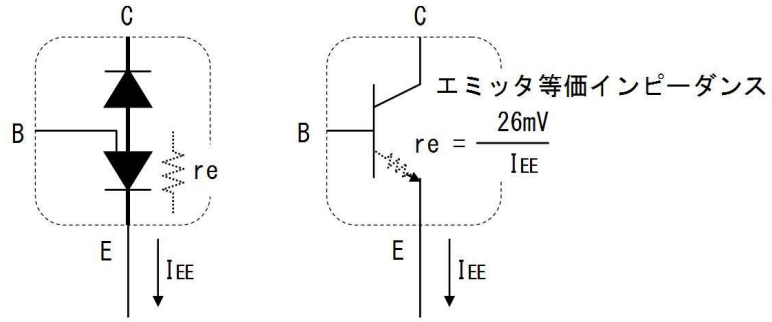
トランジスタ回路では、名前を聞いただけで、直流か、小信号かが分かるように、電圧や電流の呼び名が工夫されています。

交流／直流の区分	電圧	電流
直流や交流にこだわらない 直流と交流を合計した値	電圧の記号（大文字）Ｖに、大文字で端子の名前を添える。 エミッタ電圧：V_C ベース電圧：V_B 出力電圧：V_O 呼び方：ブイ・シー等	電流の記号（大文字）Ｉに、大文字で端子の名前を添える。 エミッタ電圧：I_C ベース電圧：I_B 出力電圧：I_O 呼び方：アイ・シー等
直流 （バイアス）	電圧の記号（大文字）Ｖに、大文字で端子の名前を２つ添える。 エミッタ直流電圧：V_{CC} ベース直流電圧：V_{BB} 出力直流電圧：V_{OO} 呼び方：ブイ・シー・シー等	電流の記号（大文字）Ｉに、大文字で端子の名前を２つ添える。 エミッタ直流電圧：I_{CC} ベース直流電圧：I_{BB} 出力直流電圧：I_{OO} 呼び方：アイ・シー・シー等
交流 小信号 （信号）	電圧の記号（小文字）ｖに、大文字で端子の名前を２つ添える。 エミッタ交流電圧：v_c ベース交流電圧：v_b 出力交流電圧：v_o 呼び方：スモール・ブイ・シー等	電流の記号（小文字）ｉに、小文字で端子の名前を添える。 エミッタ交流電圧：i_c ベース交流電圧：i_b 出力交流電圧：i_o 呼び方：スモール・アイ・シー等

そのまま発音したのでは、I_Cとi_cはどちらも「アイ・シー」で区別できませんから、小文字の方（交流の方）を「スモール・アイ・シー」等と「スモール」を付けて発音する場合もあります。また、直流電流（電圧）をバイアス電流（電圧）と、交流電流（電圧）を信号電流（電圧）と呼ぶ場合もあります。

１２. 小信号とトランジスタ

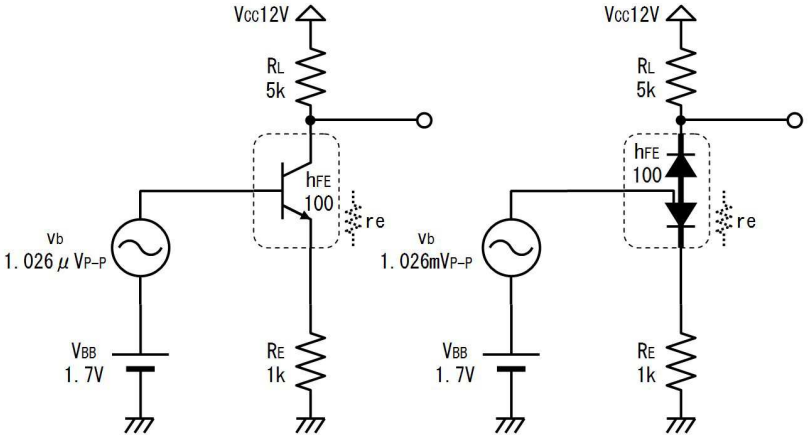
ダイオードでは、流れる直流が分れば、インピーダンスを知ることができました。トランジスタでもベースとエミッタの間はダイオードと考えることができます。ですから、ダイオードと同様に、エミッタを流れる直流が分かれば、（下図に示すダイオードと同じ計算で）エミッタのインピーダンスを知ることができます。このインピーダンスを、「エミッタ等価インピーダンス」（ｒｅ）と呼びます。



上図に示すとおり、エミッタ等価インピーダンスは２６ｍＶを直流電流で割って、下式で求めることができます。

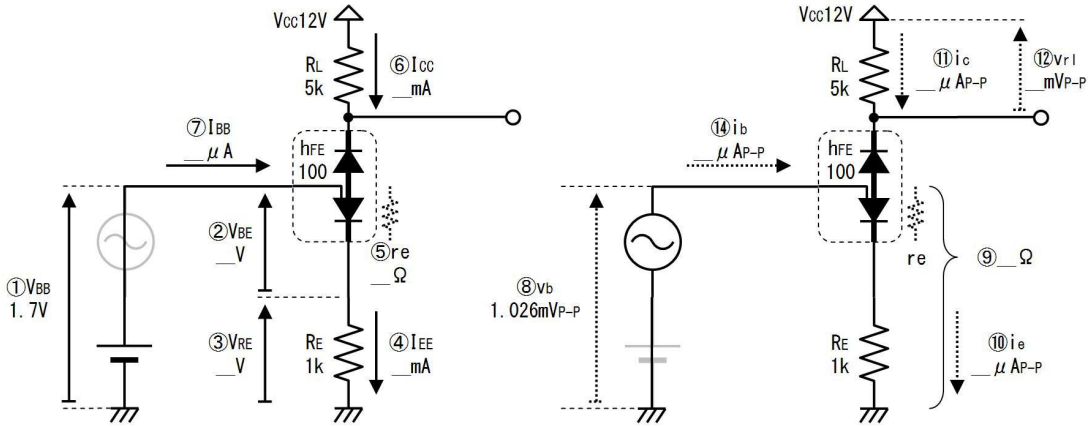
$$\text{エミッタの交流抵抗} = \frac{26mV}{\text{エミッタの直流電流}I_{EE}} = \text{エミッタ等価インピーダンス}re$$

たとえば、エミッタ直流（バイアス）電流ＩEEが１ｍＡなら、ｒｅは２６Ωです。このｒｅが分かれば、ダイオードと同様に、交流の様子を検討することができます。



１２.１. 練習

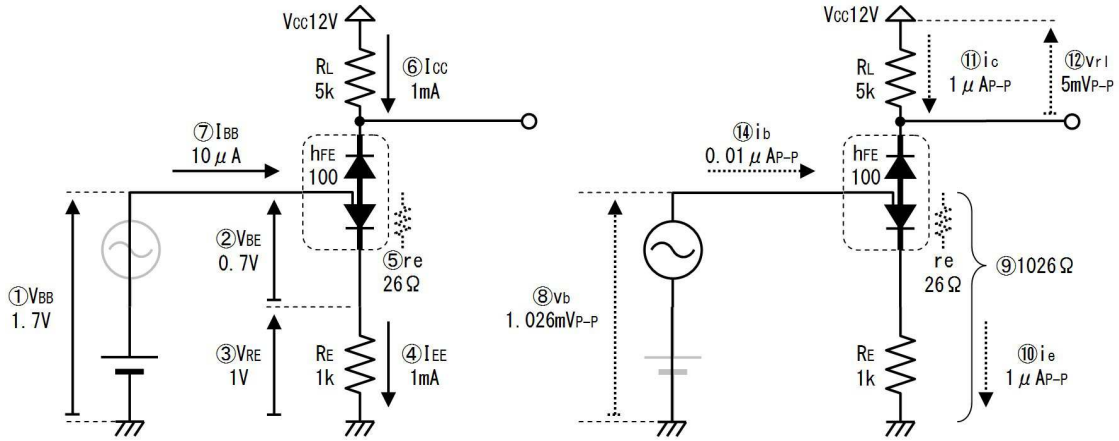
では、上図の小信号増幅回路を検討します。上図の回路を、下図を参考に下表に記入しながら、直流と交流について検討してください。



番号	質問	値
	直流について考えます。	－
①	ベースに加わる直流電圧は、	１．７Ｖ
②	電流が流れているトランジスタのＶBEは、	Ｖ
③	エミッタ抵抗ＲEの両端電圧ＶREは、	Ｖ
④	エミッタ（バイアス）電流ＩEEは、	ｍＡ
⑤	エミッタとベースの間をダイオードと考えたときのインピーダンス（ｒｅ）は、	Ω
⑥	コレクタ（バイアス）電流ＩCCは、	ｍＡ
⑦	ｈFEが１００だから、ベース（バイアス）電流ＩBBは、	μＡ

	交流について考えます。	－
⑧	ベースに加わる交流電圧は、	１．０２６mV$_{P-P}$
⑨	エミッタ側の全インピーダンスは、	Ω
⑩	エミッタに流れる電流は、	μA$_{P-P}$
⑪	コレクタに流れる電流は、（I$_C$＝I$_E$だから、）	μA$_{P-P}$
⑫	負荷抵抗R$_L$の両端に発生する電圧は、	mV$_{P-P}$
⑬	交流の振幅は約何倍に大きくなっていますか、	約　　倍
⑭	h$_{FE}$が１００だから、ベース信号電流は、	μA

１２.２. 答



番号	質問	値
	直流について考えます。	－
①	ベースに加わる直流電圧は、	１．７V
②	電流が流れているトランジスタのV$_{BE}$は、	０．７V
③	エミッタ抵抗R$_E$の両端電圧V$_{RE}$は、	１V
④	エミッタ（バイアス）電流I$_{EE}$は、	１mA
⑤	エミッタとベースの間をダイオードと考えたときのインピーダンス（ｒｅ）は、 ２６mV÷１mA＝２６Ω	２６Ω
⑥	コレクタ（バイアス）電流I$_{CC}$は、	１mA
⑦	ベース（バイアス）電流I$_{BB}$は、	１０μA
	交流について考えます。	－
⑧	ベースに加わる交流電圧は、	１．０２６mV$_{P-P}$

⑨	エミッタ側の全インピーダンスは、	１０２６Ω
⑩	エミッタに流れる電流は、	１μA_{P-P}
⑪	コレクタに流れる電流は、（$I_C = I_E$だから、）	１μA_{P-P}
⑫	負荷抵抗R_Lの両端に発生する電圧は、	５mV_{P-P}
⑬	交流の振幅は約何倍に大きくなっていますか、 ５mV÷１．０２６mV＝約５倍	約５倍
⑭	ベース信号電流は、 $i_c \div h_{fe}$＝１μA÷１００＝０．０１μA	０．０１μA

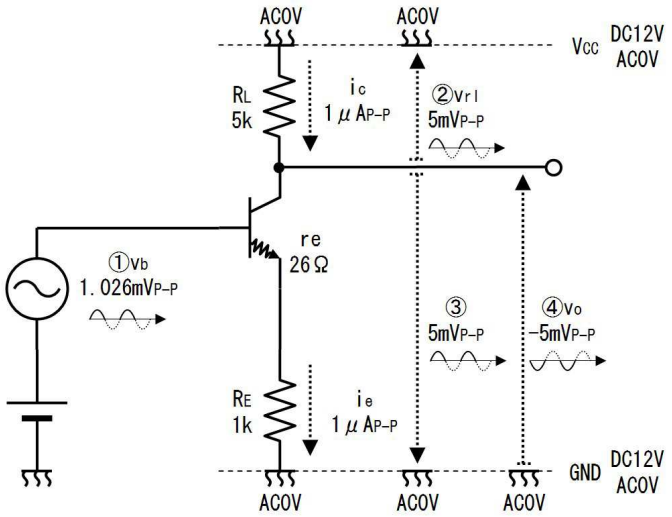
このように、負荷抵抗R_Lの両端に５mV_{P-P}の交流電圧が発生しました。この場合に、出力端子に現れる電圧を考えます。

まず、下図のように、電源（V_{CC}）もアース（ＧＮＤ）も（電圧が震えていないので）交流電圧はどちらも０Ｖで、交流にとっては同じ電圧の場所です。（下図に〰や≋で示します）

次に、今回の回路では、負荷抵抗R_Lの両端に、下図②のように、５mV_{P-P}の交流が発生していました。ここで、電源もアースも交流にとっては同じ電圧の場所（〰）でしたから、下図③のように、矢印を出力端子からアースに向けて描いても（交流にとっては）同じことです。

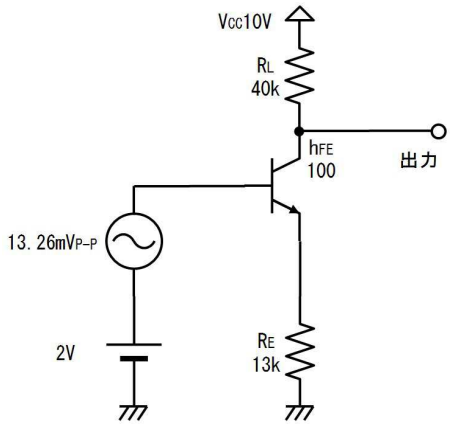
下図③の電圧は、矢印が下を向いています。いつもどおりに矢印を上向きに直すと、下図④のように、電圧の極性は－５mV_{P-P}と逆になります。

つまりこの回路は、１．０２６mV_{P-P}の交流が加わると（下図①）、－５mV_{P-P}（下図④）が出力されます。

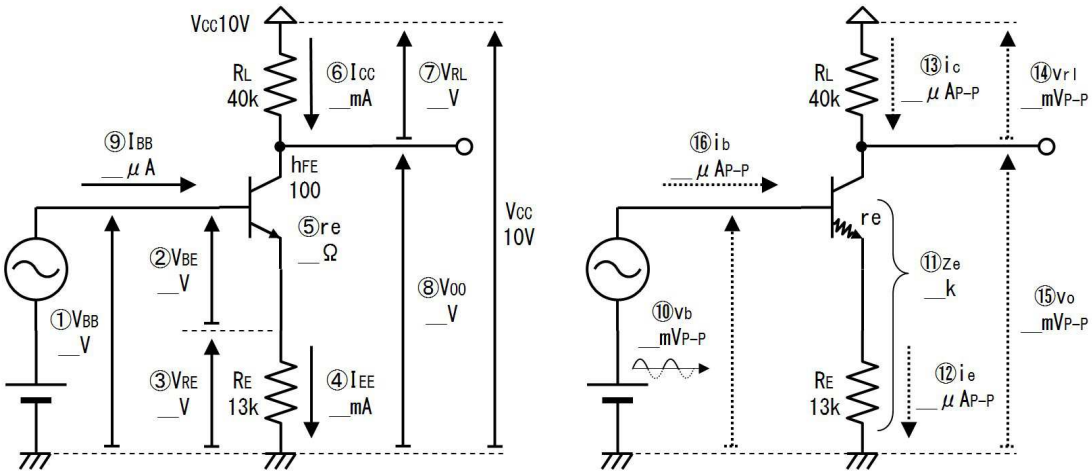


出力ｖ$_o$の極性がマイナスになるのは、上図①で入力された波が、上下逆になって④のように出力されるためです。

１２.３. 練習



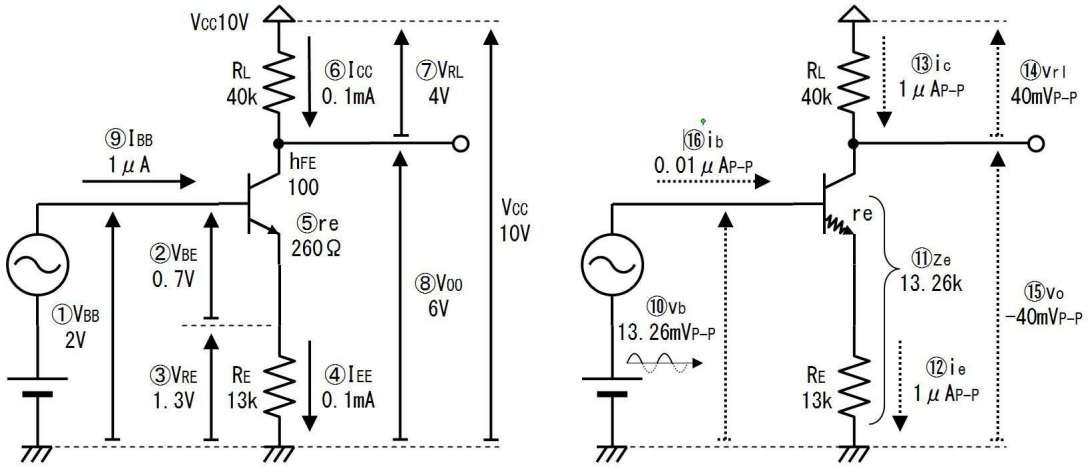
上図の回路で出力される交流電圧を、下図を参考に、下表に記入しながら検討してください。



番号	質問	値
	直流について考えます。	―
①	ベースに加わる直流電圧は、	V
②	電流が流れているトランジスタのV_{BE}は、	V
③	エミッタ抵抗R_Eの両端電圧V_{RE}は、	V
④	エミッタ直流電流I_{EE}は、	mA
⑤	エミッタとベースの間をダイオードと考えたときのインピーダンス（ｒｅ）は、	Ω
⑥	コレクタ直流電流I_{CC}は、	mA
⑦	負荷抵抗R_Lの両端電圧は、	V
⑧	出力直流電流V_{OO}は、	V
⑨	ベース直流電流I_{BB}は、	μA
	交流について考えます。	

⑩	ベースに加わる交流電圧は、	mV_{P-P}
⑪	エミッタ側の全インピーダンスは、	kΩ
⑫	エミッタに流れる交流電流は、	μA_{P-P}
⑬	コレクタに流れる交流電流は、（$I_C = I_E$だから、）	μA_{P-P}
⑭	負荷抵抗R_Lの両端に発生する交流電圧は、	mV_{P-P}
⑮	出力端子に生じる交流電圧は、	mV_{P-P}
⑯	ベースに流れる交流電流は、h_{FE}が１００だから、	μA
⑰	ベースに入力した交流電圧は、何倍になって出力されていますか。	約　　倍

１２.４. 答



番号	質問	値
	直流について考えます。	―
①	ベースに加わる直流電圧は、	２V
②	電流が流れているトランジスタのV_{BE}は、	０．７V
③	エミッタ抵抗R_Eの両端電圧V_{RE}は、	１．３V
④	エミッタ直流電流I_{EE}は、	０．１mA
⑤	エミッタとベースの間をダイオードと考えたときのインピーダンス（ｒｅ）は、 ２６mV÷０．１mA＝２６０Ω	２６０Ω
⑥	コレクタ直流電流I_{CC}は、	０．１mA
⑦	負荷抵抗R_Lの両端電圧は、	４V
⑧	出力直流電流V_{OO}は、	６V

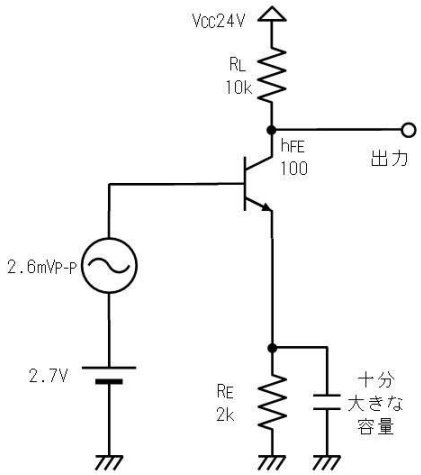
⑨	ベース直流電流I_{BB}は、	１μＡ
	交流について考えます。	
⑩	ベースに加わる交流電圧は、	１３．２６mV_{P-P}
⑪	エミッタ側の全インピーダンスは、	１３．２６ｋΩ
⑫	エミッタに流れる交流電流は、	１μA_{P-P}
⑬	コレクタに流れる交流電流は、（I_C＝I_Eだから、）	１μA_{P-P}
⑭	負荷抵抗R_Lの両端に発生する交流電圧は、	４０mV_{P-P}
⑮	出力端子に生じる交流電圧は、	－４０mV_{P-P}
⑯	ベースに流れる交流電流は、 $i_c \div h_{fe}$＝１μＡ÷１００＝０．０１μＡ	０．０１μＡ
⑰	ベースに入力した交流電圧は、何倍になって出力されていますか。 ４０mＶ÷１３．２６mＶ＝約３倍	約３倍

このタイプの回路の増幅率は$R_L \div (re + R_E)$で求めることができます。このように、エミッタ抵抗がある増幅器は（安定していますが）増幅率が小さくなります。

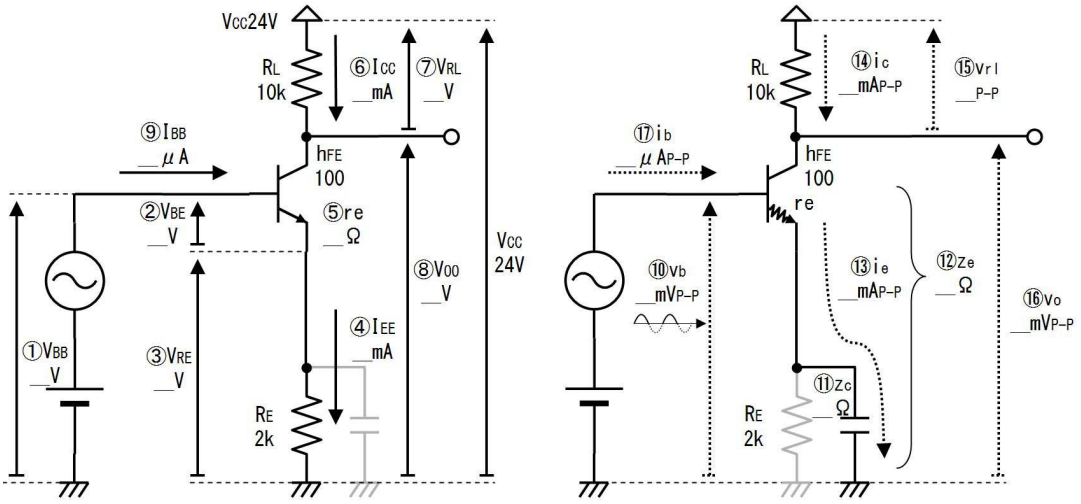
１３. エミッタバイパスコンデンサ

下図のように、エミッタ抵抗と並列にコンデンサを取り付ければ、回路の安定性を保ったまま、増幅率を大きくできます。このコンデンサを「エミッタバイパスコンデンサ」と呼びます。

直流から見ればエミッタ抵抗があり、そのために回路は（温度が変化する等しても）安定していますし、交流から見ればエミッタ抵抗がないため、エミッタに沢山の交流電流が流れて、増幅率を大きくできます。



１３.１. 練習

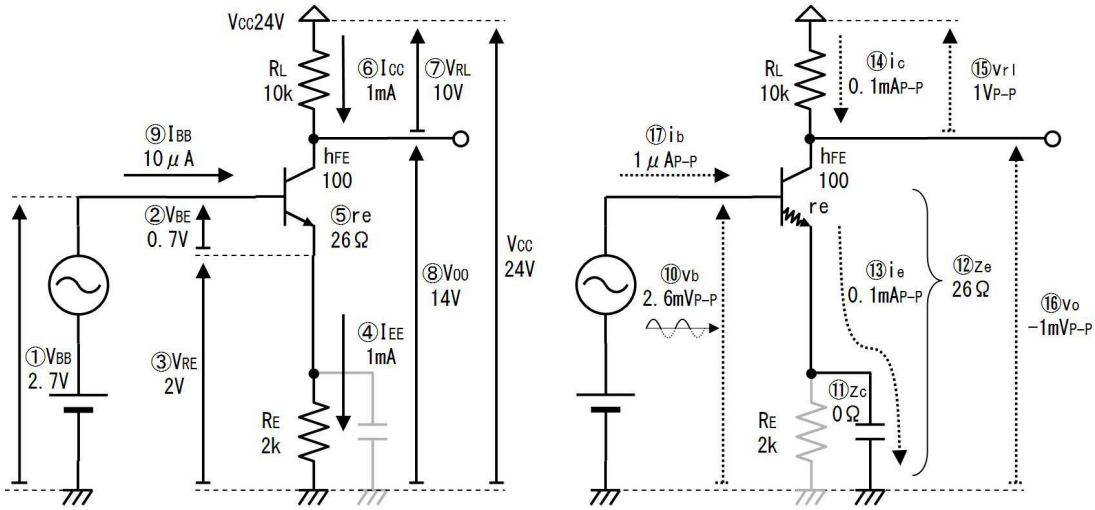


上図の回路を下表に書き込みながら直流と交流について検討し、交流出力電圧を求めてください。

番号	質問	値
	直流について考えます。	―
①	ベースに加わる直流電圧は、	V
②	電流が流れているトランジスタのV_{BE}は、	V
③	エミッタ抵抗R_Eの両端電圧V_{RE}は、	V
④	エミッタ直流電流I_{EE}は、	mA
⑤	エミッタとベースの間をダイオードと考えたときのインピーダンス（ｒｅ）は、	Ω
⑥	コレクタ直流電流I_{CC}は、	mA
⑦	負荷抵抗R_Lの両端電圧は、	V
⑧	出力直流電流V_{OO}は、	V
⑨	ベース直流電流I_{BB}は、	μA
	交流について考えます。	
⑩	ベースに加わる交流電圧は、	mV_{P-P}
⑪	十分大きな容量のコンデンサのインピーダンスは、	Ω
⑫	エミッタ側の全インピーダンスは、 $r_e+z_c=26Ω+0Ω=26Ω$	Ω
⑬	エミッタに流れる交流電流i_eは、	mA_{P-P}
⑭	コレクタに流れる交流電流は、（$I_C=I_E$だから、）	mA_{P-P}
⑮	負荷抵抗R_Lの両端に発生する交流電圧は、	V_{P-P}

⑯	出力端子に生じる交流電圧は、	V_{P-P}
⑰	ベースに流れる交流電流は、	μＡ
⑱	ベースに入力した交流電圧は、何倍になって出力されていますか。	倍

１３.２. 答

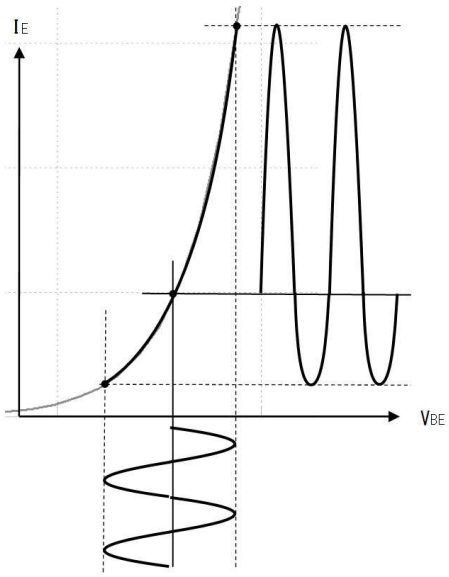


番号	質問	値
	直流について考えます。	－
①	ベースに加わる直流電圧は、	２．７Ｖ
②	電流が流れているトランジスタのV_{BE}は、	０．７Ｖ
③	エミッタ抵抗R_Eの両端電圧V_{RE}は、	２Ｖ
④	エミッタ直流電流I_{EE}は、	１ｍＡ
⑤	エミッタとベースの間をダイオードと考えたときのインピーダンス（ｒｅ）は、 ２６ｍＶ÷１ｍＡ＝２６Ω	２６Ω
⑥	コレクタ直流電流I_{CC}は、	１ｍＡ
⑦	負荷抵抗R_Lの両端電圧は、	１０Ｖ
⑧	出力直流電流V_{OO}は、	１４Ｖ
⑨	ベース直流電流I_{BB}は、	１０μＡ
	交流について考えます。	
⑩	ベースに加わる交流電圧は、	２．６ｍV_{P-P}
⑪	十分大きな容量のコンデンサのインピーダンスは、	０Ω
⑫	エミッタ側の全インピーダンスは、	２６Ω

	$r_e + z_c = 26\Omega + 0\Omega = 26\Omega$	
⑬	エミッタに流れる交流電流i_eは、	$0.1mA_{P-P}$
⑭	コレクタに流れる交流電流は、（$I_C = I_E$だから、）	$0.1mA_{P-P}$
⑮	負荷抵抗R_Lの両端に発生する交流電圧は、	$1V_{P-P}$
⑯	出力端子に生じる交流電圧は、	$-1V_{P-P}$
⑰	ベースに流れる交流電流は、 $i_c \div h_{fe} = 0.1mA \div 100 = 1\mu A$	$1\mu A$
⑱	ベースに入力した交流電圧は、何倍になって出力されていますか。 $1V \div 2.6mV = 380$倍	380倍

このように、エミッタバイパスコンデンサを取り付けると、増幅率が大きくなります。このタイプの回路の増幅率は、$R_L \div re$で求めることができます。

しかし、（交流から見ると、エミッタ抵抗が無くなり）ベースとエミッタの間（B－E間）に大きな交流電圧が加わるため、波形が歪みます。下図にその様子を示します。この図では、グラフ下側から入ってきた交流が増幅されて、グラフ右側に出力されますが、出力波形は最初の波形と大きく異なっています。



上図で分かるように、V_{BE}とI_Eの特性は曲線です。曲線に沿って回路が動作すると、かならず波形が歪みます。そこで小信号回路では「直流電圧（電流）に比べて、交流電圧（電流）が十分に小さい」というルールを設けて（本当は曲線である特性の「極一部」だけを使用して）直線に沿って回路を動作させ、信号を歪まさずに増幅していました。

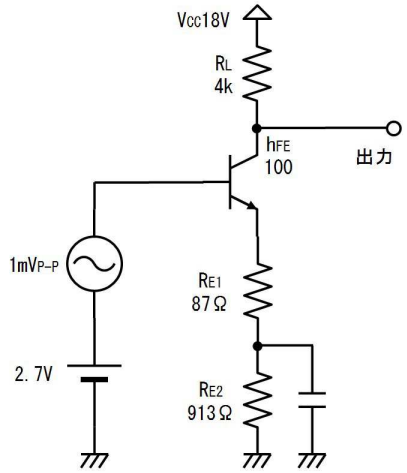
しかし、上図のように信号が（直流に比べて）大きくなると、とても「極一部」とは言えなくなってしまい、曲線に沿って回路が動作し、波形が歪みます。

直流電流と交流電流の大きさを、上で練習した回路で比較すると、④エミッタ直流電流が１ｍＡで、⑬エミッタ交流電流が０．１ｍＡと、直流にくらべて交流が１０分の１小さいだけです。歪みの少ない増幅を行うためには、交流電流を直流電流の１００分の１程度以下に小さくすることが必要です。

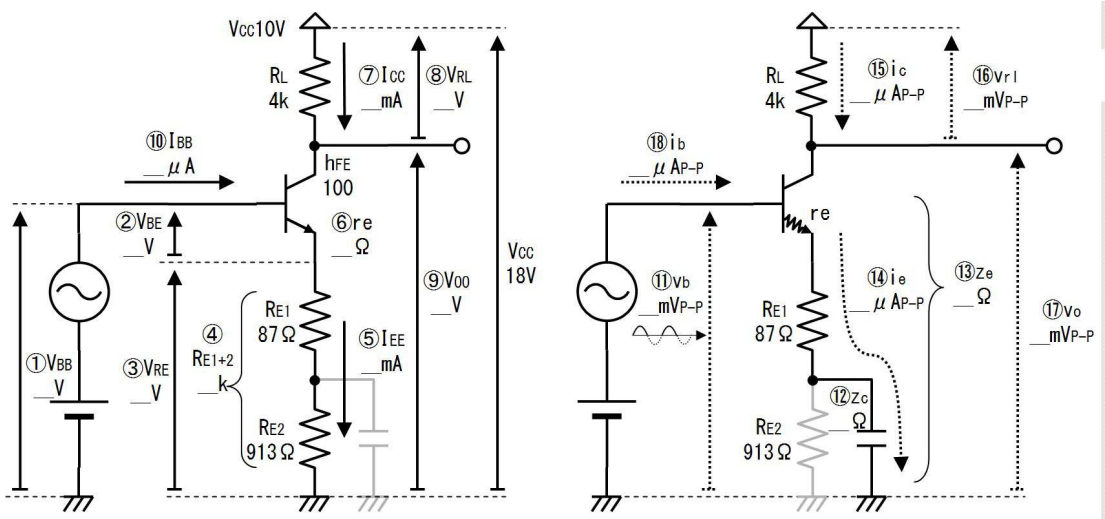
もちろん、同じ回路でも信号の振幅が小さかったり、歪が気にならない場合は、上の練習の回路で大きな増幅率を得ることも可能です。但し、あまりに増幅率が大きく、動作が不安定になる（発振する）場合もあります。

１３.３. 練習

下図の回路もエミッタバイパスコンデンサを設けた増幅回路です。この回路では、R_{E1}を追加してエミッタ側のインピーダンスを大きくし、信号電流を小さくしています。これによって増幅率は小さくなりますが、波形の歪が小さくなります。

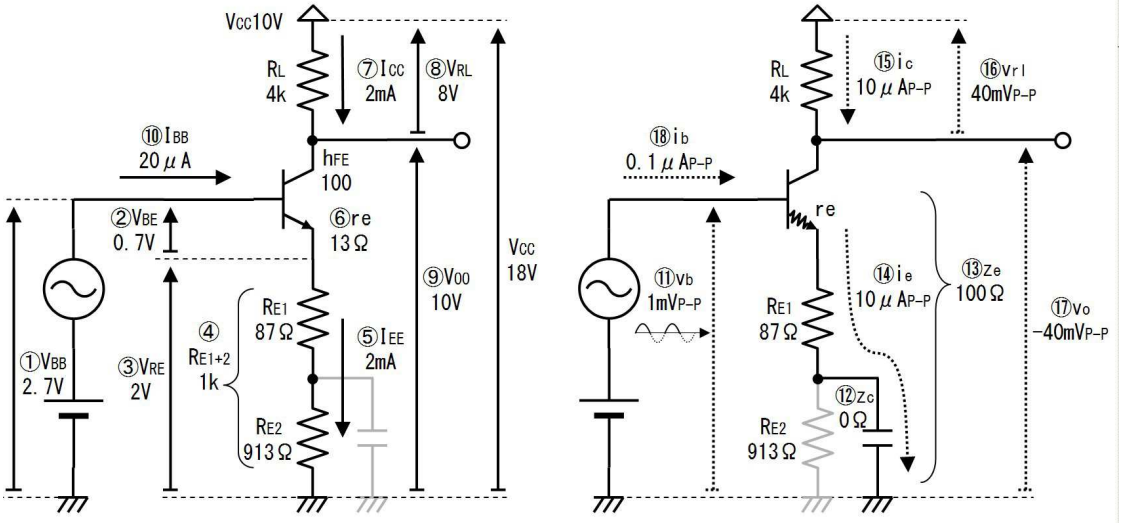


上図の回路で出力される交流電圧を、下図を参考に、下表に記入しながら検討してください。



番号	質問	値
	直流について考えます。	―
①	ベースに加わる直流電圧は、	V
②	電流が流れているトランジスタのV_{BE}は、	V
③	エミッタ抵抗R_Eの両端電圧V_{RE}は、	V
④	エミッタ抵抗R_{E1}とR_{E2}の直列合成抵抗は、	kΩ
⑤	エミッタ直流電流I_{EE}は、	mA

⑥	エミッタとベースの間をダイオードと考えたときのインピーダンス（ｒｅ）は、	Ω
⑦	コレクタ直流電流I_{CC}は、	mA
⑧	負荷抵抗R_Lの両端電圧は、	V
⑨	出力直流電流V_{OO}は、	V
⑩	ベース直流電流I_{BB}は、	μA
	交流について考えます。	
⑪	ベースに加わる交流電圧は、	mV_{P-P}
⑫	十分大きな容量のコンデンサのインピーダンスは、	Ω
⑬	エミッタ側の全インピーダンスは、	Ω
⑭	エミッタに流れる交流電流は、	μA_{P-P}
⑮	コレクタに流れる交流電流は、（$I_C=I_E$だから、）	μA_{P-P}
⑯	負荷抵抗R_Lの両端に発生する交流電圧は、	mV_{P-P}
⑰	出力端子に生じる交流電圧は、	mV_{P-P}
⑱	ベースに流れる交流電流は、	μA
⑲	ベースに入力した交流電圧は、何倍になって出力されていますか。	倍



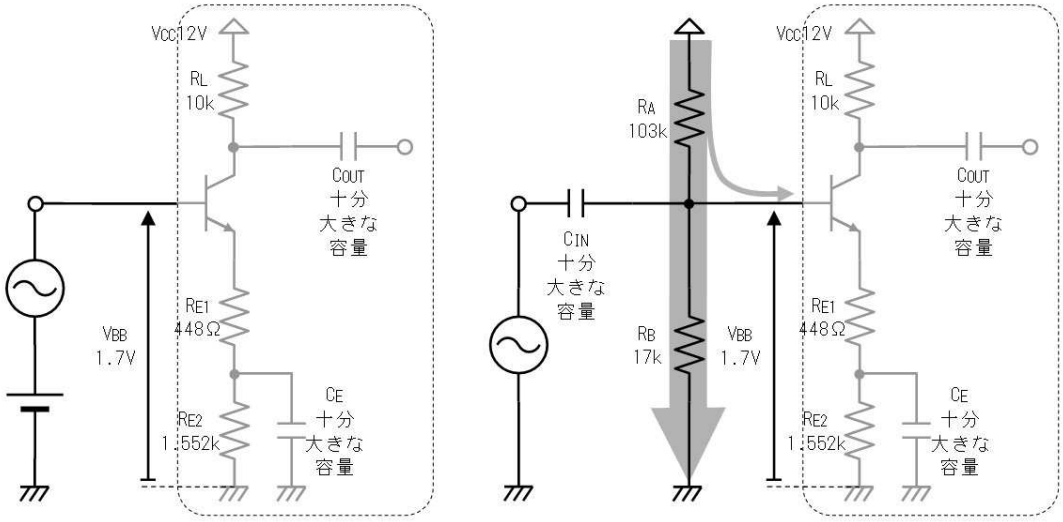
番号	質問	値
	直流について考えます。	－
①	ベースに加わる直流電圧は、	２．７Ｖ
②	電流が流れているトランジスタのV_{BE}は、	０．７Ｖ

③	エミッタ抵抗R_Eの両端電圧V_{RE}は、	２Ｖ
④	エミッタ抵抗R_{E1}とR_{E2}の直列合成抵抗は、	１ｋΩ
⑤	エミッタ直流電流I_{EE}は、	２ｍＡ
⑥	エミッタとベースの間をダイオードと考えたときのインピーダンス（ｒｅ）は、 ２６ｍＶ÷２ｍＡ＝１３Ω	１３Ω
⑦	コレクタ直流電流I_{CC}は、	２ｍＡ
⑧	負荷抵抗R_Lの両端電圧は、	８Ｖ
⑨	出力直流電流V_{OO}は、	１０Ｖ
⑩	ベース直流電流I_{BB}は、	２０μＡ
	交流について考えます。	
⑪	ベースに加わる交流電圧は、	１ｍV_{P-P}
⑫	十分大きな容量のコンデンサのインピーダンスは、	０Ω
⑬	エミッタ側の全インピーダンスは、	１００Ω
⑭	エミッタに流れる交流電流は、	１０μA_{P-P}
⑮	コレクタに流れる交流電流は、（I_C＝I_Eだから、）	１０μA_{P-P}
⑯	負荷抵抗R_Lの両端に発生する交流電圧は、	４０ｍV_{P-P}
⑰	出力端子に生じる交流電圧は、	－４０ｍV_{P-P}
⑱	ベースに流れる交流電流は、 i_c÷h_{fe}＝１０μＡ÷１００＝０．１μＡ	０．１μＡ
⑲	ベースに入力した交流電圧は、何倍になって出力されていますか。 ４０ｍＶ÷１ｍＶ＝４０倍	４０倍

このように、R_{E1}を追加することで、増幅率は４０倍と小さくなります。このタイプの回路の増幅率は、R_L÷（ｒｅ＋R_{E1}）で求めることができます。また、⑩ベース直流電流２０μＡに対して、⑱ベース交流電流は０．１μＡと、２００分の１に小さくなっており、歪みは少なくなります。

１４．増幅回路の分圧バイアス

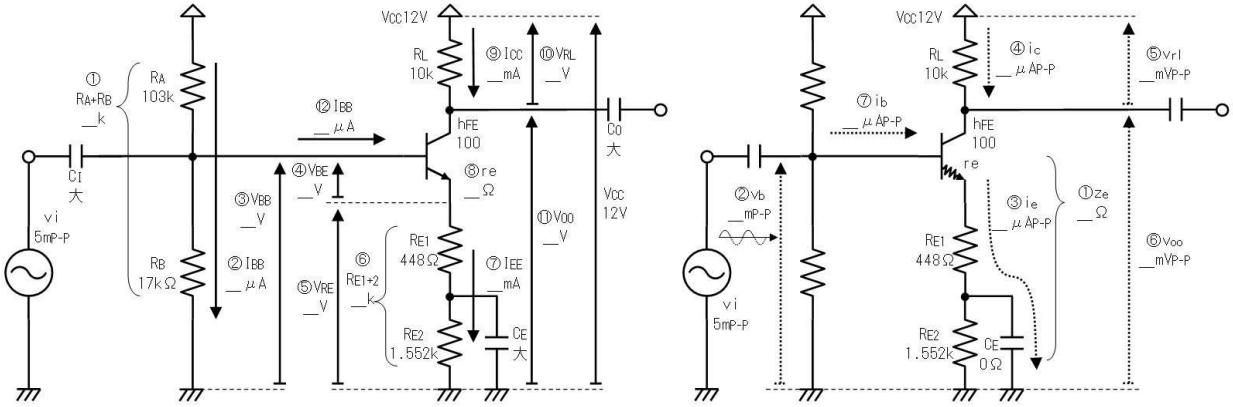
さて、これまで練習した回路では、下図左側のように、信号に直流を接続して回路に加えていました。しかし通常の信号には直流が含まれていません。そこで既に説明した「分圧バイアス」の方法を利用して、下図右のような回路で、ベースに一定の電圧（ここでは、１．７Ｖ）を加えます。



上図右の回路では（ベース電流がｈ$_{FE}$のバラツキで変化するので）上図右のＲ$_{A}$とＲ$_{B}$にはベース電流の１０倍～１００倍の電流を流すのがポイントでした。

１４.１. 練習

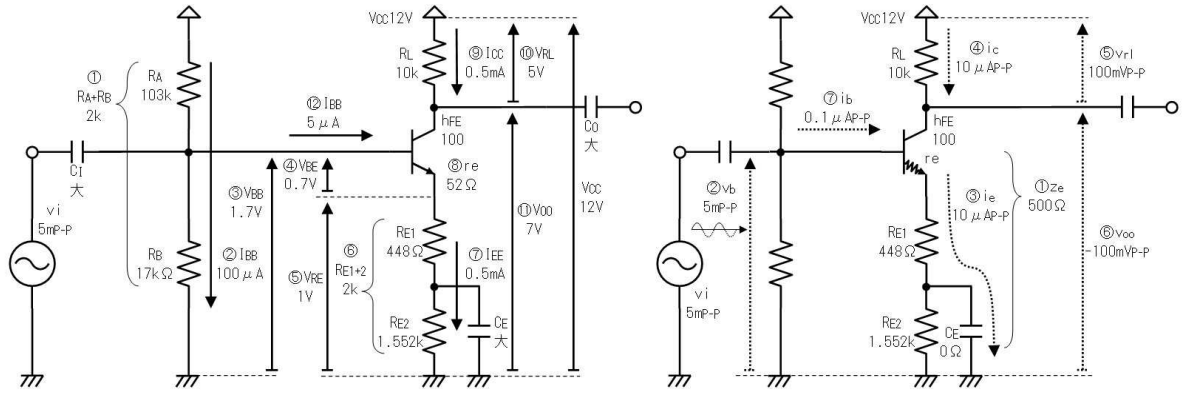
上図の回路を、下図を参考に下表に書き込みながら検討し、信号（交流）増幅率を求めて下さい。



番号	質問	値
	上図左側を使って、直流について考えます。	－
①	分圧バイアス抵抗Ｒ$_{A}$とＲ$_{B}$の合計は、	ｋΩ
②	Ｒ$_{A}$とＲ$_{B}$に流れる電流は、	μＡ
③	ベースバイアス電圧Ｖ$_{BB}$は、	Ｖ
④	ベースエミッタ間電圧Ｖ$_{BE}$は、	Ｖ
⑤	Ｒ$_{E1}$とＲ$_{E2}$の直列部分に加わる電圧は、	Ｖ
⑥	Ｒ$_{E1}$とＲ$_{E2}$の直列合成抵抗は、	ｋΩ
⑦	エミッタバイアス電流Ｉ$_{EE}$は、	ｍＡ
⑧	エミッタ等価インピーダンスｒｅは、	Ω
⑨	コレクタバイアス電流Ｉ$_{CC}$は、	ｍＡ

⑩	負荷抵抗R_Lの両端電圧は、	V
⑪	出力直流電圧V_{OO}は、	V
⑫	ベースバイアス電流I_{BB}は、	μA
	上図右側を使って、交流について考えます。	
①	エミッタ側の合計インピーダンスZeは、	Ω
②	ベースに加わる交流（信号）電圧は、	mV_{P-P}
③	エミッタ交流電圧ｉｅは、	μA_{P-P}
④	コレクタ交流電圧ｉｃは、	μA_{P-P}
⑤	負荷抵抗R_Lの両端の交流電圧v_{rl}は、	mV_{P-P}
⑥	出力端子の交流電圧v_{oo}は、	mV_{P-P}
⑦	ベース交流電流i_{bb}は、	μA_{P-P}
⑧	エミッタバイアス電流は、エミッタ交流電流の何倍、	倍

１４.２. 答



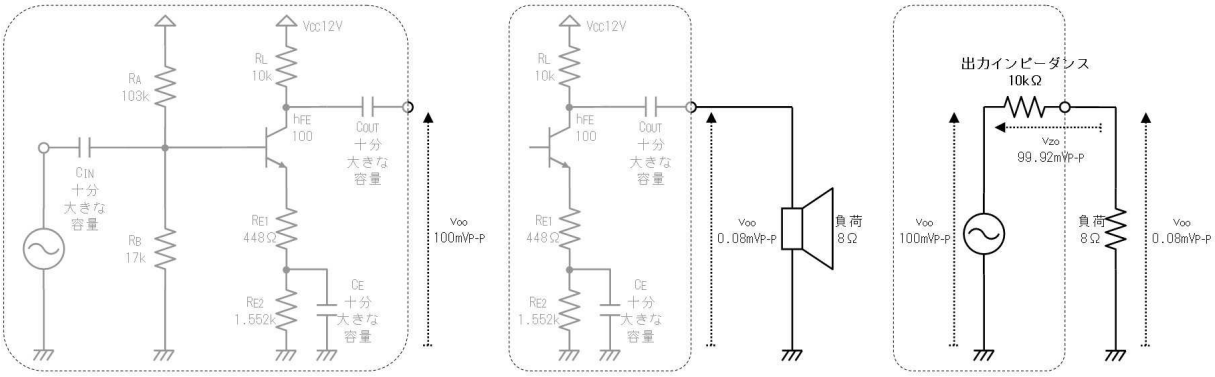
番号	質問	値
	上図左側を使って、直流について考えます。	－
①	分圧バイアス抵抗R_AとR_Bの合計は、	１２０ｋΩ
②	R_AとR_Bに流れる電流は、	１００μA
③	ベースバイアス電圧V_{BB}は、	１．７V
④	ベースエミッタ間電圧V_{BE}は、	０．７V
⑤	R_{E1}とR_{E2}の直列部分に加わる電圧は、	１V
⑥	R_{E1}とR_{E2}の直列合成抵抗は、	２ｋΩ
⑦	エミッタバイアス電流I_{EE}は、	０．５mA
⑧	エミッタ等価インピーダンスｒｅは、	５２Ω

⑨	コレクタバイアス電流I_{CC}は、	０．５mA
⑩	負荷抵抗R_Lの両端電圧は、	５V
⑪	出力直流電圧V_{OO}は、	７V
⑫	ベースバイアス電流I_{BB}は、	５μA
	上図右側を使って、交流について考えます。	
①	エミッタ側の合計インピーダンスＺｅは、	５００Ω
②	ベースに加わる交流（信号）電圧は、	$5mV_{P-P}$
③	エミッタ交流電圧ｉｅは、	$10\mu A_{P-P}$
④	コレクタ交流電圧ｉｃは、	$10\mu A_{P-P}$
⑤	負荷抵抗R_Lの両端の交流電圧v_{rl}は、	$100mV_{P-P}$
⑥	出力端子の交流電圧v_{oo}は、	$-100mV_{P-P}$
⑦	ベース交流電流i_{bb}は、	$0.1\mu A_{P-P}$
⑧	エミッタバイアス電流は、エミッタ交流電流の何倍、	５０倍

１５. 入出力インピーダンス

さて、練習でも取り扱った下図左の増幅回路の出力電圧は、$100mV_{P-P}$でした。１００mVあればスピーカーも多少は鳴るはずです。そこで、下図中央のように８Ωのスピーカーを接続すると、音が出ません。このとき出力端子の信号電圧を測定すると、$0.08mV_{P-P}$しか出力されていません。

このように増幅器に負荷を接続すると出力電圧が低下します。これは、下図右側に示すように、増幅器の内部に「出力インピーダンス」と呼ぶ抵抗があるためです。

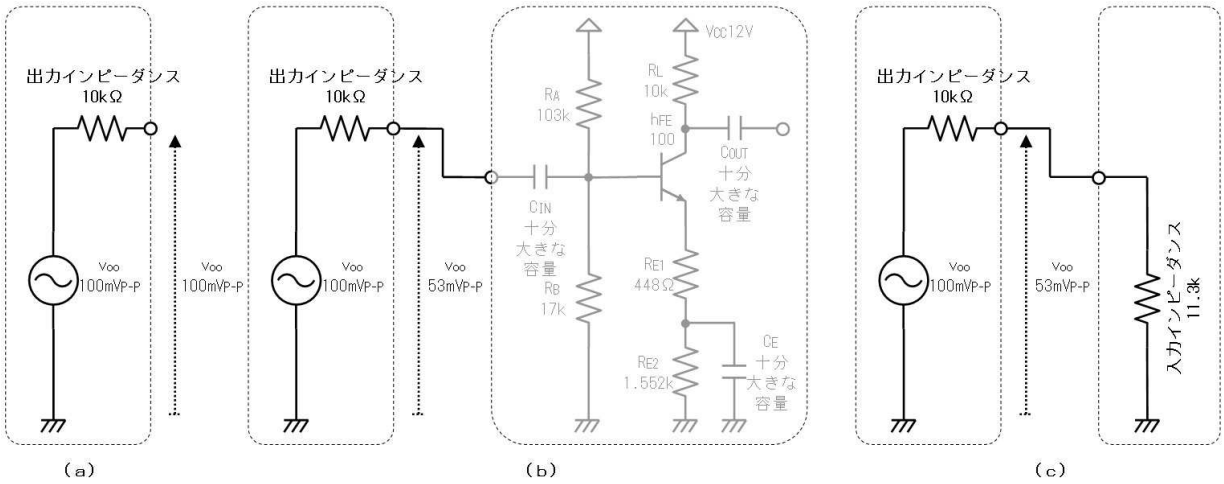


増幅器の出力を利用するとき、「どの程度の（インピーダンスの）負荷を繋いだら良いか」あるいは「負荷を接続すると、出力電圧はいくらになるか」を知るためには、出力インピーダンスの値が重要です。

増幅器は出力インピーダンスと同じ値の負荷抵抗を接続したとき最も大きな電力を取り出すことができます。

また、下図（ａ）のように、無負荷で出力電圧$100mV_{P-P}$の回路に、下図（ｂ）のように、次段の増幅回路を接続すると、１００mVであった出力電圧が、$53mV_{P-P}$に低下しました。これは、下図（ｃ）に示すように、次段の増幅器の入力部に「入力インピーダンス」と呼ぶ抵抗があり、これが接

続されたことで、前段の増幅器の出力電圧が低下するためです。

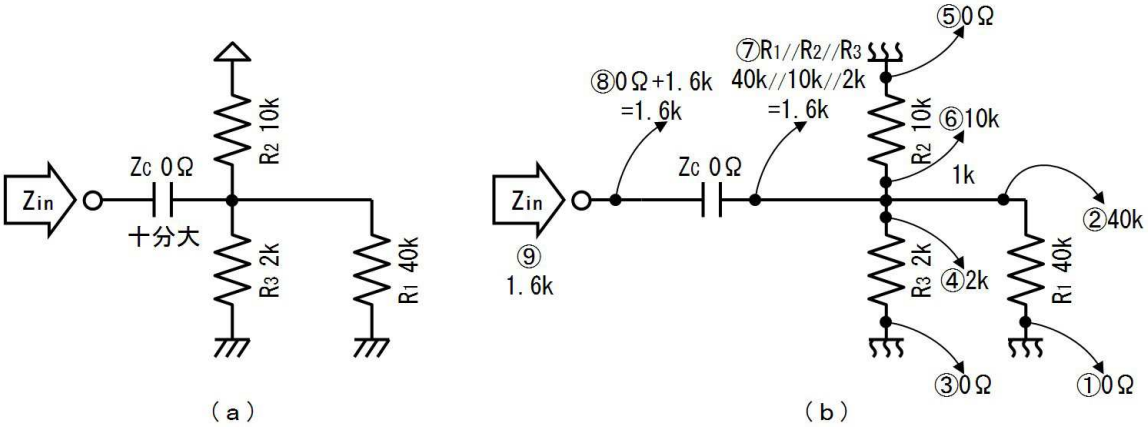


このように、増幅器を信号に接続するとき「接続すると、信号の電圧はいくらになるか」を知るためには、入力インピーダンスの値が重要です。

このような理由で、増幅器の出力インピーダンスと入力インピーダンスは、他の回路と接続したときの様子を知るために重要です。入力インピーダンスはZ_iやZ_{in}、出力インピーダンスはZ_oやZ_{out}の記号で表します。

では、入力インピーダンスや出力インピーダンス（入出力インピーダンス）を求める方法を説明します。

例えば、下図（ａ）の回路の入力インピーダンスは、下図（ｂ）のような手順で求めます。この方法では、「アースも電源も（電圧の振動が無い点だから）交流にとってはアースである」と考えます。



１５.１. 確認

上図（ｂ）を見ながら、下表に記入して、上図の回路の入力インピーダンスを求めてください。

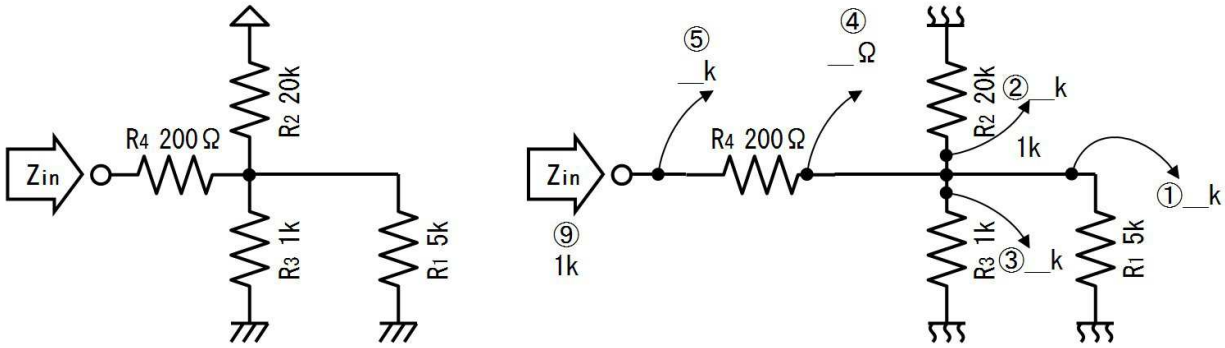
番号	質問	値
①	R_1の下側からアースを見れば、	Ω
②	R_1の上側からアースを見れば、	ｋΩ
③	R_3の下側からアースを見れば、	Ω
④	R_3の上側からアースを見れば、	ｋΩ

⑤	（電源は交流にとってはアースと同じ０Ｖだから、） R_2の上側から電源を見れば、	Ω
⑥	R_2の下側から電源を見れば、	ｋΩ
⑦	コンデンサの右側から、右側を見れば、 これまでに求めた３つのインピーダンスが並列に見えて、４０ｋ／／１０ｋ／／２ｋ	ｋ
⑧	入力端子（コンデンサの左側）から、回路全体を見れば、 上で求めたインピーダンスとコンデンサのインピーダンスが直列に見えて、 ０Ω＋１．６ｋΩ	ｋΩ

１５.２. 答

このようにして、上図の回路の入力インピーダンスを１．６ｋΩと知ることができます。

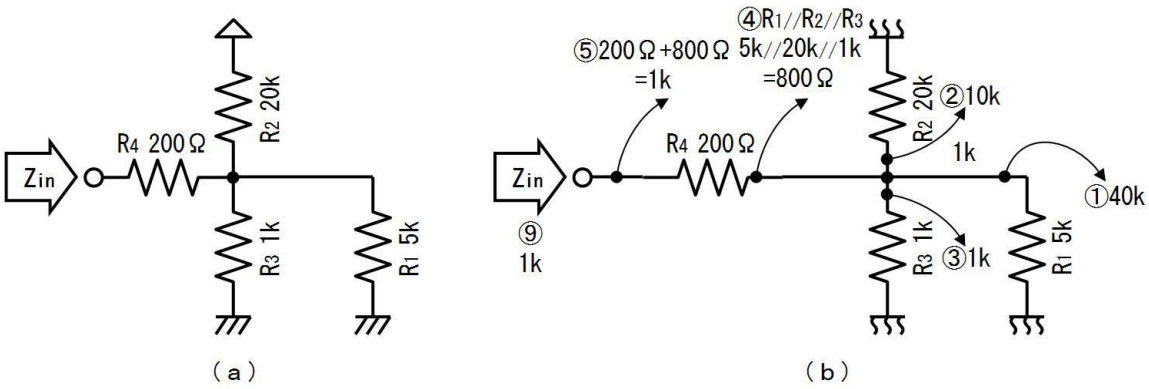
１５.３. 練習



上図（ａ）の回路の入力インピーダンスを、上図（ｂ）の考え方で、下表に書き込みながら求めてください。

番号	質問	値
①	R_1の上側からアースを見れば、	ｋΩ
②	R_2の下側から電源を見れば、	ｋΩ
③	R_3の上側からアースを見れば、	ｋΩ
④	R_4の右側から、右側を見れば、 ①～③のインピーダンスが並列に見えて、	Ω
⑤	入力端子から回路全体を見れば、 上の④のインピーダンスに、R_4のインピーダンスが加わって、	ｋΩ

１５.４. 答

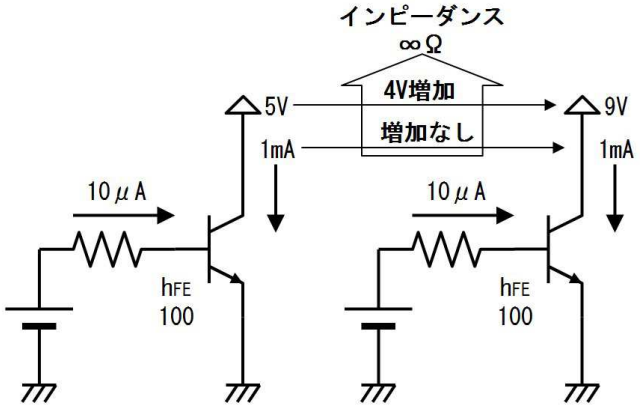


番号	質問	値
①	R_1の上側からアースを見れば、	５ｋΩ
②	R_2の下側から電源を見れば、	２０ｋΩ
③	R_3の上側からアースを見れば、	１ｋΩ
④	R_4の右側から、右側を見れば、 ５ｋ／／２０ｋ／／１ｋ＝８００Ω	８００Ω
⑤	入力端子から回路全体を見れば、 ２００Ω＋８００Ω＝１ｋΩ	１ｋΩ

１６. コレクタのインピーダンス

下図のように、ベース電流のh_{FE}倍がコレクタに流れるため、例えば、ベース電流が１０μＡで、h_{FE}が１００倍なら、コレクタ電流は１ｍＡです。

下図左では５Ｖのコレクタ電圧が、右では９Ｖと変化していますが、コレクタ電流は左右共に１ｍＡで一定です。このことを「定電流特性」と呼びました。

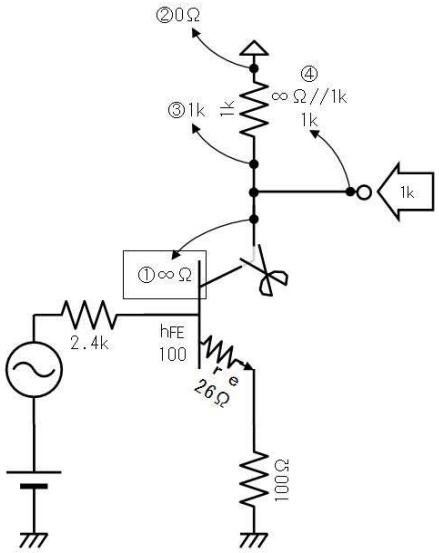


つまり、「外部から電圧の変化（交流電圧）を加えても、電流が変化しない（交流電流が流れない）」という事ですから、交流の抵抗値（インピーダンス）は、無限に大きい事が分かります。

インピーダンスは抵抗と同様に、電圧÷電流ですから、次の計算からも、インピーダンスが無限に大きくなる事が分ります。

インピーダンス ＝ 交流電圧 ÷ 交流電流 ＝ ４$V_{変化}$ ÷ ０m$A_{変化}$ ＝ ∞

コレクタのインピーダンスは∞に大きい（交流を通さない）ので、下図のように「コレクタはインピーダンス的には断線している」と考えれば、下図の手順でコレクタ回路のインピーダンスを簡単に求めることができます。



１６.１. 確認

上図を見て下表を書き込んでください。

番号	質問	値
① 重要	コレクタのインピーダンスは、	Ω
②	１ｋΩの上側から電源を見るとインピーダンスは、	Ω
③	１ｋΩの下側から電源を見るとインピーダンスは、	ｋΩ
④	出力端子から回路を見ると、①と③が並列に見えて、	ｋΩ

１６.２. 答

上図を見て下表を書き込んでください。

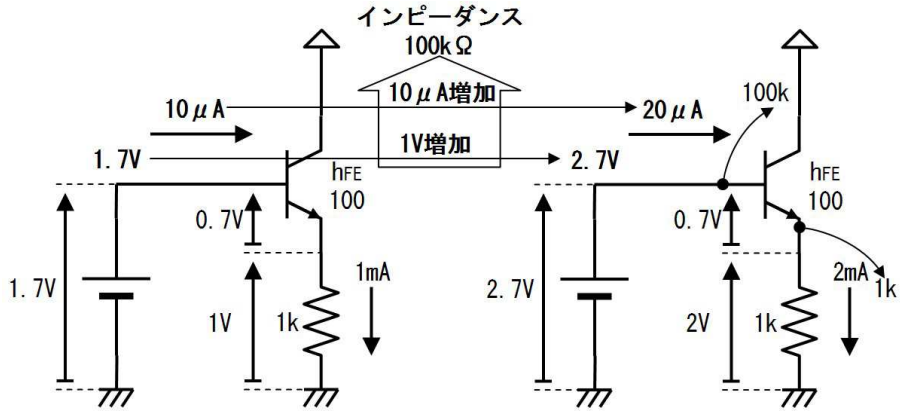
番号	質問	値
① 重要	コレクタのインピーダンスは、	∞Ω
②	１ｋΩの上側から電源を見るとインピーダンスは、	０Ω
③	１ｋΩの下側から電源を見るとインピーダンスは、	１ｋΩ
④	出力端子から回路を見ると、①と③が並列に見えて、	１ｋΩ

１７. ベースのインピーダンス

下図のように、例えば、h_{FE}が１００倍のとき、エミッタ電流が１mAならベース電流は１０μA（下

図左)、エミッタ電流が２mAならベース電流は２０μA（下図右）です。

下図左では１．７Vのベース電圧が、右では２．７Vと、１V変化しています。これによって、エミッタの電流は１mAから２mAに変化していますが、ベース電流はエミッタ電流の１／h_{FE}ですから、１０μAから２０μAに変化しています。



つまり、ベースの電圧を１V変化させる（交流１Vを加える）と、ベース電流が１０μA変化する（交流電流が１０μA流れる）と分かります。ですから、次の計算のように、ベースのインピーダンスは１V÷１０μAで、１００kΩと分かります。

ベースのインピーダンス ＝ 交流電圧 ÷ 交流電流

＝ $1V_{変化}$ ÷ $10\mu A_{変化}$ ＝ １００kΩ

ベースの電流はエミッタの電流の１／h_{FE}に小さくなるので、エミッタ（からアースを見た時）のインピーダンス（上図では１kΩ）が、h_{FE}倍（上図では１００倍）に高くなってベースに現れる（上図では１００kΩ）と考えることができます。

ベースの電流 ＝ エミッタ電流 ÷ h_{FE}

ベースのインピーダンス ＝ エミッタのインピーダンス × h_{FE}

より詳しくは次のように求められます、

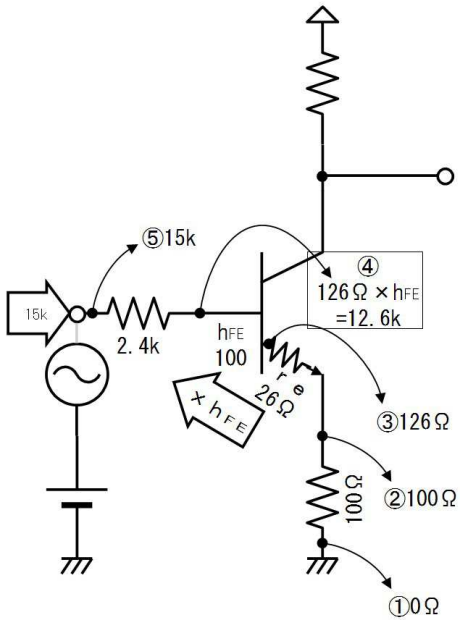
Ｚｅ＝ｖｅ÷ｉｅ

ｖｂ＝ｖｅ

ｉｅ＝ｉｂ×h_{FE}

Ｚｂ＝ｖｂ÷ｉｂ＝ｖｅ÷ｉｂ×h_{FE}＝Ｚｅ×h_{FE}

ベースのインピーダンスはエミッタのインピーダンスのh_{FE}倍になるので、ベース回路のインピーダンスは、ｒｅも配慮して、下図の手順でを簡単に求めることができます。



１７.１. 確認

上図を見て下表を書き込んでください。

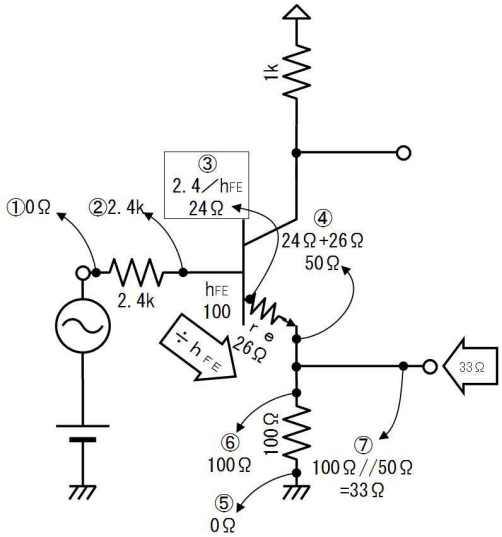
番号	質問	値
①	１００Ωの下側からアースを見たインピーダンスは、	Ω
②	１００Ωの上側からアースを見たインピーダンスは、	Ω
③	ｒｅの付け根（ベースの裏側）からアースを見たインピーダンス（エミッタの全インピーダンス）は、	Ω
④ 重要	h_{FE}を１００とすると、ベースのインピーダンスは、	ｋΩ
⑤	入力端子から回路を見たインピーダンスは、	ｋΩ

１７.２. 答

番号	質問	値
①	１００Ωの下側からアースを見たインピーダンスは、	０Ω
②	１００Ωの上側からアースを見たインピーダンスは、	１００Ω
③	ｒｅの付け根（ベースの裏側）からアースを見たインピーダンス（エミッタの全インピーダンス）は、	１２６Ω
④ 重要	h_{FE}を１００とすると、ベースのインピーダンスは、	１２．６ｋΩ
⑤	入力端子から回路を見たインピーダンスは、	１５ｋΩ

１８. エミッタのインピーダンス

ベースからみるとエミッタのインピーダンスがｈ$_{FE}$倍になりました。逆に、エミッタから見るとベースのインピーダンスが１／ｈ$_{FE}$になります。そのため、エミッタ回路のインピーダンスは、ｒｅも配慮して、下図の手順でを簡単に求めることができます。



１８.１. 確認

上図を見て下表を書き込んでください。

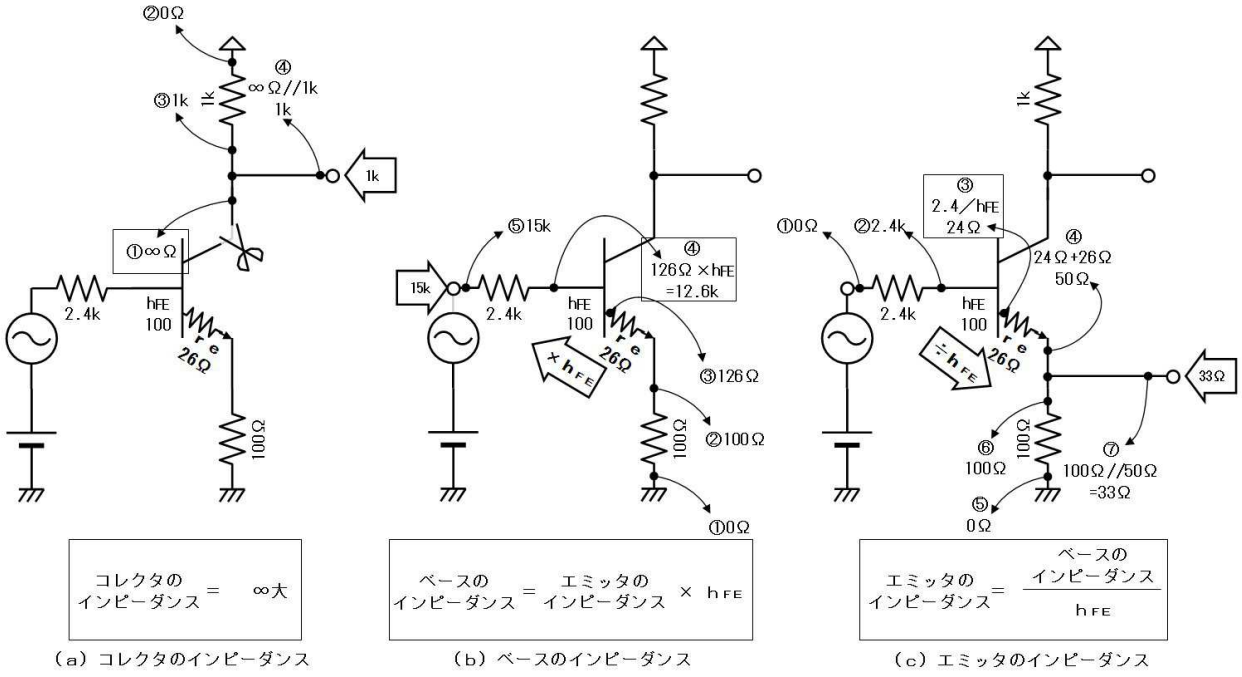
番号	質問	値
①	入力からアースを見たインピーダンスは、 （電池や交流源はインピーダンスはとても低いから、）	Ω
②	ベースから左を見たインピーダンスは、	ｋΩ
③ 重要	ｈ$_{FE}$を１００とすると、ｒｅの付け根（ベースの裏側）から左を見たインピーダンスは、	Ω
④	エミッタから左を見たインピーダンスは、 （ｒｅが２６Ωだから、）	Ω
⑤	１００Ωの下側からアースを見たインピーダンスは、	Ω
⑥	１００Ωの上側がアースを見たインピーダンスは、	Ω
⑦	出力端子から回路全体を見たインピーダンスは、 （④と⑥が並列に見えるから、）	Ω

１８.２. 答

番号	質問	値
①	入力からアースを見たインピーダンスは、 （電池や交流源はインピーダンスはとても低いから、）	０Ω

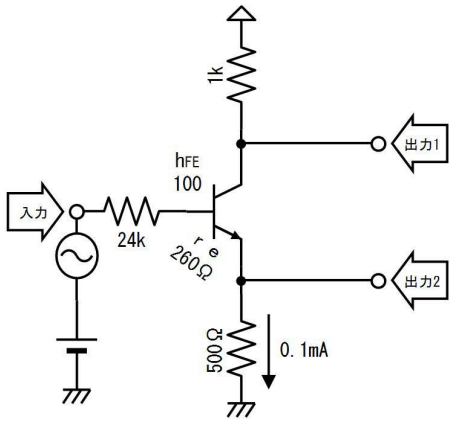
②	ベースから左を見たインピーダンスは、	２．４ｋΩ
③ 重要	h_{FE}を１００とすると、ｒｅの付け根（ベースの裏側）から左を見たインピーダンスは、	２４Ω
④	エミッタから左を見たインピーダンスは、 （ｒｅが２６Ωだから、）	５０Ω
⑤	１００Ωの下側からアースを見たインピーダンスは、	０Ω
⑥	１００Ωの上側がアースを見たインピーダンスは、	１００Ω
⑦	出力端子から回路全体を見たインピーダンスは、 （④と⑥が並列に見えるから、）	３３Ω

これまでの説明をまとめると、トランジスタのインピーダンスは下図のようにして求めることができます。



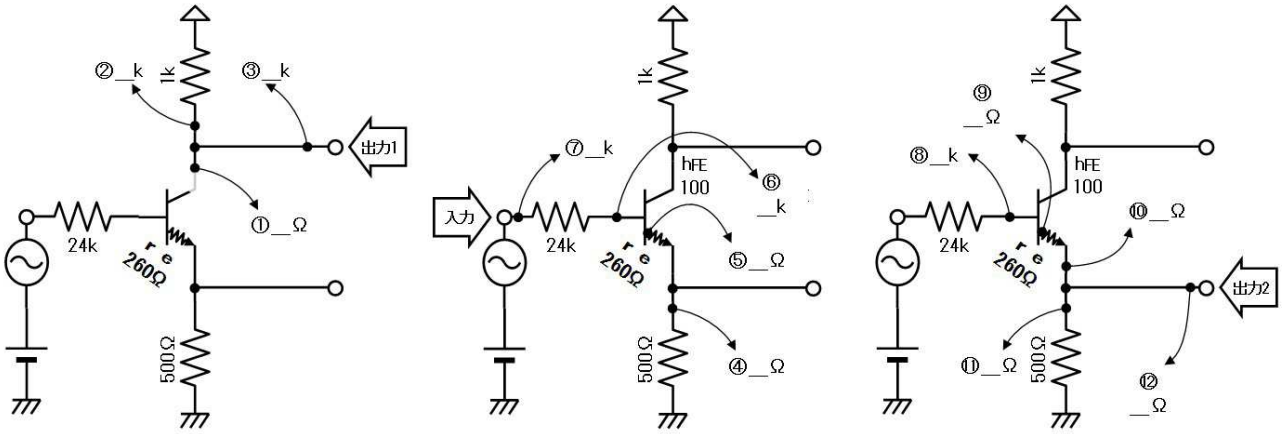
（a）コレクタのインピーダンス　（b）ベースのインピーダンス　（c）エミッタのインピーダンス

１８.３. 練習



上図の回路の入力、出力１、出力２のインピーダンスを、下図を参考に、下表に書き込みながら答え

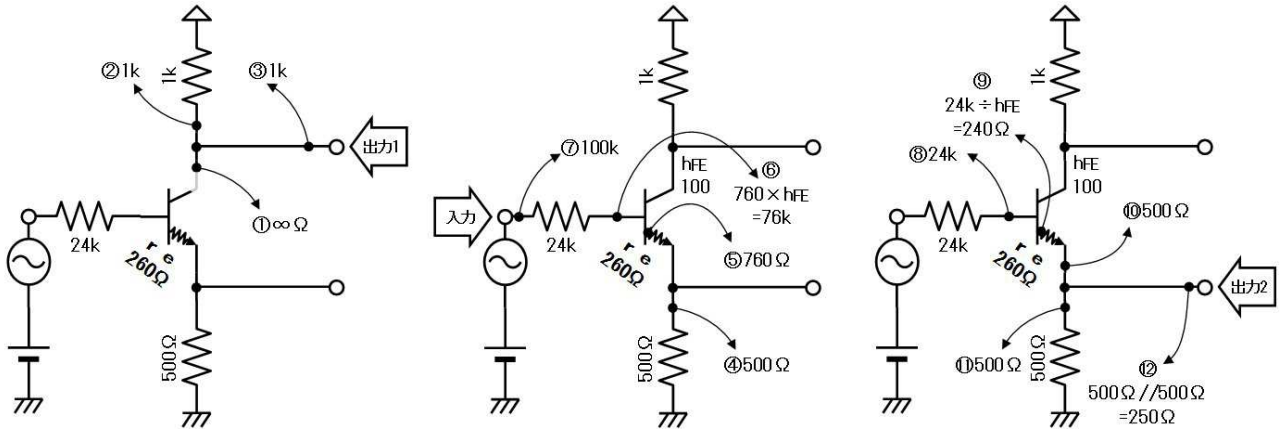
てください。（ただし、入力インピーダンスは、接続された電圧源と信号源のインピーダンスを含めずに答えてください）



番号	質問	値
	出力１のインピーダンスを考えます	―
① 重要	コレクタのインピーダンスは、	Ω
②	１ｋΩの下から電源を見たインピーダンスは、	ｋΩ
③	出力１端子から回路を見たインピーダンスは、 （１ｋΩと∞Ωが並列に見えて、）	ｋΩ
	入力のインピーダンスを考えます	―
④	５００Ωの上からアースを見たインピーダンスは、	Ω
⑤	ｒｅの付け根（ベースの裏側）からアースを見たインピーダンスは、（ｒｅが２６０Ωだから、）	Ω
⑥ 重要	ベースのインピーダンスは、ｈＦＥが１００だから、	ｋΩ
⑦	入力端子から回路を見たインピーダンスは、	ｋΩ
	出力２のインピーダンスを考えます	―
⑧	２４ｋΩの右側から、左を見たインピーダンスは、 （電池や信号源のインピーダンスは低いから）	ｋΩ
⑨ 重要	ｒｅの付け根（ベースの裏側）から左を見たインピーダンスは、（h_{FE}が１００だから、）	Ω
⑩	エミッタのインピーダンスは、（ｒｅが２６０Ωだから、）	Ω
⑪	５００Ωの上側からアースを見たインピーダンスは、	Ω

⑫	出力２端子から回路を見たインピーダンスは、 （５００Ωとエミッタが並列に見えるから、）	Ω

１８.４. 答

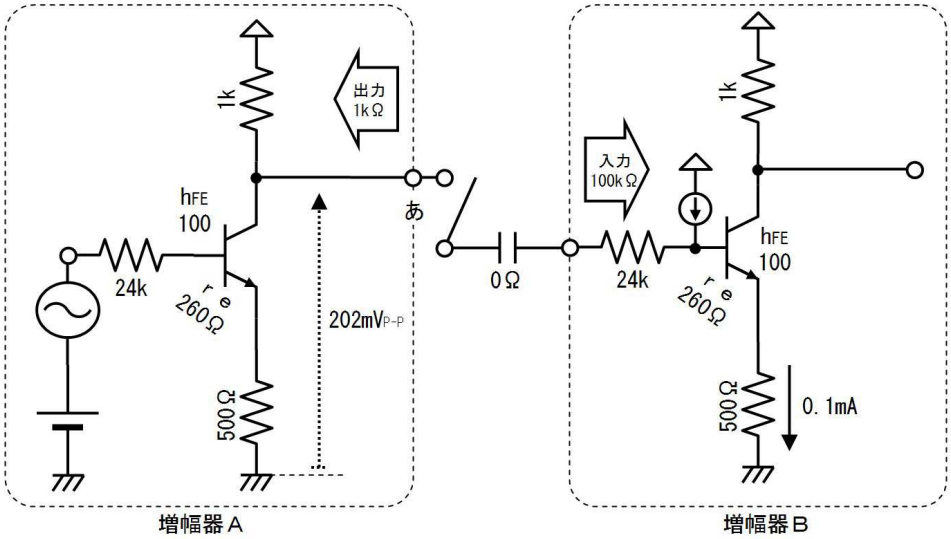


番号	質問	値
	出力１のインピーダンスを考えます	－
① 重要	コレクタのインピーダンスは、	∞Ω
②	１ｋΩの下から電源を見たインピーダンスは、	１ｋΩ
③	出力１端子から回路を見たインピーダンスは、 （１ｋΩと∞Ωが並列に見えて、）	１ｋΩ
	入力のインピーダンスを考えます	－
④	５００Ωの上からアースを見たインピーダンスは、	５００Ω
⑤	ｒｅの付け根（ベースの裏側）からアースを見たインピーダンスは、（ｒｅが２６０Ωだから、）	７６０Ω
⑥ 重要	ベースのインピーダンスは、ｈＦＥが１００だから、	７６ｋΩ
⑦	入力端子から回路を見たインピーダンスは、	１００ｋΩ
	出力２のインピーダンスを考えます	－
⑧	２４ｋΩの右側から、左を見たインピーダンスは、 （電池や信号源のインピーダンスは低いから）	２４ｋΩ
⑨ 重要	ｒｅの付け根（ベースの裏側）から左を見たインピーダンスは、（h_{FE}が１００だから、）	２４０Ω
⑩	エミッタのインピーダンスは、（ｒｅが２６０Ωだから、）	５００Ω

⑪	５００Ωの上側からアースを見たインピーダンスは、	５００Ω
⑫	出力２端子から回路を見たインピーダンスは、 （５００Ωとエミッタが並列に見えるから、）	２５０Ω

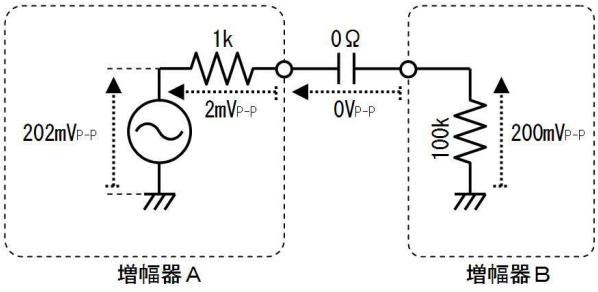
１８.５. 練習

上の練習で扱った増幅器Ａ（出力インピーダンス１ｋΩ）が、下図に示すように、無負荷時（なにも繋がないとき）２０２ｍＶの交流電圧を出力していました。これに、十分大きなコンデンサを介して、同じ増幅器Ｂ（入力インピーダンス１００ｋΩ）を繋ぐと、増幅器Ａの出力「あ」の交流出力電圧は何Ｖに減りますか。但し、増幅器Ｂの動作は（バイアス用電池を取り除いても）練習で扱った状態から変化しないと考えます。



１８.６. 答

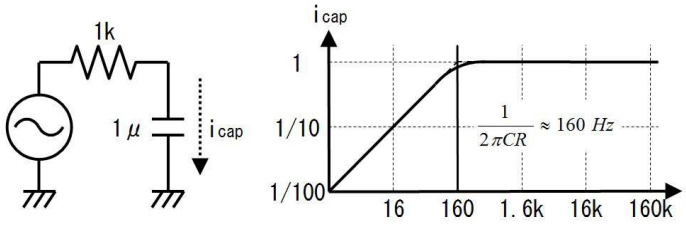
増幅器の入力インピーダンス（１００ｋΩ）と出力インピーダンス（１ｋΩ）が分かっているので、下図のように考えて、２００ｍＶに減る。



１９. コンデンサの選択

コンデンサの容量は「十分大きい」と考えて計算してきました。ここでは「十分大きい」と考えるためには、コンデンサの容量をいくらにすれば良いかを説明します。

まず、下図のＣＲ回路に交流が加わると、コンデンサに流れる電流は、周波数が１６０Ｈｚより低くなると減少します。

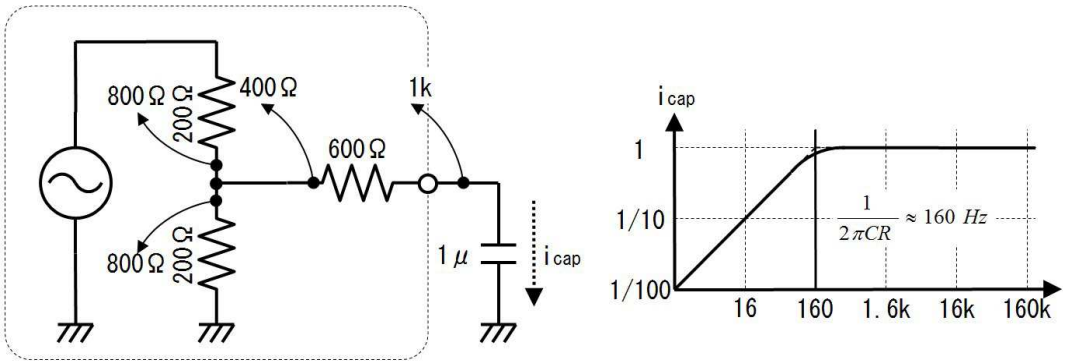


電流が減少し始める周波数は、既に説明した「遮断周波数」ｆ$_C$で、次のように計算できます。

$$f_C = \frac{1}{2\pi CR}$$

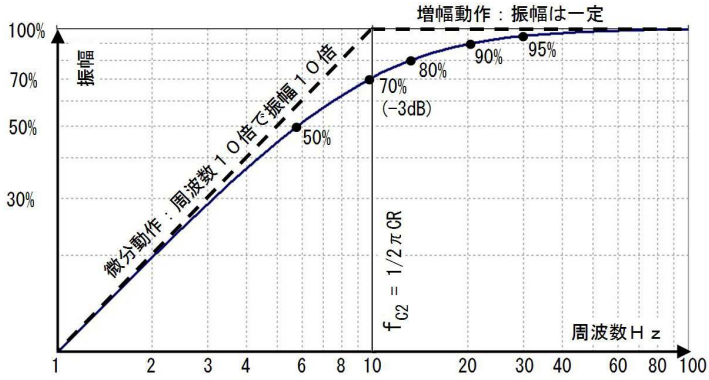
上の例では、=1/2/PI()/1E-6/1E3

下図のように回路が複雑な場合も、コンデンサから見たインピーダンスを求めて、遮断周波数を計算できます。



上の例でも、コンデンサから見たインピーダンスが１ｋΩですから、遮断周波数は１６０Ｈｚです。

さて、遮断周波数は増幅器で使用する最低の周波数を目安に選びます。コンデンサに流れる電流は遮断周波数の手前から低下を始め、下図に示すように、使用する周波数が遮断周波数と同じでも、コンデンサの電流は３割程度減少します。そして、使用する周波数が遮断周波数の４～５倍に高ければ、電流の減少は殆ど無視できます。

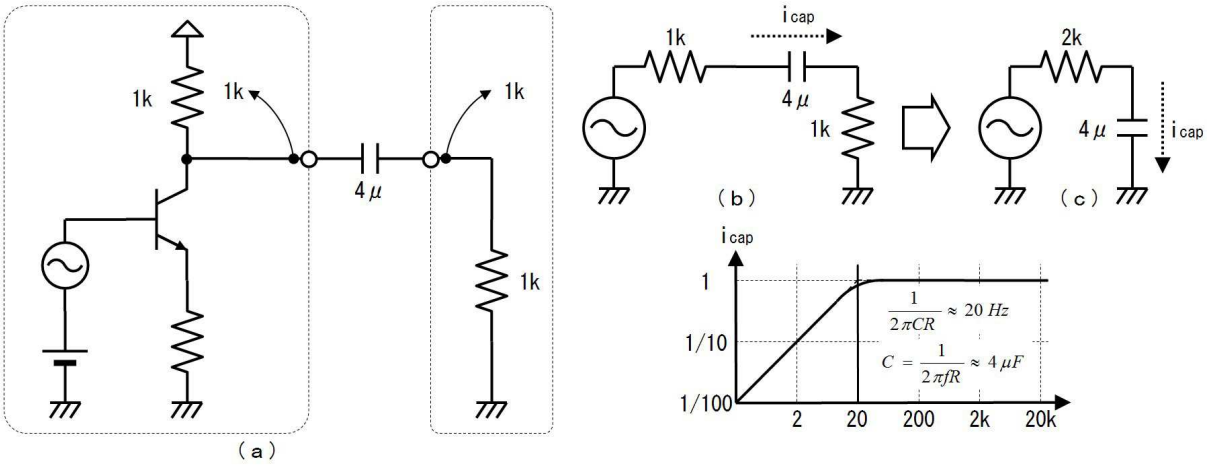


たとえ振幅の減少が３割でも、たとえば入力、エミッタ、出力と３つのコンデンサが使われていると、７０％×７０％×７０％＝３４％と、振幅は半分以下に減少します。ですから、振幅の減少が殆ど無視できるように、使用する周波数を遮断周波数の４～５倍に（遮断周波数を使用する周波数の４～５分の１に）選ぶ場合が多いです。

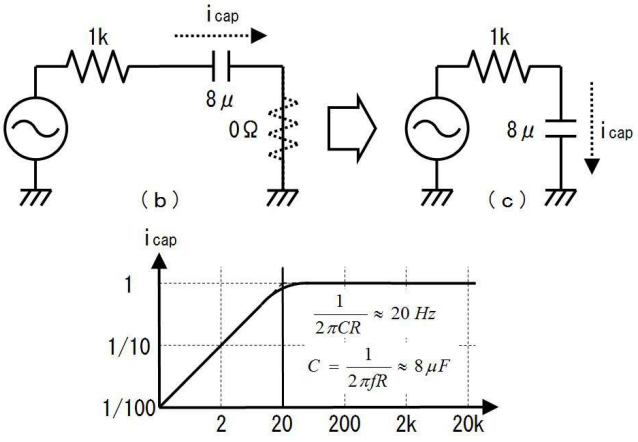
例えば、増幅する最低の周波数を１００Ｈｚとし、振幅の減少が無視できるようにする場合は、遮断周波数を（１００Ｈｚの４～５分の１の）２０Ｈｚ程度に設定します。

２０．入出力コンデンサ

遮断周波数を設定したら、次に回路を検討してコンデンサの容量を決定します。例えば下図（ａ）は、増幅器の出力をコンデンサを通じて負荷に接続した回路です。この回路では、下図（ｂ）に示すように、出力インピーダンスの１ｋΩと、負荷インピーダンスの１ｋΩは、双方ともコンデンサと直列に接続されています。このため、コンデンサから見たインピーダンスは下図（ｃ）のように２ｋΩとなり、遮断周波数を２０Ｈｚとすれば、コンデンサの容量は=1/2/PI()/20/2E3と計算して、４μＦと分かります。

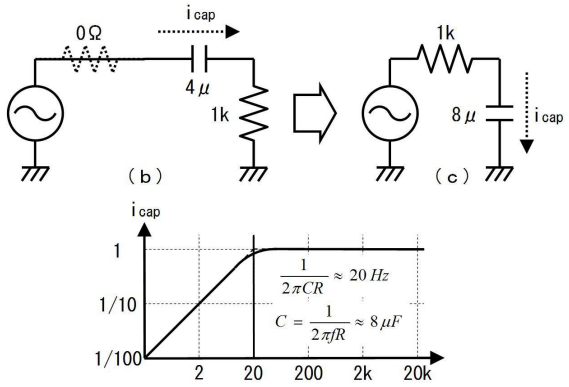


どのようなインピーダンスの負荷を接続するか分からない増幅回路の場合は、下図（ｂ）のように（最悪の場合として）０Ωの負荷を接続したと考えて、コンデンサから見たインピーダンスを下図（ｂ）のように１ｋΩとして=1/2/PI()/20/1E3と計算し、コンデンサの容量を８μＦとします。



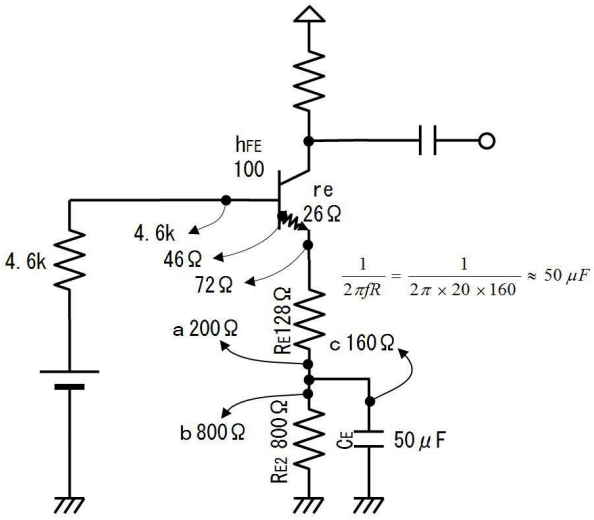
この計算方法は出力コンデンサにも、入力コンデンサにも使用することができます。

どのような入力を接続するか分からない増幅回路の場合は、下図（ｂ）のように（最悪の場合として）０Ωの信号源を接続したと考えて、コンデンサから見たインピーダンスを下図（ｂ）のように１ｋΩとして=1/2/PI()/20/1E3と計算し、コンデンサの容量を８μＦとします。



２１．エミッタバイパスコンデンサ

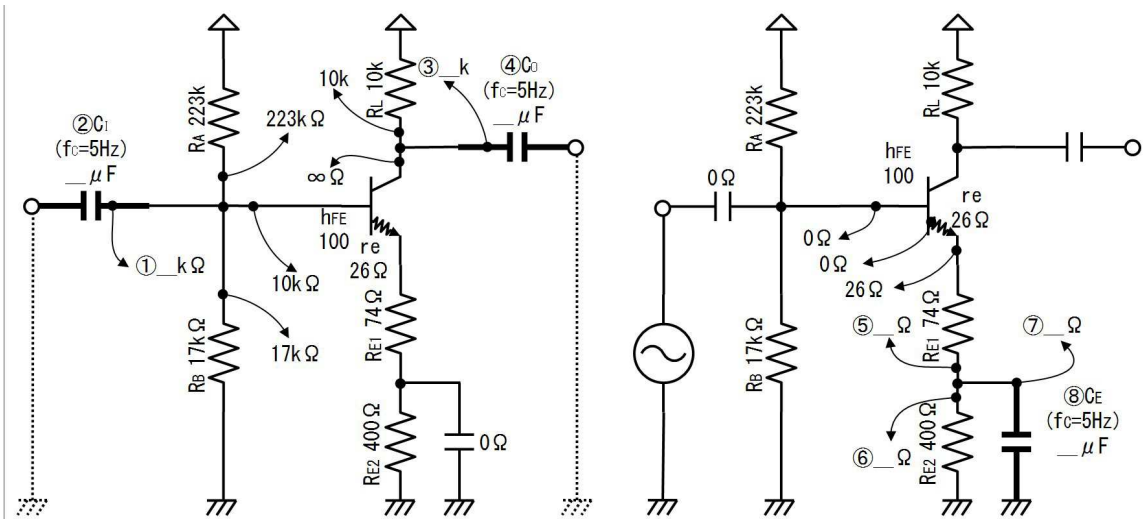
例えば下図のような、エミッタバイパスコンデンサの場合は、コンデンサからは（ａ）のインピーダンス２００Ωと、（ｂ）のインピーダンス（８００Ω）が並列に見えます。



ですから、コンデンサから見た回路のインピーダンスは１６０Ωです。遮断周波数が２０Ｈｚであれば、=1/2/PI()/20/160と計算して、コンデンサの容量は５０μＦと分かります。

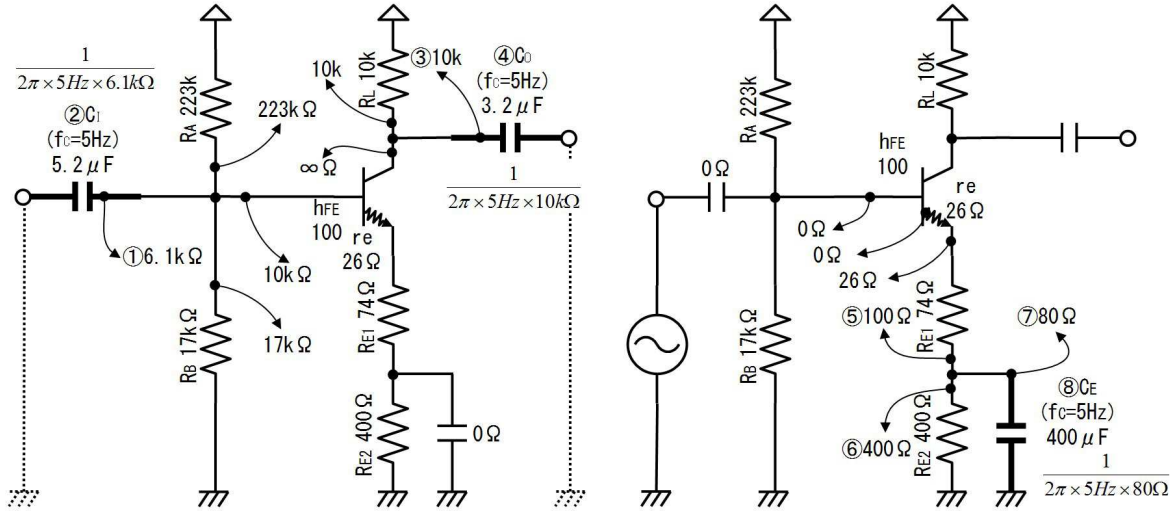
２１.１．練習

下図のように概ねインピーダンス検討を終えた増幅器があります。上図を参考に下表に書き込み、入出力コンデンサとエミッタバイパスコンデンサの容量を決定してください。増幅器で使用する最低の周波数は２０Ｈｚで、遮断周波数はその４分の１の５Ｈｚと設定します。



番号	質問	値
①	入力コンデンサの右側から回路を見たインピーダンスは、（R_A、R_B、ベース、が並列に見えて、）	kΩ
②	遮断周波数 f_C を５Ｈｚとすれば、入力コンデンサ C_I の容量は、	μＦ
③	出力コンデンサの左側から回路を見たインピーダンスは、（R_L とコレクタが並列に見えて、）	kΩ
④	遮断周波数 f_C を５Ｈｚとすれば、出力コンデンサ C_O の容量は、	μＦ
⑤	R_{E1} の下側から上を見たインピーダンスは、 （r_e（２６Ω）と R_{E1}（７４Ω）が直列に見えて、）	Ω
⑥	R_{E2} の上側からアースを見たインピーダンスは、	Ω
⑦	エミッタバイパスコンデンサ C_E から回路を見たインピーダンスは、（上の⑤と⑥が並列に見えて、）	Ω
⑧	遮断周波数 f_C を５Ｈｚとすれば、エミッタバイパスコンデンサ C_E の容量は、	μＦ

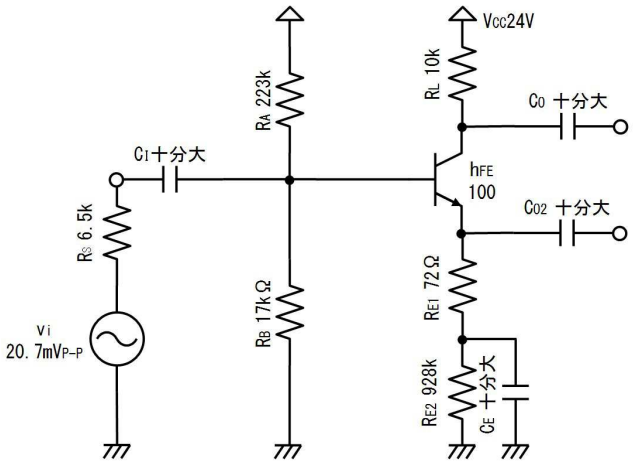
２１.２. 答



番号	質問	値
①	入力コンデンサの右側から回路を見たインピーダンスは、（R_A、R_B、ベース、が並列に見えて、）	６．１ｋΩ
②	遮断周波数ｆ$_C$を５Ｈｚとすれば、入力コンデンサC_Iの容量は、 =1/2/PI()/5/6.1E3	５．２μＦ
③	出力コンデンサの左側から回路を見たインピーダンスは、（R_Lとコレクタが並列に見えて、）	１０ｋΩ
④	遮断周波数ｆ$_C$を５Ｈｚとすれば、出力コンデンサC_Oの容量は、 =1/2/PI()/5/10E3	３．２μＦ
⑤	R_{E1}の下側から上を見たインピーダンスは、 （ｒ$_e$（２６Ω）とR_{E1}（７４Ω）が直列に見えて、）	１００Ω
⑥	R_{E2}の上側からアースを見たインピーダンスは、	８００Ω
⑦	エミッタバイパスコンデンサC_Eから回路を見たインピーダンスは、（上の⑤と⑥が並列に見えて、）	８０Ω
⑧	遮断周波数ｆ$_C$を５Ｈｚとすれば、エミッタバイパスコンデンサC_Eの容量は、 =1/2/PI()/5/80	４００μＦ

２２. 標準的なトランジスタ交流増幅器

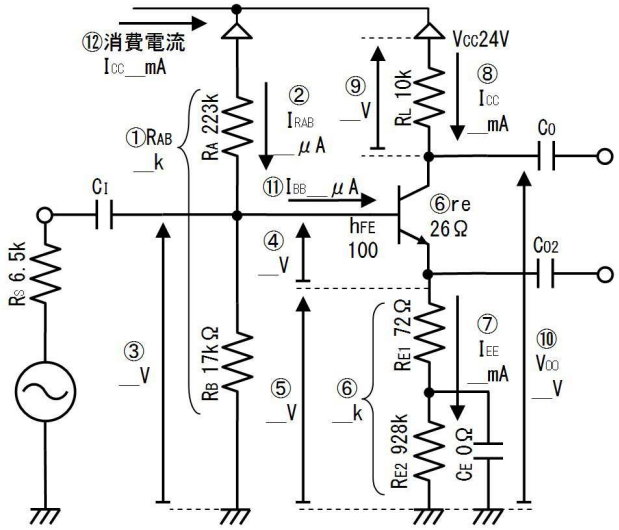
下図は入出力（結合／カップリング）コンデンサ、分圧バイアス回路、エミッタバイパスコンデンサを備えた標準的なトランジスタ増幅器です。これまでに練習した内容を活用して、下の回路を検討してみましょう。（練習の目的でエミッタからも出力を取り出しています）



上図の回路を直流検討して回路の消費電流を求め、インピーダンス検討、交流検討して、２つの出力端子の出力インピーダンス、出力電圧、使用するコンデンサの値を求めます。

２２.１. 練習

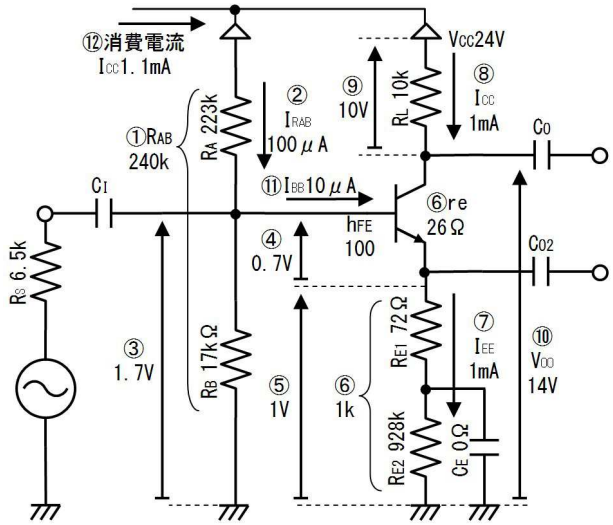
下図を参考に、下表に書き込みながら、直流検討して回路の消費電流を求めてください。



番号	質問	値
①	R_AとR_Bの直列合成抵抗は、	kΩ
②	R_AとR_Bに流れる電流、I_{RAB}は、	μA
③	R_Bの両端電圧は、	V
④	電流が流れているトランジスタのV_{BE}は、	V
⑤	R_{E1}とR_{E2}に加わる電圧の合計は、	V
⑥	R_{E1}とR_{E2}の直列合成抵抗は、	kΩ
⑦	エミッタバイアス電流I_{EE}は、	mA
⑧	コレクタバイアス電流I_{CC}は、	mA
⑨	負荷抵抗の両端電圧V_{RL}は、	V

⑩	出力バイアス電圧V_{OO}は、	V
⑪	ベースバイアス電流I_{BB}は、	μA
⑫	回路の消費電流は、（⑧と②から、）	mA

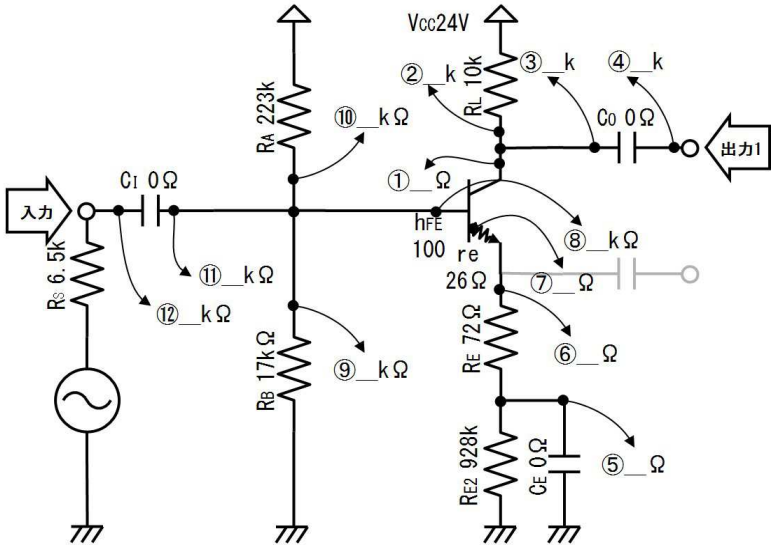
22.2. 答



番号	質問	値
①	R_AとR_Bの直列合成抵抗は、	２４０ｋΩ
②	R_AとR_Bに流れる電流、I_{RAB}は、	１００μＡ
③	R_Bの両端電圧は、	１．７Ｖ
④	電流が流れているトランジスタのV_{BE}は、	０．７Ｖ
⑤	R_{E1}とR_{E2}に加わる電圧の合計は、	１Ｖ
⑥	R_{E1}とR_{E2}の直列合成抵抗は、	１ｋΩ
⑦	エミッタバイアス電流I_{EE}は、	１ｍＡ
⑧	コレクタバイアス電流I_{CC}は、	１ｍＡ
⑨	負荷抵抗の両端電圧V_{RL}は、	１０Ｖ
⑩	出力バイアス電圧V_{OO}は、	１４Ｖ
⑪	ベースバイアス電流I_{BB}は、	１０μＡ
⑫	回路の消費電流は、（⑧と②から、）	１．１ｍＡ

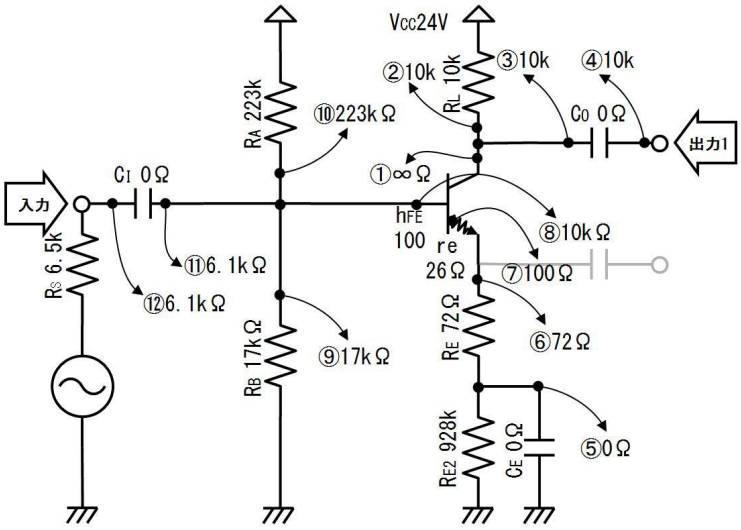
22.3. 練習

下図を参考に、下表に書き込みながら、ベース側とコレクタ側のインピーダンスを検討してください。



番号	質問	値
	出力１（コレクタ側）のインピーダンスを考えます	―
①	コレクタのインピーダンスは、	Ω
②	１０ｋΩの下から電源を見たインピーダンスは、	ｋΩ
③	C_Oの左側から回路を見たインピーダンスは、 （１０ｋΩと∞Ωが並列に見えて、）	ｋΩ
④	出力１端子から回路を見たインピーダンスは、 （C_Oが十分大きいから、）	ｋΩ
	入力のインピーダンスを考えます	―
⑤	９２８Ω上側からアースを見たインピーダンスは、 （C_Eが十分大きいから、）	Ω
⑥	７２Ωの上側からアースを見たインピーダンスは、	Ω
⑦	ｒｅの付け根（ベースの裏側）からアースを見たインピーダンスは、（ｒｅが２６Ωだから、）	Ω
⑧	ベースのインピーダンスは、ｈＦＥが１００だから、	ｋΩ
⑨	１７ｋの上側からアースを見たインピーダンスは、	ｋΩ
⑩	２２３ｋの下側から電源を見たインピーダンスは、	ｋΩ
⑪	C_Iの右側から右を見たインピーダンスは、 （⑧⑨⑩が並列に見えて、）	ｋΩ
⑫	入力端子から回路を見たインピーダンスは、 （C_Iが十分大きいから、）	ｋΩ

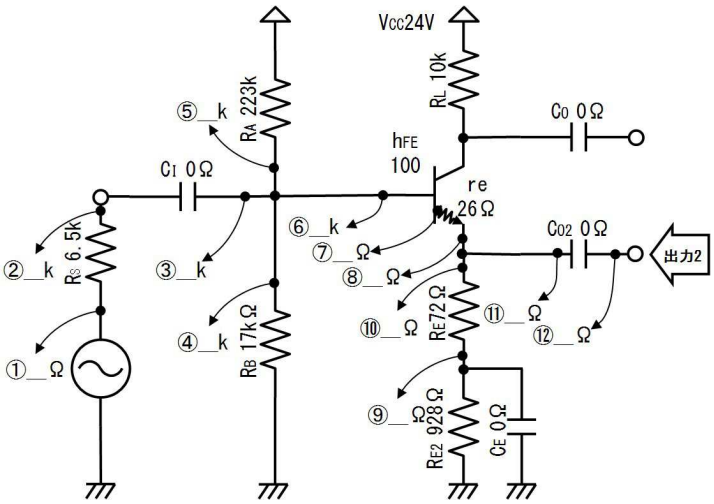
２２.４. 答



番号	質問	値
	出力１（コレクタ側）のインピーダンスを考えます	－
①	コレクタのインピーダンスは、	∞Ω
②	１０ｋΩの下から電源を見たインピーダンスは、	１０ｋΩ
③	C_Oの左側から回路を見たインピーダンスは、 （１０ｋΩと∞Ωが並列に見えて、）	１０ｋΩ
④	出力１端子から回路を見たインピーダンスは、 （C_Oが十分大きいから、）	１０ｋΩ
	入力のインピーダンスを考えます	－
⑤	９２８Ω上側からアースを見たインピーダンスは、 （C_Eが十分大きいから、）	０Ω
⑥	７２Ωの上側からアースを見たインピーダンスは、	７２Ω
⑦	ｒｅの付け根（ベースの裏側）からアースを見たインピーダンスは、（ｒｅが２６Ωだから、）	１００Ω
⑧	ベースのインピーダンスは、ｈＦＥが１００だから、	１０ｋΩ
⑨	１７ｋの上側からアースを見たインピーダンスは、	１７ｋΩ
⑩	２２３ｋの下側から電源を見たインピーダンスは、	２２３ｋΩ
⑪	C_Iの右側から右を見たインピーダンスは、 （⑧⑨⑩が並列に見えて、）	６．１ｋΩ
⑫	入力端子から回路を見たインピーダンスは、 （C_Iが十分大きいから、）	６．１ｋΩ

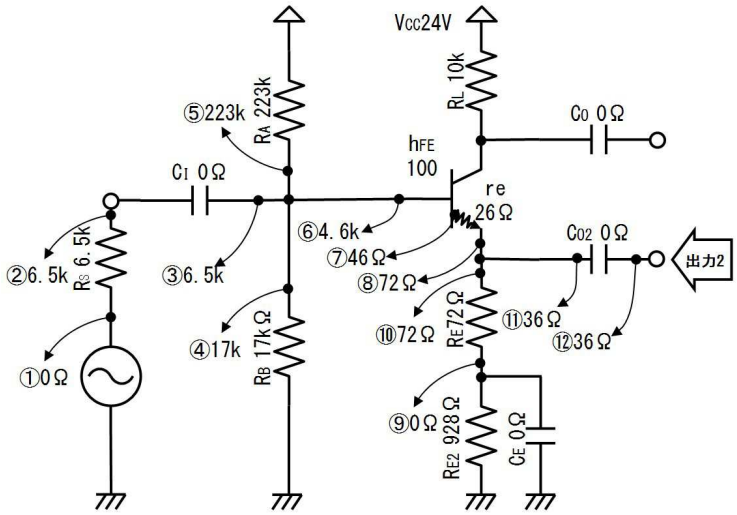
２２.５. 練習

下図を参考に、下表に書き込みながら、エミッタ側のインピーダンスを検討してください。



番号	質問	値
	出力２（エミッタ側）のインピーダンスを考えます	―
①	信号源のインピーダンスは、	Ω
②	６．５ｋの上側からアースを見たインピーダンスは、	ｋΩ
③	C_Iの右側から左を見たインピーダンスは、 （C_Iが十分大きいから）	ｋΩ
④	１７ｋの上側からアースを見たインピーダンスは、	ｋΩ
⑤	２２３ｋの下側から電源を見たインピーダンスは、	ｋΩ
⑥	ベースから左側を見たインピーダンスは、 （③④⑤の３つが並列に見えて、）	ｋΩ
⑦	ｒｅの付け根（ベースの裏側）から左を見たインピーダンスは、（h_{FE}が１００だから、）	Ω
⑧	エミッタから左を見たインピーダンスは、	Ω
⑨	９２８Ωの上側からアースを見たインピーダンスは、 （C_Eが十分大きいから、）	Ω
⑩	７２Ωの上側からアースを見たインピーダンスは、	Ω
⑪	C_{O2}の左側から左を見たインピーダンスは、 （⑧と⑩が並列に見えて、）	Ω
⑫	出力端子から回路を見たインピーダンスは、 （C_{O2}は十分大きいから、）	Ω

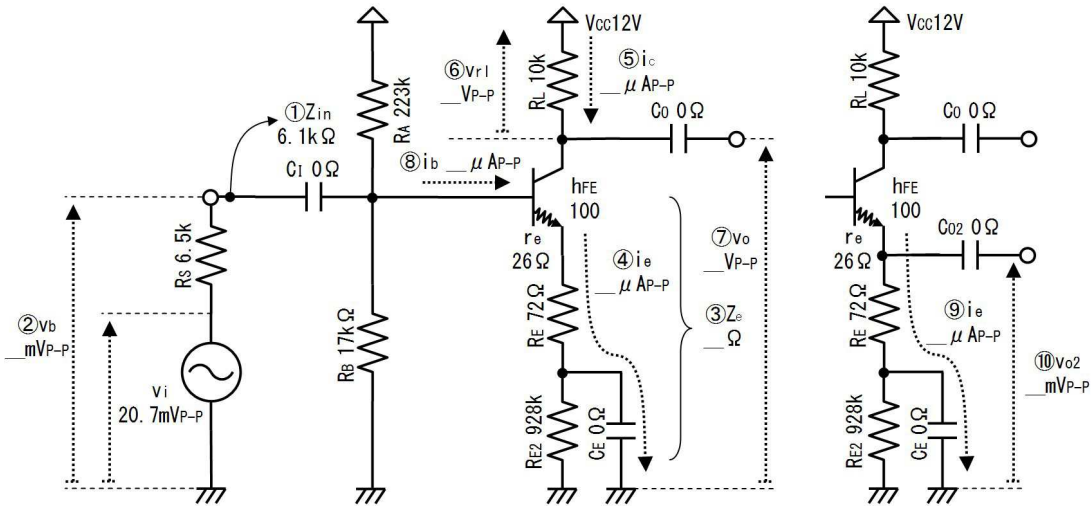
２２.６. 答



番号	質問	値
	出力２（エミッタ側）のインピーダンスを考えます	－
①	信号源のインピーダンスは、	０Ω
②	６．５ｋの上側からアースを見たインピーダンスは、	６．５ｋΩ
③	C_Iの右側から左を見たインピーダンスは、 （C_Iが十分大きいから）	６．５ｋΩ
④	１７ｋの上側からアースを見たインピーダンスは、	１７ｋΩ
⑤	２２３ｋの下側から電源を見たインピーダンスは、	２２３ｋΩ
⑥	ベースから左側を見たインピーダンスは、 （③④⑤の３つが並列に見えて、）	４．６ｋΩ
⑦	ｒｅの付け根（ベースの裏側）から左を見たインピーダンスは、（h_{FE}が１００だから、）	４６Ω
⑧	エミッタから左を見たインピーダンスは、	７２Ω
⑨	９２８Ωの上側からアースを見たインピーダンスは、 （C_Eが十分大きいから、）	０Ω
⑩	７２Ωの上側からアースを見たインピーダンスは、	７２Ω
⑪	C_{O2}の左側から左を見たインピーダンスは、 （⑧と⑩が並列に見えて、）	３６Ω
⑫	出力端子から回路を見たインピーダンスは、 （C_{O2}は十分大きいから、）	３６Ω

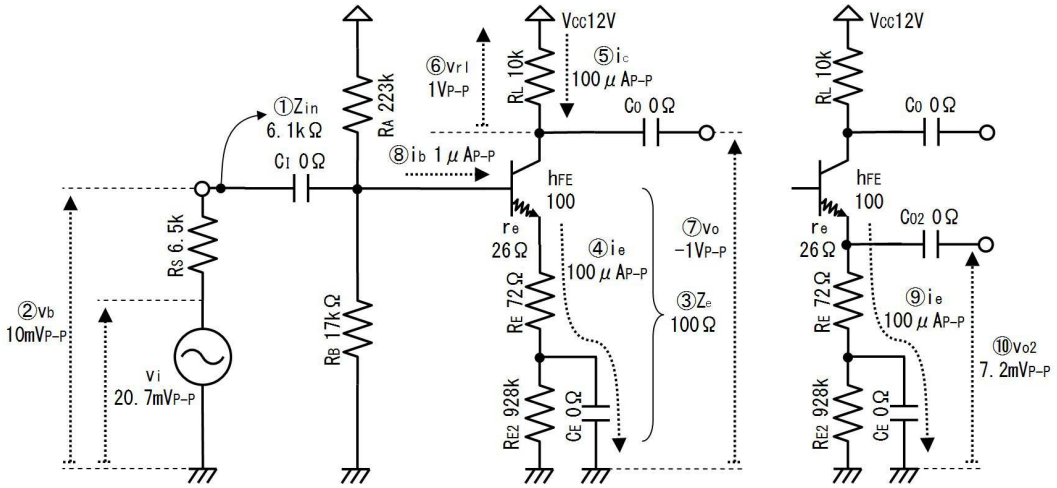
２２.７. 練習

下図を参考に、下表に書き込みながら、交流検討して交流出力電圧を求めてください。



番号	質問	値
①	増幅器の入力インピーダンスZ_{in}は、 （すでに求めたとおり、）	６．１ｋΩ
②	信号電圧が２０．７mA_{P-P}、信号源インピーダンスR_Sが６．５ｋΩだから、増幅器の入力端子（白丸）に加わる交流電圧は、	mV_{P-P}
③	エミッタ側インピーダンスの合計は、	Ω
④	エミッタ信号電流i_eは、	μA_{P-P}
⑤	コレクタ信号電流i_cは、	μA_{P-P}
⑥	負荷抵抗R_Lの両端信号電圧v_{rl}は、	V_{P-P}
⑦	出力信号電圧v_oは、	V_{P-P}
⑧	ベース信号電流i_bは、	μA_{P-P}
⑨	今一度、エミッタ信号電流は、	μA_{P-P}
⑩	エミッタ側出力端子の出力信号電圧v_{o2}は、 $１００\mu A_{P-P}\times７２\Omega＝７．２mV_{P-P}$	mV_{P-P}

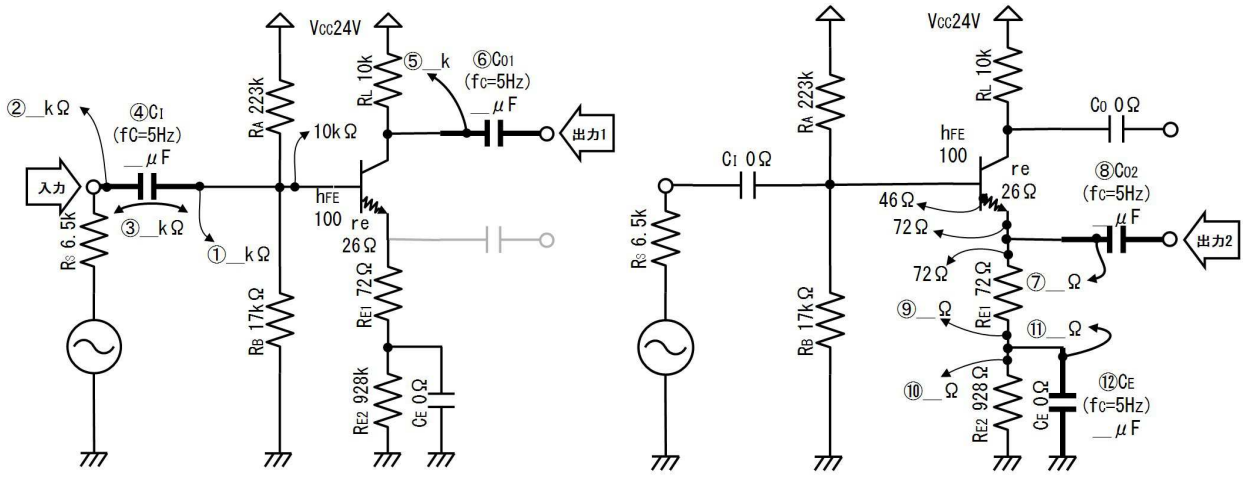
２２.８. 答



番号	質問	値
①	増幅器の入力インピーダンスZ_{in}は、	６．１ｋΩ
②	信号電圧が２０．７mA_{P-P}、信号源インピーダンスR_Sが６．５ｋΩだから、増幅器の入力端子（白丸）に加わる交流電圧は、	１０mV_{P-P}
③	エミッタ側インピーダンスの合計は、	１００Ω
④	エミッタ信号電流i_eは、	１００μA_{P-P}
⑤	コレクタ信号電流i_cは、	１００μA_{P-P}
⑥	負荷抵抗R_Lの両端信号電圧v_{rl}は、	１V_{P-P}
⑦	出力信号電圧v_oは、	−１V_{P-P}
⑧	ベース信号電流i_bは、	１μA_{P-P}
⑨	今一度、エミッタ信号電流は、	１００μA_{P-P}
⑩	エミッタ側出力端子の出力信号電圧v_{o2}は、 １００μA_{P-P}×７２Ω＝７．２mV_{P-P}	７．２mV_{P-P}

２２.９. 練習

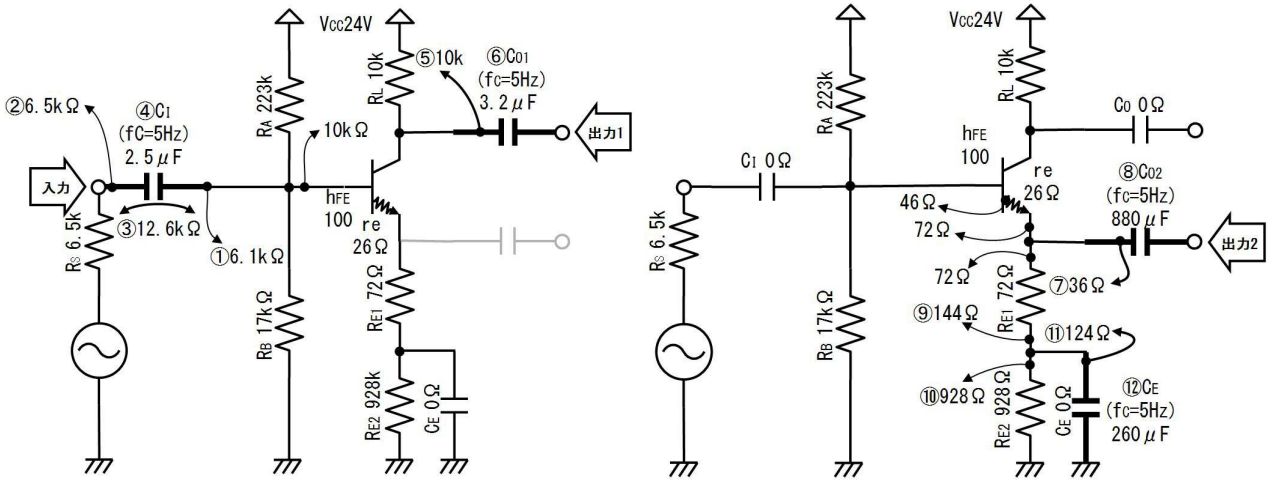
回路で使用する最低の周波数を２０Ｈｚとして、遮断周波数を５Ｈｚに設定し、下図を参考に下表に書き込みながら、回路に使用された４つのコンデンサの容量を決定して下さい。



番号	質問	値
①	入力コンデンサC_Iの右側から回路を見たインピーダンスは、 （R_A、R_B、ベースのインピーダンスが並列に見えて、）	kΩ
②	入力コンデンサC_Iの左側から信号を見たインピーダンスは、	kΩ
③	コンデンサから左右を見たインピーダンスは、（①と②が直列に見えて、）	kΩ
④	断周波数f_Cを５Ｈｚとすれば、入力コンデンサC_Iの容量は、	μＦ
⑤	出力コンデンサC_Oの左側から回路を見たインピーダンスは、 出力に接続する回路は未定ですから、コンデンサの右側に接続されるインピーダンスは０Ωと考えて、ここで計算したインピーダンスを、コンデンサから見たインピーダンスと考えます。	kΩ
⑥	断周波数f_Cを５Ｈｚとすれば、出力コンデンサC_Oの容量は、	μＦ
⑦	出力２コンデンサC_{O2}の左側から回路を見たインピーダンスは、 （ベースのインピーダンス（７２Ω）とR_{E1}（７２Ω）が並列に見えて、） 出力に接続する回路は未定ですから、コンデンサの右側に接続されるインピーダンスは０Ωと考えて、ここで計算したインピーダンスを、コンデンサから見たインピーダンスと考えます。	Ω
⑧	断周波数f_Cを５Ｈｚとすれば、出力コンデンサC_{O2}の容量は、	μＦ
⑨	エミッタバイパスコンデンサC_Eの上側から、上を見たインピーダンスは、	Ω

⑩	エミッタバイパスコンデンサC_Eの上側から、下を見たインピーダンスは、	Ω
⑪	エミッタバイパスコンデンサC_Eから回路を見たインピーダンスは、	Ω
⑫	断周波数f_Cを５Ｈｚとすれば、エミッタバイパスコンデンサC_Eの容量は、	μＦ

２２.１０. 答

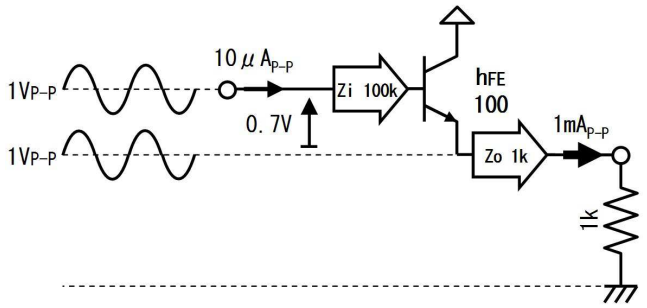


番号	質問	値
①	入力コンデンサC_Iの右側から回路を見たインピーダンスは、=1/(1/10E3+1/223E3+1/17E3) （R_A、R_B、ベースのインピーダンスが並列に見えて、）	６．１ｋΩ
②	入力コンデンサC_Iの左側から信号を見たインピーダンスは、	６．５ｋΩ
③	コンデンサから左右を見たインピーダンスは、（①と②が直列に見えて、）	１２．６ｋΩ
④	断周波数f_Cを５Ｈｚとすれば、入力コンデンサC_Iの容量は、=1/2/PI()/5/12.6E3	２．５μＦ
⑤	出力コンデンサC_Oの左側から回路を見たインピーダンスは、	１０ｋΩ
⑥	断周波数f_Cを５Ｈｚとすれば、出力コンデンサC_Oの容量は、=1/2/PI()/5/10E3 出力に接続する回路は未定ですから、コンデンサの右側に接続されるインピーダンスは０Ωと考えて、ここで計算したインピーダンスを、コンデンサから見たインピーダンスと考えます。	３．２μＦ
⑦	出力２コンデンサC_{O2}の左側から回路を見たインピーダンスは、	３６Ω

	（ベースのインピーダンス（７２Ω）とR_{E1}（７２Ω）が並列に見えて、） 出力に接続する回路は未定ですから、コンデンサの右側に接続されるインピーダンスは０Ωと考えて、ここで計算したインピーダンスを、コンデンサから見たインピーダンスと考えます。	
⑧	断周波数f_Cを５Ｈｚとすれば、出力コンデンサC_{O2}の容量は、=1/2/PI()/5/36	８８０μＦ
⑨	エミッタバイパスコンデンサC_Eの上側から、上を見たインピーダンスは、	１４４Ω
⑩	エミッタバイパスコンデンサC_Eの上側から、下を見たインピーダンスは、	９２８Ω
⑪	エミッタバイパスコンデンサC_Eから回路を見たインピーダンスは、	１２４Ω
⑫	断周波数f_Cを５Ｈｚとすれば、エミッタバイパスコンデンサC_Eの容量は、=1/2/PI()/5/124	２６０μＦ

２３. エミッタフォロア

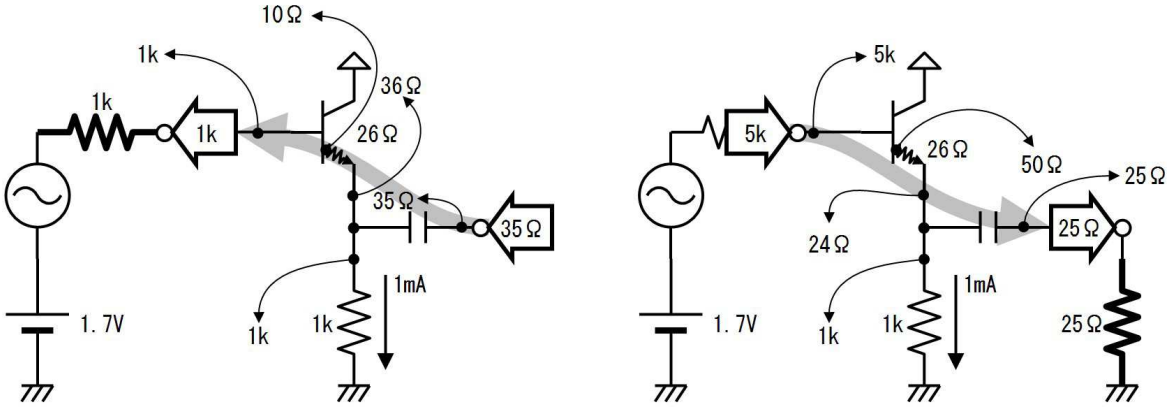
下図のように、ベースに直流電圧と共に交流電圧を加えると（V_{BE}が一定ですから）エミッタにもほぼ同じ交流電圧が生じます。ところが電流は、例えばエミッタに１mA_{P-P}流れていても、ベースにはそのh_{FE}分の１の１０μA_{P-P}しか流れません。電圧が同じで電流が少なくなりますから、ベースの交流抵抗は高くなります。



これがすでに説明した「ベースのインピーダンスはエミッタのインピーダンスのh_{FE}倍に高くなる」という現象です。この性質をそのまま増幅器に利用したのがエミッタフォロアです。「フォロア」とは「あとについて（同じように）動く」という意味で、エミッタの電圧がベースの電圧と同じように動くために命名されています。

つまりエミッタフォロアは「電圧は増幅しない（ほとんどそのまま出てくる）」が、「電流はh_{FE}倍に増幅」し、その結果、「入力インピーダンスは出力インピーダンスのh_{FE}倍に高くなる」あるいは「出力インピーダンスは入力インピーダンスのh_{FE}分の１に低くなる」増幅器です。

下図の例では、入力から見れば同図（ａ）のように、信号源の１ｋΩの（高い）インピーダンスが、出力端子からは３５Ωと低く見えています。出力から見れば同図（ｂ）のように、出力の２５Ωの（低い）インピーダンスが、入力端子からは５ｋΩと高く見えています。



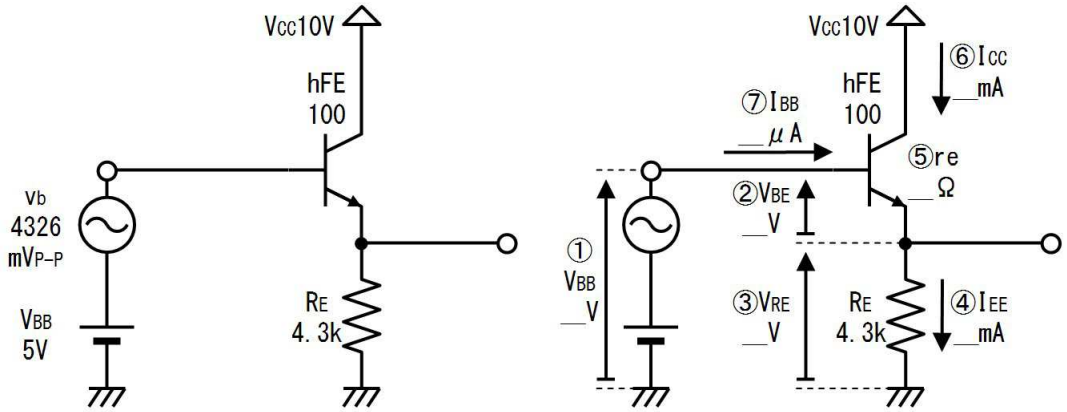
（ａ）　　（ｂ）

上図の通り、実際の回路では、ｒｅやエミッタ抵抗の影響で、インピーダンスがぴったりｈ$_{FE}$倍やｈ$_{FE}$分の１にはなりませんが、入力インピーダンスは高く、出力インピーダンスは低くなります。

２３.１. 練習

下図（ａ）のエミッタフォロアの出力直流電圧Ｖ$_{OO}$、出力交流電圧ｖ$_{o}$、出力インピーダンスＺ$_{o}$を下図を参考に、下表に書き込みながら求めてください。

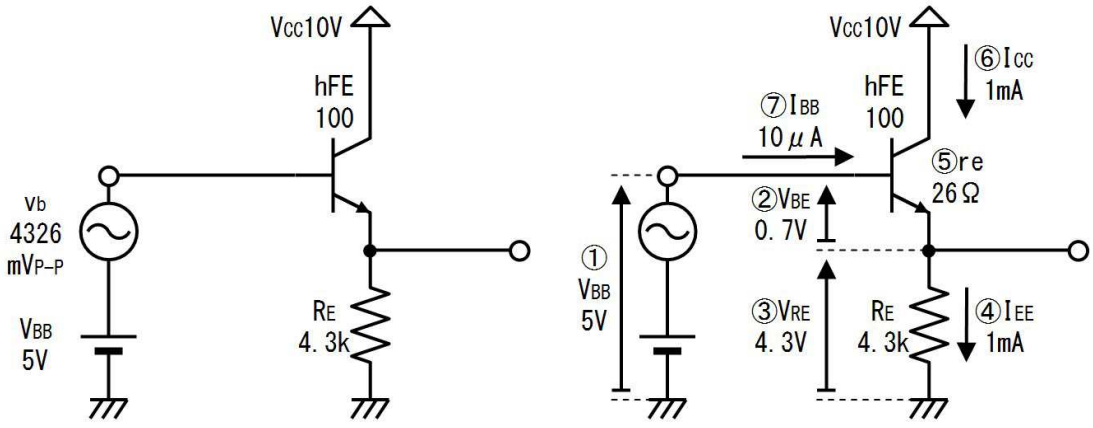
まず、直流検討して、Ｖ$_{OO}$を求めます。



（ａ）　　（ｂ）

番号	質問	値
①	ベースバイアス電圧Ｖ$_{BB}$は、	Ｖ
②	電流の流れているトランジスタのＶ$_{BE}$は、	Ｖ
③	エミッタ抵抗の両端電圧Ｖ$_{RE}$は、	Ｖ
④	エミッタバイアス電流Ｉ$_{EE}$は、	ｍＡ
⑤	エミッタ等価インピーダンスｒ$_{e}$は、 ２６ｍＶ÷１ｍＡ＝２６Ω	Ω
⑥	コレクタバイアス電流Ｉ$_{CC}$は、	ｍＡ
⑦	ベースバイアス電流Ｉ$_{BB}$は、	μＡ

２３.２. 答

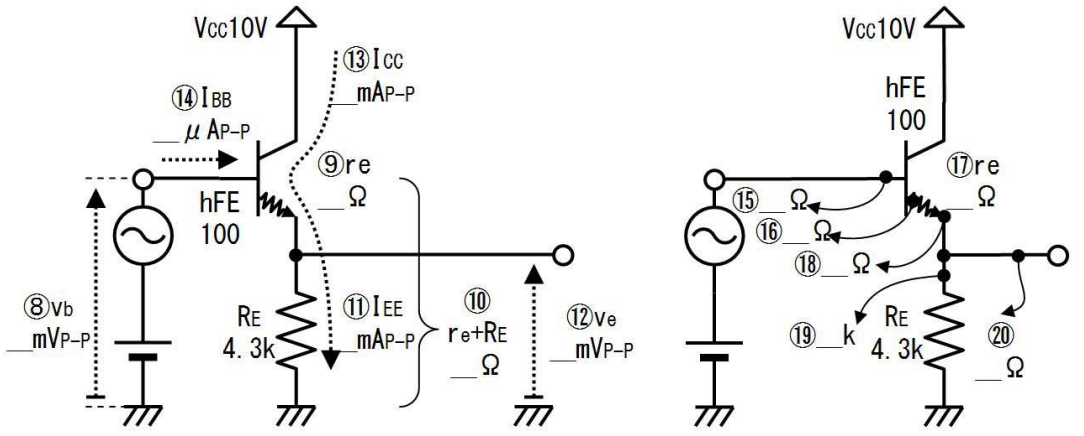


（ａ）　　（ｂ）

番号	質問	値
①	ベースバイアス電圧V_{BB}は、	５Ｖ
②	電流の流れているトランジスタのV_{BE}は、	０．７Ｖ
③	エミッタ抵抗の両端電圧V_{RE}は、	４．３Ｖ
④	エミッタバイアス電流I_{EE}は、	１ｍＡ
⑤	エミッタ等価インピーダンスr_eは、 ２６ｍＶ÷１ｍＡ＝２６Ω	２６Ω
⑥	コレクタバイアス電流I_{CC}は、	１ｍＡ
⑦	ベースバイアス電流I_{BB}は、	１０μＡ

２３.３. 練習

次に交流検討して、出力信号電圧v_oと、インピーダンス検討して出力インピーダンスZ_oを求めます。

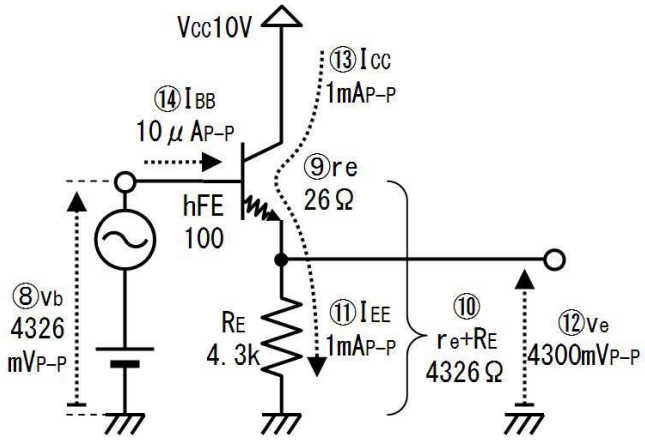


（ｃ）　　（ｄ）

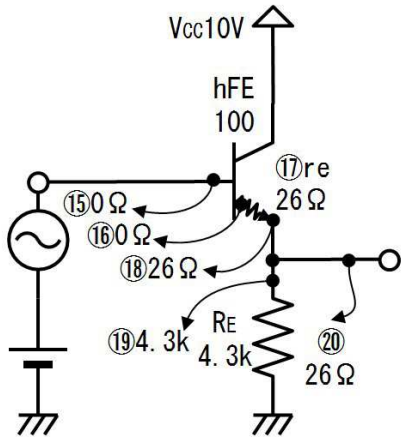
番号	質問	値
⑧	ベース信号電圧v_{bb}は、	mV_{P-P}

⑨	エミッタ等価インピーダンスr_eは、	Ω
⑩	エミッタ側の総インピーダンスは、 r_e+R_E＝４３２６Ω	Ω
⑪	エミッタ信号電流i_{ee}は、	mA_{P-P}
⑫	出力信号電圧v_o（エミッタ抵抗の両端信号電圧は、）	mV_{P-P}
⑬	コレクタ信号電流i_{cc}は、	mA_{P-P}
⑭	ベース信号電流i_{bb}は、 $I_{CC}\div h_{FE}$＝１０μＡ	μA_{P-P}
⑮	ベースから左を見たインピーダンス（信号源のインピーダンス）は、	Ω
⑯	r_eの付け根（ベースの裏側）から左を見たインピーダンスは、 ０Ω÷h_{FE}＝０Ω	Ω
⑰	エミッタ等価インピーダンスr_eは、	Ω
⑱	エミッタのインピーダンスは、	Ω
⑲	R_Eの上側からアースを見たインピーダンスは、	kΩ
⑳	出力端子から回路を見たインピーダンスは、 ２６Ω／／４．３kΩ＝２６Ω	Ω

２３.４. 答



（ｃ）



（ｄ）

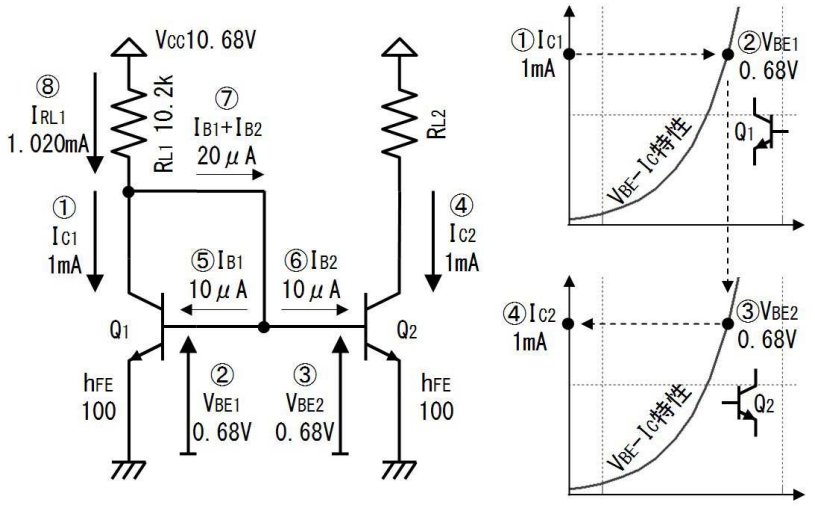
番号	質問	値
⑧	ベース信号電圧v_{bb}は、	４３２５mV_{P-P}
⑨	エミッタ等価インピーダンスr_eは、	２６Ω

⑩	エミッタ側の総インピーダンスは、 $r_e + R_E = 4326\Omega$	4326Ω
⑪	エミッタ信号電流i_{ee}は、	$1mA_{P-P}$
⑫	出力信号電圧v_o（エミッタ抵抗の両端信号電圧は、）	$4300mV_{P-P}$
⑬	コレクタ信号電流i_{cc}は、	$1mA_{P-P}$
⑭	ベース信号電流i_{bb}は、 $I_{CC} \div h_{FE} = 10\mu A$	$10\mu A_{P-P}$
⑮	ベースから左を見たインピーダンス（信号源のインピーダンス）は、	0Ω
⑯	r_eの付け根（ベースの裏側）から左を見たインピーダンスは、 $0\Omega \div h_{FE} = 0\Omega$	0Ω
⑰	エミッタ等価インピーダンスr_eは、	26Ω
⑱	エミッタのインピーダンスは、	26Ω
⑲	R_Eの上側からアースを見たインピーダンスは、	4．3kΩ
⑳	出力端子から回路を見たインピーダンスは、 26Ω／／4．3kΩ＝26Ω	26Ω

24. カレントミラー

下図のように、ベース同士を繋いだトランジスタでは、2つのトランジスタのV_{BE}が同じになり、2つのトランジスタには同じ大きさのI_Cが流れます。また、コレクタ電流には定電流特性があるため、負荷抵抗R_{L2}の値を変更しても、I_{C2}の値は変化しません。

このように、2つのトランジスタを組み合わせると、双方のI_Cが等しくなり、負荷が変化しても一定の電流を保ちます。まるで、Q_1の電流が鏡に映ったようQ_2に反映されるため、この回路を「カレント・ミラー」と呼びます。



２４.１. 確認

上図を参考に下表に書き込んで、回路の動作を確認します。

番号	質問	値
①	Ｑ１のコレクタ電流ＩＣ１は１ｍＡとします。	－
②	ＶＢＥ－ＩＣ特性から、そのときのＱ１のＶＢＥは、	Ｖ
③	Ｑ１とＱ２のベースが繋がっているから、Ｑ１のＶＢＥは、	Ｖ
④	ＶＢＥ－ＩＣ特性から、そのときのＱ１のＩＣは、	ｍＡ
⑤	ｈＦＥが１００だから、Ｑ１のＩＢは、	μＡ
⑥	同じくＱ２のＩＢは、	μＡ
⑦	ベース電流の合計は、	μＡ
⑧	ＲＬ１に流れる電流、ＩＲＬ１は、	ｍＡ

２４.２. 答

番号	質問	値
①	Ｑ１のコレクタ電流ＩＣ１は１ｍＡとします。	－
②	ＶＢＥ－ＩＣ特性から、そのときのＱ１のＶＢＥは、	０．６８Ｖ
③	Ｑ１とＱ２のベースが繋がっているから、Ｑ１のＶＢＥは、	０．６８Ｖ
④	ＶＢＥ－ＩＣ特性から、そのときのＱ１のＩＣは、	１ｍＡ
⑤	ｈＦＥが１００だから、Ｑ１のＩＢは、	１０μＡ
⑥	同じくＱ２のＩＢは、	１０μＡ
⑦	ベース電流の合計は、	２０μＡ

⑧	ＲＬ１に流れる電流、ＩＲＬ１は、	１．０２０ｍＡ

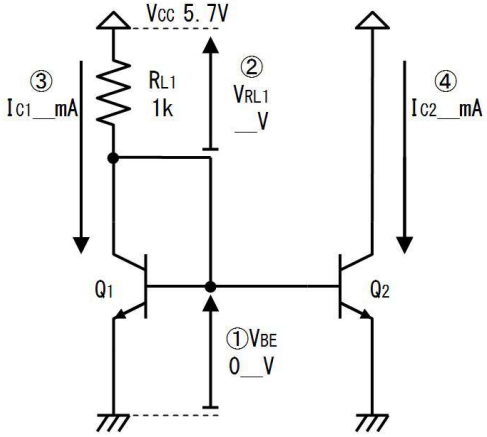
上表で分かるように、ＲＬ１とＲＬ２に流れる電流には、２％程度の差しかありません。大雑把な設計では、２つの電流を同じと考えて計算します。

V_{BE}は温度変化するため、Q_1とQ_2の温度が同じでなければ、コレクタ電流が等しくなりません。このため２つのトランジスタを接着（熱結合）して使用したり、一つのチップの上に２つのトランジスタを作りこんだ「デュアルトランジスタ」を使用します。

オペアンプＩＣでは全てのトランジスタが一つのチップの上に作り込まれていますから、デュアルトランジスタ同様にカレントミラーは精度良く動作します。ただし、熱を発する出力トランジスタまで同じチップに作り込まれているため、その影響を受けるのが悩みの種です。そこで、チップ上の配置を工夫して、たとえ出力回路が発熱しても、２つのトランジスタの温度が同じになるように配慮されています。

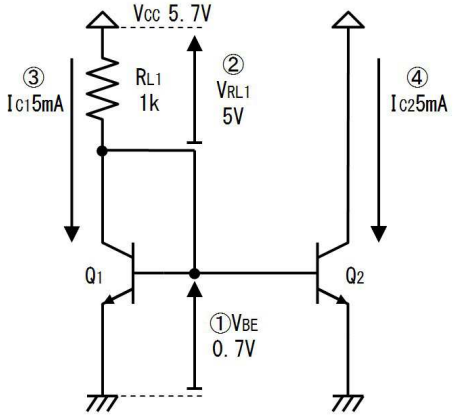
２４.３. 練習

下図の回路のQ_2のコレクタ電流I_{C2}を下表に書き込みながら求めてください。



番号	質問	値
①	電流の流れているトランジスタのV_{BE}は、	Ｖ
②	V_{CC}が５．７Ｖなので、R_{L1}の両端電圧は、	Ｖ
③	Q_1のコレクタ電流I_{C1}は、	ｍＡ
④	Q_2のコレクタ電流I_{C2}は、	ｍＡ

２４.４. 答

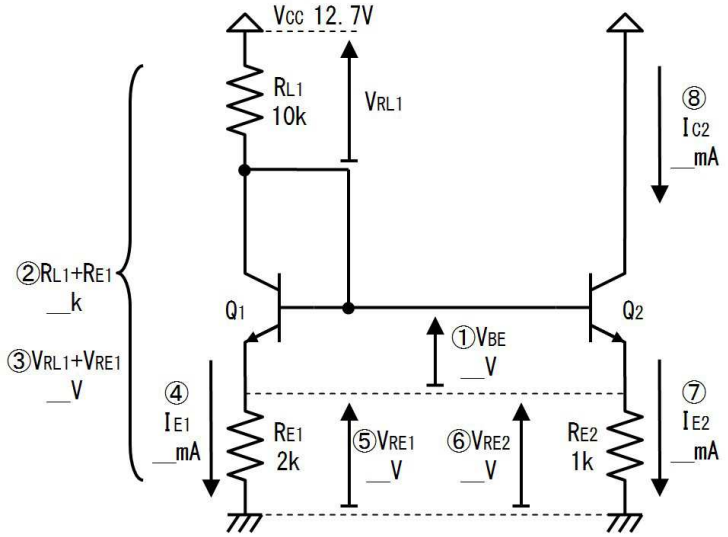


番号	質問	値

①	電流の流れているトランジスタのV_{BE}は、	０．７Ｖ
②	V_{CC}が５．７Ｖなので、R_{L1}の両端電圧は、	５Ｖ
③	Q_1のコレクタ電流I_{C1}は、	５ｍＡ
④	Q_2のコレクタ電流I_{C2}は、	５ｍＡ

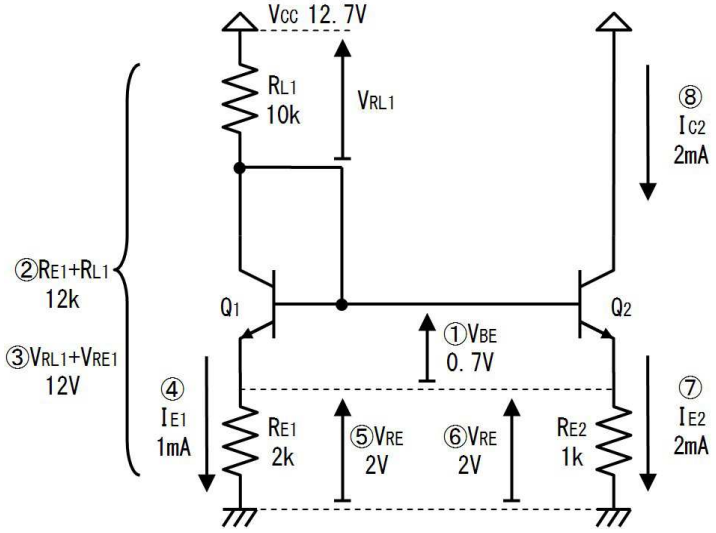
２４.５. 練習

下図のようにエミッタ抵抗を挿入することによって、左右で異なる電流を流すこともできます。



番号	質問	値
①	電流の流れているトランジスタのV_{BE}は、	Ｖ
②	Q_1のコレクタ抵抗R_{L1}とエミッタ抵抗R_{E1}の合計値は、	ｋΩ
③	R_{L1}の両端電圧V_{RL1}と、R_{E1}の両端電圧V_{RE1}の合計電圧は、	Ｖ
④	R_{L1}とR_{E1}に流れる電流は、	ｍＡ
⑤	Q_1のエミッタ抵抗の両端電圧V_{RE1}は、	Ｖ
⑥	Q_2のエミッタ抵抗の両端電圧V_{RE2}は、	Ｖ
⑦	Q_2のエミッタ電流I_{E2}は、	ｍＡ
⑧	Q_2のコレクタ電流I_{C2}は、	ｍＡ

２４.６. 答

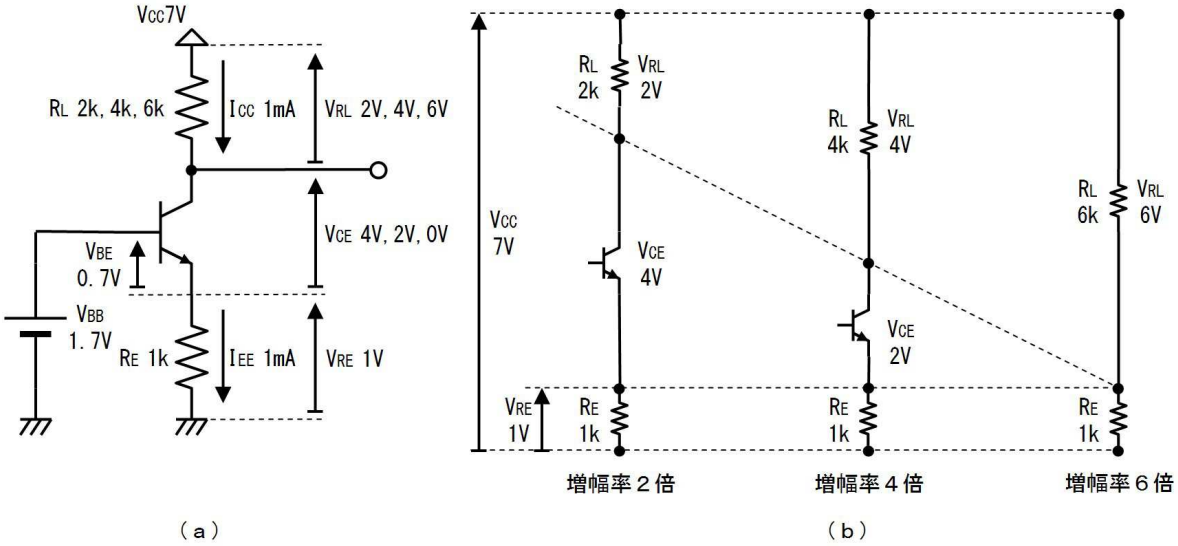


番号	質問	値
①	電流の流れているトランジスタのV_{BE}は、	０．７Ｖ
②	Q_1のコレクタ抵抗R_{L1}とエミッタ抵抗R_{E1}の合計値は、	１２ｋΩ
③	R_{L1}の両端電圧V_{RL1}と、R_{E1}の両端電圧V_{RE1}の合計電圧は、	１２Ｖ
④	R_{L1}とR_{E1}に流れる電流は、	１ｍＡ
⑤	Q_1のエミッタ抵抗の両端電圧V_{RE1}は、	２Ｖ
⑥	Q_2のエミッタ抵抗の両端電圧V_{RE2}は、	２Ｖ
⑦	Q_2のエミッタ電流I_{E2}は、	２ｍＡ
⑧	Q_2のコレクタ電流I_{C2}は、	２ｍＡ

エミッタ抵抗は、左右のトランジスタの電流を変えるだけではなく、エミッタ抵抗のある増幅器と同様に、V_{BE}の温度変化やh_{FE}のばらつきを緩和する効果があります。つまり、左右の電流が同じ場合でも、エミッタ抵抗によって安定度が向上します。

２５. アクティブロード（能動負荷）

増幅器の増幅率を高くする方法を考えます。下図（ａ）の増幅器では、増幅率はエミッタ抵抗R_Eと負荷抵抗R_Lの比率で決まります。つまり、R_Lが大きい程増幅率を高くできます。この回路では、R_Lが、２ｋΩ、４ｋΩ、６ｋΩと大きくなれば、増幅率は２倍、４倍、６倍と大きくなります。



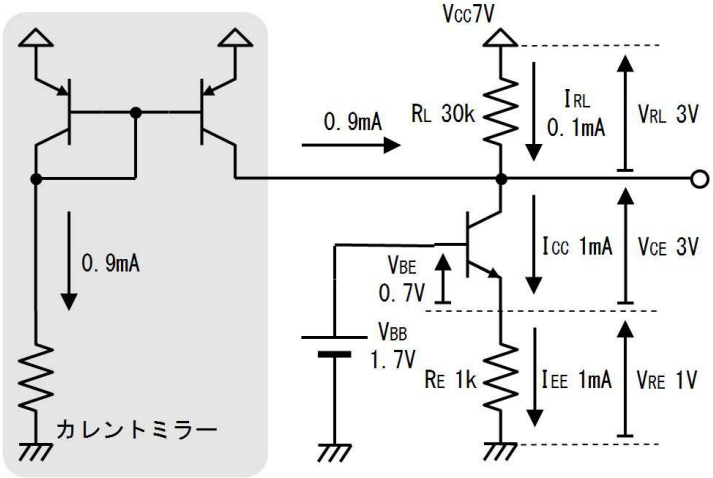
しかし、上図（ｂ）で分かるように、R_Lが大きくなるにつれV_{RL}も大きくなり、逆にV_{CE}は小さくなります。そしてついに、R_Lが６ｋΩになるとV_{CE}が０Ｖになって回路は動作しなくなります。つまり、単にR_Lを大きくする方法では、増幅率が十分大きくなる前に回路が動作しなくなってしまいます。

ところでV_{RL}が発生する原因は、R_Lにコレクタバイアス電流I_{CC}が流れているためです。もし、R_Lに流れる電流を減らすことができれば、R_Lをもっと大きくできます。

しかし、I_{CC}は回路の動作に必要な電流ですから減らすことはできません。そこで下図のように、I_{CC}を、R_Lとは別の経路で供給して、R_Lに流れる電流を減らす方法が工夫されました。これがアクティブロード（能動負荷）です。

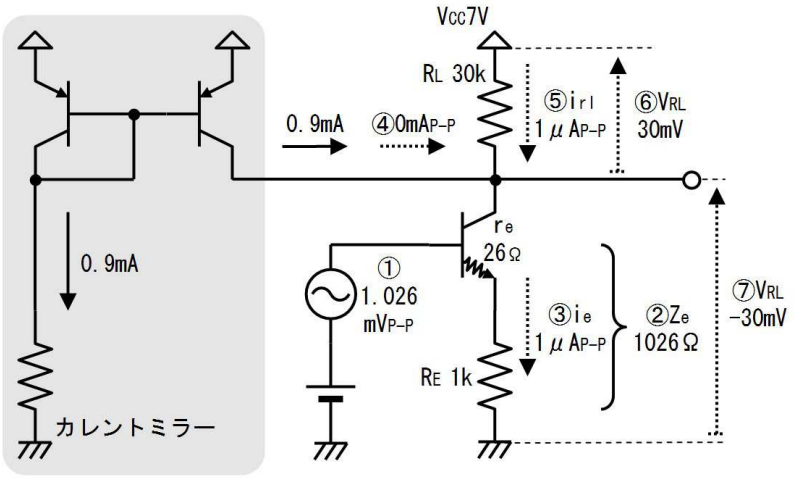
「能動（アクティブ）」とはトランジスタのような「増幅作用」の事で、（増幅作用の無い）抵抗の代りに、トランジスタ（能動素子）を「負荷（ロード）」に使うので、「能動負荷」と呼ばれます。

下図の回路では、カレントミラー回路を使用して、R_Lとは別経路で０．９ｍＡの電流をコレクタに供給しています。このため、R_Lを流れる電流は０．１ｍＡと小さくなり、R_Lを３０ｋΩと高くし、３０倍の増幅率を得ることができます。



２５.１. 確認

下図の回路の信号増幅率を下表に記入しながら確認してください。



番号	質問	値
①	ベースに加わる信号電圧v_bは、	mV_{P-P}
②	エミッタ側の合計インピーダンスZ_eは、	Ω
③	エミッタ信号電流i_eは、	μA_{P-P}
④	カレントミラーから流れ込む信号電流は、 （カレントミラーの出力は、定電流である。定電流とは「電流全く変動しない」という事だから、変動する電流である信号電流は、）	mA_{P-P}
⑤	負荷抵抗R_Lに流れる信号電流i_{rl}は、	μA_{P-P}
⑥	負荷抵抗の両端に現れる信号電圧v_{rl}は、	mV_{P-P}
⑦	出力端子に現れる信号電圧v_oは、	mV_{P-P}
⑧	電圧増幅率は、	倍

25.2. 答

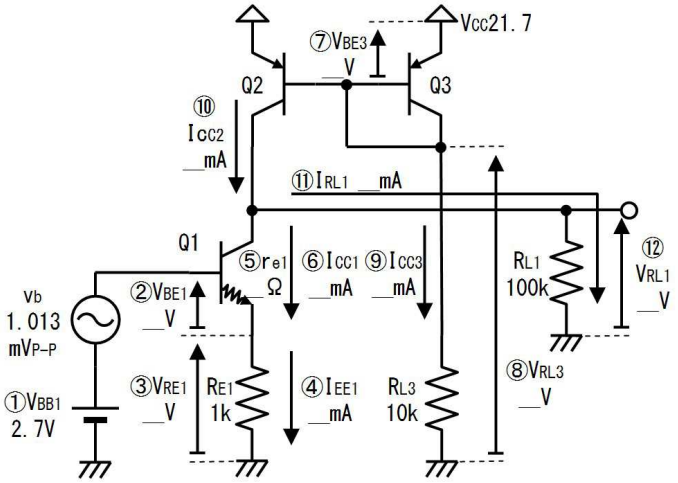
番号	質問	値
①	ベースに加わる信号電圧v_bは、	１．０２６mV_{P-P}
②	エミッタ側の合計インピーダンスZ_eは、	１０２６Ω
③	エミッタ信号電流i_eは、	１μA_{P-P}
④	カレントミラーから流れ込む信号電流は、 （カレントミラーの出力は、定電流である。定電流とは「電流全く変動しない」という事だから、変動する電流である信号電流は、）	０mA_{P-P}
⑤	負荷抵抗R_Lに流れる信号電流i_{rl}は、	１μA_{P-P}
⑥	負荷抵抗の両端に現れる信号電圧v_{rl}は、	３０mV_{P-P}

⑦	出力端子に現れる信号電圧ｖ。は、	－３０ｍＶ$_{P-P}$
⑧	電圧増幅率は、	－３０倍

増幅率は、エミッタバイパスコンデンサを取り付けて高めることもできますが、直流には（コンデンサは直流を通さないため）効果がありません。これとは違い、アクティブロードは直流の増幅率も高めることができます。

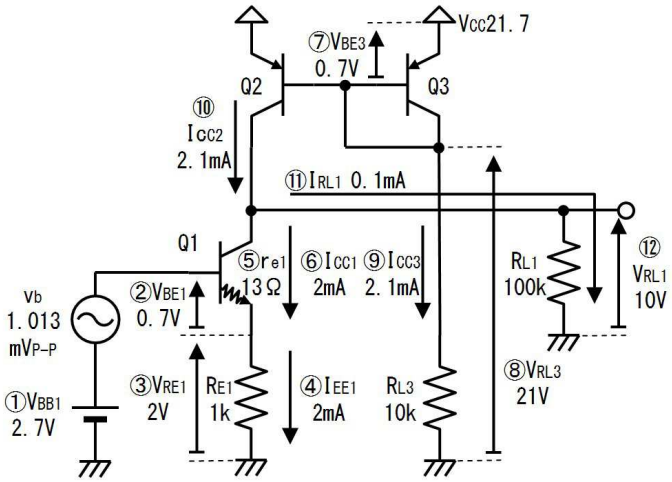
２５.３. 練習

下図の回路を直流検討して消費電流を求め、交流検討して増幅率を求めてください。



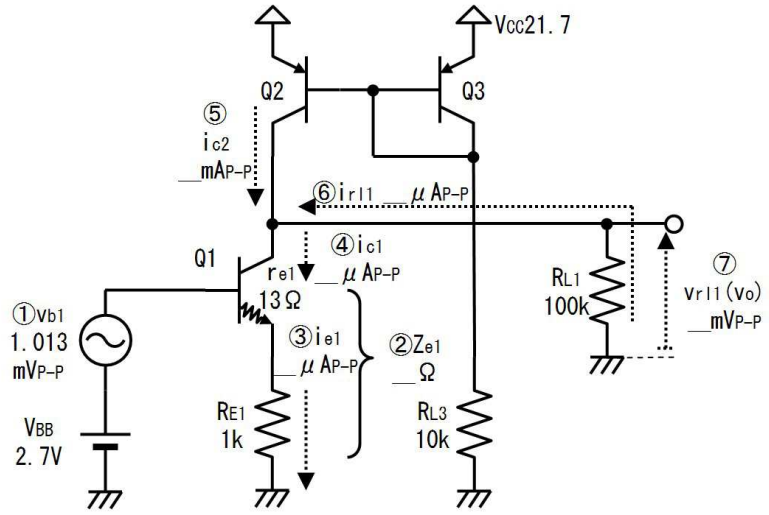
番号	質問	値
①	Ｑ$_1$のベースバイアス電圧Ｖ$_{BB1}$は、	２．７Ｖ
②	Ｑ$_1$のベースエミッタ間電圧Ｖ$_{BE1}$は、	Ｖ
③	Ｑ$_1$のエミッタ抵抗の両端電圧Ｖ$_{RE1}$は、	Ｖ
④	Ｑ$_1$のエミッタバイアス電流Ｉ$_{EE1}$は、	ｍＡ
⑤	Ｑ$_1$のエミッタ等価インピーダンスｒ$_{e1}$は、	Ω
⑥	Ｑ$_1$のコレクタバイアス電流１$_{CC1}$は、	ｍＡ
⑦	Ｑ$_3$のベースエミッタ間電圧Ｖ$_{BE1}$は、	Ｖ
⑧	Ｑ$_3$の負荷抵抗Ｒ$_{L3}$の両端電圧Ｖ$_{RL3}$は、	Ｖ
⑨	Ｑ$_3$のコレクタ電流Ｉ$_{CC3}$は、	ｍＡ
⑩	Ｑ$_2$のコレクタ電流Ｉ$_{CC2}$は、 （Ｑ$_2$とＱ$_3$はカレントミラーだから、）	ｍＡ
⑪	負荷抵抗Ｒ$_{L1}$に流れる電流Ｉ$_{RL1}$は、	ｍＡ
⑫	負荷抵抗Ｒ$_{L1}$の両端電圧Ｖ$_{RL1}$は、	Ｖ

２５.４. 答



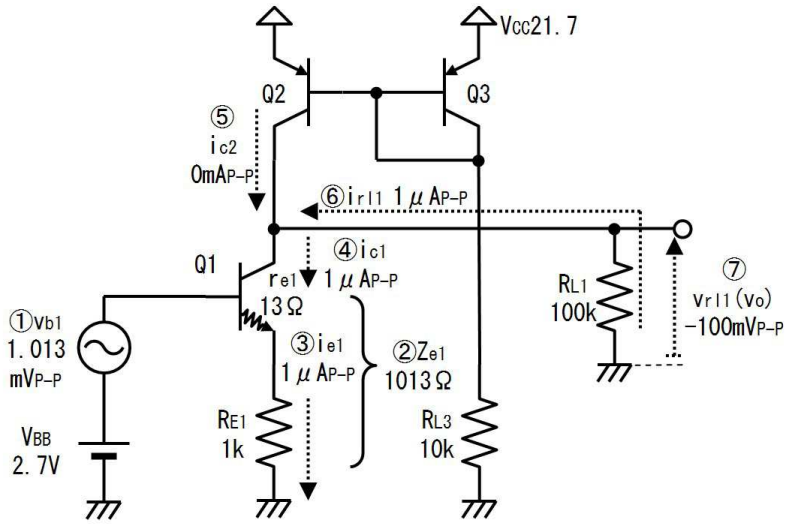
番号	質問	値
①	Q_1のベースバイアス電圧V_{BB1}は、	２．７Ｖ
②	Q_1のベースエミッタ間電圧V_{BE1}は、	０．７Ｖ
③	Q_1のエミッタ抵抗の両端電圧V_{RE1}は、	２Ｖ
④	Q_1のエミッタバイアス電流I_{EE1}は、	２ｍＡ
⑤	Q_1のエミッタ等価インピーダンスr_{e1}は、	１３Ω
⑥	Q_1のコレクタバイアス電流1_{CC1}は、	２ｍＡ
⑦	Q_3のベースエミッタ間電圧V_{BE1}は、	０．７Ｖ
⑧	Q_3の負荷抵抗R_{L3}の両端電圧V_{RL3}は、	２１Ｖ
⑨	Q_3のコレクタ電流I_{CC3}は、	２．１ｍＡ
⑩	Q_2のコレクタ電流I_{CC2}は、 （Q_2とQ_3はカレントミラーだから、）	２．１ｍＡ
⑪	負荷抵抗R_{L1}に流れる電流I_{RL1}は、	０．１ｍＡ
⑫	負荷抵抗R_{L1}の両端電圧V_{RL1}は、	１０Ｖ

２５.５. 練習



番号	質問	値
①	Q_1のベースに加わる信号電圧v_{b1}は、	１．０３１mV_{P-P}
②	Q_1のエミッタ側インピーダンスの合計Z_{e1}は、	Ω
③	Q_1のエミッタ信号電流i_{e1}は、	μA_{P-P}
④	Q_1のコレクタ信号電流i_{c1}は、	μA_{P-P}
⑤	Q_2のコレクタ信号電流i_{c2}は、 （Q_2とQ_3はカレントミラーで、Q_2のコレクタ電流は定電流だから、）	mA_{P-P}
⑥	負荷抵抗R_{L1}に流れる信号電流i_{rl1}は、	μA_{P-P}
⑦	負荷抵抗R_{L1}の両端電圧v_{rl1}は、	mV_{P-P}
⑧	この回路の電圧増幅率は、	約　　倍

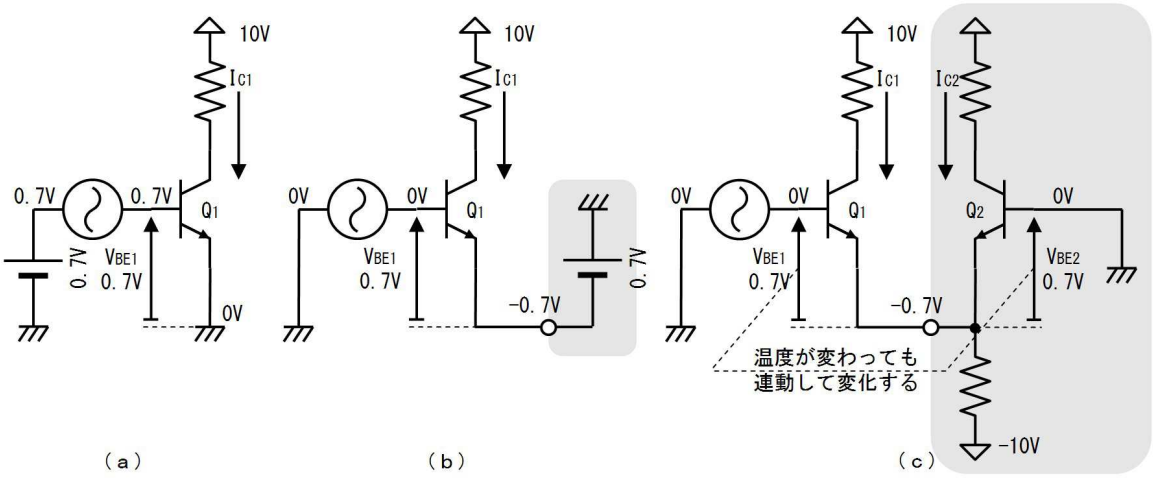
２５.６. 答



番号	質問	値
①	Q_1のベースに加わる信号電圧v_{b1}は、	１．０３１mV_{P-P}
②	Q_1のエミッタ側インピーダンスの合計Z_{e1}は、	１０１３Ω
③	Q_1のエミッタ信号電流i_{e1}は、	１μA_{P-P}
④	Q_1のコレクタ信号電流i_{c1}は、	１μA_{P-P}
⑤	Q_2のコレクタ信号電流i_{c2}は、 （Q_2とQ_3はカレントミラーで、Q_2のコレクタ電流は定電流だから、）	０mA_{P-P}
⑥	負荷抵抗R_{L1}に流れる信号電流i_{rl1}は、	１μA_{P-P}
⑦	負荷抵抗R_{L1}の両端電圧v_{rl1}は、	－１００mV_{P-P}
⑧	この回路の電圧増幅率は、	約９９倍

２６．差動増幅回路

下図（ａ）は単純な増幅器です。トランジスタを動作させるためには、信号と直列に０．７Ｖの電圧を加える必要がありました。しかし、入力に直流を加えるのは面倒ですから、できれば信号を直接ベースに接続したいところです。



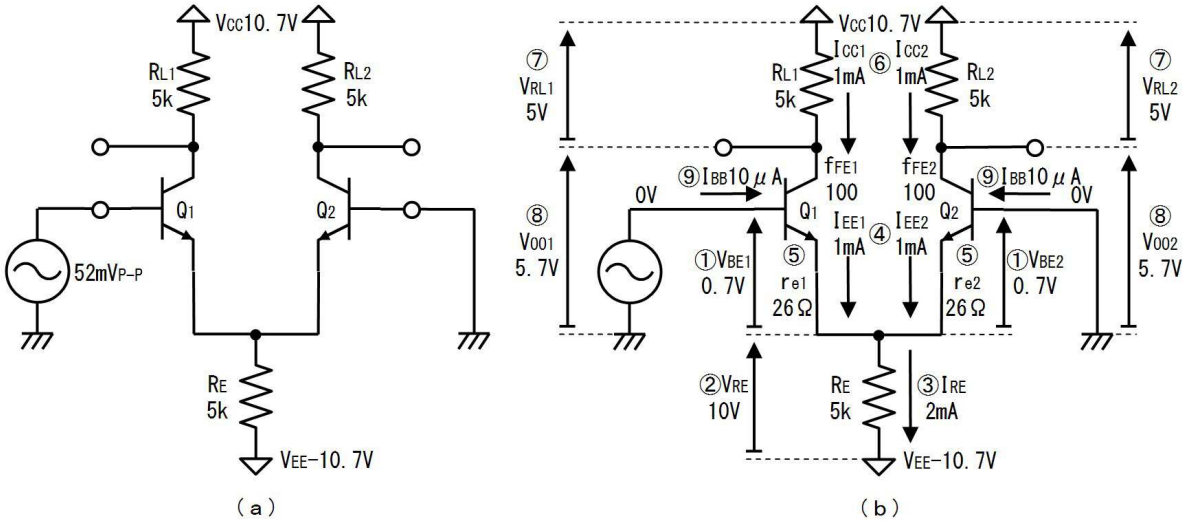
そこで上図（ｂ）のように、ベースの電圧を上げるのではなく、エミッタの電圧を下げることで、ベースに直接信号を加えることができます。

ただし、この方法には欠点があります。つまり「V_{BE}は０．７Ｖ程度でほぼ一定」とは言うものの、温度で変化（１℃あたり約２ｍＶ低下）するため、温度変化に合わせて電池の電圧を調節しないと、I_Cを一定に保つことができません。

そこで、上図（ｃ）のように、もう一つの（同一品種の）トランジスタ（Q_2）を用意し、ベースをアースに接続し、エミッタ抵抗を負電源に接続すれば、Q_2のエミッタの電圧は－０．７Ｖとなります。この－０．７Ｖを、電池の代わりに利用することで、（Q_1のV_{BE1}とQ_2のV_{BE2}は、温度に対して同じ変化をしますから）I_Cは温度に影響されなくなります。

上図（ｃ）の回路に、出力端子を追加してバランスよく書き直した回路を下図（ａ）に示します。こ

のように２つの増幅器をエミッタでつないだ回路を「差動増幅回路」と呼びます。ベースを０Ｖに接続できるように、エミッタは負の電圧に保ちます。そのため、正電源V_{CC}だけでなく、負電源V_{EE}が必要です。



２６.１. 確認

上図（ａ）を参考に、下表に書き込みながら、差動増幅回路を直流検討し、２つの出力端子の電圧V_{O01}とV_{O02}を求めて下さい。

番号	質問	値
①	電流の流れているトランジスタのV_{BE}は、	Ｖ
②	エミッタ抵抗R_Eの両端電圧V_{RE}は、	Ｖ
③	エミッタ抵抗に流れる電流I_{RE}は、	ｍＡ
④	回路の左右は同じ形（対称）だから、エミッタバイアス電流I_{EE1}とI_{EE2}は、いずれも、	ｍＡ
⑤	エミッタ等価インピーダンスr_{e1}とr_{e2}は、	Ω
⑥	コレクタバイアス電流I_{CC1}とI_{CC2}は、いずれも、	ｍＡ
⑦	負荷抵抗R_{L1}とR_{L2}の両端電圧V_{RL1}とV_{RL2}は、	Ｖ
⑧	出力端子の直流電圧V_{O01}とV_{O02}は、	Ｖ
⑨	ベースバイアス電流I_{BB1}とI_{BB2}は、	μＡ

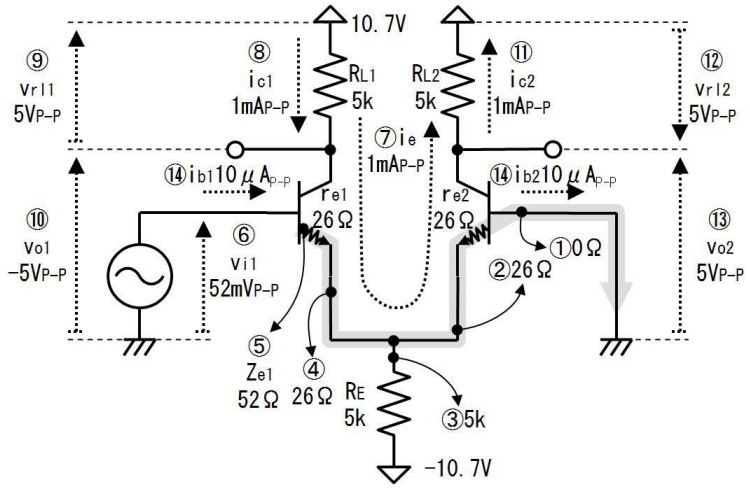
２６.２. 答

番号	質問	値
①	電流の流れているトランジスタのV_{BE}は、	０．７Ｖ
②	エミッタ抵抗R_Eの両端電圧V_{RE}は、	１０Ｖ
③	エミッタ抵抗に流れる電流I_{RE}は、	２ｍＡ
④	回路の左右は同じ形（対称）だから、エミッタバイアス	１ｍＡ

	電流I_{EE1}とI_{EE2}は、いずれも、	
⑤	エミッタ等価インピーダンスr_{e1}とr_{e2}は、	２６Ω
⑥	コレクタバイアス電流I_{CC1}とI_{CC2}は、いずれも、	１ｍA
⑦	負荷抵抗R_{L1}とR_{L2}の両端電圧V_{RL1}とV_{RL2}は、	５V
⑧	出力端子の直流電圧V_{OO1}とV_{OO2}は、	５．７V
⑨	ベースバイアス電流I_{BB1}とI_{BB2}は、	１０μA

２６.３. 確認

下図を参考に、下表に書き込みながら、差動増幅回路をインピーダンス及び交流検討し、２つの出力端子の信号電圧v_{o1}とv_{o2}を確認してください。



（ｃ）

番号	質問	値
	まず、Q_1のエミッタのインピーダンスを検討します。	―
①	Q_2のベースからアースを見たインピーダンスは、	Ω
②	Q_2のエミッタからベース（上）を見たインピーダンスは、	Ω
③	R_Eの上側からマイナス電源V_{EE}を見たインピーダンスは、	ｋΩ
④	Q_1のエミッタから下を見たインピーダンスは、 （②と③が並列に見えて、）	Ω
⑤	Q_1のr_eの付け根（ベースの裏側）から右を見たインピーダンスは、	Ω
	次に交流検討をします。	―
⑥	ベースに加わる信号電圧v_{i1}は、	mV_{P-P}

⑦	エミッタ信号電流 i_e は、 （⑤と⑥から、）	mA_{P-P}
⑧	Q_1 のコレクタ信号電流 i_{c1} は、	mA_{P-P}
⑨	Q_1 の負荷抵抗 R_{L1} の両端信号電圧 v_{rl1} は、	V_{P-P}
⑩	出力端子の信号電圧 v_{o1} は、	V_{P-P}
⑪	Q_2 のコレクタ信号電流 i_{c2} は、	mA_{P-P}
⑫	Q_1 の負荷抵抗 R_{L2} の両端信号電圧 v_{rl2} は、 （但し、電圧の矢印は下向きです）	V_{P-P}
⑬	出力端子の信号電圧 v_{o2} は、 （矢印の向きに注意して、）	V_{P-P}
⑭	ベース信号電流 i_{b1}、i_{b2} は、 （h_{FE} が１００だから、）	μA_{P-P}

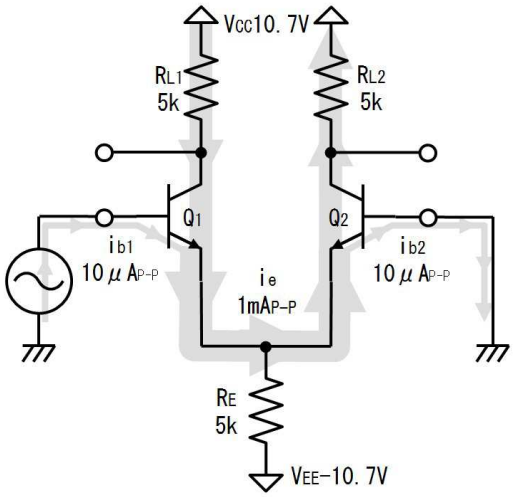
26.4. 答

番号	質問	値
	まず、Q_1 のエミッタのインピーダンスを検討します。	－
①	Q_2 のベースからアースを見たインピーダンスは、	０Ω
②	Q_2 のエミッタからベース（上）を見たインピーダンスは、	２６Ω
③	R_E の上側からマイナス電源 V_{EE} を見たインピーダンスは、	５ｋΩ
④	Q_1 のエミッタから下を見たインピーダンスは、 （②と③が並列に見えて、）	２６Ω
⑤	Q_1 の r_e の付け根（ベースの裏側）から右を見たインピーダンスは、	５２Ω
	次に交流検討をします。	－
⑥	ベースに加わる信号電圧 v_{i1} は、	５２mV_{P-P}
⑦	エミッタ信号電流 i_e は、 （⑤と⑥から、）	１mA_{P-P}
⑧	Q_1 のコレクタ信号電流 i_{c1} は、	１mA_{P-P}
⑨	Q_1 の負荷抵抗 R_{L1} の両端信号電圧 v_{rl1} は、	５V_{P-P}
⑩	出力端子の信号電圧 v_{o1} は、	－５V_{P-P}

⑪	Q_2のコレクタ信号電流i_{c2}は、	$1mA_{P-P}$
⑫	Q_2の負荷抵抗R_{L2}の両端信号電圧v_{r12}は、 （但し、電圧の矢印は下向きです）	$5V_{P-P}$
⑬	出力端子の信号電圧v_{o2}は、 （矢印の向きに注意して、）	$5V_{P-P}$
⑭	ベース信号電流i_{b1}、i_{b2}は、 （h_{FE}が１００だから、）	$10\mu A_{P-P}$

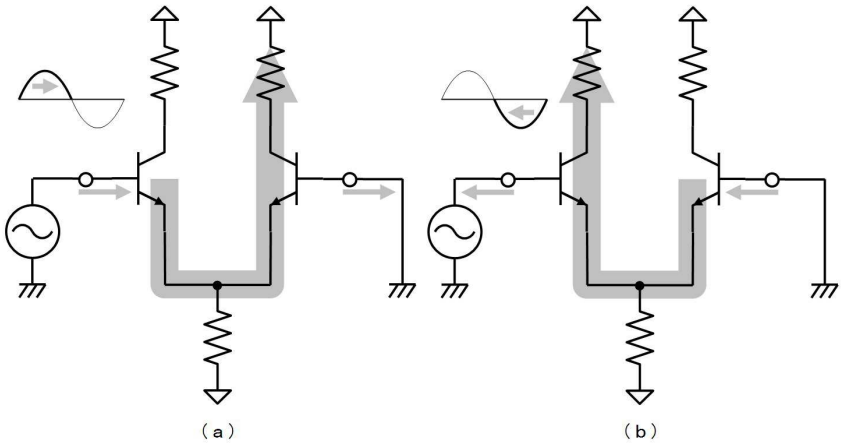
このように、Q_1のベースに信号を加えるだけで、Q_1とQ_2両方のエミッタに信号電流が流れ、両方の出力端子に信号が出力されます。

差動増幅回路では、下図に灰色矢印で示すように信号電流が流れます。左側からQ_1のベースに流れ込んだ信号電流は、h_{FE}倍に増幅されて、Q_1のエミッタ信号電流になり、Q_2に向かって右向きの、そして上向きに登ってゆきます。このようにして流れたQ_2のエミッタ電流のh_{FE}分の１が、Q_2のベース信号電流となり、右へ流れ出てゆきます。



ベース信号電流に注目すると、上図に灰色細矢印で示すように、Q_1のベースから入ってエミッタを通り、Q_2のベースから流れ出します。また、コレクタやエミッタ信号電流は、上図に灰色太矢印で示すように、U字型に流れます。

下図に、差動増幅回路に信号電流が流れるイメージを示します。

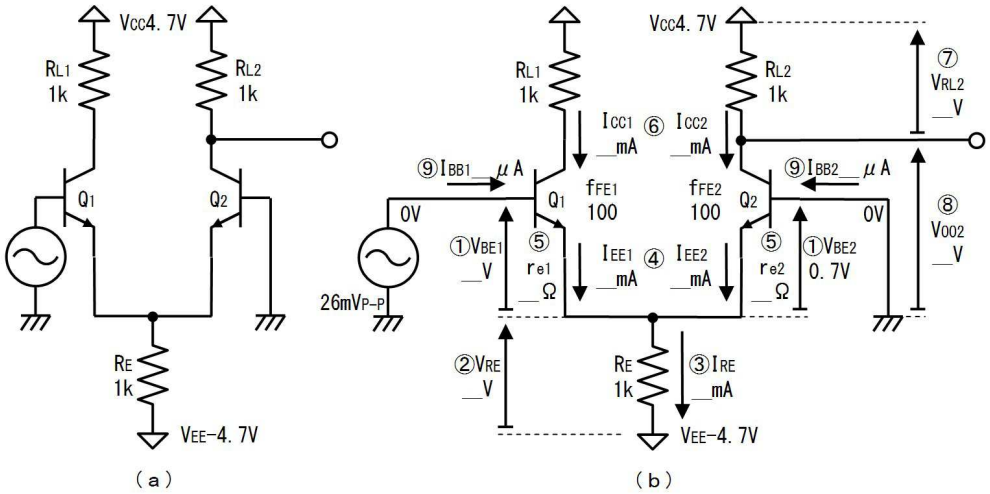


信号電流は「正」「負」を繰り返す交流ですから、回路は上図（ａ）の状態と、上図（ｂ）の状態を交互に繰り返して、回路内には電流が行き来します。

この図で分かるように、左右のトランジスタのエミッタやコレクタには同じ電流が流れますから、出力端子をどちらのトランジスタに設けても、同じ電圧の（位相は逆）の出力が得られます。

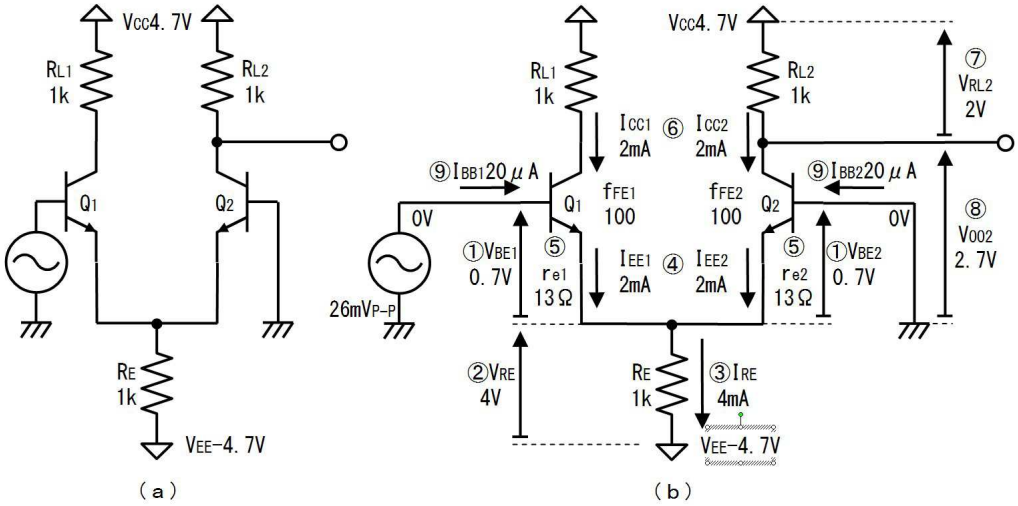
２６.５. 練習

下図の差動増幅回路を直流検討し、出力直流電圧V_{OO}を求め、インピーダンス検討、交流検討して、信号出力電圧v_oを求めてください。



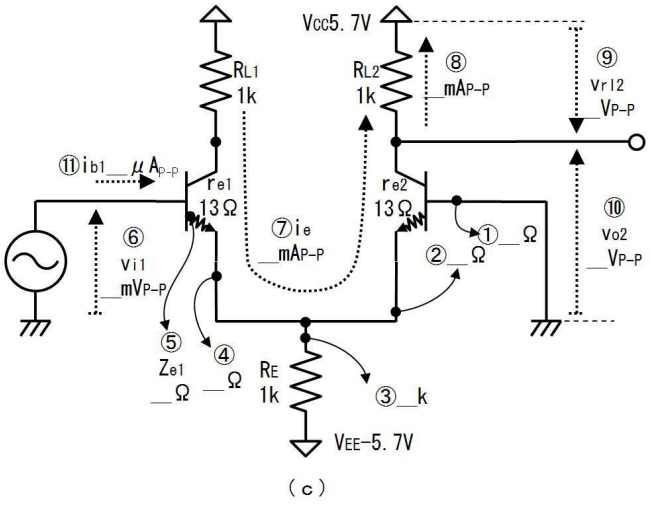
番号	質問	値
	直流について考えます。	
①	電流が流れているトランジスタのV_{BE}は、	V
②	エミッタ抵抗の両端電圧V_{RE}は、	V
③	エミッタ抵抗の電流I_{RE}は、	mA
④	Q_1とQ_2のエミッタバイアス電流、I_{EE1}とI_{EE2}は、	mA
⑤	Q_1とQ_2のエミッタ等価インピーダンスは、	Ω
⑥	Q_1とQ_2のコレクタバイアス電流、I_{CC1}とI_{CC2}は、	mA
⑦	Ｑ２の付加抵抗の両端電圧V_{RL2}は、	V
⑧	出力直流（バイアス）電圧V_{OO}は、	V

26.6. 答



番号	質問	値
	直流について考えます。	
①	電流が流れているトランジスタのV_{BE}は、	0．7V
②	エミッタ抵抗の両端電圧V_{RE}は、	4V
③	エミッタ抵抗の電流I_{RE}は、	4mA
④	Q_1とQ_2のエミッタバイアス電流、I_{EE1}とI_{EE2}は、	2mA
⑤	Q_1とQ_2のエミッタ等価インピーダンスは、	13Ω
⑥	Q_1とQ_2のコレクタバイアス電流、I_{CC1}とI_{CC2}は、	2mA
⑦	Q2の付加抵抗の両端電圧V_{RL2}は、	2V
⑧	出力直流（バイアス）電圧V_{OO}は、	2．7V

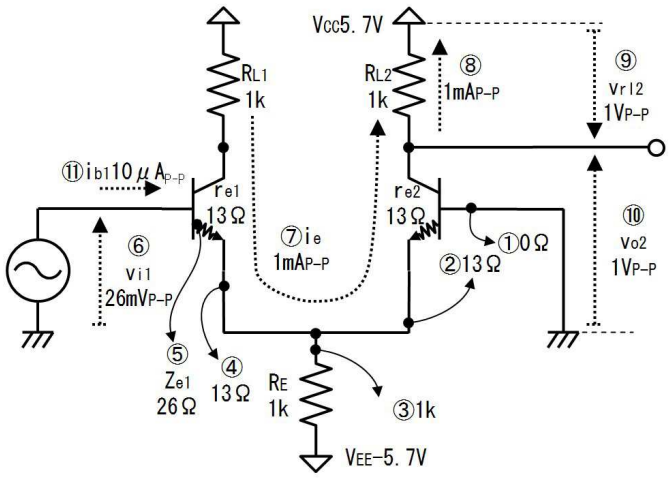
26.7. 練習



番号	質問	値

	Q_1のエミッタインピーダンスを検討します。	
①	Q_2のベースからアースを見たインピーダンスは、	Ω
②	Q_2のエミッタからアースを見たインピーダンスは、	Ω
③	エミッタ抵抗R_Eからマイナス電源を見たインピーダンスは、	kΩ
④	Q_1のエミッタから右側を見たインピーダンスは、 （②と③が並列に見えて）	Ω
⑤	Q_1のr_eの付け根（ベースの裏側）から右を見たインピーダンスは、	Ω
	回路を交流検討します。	
⑥	Q_1のベースに加わる信号電圧は、	mV_{P-P}
⑦	Q_1のエミッタ信号電流i_{e1}は、 （エミッタのインピーダンスは⑤であったから、）	mA_{P-P}
⑧	Q_2のコレクタ信号電流は、	mA_{P-P}
⑨	Q２の負荷抵抗ＲＬ２の両端電圧は、	V_{P-P}
⑩	信号出力電圧v_{o2}は、	V_{P-P}

２６.８. 答

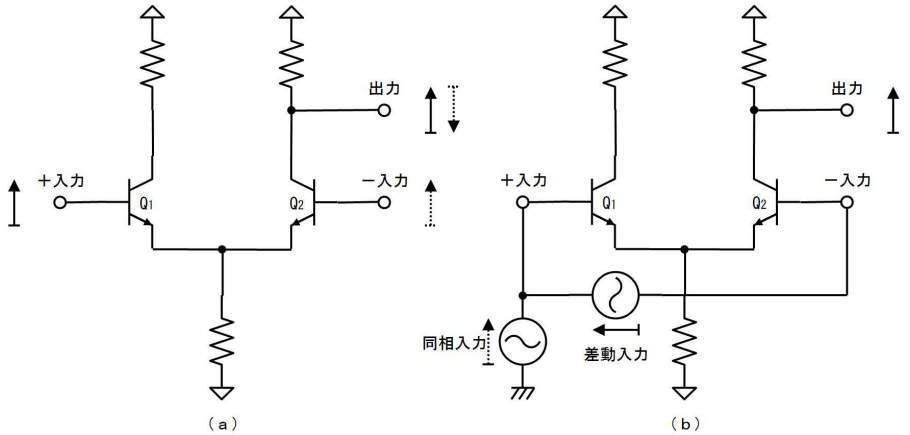


（ｃ）

番号	質問	値
	Q_1のエミッタインピーダンスを検討します。	
①	Q_2のベースからアースを見たインピーダンスは、	０Ω
②	Q_2のエミッタからアースを見たインピーダンスは、	１３Ω
③	エミッタ抵抗R_Eからマイナス電源を見たインピーダ	１ｋΩ

	ンスは、	
④	Q_1のエミッタから右側を見たインピーダンスは、 （②と③が並列に見えて）	１３Ω
⑤	Q_1のr_eの付け根（ベースの裏側）から右を見たインピーダンスは、	２６Ω
	回路を交流検討します。	
⑥	Q_1のベースに加わる信号電圧は、	２６mV_{P-P}
⑦	Q_1のエミッタ信号電流i_{e1}は、 （エミッタのインピーダンスは⑤であったから、）	１mA_{P-P}
⑧	Q_2のコレクタ信号電流は、	１mA_{P-P}
⑨	Ｑ２の負荷抵抗ＲＬ２の両端電圧は、	１V_{P-P}
⑩	信号出力電圧v_{o2}は、	１V_{P-P}

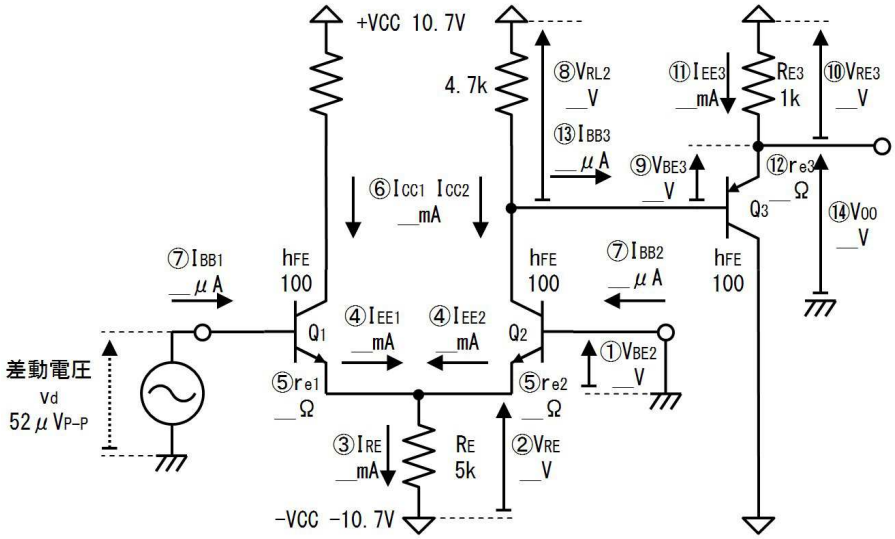
下図（ａ）のように、差動増幅回路は左右のベースを同時に入力に使用できます。左のベースの電圧を上げると出力電圧が上がり、右のベースの電圧を上げると出力電圧が下がります。このため、左のベースを＋入力、右のベースを－入力と呼びます。



上図（ｂ）のように＋入力と－入力の間に加える入力を「差動入力」、＋入力と－入力を同時に上下させるような入力を「同相入力」と呼びます。差動増幅回路は、差動入力だけを増幅して出力します。

２７．差動増幅回路とエミッタフォロア

差動増幅回路は安定しており増幅率も大きいですが、出力インピーダンスが高いので、下図に示すように、出力にエミッタフォロアを追加して使用します。



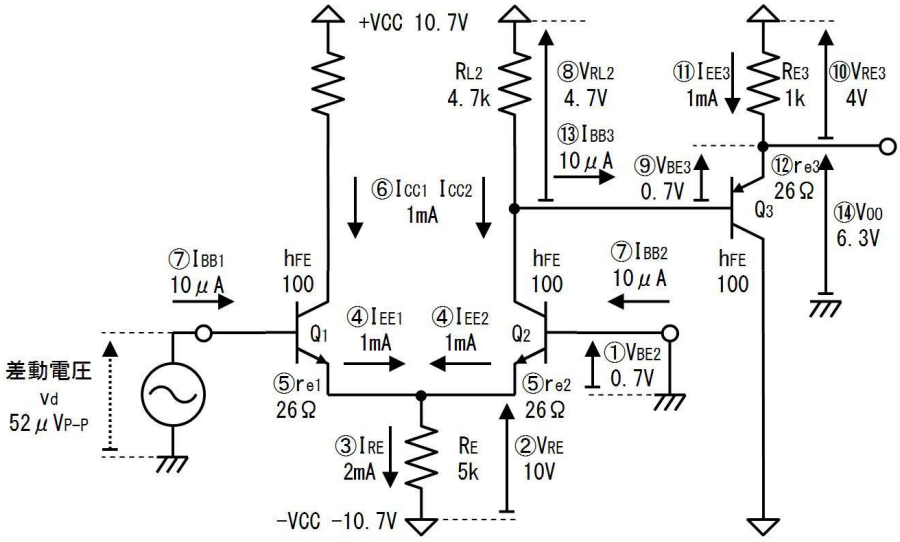
２７.１. 練習

上図の回路を下表に書き込みながら直流検討してください。

番号	質問	値
①	Q_2のV_{BE}は、	V
②	エミッタ抵抗の両端電圧V_{RE}は、	V
③	エミッタ抵抗に流れる電流I_{RE}は、	mA
④	Q_1とQ_2のエミッタバイアス電流I_{EE1}、I_{EE2}は、	mA
⑤	Q_1とQ_2のエミッタ等価インピーダンスｒｅ１、r_{e2}は、	Ω
⑥	Q_1とQ_2のコレクタバイアス電流I_{CC1}、I_{CC2}は、	mA
⑦	Q_1とQ_2のベースバイアス電流I_{BB1}、I_{BB2}は、（h_{FE}が１００だから、）	μA
⑧	Q_2の負荷抵抗R_{L2}の両端電圧は、	V
⑨	Q_3のV_{BE}は、	V
⑩	Q_3のエミッタ抵抗の両端電圧V_{RE3}は、	V
⑪	Q_3のエミッタバイアス電流I_{EE3}は、	mA
⑫	Q_3のエミッタ等価インピーダンスr_{e3}は、	Ω
⑬	Q_3のベースバイアス電流I_{BB3}は、	μA
	前段のコレクタバイアス電流はI_{CC2}は後段のベースバイアス電流I_{BB3}の何倍、（Q_3のh_{FE}ばらつきの影響を避けるため、２０倍程度欲しい）	倍

⑭	出力バイアス電圧V_{OO}は、	V

２７.２. 答

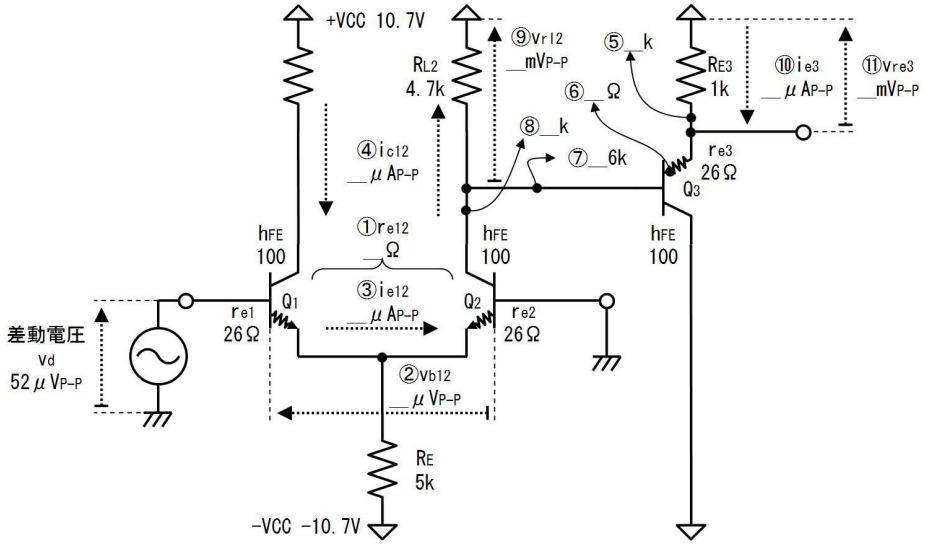


番号	質問	値
①	Q_2のV_{BE}は、	０．７Ｖ
②	エミッタ抵抗の両端電圧V_{RE}は、	１０Ｖ
③	エミッタ抵抗に流れる電流I_{RE}は、	２mA
④	Q_1とQ_2のエミッタバイアス電流I_{EE1}、I_{EE2}は、	１mA
⑤	Q_1とQ_2のエミッタ等価インピーダンスr_{e1}、r_{e2}は、	２６Ω
⑥	Q_1とQ_2のコレクタバイアス電流I_{CC1}、I_{CC2}は、	１mA
⑦	Q_1とQ_2のベースバイアス電流I_{BB1}、I_{BB2}は、 （h_{FE}が１００だから、）	１０μA
⑧	Q_2の負荷抵抗R_{L2}の両端電圧は、	４．７Ｖ
⑨	Q_3のV_{BE}は、	０．７Ｖ
⑩	Q_3のエミッタ抵抗の両端電圧V_{RE3}は、	４Ｖ
⑪	Q_3のエミッタバイアス電流I_{EE3}は、	１mA
⑫	Q_3のエミッタ等価インピーダンスr_{e3}は、	２６Ω
⑬	Q_3のベースバイアス電流I_{BB3}は、	１０μA
	前段のコレクタバイアス電流はI_{CC2}は後段のベースバイアス電流I_{BB3}の何倍、 （Q_3のh_{FE}ばらつきの影響を避けるため、２０倍程度欲しい）	１００倍

⑭	出力バイアス電圧V_{OO}は、	６．３Ｖ

２７.３. 練習

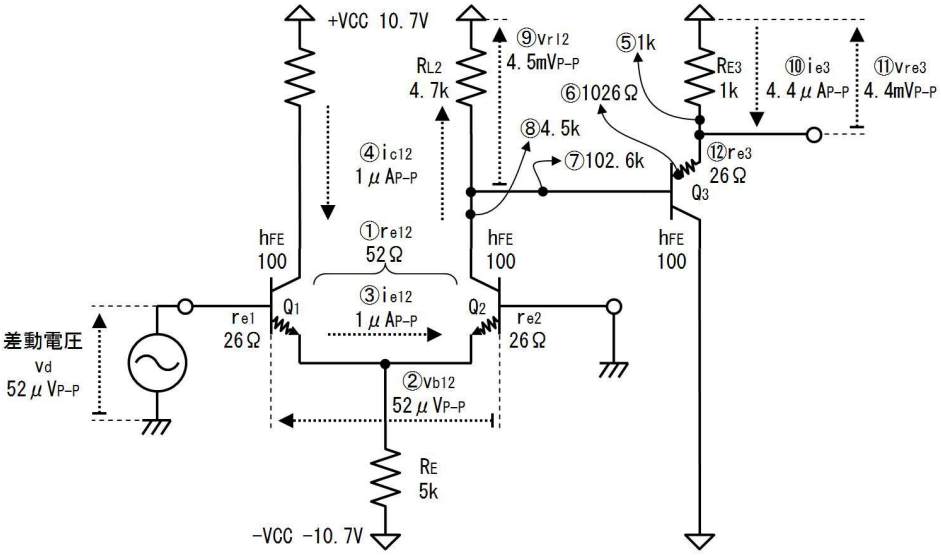
下図を参考に下表に書き込みながら下図の回路を交流検討して、電圧増幅率と出力インピーダンスを求めてください。



番号	質問	値
①	Q_1のベースとQ_2のベース間の信号電圧v_{b12}は、	μV_{P-P}
②	Q_1とQ_2のエミッタ側インピーダンスの合計は、	Ω
③	Q_1とQ_2のエミッタ信号電流i_{e12}は、	μA_{P-P}
④	Q_1とQ_2のコレクタ信号電流i_{c12}は、 （方向は互いに異なるが、）	μA_{P-P}
⑤	R_{E3}の下側から＋電源を見たインピーダンスは、	kΩ
⑥	Q_3のベースの裏側から、＋電源を見たインピーダンスは、	Ω
⑦	Q_3のベースから＋電源を見たインピーダンスは、 （h_{FE}が１００だから、）	kΩ
⑧	Q_2のコレクタから＋電源を見たインピーダンスは、 （R_{L2}と⑦が並列に見えて、）	kΩ
⑨	Q_2の負荷抵抗R_{L2}の両端信号電圧は、 （④と⑧から、）	mV_{P-P}
⑩	Q_3のエミッタ信号電圧i_{e3}は、	μA_{P-P}
⑪	R_{E3}の両端信号電圧は、	mV_{P-P}
	電圧増幅率Ａｖは、	倍

	（②と⑪から、）	
	出力インピーダンスは、 （（R_{L2}／h_{FE3}＋２６Ω）／／１ｋΩで、）	Ω

２７.４. 答



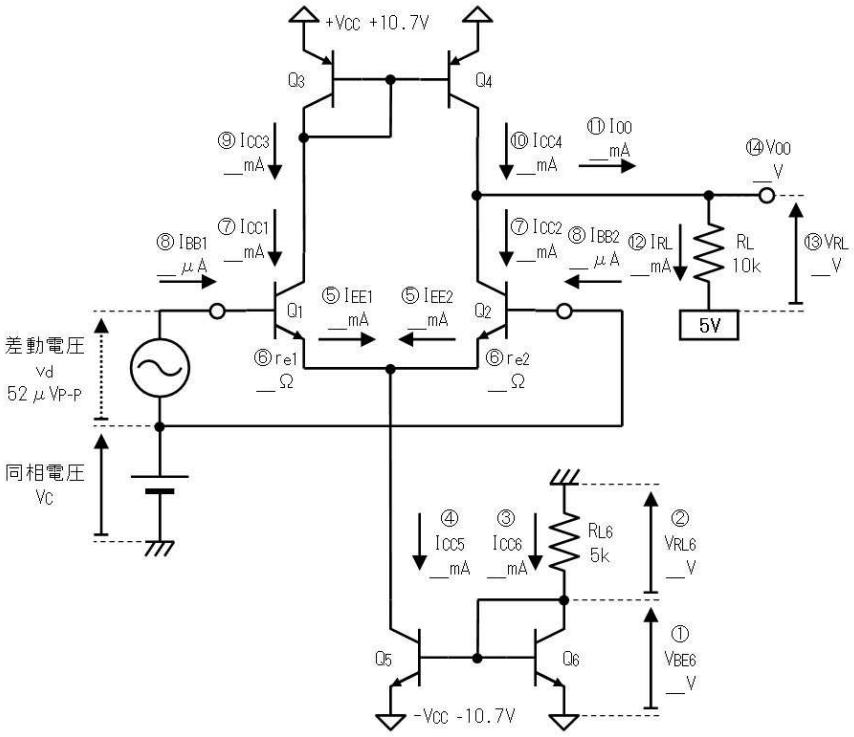
番号	質問	値
①	Ｑ１のベースとＱ２のベース間の信号電圧ｖｂ１２は、	５２μＶＰ－Ｐ
②	Ｑ１とＱ２のエミッタ側インピーダンスの合計は、	５２Ω
③	Ｑ１とＱ２のエミッタ信号電流ｉｅ１２は、	１μＡＰ－Ｐ
④	Ｑ１とＱ２のコレクタ信号電流ｉｃ１２は、 （方向は互いに異なるが、）	１μＡＰ－Ｐ
⑤	ＲＥ３の下側から＋電源を見たインピーダンスは、	１ｋΩ
⑥	Ｑ３のベースの裏側から、＋電源を見たインピーダンスは、	１０２６Ω
⑦	Ｑ３のベースから＋電源を見たインピーダンスは、 （ｈＦＥが１００だから、）	１０２．６ｋΩ
⑧	Ｑ２のコレクタから＋電源を見たインピーダンスは、 （ＲＬ２と⑦が並列に見えて、）	４．５ｋΩ
⑨	Ｑ２の負荷抵抗ＲＬ２の両端信号電圧は、 （④と⑧から、）	４．５ｍＶＰ－Ｐ
⑩	Ｑ３のエミッタ信号電圧ｉｅ３は、	４．４μＡＰ－Ｐ
⑪	ＲＥ３の両端信号電圧は、	４．４ｍＶＰ－Ｐ
	電圧増幅率Ａｖは、	８５倍

	（②と⑪から、）	
	出力インピーダンスは、 （（ＲＬ２／ｈＦＥ３＋２６）／／１ｋΩで、）	６８Ω

２８. 差動増幅回路の能動負荷

差動増幅回路に能動負荷を応用する場合、下図のように、エミッタ側とコレクタ側に２つのカレントミラーを使用します。これによって同相入力電圧の影響が一層少なくなり、また、大きな増幅率が得られます。

Q_1、Q_2が差動増幅回路、Q_5、Q_6が差動増幅回路のエミッタ電流を一定に保つカレントミラー、Q_3、Q_4が差動増幅回路のコレクタ電流を等しく保つカレントミラーです。



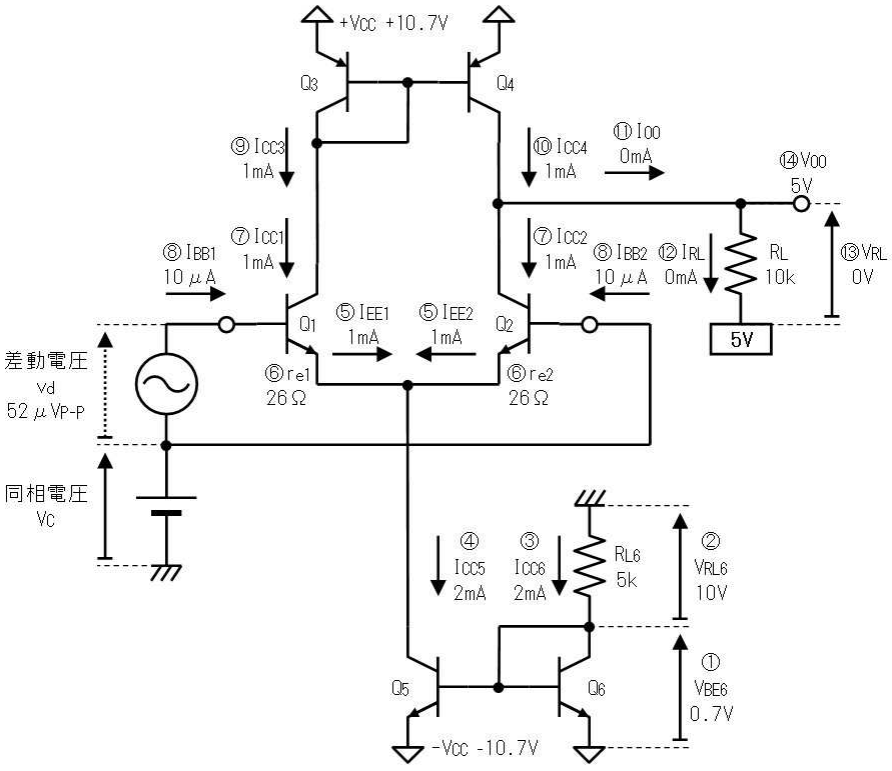
２８.１. 練習

上図を参考に下表に書き込んで能動負荷を利用した差動増幅回路を直流検討してください。

番号	質問	値
①	Q_6の$_{VBE}$は、	V
②	負荷抵抗R_{L6}の両端電圧は、	V
③	Q_6のコレクタバイアス電流I_{CC6}は、	mA
④	Q_5のコレクタバイアス電流I_{CC5}は、 （Q_5、Q_6はカレントミラーだから、）	mA
⑤	Q_1とQ_2のエミッタ電流I_{EE1}とI_{EE2}は、	mA
⑥	Q_1とQ_2のエミッタ等価インピーダンスr_{e1}とr_{e2}	Ω

	は、	
⑦	Q_1とQ_2のコレクタバイアス電流I_{CC1}とI_{CC2}は、	mA
⑧	Q_1とQ_2のベースバイアス電流I_{BB1}とI_{BB2}は、	μA
⑨	Q3のコレクタ電流I_{CC3}は、	mA
⑩	Q_4のコレクタ電流は、 （Q_3、Q_4はカレントミラーだから、）	mA
⑪	出力端子へ向かうバイアス電流I_{OO}は、 （⑦と⑩から、）	mA
⑫	R_Lに流れるバイアス電流I_{RL}は、	mA
⑬	R_Lの両端電圧V_{RL}は、	V
⑭	出力バイアス電圧V_{OO}は、	V

28.2. 答



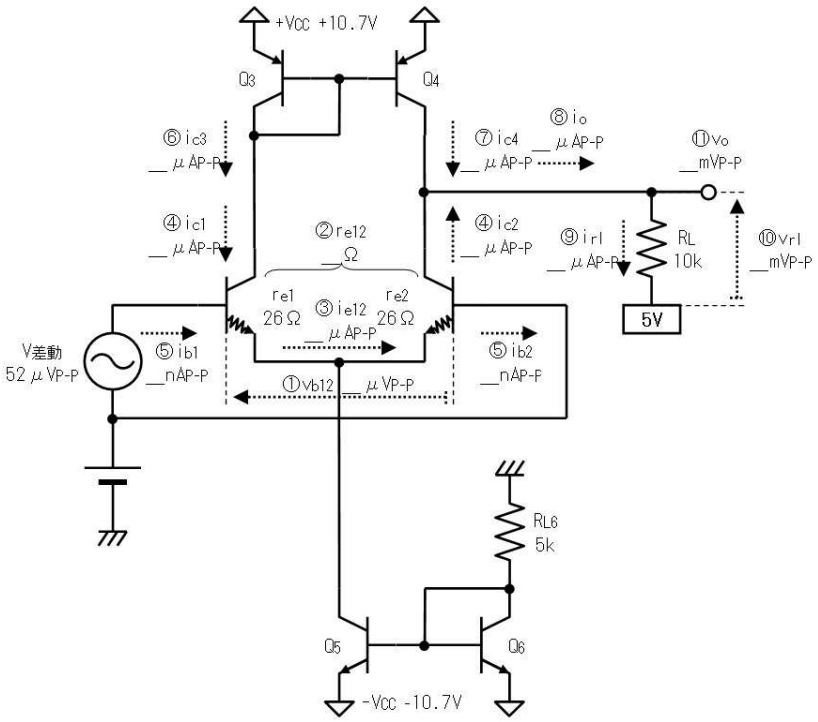
番号	質問	値
①	Q_6のV_{BE}は、	０．７V
②	負荷抵抗R_{L6}の両端電圧は、	１０V
③	Q_6のコレクタバイアス電流I_{CC6}は、	2mA
④	Q_5のコレクタバイアス電流I_{CC5}は、	2mA

	（Q_5、Q_6はカレントミラーだから、）	
⑤	Q_1とQ_2のエミッタ電流I_{EE1}とI_{EE2}は、	１mA
⑥	Q_1とQ_2のエミッタ等価インピーダンスr_{e1}とr_{e2}は、	２６Ω
⑦	Q_1とQ_2のコレクタバイアス電流I_{CC1}とI_{CC2}は、	１mA
⑧	Q_1とQ_2のベースバイアス電流I_{BB1}とI_{BB2}は、	１０μA
⑨	Q３のコレクタ電流I_{CC3}は、	１mA
⑩	Q_4のコレクタ電流は、 （Q_3、Q_4はカレントミラーだから、）	１mA
⑪	出力端子へ向かうバイアス電流I_{OO}は、 （⑦と⑩から、）	０mA
⑫	R_Lに流れるバイアス電流I_{RL}は、	０mA
⑬	R_Lの両端電圧V_{RL}は、	０V
⑭	出力バイアス電圧V_{OO}は、	５V

このように回路の動作は上図に電池で示す同相入力電圧V_Cの影響を受けません。

２８.３. 練習

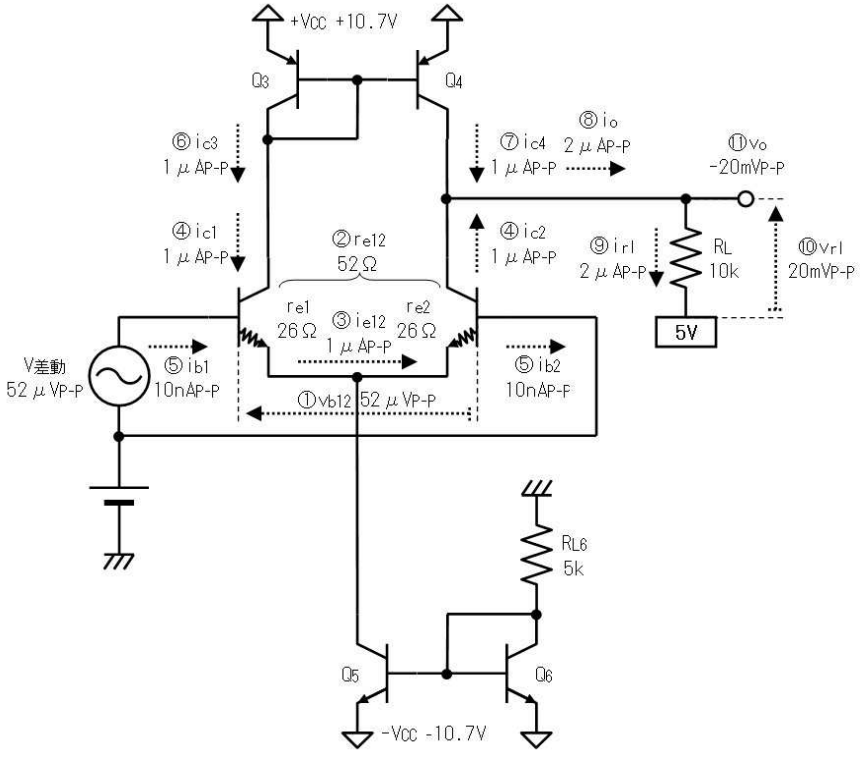
下図を参考に下表に記入しながら、回路を交流検討して増幅率を求めて下さい。



番号	質問	値
①	Q_1とQ_2のベース間に加わる信号電圧v_{b12}は、	μV_{P-P}

②	Q_1とQ_2のエミッタ側インピーダンスの合計は、	Ω
③	Q_1とQ_2のエミッタ信号電流i_{e12}は、	μA_{P-P}
④	Q_1とQ_2のコレクタ信号電流はi_{c1}、i_{c2}は、 （それぞれ向きは違うが、）	μA_{P-P}
⑤	Q_1とQ_2のベース信号電流i_{b1}、i_{b2}は、 （h_{FE}を１００とすれば、）	nA_{P-P}
⑥	Q_3のコレクタ信号電流i_{c3}は、	μA_{P-P}
⑦	Q_4のコレクタ信号電流i_{c4}は、 （Q_3、Q_4はカレントミラーだから、）	μA_{P-P}
⑧	出力端子へ向かう信号電流i_oは、	μA_{P-P}
⑨	負荷抵抗R_Lに流れる信号電流i_{rl}は、	μA_{P-P}
⑩	負荷抵抗R_Lの両端信号電圧v_{rl}は、	mV_{P-P}
⑪	出力信号電圧v_oは、	mV_{P-P}
⑫	差動電圧増幅率は、 （①と⑪から、）	倍

２８.４. 答

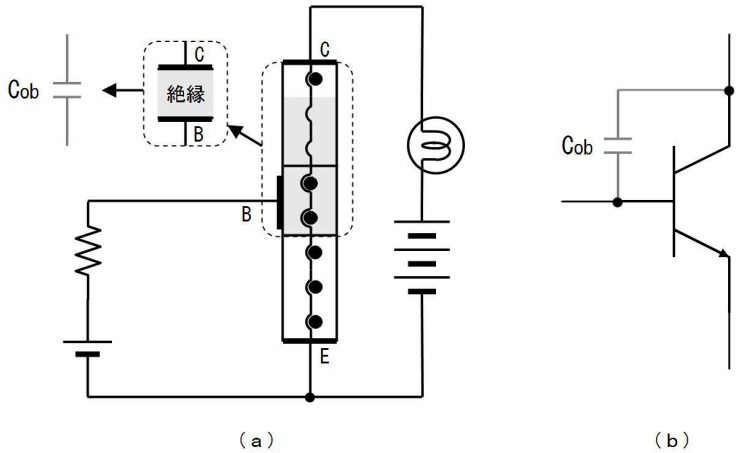


番号	質問	値
①	Q_1とQ_2のベース間に加わる信号電圧v_{b12}は、	５２μV_{P-P}

②	Q_1とQ_2のエミッタ側インピーダンスの合計は、	５２Ω
③	Q_1とQ_2のエミッタ信号電流i_{e12}は、	１μA_{P-P}
④	Q_1とQ_2のコレクタ信号電流はi_{c1}、i_{c2}は、 （それぞれ向きは違うが、）	１μA_{P-P}
⑤	Q_1とQ_2のベース信号電流i_{b1}、i_{b2}は、 （h_{FE}を１００とすれば、）	１０nA_{P-P}
⑥	Q_3のコレクタ信号電流i_{c3}は、	１μA_{P-P}
⑦	Q_4のコレクタ信号電流i_{c4}は、 （Q_3、Q_4はカレントミラーだから、）	１μA_{P-P}
⑧	出力端子へ向かう信号電流i_oは、	２μA_{P-P}
⑨	負荷抵抗R_Lに流れる信号電流i_{rl}は、	２μA_{P-P}
⑩	負荷抵抗R_Lの両端信号電圧v_{rl}は、	２０mV_{P-P}
⑪	出力信号電圧v_oは、	－２０mV_{P-P}
⑫	差動電圧増幅率は、 （①と⑪から、）	３８０倍

２９. コレクタ出力容量

下図は（ａ）は、ＮＰＮトランジスタの動作時の模式図です。エミッタベース間は電流が流れる向きに電圧が加えられています（順バイアス）が、ベースコレクタ間は電流の流れない向きに電圧が加えられています（逆バイアス）。このため、ベースとエミッタの間には下図（ａ）に灰色で示す、絶縁性の空乏層が出来ています。



（ａ）　　（ｂ）

つまり、上図（ａ）に点線で囲って示すように、コレクタとベースが絶縁体で隔てられている訳ですから、コンデンサとしても機能します。つまり、上図（ｂ）に示すように、コレクタとベースの間には、容量が生じ、トランジスタの性能（素早い動作）に大きな影響を与えます。この容量を、コレクタ出力容量（Ｃｏｂ）と呼びます。

３０. 接地方式

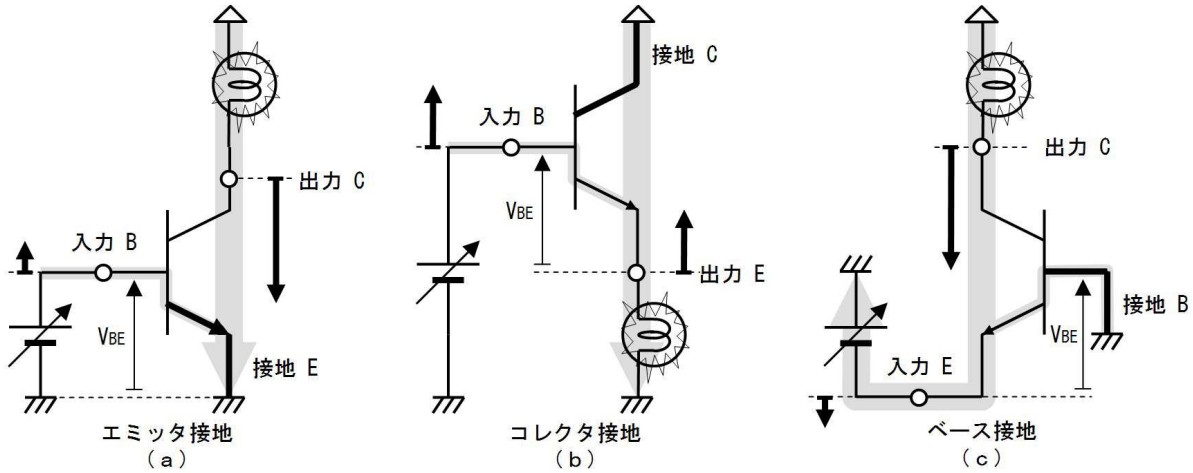
トランジスタには３本の端子があり、何れか１本を入力、その他の１本を出力に使うと、入力でも出力でも無い端子が１つ残ります。この残った一本の端子の名称を使って、トランジスタ回路に名前を付け「接地方式」と呼んでいます。

例えば下図（ａ）のように、ベースを入力に、コレクタを出力に使うと、エミッタが残るので、この使い方（接地方式）は「エミッタ接地」と呼びます。また、下図（ｂ）のように、ベースを入力に、エミッタを出力に使うと、コレクタが残るので、この使い方（接地方式）は「コレクタ接地（別名エミッタフォロア）」と呼びます。

コレクタ「接地」とは呼びますが、コレクタが「アース」に接続されている訳ではありません。あくまでも「信号を加えていない」という気持で「接地」と呼んでいるだけです。ですからコレクタ「共通」と呼ぶ人もいます。

英語では「common-emitter amplifier」で要は「common」を「接地」と訳すか「共通」と訳すかという問題です。

下図に３つの接地方式の略図を示します。



上図（ａ）のエミッタ接地は、僅かに入力電圧を上げると出力電圧が低下し、大きな電圧増幅率が得られ、その上、入力電流はh_{FE}倍に増大して出力に流れます。つまり、電圧も電流も増幅できます。

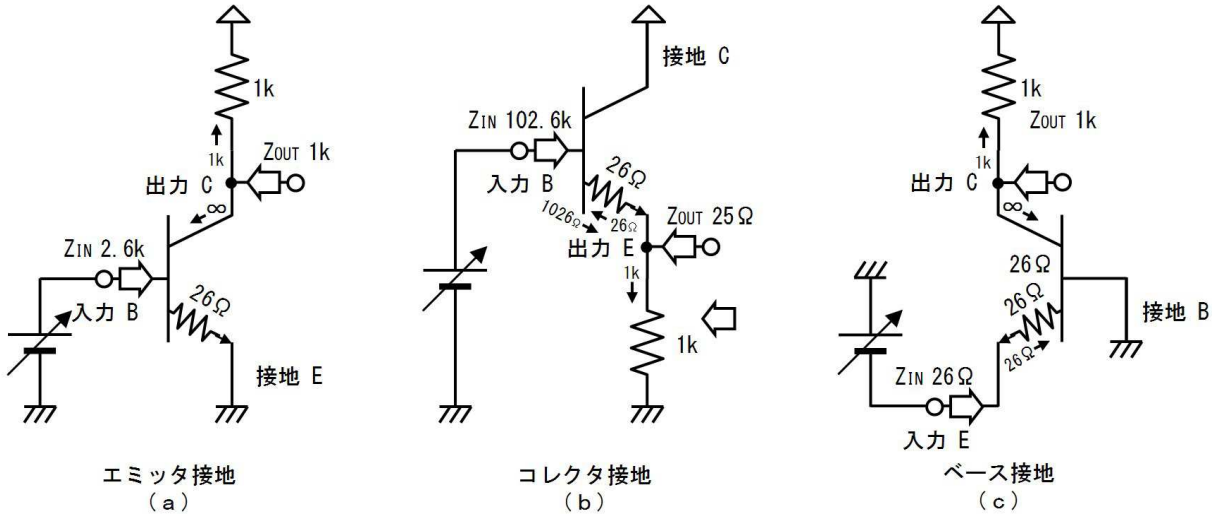
上図（ｂ）のエミッタ接地は、入力電圧を１Ｖ上げると、出力電圧も１Ｖ上がります。つまり電圧は増幅されません。しかし、入力電流はh_{FE}倍に増大して出力に流れます。つまり、電流だけが増幅できます。

上図（ｃ）のベース接地は、僅かに入力電圧を下げると出力電圧が低下し、大きな電圧増幅率が得られます。しかし、入力に流れた電流がそのまま出力に流れ、電流は増幅されません。

これらをまとめると、下表のようになります。

接地方式	エミッタ接地	コレクタ接地	ベース接地
電圧増幅率	大きい	１倍	大きい
電流増幅率	大きい	大きい	１倍
電力増幅率 電圧増幅×電流増幅	大きい	並	並

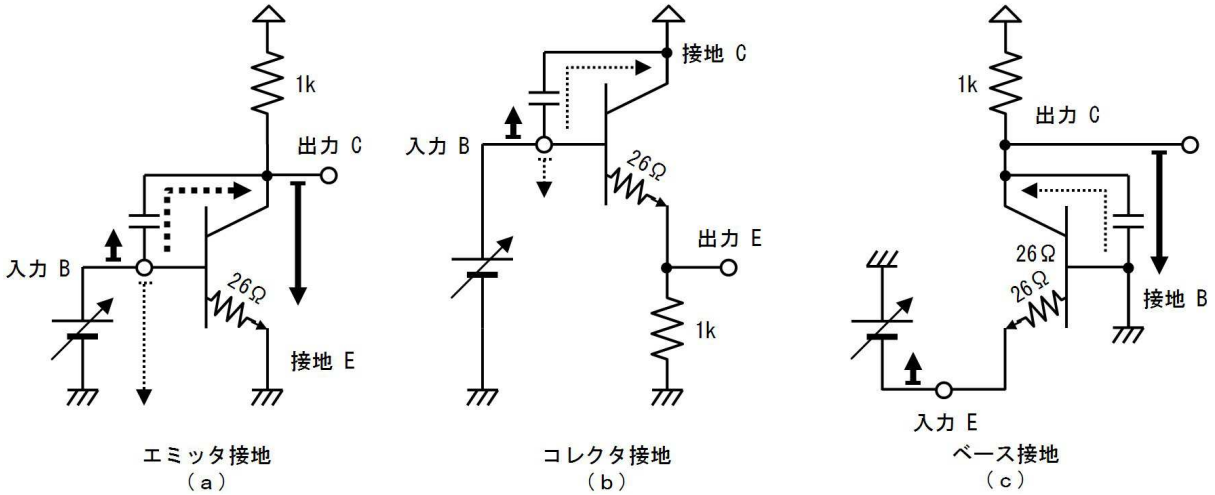
下図に各回路の入出力インピーダンスを示します。



各回路の入出力インピーダンスは、下表のようになります。

接地方式	エミッタ接地	コレクタ接地	ベース接地
入力インピーダンス	並	高い	低い
出力インピーダンス	高い	低い	高い

コレクタ出力容量Ｃｏｂの影響は、下図のように回路方式によって異なります。



上図（ａ）のエミッタ接地では入力電圧を少し上げると、出力が大きく低下し、Ｃｏｂを通じて（上図に点線で示す）大きな電流が流れ、上がろうとする入力電圧を押し下げます。そのため、あたかも大容量のＣｏｂが存在するような大きな影響が生じます。このようにエミッタ接地でＣｏｂが大きく見える作用を「ミラー効果」と呼びます。エミッタ接地はミラー効果が生じるため、高い周波数の増幅が苦手です。

上図（ｂ）のコレクタ接地では入力電圧を上げると、Ｃｏｂに電流が流れます。しかしＣｏｂの一方は電圧の変化しない電源に接続されているので、ミラー効果は生じません。このように、コレクタ接地ではＣｏｂが入力に小さな影響を与えるため、多少高い周波数でも増幅できます。

上図（ｃ）のベース接地では、Ｃｏｂが入力に接続されていません。このためＣｏｂは入力に影響を与えず、ベース接地は高い周波数の増幅が得意です。

これらをまとめると下表のようになります。

接地方式	エミッタ接地	コレクタ接地	ベース接地
使用できる周波数	低い	中程度	高い

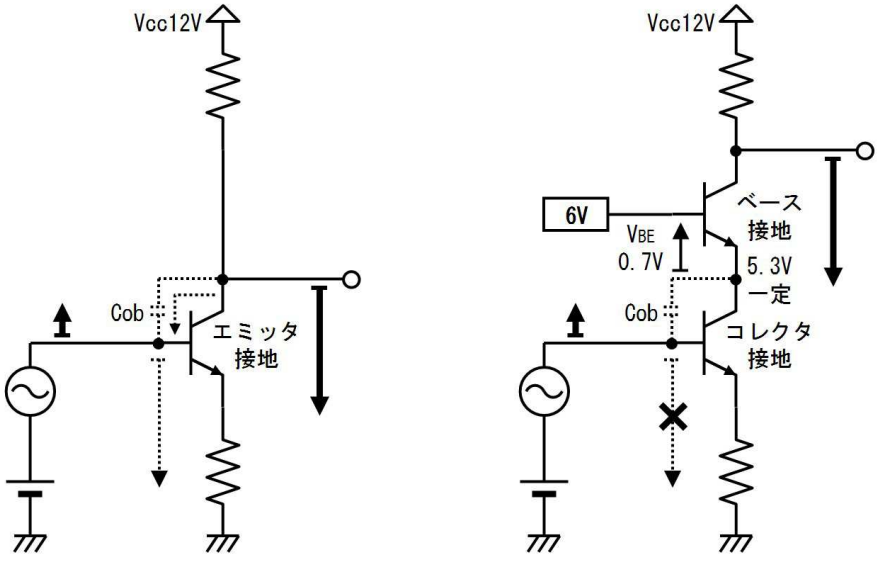
これまでの説明をまとめると、下表のようになります。

接地方式	エミッタ接地	コレクタ接地	ベース接地
電圧増幅率	大きい	１倍	大きい
電流増幅率	大きい	大きい	１倍
電力増幅率	大きい	並	並
入力インピーダンス	並	高い	低い
出力インピーダンス	高い	低い	高い
使用できる周波数	低い	中程度	高い
別名		エミッタフォロア	

３１．カスコード

カスコード増幅器は、より高い周波数を増幅するために利用される回路です。

下図（ａ）はありふれたエミッタ接地の増幅器です。ミラー効果によりＣｏｂが強く影響し、高い周波数を増幅することができません。



（ａ）エミッタ接地　　（ｂ）カスコード増幅器

上図（ｂ）はカスコード増幅器です。エミッタ接地回路のコレクタ側に、もう一つトランジスタが追加されています。

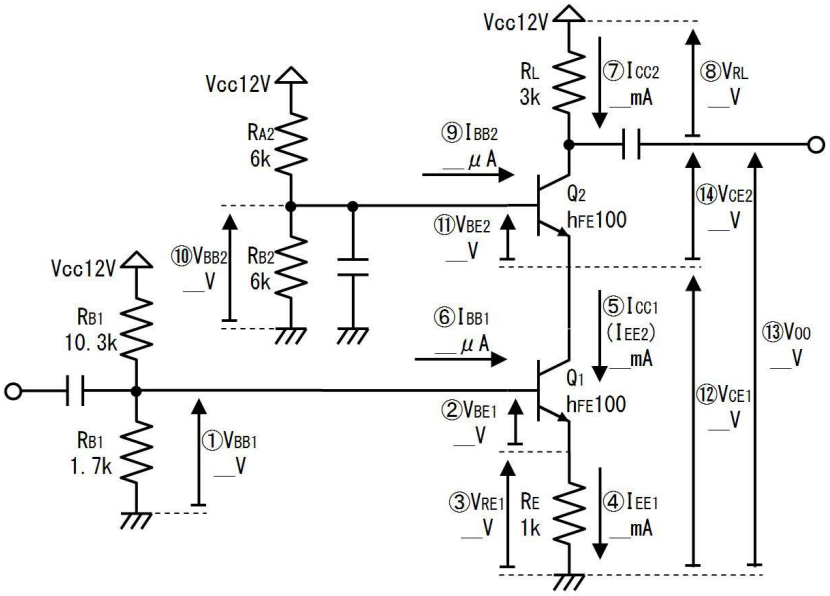
上側のトランジスタのベースは６Ｖに接続されているため、エミッタの電圧は５．３Ｖで一定です。このため、下側のトランジスタのコレクタ電圧が一定となり、コレクタ接地回路として素早く動作します。また、上側のトランジスタはベース接地回路であるため、極めて素早く動作します。

その結果カスコード増幅器は部品が増加しますが、素早く動作し、高い周波数も増幅する事ができま

す。

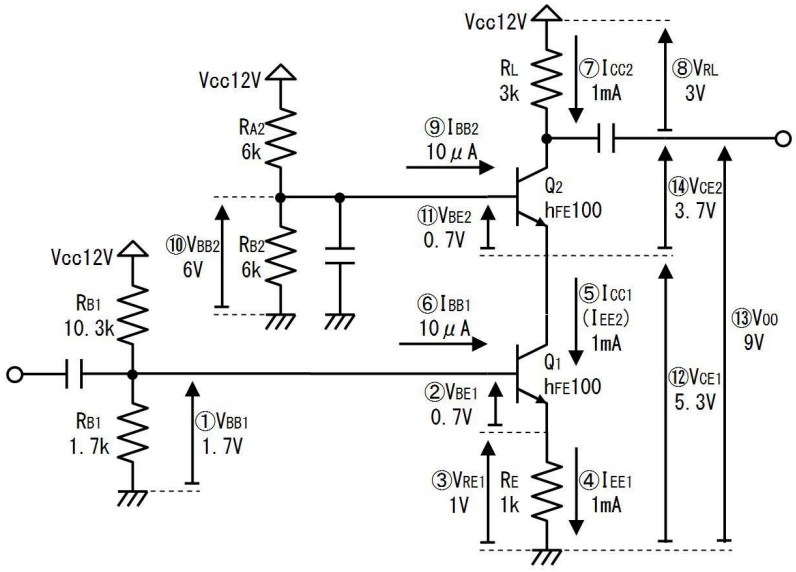
３１.１. 練習

下図のカスコード増幅回路を下表に書き込みながら直流検討してください。



番号	質問	値
①	分圧によって得られるQ_1のベースバイアス電圧V_{BB1}は、	V
②	Q_1のV_{BE}は、	V
③	Q_1のエミッタ抵抗の両端電圧V_{RE1}は、	V
④	Q_1のエミッタバイアス電流I_{EE1}は、	mA
⑤	Q_1のコレクタバイアス電流I_{CC1}（Q_2のエミッタバイアス電流I_{EE2}）は、	mA
⑥	Q_1のベースバイアス電流I_{BB1}は、	μA
⑦	Q_2のコレクタバイアス電流I_{CC2}は、	mA
⑧	負荷抵抗の両端電圧V_{RL}は、	V
⑨	Q_2のベースバイアス電流I_{BB2}は、	μA
⑩	分圧によって得られるQ_2のベースバイアス電圧V_{BB2}は、	V
⑪	Q_2のV_{BE}は、	V
⑫	Q_1のV_{CE}は、	V
⑬	出力バイアス電圧V_{OO}は、	V
⑭	Q_2のV_{CE}は、	V

３１.２. 答



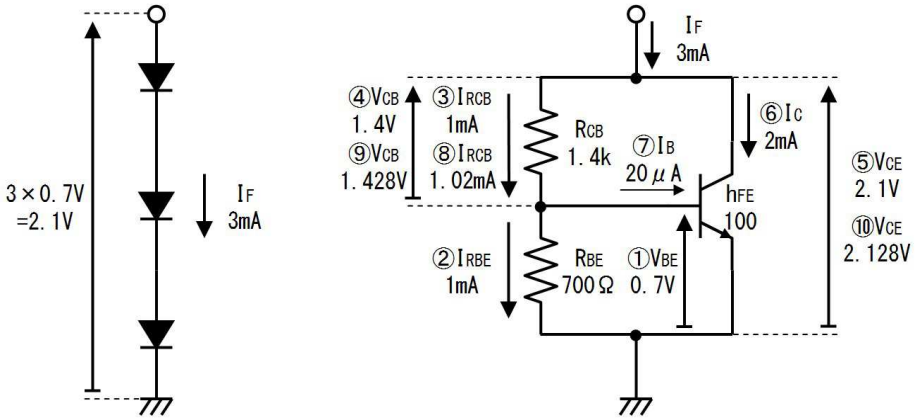
番号	質問	値
①	分圧によって得られるQ_1のベースバイアス電圧V_{BB1}は、	１．７Ｖ
②	Q_1のV_{BE}は、	０．７Ｖ
③	Q_1のエミッタ抵抗の両端電圧V_{RE1}は、	１Ｖ
④	Q_1のエミッタバイアス電流I_{EE1}は、	１ｍＡ
⑤	Q_1のコレクタバイアス電流I_{CC1}（Q_2のエミッタバイアス電流I_{EE2}）は、	１ｍＡ
⑥	Q_1のベースバイアス電流I_{BB1}は、	１０μＡ
⑦	Q_2のコレクタバイアス電流I_{CC2}は、	１ｍＡ
⑧	負荷抵抗の両端電圧V_{RL}は、	３Ｖ
⑨	Q_2のベースバイアス電流I_{BB2}は、	１０μＡ
⑩	分圧によって得られるQ_2のベースバイアス電圧V_{BB2}は、	６Ｖ
⑪	Q_2のV_{BE}は、	０．７Ｖ
⑫	Q_1のV_{CE}は、	５．３Ｖ
⑬	出力バイアス電圧V_{OO}は、	９Ｖ
⑭	Q_2のV_{CE}は、	３．７Ｖ

３２．V_{BE}マルチプライヤ

正確な電圧を得るならツェーナダイオード等の低電圧部品を使用しますが、V_{BE}と同様に温度で変化

する電圧が必要な場合があります。このような場合は、ダイオードを直列にしたり、ここで説明するV_{BE}マルチプライヤを使用します。

下図（ａ）のように、ダイオードを直列にして電流を流すことで、V_{BE}３個分（約２．１Ｖ）の電圧を得ることができます。ただしこの方法では「２．５個分」といった半端な電圧は得ることができません。



上図（ｂ）は、トランジスタを使って（ａ）と似た動作を行なう回路です。抵抗値の設定次第で、V_{BE}２．５個分、等の半端な倍率も使用できます。下表に書き込んで回路の状態を確認して下さい。

３２.１. 確認

番号	質問	値
①	電流の流れているトランジスタのV_{BE}は、	Ｖ
②	下側の抵抗に流れる電流I_{RBE}は、	ｍＡ
③	I_Bを無視すれば、上側の抵抗に流れる電流I_{RCB}は、（キルヒ則より）	ｍＡ
④	上側の抵抗の両端電圧V_{CB}は、	Ｖ
⑤	全体の電圧V_{CE}は、	Ｖ
⑥	コレクタ電流I_Cは、（全体の電流が３ｍＡだから、③とキルヒ則で）	ｍＡ
⑦	ベース電流I_Bは、（h_{FE}が１００だから）	μＡ
⑧	ベース電流を無視しなければ、I_{RCB}は、	ｍＡ
⑨	ベース電流を無視しなければ、V_{CB}は、	Ｖ
⑩	ベース電流を無視しなければ、全体の電圧V_{CE}は、	Ｖ

３２.２. 答

番号	質問	値

①	電流の流れているトランジスタのV_{BE}は、	０．７Ｖ
②	下側の抵抗に流れる電流I_{RBE}は、	１ｍＡ
③	I_Bを無視すれば、上側の抵抗に流れる電流I_{RCB}は、（キルヒ則より）	１ｍＡ
④	上側の抵抗の両端電圧V_{CB}は、	１．４Ｖ
⑤	全体の電圧V_{CE}は、	２．１Ｖ
⑥	コレクタ電流I_Cは、（全体の電流が３ｍＡだから、③とキルヒ則で）	２ｍＡ
⑦	ベース電流I_Bは、（h_{FE}が１００だから）	２０μＡ
⑧	ベース電流を無視しなければ、I_{RCB}は、	１．０２ｍＡ
⑨	ベース電流を無視しなければ、V_{CB}は、	１．４２８Ｖ
⑩	ベース電流を無視しなければ、全体の電圧V_{CE}は、	２．１２８Ｖ

このように、I_Bを無視すれば、下の抵抗と上の抵抗で全体の電圧が決まり、

全体の電圧（V_{CE}）≒ ０．７ ＋ ０．７ × R_{CB} ／ R_{BE}

=0.7+0.7*R1/R2

と計算することができます。

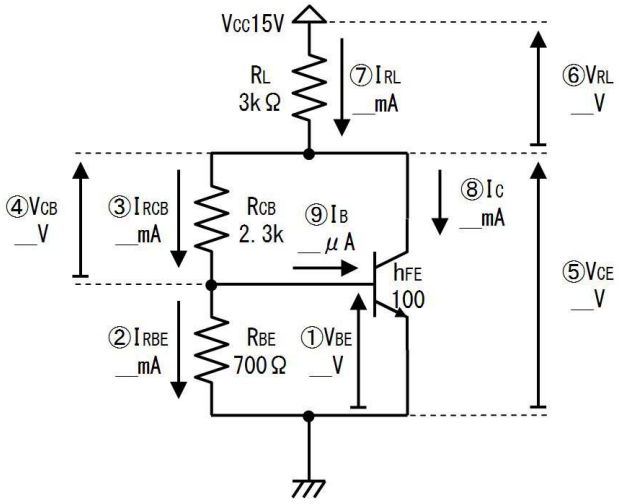
上図（ｂ）の回路は、V_{BE}が０．７Ｖなければ動作しません。このために、I_{RBE}は（７００Ωだから）１ｍＡ必要です。コレクタにも多少の電流を流す事を考えると、回路全体には最低２ｍＡ程度（I_{RBE}の２倍くらい）の電流を流す必要があります。

また上表⑦～⑩のように、I_Bが大きくなると動作がくるいます。ですから、I_BはI_{RBE}の１０分の１以下にします。このため、（h_{FE}を１００とすれば）I_CはI_{RBE}の１０倍以下にする必要があります。

つまり上図の回路は、回路全体にI_{RBE}の２倍～１０倍程度の電流を流して使用します。

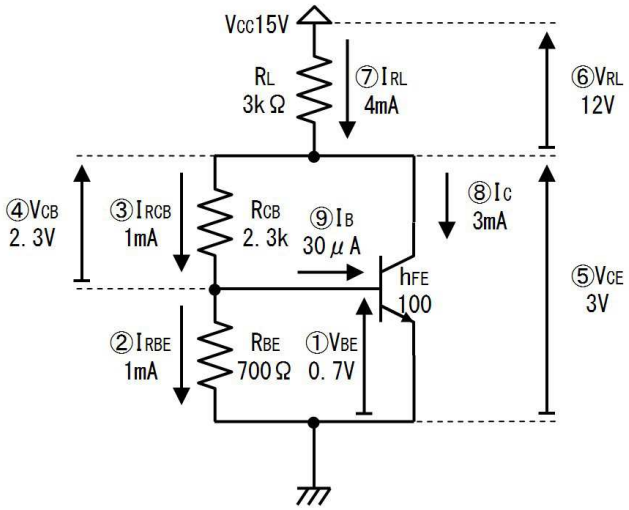
３２.３. 練習

下図の回路の電圧や電流を、下表に書き込みながら検討してください。



番号	質問	値
①	電流が流れているトランジスタのV_{BE}は、	V
②	ベースエミッタ間抵抗に流れる電流I_{RBE}は、	mA
③	ベース電流を無視すれば、コレクタベース間抵抗に流れる電流I_{RCB}は、	mA
④	コレクタベース間電圧V_{CB}は、	V
⑤	コレクタエミッタ間電圧、V_{CE}は、	V
⑥	負荷抵抗の両端電圧V_{RL}は、	V
⑦	負荷抵抗に流れる電流I_{RL}は、	mA
⑧	コレクタ電流I_{C}は、 （③と⑦よりキルヒ則で、）	mA
⑨	ベース電流I_{B}は、 （ｈＦＥが１００だから、）	μA
⑩	回路全体の電流I_{RL}は、I_{RBE}の何倍、	倍
⑪	I_{RBE}の大きさは適切か、 （２～１０倍なら適切と考えて、）	不適切・適切

３２.４. 答



番号	質問	値
①	電流が流れているトランジスタのV_{BE}は、	０．７Ｖ
②	ベースエミッタ間抵抗に流れる電流I_{RBE}は、	１ｍＡ
③	ベース電流を無視すれば、コレクタベース間抵抗に流れる電流I_{RCB}は、	１ｍＡ
④	コレクタベース間電圧V_{CB}は、	２．３Ｖ
⑤	コレクタエミッタ間電圧、V_{CE}は、	３Ｖ
⑥	負荷抵抗の両端電圧V_{RL}は、	１２Ｖ
⑦	負荷抵抗に流れる電流I_{RL}は、	４ｍＡ
⑧	コレクタ電流I_Cは、 （③と⑦よりキルヒ則で、）	３ｍＡ
⑨	ベース電流I_Bは、 （ｈＦＥが１００だから、）	３０μＡ
⑩	回路全体の電流I_{RL}は、I_{RBE}の何倍、	４倍
⑪	I_{RBE}の大きさは適切か、 （２～１０倍なら適切と考えて、）	不適切・適切

３３. 電力増幅回路

小信号回路では、直流電圧（バイアス電圧）に比べて、交流電圧（信号電圧）が十分に小さいと考えて、直流と交流を分けて設計することができました。

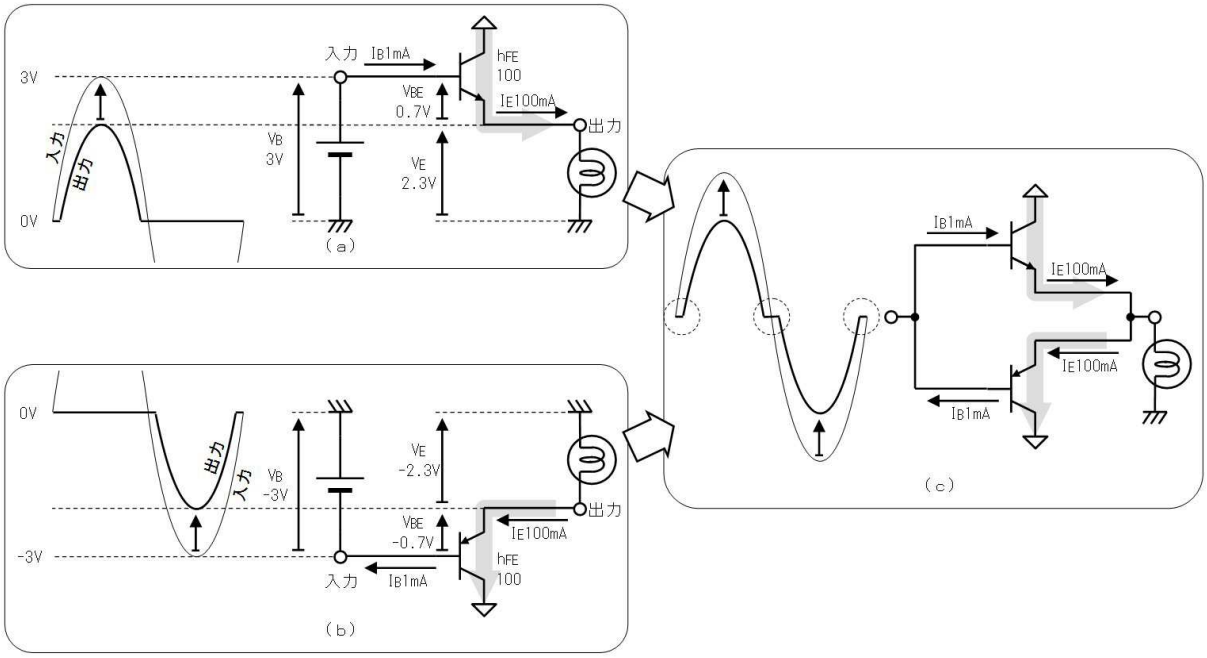
しかし、スピーカーを鳴らす、モーターを回す、等の大きな電力を駆動する回路では、電源電圧に近い大きな振幅の信号電圧を扱います。このような回路を電力増幅回路と呼びます。

電力増幅回路では下表のように、小信号回路とは違う方法で検討し、電力や熱を検討する必要があります。

	小信号回路	電力増幅回路
検討の方法	直流と交流を別々に検討する。	様々な入力（出力）電力で検討する。 たとえば、０Ｖ出力時、最大電圧出力時、中間の電圧出力時等
電力	回路の消費電力は少なく、各部品の消費電力を検討する必要は少ない。	回路の消費電力が大きく、各部品の消費電力を検討する必要がある。
熱	熱の発生は僅かで、放熱を考える必要は少ない。	熱が発生するため、素子の放熱を考える必要がある。

３４．コンプリメンタリ・エミッタフォロア

トランジスタを用いた電力増幅回路では、出力電流の大きなエミッタフォロアが利用されます。下図（ａ）はＮＰＮトランジスタを使ったエミッタフォロアです。＋電源で動作し、入力電流をh_{FE}倍して吐き出すことができます。出力電圧は入力電圧より０．７Ｖ低くなりますが、入力に従って変化します。また、下図（ｂ）はＰＮＰトランジスタを使ったエミッタフォロアです。－電源で動作し、入力電流をh_{FE}倍して吸い込むことができます。出力電圧は入力電圧より０．７Ｖ高くなりますが、入力に従って変化します。負荷に流す電流の向きが一方向で良い場合は、このような回路が利用できます。



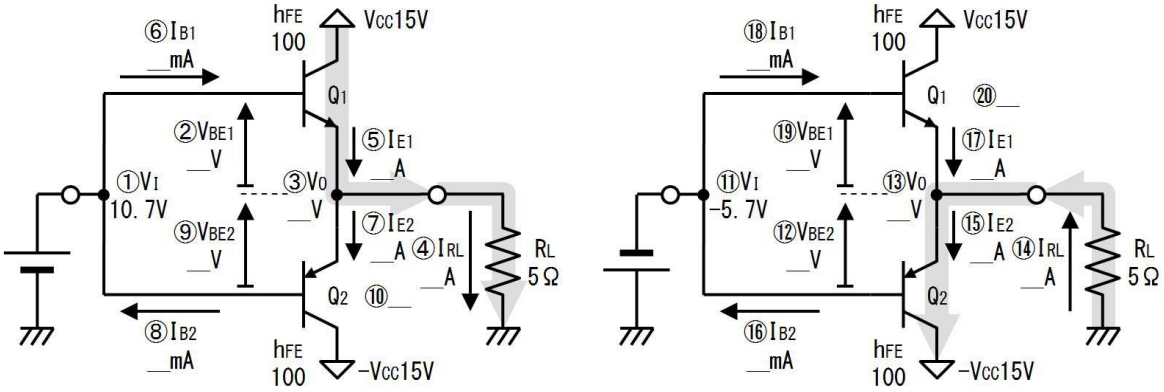
上図（ａ）と（ｂ）の回路を一つにすると、同図（ｃ）に示す、電流を吐き出すことも、吸い込むこともできる、コンプリメンタリ・エミッタフォロアになります。

上図（ｃ）の回路では、上側のトランジスタは入力が０．７Ｖより低いときは出力電流が流れません。また、下側のトランジスタは入力が－０．７Ｖより高いときは出力電流が流れません。このため、入力

が－０．７Ｖ～０．７Ｖの間は回路が動作せず、上図（ｃ）のグラフに点線で囲む部分で波形が歪む欠点があります。この歪は、上のトランジスタから、下のトランジスタに動作が引き継がれるときに発生するので「クロスオーバー歪」と呼ばれます。

３４.１. 練習

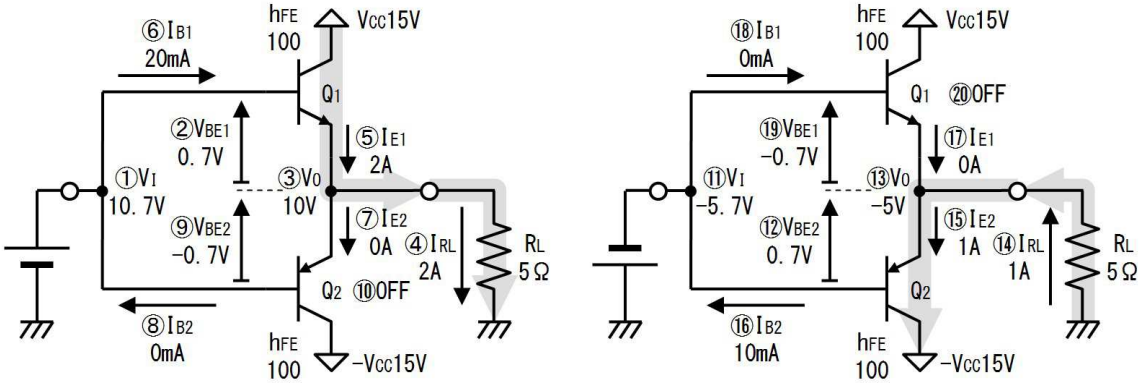
下図のエミッタフォロア回路に、＋１０．７Ｖを入力した場合と、－５．７Ｖを入力した場合の各部の電圧や電流を、下表に書き込みながら検討してください。



番号	質問	値
①	入力に１０．７Ｖを加えた場合を考えます。	－
②	Ｑ１のベースエミッタ間電圧V_{BE1}は、 （入力電圧がプラスの場合、Ｑ１には電流が流れているから、）	Ｖ
③	出力電圧V_Oは、	Ｖ
④	負荷抵抗R_Lに流れる電流I_{RL}は、	Ａ
⑤	Ｑ１のエミッタ電流I_{E1}は、	Ａ
⑥	Ｑ１のベース電流I_{B1}は、	ｍＡ
⑦	Ｑ２のエミッタ電流I_{E2}は、	Ａ
⑧	Ｑ２のベース電流I_{B2}は、	ｍＡ
⑨	Ｑ２のベースエミッタ間電圧V_{BE2}は、	Ｖ
⑩	Ｑ２はＯＮかＯＦＦか、（選んで下さい） （V_{BE}が負の電圧ならベース電流は流れないから、）	ＯＮ・ＯＦＦ
⑪	入力に－５．７Ｖを加えた場合を考えます。	－
⑫	Ｑ２のベースエミッタ間電圧V_{BE2}は、 （入力電圧がマイナスの場合、Ｑ２には電流が流れているから、）	Ｖ
⑬	出力電圧V_Oは、	Ｖ

⑭	負荷抵抗R_Lに流れる電流I_{RL}は、	A
⑮	Ｑ２のエミッタ電流I_{E2}は、	A
⑯	Ｑ２のベース電流I_{B2}は、	mA
⑰	Ｑ１のエミッタ電流I_{E1}は、	A
⑱	Ｑ１のベース電流I_{B1}は、	mA
⑲	Ｑ１のベースエミッタ間電圧V_{BE1}は、	V
⑳	Ｑ１はＯＮかＯＦＦか、（選んで下さい） （V_{BE}が負の電圧ならベース電流は流れないから、）	ＯＮ・ＯＦＦ

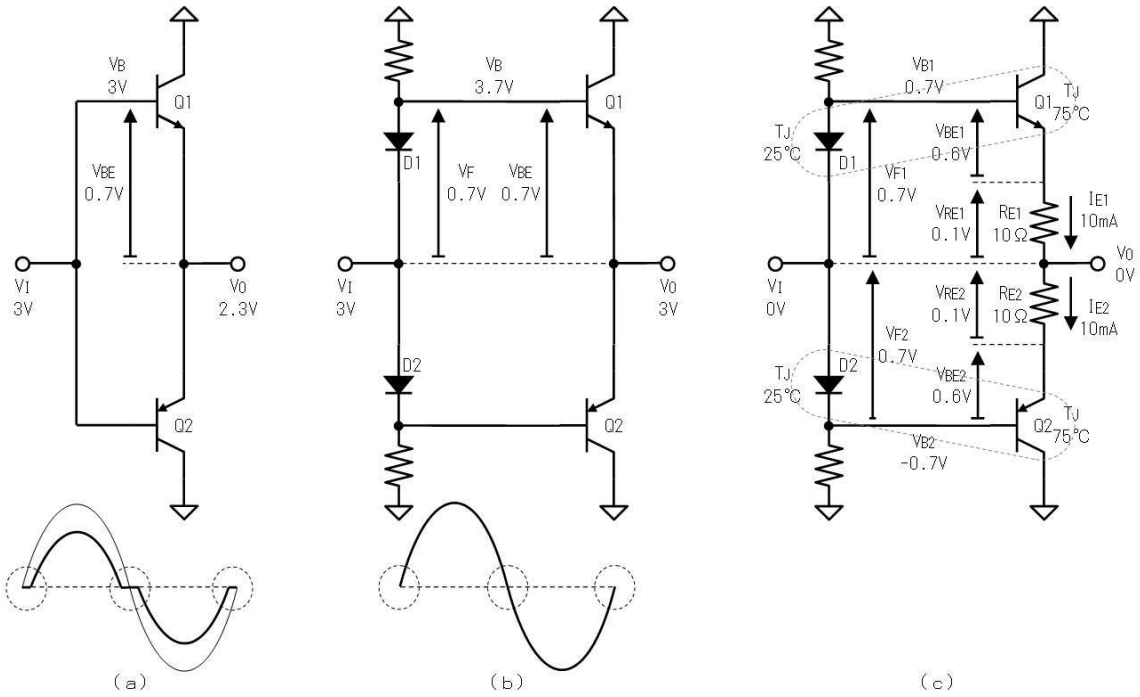
３４.２. 答



番号	質問	値
①	入力に１０．７Ｖを加えた場合を考えます。	－
②	Ｑ１のベースエミッタ間電圧V_{BE1}は、 （入力電圧がプラスの場合、Ｑ１には電流が流れているから、）	０．７Ｖ
③	出力電圧V_Oは、	１０Ｖ
④	負荷抵抗R_Lに流れる電流I_{RL}は、	２Ａ
⑤	Ｑ１のエミッタ電流I_{E1}は、	２Ａ
⑥	Ｑ１のベース電流I_{B1}は、	２０ｍＡ
⑦	Ｑ２のエミッタ電流I_{E2}は、	０Ａ
⑧	Ｑ２のベース電流I_{B2}は、	０ｍＡ
⑨	Ｑ２のベースエミッタ間電圧V_{BE2}は、	－０．７Ｖ
⑩	Ｑ２はＯＮかＯＦＦか、（選んで下さい） （V_{BE}が負の電圧ならベース電流は流れないから、）	ＯＮ・ＯＦＦ
⑪	入力に－５．７Ｖを加えた場合を考えます。	－

⑫	Ｑ２のベースエミッタ間電圧V_{BE2}は、 （入力電圧がマイナスの場合、Ｑ２には電流が流れているから、）	０．７Ｖ
⑬	出力電圧V_Oは、	－５Ｖ
⑭	負荷抵抗R_Lに流れる電流I_{RL}は、	１Ａ
⑮	Ｑ２のエミッタ電流I_{E2}は、	１Ａ
⑯	Ｑ２のベース電流I_{B2}は、	１０ｍＡ
⑰	Ｑ１のエミッタ電流I_{E1}は、	０Ａ
⑱	Ｑ１のベース電流I_{B1}は、	０ｍＡ
⑲	Ｑ１のベースエミッタ間電圧V_{BE1}は、	－０．７Ｖ
⑳	Ｑ１はＯＮかＯＦＦか、（選んで下さい） （V_{BE}が負の電圧ならベース電流は流れないから、）	ＯＮ・ＯＦＦ

これまでに説明した下図（ａ）の回路は、クロスオーバー歪みが生じました。そこで、下図（ｂ）のようにダイオードを追加して、ベース電圧を０．７Ｖ高めることで（ベースにバイアス電圧を加えることで）、クロスオーバー歪を無くすことができます。



ところが、上図（ｂ）の回路は「熱暴走（ヒートラン）」という現象で破損します。まず、その仕組みを説明します。ここでは、入力電圧も出力電圧も０Ｖ場合を考えます。

トランジスタにはダイオードより大きな電流が流れるため、発熱も大きくなります。ところで、V_{BE}やV_Fは１℃で２ｍＶ低下する性質があります。このためたとえば、ダイオードが２５℃のままで、トランジスタが７５℃に発熱したとすると、V_Fは０．７Ｖのまま、V_{BE}は０．６Ｖに低下します。このためベース電流が増加し、エミッタ電流はそのh_{FE}倍で大きく増加します。その結果トランジスタはさらに発熱し、V_{BE}は一層低下します。（加えて、h_{FE}が温度で大きくなるという問題もあります）

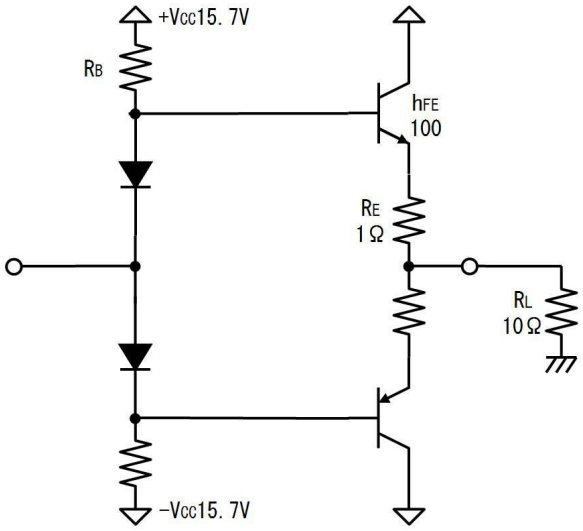
このようにして、発熱→V_{BE}低下→電流増加→更なる発熱、という過程を繰り返して、電流の増加、あるいは過熱でトランジスタが破壊します。この現象を「熱暴走」と呼びます。

次に熱暴走の対策を説明します。主な対策は２つあります。１つ目は、トランジスタが発熱すれば、ダイオードの温度も上がるように（V_{BE}が低下すればV_Fが低下するように）する事です。そのために、トランジスタにダイオードを密着（熱結合）します。しかし、半導体チップ（半導体の本体）は金属やプラスチックの（パッケージ）容器で分厚く保護されていますから、パッケージの表面温度は内部の半導体チップよりかなり低くなります。このため、如何にしっかりと熱結合しても、トランジスタのチップと、ダイオードのチップを同じ温度にすることは出来ません。その結果、電流の多いトランジスタの温度はどうしてもダイオードより高くなり、V_{BE}はV_Fより低くなり、電流はある程度増加します。

そこで、２つ目の対策を行います。２つ目は、既に説明したエミッタ抵抗の挿入です。上図（ｃ）のように、たとえV_FとV_{BE}に０．１Ｖの差が生じても、例えば１０Ωのエミッタ抵抗が挿入されていれば電流は１０ｍＡ増加するだけです。ただし、エミッタ抵抗を大きくすると出力インピーダンスが上がり、大きな電流を出力できなくなりますから、エミッタ抵抗の値は、熱暴走の危険が無い範囲で小さな抵抗値に設定します。

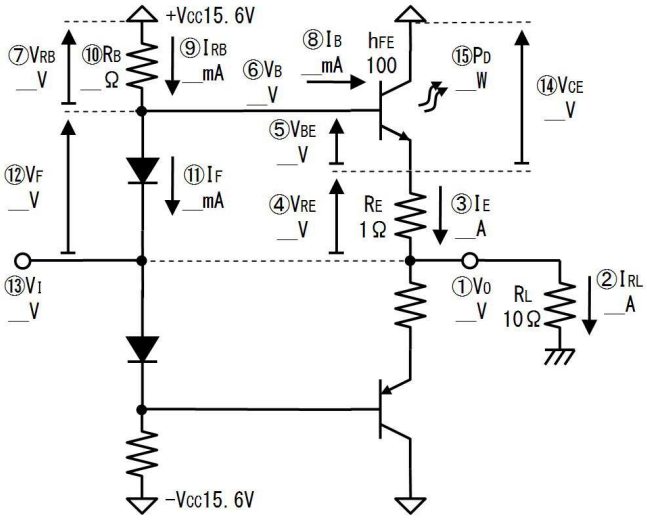
エミッタ抵抗の目安は、ダイオードとトランジスタの熱結合が無いと考えて、消費電力の増加で生じるチップの温度上昇は、ΔＴ＝ΔＰ×Ｔθ、温度上昇で生じる消費電力の増加は、ΔＰ＝V_{CC}×ΔＴ×２ｍＶ／R_E、よって、エミッタ抵抗の最低値は、$R_{E(MIN)}$＝V_{CC}×Ｔθ×２ｍＶ、程度です。たとえば、V_{CC}１０Ｖで、総熱抵抗５℃／Ｗの放熱を行えば、$R_{E(MIN)}$ ＝ １０Ｖ × ５℃／Ｗ × ０．００２ ＝ ０．１Ω、この値は「伸るか反るか」という値ですから、その３倍くらいの値で、０．３Ωくらいに設定します。もちろん、熱結合が十分であれば抵抗値は低くできますが、この目安は、h_{FE}の温度による上昇は配慮していませんから、あまり小さくすることはできません。

下図のコンプリメンタリエミッタフォロア回路について、最高電圧の出力時と、無信号時について検討します。



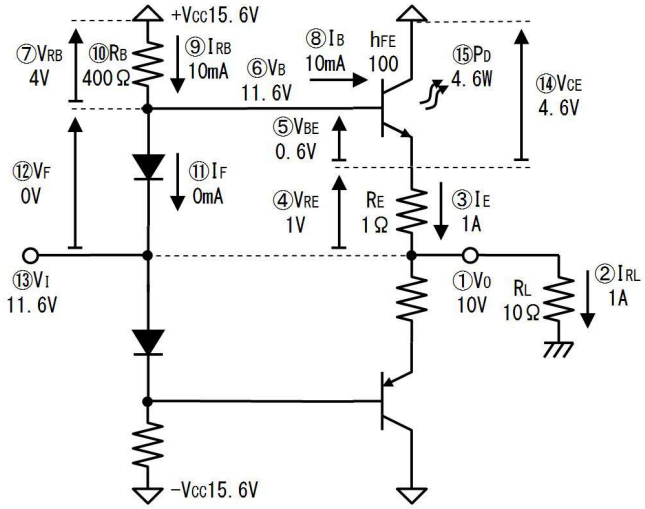
３４.３. 練習

回路の最大出力電圧を１０Ｖとして、１０Ｖを出力している場合の各部の電圧や電流を下表に書き込みながら検討してください。但し、トランジスタの温度が（２５℃から約７５℃に）上昇して、V_{BE}が０．６Ｖに低下していると考えてください。



番号	質問	値
①	出力電圧は最大値の１０Ｖです。	－
②	負荷抵抗に流れる電流I_{RL}は、	A
③	エミッタ抵抗に流れる電流I_{RE}は、	A
④	エミッタ抵抗の両端電圧I_{RE}は、	V
⑤	ベースエミッタ間電圧V_{RE}は、	V
⑥	ベース電圧V_Bは、	V
⑦	ベース抵抗の両端電圧V_{RB}は、	V
⑧	ベース電流I_Bは、 （h_{FE}が１００だから）	mA
⑨	ベース抵抗の電流I_{RB}は、 （ベース電流がすべてベース抵抗に流れているとすれば、）	mA
⑩	ベース抵抗の値は、	Ω
⑪	ダイオードには電流が流れていないと考えます。	－
⑫	電流の流れていないダイオードの両端電圧は、	V
⑬	入力電圧は、	V
⑭	コレクタエミッタ間電圧V_{CE}は、	V
⑮	トランジスタの消費電力P_Dは、	W

３４.４. 答

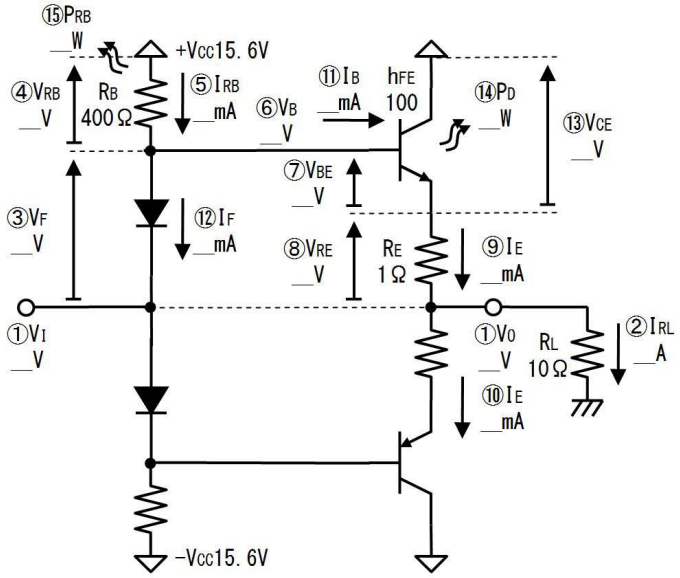


番号	質問	値
①	出力電圧は最大値の１０Ｖです。	－
②	負荷抵抗に流れる電流Ｉ$_{RL}$は、	１Ａ
③	エミッタ抵抗に流れる電流Ｉ$_{RE}$は、	１Ａ
④	エミッタ抵抗の両端電圧Ｉ$_{RE}$は、	１Ｖ
⑤	ベースエミッタ間電圧Ｖ$_{RE}$は、	０．６Ｖ
⑥	ベース電圧Ｖ$_{B}$は、	１１．６Ｖ
⑦	ベース抵抗の両端電圧Ｖ$_{RB}$は、	４Ｖ
⑧	ベース電流Ｉ$_{B}$は、 （ｈ$_{FE}$が１００だから）	１０ｍＡ
⑨	ベース抵抗の電流Ｉ$_{RB}$は、 （ベース電流がすべてベース抵抗に流れているとすれば、）	１０ｍＡ
⑩	ベース抵抗の値は、	４００Ω
⑪	ダイオードには電流が流れていないと考えます。	－
⑫	電流の流れていないダイオードの両端電圧は、	０Ｖ
⑬	入力電圧は、	１１．６Ｖ
⑭	コレクタエミッタ間電圧Ｖ$_{CE}$は、	４．６Ｖ
⑮	トランジスタの消費電力Ｐ$_{D}$は、	４．６Ｗ

３４.５. 練習

回路の無信号時の状態として、０Ｖを出力している場合の各部の電圧や電流を下表に書き込みながら検討してください。但し、トランジスタの温度が（２５℃から約７５℃に）上昇して、Ｖ$_{BE}$が０．６Ｖ

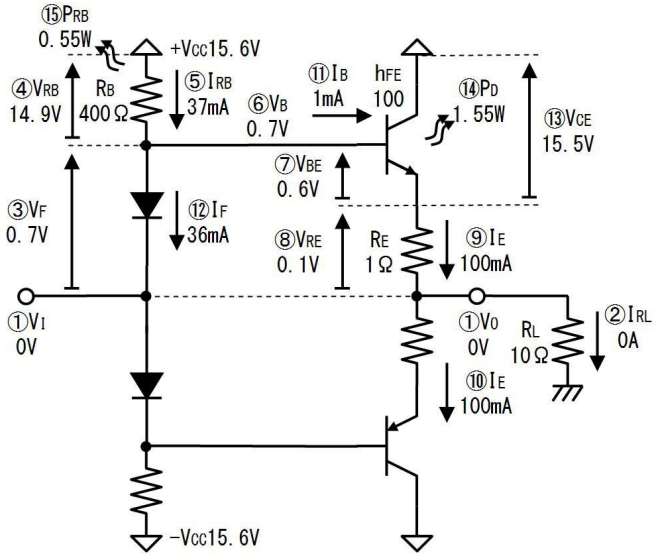
に低下していると考えてください。



番号	質問	値
①	入出力電圧はともに０Ｖと考えます。	－
②	負荷抵抗に流れる電流I_{RL}は、	A
③	ダイオードの順方向電圧V_Fは、	V
④	ベース抵抗の両端電圧V_{RB}は、	V
⑤	ベース抵抗に流れる電流I_{RB}は、 （①と③から、）	mA
⑥	ベース電圧V_Bは、	V
⑦	ベースエミッタ間電圧V_{BE}は、 （温度が上昇しているから、）	V
⑧	エミッタ抵抗の両端電圧V_{RE}は、 （①、③、⑦から、）	V
⑨	エミッタ電流I_Eは、	mA
⑩	下側のトランジスタのエミッタ電流I_Eは、 （②と⑨から、）	mA
⑪	ベース電流I_Bは、 （h_{FE}が１００だから、）	mA
⑫	ダイオードの順電流I_Fは、 （⑤と⑪からキルヒ則で、）	mA
⑬	V_{CE}は、	V

⑭	トランジスタの消費電力P_Dは、	W
⑮	ベース抵抗の消費電力P_{RB}は、 （④と⑤から、）	W

３４.６. 答



番号	質問	値
①	入出力電圧はともに０Ｖと考えます。	－
②	負荷抵抗に流れる電流I_{RL}は、	０Ａ
③	ダイオードの順方向電圧V_Fは、	０．７Ｖ
④	ベース抵抗の両端電圧V_{RB}は、	１４．９Ｖ
⑤	ベース抵抗に流れる電流I_{RB}は、 （①と③から、）	３７ｍＡ
⑥	ベース電圧V_Bは、	０．７Ｖ
⑦	ベースエミッタ間電圧V_{BE}は、 （温度が上昇しているから、）	０．６Ｖ
⑧	エミッタ抵抗の両端電圧V_{RE}は、 （①、③、⑦から、）	０．１Ｖ
⑨	エミッタ電流I_Eは、	１００ｍＡ
⑩	下側のトランジスタのエミッタ電流I_Eは、 （②と⑨から、）	１００ｍＡ
⑪	ベース電流I_Bは、 （h_{FE}が１００だから、）	１ｍＡ

⑫	ダイオードの順電流I_Fは、 （⑤と⑪からキルヒ則で、）	３６ｍＡ
⑬	V_{CE}は、	１５．５Ｖ
⑭	トランジスタの消費電力P_Dは、	１．５５Ｗ
⑮	ベース抵抗の消費電力P_{RB}は、 （④と⑤から、）	０．５５Ｗ

コンプリメンタリエミッタフォロアで、無信号時に流れるエミッタ（コレクタ）電流を「アイドリング電流」と呼びます。無信号時にはV_{CE}が大きいため、小さなアイドリング電流でも、意外と大きな発熱を生じます。

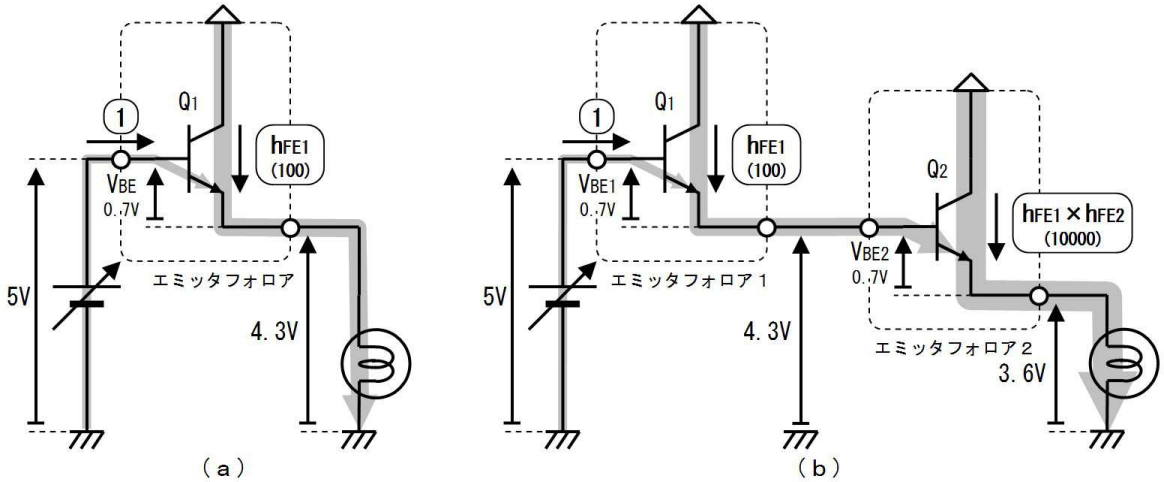
また、無信号時にはベース抵抗の両端電圧が大きくなり、ベース抵抗の消費電力も０．５５Ｗと大きく、電力用の抵抗を使う必要があることが分かります。

このように電力増幅回路では、発熱する部品が増えるため、各部品の消費電力を計算して回路を検討し、電力に耐える部品を選ぶ必要があります。

３５. ダーリントン接続

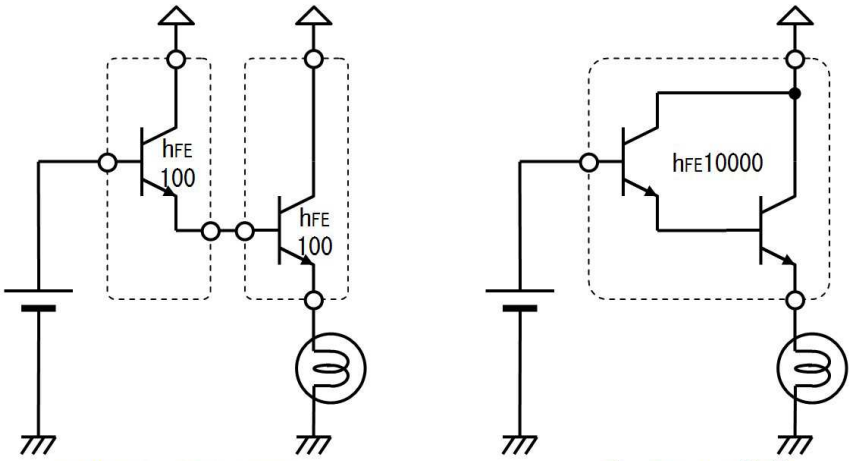
下図（ａ）の回路はエミッタフォロアです。下図の例では、入力電流の１００倍の電流を出力することができます。下図（ｂ）はエミッタフォロアを２段接続した回路です。入力電流がQ_1で１００倍、Q_2でさらに１００倍となるので、２段で入力電流の１００００倍の電流を出力することができます。

このようにエミッタフォロアを２段重ねにすることで、全体で$h_{FE1} \times h_{FE2}$の大きな電流増幅率を得ることができます。



上図（ａ）の回路の出力電圧は、入力より０．７Ｖ低くなり、４．３Ｖですが、同図（ｂ）の回路では、１．４Ｖ低くなり、３．６Ｖです。このようにエミッタフォロアを重ねると、入力に比べて出力電圧が低くなります。

ところで、下図（ａ）の２段エミッタフォロア回の２つのトランジスタを１つと考えて、下図（ｂ）のように書き直すことができます。同図（ｂ）の接続方法を「ダーリントン接続」と呼びます。

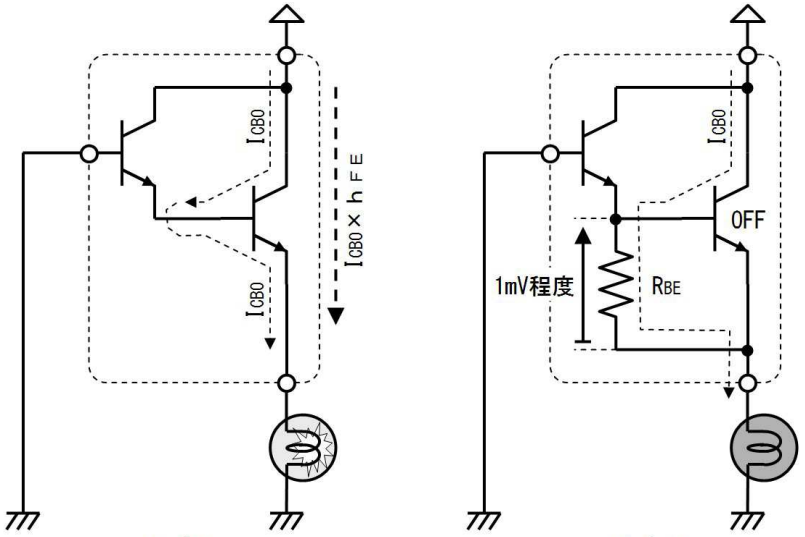


２段エミッタフォロア
（ａ）

ダーリントン接続
（ｂ）

ダーリントン接続したトランジスタは、V_{BE}が１．４Ｖと大きくなりますが、h_{FE}は１００００（$h_{FE1}\times h_{FE2}$）と非常に大きく、大電流を出力するのに便利です。このため、１つのパッケージに内部でダーリントン接続した２つのトランジスタを内臓した「ダーリントントランジスタ」も販売されています。

さて、上図で説明したダーリントン接続をそのまま使う都、トランジスタが完全にＯＦＦしません。なぜなら、下図（ａ）のように、コレクタからベースに流れてきたI_{CBO}の行き先が無く、I_{CBO}がベースからエミッタに流れ、これがh_{FE}倍されてコレクタに流れるからです。



RBE無し
（ａ）

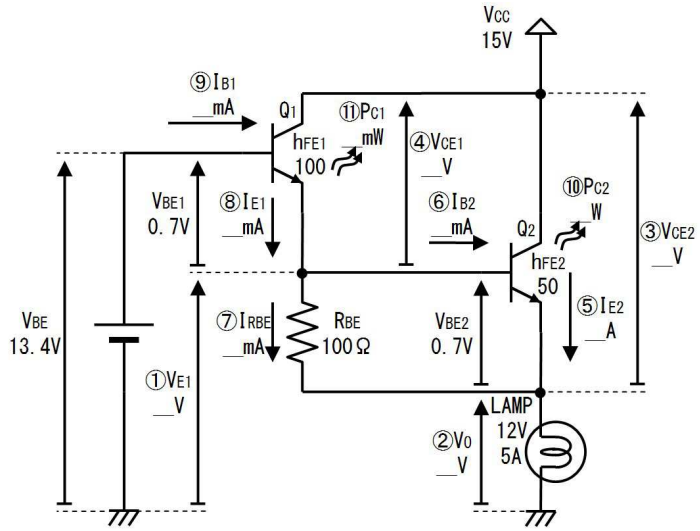
RBEあり
（ｂ）

そこで上図（ｂ）のようにR_{BE}を取り付けてI_{CBO}がベースに流れ込まないようにします。これによって、トランジスタは完全にＯＦＦになります。スイッチング回路の場合と同様、I_{CBO}によってR_{BE}の両端に生じる電圧が１ｍＶ程度になるようにR_{BE}を選びます。

R_{BE}には、トランジスタを完全にＯＦＦさせる役割のほかにも、トランジスタがＯＦＦする瞬間に、ベースに電子を送り込む（電流をベースから引き抜く）働きもあります。（Ｐ型であるベースのホール（穴）を電子で埋めることでＯＦＦさせました）

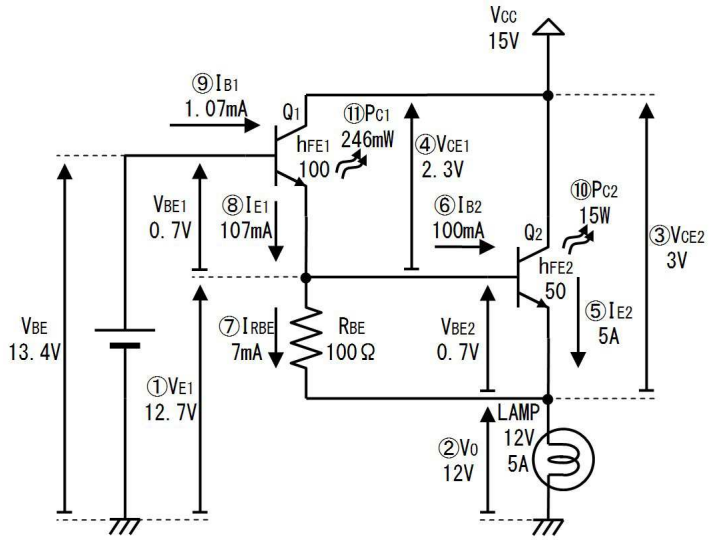
このため、R_{BE}を取り付けると動作も素早くなり、R_{BE}の値が小さいと一層素早く動作します。このため、素早く動作させたい場合は、上のようにI_{CBO}と１ｍＶから計算した値より、さらに小さな抵抗値のR_{BE}が使用されます。

３５.１. 練習



番号	質問	値
①	Q_1のエミッタ電圧V_{E1}は、 （Q_1のV_{BE}が０．７Ｖ、入力電圧が１３．４Ｖだから、）	Ｖ
②	出力電圧V_Oは、 （Q_2のV_{BE}が０．７Ｖだから、）	Ｖ
③	Q_2のV_{CE}は、	Ｖ
④	Q_1のV_{CE}は、	Ｖ
⑤	電球の仕様より、Q_2のエミッタ電流I_{E2}は、 （I_{RBE}は無視して、）	Ａ
⑥	Q_2のベース電流I_{B2}は、 （h_{FE2}が５０だから、）	ｍＡ
⑦	R_{BE}に流れる電流I_{RBE}は、	ｍＡ
⑧	Q_1のエミッタ電流I_{E1}は、 （⑥、⑦とキルヒ則から、）	ｍＡ
⑨	Q_1のベース電流I_{B1}は、 （h_{FE1}が１００だから、）	ｍＡ
⑩	Q_2のコレクタ損失P_{C2}は、	Ｗ
⑪	Q_1のコレクタ損失P_{C1}は、	ｍＡ

３５.２. 答



番号	質問	値
①	Q_1のエミッタ電圧V_{E1}は、 （Q_1のV_{BE}が0．７V、入力電圧が１３．４Vだから、）	１２．７V
②	出力電圧V_Oは、 （Q_2のV_{BE}が0．７Vだから、）	１２V
③	Q_2のV_{CE}は、	３V
④	Q_1のV_{CE}は、	２．３V
⑤	電球の仕様より、Q_2のエミッタ電流I_{E2}は、 （I_{RBE}は無視して、）	５A
⑥	Q_2のベース電流I_{B2}は、 （h_{FE2}が５０だから、）	１００mA
⑦	R_{BE}に流れる電流I_{RBE}は、	７mA
⑧	Q_1のエミッタ電流I_{E1}は、 （⑥、⑦とキルヒ則から、）	１０７mA
⑨	Q_1のベース電流I_{B1}は、 （h_{FE1}が１００だから、）	１．０７mA
⑩	Q_2のコレクタ損失P_{C2}は、	１５W
⑪	Q_1のコレクタ損失P_{C1}は、	２４６mW

このように大電流の流れる電力増幅回路は、大きな発熱（１５W等）があります。しかし、この練習で計算した発熱は最大値ではありません。

Q_2の発熱が最大になるのは、V_{CE}が電源電圧の半分程度になったときです。今回の例では、Q_2のV_{CE}が7．５V程度のとき、P_{C2}（Q_2の発熱）が最大になります。

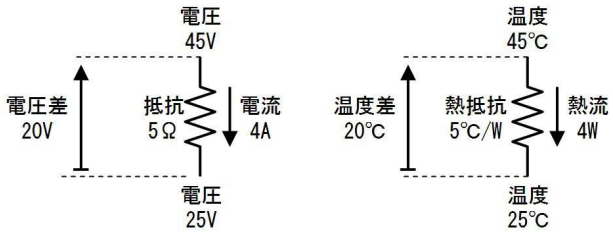
ですからそのような状態（V_{CE}が電源電圧の半分程度）でも計算し、コレクタ損失がトランジスタの許容損失を十分に下回っている事を確認します。また、トランジスタ単体では放熱が無理な場合は、放熱器を取り付けます。

Q_1に使うような小形トランジスタ（ＴＯ９２パッケージ）は１Ｗの損失でチップ温度が１００度上昇しますから、２４６mWでは、２４度上昇し、ケース内温度が５０度ならチップは７４度になります。（使えるでしょう）

Ｑ２に使うような中型トランジスタ（ＴＯ２２０パッケージ）は１Ｗの損失でチップ温度が７０度上昇しますから、１５Ｗでは、チップは１０５０℃となり、放熱器を付けなければ確実に壊れます。（チップが１５０℃になると壊れます）

３６．放熱器（ヒートシンク）

ヒートシンクの放熱能力は熱抵抗で現します。下図に「抵抗」と「熱抵抗」対応を示します。



（ａ）抵抗　　（ｂ）熱抵抗

対応を表にすると次表のとおりです。

電気抵抗	熱抵抗
抵抗の上側が４５Ｖ	半導体チップが４５℃
抵抗の下側が２５Ｖ	外気温が２５℃
両端電圧が２０Ｖ	温度差が２０℃
抵抗値Ｒが５Ω	熱抵抗θが５℃／Ｗ
流れる電流は４Ａ	放熱される熱は４Ｗ

ですから、

温度差 ＝ 放熱電力 × 熱抵抗

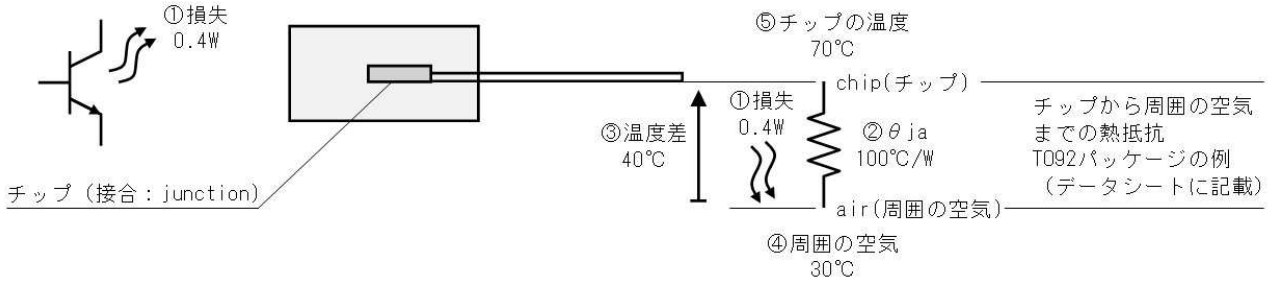
熱抵抗 ＝ 温度差 ÷ 放熱電力

と計算できます。

たとえば、コレクタ損失が１０Ｗで、熱抵抗が２℃／Ｗなら、気温に対してチップ温度が５℃高くなります。気温が３０℃なら、チップは３５℃です。

熱抵抗の単位は［℃／Ｗ］で、記号にはθやR_{TH}が良く使われます。

下図は放熱器の無い小形パッケージの例です。チップ（接合面ｊｕｎｃｔｉｏｎ）から周囲の空気（ａｉｒ）までの熱抵抗はθ_{ja}は１００℃／Ｗです。（このように「ａからｂまでの熱抵抗」をθ_{ab}と書きます。）



３６.１. 確認

上図を参考に下表に書き込んでチップの温度を確認してください。

番号	質問	値
①	チップで発生する熱（電力、損失）はP_D、	W
②	チップから周囲の空気までの熱抵抗θ_{ja}は、	℃／W
③	チップと周囲の空気の温度差は、 （０．４W×１００℃／W＝４０°）	℃
④	周囲の空気の温度T_aは、	℃
⑤	チップの温度Ｔｊは、 （③と④から、）	℃

３６.２. 答

番号	質問	値
①	チップで発生する熱（電力、損失）はP_D、	０．４W
②	チップから周囲の空気までの熱抵抗θ_{ja}は、	１００℃／W
③	チップと周囲の空気の温度差は、 （０．４W×１００℃／W＝４０°）	４０℃
④	周囲の空気の温度T_aは、	３０℃
⑤	チップの温度Ｔｊは、 （③と④から、）	７０℃

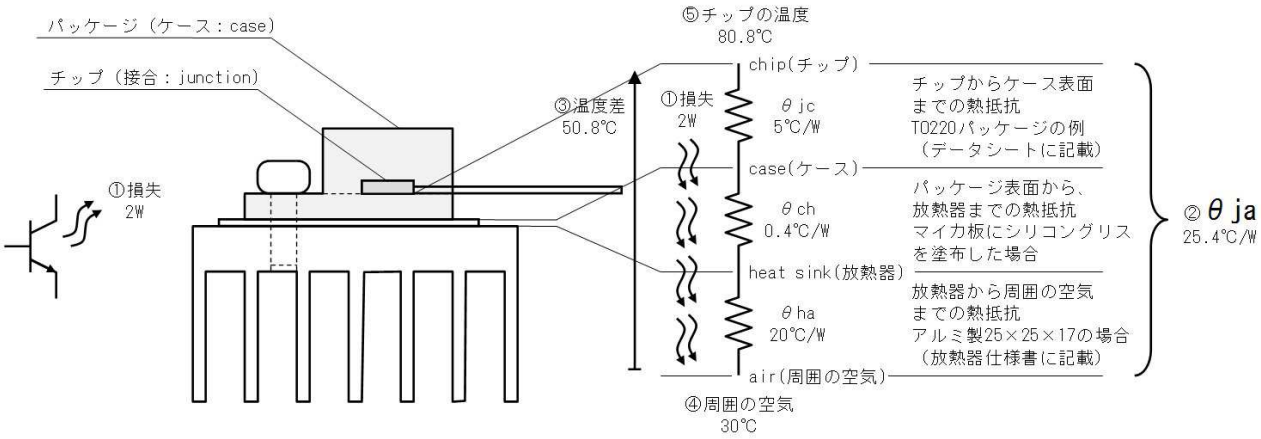
データシートに書かれた熱抵抗には、下表のように、θ_{ja}やθ_{jc}があります。放熱器を使わず、素子から直接放熱する場合はθ_{ja}を使用します。

記号	θｊａ	θｊｃ
意味	チップ（ＰＮ接合面：ｊｕｎｃｔｉｏｎ）から、周囲の空気ａｉｒまでの熱抵抗	チップ（ＰＮ接合面：ｊｕｎｃｔｉｏｎ）から、ケースの表面までの熱抵抗
使い方	素子単体で放熱する場合に利用する	放熱器を利用して放熱する場合に利用する。

逆に、放熱器を使用する場合は、θｊｃを使用します。下図の例では、2Wが発生するトランジスタを２０W／℃の放熱器に取り付けています。

３６.３. 確認

下図を参考に、下表に書き込みながらトランジスタのチップ温度を求めてください。



番号	質問	値
①	トランジスタの損失は2Wです。	―
②	トランジスタのチップから、周囲の空気までの熱抵抗の合計は、	℃／W
③	損失①と熱抵抗②から、温度差は、	℃
④	周囲の空気の温度は、	℃
⑤	チップは、周囲の空気④より、温度差③だけ熱くなるから、	℃

３６.４. 答

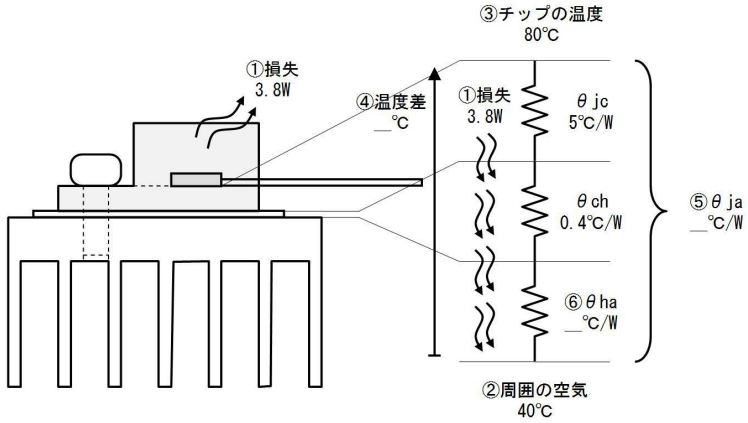
番号	質問	値
①	トランジスタの損失は2Wです。	―
②	トランジスタのチップから、周囲の空気までの熱抵抗の合計は、 （５＋０．４＋２０＝２５．４℃／W）	２５．４℃／W
③	損失①と熱抵抗②から、温度差は、 （２５．４×２＝５０．８℃）	５０．８℃
④	周囲の空気の温度は、	３０℃
⑤	チップは、周囲の空気④より、温度差③だけ熱くなるから、 ３０＋５０．８＝８０．８℃	８０．８℃

チップの温度は（温度による特性の変化が気にならなくても）１００度を超えないようにします。温

度が低いと寿命が伸びます（温度が１０℃下がると、寿命が倍になる）ので、長持ちさせたい場合は、低い温度で使用します。

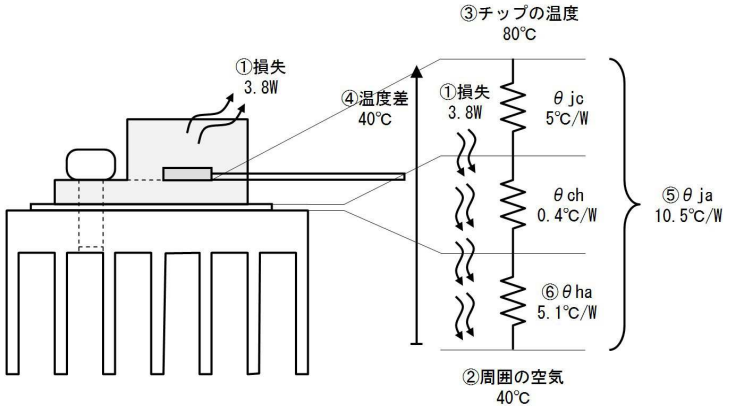
３６.５. 練習

３．８Wの損失を生じるトランジスタのチップ温度Ｔｊを８０℃に押さえるため、どのような放熱器が必要ですか？但し、周囲温度を４０℃、パッケージの熱抵抗を５℃／W、絶縁板の熱抵抗（シリコングリス塗布）を０．４℃／Wとします。



番号	質問	値
①	トランジスタの損失は３．８Wです。	―
②	チップの温度は８０℃に抑えます。	―
③	周囲温度は５０℃です。	―
④	チップと周囲の温度差は、	℃
⑤	損失①と温度差④から、総熱抵抗θｊａは、	℃／W
⑥	放熱器の熱抵抗は、	℃／W

３６.６. 答



番号	質問	値
①	トランジスタの損失は３．８Wです。	―
②	チップの温度は８０℃に抑えます。	―

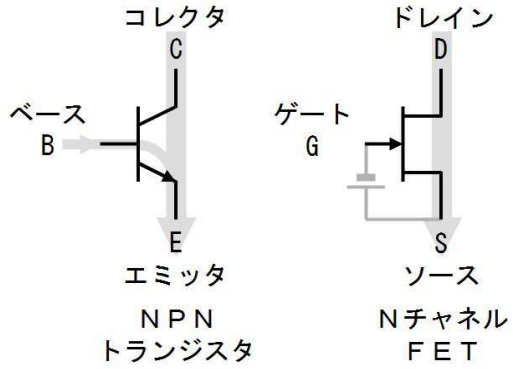
③	周囲温度は５０℃です。	－
④	チップと周囲の温度差は、	４０℃
⑤	損失①と温度差④から、総熱抵抗θｊａは、	１０．５℃／W
⑥	放熱器の熱抵抗は、 総熱抵抗１０．５－ケース５－絶縁板０．４℃＝放熱器５．１℃／W	５．１℃／W

パッケージ（ケース）の熱抵抗θｊｃが大きいと、放熱器をいくら大きくしても間に合わなくなります。このような場合は、より大きなパッケージ（θｊｃが小さい）の素子を使用します。

３７. 接合型ＦＥＴ

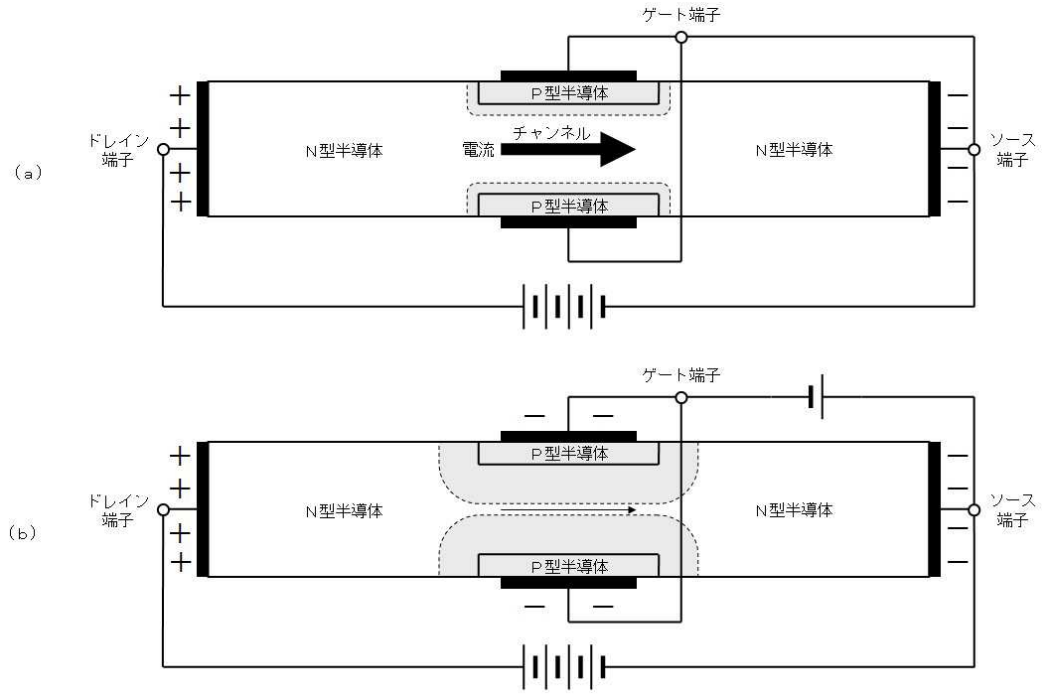
ＣＯＭＳオペアンプの性能が向上し、そのうえ安価になっているので、接合型ＦＥＴ（以下、単に「ＦＥＴ」）を遣った増幅器回路は以前ほど重要ではありません。とはいえ素子の特徴を活かして、ここ一発という場所に使う場合はありますから、仕組みや使い方を説明します。

下図にバイポーラトランジスタとＦＥＴの図記号と端子の名前を示します。トランジスタでは、エミッタ、コレクタ、ベースの各端子が、ＦＥＴでは、ソース、ドレイン、ゲート、に対応します。



トランジスタではベースに電流を流すことで、コレクタからエミッタに電流が流れます。しかし、ＦＥＴではゲートに電圧を加える（取り除く）ことで、ドレインからソースに電流が流れます。ＦＥＴではゲートには電流が流れません。

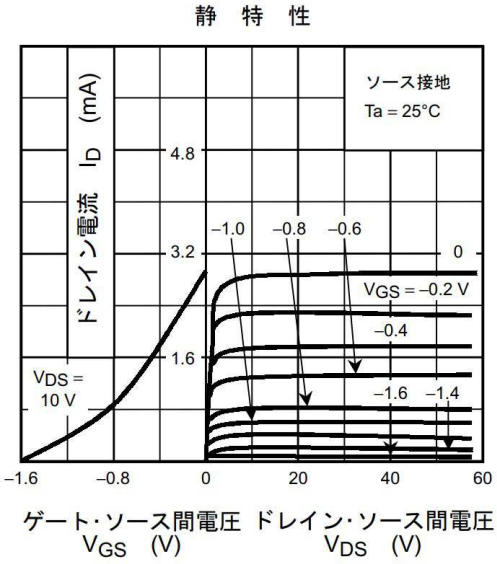
下図（ａ）にゲートに電圧を加えない場合のＦＥＴの模式図を示します。Ｎ型半導体を挟むように、Ｐ型半導体が配置されており、接合面には空乏層ができています。ゲートとソースの間に電圧を加えないときは、空乏層は極薄いため、Ｐ型半導体に挟まれた「チャネル」と呼ばれる部分は幅が広く、ドレインからソースに向かって大きな電流が流れます。



ゲートとソースの間に負の電圧を加えると上図（ｂ）のように空乏層が広がり、チャネルが狭くなります。その結果ドレインからソースに流れる電流は減少します。さらにゲートの負電圧が高くなると、チャネルが無くなり、ドレイン電流が全く流れなくなります。この現象を（空乏層に挟まれて、チャネルが途切れて電流が止まるので）「ピンチ・オフ」（挟んで止まる）と呼びます。

このようにＦＥＴはゲートに電圧を加えないとき最大のドレイン電流（I_{DSS}と呼ばれます）が流れ、ゲートに負電圧を加えることで、ドレイン電流が減少します。

下図左側が、ゲートの電圧（ゲートソース間電圧（V_{GS}））とドレイン電流（I_D）の関係です。V_{GS}が０Ｖのとき、最大のI_D（３ｍＡ程度）が流れ、ゲートに負の電圧を加えると（グラフの左へ行く程）I_Dが減少し、V_{GS}が－１．６Ｖ程度になるとピンチオフしています。



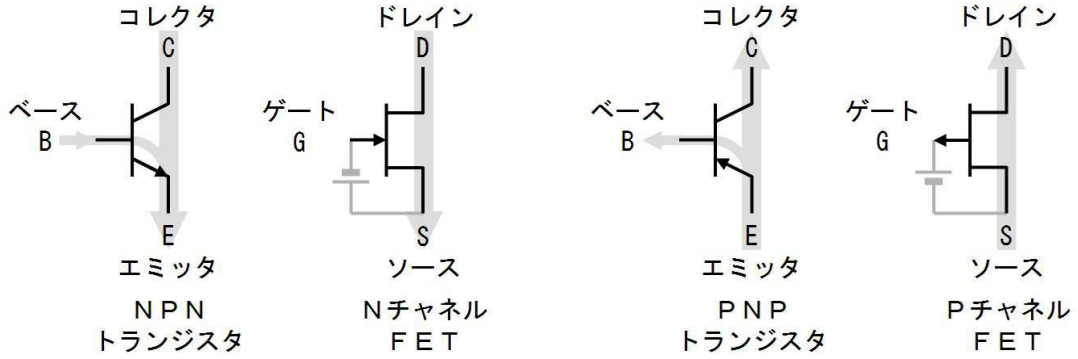
上図右側は、様々なゲート電圧V_{GS}でのドレインソース間電圧V_{DS}とドレイン電流I_Dの関係です。ＦＥＴにはトランジスタと同様に定電流特性があり、ドレイン電圧V_{GS}とは関係なくV_{GS}で決まる電流が流れることが分かります。

トランジスタはベース電流でコレクタ電流が決まり、コレクタ電流は定電流特性があります。ＦＥＴ

は、ゲート電圧でドレイン電流が決まり、ドレイン電流は定電流特性があります。

トランジスタのh_{FE}には個体差があるように、ＦＥＴの最大ドレイン電流I_{DSS}（V_{GS}がＯＶの時のI_D）にも個体差があります。このため、I_{DSS}が変化しても影響の無い回路を利用するか、ＦＥＴを選別して利用します。

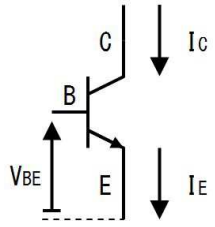
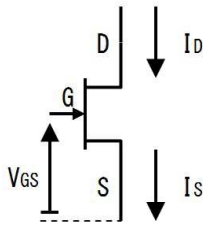
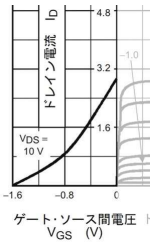
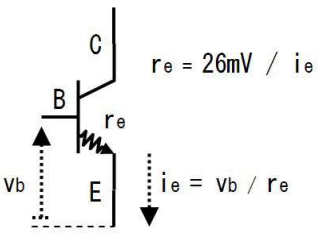
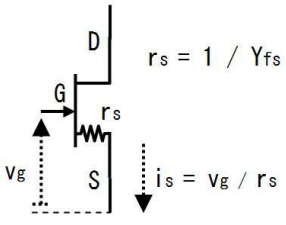
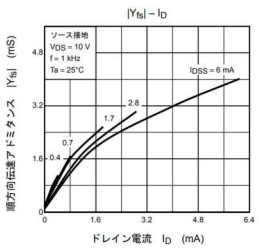
トランジスタにＮＰＮとＰＮＰがあるように、ＦＥＴには、Ｎチャネルとチャネルがあります。



ＰチャネルＦＥＴはドレインにマイナスの電圧を掛けて電流を流し、ゲートにプラスの電圧を加えてその電流を減らします。

３８．ＦＥＴを使用した増幅器

下表にトランジスタの重要な性質と対比して、ＦＥＴの重要な性質を示します。

直流／交流	トランジスタ	ＦＥＴ	
直流検討			
	エミッタベース間電圧V_{BE} V_{BE}＝０．７Ｖ	ゲートソース間電圧V_{GS} V_{GS}はI_Dで変化する	V_{GS}とI_Dは互いに関係しているので、V_{GS}－I_Dグラフで動作させる点を決める。
	コレクタ電流I_C $I_C = I_B \times h_{FE}$	ドレイン電流I_D I_DはV_{GS}で変化する。	
	$I_C \fallingdotseq I_E$	$I_D = I_S$	トランジスタと違いＦＥＴではゲートには全く電流が流れないので、I_Dは完全にI_Sと等しい。
交流検討			

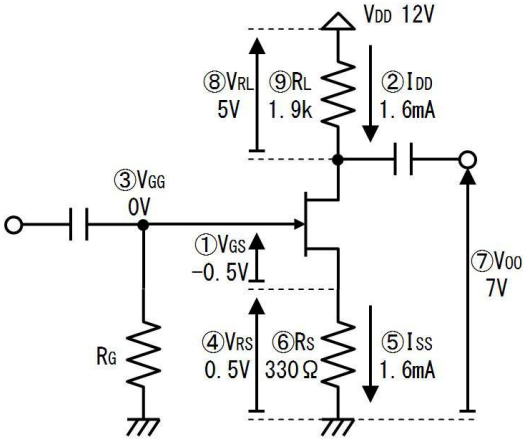
	エミッタ等価インピーダンス r_e $r_e = 26mV / I_{EE}$	ソース等価インピーダンス r_s $r_s = 1 / Y_{fs}$	Y_{fs}はI_Dで変化するので、Y_{fs}－I_Dグラフで求める。（多少の個体差もある）
	エミッタ信号電流 i_e $i_e = v_b / r_e$	ソース信号電流 i_s $i_S = v_g / r_s$	

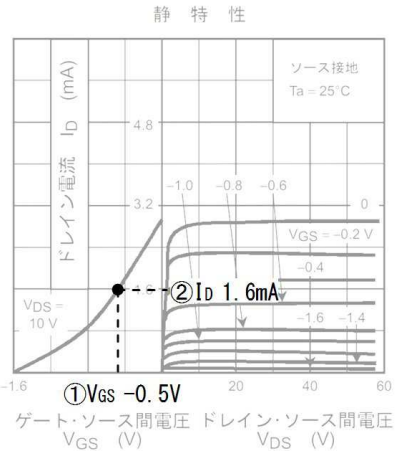
トランジスタではV_{BE}を約０．７Ｖと決めて検討できましたが、ＦＥＴではV_{GS}がI_Dによって変化するため、データシートのグラフで求める必要があります。

また、トランジスタのr_eはi_eから簡単に計算（$26mV / i_e$）できましたが、ＦＥＴのr_sは、データシートのグラフから求める必要があります。

つまり、大雑把な設計でもデータシートのグラフを２つ利用します。このあたりが、（理屈は大体同じなのですが）面倒な所で、ＦＥＴに先立ってトランジスタを説明した理由です。

下図左側はＦＥＴを用いた増幅器で、同図右側はＦＥＴ（２ＳＫ３０）のデータシートに掲載されたV_{GS}－I_D特性図です。例えば、I_Dが１．６ｍＡであれば、V_{GS}は－０．５Ｖと分かります。





３８.１．確認

上図を参考に下表に書き込みながら、回路の直流検討を確認してください。

番号	質問	値
①	上図右のV_{GS}－I_Dグラフで、使用する点を決めます。 ここではV_{GS}を－０．５Ｖで使用すると決めます。	－
②	上図右のグラフより、ドレインバイアス電流I_{DD}は、	ｍＡ
③	ゲートには電流が流れないから、R_Gでアースに接続されたゲートバイアス電圧V_{GG}は、	Ｖ
④	ソース抵抗の両端電圧V_{RS}は、 （③と①から、）	Ｖ
⑤	ソースバイアス電流I_{SS}は、（$I_D = I_S$だから、）	ｍＡ
⑥	ソース抵抗R_Sの値は、 （④と⑤から、）	Ω

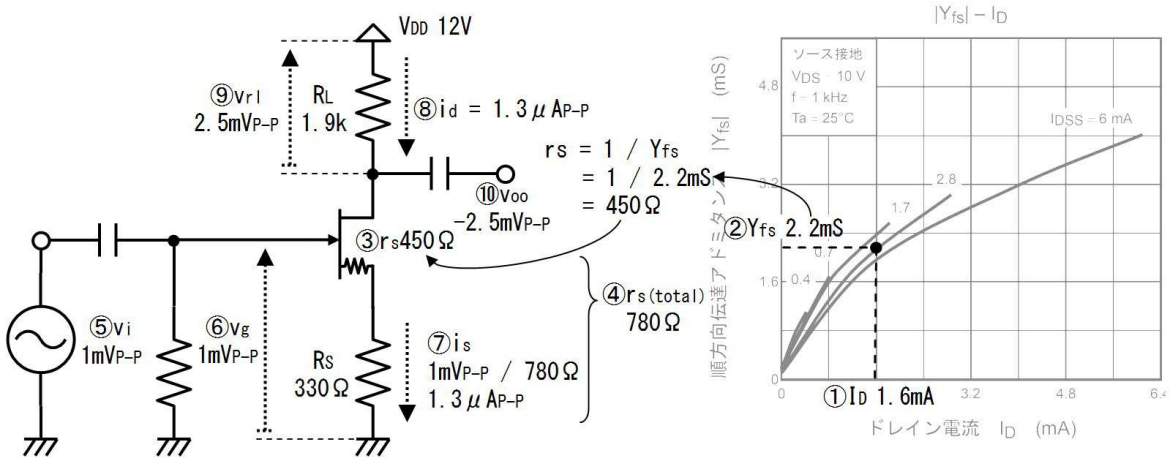
⑦	出力バイアス電圧V_{OO}を７Ｖと決めます。	－
⑧	負荷抵抗の両端電圧V_{RL}は、 （V_{CC}が１２Ｖだから、）	Ｖ
⑨	負荷抵抗R_Lの値は、 （②と⑧より、）	ｋΩ

３８.２. 答

番号	質問	値
①	上図右のV_{GS}－I_Dグラフで、使用する点を決めます。 ここではV_{GS}を－０．５Ｖで使用すると決めます。	－
②	上図右のグラフより、ドレインバイアス電流I_{DD}は、	１．６ｍＡ
③	ゲートには電流が流れないから、R_Gでアースに接続されたゲートバイアス電圧V_{GG}は、	０Ｖ
④	ソース抵抗の両端電圧V_{RS}は、 （③と①から、）	０．５Ｖ
⑤	ソースバイアス電流I_{SS}は、（I_D＝I_Sだから、）	１．６ｍＡ
⑥	ソース抵抗R_Sの値は、 （④と⑤から、）	３３０Ω
⑦	出力バイアス電圧V_{OO}を７Ｖと決めます。	－
⑧	負荷抵抗の両端電圧V_{RL}は、 （V_{CC}が１２Ｖだから、）	５Ｖ
⑨	負荷抵抗R_Lの値は、 （②と⑧より、）	１．９ｋΩ

３８.３. 確認

下図を参考に下表に書き込みながら、回路の交流検討を確認してください。



番号	質問	値
①	直流検討からI_Dは、	mA
②	I_Dは1．6mAであるから、I_D－Y_{fs}グラフから、Y_{fs}の値は、	mS
③	ソース等価インピーダンスr_sの値は、（1／Y_{fs}だから、）	Ω
④	ソース側の合計インピーダンスは、（r_sとR_Sが直列だから、）	Ω
⑤	入力信号電圧v_iは、	mV_{P-P}
⑥	ゲート信号電圧v_gは、	mV_{P-P}
⑦	ソース信号電流i_sは、（④と⑥から、）	μA_{P-P}
⑧	ドレイン信号電流i_dは、（I_D＝I_Sだから、）	μA_{P-P}
⑨	負荷抵抗の両端信号電圧v_{rl}は、	mV_{P-P}
⑩	出力信号電圧v_{oo}は、（極性に注意して、）	mV_{P-P}
⑪	回路の電圧増幅率は、	倍

38.4. 答

番号	質問	値
①	直流検討からI_Dは、	1．6mA
②	I_Dは1．6mAであるから、I_D－Y_{fs}グラフから、Y_{fs}の値は、	2．2mS
③	ソース等価インピーダンスr_sの値は、（1／Y_{fs}だから、）	450Ω
④	ソース側の合計インピーダンスは、（r_sとR_Sが直列だから、）	780Ω
⑤	入力信号電圧v_iは、	$1mV_{P-P}$
⑥	ゲート信号電圧v_gは、	$1mV_{P-P}$
⑦	ソース信号電流i_sは、（④と⑥から、）	$1．3\mu A_{P-P}$

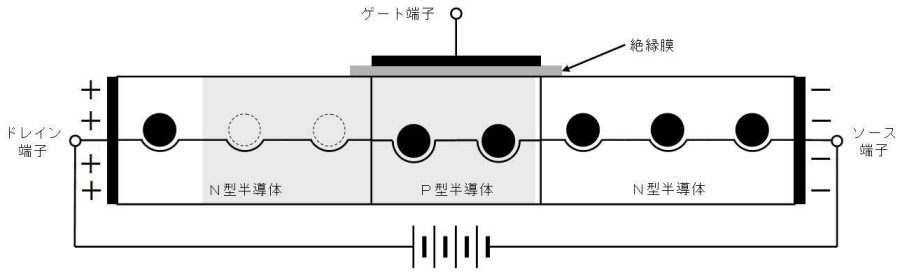
⑧	ドレイン信号電流 i_d は、 （$I_D = I_S$ だから、）	１．３μA_{P-P}
⑨	負荷抵抗の両端信号電圧 v_{rl} は、	２．５mV_{P-P}
⑩	出力信号電圧 v_{oo} は、 （極性に注意して、）	－２．５mV_{P-P}
⑪	回路の電圧増幅率は、	－２．５倍

ゲート抵抗R_Gの値は、ゲート漏れ電流I_{GSS}から決めます。２ＳＫ３０の場合I_{GSS}は１ｎＡですから、R_Gを１０MΩとしてもR_Gの両端電圧は１０ｍＶで回路の動作には影響を与えません。

このように、ＦＥＴを使用した増幅器は極めて高い入力インピーダンスを得ることができますが、トランジスタを使用した増幅器よりも増幅率が小さくなる傾向があります。

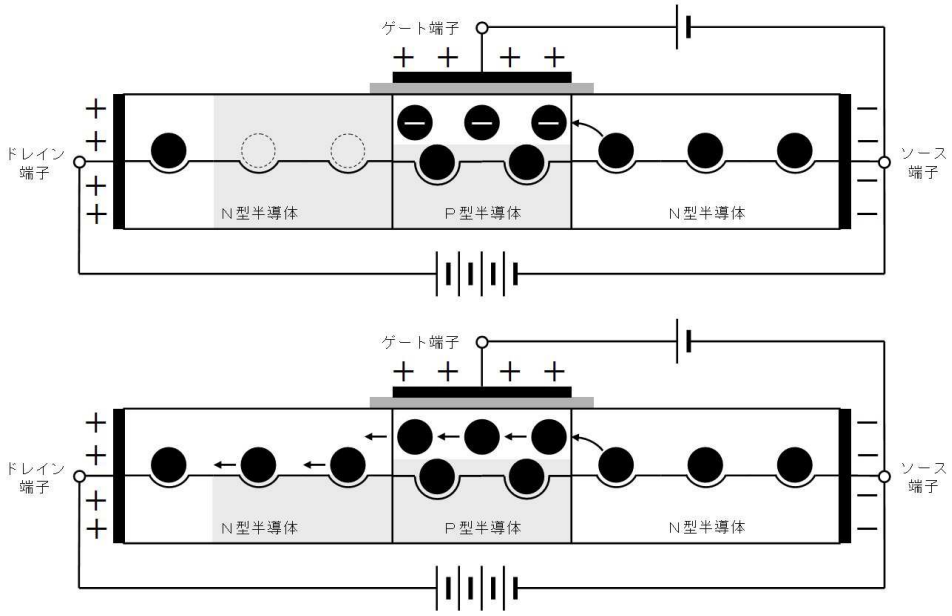
３９. ＭＯＳＦＥＴ

ＦＥＴではＰＮ接合を作って（逆電圧を加えて）ゲートを絶縁していましたが、下図のように、絶縁体の薄い膜を作ってゲートを絶縁したトランジスタがＭＯＳＦＥＴです。



トランジスタと似たＮＰＮの接合に隣り合って、絶縁膜で隔てたゲート電極が設けられています。トランジスタではコレクタに相当するドレインにプラスの、エミッタに相当するソースにマイナスの電圧を加えると、上図右側の接合面は電流が流れますが、左側の接合面は空乏層ができて電流が流れません。

ここで下図上側に示すようにゲートにプラスの電圧を加えると、このプラスの電圧に引かれてゲートの下に電子が集まります。



上図下側の図の示すように、ゲートの下に集まった電子が、左向きに移動することでソースからドレインに向かって電子が移動できるようになります。

別の見方では、ゲートの下は最初はＰ型半導体でしたが、上図のように電子が集まったため、電子が豊富なN型半導体に変化したと考えます。このように最初の極性（Ｐ型）とは逆の極性（N型）になってしまった範囲を「反転層」と呼びます。反転層が生じた結果、上図下側に示すように左右のN型領域が反転層を介して一つに繋がり、電流が流れるという見方です。

ＭＯＳＦＥＴはゲートに電圧を加えるだけで（電流を流し続けなくても）ドレインに電流が流れます。しかし、ゲートの電圧を上げるためには、コンデンサと同様にゲートを充電する必要があります。一般に大電流のＭＯＳＦＥＴはゲートの容量が大きいので、充電のための電流も大きくなります。

４０．ＭＯＳＦＥＴによるスイッチング回路

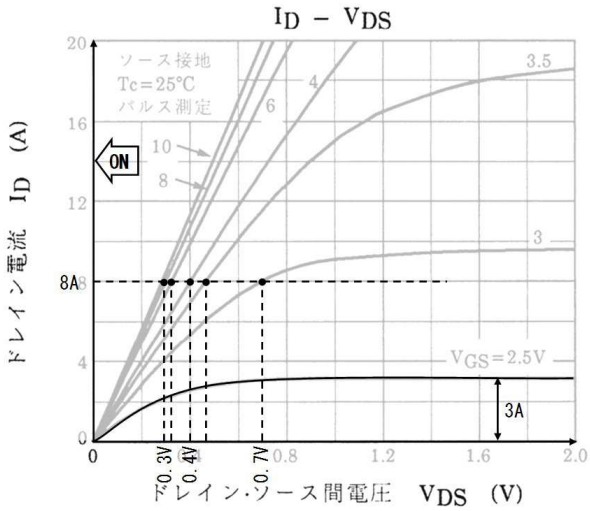
ＭＯＳＦＥＴは一旦ゲートを充電すれば、ゲートに電流を流し続けなくても大きなドレイン電流を流せるため、トランジスタより楽に大電流を流すことができます。

ただし、ゲートに加える電圧が不足するとON損失（導通損失、伝導損失）が発生し、また、ゲートの充放電が遅いとスイッチング損失が発生して、思わぬ激しい発熱が生じるため、トランジスタとは別の注意が必要です。

４１．ON損失

ＭＯＳＦＥＴがONして、V_{DS}が低くなったときの消費電力（発熱）がON損失です。V_{DS}が十分に小さくならないために発生する損失です。

下図は２ＳＫ２２３２のI_D－V_{DS}特性です。ドレイン電流は定電流特性を持っており、その電流はV_{GS}で決まります。例えばグラフの最も下の曲線が示すように、V_{GS}が２．５Ｖなら、I_Dは約３Ａです。このような定電流状態でＭＯＳＦＥＴを使用すると、V_{DS}が大きいため発熱も大きくなります。通常ＭＯＳＦＥＴはこのような定電流状態では使用しません。

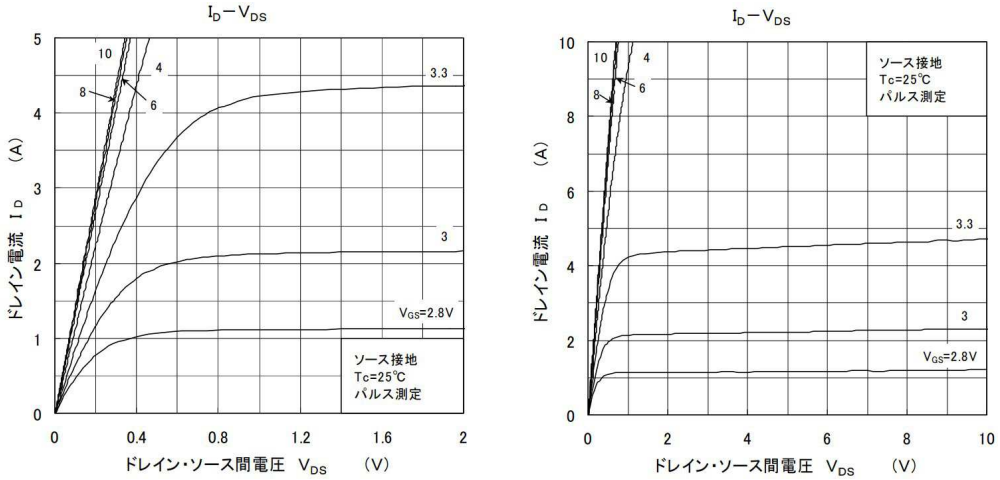


通常、ＭＯＳＦＥＴはＯＮにして（V_{DS}をＯＶに近付けて）I_Dを流して使用します。そこで上図グラフでI_Dが８Ａの場合のV_{DS}に注目すると、V_{GS}が３ＶならＶ$_{DS}$は０．７Ｖ、４Ｖなら０．４Ｖ、８Ｖなら０．３Ｖと、V_{GS}が大きくなるとV_{DS}が小さくなります。

つまり、ＭＯＳＦＥＴを十分にＯＮにする（V_{DS}を十分に小さくする）ためには、V_{GS}をある程度高くする必要があります。逆にV_{GS}が低いとドレインに電流は流れるものの、V_{DS}が大きく発熱が大きくなります。

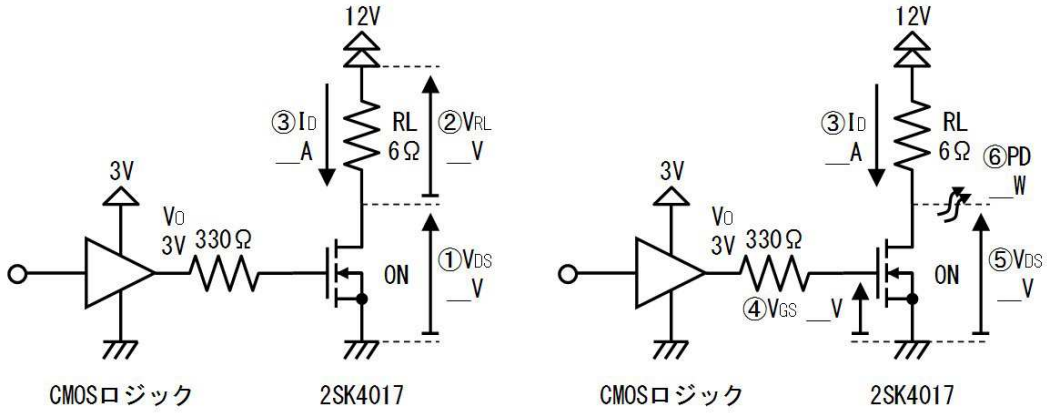
ＭＯＳＦＥＴを十分にＯＮできるV_{GS}は品種によって異なります。低いV_{GS}でも十分にＯＮになるように設計された品種もあり、データシートに「低電圧駆動」「４Ｖ駆動」「低電圧ゲートドライブ可能」等と記載されています。

下図は２ＳＫ４０１７（４Ｖ駆動可能）のI_D－V_{DS}特性で、V_{GS}が４Ｖあれば、数Ａの電流を流してもＶ$_{DS}$がかなり低くなる（ＯＮになる）ことが分かります。



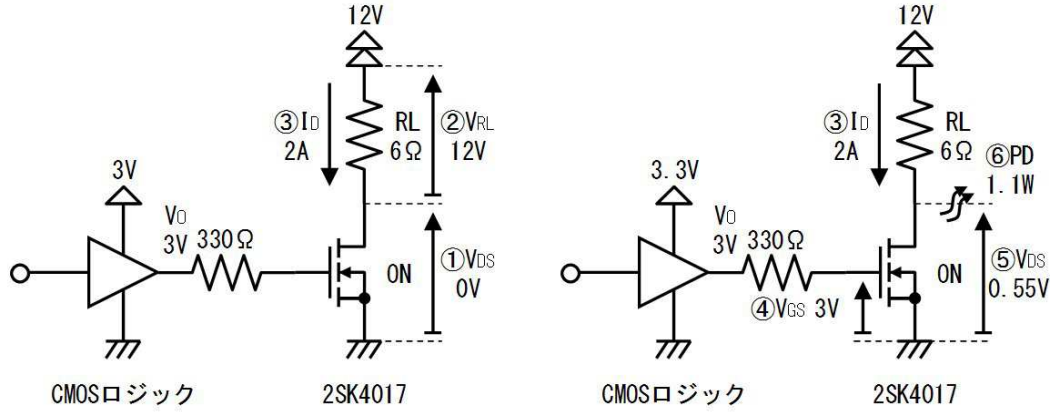
４１.１. 練習

下図は３Ｖで動作するＣＭＯＳロジックで２ＳＫ４０１７のゲートを直接駆動した回路です。上図のグラフを使用して、下図の回路がＯＮしているときのＭＯＳＦＥＴの消費電力P_Dを、下表に書き込みながら検討してください。



番号	質問	値
①	ＭＯＳＦＥＴがＯＮしているとき、V_{DS}は、	Ｖ
②	負荷抵抗の両端電圧V_{RL}は、	Ｖ
③	ドレイン電流I_Dは、	Ａ
④	V_{GS}は、 （ＣＯＭＳロジックの出力が３Ｖだから、）	Ｖ
⑤	上のグラフから、④のV_{GS}で、③のI_Dの場合の、ドレインソース間電圧V_{DS}は、	Ｖ
⑥	ＭＯＳＦＥＴの消費電力P_Dは、（③と⑤から、） （⑤のV_{DS}がV_{RL}やI_Dに与える影響を無視して、）	Ｗ
⑦	パッケージの（放熱器なしの）熱抵抗を１２５℃／Ｗとすると、チップの温度上昇は、 （温度上昇＝消費電力×熱抵抗　だから、）	℃
⑧	気温が４０℃のとき、チップの温度は、 （チップ温度＝気温＋温度上昇　だから、）	℃

４１.２. 答



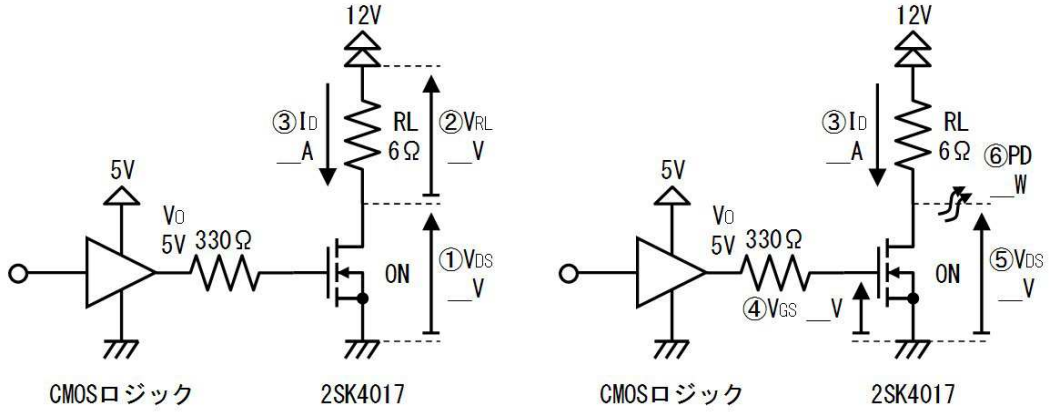
番号	質問	値

①	ＭＯＳＦＥＴがＯＮしているとき、V_{DS}は、	０Ｖ
②	負荷抵抗の両端電圧V_{RL}は、	１２Ｖ
③	ドレイン電流I_Dは、	２Ａ
④	V_{GS}は、 （ＣＯＭＳロジックの出力が３Ｖだから、）	３Ｖ
⑤	上のグラフから、④のV_{GS}で、③のI_Dの場合の、ドレインソース間電圧V_{DS}は、	０．５５Ｖ
⑥	ＭＯＳＦＥＴの消費電力P_Dは、（③と⑤から、） （⑤のV_{DS}がV_{RL}やI_Dに与える影響を無視して、） ０．２５Ｖ×２Ａ＝０．５Ｗ	１．１Ｗ
⑦	パッケージの（放熱器なしの）熱抵抗を１２５℃／Ｗとすると、チップの温度上昇は、 温度上昇＝消費電力×熱抵抗 ＝１．１Ｗ×１２５℃／Ｗ＝１３８℃	１３８℃
⑧	気温が４０℃のとき、チップの温度は、 チップ温度＝気温＋温度上昇 ＝４０℃＋１３８℃＝１７８℃	１７８℃

このように、４Ｖ駆動可能なＭＯＳＦＥＴを３Ｖで駆動すると、V_{DS}が大きくなり、この例では１．１Ｗの電力が消費され、放熱器を付けなければチップは１７８℃となり（１５０℃で壊れますから）素子は熱で破壊します。

４１.３. 練習

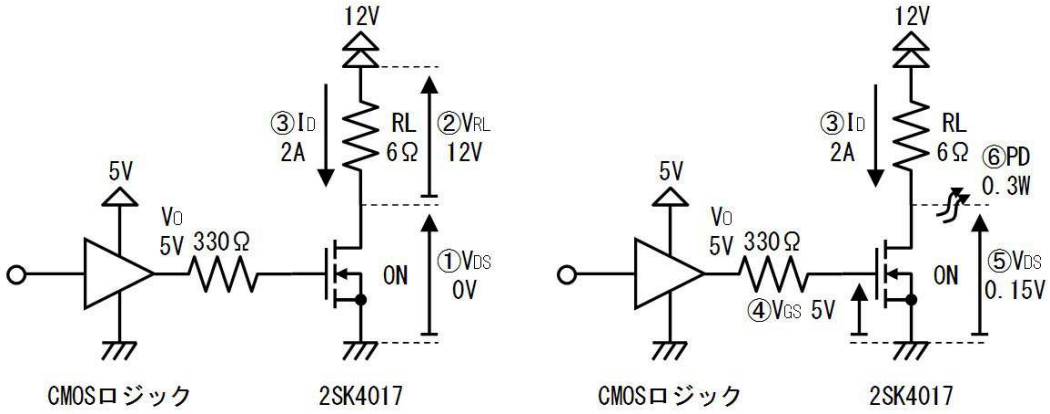
下図は既に練習した回路の駆動電圧を３Ｖから５Ｖに高めた回路です。既出のグラフを使用して、下図の回路がＯＮしているときのＭＯＳＦＥＴの消費電力P_Dを、下表に書き込みながら検討してください。



番号	質問	値
①	ＭＯＳＦＥＴがＯＮしているとき、V_{DS}は、	Ｖ

②	負荷抵抗の両端電圧V_{RL}は、	V
③	ドレイン電流I_Dは、	A
④	V_{GS}は、 （COMSロジックの出力が５Vだから、）	V
⑤	上のグラフから、④のV_{GS}で、③のI_Dの場合の、ドレインソース間電圧V_{DS}は、	V
⑥	MOSFETの消費電力P_Dは、（③と⑤から、） （⑤のV_{DS}がV_{RL}やI_Dに与える影響を無視して、）	W
⑦	パッケージの（放熱器なしの）熱抵抗を１２５℃／Wとすると、チップの温度上昇は、 温度上昇＝消費電力×熱抵抗	℃
⑧	気温が４０℃のとき、チップの温度は、 チップ温度＝気温＋温度上昇	℃

４１.４. 答



番号	質問	値
①	MOSFETがONしているとき、V_{DS}は、	０V
②	負荷抵抗の両端電圧V_{RL}は、	１２V
③	ドレイン電流I_Dは、	２A
④	V_{GS}は、 （COMSロジックの出力が５Vだから、）	５V
⑤	上のグラフから、④のV_{GS}で、③のI_Dの場合の、ドレインソース間電圧V_{DS}は、	０．１５V
⑥	MOSFETの消費電力P_Dは、（③と⑤から、） （⑤のV_{DS}がV_{RL}やI_Dに与える影響を無視して、） ０．２５V×２A＝０．５W	０．３W

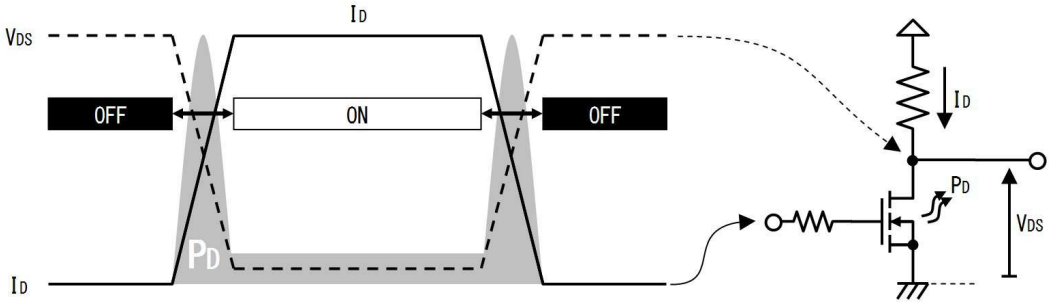
⑦	パッケージの（放熱器なしの）熱抵抗を１２５℃／Wとすると、チップの温度上昇は、 温度上昇＝消費電力×熱抵抗 ＝０．３W×１２５℃／W＝７５℃	７５℃
⑧	気温が４０℃のとき、チップの温度は、 チップ温度＝気温＋温度上昇 ＝４０℃＋７５℃＝１１５℃	１１５℃

５Ｖで駆動することでＶＤＳが０．１５Ｖに低くなり、発熱は３００mWに、チップ温度は１１５℃に下がります。チップ温度が高く寿命の短縮もありますが、即座に壊れることは無くなります。小さな放熱器を付ければチップ温度が下がり、実用出来ます。

高い電圧で使用できるＭＯＳＦＥＴ（V_{DS}の最大値の大きな品種の）は、ＯＮ時のV_{DS}が大きくなる傾向があります。従って、無闇にV_{DS}の最大値の大きな品種を使わない方が、ＯＮ損失を減らすことができます。

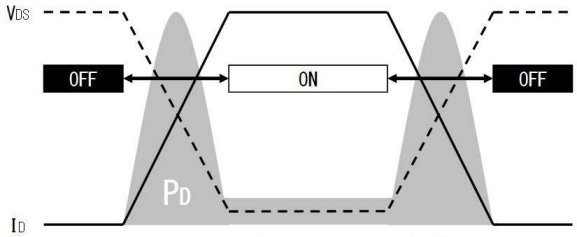
４２. スイッチング損失

ＭＯＳＦＥＴはＯＮ時だけではなく、下図に左右方向の矢印で示す、ＯＦＦからＯＮに変化する瞬間と、ＯＮからＯＦＦに変化する瞬間にも発熱します。この発熱をスイッチング損失と呼びます。

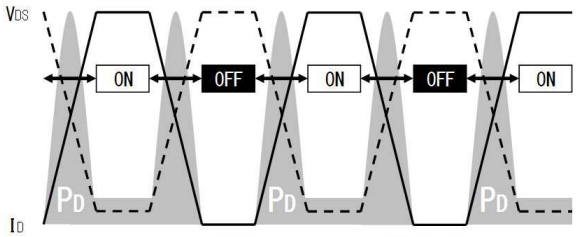


ＭＯＳＦＥＴの損失P_Dを、上図に灰色で示します。V_{DS}が電源電圧の半分になったとき、最大の電力が消費されるため、上図中の２つの山がスイッチング損失を示します。山と山の間の平らな灰色の部分は、すでに練習したＯＮ損失（導通損失）による発熱です。

下図（ａ）のように、スイッチングがゆっくりであると、山の横幅が広がってスイッチング損失が増加します。また、下図（ｂ）のように、スイッチングの頻度が高くても、スイッチング損失が増加します。



（ａ）ゆっくりとＯＮ／ＯＦＦする場合



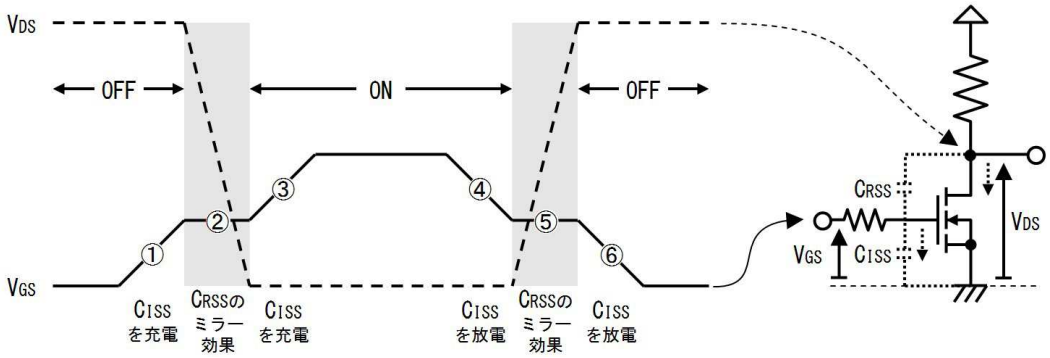
（ｂ）頻繁にＯＮ／ＯＦＦする場合

ですから、スイッチングを素早く行い、スイッチング頻度を適度に抑えることでスイッチング損失を小さくします。

４３．スイッチングの高速化

下図にＭＯＳＦＥＴのＯＮ／ＯＦＦ時のゲート電圧V_{GS}（実線）と、ドレイン電圧V_{DS}（点線）を示します。

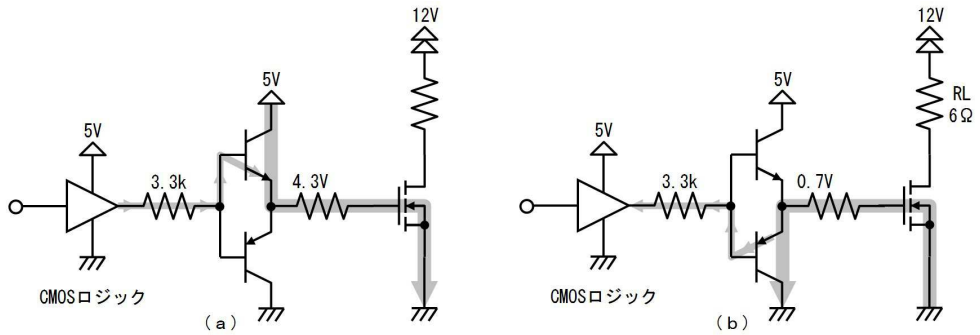
ＭＯＳＦＥＴをＯＮにするときは、ゲートを充電します。ＭＯＳＦＥＴのゲートには大きな容量があるので、ゲートに電流を流すとC_{ISS}が充電されて、①電圧が上昇を始めます。ゲートの電圧が上昇して、ドレイン電流I_Dが増え始めると、V_{DS}が低下を始め、C_{RSS}を介して（上がろうとしている）ゲートの電圧を引き下げる（トランジスタと同様「ミラー効果」と呼びます）ため、②ゲートの電圧は上昇を止めます。ＭＯＳＦＥＴがＯＮになりV_{DS}の低下が止まると、ミラー効果なくなり、C_{ISS}の充電が再開されて③ゲート電圧が再び上昇を始めます。



また、ＭＯＳＦＥＴをＯＦＦにするときは、ゲートを放電します。ゲートから電流を吸い出すと、C_{ISS}が放電されて、④電圧が低下を始めます。ゲートの電圧が低下して、ドレイン電流I_Dが減り始めると、V_{DS}が上昇を始め、C_{RSS}を介して（下がろうとしている）ゲートの電圧を引き上げるげる（トランジスタと同様「ミラー効果」と呼びます）ため、⑤ゲートの電圧は低下を止めます。ＭＯＳＦＥＴがＯＦＦになりV_{DS}の上昇が止まると、ミラー効果なくなり、C_{ISS}の放電が再開されて⑥ゲート電圧が再び低下を始めます。

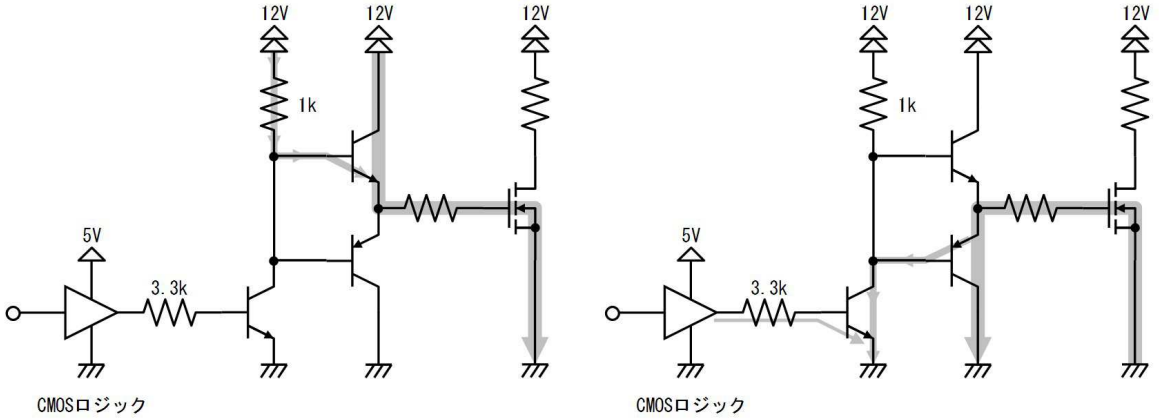
スイッチングを素早く行うためには、大きな電流でゲートを充放電して、①②③④⑤⑥の時間、とりわけ②⑤の時間を短くする必要があります。

下図はコンプリメンタリエミッタフォロアを利用して素早くゲートを充放電する回路です。ゲートの出力がＨの場合は、下図（ａ）に示すように上側のトランジスタが電流を流してh_{FE}倍の電流でゲートを充電します。また、ゲートの出力がＬの場合は、下図（ｂ）に示すように下側のトランジスタが電流を流してh_{FE}倍の電流でゲートを放電します。

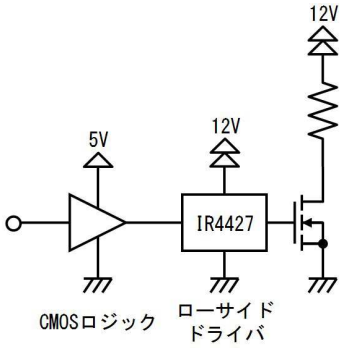


上図の回路の欠点はトランジスタのV_{BE}の影響で、ＯＮ時のV_{GS}が４．３Ｖまでしか上昇しないことです。この影響で、ＯＮ時のV_{DS}が大きくなり、ＯＮ損失が大きくなる場合があります。

下図の回路は高いV_{GS}を加えてＯＮ損失を減らし、かつ大電流で素早くゲートの充放電を行いスイッチング損失を減らす回路です。



下図のようにローサイドドライバＩＣを使用すると、簡単な回路で素早くゲートをＯＮ／ＯＦＦできます。



４４．誘導負荷とアバランシェ耐量

誘導負荷（コイル成分のある負荷）をＯＮ／ＯＦＦする場合は、ＭＯＳＦＥＴもトランジスタと同様にスナバ回路を取り付けます。

ＭＯＳＦＥＴのドレインソース間にはツェーナダイオードに似た性質があり、この性質を利用してフライバック電圧を抑えられる品種もあります。

下表は２ＳＫ４０１７のデータシートの一部ですが、ドレインソース間降伏電圧（V_{BR}）は（V_{GS}が０Ｖの場合）６０Ｖと記載されています。つまり、フライバック電圧は６０Ｖで抑制されます。

項目	記号	測定条件	最小	標準	最大	単位
ゲート漏れ電流	I_{GSS}	V_{GS} = ±16 V, V_{DS} = 0 V	—	—	±10	μA
ドレインしゃ断電流	I_{DSS}	V_{DS} = 60 V, V_{GS} = 0 V	—	—	100	μA
ドレイン・ソース間降伏電圧	$V_{(BR)\ DSS}$	I_D = 10 mA, V_{GS} = 0 V	60	—	—	V
	$V_{(BR)\ DSX}$	I_D = 10 mA, V_{GS} = -20 V	35	—	—	V
ゲートしきい値電圧	V_{th}	V_{DS} = 10 V, I_D = 1 mA	1.3	—	2.5	V
ドレイン・ソース間オン抵抗	$R_{DS\ (ON)}$	V_{GS} = 4 V, I_D =2.5 A	—	0.09	0.15	Ω
		V_{GS} = 10 V, I_D = 2.5 A	—	0.07	0.10	
順方向伝達アドミタンス	$\|Y_{fs}\|$	V_{DS} = 10 V, I_D = 2.5 A	3.0	6.0		S

ただし、あまり大きな電流を吸収させるとＭＯＳＦＥＴが破損します。下図の絶対最大定格によれば、アバランシェ電流は５Ａで、アバランシェエネルギーは２ｍＪです。

項目		記号	定格	単位
ドレイン・ソース間電圧		V_{DSS}	60	V
ドレイン・ゲート間電圧 (R_{GS}=20kΩ)		V_{DGR}	60	V
ゲート・ソース間電圧		V_{GSS}	±20	V
ドレイン電流	DC (注 1)	I_D	5	A
	パルス (注 1)	I_{DP}	20	A
許容損失 (Tc=25℃)		P_D	20	W
アバランシェエネルギー(単発) (注 2)		E_{AS}	40.5	mJ
アバランシェ電流		I_{AR}	5	A
アバランシェエネルギー(連続) (注 3)		E_{AR}	2	mJ
チャネル温度		T_{ch}	150	℃
保存温度		T_{stg}	−55 ～ 150	℃

フライバック電流は負荷の最大電流とほぼ等しくなりますから、最大電流を５Ａより十分小さくする必要があります。

アバランシェエネルギは、

アバランシェ電流 × ドレインソース間降伏電圧 × 電流の流れる時間 ÷ ２

で求めます。（２で割る理由は、電流波形が三角形になるため、三角形の面積でエネルギを求めるからです。）

例えば、２Ａで６０Ｖのフライバックが５μ秒流れる場合は、=2*60*5E-6/2と計算して、０．３ｍＪと求めることができます。

１４．アナログ回路後編

１．電流ブースタ

オペアンプにエミッタフォロアを追加する事で、出力電流を大きくすることができます。出力電流を増強（ブースト）するので、電流ブースタと呼ばれます。

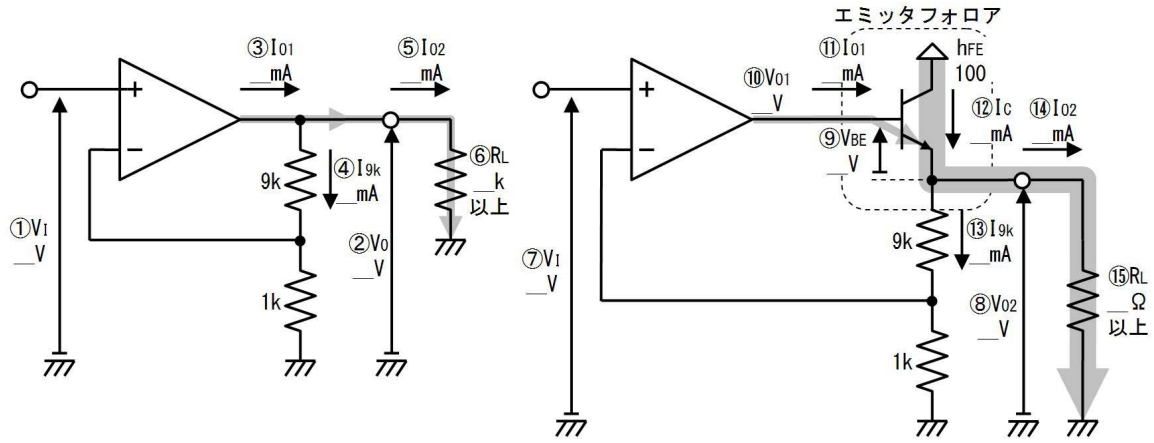
例えば、ＴＤＡ２０３０（オーディオパワーアンプと呼ばれてますが、実は３Ａ２０Ｗのパワーオペアンプです）のように大きな電流を出力できるオペアンプも安価になっているため、オペアンプの出力電流を増強する回路は以前ほど重要ではありません。

とはいえ、手持ちのオペアンプとトランジスタで、手軽に出力電流を増やすことができれば便利ですから、ここでは電流ブースタについて説明します。

２．シングルブースタ

電流を吐き出すか、吸い出すか、いずれか一方だけの動作をする回路をシングルブースタと呼びます。

さて、下図（ａ）はオペアンプを利用した１０倍の非反転増幅回路です。下図（ｂ）のように、この回路にエミッタフォロアを追加すると、出力電流を大きくすることができます。この回路は、電流を吐き出すことはできますが、吸い込むことはできません。



（ａ）　　（ｂ）

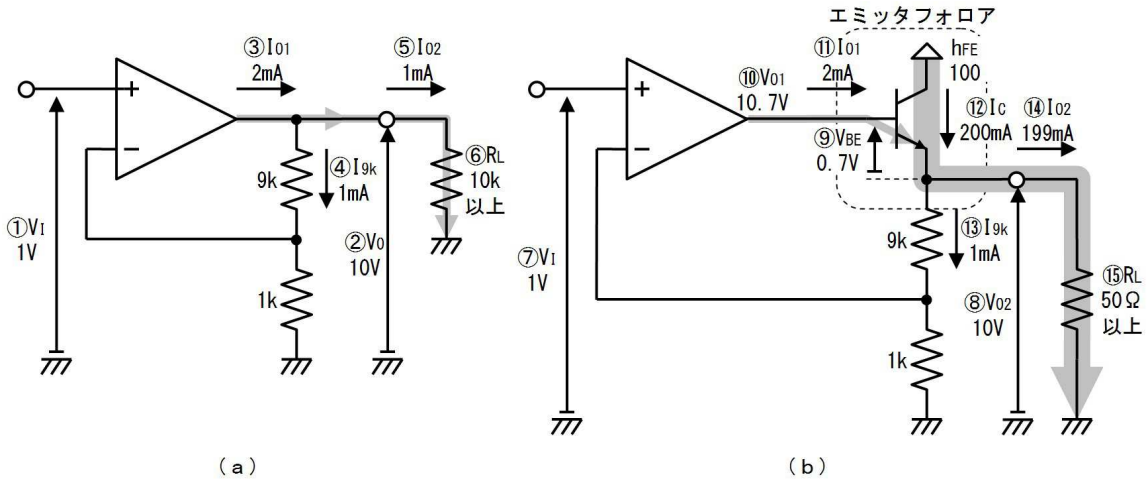
２.１．確認

上図を参考に、下表に書き込みながら回路の動作を確認してください。

番号	質問	値
	上図（ａ）で、オペアンプだけの非反転増幅回路について考えます。	
①	入力電圧V_Iは、	V
②	出力電圧V_Oは、	V
③	このオペアンプは２ｍＡまでの電流を出力できるとします。	２ｍＡ

④	９ｋΩに流れる電流Ｉ$_{9k}$は、 （入力に電流が流れず、９ｋと１ｋで１０ｋだから、）	ｍＡ
⑤	外部に出力できる電流Ｉ$_{O2}$は、 （③と④からキルヒ則で、）	ｍＡ
⑥	負荷抵抗Ｒ$_{L}$の最低値は、 （②と⑤から、）	ｋΩ以上
	上図（ｂ）で、エミッタフォロアを追加した反転増幅回路について考えます。	
⑦	入力電圧Ｖ$_{I}$は、	Ｖ
⑧	出力電圧Ｖ$_{O2}$は、	Ｖ
⑨	電流が流れているトランジスタのＶ$_{BE}$は、	Ｖ
⑩	オペアンプの出力端子のＶ$_{O1}$は、	Ｖ
⑪	このオペアンプは２ｍＡまでの電流を出力できるとします。	２ｍＡ
⑫	コレクタ電流Ｉ$_{C}$は、 （ｈ$_{FE}$が１００だから、）	ｍＡ
⑬	９ｋΩに流れる電流Ｉ$_{9k}$は、	ｍＡ
⑭	外部に出力できる電流Ｉ$_{O2}$は、 （⑫と⑬からキルヒ則で、）	ｍＡ
⑮	負荷抵抗Ｒ$_{L}$の最低値は、 （⑧と⑭から、）	Ω以上

2.2. 答



（ａ）　　（ｂ）

番号	質問	値

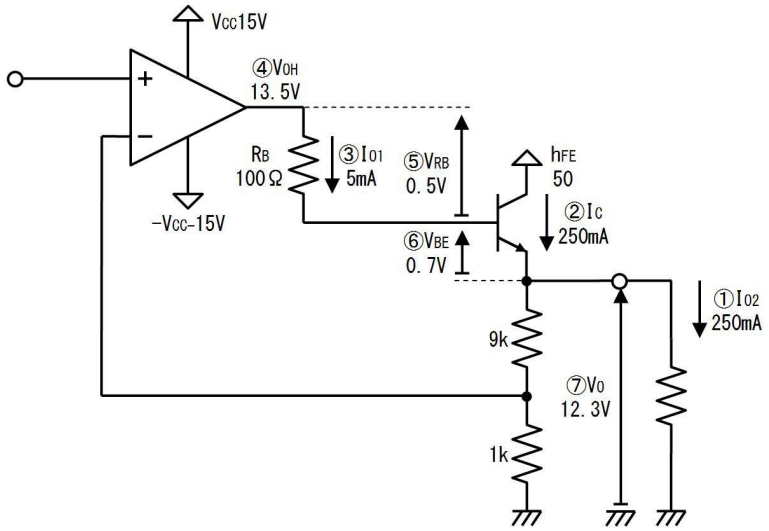
	上図（ａ）で、オペアンプだけの非反転増幅回路について考えます。	
①	入力電圧V_Iは、	１Ｖ
②	出力電圧V_Oは、	１０Ｖ
③	このオペアンプは２ｍＡまでの電流を出力できるとします。	２ｍＡ
④	９ｋΩに流れる電流I_{9k}は、 （入力に電流が流れず、９ｋと１ｋで１０ｋだから、）	１ｍＡ
⑤	外部に出力できる電流I_{O2}は、 （③と④からキルヒ則で、）	１ｍＡ
⑥	負荷抵抗R_Lの最低値は、 （②と⑤から、）	１０ｋΩ以上
	上図（ｂ）で、エミッタフォロアを追加した反転増幅回路について考えます。	
⑦	入力電圧V_Iは、	１Ｖ
⑧	出力電圧V_{O2}は、	１０Ｖ
⑨	電流が流れているトランジスタのV_{BE}は、	０．７Ｖ
⑩	オペアンプの出力端子のV_{O1}は、	１０．７Ｖ
⑪	このオペアンプは２ｍＡまでの電流を出力できるとします。	２ｍＡ
⑫	コレクタ電流I_Cは、 （h_{FE}が１００だから、）	２００ｍＡ
⑬	９ｋΩに流れる電流I_{9k}は、	１ｍＡ
⑭	外部に出力できる電流I_{O2}は、 （⑫と⑬からキルヒ則で、）	１９９ｍＡ
⑮	負荷抵抗R_Lの最低値は、 （⑧と⑭から、）	５０Ω以上

このようにエミッタフォロアを追加することで、出力電流を概ねh_{FE}倍に拡大できます。（上表⑭）その結果、オペアンプ単体では１０ｋΩまでの負荷しか接続できませんでしたが（上表⑥）、エミッタフォロアを追加すると５０Ωまでの負荷を接続できます（上表⑮）。

さらに、エミッタフォロアで生じる、入出力の電圧差（０．７Ｖ）をオペアンプが吸収して、正確に入力電圧を増幅した電圧が出力されます。（上表⑧⑨⑩）ただし、出力できる最高の電圧は、０．７Ｖ（V_{BE}の分）低くなります。

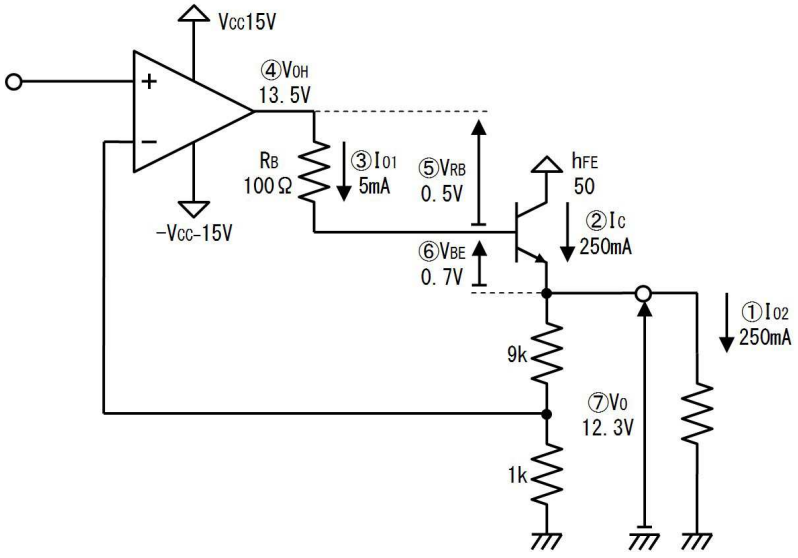
2.3. 練習

下図は、最大２５０ｍＡを出力できる電流ブースタです。使用しているオペアンプは、最高１３．５Ｖを出力できます。この回路が出力できる電圧の最大値を、下表に書き込みながら検討してください。



番号	質問	値
①	回路の最大出力電流は２５０ｍＡです。	－
②	コレクタ電流Ｉ$_C$は、	ｍＡ
③	ベース電流Ｉ$_B$は、 （ｈ$_{FE}$が５０だから、）	ｍＡ
④	オペアンプの最大出力電圧は１３．５Ｖです。	－
⑤	ベース抵抗の両端電圧Ｖ$_{RB}$は、	Ｖ
⑥	Ｖ$_{BE}$は、	Ｖ
⑦	出力電圧は、	Ｖ

2.4. 答

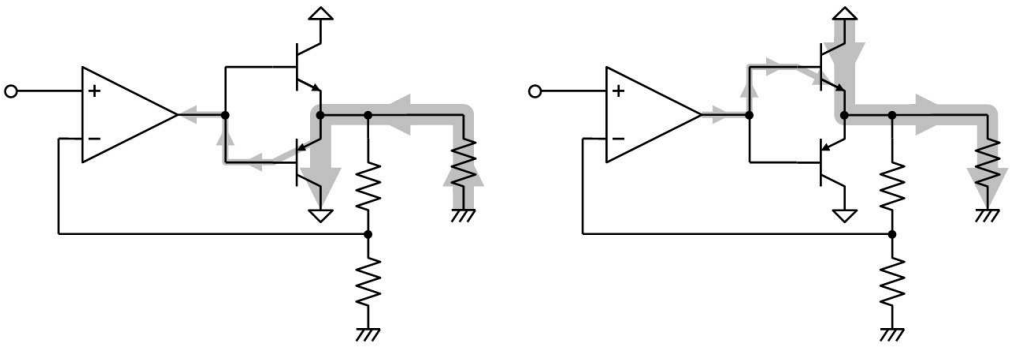


番号	質問	値
①	回路の最大出力電流は２５０ｍＡです。	－
②	コレクタ電流Ｉ$_C$は、	２５０ｍＡ
③	ベース電流Ｉ$_B$は、 （ｈ$_{FE}$が５０だから、）	５ｍＡ
④	オペアンプの最大出力電圧は１３．５Ｖです。	－
⑤	ベース抵抗の両端電圧Ｖ$_{RB}$は、	０．５Ｖ
⑥	Ｖ$_{BE}$は、	０．７Ｖ
⑦	出力電圧は、	１２．３Ｖ

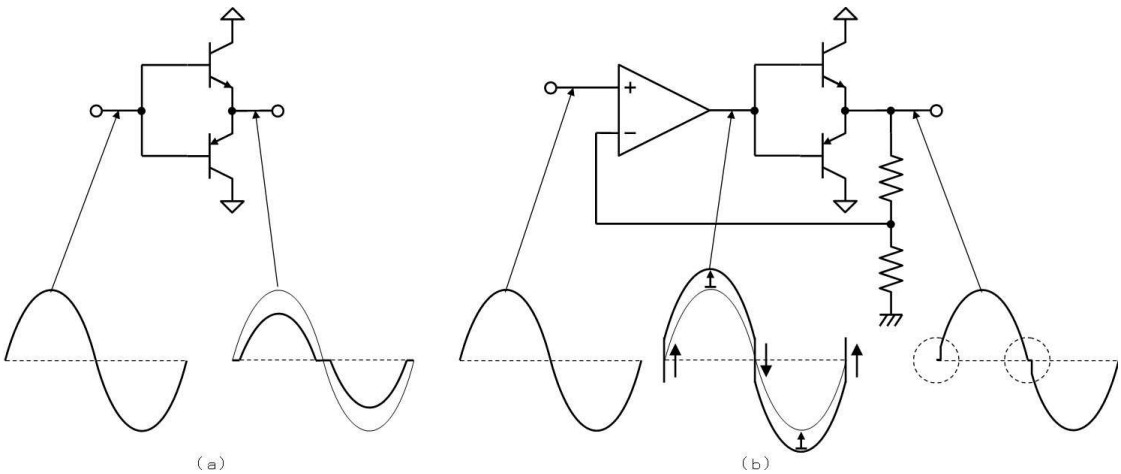
このようにR_Bを追加すると、最高出力電圧が低くなります。R_Bはオペアンプの出力を保護し、また、高い周波数でのオペアンプやトランジスタの動作を安定させるために挿入しています。電源電圧が５Ｖ程度なら必要ありませんが、電源電圧が高い場合は必要です。

３．コンプリメンタリブースタ

下図のように、オペアンプにコンプリメンタリエミッタフォロアを追加することもできます。出力電流を大きくできるだけではなく、下図の左右に示すように、電流を吸い込むことも、吐き出すこともできます。



単純なコンプリメンタリエミッタフォロアは、下図（ａ）に示すように、クロスオーバー歪みを発生します。



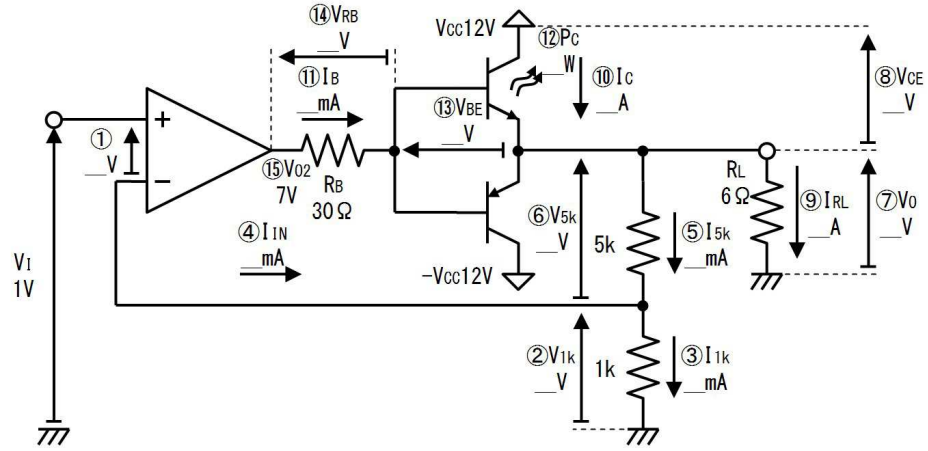
しかし、エミッタフォロアをオペアンプと組み合わせることで、上図（ｂ）の中央の波形に示すように、オペアンプがV_{BE}の電圧を補って動作し、上部（ｂ）の右側の波形に示すように、クロスオーバー歪みを小さくすることができます。

このとき、上図（ｂ）に矢印で示すように、オペアンプは－０．７Ｖ～＋０．７Ｖまで一瞬で立ち上がる（立ち下がる）必要があります。しかし、現実には「一瞬」とは行かないため、ここでオペアンプの動作が後れた分が歪みになります。

この回路はモータ等を駆動するなら十分な性能ですが、良好な音質でスピーカーを鳴らすには力不足です。

３.１. 練習

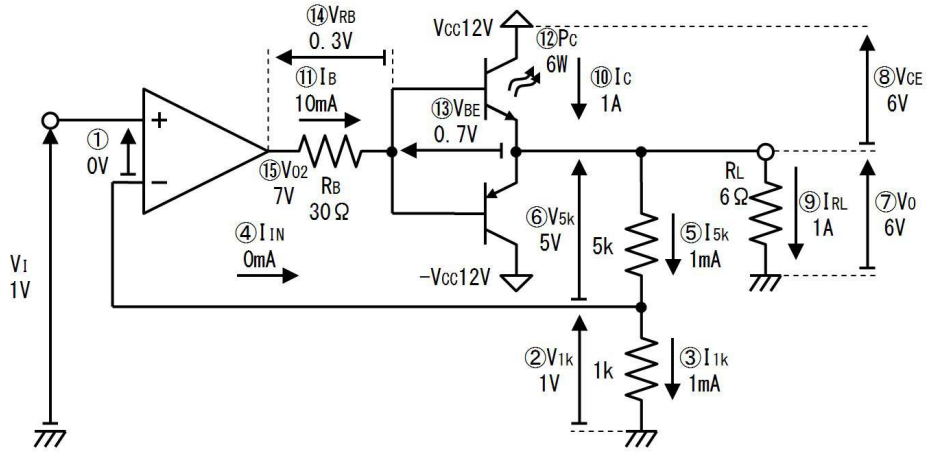
下図のコンプリメンタリ電流ブースタ回路の各部の電圧・電流を、下表に書き込みながら検討してください。



番号	質問	値
①	負帰還が掛かっているから、＋入力と－入力の間の電圧は、	V
②	１ｋΩの両端電圧V_{1k}は、	V
③	１ｋΩに流れる電流I_{1k}は、	mA
④	オペアンプの入力端子に流れる電流は、	mA
⑤	５ｋΩに流れる電流I_{5k}は、	mA
⑥	５ｋΩの両端電圧V_{5k}は、	V
⑦	出力電圧V_Oは、	V
⑧	上側（ＮＰＮトランジスタの）V_{CE}は、	V
⑨	負荷に流れる電流I_{RL}は、	A
⑩	コレクタ電流I_Cは、 （I_{5k}を無視すると、）	A
⑪	ベース電流I_Bは、	mA

	（h_{FE}を１００とすると、⑩から、）	
⑫	コレクタ損失P_Cは、 （⑧と⑩から、）	W
⑬	電流の流れているトランジスタのV_{BE}は、	V
⑭	ＲＢの両端電圧V_{RB}は、	V
⑮	オペアンプの出力端子の電圧V_{O2}は、	V

3.2. 答



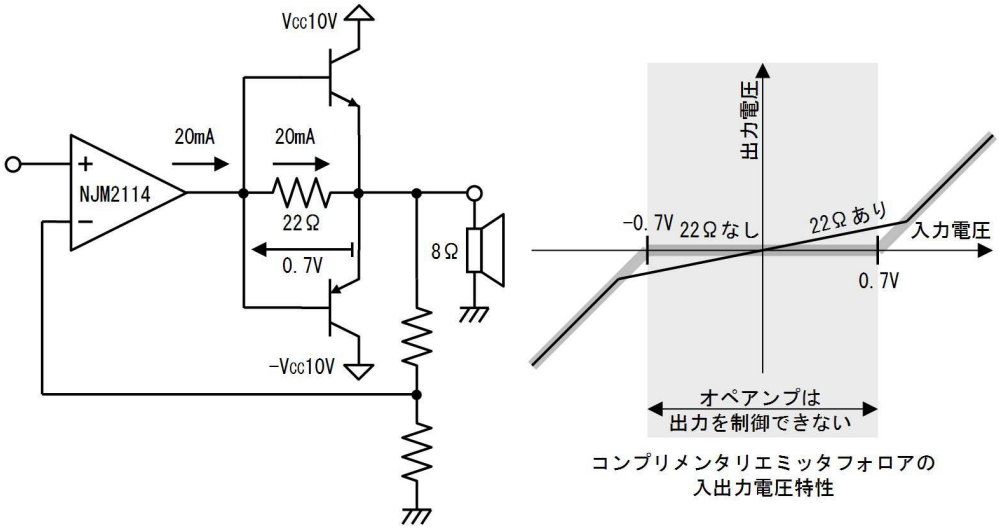
番号	質問	値
①	負帰還が掛かっているから、＋入力と－入力の間の電圧は、	０Ｖ
②	１ｋΩの両端電圧V_{1k}は、	１Ｖ
③	１ｋΩに流れる電流I_{1k}は、	１ｍＡ
④	オペアンプの入力端子に流れる電流は、	０ｍＡ
⑤	５ｋΩに流れる電流I_{5k}は、	１ｍＡ
⑥	５ｋΩの両端電圧V_{5k}は、	５Ｖ
⑦	出力電圧V_Oは、	６Ｖ
⑧	上側（ＮＰＮトランジスタの）V_{CE}は、	６Ｖ
⑨	負荷に流れる電流I_{RL}は、	１Ａ
⑩	コレクタ電流I_Cは、 （I_{5k}を無視すると、）	１Ａ
⑪	ベース電流I_Bは、 （h_{FE}を１００とすると、⑩から、）	１０ｍＡ
⑫	コレクタ損失P_Cは、	６Ｗ

	（⑧と⑩から、）	
⑬	電流の流れているトランジスタのV_{BE}は、	０．７Ｖ
⑭	ＲＢの両端電圧V_{RB}は、	０．３Ｖ
⑮	オペアンプの出力端子の電圧V_{O2}は、	７Ｖ

上表のように多くの場合、出力電圧が電源電圧（１２Ｖ）の半分のとき（６Ｖのとき）エミッタフォロアの発熱が最大になります。今回の回路は６Ｗの発熱がありますから、それに耐えるトランジスタと、その熱を処理できる放熱器が必要です。

さてこのように、オペアンプとコンプリメンタリエミッタフォロアを組み合わせても、クロスオーバ歪みは多少発生します。

クロスオーバ歪みを減らす最もお手軽な方法を下図に示します。下図の回路では、ベースエミッタ間に２２Ωの抵抗を追加しています。

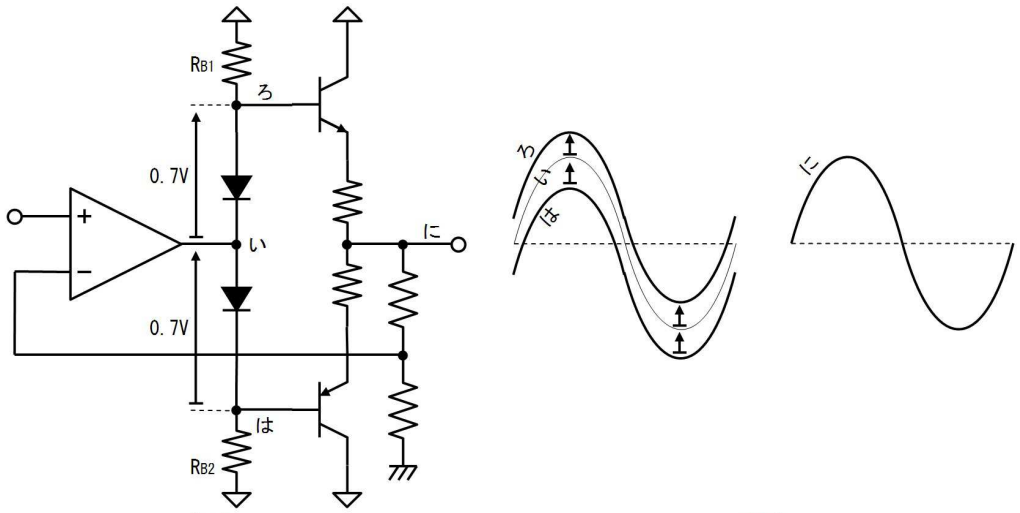


コンプリメンタリエミッタフォロアの
入出力電圧特性

単純なコンプリメンタリエミッタフォロアの入出力電圧特性は、下図右側に灰色線で示すように、入力が－０．７Ｖ～０．７Ｖの間は出力が変化しません。つまりこの電圧範囲では、オペアンプは出力電圧を制御できません。このため、歪みを抑えることもできません。ここで２２Ωを追加すると、この電圧範囲で僅かではありますがオペアンプが出力を制御できるようになります。このため、回路が簡単な割には、意外と歪みが少なくなります。

この回路では、トランジスタが動作しない、－０．７Ｖ～０．７Ｖの間は、２２Ωを通じてオペアンプが直接負荷に電流を流しますから、出力電流の大きなオペアンプが必要です。また、－０．７Ｖから＋０．７Ｖまで素早く立ち上がって歪みを抑えられるように、スルーレイトの高いオペアンプが適します。ここでは、ＮＪＭ２１１４を使用しています。

クロスオーバー歪を減らす、より効果的で、一般的な方法を下図に示します。同図（ａ）に示すように、コンプリメンタリエミッタフォロアのベースに（V_{BE}に相当する）バイアス電圧を（既に説明した方法で）ダイオードによって加えます。



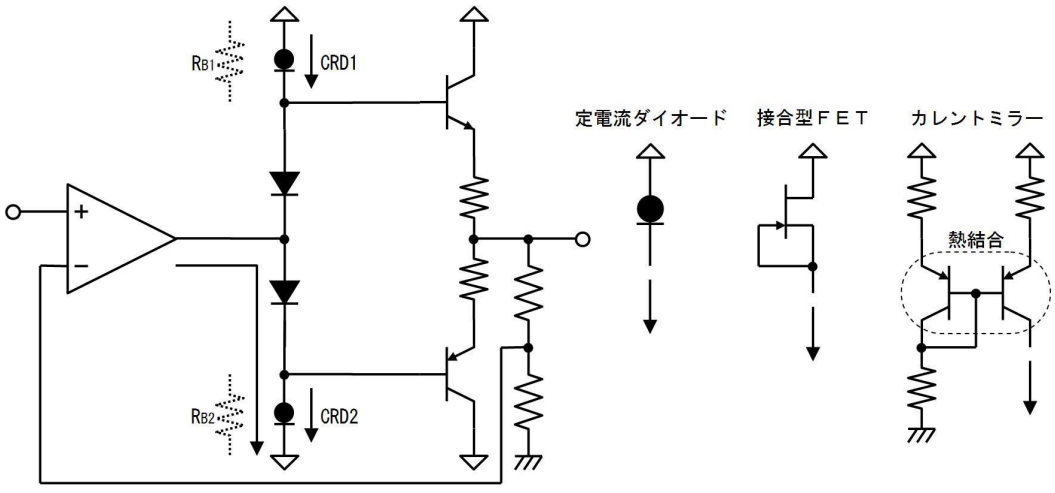
（ａ）　　（ｂ）

これにより、上図（ｂ）に示すように、オペアンプの出力電圧（い）に対して、上側トランジスタのベース電圧は０．７Ｖ高く（ろ）、下側トランジスタのベース電圧は０．７Ｖ低く（は）維持されます。この結果、出力電圧（に）は０Ｖ付近でも滑らかに変化し、クロスオーバ歪がなくなります。

ところが（書籍でも良く紹介される）上図の回路は、R_Bが原因となって、あまり大きな出力電流を流すことができません。

上図の回路では、R_Bがベース電流を供給しますから、R_Bが大きいと出力電流が小さくなってしまいます。ですから、出力電流を大きくするためには、R_Bを小さくしなくてはなりません。ところが、R_Bはオペアンプの負荷となっているため、R_Bを小さくすると、オペアンプは大きな電流を出力しなくてはなりません。しかし、汎用オペアンプの出力電流は数ｍＡ～数十ｍＡと小さいので、R_Bを小さくすることはできません。

そこで、下図（ａ）に示すような、R_Bの代りに（両端電圧にかかわらず）一定の電流を流す「定電流ダイオード」を使用した回路が良く利用されます。

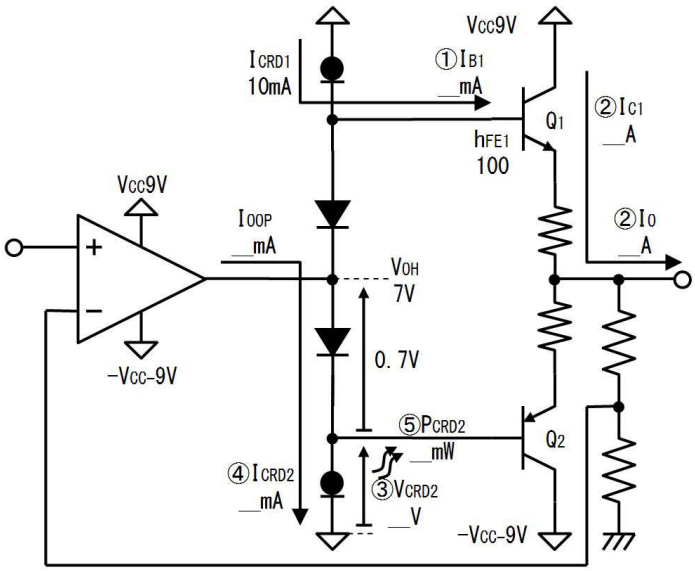


（ａ）　　（ｂ）

上図（ｂ）のように、定電流ダイオードの代りに、接合型ＦＥＴやカレントミレーを使用することもできます。接合型ＦＥＴの場合は電流に個体差があるので選別が必要で、カレントミラーは部品点数が多くなりますから、上図（ａ）のように、定電流ダイオードを用いる方法が楽です。

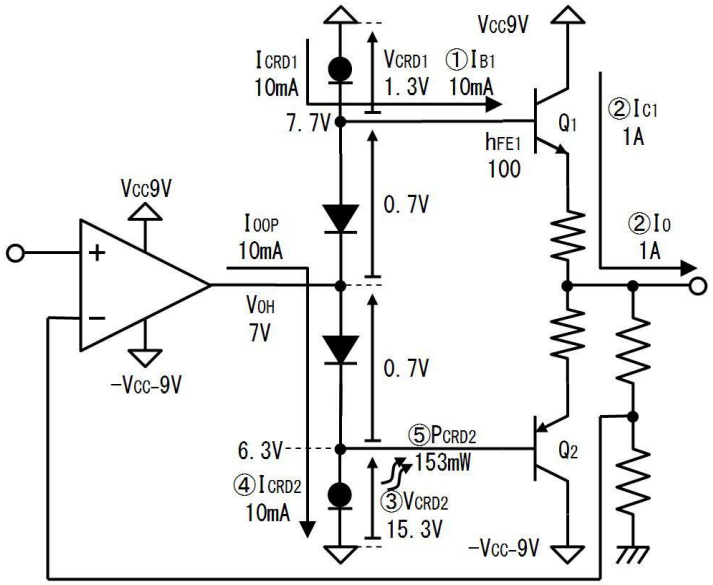
3.3. 練習

下図の電流ブースタの最大出力電流を、下表に書き込みながら求めてください。ただし、電源電圧±９Ｖでのオペアンプの最高／最低出力電圧を±７Ｖと、オペアンプは最大出力電流を１０ｍＡで使用すると考えます。

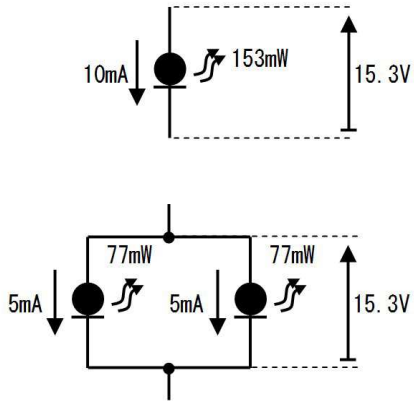


番号	質問	値
	オペアンプが最高出力電圧７Ｖを出力している場合を考えます。	
①	ＣＲＤ$_1$の電流が全てＱ$_1$のベースに流れたとすれば、ベース電流Ｉ$_{B1}$は、	ｍＡ
②	電流ブースタの出力電流Ｉ$_O$、つまりＱ$_1$のコレクタ電流Ｉ$_{C1}$は、 （ｈ$_{FF}$が１００だから）	Ａ
③	ＣＲＤ$_2$の両端電圧Ｖ$_{CRD2}$は、 （オペアンプの最高出力電圧と、ダイオードの順電圧から、）	Ｖ
④	ＣＲＤ$_2$に流れる電流Ｉ$_{CRD2}$は、	ｍＡ
⑤	ＣＲＤ$_2$の消費電力Ｐ$_{CRD2}$は、	ｍＷ
⑥	オペアンプの出力電流Ｉ$_{OOP}$は、	ｍＡ

3.4. 答



（ａ）



（ｂ）

番号	質問	値
	オペアンプが最高出力電圧７Ｖを出力している場合を考えます。	
①	ＣＲＤ$_1$の電流が全てＱ$_1$のベースに流れたとすれば、ベース電流Ｉ$_{B1}$は、	１０ｍＡ
②	電流ブースタの出力電流Ｉ$_O$、つまりＱ$_1$のコレクタ電流Ｉ$_{C1}$は、 （ｈ$_{FF}$が１００だから）	１Ａ
③	ＣＲＤ$_2$の両端電圧Ｖ$_{CRD2}$は、 （オペアンプの最高出力電圧と、ダイオードの順電圧から、）	１５．３Ｖ
④	ＣＲＤ$_2$に流れる電流Ｉ$_{CRD2}$は、	１０ｍＡ
⑤	ＣＲＤ$_2$の消費電力Ｐ$_{CRD2}$は、	１５３ｍＷ
⑥	オペアンプの出力電流Ｉ$_{OOP}$は、	１０ｍＡ

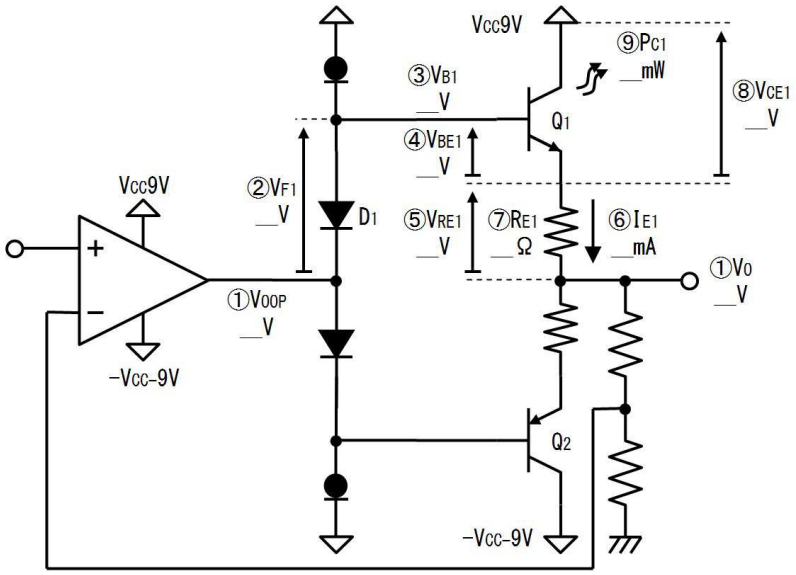
上表で分かるように、ＣＲＤの電流のｈ$_{FE}$倍が、電流ブースタの最大出力電流となり、また、ＣＲＤの電流はオペアンプの最大出力電流となります。

つまり、（発熱も含めて検討し）オペアンプが１０ｍＡ流すことができれば、ＣＲＤは１０ｍＡの品種を選び、電流ブースタは１０ｍＡ×１００＝１Ａの電流を出力できます。逆に、１Ａ出力したい場合は、１Ａ／ｈ$_{FE}$＝１０ｍＡのＣＲＤを選び、オペアンプは１０ｍＡの出力電流が必要です。

また、最高電圧を出力したときに、ＣＲＤ$_2$の消費電力が最高になります。小形ＣＲＤの最大定格は３００ｍＷ程度ですから、上表の１５３ｍＷは気温が高いと厳しい状態です。このような場合、上図（ｂ）のように、５ｍＡのＣＲＤを並列に接続することで、素子１つあたりの電力を減らすことができます。

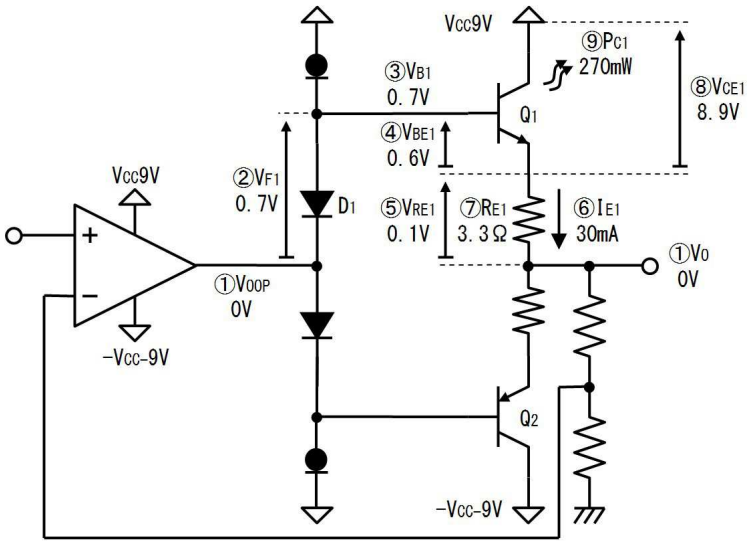
3.5. 練習

下図を参考に、下表に書き込みながら、回路が０Ｖを出力しているとき、アイドリング電流（０Ｖ出力時のエミッタ電流）が３０ｍＡとなるよう、R_Eの値を決定して下さい。また、そのときのQ_1の消費電力（コレクタ損失）を求めて下さい。ただし、ダイオードの順電圧を０．７Ｖと、Ｑ１は発熱により（約５０℃温度上昇して）V_{BE}が０．６Ｖに低下したと考えてください。



番号	質問	値
①	回路の出力電圧とオペアンプの出力電圧は共に、 （ここでは、０Ｖ出力時を考えるから、）	Ｖ
②	常温のダイオードD_1の順電圧V_{F1}は、	Ｖ
③	Q_1のベース電圧V_{B1}は、	Ｖ
④	発熱したQ_1のV_{BE1}は、 （約５０℃温度上昇しているから、）	Ｖ
⑤	エミッタ抵抗の両端電圧V_{RE1}は、	Ｖ
⑥	Q_1のエミッタ電流I_{E1}は、 （アイドリング電流を３０ｍＡとするから、）	ｍＡ
⑦	エミッタ抵抗R_Eの値は、 （⑤と⑥から、）	Ω
⑧	このときのQ_1のV_{CE}は、 （⑤とV_{CC}９Ｖから、）	Ｖ
⑨	このときのQ_1のコレクタ損失P_{C1}は、	ｍＷ
⑩	同様に考えてＱ２のコレクタ損失P_{C2}は、	ｍＷ

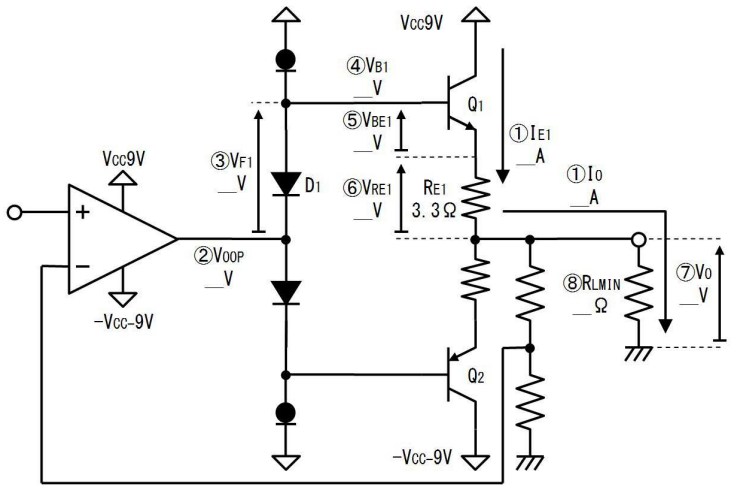
3.6. 答



番号	質問	値
①	回路の出力電圧とオペアンプの出力電圧は共に、 （ここでは、０Ｖ出力時を考えるから、）	０Ｖ
②	常温のダイオードD_1の順電圧V_{F1}は、	０．７Ｖ
③	Q_1のベース電圧V_{B1}は、	０．７Ｖ
④	発熱したQ_1のV_{BE1}は、 （約５０℃温度上昇しているから、）	０．６Ｖ
⑤	エミッタ抵抗の両端電圧V_{RE1}は、	０．１Ｖ
⑥	Q_1のエミッタ電流I_{E1}は、 （アイドリング電流を３０ｍＡとするから、）	３０ｍＡ
⑦	エミッタ抵抗R_Eの値は、 （⑤と⑥から、）	３３Ω
⑧	このときのQ_1のV_{CE}は、 （⑤とV_{CC}９Ｖから、）	８．９Ｖ
⑨	このときのQ_1のコレクタ損失P_{C1}は、	２７０ｍＷ
⑩	同様に考えてＱ２のコレクタ損失P_{C2}は、	２７０ｍＷ

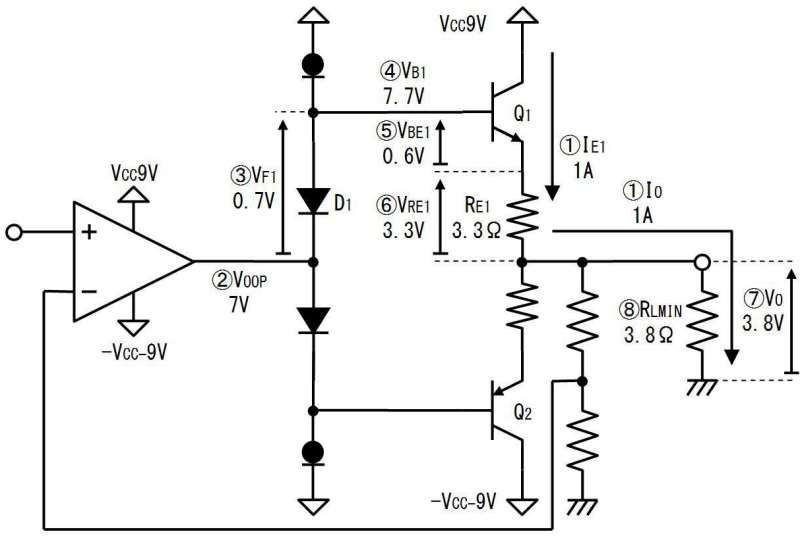
3.7. 練習

下図を参考に下表に書き込みながら、回路が最大電流（１Ａ）を出力しているときの、最大出力電圧を求めてください。但しオペアンプの最大出力電圧を７Ｖとします。



番号	質問	値
①	Q_1の最大エミッタ電流I_{E1}は、	A
②	オペアンプの最大出力電圧V_{OOP}は、	V
③	ダイオードD_1の順電圧V_{F1}は、	V
④	Q_1のベース電圧V_{B1}は、	V
⑤	Q_1のV_{BE}は発熱していると考えて、	V
⑥	エミッタ抵抗の両端電圧V_{RE1}は、 （①とエミッタ抵抗の値から、）	V
⑦	回路の出力電圧V_Oは、	V
⑧	回路に接続できる負荷抵抗ＲＬの最低値は、 （①と⑦から、）	Ω

3.8. 答



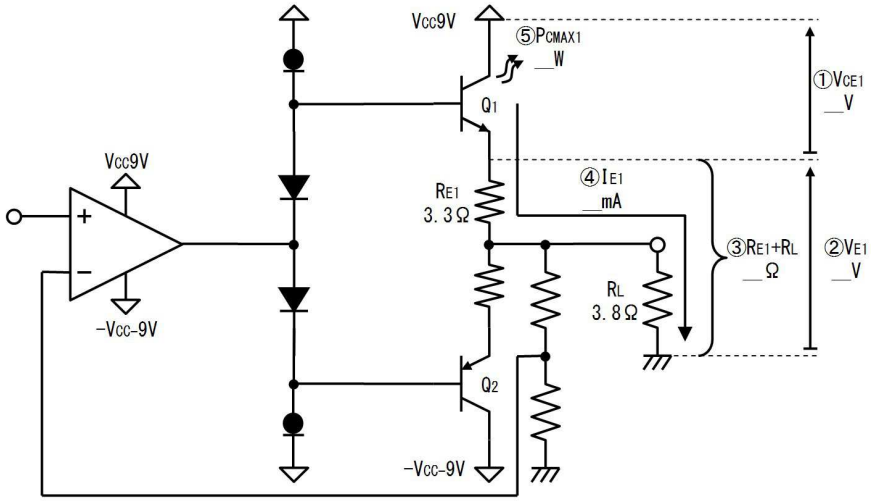
番号	質問	値

①	Q_1の最大エミッタ電流I_{E1}は、	１Ａ
②	オペアンプの最大出力電圧V_{OOP}は、	７Ｖ
③	ダイオードD_1の順電圧V_{F1}は、	０．７Ｖ
④	Q_1のベース電圧V_{B1}は、	７．７Ｖ
⑤	Q_1のV_{BE}は発熱していると考えて、	０．６Ｖ
⑥	エミッタ抵抗の両端電圧V_{RE1}は、 （①とエミッタ抵抗の値から、）	３．３Ｖ
⑦	回路の出力電圧V_Oは、	３．８Ｖ
⑧	回路に接続できる負荷抵抗ＲＬの最低値は、 （①と⑦から、）	３．８Ω

このように、R_Eの値が大きいと、最大出力電圧が小さくなります。ダイオードとトランジスタの熱結合をしっかり行うことで、両者の温度を近づけることができ、R_Eの値を小さくすることができます。

3.9. 練習

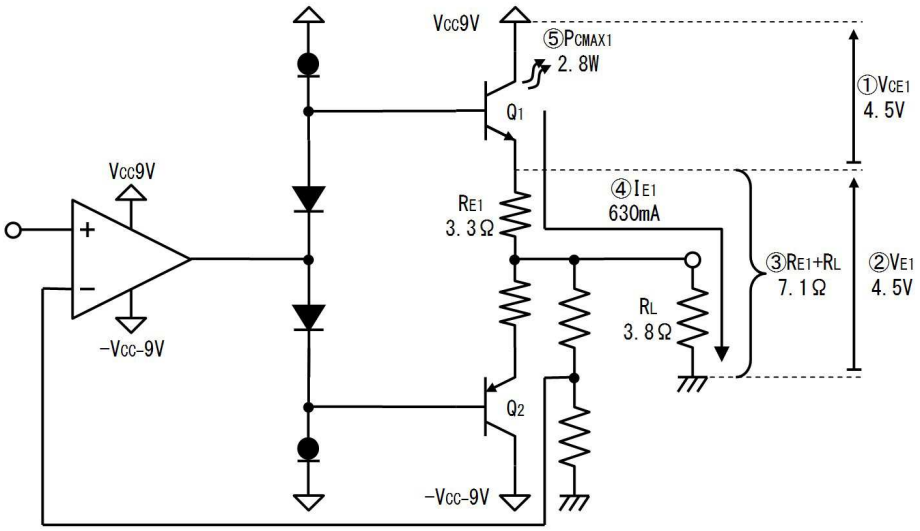
V_{CE1}が電源電圧V_{CC}の半分となったとき、Q_1のコレクタ損失P_{C1}が最大になります。下図を参考に下表に書き込みながら、Q_1の最大のコレクタ損失P_{CMAX1}を求めてください。但し、回路の負荷として３．８Ωの抵抗を接続したと考えます。



番号	質問	値
①	Q_1のコレクタエミッタ間電圧、V_{CE1}は、 （V_{CC}の半分だから、）	V
②	Q_1のエミッタ電圧V_{E1}は、 （V_{CC}と①から、）	V
③	R_{E1}とR_Lの直列合成抵抗は、	Ω
④	Q_1のエミッタ電流I_{E1}は、	mW

	（②と③から、）	
⑤	Q_1の最大損失P_{CMAX1}は、	W

3.10. 答

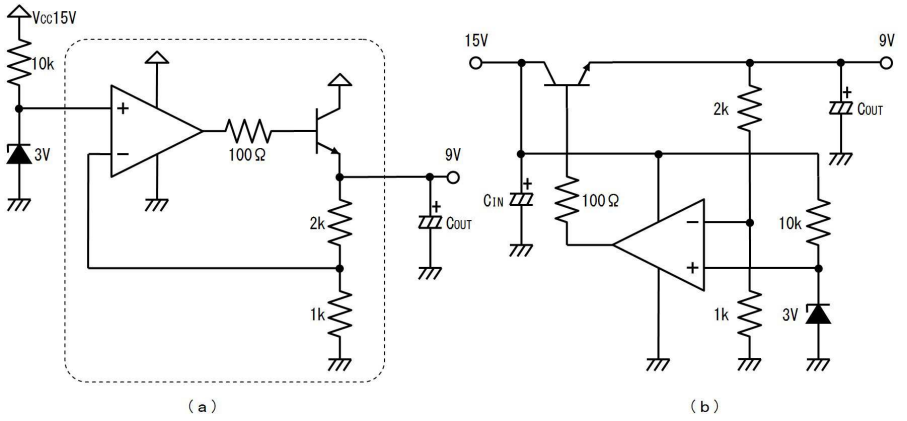


番号	質問	値
①	Q_1のコレクタエミッタ間電圧、V_{CE1}は、 （V_{CC}の半分だから、）	４．５Ｖ
②	Q_1のエミッタ電圧V_{E1}は、 （V_{CC}と①から、）	４．５Ｖ
③	R_{E1}とR_Lの直列合成抵抗は、	７．１Ω
④	Q_1のエミッタ電流I_{E1}は、 （②と③から、）	６３０mW
⑤	Q_1の最大損失P_{CMAX1}は、	２．８W

4. 安定化電源回路

優れた性能の３端子レギュレータが安価に出回っているため、安定化電源を手作りする必要は殆どありません。ここでは回路構成を解説する目的で、安定化電源を説明します。

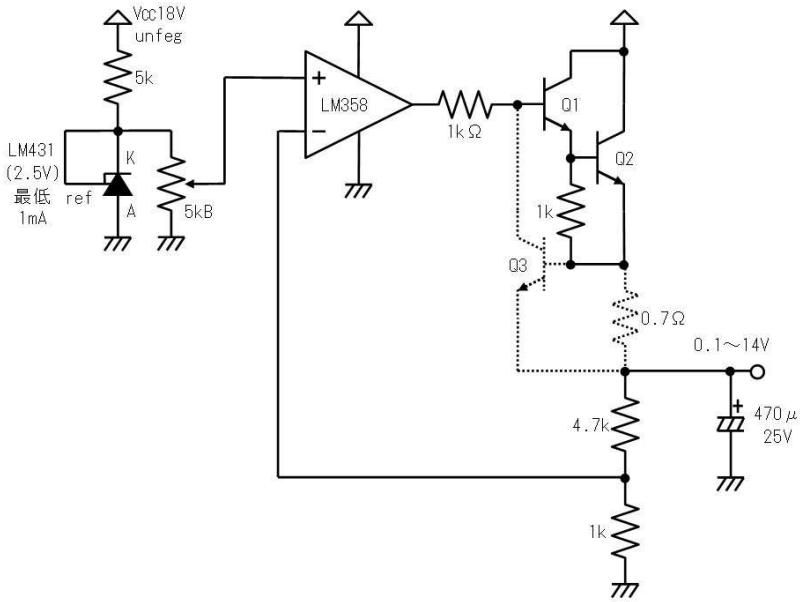
下図（ａ）の回路は、９Ｖの安定化電源回路です。既に説明した、電流ブースタ付の３倍の非反転増幅器に、ツェーナダイオードで発生させた３Ｖを入力し、安定した９Ｖを出力します。つまり、安定化電源回路とは、一定の電圧を出力する大出力の増幅器です。



上図（ｂ）は、実は上図（ａ）と全く同じ回路で、書き方が変わっただけです。オペアンプ回路を電源回路に利用するときは、上図（ｂ）のように書く場合が殆どです。なぜなら、通常の回路では省略されるV_{CC}が、電源回路では「回路の入力」となるので、V_{CC}の配線を具体的に示したいからです。

安定化電源回路の出力電圧は一定ですから、上図のC_{OUT}を取り付けてもトランジスタの負担は増さず、逆に、急に電流が流れたときに、C_{OUT}が放電してその電流を供給してくれるので好都合です。ただし、中途半端な容量のC_{OUT}を取り付けると、オペアンプが充放電を繰り返して回路が不安定になるため、十分大きな容量のコンデンサを使用します。

下図はツェーナダイオードの代りに、より安定な基準電圧用ＩＣ（ＬＭ４３１）を利用して、ボリウムで出力電圧を可変にした電源回路の例です。Ｑ１とＱ２はダーリントン接続で大きな出力電流を流すことができます。



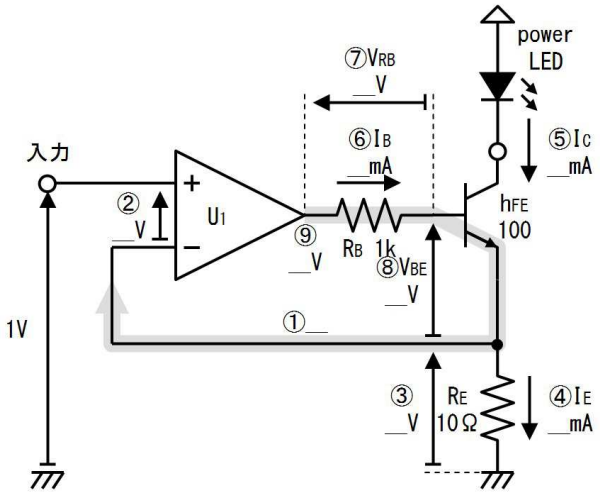
図に点線で示す回路は簡易保護回路で、０．７Ωの両端電圧が０．７Ｖを超えると、Ｑ３がＯＮになり、Ｑ１のベース電圧を下げて、出力電流がそれ以上増えないようにします。上の回路では約１Ａで保護が掛かります。保護が掛かっているとは言え、１Ａの電流が流れ続けますから、大きな発熱があります。ですから、保護の掛かった状態で連続使用することはできません。（過って、出力をショートさせた瞬間にトランジスタが壊れないためのものです。）

この回路構成でＯＶに近い電圧を出力するためには、－電源電圧（ここではＯＶ）付近の入力電圧で正常動作するオペアンプが必要です。ＬＭ３５８このような目的で利用できる安価なオペアンプで、設計は古いですがまだまだ使えます。

安定化電源回路は、様々な負荷を繋いで使用するため、発振する場合があります。このような場合、C_{OUT}を大きくするか、増幅器の増幅率を上げます。たとえば、上図の回路では５．７倍ですが、２０倍、３０倍、というように増幅率を上げれば（その分＋入力端子の電圧を下げます）発振は治まります。

５．定電流回路

下図はオペアンプで正確さを高めた定電流回路です。また、入力電圧で電流を変化させることもできます。

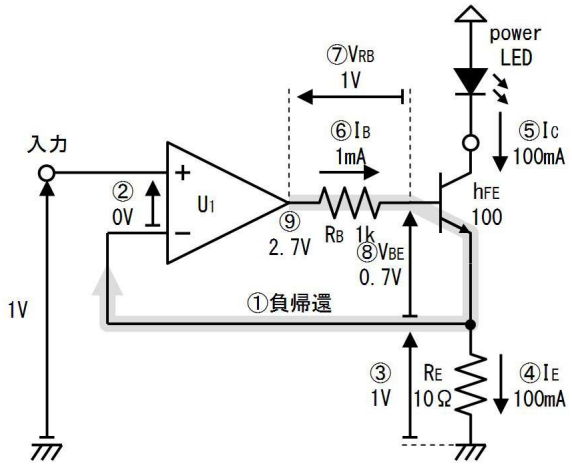


５.１．練習

上図の回路の動作を下表に書き込みながら確認してください。

番号	質問	値
①	この回路は負帰還が掛かっていますか。 （選んで下さい）	掛かっている 掛かっていない
②	＋入力と－入力の間の電圧は、 （①から、）	V
③	１００Ωの両端電圧は、	V
④	１００Ωに流れる電流は、	mA
⑤	コレクタ電流（出力電流）は、	mA
⑥	ベース電流は、 （h_{FE}が１００だから、）	mA
⑦	ベース抵抗の両端電圧は、	V
⑧	V_{BE}は、	V
⑨	オペアンプの出力電圧は、	V

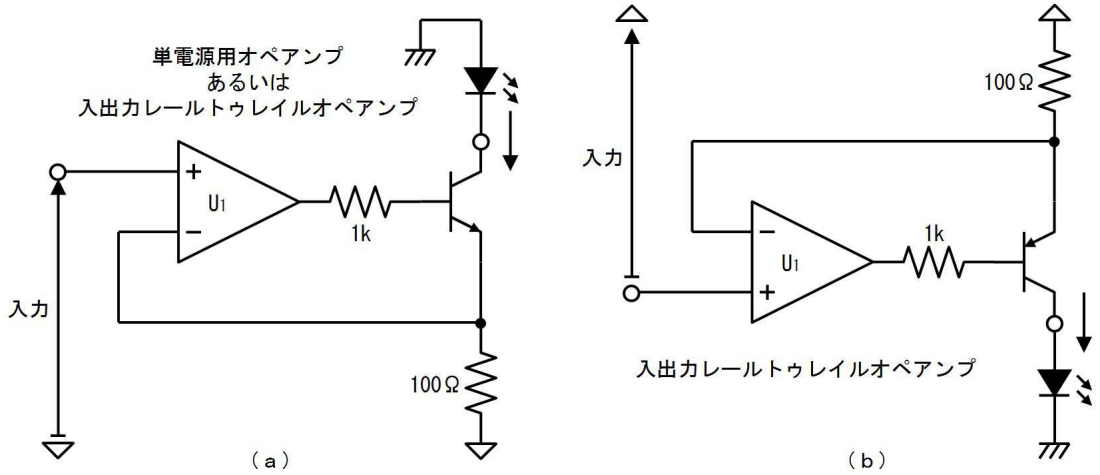
5.2. 答



番号	質問	値
①	この回路は負帰還が掛かっていますか。 （選んで下さい）	掛かっている 掛かっていない
②	＋入力と－入力の間の電圧は、 （①から、）	０Ｖ
③	１００Ωの両端電圧は、	１Ｖ
④	１００Ωに流れる電流は、	１００ｍＡ
⑤	コレクタ電流（出力電流）は、	１００ｍＡ
⑥	ベース電流は、 （h_{FE}が１００だから、）	１ｍＡ
⑦	ベース抵抗の両端電圧は、	１Ｖ
⑧	V_{BE}は、	０．７Ｖ
⑨	オペアンプの出力電圧は、	２．７Ｖ

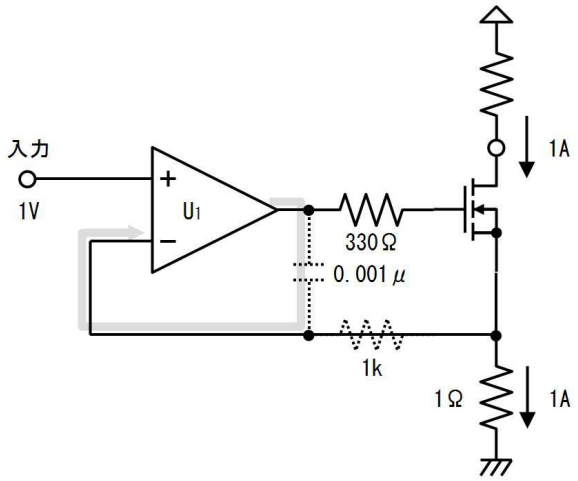
単一電源で上図の回路を動作させる場合は、０Ｖ付近の電圧を入出力できる単一電源用オペアンプ（ＬＭ３５８やＬＭ２９０４等）を使用します。

下図（ａ）のように単電源用オペアンプ（あるいは、レールトゥレイルオペアンプ）を用いれば、マイナス電源に向かってアースから電流を吸い込む動作ができます。ただし、入力電圧はマイナス電源を基準として加える必要があります。



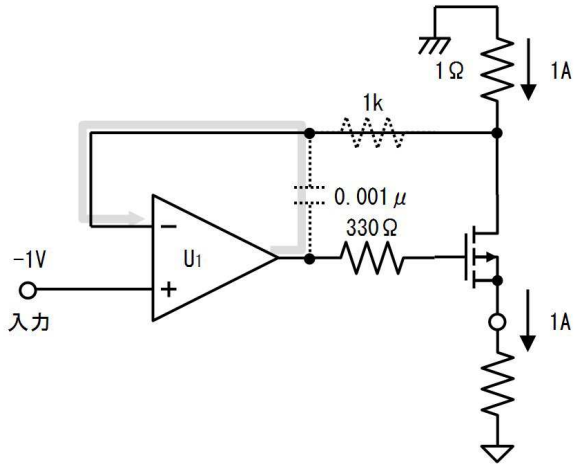
上図（ｂ）のように、ＰＮＰトランジスタとレールトゥレイルオペアンプを用いれば、プラス電源からアースに向かって電流を吐き出す動作もできます。ただし、入力電圧はプラス電源を基準として加える必要があります。

下図に示すように、ＭＯＳＦＥＴ（Ｎチャネル）を用いれば、オペアンプの出力電流が小さくても、大きな電流を制御できます。



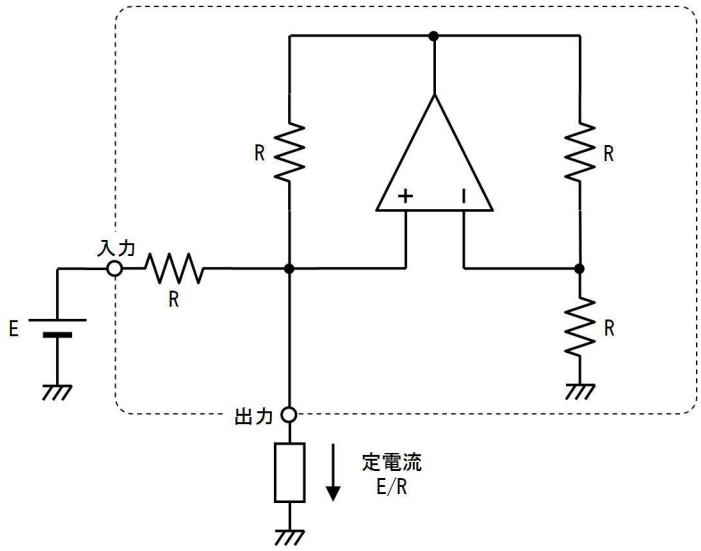
大型のＭＯＳＦＥＴのゲートには大きな容量があるので、オペアンプでは素早く充電できません。そのため動作が遅れて発振する場合があります。この場合、上図に点線で示すように１ｋΩと０．００１μＦを追加して、高い周波数では、オペアンプの出力が直接－入力に負帰還されるようにします。（２Ｎ７０００等の小形ＭＯＳＦＥＴでは、このＣＲは必要ありません。）

下図のようにＰチャネルＭＯＳＦＥＴを用いれば、電流を吐き出す定電流回路を作ることができます。



6. ホーランド回路

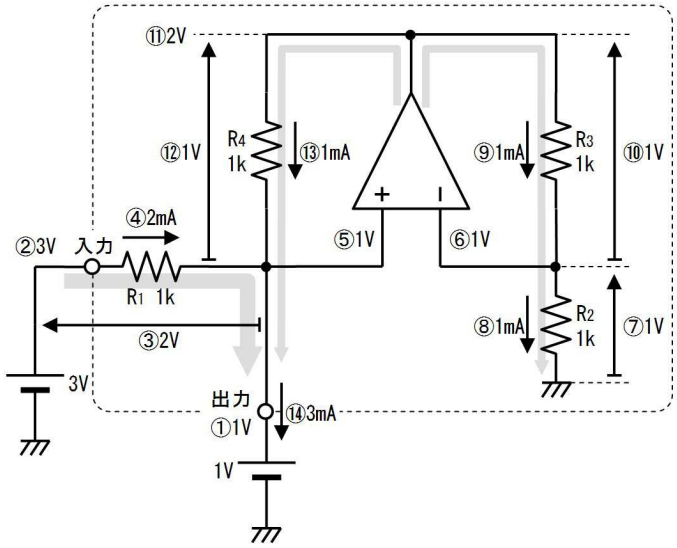
下図は「ホーランド回路（ホーランドの電流ポンプ：Howland Current Pump）」という定電流回路で、大きな電流は流せませんが、電流を吐き出すことも、吸い込むこともできます。また、入力端子の電圧で、流す電流を自由に変更できます。



ホーランド回路は、入力端子の電圧で決まる電流を、（出力端子に加わる電圧や、接続する負荷に関係なく）出力端子に流すことのできる定電流回路です。

6.1. 確認

下図を参考に下表に書き込んで、入力端子に３Ｖ、出力端子に１Ｖを加えた場合の、ホーランド回路の出力電流を確認してください。



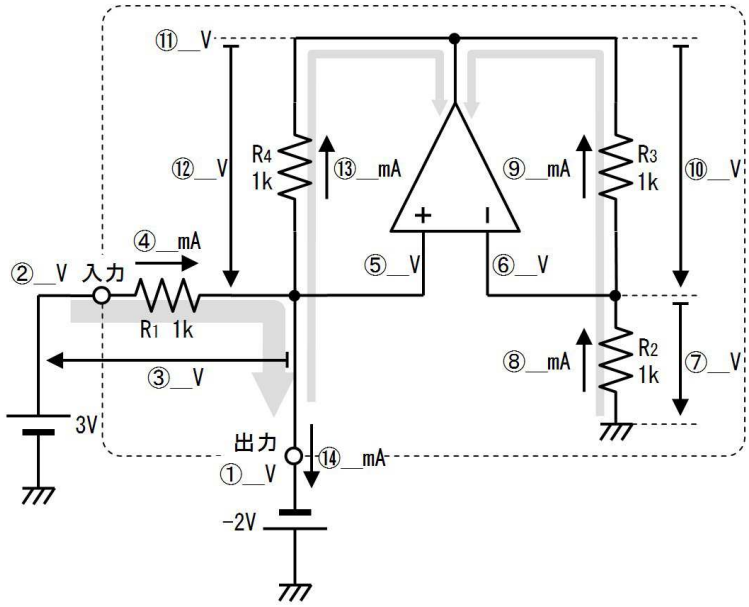
番号	質問	値
①	出力端子の電圧は、 （１Ｖの電池が接続されているので、）	Ｖ
②	入力端子の電圧は、 （３Ｖの電池が接続されているので、）	Ｖ
③	R_1の両端電圧は、 （①と②から、）	Ｖ
④	R_1に流れる電流は、	ｍＡ
⑤	－入力の電圧は、（①から、）	Ｖ
⑥	＋入力の電圧は、 （⑤と、R_4で負帰還が掛かっているから、）	Ｖ
⑦	R_2の両端電圧は、（⑥から、）	Ｖ
⑧	R_2に流れる電流は、	ｍＡ
⑨	R_3に流れる電流は、 （入力端子には電流が流れないから、）	ｍＡ
⑩	R_3の両端電圧は、	Ｖ
⑪	オペアンプの出力端子の電圧は、（⑦と⑩から、）	Ｖ
⑫	R_4の両端電圧は、（⑤と⑪から、）	Ｖ
⑬	R_4に流れる電流は、	ｍＡ
⑭	出力端子から流れ出す電流は、 （④と⑬から、）	ｍＡ

6.2. 答

番号	質問	値
①	出力端子の電圧は、 （１Ｖの電池が接続されているので、）	１Ｖ
②	入力端子の電圧は、 （３Ｖの電池が接続されているので、）	３Ｖ
③	R_1の両端電圧は、 （①と②から、）	２Ｖ
④	R_1に流れる電流は、	２ｍＡ
⑤	－入力の電圧は、（①から、）	１Ｖ
⑥	＋入力の電圧は、 （⑤と、R_4で負帰還が掛かっているから、）	１Ｖ
⑦	R_2の両端電圧は、（⑥から、）	１Ｖ
⑧	R_2に流れる電流は、	１ｍＡ
⑨	R_3に流れる電流は、 （入力端子には電流が流れないから、）	１ｍＡ
⑩	R_3の両端電圧は、	１Ｖ
⑪	オペアンプの出力端子の電圧は、（⑦と⑩から、）	２Ｖ
⑫	R_4の両端電圧は、（⑤と⑪から、）	１Ｖ
⑬	R_4に流れる電流は、	１ｍＡ
⑭	出力端子から流れ出す電流は、 （④と⑬から、）	３ｍＡ

6.3. 練習

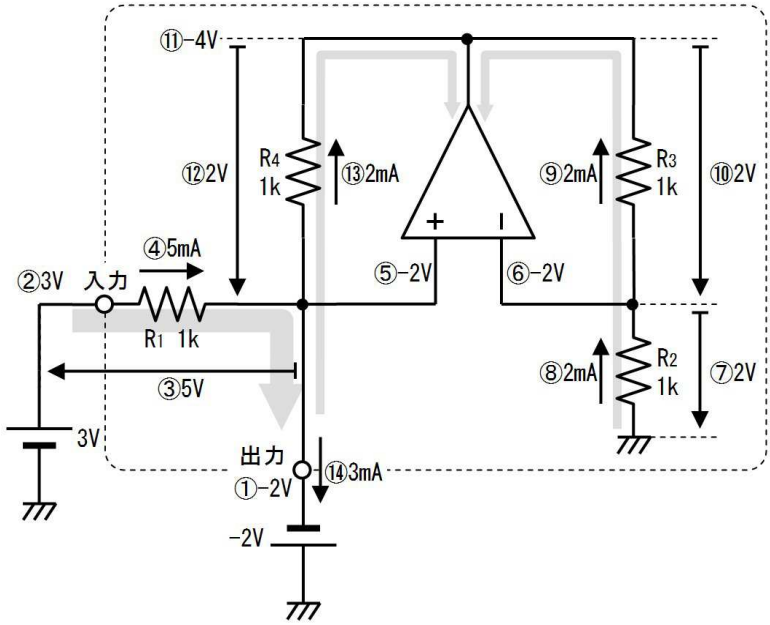
下図を参考に下表に書き込んで、入力端子に３Ｖ、出力端子に－２Ｖを加えた場合の、ホーランド回路の出力電流を確認してください。（電圧・電流は矢印の向きをプラスとして記入してください）



番号	質問	値
①	出力端子の電圧は、 （－２Ｖの電池が接続されているので、）	Ｖ
②	入力端子の電圧は、 （３Ｖの電池が接続されているので、）	Ｖ
③	R_1の両端電圧は、 （①と②から、）	Ｖ
④	R_1に流れる電流は、	ｍＡ
⑤	－入力の電圧は、（①から、）	Ｖ
⑥	＋入力の電圧は、 （⑤と、R_4で負帰還が掛かっているから、）	Ｖ
⑦	R_2の両端電圧は、（⑥から、）	Ｖ
⑧	R_2に流れる電流は、	ｍＡ
⑨	R_3に流れる電流は、 （入力端子には電流が流れないから、）	ｍＡ
⑩	R_3の両端電圧は、	Ｖ
⑪	オペアンプの出力端子の電圧は、（⑦と⑩から、）	Ｖ
⑫	R_4の両端電圧は、（⑤と⑪から、）	Ｖ
⑬	R_4に流れる電流は、	ｍＡ
⑭	出力端子から流れ出す電流は、	ｍＡ

	（④と⑬から、）	

6.4. 答

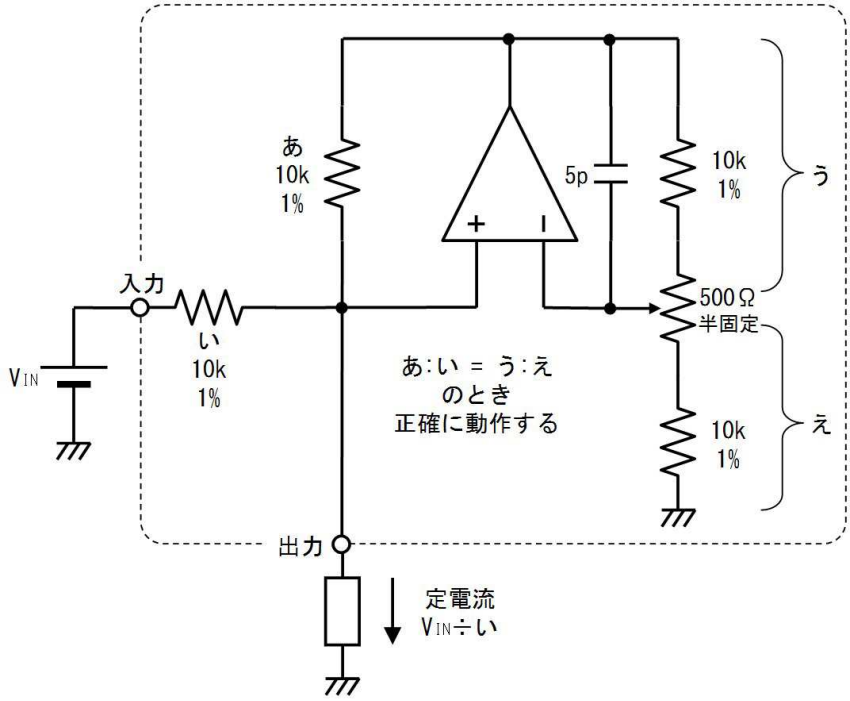


番号	質問	値
①	出力端子の電圧は、 （－２Ｖの電池が接続されているので、）	－２Ｖ
②	入力端子の電圧は、 （３Ｖの電池が接続されているので、）	３Ｖ
③	R_1の両端電圧は、 （①と②から、）	５Ｖ
④	R_1に流れる電流は、	５ｍＡ
⑤	－入力の電圧は、（①から、）	－２Ｖ
⑥	＋入力の電圧は、 （⑤と、R_4で負帰還が掛かっているから、）	－２Ｖ
⑦	R_2の両端電圧は、（⑥から、）	２Ｖ
⑧	R_2に流れる電流は、	２ｍＡ
⑨	R_3に流れる電流は、 （入力端子には電流が流れないから、）	２ｍＡ
⑩	R_3の両端電圧は、	２Ｖ
⑪	オペアンプの出力端子の電圧は、（⑦と⑩から、）	４Ｖ
⑫	R_4の両端電圧は、（⑤と⑪から、）	１Ｖ

⑬	R_4に流れる電流は、	2mA
⑭	出力端子から流れ出す電流は、 （④と⑬から、）	3mA

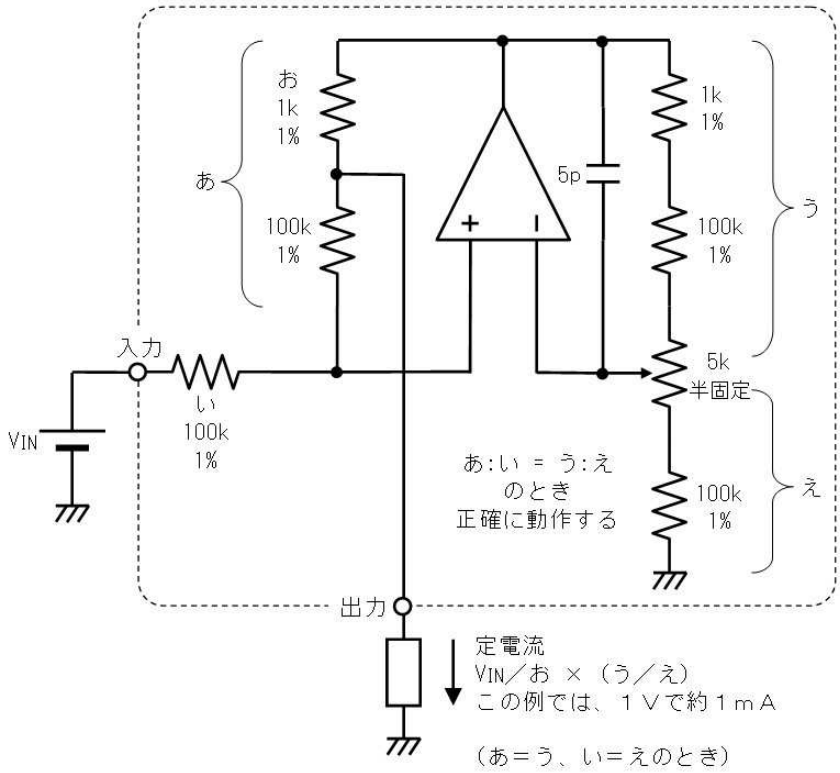
このように、ホーランド回路は出力端子の電圧が変化しても、出力端子には一定の電流が流れます。

下図は実用的な（高精度の）ホーランド回路です。ホーランド回路は抵抗の比率が、あ：い ＝ う：え の時に正確に動作します。このため半固定抵抗で う：え の比率を調節できるように工夫されています。５ｐのコンデンサは発振防止です。（精度の必要ない場合は調整を省略できます）



半固定の調整方法は次のとおりです。①半固定を「え」の方向に一杯回します。②入力を０Ｖに接続し、出力には何も接続しない状態で、オペアンプの出力電圧を測定します。（電圧は０Ｖです）③半固定を「う」の方向に回して行くと、オペアンプの出力電圧が急に上昇（あるいは、降下）する位置があります。その寸前が正しい設定位置です。

下図は改良型のホーランド回路で「い」の抵抗を大きくできるため、入力端子に流れ込む電流が僅かで済みます。また「お」の抵抗を小さくできるので、出力に効率良く電流を流すことができます。



上図の回路も、抵抗の比率が あ：い＝う：え のとき正確に動作し、出力電流は（あ＝う、い＝えの場合）

出力電流＝（入力電圧÷お）×（う÷え）

です。上の例では、入力電圧が１Ｖのとき、Ｅｘｃｅｌで=(1/1E3)*(100E3/100E3)と計算して、約１ｍＡです。

７．対数圧縮回路

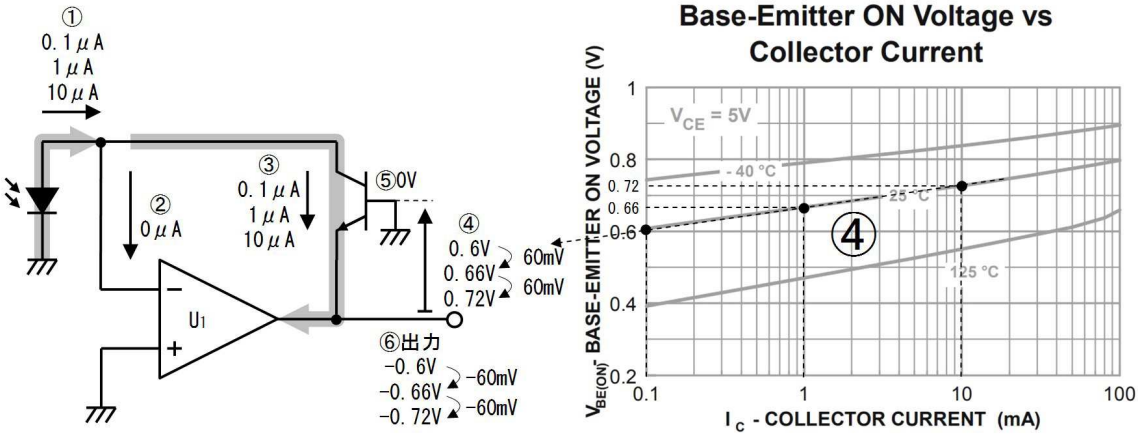
たとえばフォトダイオードが発生する電流（光電流）は、真昼と暗闇で１万倍以上変化します。このため、測定にはレンジ切り替えが必要です。また、ＡＤ変換してマイコンに取り込む場合も、ビット数の多い高価なＡＤＣが必要になります。

しかし、下図の回路で光電流を処理すると、この例（２Ｎ３９０４を使用）では、光電流が１０倍になるごとに、出力電圧が６０ｍＶずつ低下するため、０．１μＡ～１０μＡの２桁の変化を－０．６Ｖ～－０．７２Ｖの変化に圧縮できます。（後に示すように、１０ｎＡ～１０μＡの６桁の変化であっても、－０．３６Ｖ～－０．７２Ｖの変化に圧縮できます）

このようにして、一旦信号を圧縮してしまえば、レンジ切り替えが不要になりますし、ビット数の少ないＡＤＣでもマイコンに取り込むことができます。

上に説明したような、数桁にわたって変化する入力を（例えば、１０倍で６０ｍＶといった規則で）圧縮する回路を「ログアンプ」あるいは「対数圧縮回路」と呼びます。

下図左側の対数圧縮回路は、下図右側のグラフに示すように（例えば２Ｎ３９０４では）I_Cが１０倍に増えると、V_{BE}が６０ｍＶ大きくなる現象を利用しています。（I_CとV_{BE}の関係は品種や個体差があります）



7.1. 確認

上図の回路の動作を、下表に書き込みながら確認してください。

番号	質問	値	値	値
①	フォトダイオードの光電流が ０．１μＡ～１０μＡまで １００倍変化した場合を考えます。	０．１mA	１mA	１０mA
②	ー入力に流れる電流は、	mA	mA	mA
③	コレクタ電流I_Cは、 （上図右のグラフから、）	mA	mA	mA
④	ベースエミッタ間電圧V_{BE}は、	V	V	V
⑤	ベース電圧V_Bは、	V	V	V
⑥	出力電圧V_Oは、	V	V	V

7.2. 答

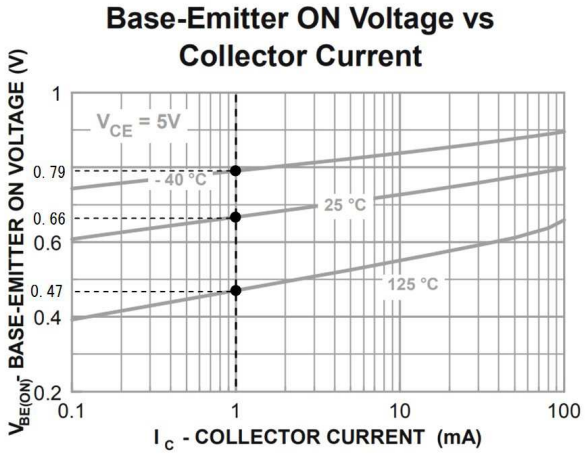
番号	質問	値	値	値
①	フォトダイオードの光電流が ０．１μＡ～１０μＡまで １００倍変化した場合を考えます。	０．１mA	１mA	１０mA
②	ー入力に流れる電流は、	０mA	０mA	０mA
③	コレクタ電流I_Cは、 （上図右のグラフから、）	０．１mA	１mA	１０mA
④	ベースエミッタ間電圧V_{BE}は、	０．６V	０．６６V	０．７２V
⑤	ベース電圧V_Bは、	０V	０V	０V

⑥	出力電圧V_Oは、	－0．6V	－0.66V	－0.72V

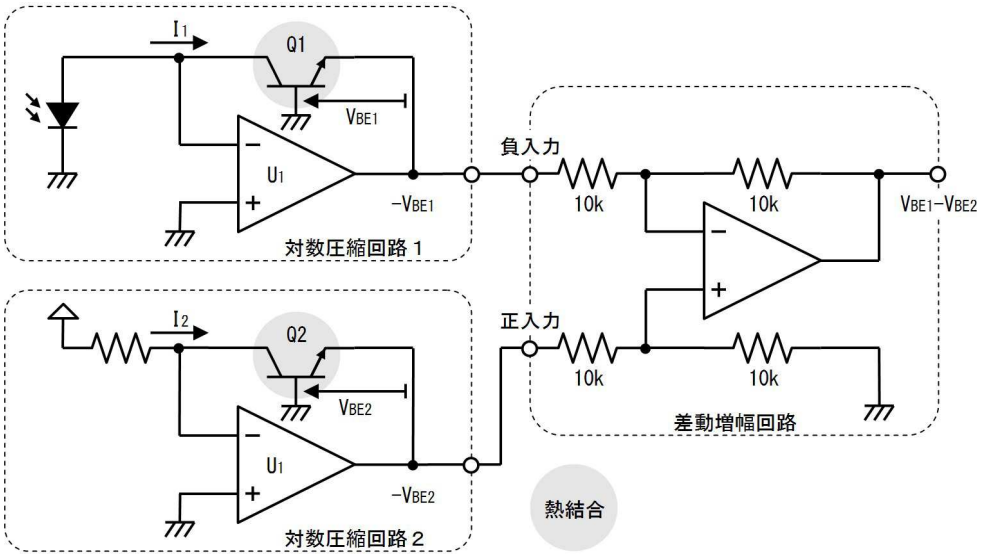
上図右のグラフには記載されていませんが、左側に延長しても特性は直線のまま（60mVで10倍の状態を保って）続いています。ですから下表のように、さらに広い範囲の電流で対数圧縮を行うことができます。

入力電流 （I_C）	出力電圧 （V_{BE}）
10nA	－0．36V
100nA	－0．42V
1μA	－0．48
10μA	－0．54V
100μA	－0．6V
1mA	－0．66V
10mA	－0．72V

このように大変便利な対数圧縮回路ですが、上図の基本回路のままでは、（V_{BE}が温度で変化するため）温度で出力電圧が大きく変化してしまいます。下図は既に掲載したI_C－V_{BE}のグラフです。



上図から、コレクタ伝優雅1mAであっても、温度が－40℃、25℃、125℃、と変化すると、VBEが、0．79V、0．66V、0．47V、と大きく変化することが分かります。そこで下図のように、温度の影響を打ち消す工夫をします。



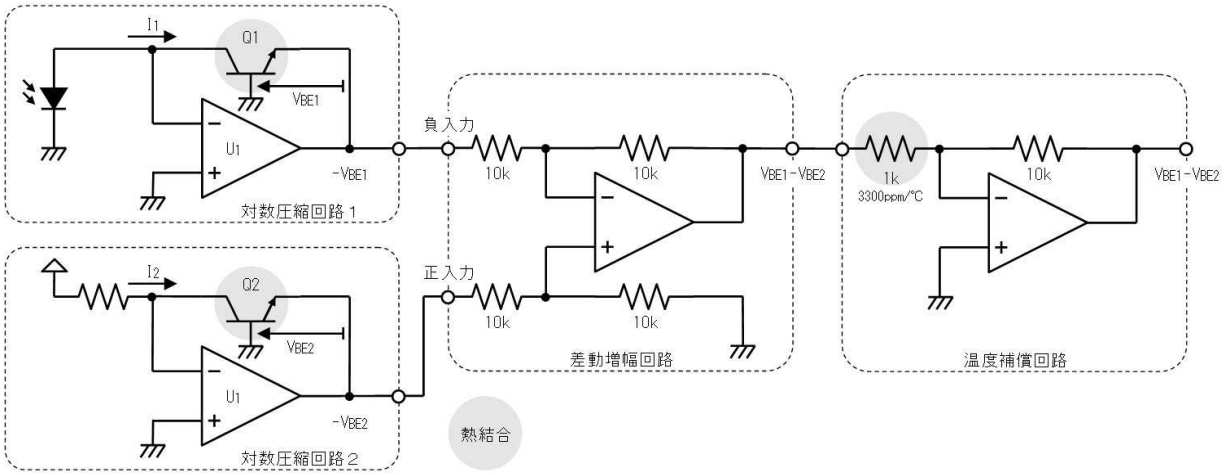
上図では、対数圧縮回路１はV_{BE1}を出力し、対数圧縮回路２はV_{BE2}を出力します。V_{BE1}もV_{BE2}も（既に説明したように）温度で変化します。そこで、差動増幅回路でV_{BE1}とV_{BE2}の差を求めて出力します。ここでQ_1とQ_2を熱結合して（同じ温度に保って）おくと、（気温が変化しても）V_{BE1}とV_{BE2}が同じ変化をしますから、両者の差を求めた出力電圧は温度の影響を殆ど受けなくなります。

そのうえで、対数圧縮回路１にだけ入力電流I_1を入力し、対数圧縮回路２には常に一定の電流I_2を入力します。これによって、差動増幅回路の出力には、入力電流I_1に対応した電圧が出力されます。

このように、入力に対応したV_{BE}から基準のV_{BE}を引く方法（差を求める方法）で、V_{BE}の温度変化が出力に与える影響をかなり小さくできます。出力電圧が温度で１０～２０％変化しても気にならない場合は、この方法が利用できます。

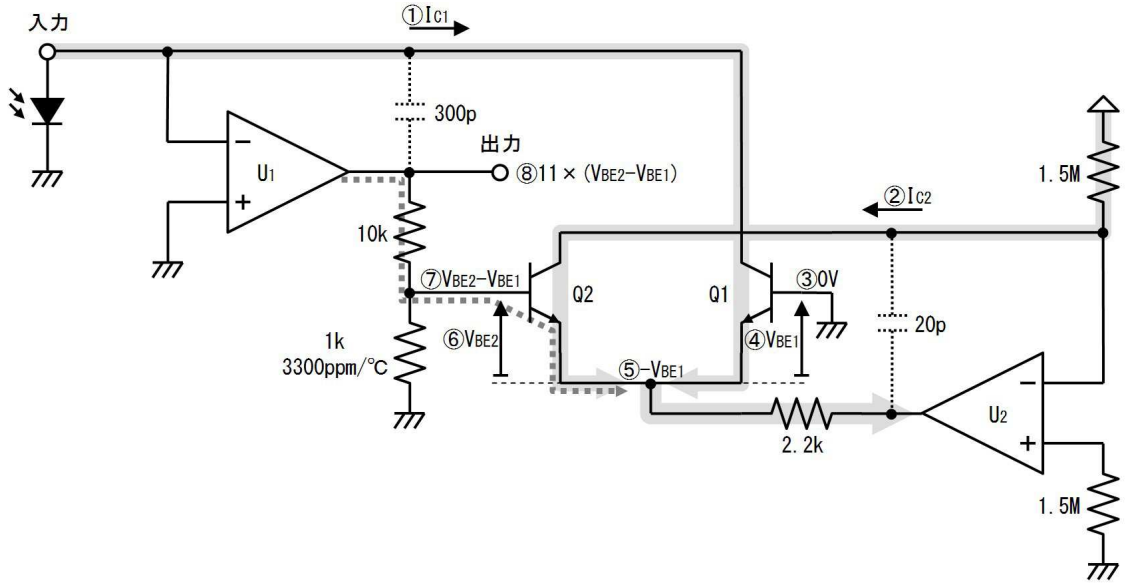
さて、上記の「差を求める方法」でも多少の温度変化が生じる理由は、上図のグラフの傾きが、温度が高い程大きくなるためです。このため、出力電圧は絶対温度に比例して変化します。たとえば、絶対温度３００度K（２７℃）で１０Vが出力されているとき、絶対温度が３３０度K（５７℃）に上昇すると、１１Vが出力されます。

そこで、下図のように、３０℃で１０％抵抗値が高くなる抵抗（温度係数３３００ｐｐｍ／℃の抵抗）を使って温度による出力の変化を打ち消します。



上図の回路ではオペアンプの使用個数が多いですし、（今は殆ど販売されていませんが）２つの特性の揃ったトランジスタを１つのパッケージに入れた「デュアルトランジスタ」は２つのトランジスタのエミッタが繋がっている場合が多いため、下図のように工夫した回路が良く使われます。下図の回路は

かなり凝った構成になっていますから、直ちに理解できなくても問題ありません。



上図の回路では、U_1はQ_2をエミッタフォロアのように動作させてQ_1のエミッタ電圧を制御し、Q_1に入力電流①I_{C1}を流して④V_{BE1}を発生させます（つまり、U_1の入力電流I_{C1}にはV_{BE1}が対応します）。U_2はQ_2のエミッタを制御して、一定の電流②I_{C2}を流します（つまり、U_2の入力電流I_2にはV_{BE2}が対応します）。

7.3. 確認

上図の回路の出力電圧を、下表に記入して確認してください。

番号	質問	値
①	入力から流れ込む電流をI_{C1}とします。	―
②	抵抗から流れ込む一定の電流をI_{C2}とします。	―
③	Q_1のベース電圧は、 （アースに接続されているから、）	V
④	Q_1のV_{BE}はI_{C1}に対応したV_{BE1}です。	―
⑤	Q_2のエミッタ電圧は、（選んで下さい） （③と④から、）	$-V_{BE2}$ $-V_{BE1}$
⑥	Q_2のV_{BE}はI_{C2}に対応したV_{BE2}です。	―
⑦	Q_2のベース電圧は、（選んで下さい） （⑤と⑥から、）	$V_{BE1}-V_{BE2}$ $V_{BE2}-V_{BE1}$
⑧	出力端子の電圧は、（選んで下さい） （１０ｋと１ｋから、）	$11\times V_{BE2}-V_{BE1}$ $11\times V_{BE2}-V_{BE1}$

7.4. 答

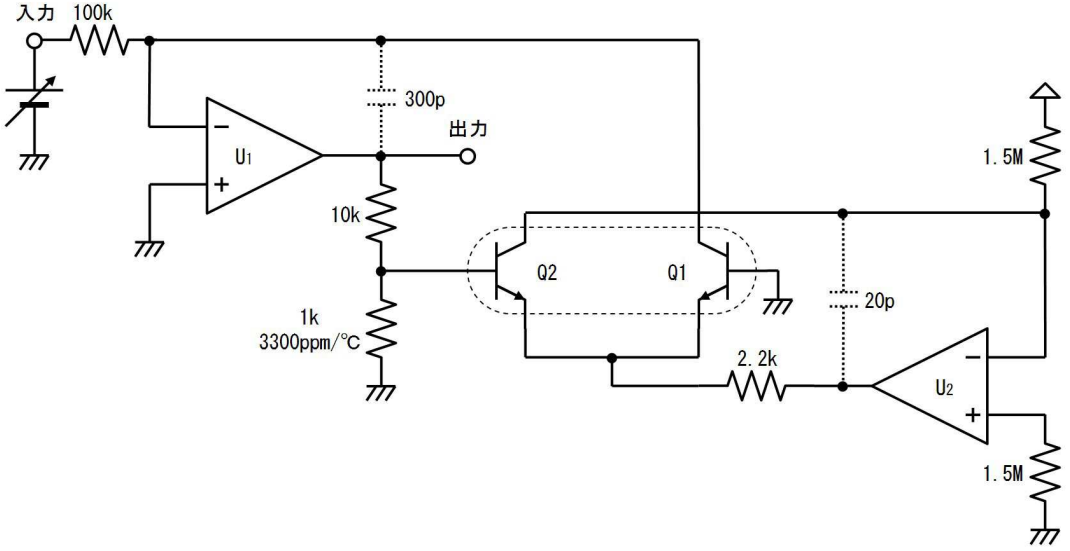
番号	質問	値

①	入力から流れ込む電流をI_{C1}とします。	－
②	抵抗から流れ込む一定の電流をI_{C2}とします。	－
③	Q_1のベース電圧は、 （アースに接続されているから、）	０Ｖ
④	Q_1のV_{BE}はI_{C1}に対応したV_{BE1}です。	－
⑤	Q_2のエミッタ電圧は、（選んで下さい） （③と④から、）	$-V_{BE2}$ $\boxed{-V_{BE1}}$
⑥	Q_2のV_{BE}はI_{C2}に対応したV_{BE2}です。	－
⑦	Q_2のベース電圧は、（選んで下さい） （⑤と⑥から、）	$V_{BE1}-V_{BE2}$ $\boxed{V_{BE2}-V_{BE1}}$
⑧	出力端子の電圧は、（選んで下さい） （１０ｋと１ｋから、）	$11\times V_{BE2}-V_{BE1}$ $\boxed{11\times V_{BE2}-V_{BE1}}$

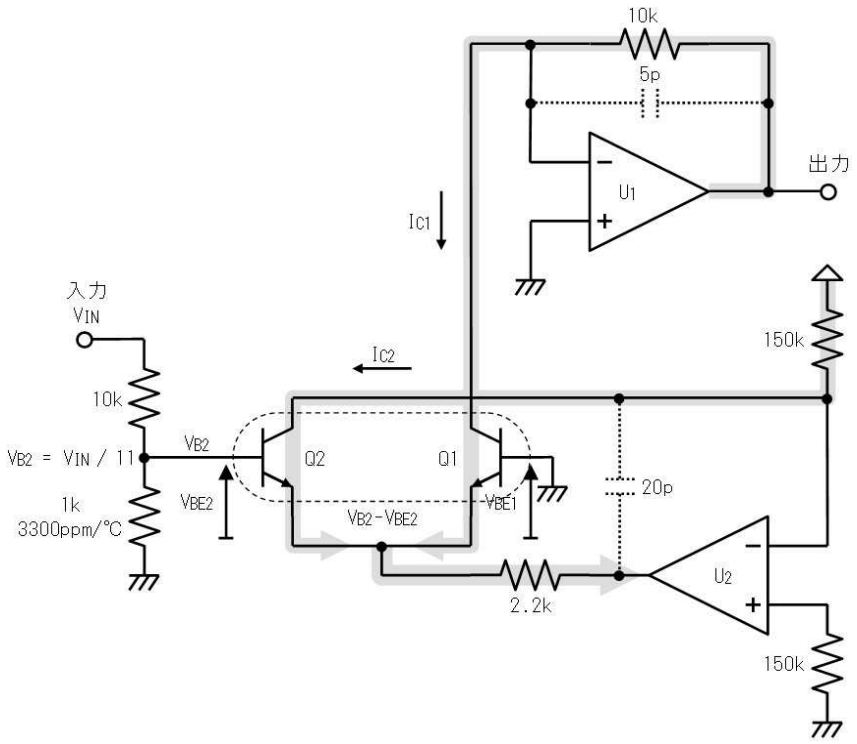
このように出力には２つのV_{BE}の差が出力されます。また、Q_2のベースに接続された＋３３００ｐｐｍ／℃（＋０．３％／℃）の抵抗で絶対温度に比例した出力電圧の上昇も防いでいます。Q_1、Q_2、１ｋΩは熱結合しておきます。

デュアルトランジスタは今や入手が困難になっていますから、２つのトランジスタを密着して接着（変性シリコーン接着剤等）し、アルミや銅箔の粘着テープを巻きつけて熱結合します。

この回路に（フォトダイオード等を接続して）電流を入力するのではなく、電圧を入力する場合は、下図に示すように、U_1の入力に抵抗を追加します。



下図の回路を使用して、対数圧縮した電圧を元の電圧に戻すこともできます。このような回路をアンチログアンプ（逆対数増幅器）と呼びます。



上図のU_2は、一定のコレクタ電流I_{C2}をQ_2に流して、一定のV_{BE2}を発生させます。入力電圧は１０ｋΩと１ｋΩで分圧されてQ_2のベースに加えられ、その結果Q_2のエミッタはV_{B2}（分圧された入力電圧）より、V_{BE2}だけ低い電圧になります。Q_1はベースが接地されているため、Q_2のエミッタ電圧（$V_{B2}-V_{BE2}$）に対応したコレクタ電流I_{C1}が流れます。U_1はI_{C1}を１０ｋΩで電圧に変換して出力します。

さて、ここまで説明した対数圧縮回路では、トランジスタのI_C—V_{BE}特性に対数の関係があることを利用しました。ところで下図に示すように、ダイオードのI_F—V_Fにも（トランジスタと同様の）対数の関係があります（１Ｎ４１４８の例）。グラフから、広いI_Fの範囲で、I_Fが１０倍になるとごとに、V_Fが約１２０ｍＶずつ上昇するという関係が維持されていることが分かります。

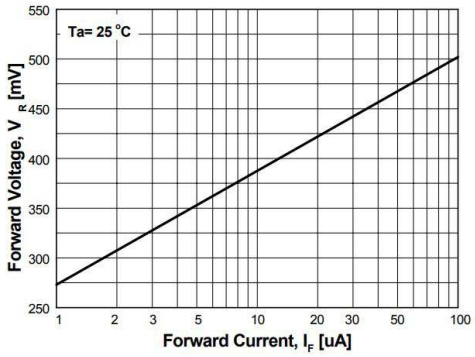


Figure 3. Forward Voltage vs Forward Current
VF - 1 to 100μA

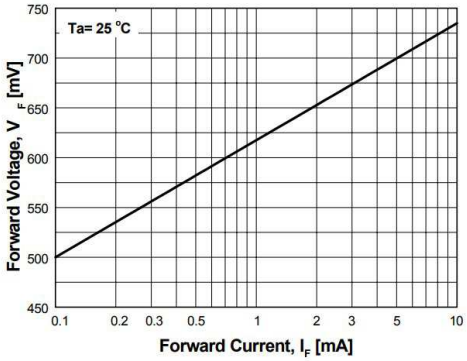
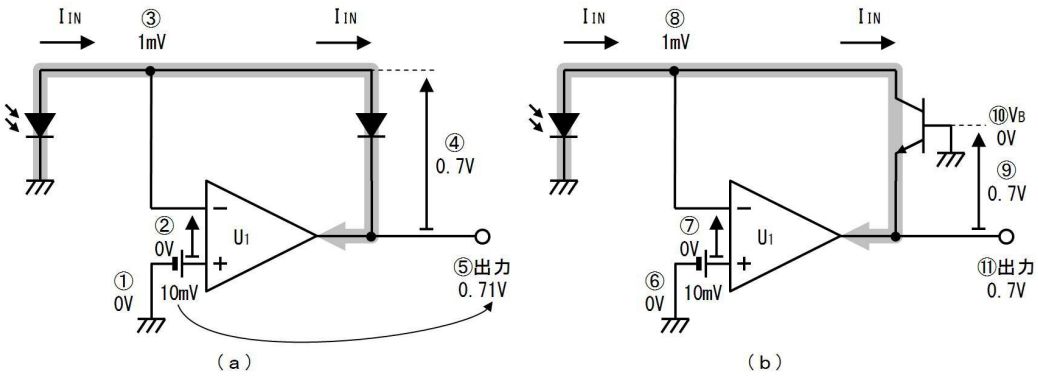


Figure 4. Forward Voltage vs Forward Current
VF - 0.1 to 10mA

このため下図（ａ）のようにダイオードを使用した回路で対数圧縮を行うこともできます。しかし、ダイオードを使った回路には次のような弱点があります。

つまり、トランジスタを使用した回路（ｂ）では、ベースがアースに接続されているため、オペアンプのオフセット電圧に関係なく、正確にV_{BE}が出力されました。しかし、ダイオードを使った回路では、オペアンプの入力オフセット電圧が出力に現れてしまいます。



7.5. 確認

上図（ａ）（ｂ）の各回路で、オフセット電圧の影響を確認してください。

番号	質問	値
	（ａ）の回路について考えます。 オペアンプにオフセット電圧が１０ｍＶあるとします。	－
①	＋入力の電圧は、（オフセット電圧の影響を考えて、）	ｍＶ
②	＋入力と－電圧の電圧差は、 （ダイオードで負帰還が掛かっているから、）	Ｖ
③	－入力の電圧は、	ｍＶ
④	ダイオードの両端電圧を０．７Ｖとします。	－
⑤	出力電圧は、 （③と④から、）	Ｖ
	（ｂ）の回路について考えます。 オペアンプにオフセット電圧が１０ｍＶあるとします。	－
⑥	＋入力の電圧は、（オフセット電圧の影響を考えて、）	ｍＶ
⑦	＋入力と－電圧の電圧差は、 （トランジスタで負帰還が掛かっているから、）	Ｖ
⑧	－入力の電圧は、	ｍＶ
⑨	トランジスタのV_{BE}を０．７Ｖとします。	
⑩	ベース電圧は、	Ｖ
⑪	出力電圧は、 （⑨と⑩から、）	Ｖ

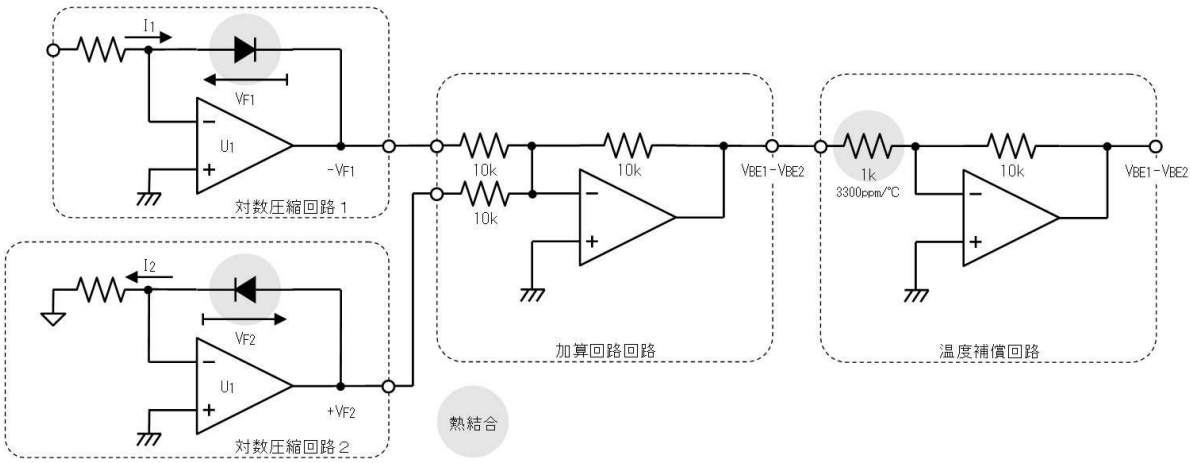
7.6. 答

番号	質問	値

	（ａ）の回路について考えます。 オペアンプにオフセット電圧が１０ｍＶあるとします。	－
①	＋入力の電圧は、（オフセット電圧の影響を考えて、）	１０ｍＶ
②	＋入力と－電圧の電圧差は、 （ダイオードで負帰還が掛かっているから、）	０Ｖ
③	－入力の電圧は、	１ｍＶ
④	ダイオードの両端電圧を０．７Ｖとします。	－
⑤	出力電圧は、 （③と④から、）	０．７１Ｖ
	（ｂ）の回路について考えます。 オペアンプにオフセット電圧が１０ｍＶあるとします。	－
⑥	＋入力の電圧は、（オフセット電圧の影響を考えて、）	１０ｍＶ
⑦	＋入力と－電圧の電圧差は、 （トランジスタで負帰還が掛かっているから、）	０Ｖ
⑧	－入力の電圧は、	１ｍＶ
⑨	トランジスタのV_{BE}を０．７Ｖとします。	
⑩	ベース電圧は、	０Ｖ
⑪	出力電圧は、 （⑨と⑩から、）	０．７Ｖ

このように電流を出力する（フォトダイオードのような）素子を入力に接続して「電流を入力」して使用する場合は、（オペアンプのオフセット電圧の影響を回避できるので）トランジスタを用いた回路が有利です。

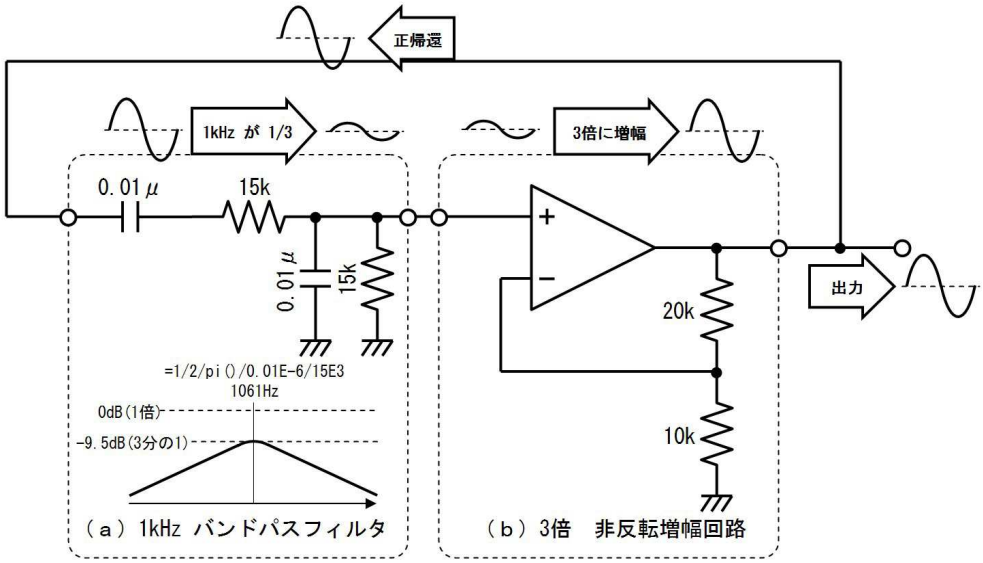
逆に、入力に抵抗を追加して「電圧を入力」して使用する場合は、トランジスタを用いてもオフセット電圧の影響が（入力側で）発生しますから、ダイオードを用いた回路でもさほど不利ではありません。ただし、温度の影響を無くすために２つのV_Fの差を求めて、さらに絶対温度の補償を行うとなると、下図のように意外と複雑な回路となり、逆にトランジスタを使った回路の方が簡単になります。



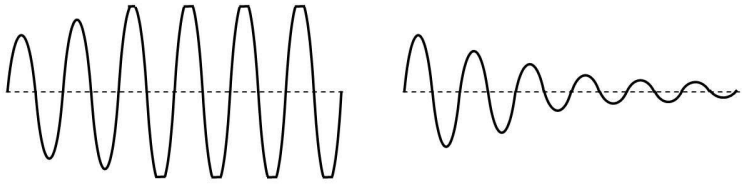
８．正弦波発生回路

正弦波を発振する回路は数多くあります。下図はその一例で「ウィーンブリッジ発振回路」と呼ばれています。

下図（ａ）のバンドパスフィルタは中心周波数が約１ｋＨｚで、１ｋＨｚの信号が３分の１に弱まる特性を持っています。そこで、フィルタの出力を下図（ｂ）の増幅回路で３倍に増幅して元の振幅に戻し、再びフィルタに入力（正帰還）します。これによって１ｋＨｚの信号が回路の中をいつまでも回り続け、発振します。

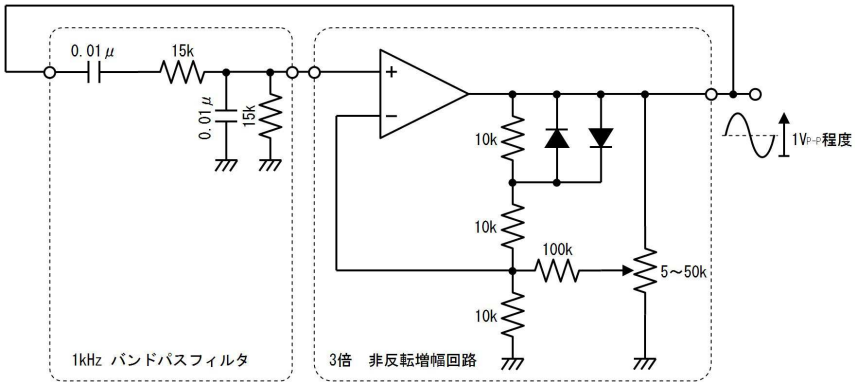


上図の基本回路は、同図（ｂ）の増幅率が３倍より少しでも大きいと、下図（ａ）のように、波は次第に大きくなり、上下が歪んでしまいます。逆に増幅率が、３倍より少しでも小さいと、下図（ｂ）のように波が次第に小さくなり、止まってしまいます。ですから、机の上にボールペンを（先端を下にして）立てるのが無理なのと同様に、上図の基本回路では、出力を一定の振幅を保つことはできません。



（ａ）３倍よりちょっと大きいとき　　（ｂ）３倍よりちょっと小さいとき

下図の回路は、３本の１０ｋΩで増幅率を３倍に設定し、ボリウム（５ｋΩから、５０ｋΩまで、いずれの値でも使用可能）と１００ｋΩで増幅率を微調整できるように工夫しています。しかし、たとえ増幅率を微調整しても、波は次第に大きくなり歪むか、次第に小さくなって無くなります。ですから、下図の回路では、抵抗と並列にダイオードを接続しています。出力振幅が大きくなると、ダイオードに電流が流れ（抵抗が小さくなったのと似た効果を生じて）増幅率が下がり、大きく歪むことを防いでいます。



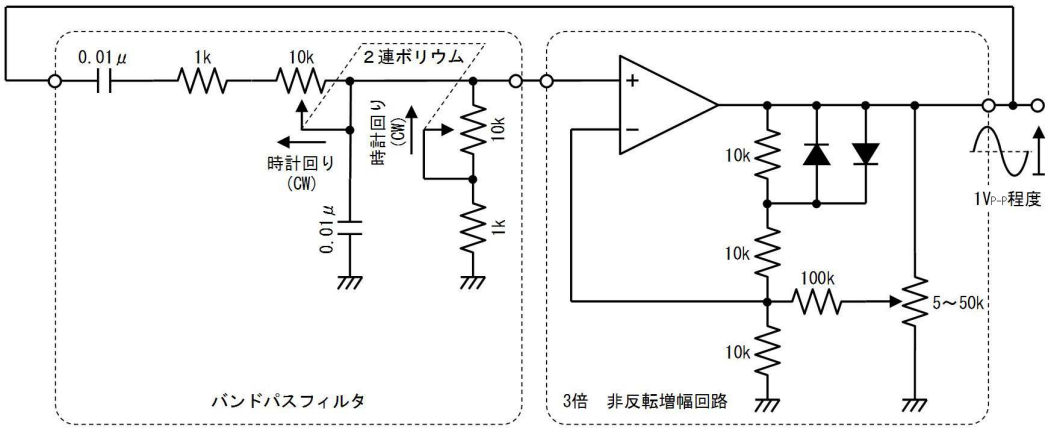
上の回路ではボリウムを調整すると出力振幅が変化します。振幅が大きい程、ダイオードが導通して波形が歪みますから、ダイオードに微かに電流が流れる程度、つまり出力が１V_{P-P}程度になるよう、ボリウムを調整します。

上の回路の発振周波数はバンドパスフィルタの中心周波数で決まり、抵抗をＲ１、コンデンサをＣ１とすれば（２つのコンデンサと抵抗は同じ値にします）発振周波数は

=1/2/PI()/C1/R1

で求めることができます。

周波数を可変する場合は、下図のように２連ボリウムを使います。下図の場合周波数を１：１０程度に可変できます。オペアンプにＣＭＯＳタイプやＦＥＴ入力タイプを使用すれば、２連ボリウムに１００ｋΩの品種を使用して、周波数を１００倍可変することもできます。

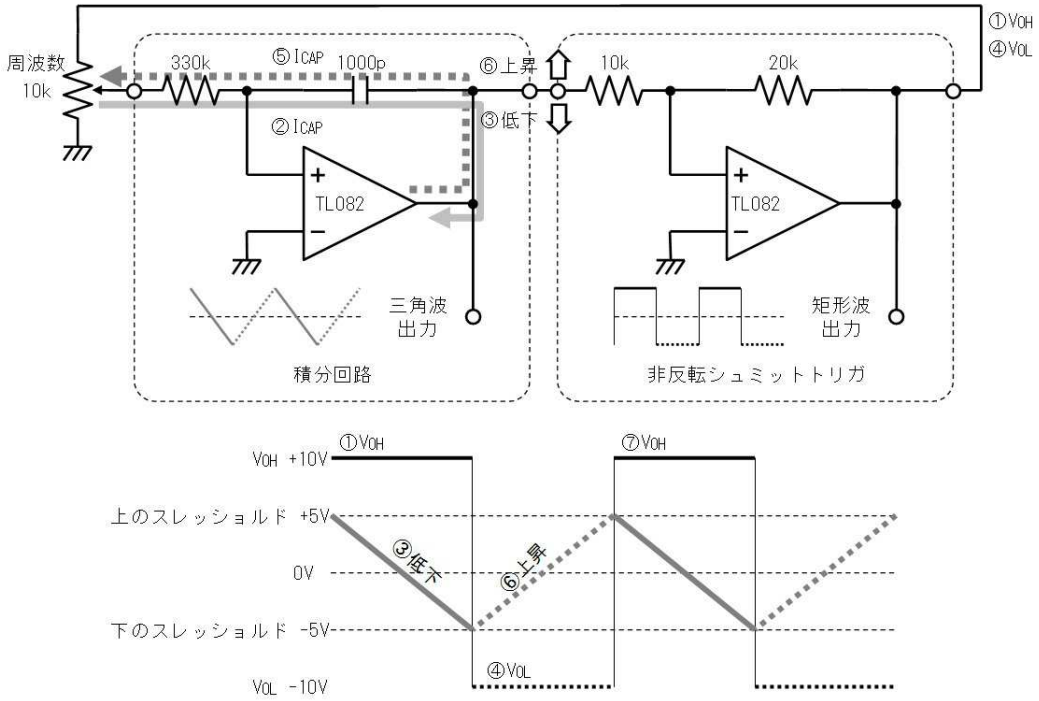


２連ボリウムで周波数を大きく可変したとき、（２連ボリウムやコンデンサの性能によっては）回路図右側のボリウム（５～５０ｋΩ）も、多少調節する必要が生じる場合があります。

９．三角波発生回路

下図の回路は「ファンクションゼネレータ」と呼ばれ、三角波と矩形波を同時に発生できます。積分回路と非反転シュミットトリガを接続した回路です。

ファンクションゼネレータは、既に練習した「無安定マルチバイブレータ」のＣＲ積分回路の代りに、オペアンプによる積分回路を使用しているため、綺麗な三角波が出力されます。動作の仕組みは無安定マルチバイブレータと良く似ています。



９.１. 確認

上図を参考に下表の選択肢を選びながらファンクションゼネレータの動作を確認してください。

番号	質問	選択肢
①	非反転シュミットトリガはV_{OH}（１０Ｖ）を出力しているとします。	ー
②	シュミットトリガの出力が積分回路に入力されているから、このとき積分回路のコンデンサに流れる電流の向きは、	右向き 左向き
③	上の②の向きに電流が流れるため、積分器の出力電圧は、	上昇 低下
④	積分器の出力が下のスレッショルドに達すると、非反転シュミットトリガの出力は、	ＶＯＨに反転 ＶＯＬに反転
⑤	積分回路のコンデンサに流れる電流の向きは、 （シュミットトリガの出力が積分回路に入力されているから、）	右向き 左向き
⑥	上の②の向きに電流が流れるため、積分器の出力電圧は、	上昇 低下
⑦	積分器の出力が上のスレッショルドに達すると、非反転	ＶＯＨに反転

	シュミットトリガの出力は、	ＶＯＬに反転
⑧	このようにして、再び①の状態に戻って繰り返します。	ー

9.2. 答

番号	質問	選択肢
①	非反転シュミットトリガはV_{OH}（１０Ｖ）を出力しているとします。	ー
②	シュミットトリガの出力が積分回路に入力されているから、このとき積分回路のコンデンサに流れる電流の向きは、	右向き 左向き
③	上の②の向きに電流が流れるため、積分器の出力電圧は、	上昇 低下
④	積分器の出力が下のスレッショルドに達すると、非反転シュミットトリガの出力は、	ＶＯＨに反転 ＶＯＬに反転
⑤	積分回路のコンデンサに流れる電流の向きは、 （シュミットトリガの出力が積分回路に入力されているから、）	右向き 左向き
⑥	上の②の向きに電流が流れるため、積分器の出力電圧は、	上昇 低下
⑦	積分器の出力が上のスレッショルドに達すると、非反転シュミットトリガの出力は、	ＶＯＨに反転 ＶＯＬに反転
⑧	このようにして、再び①の状態に戻って繰り返します。	ー

ファンクションゼネレータの発振周波数は、出力が低下するのに必要な時間と、出力が上昇するのに必要な時間を求め、両者を合計して周期を求めて計算します。

まず、出力が低下するのに必要な時間は、ボリウムを最大（最も高い周波数）に設定した場合、今回例のように、上のスレッショルドと下のスレッショルドの差（V_{HY}）が１０Ｖなら、

出力が低下するのに必要な時間 ＝ １０Ｖ × ３３０ｋ × １０００ｐ ／ V_{OH}

Ｅｘｃｅｌで、=10*330E3*1000E-12/10と計算して、０．３３ｍ秒

（＝ V_{HY} × R_{IN} × C_F ／ V_{OH}）

同様に

出力が上昇するのに必要な時間 ＝ １０Ｖ × ３３０ｋ × １０００ｐ ／ V_{OL}

Ｅｘｃｅｌで、=10*330E3*1000E-12/10と計算して、０．３３ｍ秒

（＝ V_{HY} × R_{IN} × C_F ／ V_{OL}）

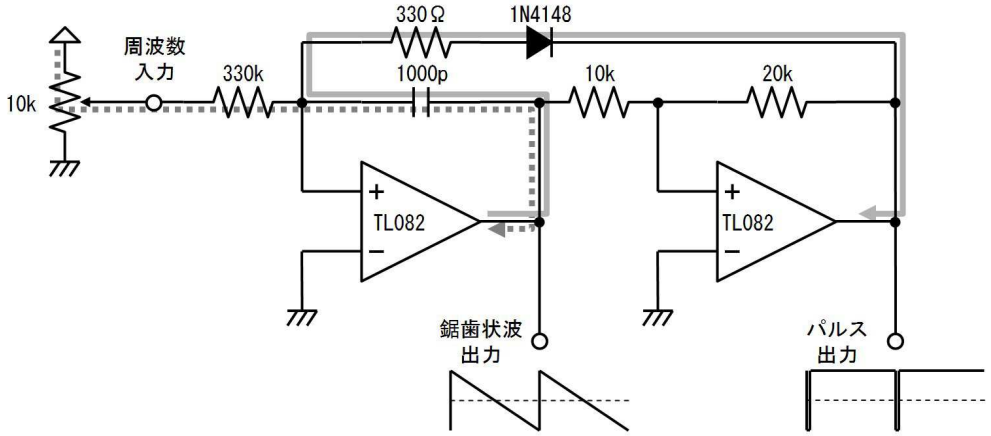
と計算することができます。ですから（ボリウムを最大にした場合の）発振周期は０．６６ｍ秒で周波数は、１５００Ｈｚと分かります。低下時間と上昇時間は同じなので、次のように計算することもで

きます。

発振周波数 ＝ V_{OH} ／ ２ ／ V_{HY} ／ R_{IN} ／ C_F

１０. 鋸歯状波回路

下図のようにファンクションゼネレータの回路を改造すると、鋸歯状波を発生させることができます。



上図の回路で、非反転シュミットトリガがV_{OL}を出力すると、ダイオードが（順電圧で）導通して、灰色太線で示す経路で３３０Ωを通じて大きな電流が流れ、一瞬で積分器の出力が上昇して、シュミットトリガはV_{OH}に反転します。

シュミットトリガがV_{OH}を出力すると、ダイオードは（逆電圧で）電流を流さなくなり、灰色点線で示す経路で、３３０ｋΩを通じて流れる僅かな電流で、ゆっくりと積分器の出力が低下して行きます。積分器の出力が下のスレッショルドに達すると、シュミットトリガは再びV_{OL}を出力します。

これを繰り返して、素早く上昇し、ゆっくりと低下する鋸歯状波が出力されます。この発振回路は、入力端子の電圧で周波数を広範囲に可変できる特徴もあります。

発振周波数は次のように計算できます。

発振周波数 ＝ 入力電圧 ／ ２つのスレッショルド電圧の差 ／ 入力抵抗 ／ 積分コンデンサ

＝ V_{IN} ／ V_{HY} ／ R_{IN} ／ C_F

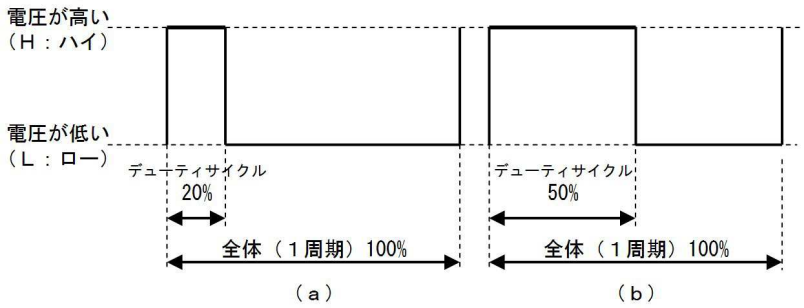
例えば１Ｖを入力した場合は、

＝ １Ｖ ／ １０Ｖ ／ ３３０ｋ ／ １０００ｐ

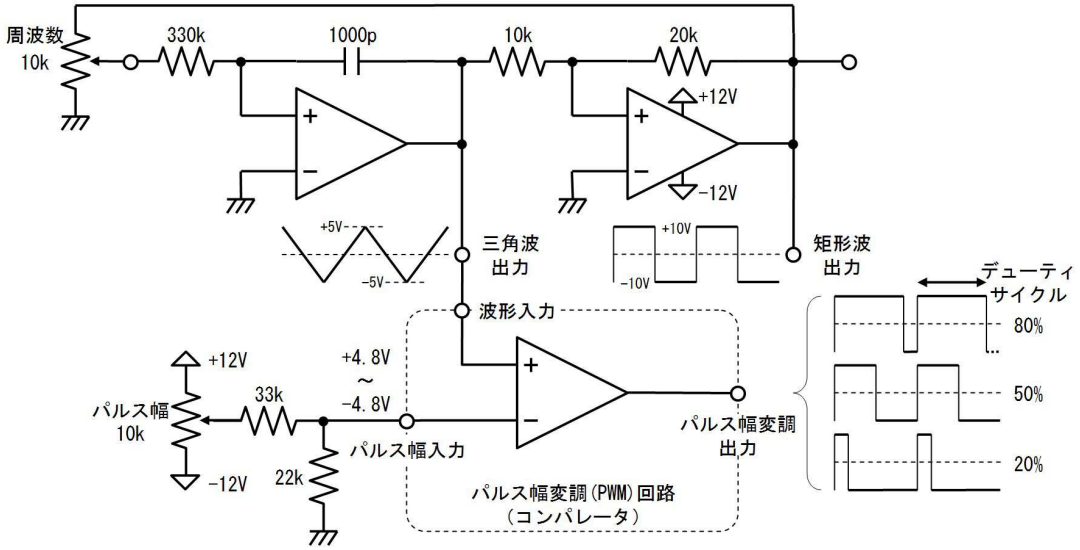
Ｅｘｃｅｌで =1/10/330E3/1000E-12 と入力して、３０３Ｈｚと計算できます。１０Ｖを入力すると、３０３０Ｈｚで発振します。このように電圧で発振周波数を変更できる発信機を「電圧制御発振器（ＶＣＯ）」と呼びます。

１１. パルス幅変調回路

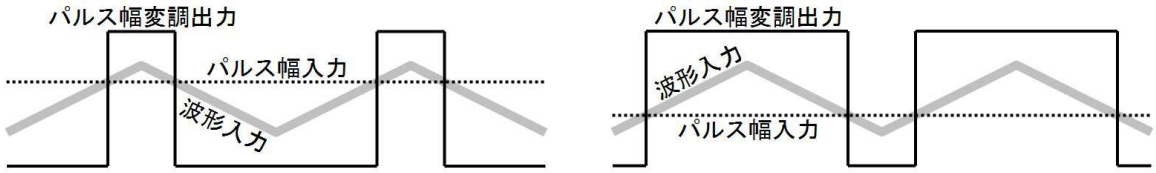
パルスの幅は下図に示すように、デューティサイクル（１周期の中で、電圧が高い（Ｈ：ハイ）期間の割合）で表します。デューティサイクルが２０%なら、下図（ａ）に示すように、１周期中の２０%がHの期間で、５０%なら、下図（ｂ）に示すように、１周期中の半分がHの期間です。



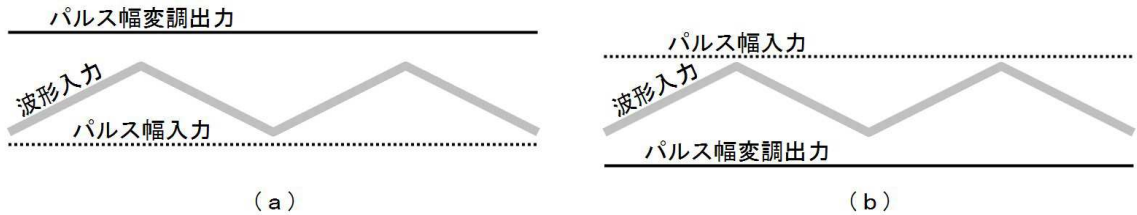
パルス幅変調（ＰＷＭ）回路とは、周波数を変えずにパルスの幅だけを変更する回路です。下図上側はすでに説明した三角波発生回路で、同図下側に点線で囲って示す部分がパルス幅変調回路です。



パルス幅変調回路の正体は、「パルス幅入力」と「波形入力」を比較するコンパレータで、下図に示すように、三角波がパルス幅入力電圧より高いときはＨを、低いときはＬを出力します。

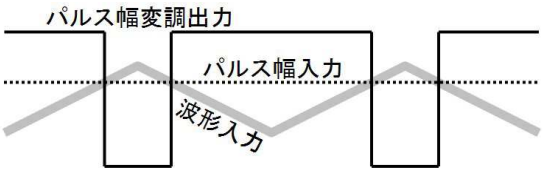


下図（ａ）のように、パルス幅入力の電圧が、三角波の最低電圧より低い、あるいは、（ｂ）のように、三角波の最高電圧より高い場合は、パルスが出力されません。ですから、常にパルスが出るようにしたい場合は、パルス幅入力端子に加える電圧を、三角波の最低電圧～最高電圧となるようにします。



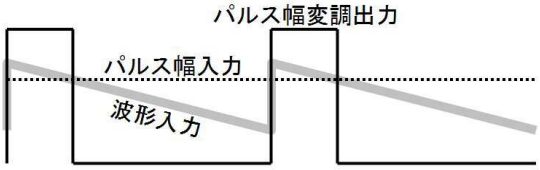
上図の回路はコンパレータの＋入力と－入力を逆に接続しても動作します。この場合、出力波形の上下が逆になります。

（ａ）＋入力に波形を入力



（ｂ）－入力に波形を入力

波形入力端子に、下図（ａ）のように三角波ではなく鋸歯状波を加えても動作します。また、下図（ｂ）のように、正弦波を加えても動作しますが、この場合、パルス幅入力端子の電圧とデューティサイクルが比例しなくなります。



（ａ）鋸歯状波を入力

（ｂ）正弦波を入力

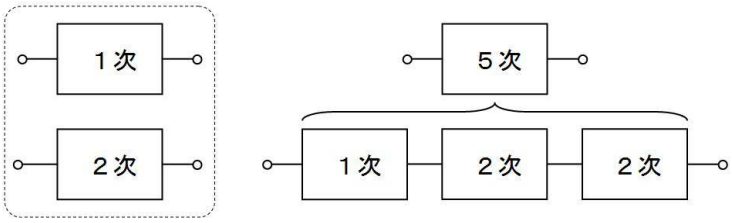
１２. 振幅変調回路（★）

１３. 乗算回路（★）

１４. フィルタ

既に説明した１次のフィルタのように、周波数によって利得が変化する回路をフィルタと呼びます。不要な周波数の信号を取り除いたり、希望の信号だけを選択するなどの用途で使われます。

フィルタの教科書には、沢山の種類の回路や、チェビチェフ、バタワース、ベッセル、ガウシアン等の多くの名前と数式が登場する上、謎めいたグラフも多いため、フィルタは難しいと思い勝ちです。

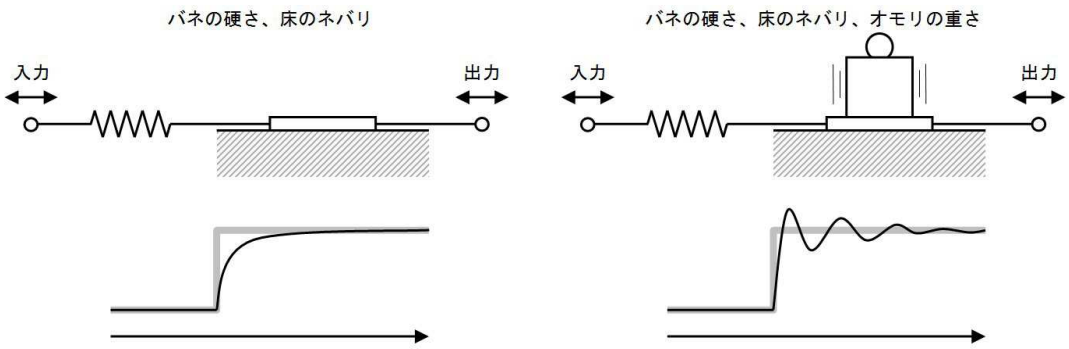


実はフィルタには２種類しかなく、その２種類の設定の組み合わせで様々なフィルタができています。その２つとは、上図左の１次のフィルタと、２次のフィルタです。例えば５次のフィルタは、上図右側のように、１次のフィルタ１つと、２次のフィルタを２つを繋いだものです。

ここで言う「１次のフィルタ」は、既に１次のフィルタの項で取り上げた「組み合わせフィルタ」のような複雑な１次のフィルタではなく、ＣとＲが一組だけ働く（周波数特性の折れ曲がりが一箇所しか無い）単純な１次のフィルタです。

ですから、この２つのフィルタを理解できれば、それを接続して殆どのフィルタを作ることができます。

２つのフィルタのイメージは下図の通りです。



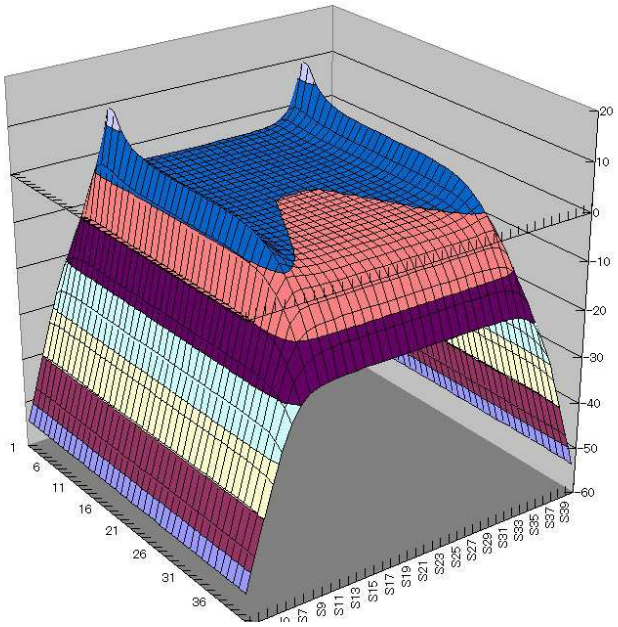
１次のフィルタは上図左のように、ヌルヌルする床とバネのイメージです。入力を動かすと出力が遅れて付いてきます。２次のフィルタは上図右のように、ヌルヌルする床と、バネとオモリのイメージです。入力を動かすと出力は遅れて動きつつ、ユラユラと揺れます。つまり１次のフィルタは「揺れる」（共振する）性質はありませんが、１次のフィルタは（床のネバリが緩いと）揺れが持続する（共振する）性質があります。

１５. ステートバリアブルフィルタ（★）

１６. Ｅｘｃｅｌとフィルタの正体

Ｅｘｃｅｌが無いときは、「フィルタの正体を目で見る」ことは至難の業でした。フィルタの性質は、言ってみれば「地形」のようなもので、それを南北に切った断面に、周波数特性が現れるのです。ところが、昔はこの「地形」を立体的に見ることができず「ここに山がある筈だから…この辺が盛り上がって…」等と平面的な地図を見て地形を頭の中で想像していた訳です。

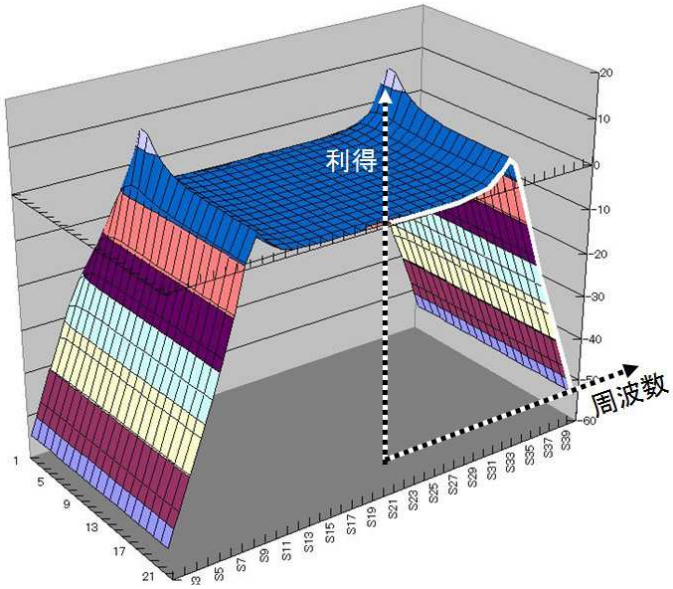
ところが今日では、下図のようにフィルタに対応する地形をＥｘｅｃｅｌを使って立体的に見ることができます。ですから、それを南北に切れば、どのような周波数特性になるのか、簡単に理解することができます。



上図は２次フィルタの周波数伝達関数 $\frac{1}{(j\omega)^2+0.5j\omega+1}$ を立体地図に描いたものです。このグラフは、伝達関数を=20*LOG(IMABS(IMDIV(1,IMSUM(IMPRODUCT(1,IMPOWER(Sheet1!B2,2)),IMPRODUC

T(0.5,Sheet1!B2),1))),10)と、Ｅｘｃｅｌに入力して、等高線グラフを指定すれば表示されます。（具体的な手順は後で説明します）

さて、この地形が示す周波数特性は、中央で南北に切れば、下図に白線で示すように断面に現れます。



つまり、フィルタの設計とは、地形上で山の位置を様々に変化させて、自分の希望する周波数特性を実現することです。この「山」のことを「ポール」と呼んでいます。

実際には実用性の高い周波数特性毎に、最適な山の配置が既に分っているので、その配置になるようにＣやＲの値を決めることでフィルタが設計できます。

１５. 受動素子（★）

１. 抵抗（★）

２. 寄生インダクタンスとキャパシタンス（★）

３. 電力定格と最高電圧（★）

４. 発熱（★）

５. コンデンサ（★）

６. ＭＬＣＣの容量（★）

７. フィルムコンデンサ（★）

８. 電解コンデンサ（★）

９. 温度と寿命（★）

１０. コイル（★）

１６．高周回路波入門

１．高周波

２．ｄＢｍとｄＢμ

デシベルは極めて小さい比率から、極めて大きい比率まで、手短に書くことができて非常に便利です。あまりに便利なので「比率しか表さないのは勿体無い」「Wと同様に電力の大きさも表したい」という熱烈なファンが現れます。

そこでとりわけ高周波の世界では、下表に示す、電力１倍（０ｄＢ）を１mWと決めたｄＢｍ（デシベルミリ）と、１μWと決めたｄＢμが使われます。

ｄＢｍ（デシベルミリ）			ｄＢμ（デシベルマイクロ）		
基準の電力	表す電力	ｄＢｍの値	基準の電力	表す電力	ｄＢμの値
１mW	０．００１mW	－３０ｄＢｍ	１μW	１μW	０ｄＢμ
	０．０１mW	－２０ｄＢｍ		１０μW	１０ｄＢμ
	０．１mW	－１０ｄＢｍ		１００μW	２０ｄＢμ
	１mW	０ｄＢｍ		１mW	３０ｄＢμ
	１０mW	１０ｄＢｍ		１０mW	４０ｄＢμ
	１００mW	２０ｄＢｍ		１００mW	５０ｄＢμ

ｄＢｍの値に３０を加えるとｄＢμの値になります。そんな事なら、どちらか一方あれば良い筈ですが、mWを良く使う人も居れば、μWを良く使う人も居るので、両方が存在しています。

ｄＢｍやｄＢμの値は次のように計算できます。

ｄＢｍの値＝１０×ｌｏｇ$_{10}$（電力W÷１mW）[ｄＢｍ]

エクセルでは、ｄＢｍの値=10*LOG(電力W/1E-3,10)

ｄＢμの値＝１０×ｌｏｇ$_{10}$（電力W÷１μW）[ｄＢμ]

エクセルでは、ｄＢμの値=10*LOG(電力W/1E-6,10)

逆にｄＢｍやｄＢμから電力を求める場合は、

電力W＝１mW×１０$^{ｄＢｍの値÷１０}$[W]

エクセルでは、電力W=1E-3*10^(dBm の値/10)

電力W＝１μW×１０$^{ｄＢμの値÷１０}$[W]

エクセルでは、電力W=1E-6*10^(dBμの値/10)

２.１．練習

様々な電力を、mW、μW、ｄＢｍ、ｄＢμで示した下表の空欄を埋めて完成してください。

デシベル	電力	ヒント

２３ｄＢμ	２００μＷ	２０＋３ｄＢ⇔１００×２倍
□ｄＢμ	５０００μＷ	３０＋７ｄＢ⇔１０００×５倍
□ｄＢｍ	２０００ｍＷ	３０＋３ｄＢ⇔１０００×２倍
１６ｄＢμ	□μＷ	
４６ｄＢｍ	□ｍＷ	

答

デシベル	電力	考え方
２３ｄＢμ	２００μＷ	２０＋３ｄＢ⇔１００×２倍
３７ｄＢμ	５０００μＷ	３０＋７ｄＢ⇔１０００×５倍
３３ｄＢｍ	２０００ｍＷ	３０＋３ｄＢ⇔１０００×２倍
１６ｄＢμ	４０μＷ	１０＋６ｄＢ⇔１０×４倍
４６ｄＢｍ	４００００ｍＷ	４０＋６ｄＢ⇔１００００×４倍

３．ｄＢｍＶとｄＢμＶ

本来電力を表すｄＢですが、人気はさらに高まり「ｄＢで電圧も表したい」という熱狂的なファンさえ現れます。そこで、とりわけ高周波の世界では、１ｍＶを基準にしたｄＢｍＶ、１μＶを基準にしたｄＢμＶが使われます。

ただし、下表のように、電圧が１０倍になると、電力が１００倍になるので、１０倍で２０ｄＢ大きくなる点に注意が必要です。

ｄＢｍＶ（デシベルミリボルト）			ｄＢμＶ（デシベルマイクロボルト）		
基準の電力	表す電力	ｄＢｍＶの値	基準の電力	表す電力	ｄＢμの値
１ｍＶ	０．００１ｍＶ	－６０ｄＢｍＶ	１μＶ	１μＶ	０ｄＢμＶ
	０．０１ｍＶ	－４０ｄＢｍＶ		１０μＶ	２０ｄＢμＶ
	０．１ｍＶ	－２０ｄＢｍＶ		１００μＶ	４０ｄＢμＶ
	１ｍＶ	０ｄＢｍＶ		１ｍＶ	６０ｄＢμＶ
	１０ｍＶ	２０ｄＢｍＶ		１０ｍＶ	８０ｄＢμＶ
	１００ｍＶ	４０ｄＢｍＶ		１００ｍＶ	１００ｄＢμＶ

ｄＢｍＶの値に６０を加えると、ｄＢμＶの値になります。ｄＢｍＶやｄＢμＶの値は次のように計算できます。

ｄＢｍＶの値＝２０×ｌｏｇ$_{10}$（電圧÷１ｍＶ）[ｄＢｍＶ]

エクセルでは、電圧 dBmV=20*LOG(電圧/1E-3,10)

ｄＢμＢの値＝２０×ｌｏｇ$_{10}$（電圧÷１μＢ）[ｄＢμＶ]

エクセルでは、電圧 dBμV =20*LOG(電圧/1E-6,10)

逆にｄＢｍＶやｄＢμＶから電力を求める場合は、

電圧[Ｖ]＝１ｍＶ×１０$^{ｄＢｍＶの値÷２０}$

エクセルでは、電圧[Ｖ]=1E-3*10^(dBmV の値/20)

電圧[Ｖ]＝１μＶ×１０$^{ｄＢμＶの値÷２０}$

エクセルでは、電圧[Ｖ]=1E-6*10^(dBμV の値/20)

3.1. 練習

様々な電力を、ｍＶ、μＶ、ｄＢｍＶ、ｄＢμＶで示した下表の空欄を埋めて完成してください。

デシベル	電圧	ヒント
２６ｄＢμＶ	２００μＶ	２６÷２＝１３ １０＋３ｄＢ⇔１０×２倍
［　　］ｄＢｍＶ	２００ｍＶ	２０＋３ｄＢ⇔１００×２倍
６ｄＢμＶ	［　　］μＶ	６÷２＝３
６６ｄＢｍＶ	［　　］ｍＶ	
［　　］ｄＢμＶ	２０ｍＶ	

3.2. 答

Ｅｘｃｅｌで計算する場合は、ｄＢｍやｄＢμ（電力）と間違わないように、ｄＢｍＶやｄＢμＶ（電圧）の計算式を入力します。

暗算で概算する場合は、ｄＢｍＶとｄＶμＶは、電圧を示す単位ですから、通常のｄＢなら１０００倍が３０ｄＢｍですが、電圧の場合は、１０００倍で６０ｄＢｍＶ（２倍）となる点に注意が必要です。このため、電圧のｄＢは「求めてから２倍する」あるいは「まず２で割ってから処理する」と考えると良いです。

つまり、例えば４６ｄＢｍＶを概算で電圧に戻すときは、最初に２で割って２３ｄＢと考え、２０＋３ｄＢ⇔１００×２倍と考えて、２００ｍＶと求めます。逆に、電圧の２００倍を（仮に電力の２００倍率と考えて）２３ｄＢに直した後で、２倍することで、４６ｄＢと答えます。

デシベル	電圧	考え方
２６ｄＢμＶ	２０μＶ	２６÷２＝１３ １０＋３ｄＢ⇔１０×２倍
［４６］ｄＢｍＶ	２００ｍＶ	２０＋３ｄＢ⇔１００×２倍 ２３×２＝４６
６ｄＢμＶ	［２］μＶ	６÷２＝３ ３ｄＢ⇔２倍
６６ｄＢｍＶ	［２０００］ｍＶ	６６÷２＝３３ ３０＋３ｄＢ⇔１０００×２倍

８６ｄＢμＶ	２０ｍＶ	４０＋３ｄＢ⇔１００００×２倍 ４３×２＝８６

４．直流や低周波と、高周波の違い（★）

（浴槽の湯と波立つ水槽で説明）

５．反射とＳパラメーター（★）

６．正規化インピーダンス（★）

７．インミタンス（スミス）チャート（★）

１７. 高周波回路（★）

１. 整合（★）

２. デカップリング（★）

３. 高周波増幅回路（★）

１８. 制御回路（★）

開ループ制御と閉ループ制御

ＰＩＤ制御

Ｅｘｃｅｌと制御

現代制御

微分先行型制御

フィードフォアード制御

比例値フィードフォアード制御

比例値フィードフォアード制御

外乱オブザーバー制御

１９. 論理回路（★）

２０. マイコン（★）

２１．実装（★）

パスコン

グラウンド

シールド

信号線

ユニバーサル基板実装のテクニック

２２. 電子工作例（★）

１. 簡単パワーアンプ

２. はんだゴテコントローラー

３. 電離電流測定器

４. ガンマ線スペクトル測定器

５. ワイアレス給電装置

２３．あとがき

１．本書に書いた事、書かなかった事

自分で白紙から考えなくても、データシート等に紹介された様々な応用回路を組み合わせるだけでも、結構楽しい工作ができるものです。ところが、それぞれの応用回路がどういう筋道で動作しているかという説明が少ないので、紹介された回路をアレンジするとなれば、急にハードルが上がります。

もちろん、工学書を引っ張り出して読み解くことで、いつかはそれらの回路の動作を理解することができるでしょう。でも、楽しい電子工作のために、つまらない工学書を読むというのは、何か違うように思えます。

応用の利く、ちょっとは根源性のある理屈を、多少の誤解を覚悟した上で分り易く説明するのは（それほど困難では無いとしても）非常に面倒で、（まともな本にして出せるような話でもないので）見返りの無い分野です。本書ではその「面倒で見返りの無い部分」に焦点をあてて物好きな解説を展開しました。

ですから、巷に多く紹介されている基本的な応用回路等はあえて割愛しています。部品メーカーのサイトを探せば、アプリケーションノート等として面白い応用回路が沢山紹介されていますから、ぜひ参照してください。