

半導体の基本素子 トランジスタを攻略しよう！

本書では、スピーカを鳴らすことができるパワー・アンプ(写真1)の完成を最終目標にして、トランジスタ回路を設計/製作していきます。

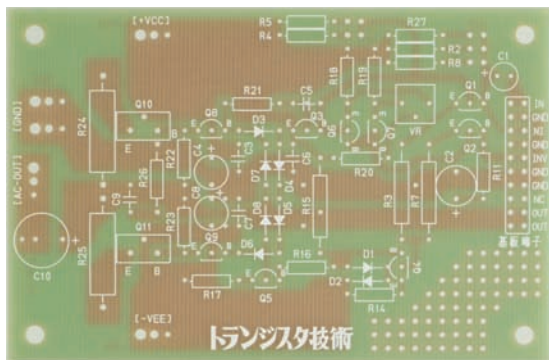
技術を習得するには、手を動かすことが大切です。手を使い汗をかいて憶えたことは、決して忘れません。できるだけ多くの回路を製作して実験すべきですが、そのつどプリント基板を作っていたのでは、いくら時間があっても足りません。出費もバカになりません。

そこで、8種類のアンプを製作できる実験用プリント基板(写真2)を用意しました。部品セットと実験用プリント基板の頒布も行います(p.167参照)。

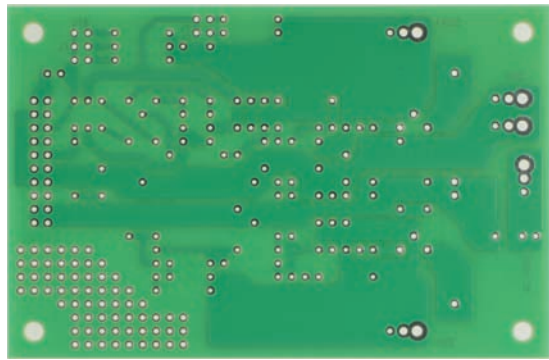
まず1石アンプを作り、動作を確認したら、トランジスタを追加して2石アンプにするというように、少しずつ部品を足し、8種類の回路を実験していきます。



写真1 第6章で作るトランジスタ・アンプでスピーカを鳴らしているところ



(a) 表面



(b) 裏面

写真2 実験用プリント基板

1石アンプ、2石アンプ、3石アンプ、5石アンプ、7石アンプ、9石アンプ、単電源11石アンプ、両電源11石アンプの8種類のアンプを作れる

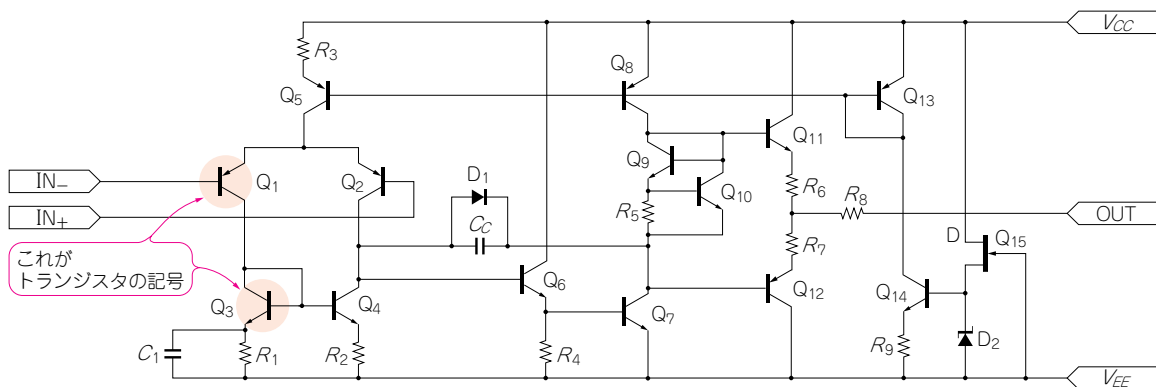


図1⁽¹⁾ 汎用OPアンプとして有名な4558(NJM4558)の内部等価回路

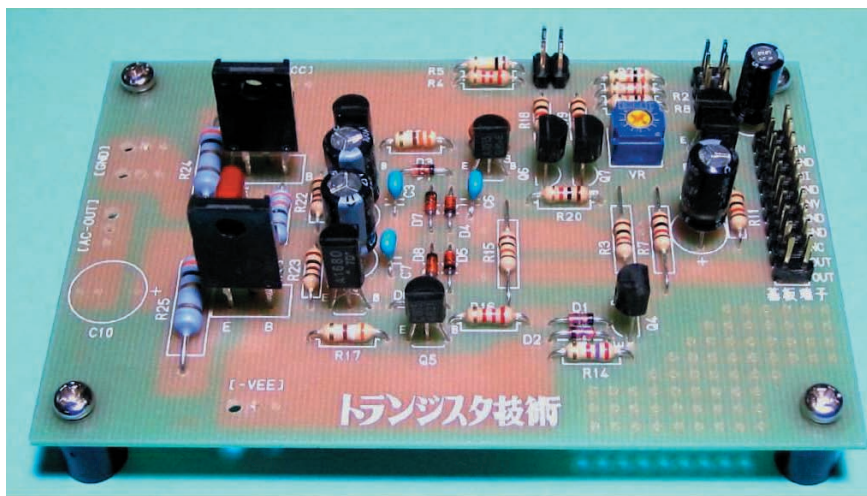
第5章ではOPアンプ回路を作ります。実際のOPアンプの内部回路(図1)と、製作する回路を見比べてみてください。

最終的には、スピーカを鳴らせる11石のパワー・アンプを完成させます(写真3)。

私が若い頃は、1年に数十枚のプリント基板を作ったものです。アナログ回路の設計と製作は、それほど魅力がありました。時は移り21世紀、齢を重ね、回路設計の高揚感を若い人に味わって欲しいと思うようになりました。そんな折、本書の元になった特集の話が舞い込みました。まさに渡りに船、即座にお引き受けしました。アナログ回路を設計/製作する楽しさを味わっていただければと思います。

本書には、紛れもない過去の回路も混ざっていますが、最終的には、現在も立派に通用する由緒正しい回路まで作ります。

見本



高価な測定器を使わずに実験を進める

昔のエンジニアは、次のような方法で回路設計を学びました。

- トランジスタ(回路)の教科書を読む
- 回路集に載っている回路を製作する
- 社内の先輩技術者が設計した回路を改良する

これらの方法はもはや有効ではないでしょう。なぜなら、いまや回路集の類は入手が難しいうえ、トランジスタ回路を理解している技術者も少ないからです。

逆に、昔はなかった有利な状況も生まれています。

- 回路シミュレータ SPICE を利用できる
- パソコンを測定器として利用できる

本書では、これらの状況を踏まえ、次のようなやりかたでアナログ回路の理解を深めます。

● 身近な機器を利用して安価に測定環境を整える

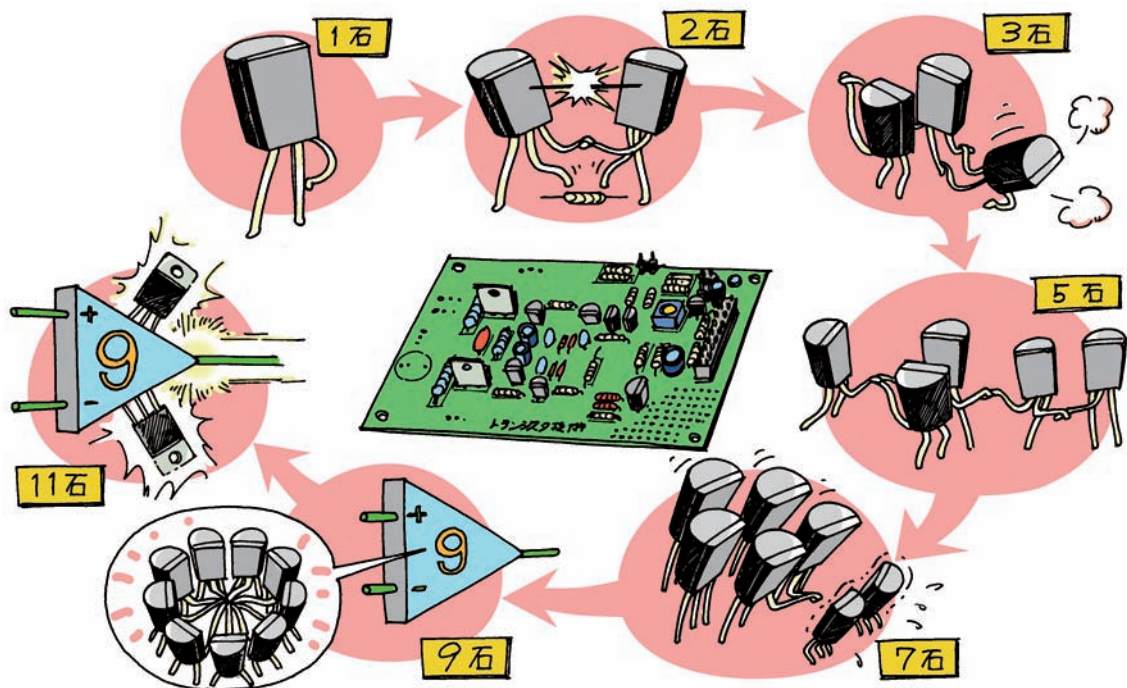
電子回路は、完璧に設計したつもりでも、どこかに見落としがあるものです。必ず測定して動作を確認しなければなりません。増幅回路の測定には、

- ① オシロスコープ
- ② 信号発生器(発振器)
- ③ 交流電圧計
- ④ ひずみ率計

などが必要です。そうはいても、個人が測定器をそろえるのは、なかなか大変です。

そこで、パソコンのオーディオ機能を利用します。

見本



ソフトウェアは efu 氏が無償公開しておられる WaveGene と WaveSpectra を使うことにします。

ただし、パソコンを測定器として使うには、いろいろと条件や設定が必要です。これらについて詳しくは Appendix A を参照してください。

▶ 直流電圧の測定

デジタル・テスタを使います。

▶ 交流電圧の測定

交流電圧計の代わりに、Appendix B で紹介する自作アダプタとテスタを組み合わせで使います。

▶ 信号の発生

信号発生器の代わりに、パソコンのオーディオ出力とソフトウェア WaveGene を使います(図2)。

▶ 波形観測とひずみ率の測定

オシロスコープやひずみ率計の代わりに、パソコンのオーディオ入力とソフトウェア WaveSpectra を使います(図3)。

WaveSpectra は波形表示と FFT 解析⁽⁴⁾の機能を持ちます。FFT 解析はひずみ率計としての代用が可能です。

● 電子回路シミュレータ SPICE を利用する

パソコンのオーディオ機能による測定では、周波数特性、小信号の観測、精度などに制約があります。

測定が困難な特性は、電子回路シミュレータ SIMetrix/SIMPLIS のシミュレーションで確認します。

電子回路シミュレータ SIMetrix/SIMPLIS スペシャルパック」(CQ 出版)に収録されています。



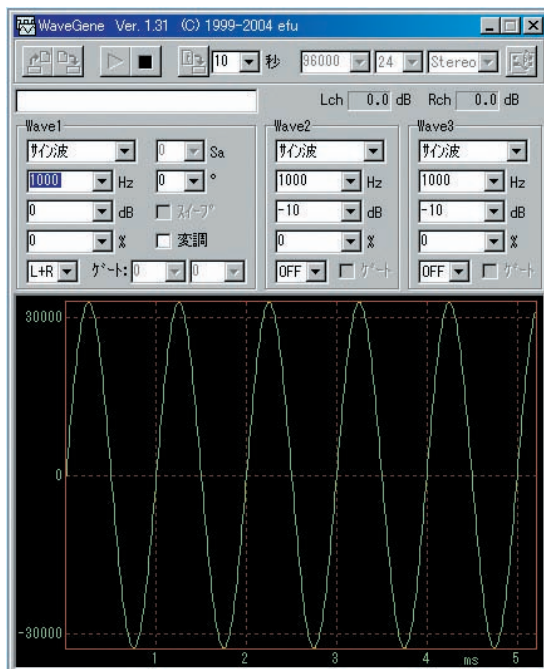


図2 パソコンが信号発生器として使えるようになるフリーのソフトウェア WaveGene

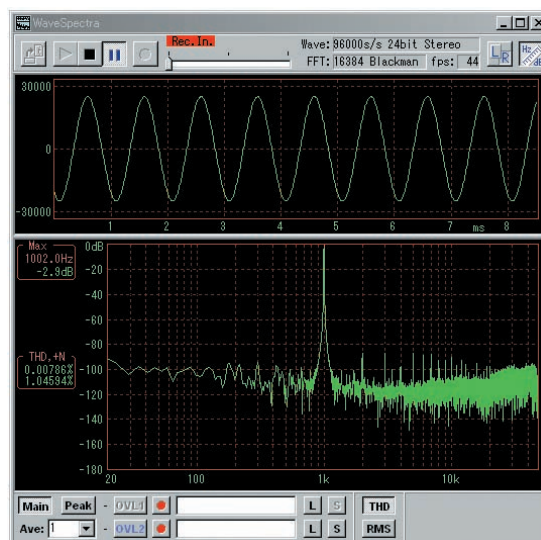


図3 パソコンがオシロスコープとして使えるようになるフリーのソフトウェア WaveSpectra

PSpiceやMicro-CAPなど、ほかのSPICEシミュレータでも解析できるよう、トランジスタのデバイス・モデルを公開しています。

● 本書で使用した計測器の一覧

周波数特性の実測データや、パソコンでは測れない低いひずみ率を測定するために、私が自作した測定器も使っています。

測定データに、以下のどれを使用して測定したかを示すようにしています。

▶ デジタル・テスタ

直流電圧の測定と、自作アダプタと組み合わせた交流電圧の測定に使っています。

▶ パソコン

波形観測、ゲイン測定、ひずみ率測定、周波数測定に使っています。

本書の測定では、デスクトップ・パソコン本体のオーディオ入出力を使いました。測定に使ったパソコンのマザーボードはインテルD945GNTです。

▶ 周波数特性測定セット

私が自作した、信号発生器と交流電圧計などのセットです。パソコンによる信号源では測れない広い周波数帯域の特性を測定します。

▶ ひずみ率測定セット

私が自作した、低ひずみ正弦波発振器とひずみ率計のセットです。パソコンのFFT解析では測れない

見本

い低いひずみ率の特性を測定します。

● 理屈を抜きにしてみよう

難しい話もあるかもしれませんが、どうということはありません。はっきりわからなくても「…のようなもの」と自分流に解釈しておけば、先へ進めます。

「これではいけない」と自覚した時点で真剣に学ばよいのです。難しい理屈を知らないほうが冒険できるので、大発見につながることもあります。

あまり難しく考えず、まずはどんどん手を動かしましょう。そうすれば自然にわかってくるものです。頭でっかちはいけません。

トランジスタ回路を理解していることのメリット

● トランジスタ回路は電子回路の基礎

電子回路でOPアンプを使うのは、重要な部分があらかじめ作られており、手軽だからです。逆にいえば、トランジスタ回路の設計は面倒です。

それでは、トランジスタ回路は必要ないのでしょうか？

そんなことはありません。OPアンプの動作をより詳しく理解するためには、その中身であるトランジスタ回路の動作を理解する必要があります。

● OPアンプで増幅回路を作ってみる

+5Vで動作しマイコンなどと同時に利用するのに向いたOPアンプとして、LM358(ナショナル セミコンダクター、以下NS)があります。

さて、このLM358を使って図4のような増幅回路を作ったとしましょう。

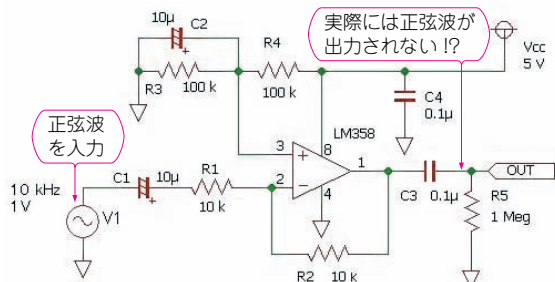


図4 思ったように動作しない回路の例

この回路だけを見ても原因はわからない。OPアンプ内部のトランジスタの動作を理解しなければならない

見本

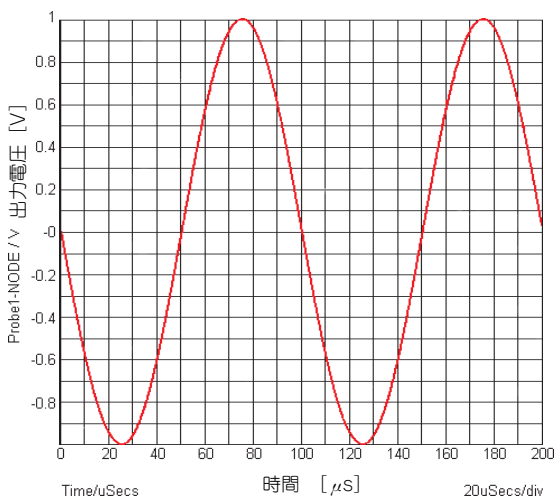


図5 シミュレーションではきれいな正弦波が出力される

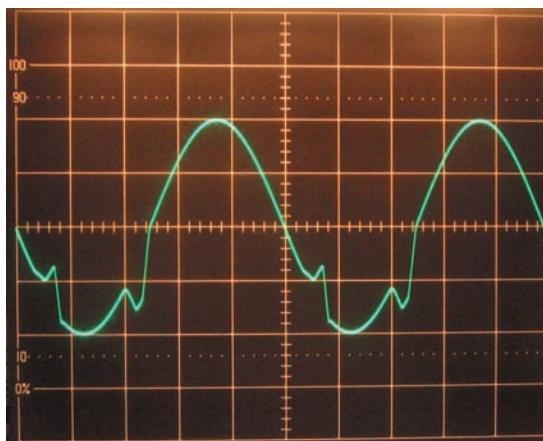


写真4 図4の回路を実際に作ると出力波形が正弦波にならない

AC Coupled Inverting Amplifier

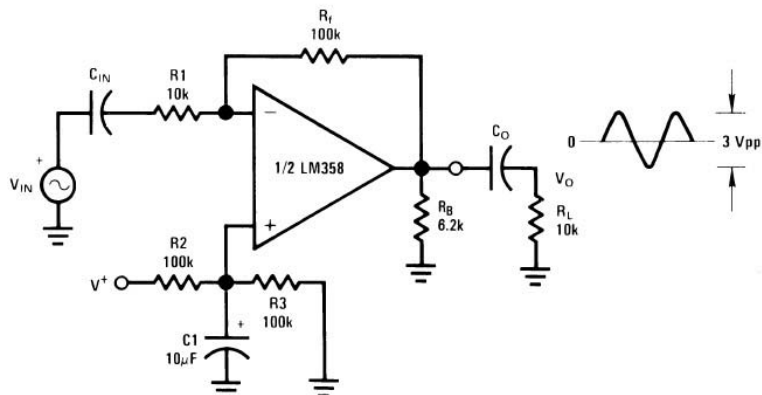


図6(2) データシートから引用したLM358の応用回路例

● シミュレーションと比べて実際の波形が汚い

シミュレーション(SIMetrix)で動作を確認してみましょう。

正弦波を入力したときの波形は図5で、出力はきれいな正弦波になっています。問題はないように思えます。

▶ 実際の回路では驚くほど汚い波形が出てくる

実際に図4の回路を組み立てて、出力波形をオシロスコープで観察した結果が写真4です。

どうしたことでしょう。驚くほど汚い波形です。なにか間違えたのでしょうか？

▶ 応用回路例に合わせればシミュレーションどおり

LM358のデータシートにある応用回路例を、図6に示します。一見、図4と同じように思えます。し

かし、よく

くりと見比べると、LM358の出力端子とグラウンドの間に、意味のわからない抵抗6.2 kΩ

があるのに気がつきます。

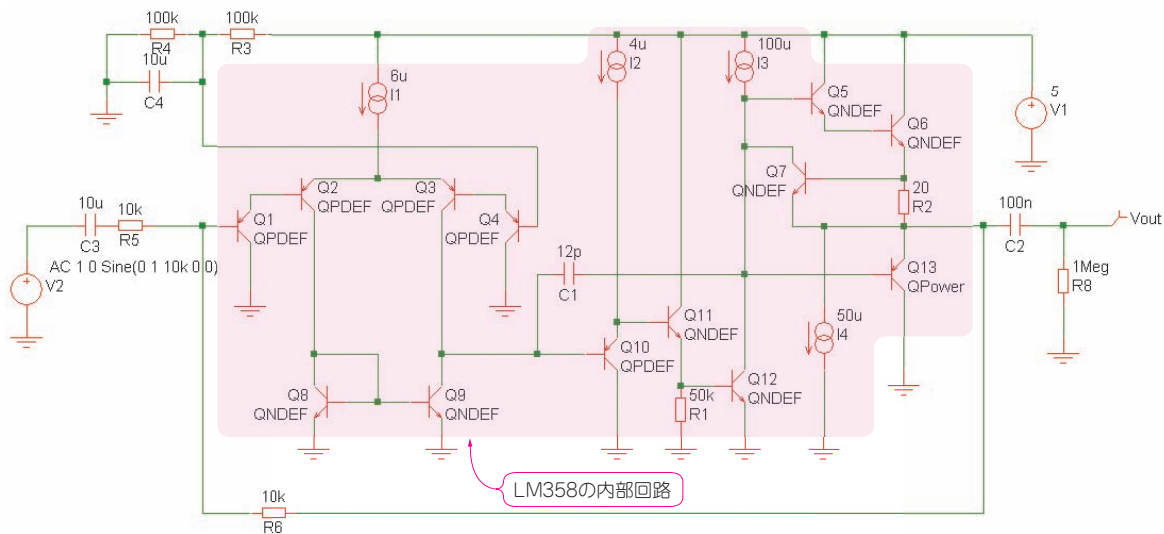
応用回路例にあるこの抵抗を加えて再測定すると、図5のような、きれいな波形が出力されます。

● トランジスタ回路をシミュレーションすれば実験と同じ結果が得られる

写真4のような波形になることを、なぜシミュレーションできなかったのでしょうか。

これは、図4のシミュレーションに使ったNS社純正のOPアンプ・モデルが、大まかなふるまいだけを扱う「機能等価モデル(マクロ・モデル)」だからです。

LM358内部のトランジスタ回路を使って、図4の回路を書き直すと、図7のような増幅回路になります。



MODEL QPDEF PNP (IS=2E-15 BF=8 VAF=50 TF=25n RB=300 CJC=1p CJE=0.4P CJS=3P)
MODEL QPcwer PNP (IS=1E-14 BF=50 VAF=50 TF=17n RB=100 CJC=2.5p CJE=0.7P)
MODEL QNDEF NPN (IS=5E-15 BF=200 VAF=100 TF=0.3n RB=200 CJC=0.3P CJE=1P CJS=3P)

図7 図4をトランジスタ回路で書きなおした回路図

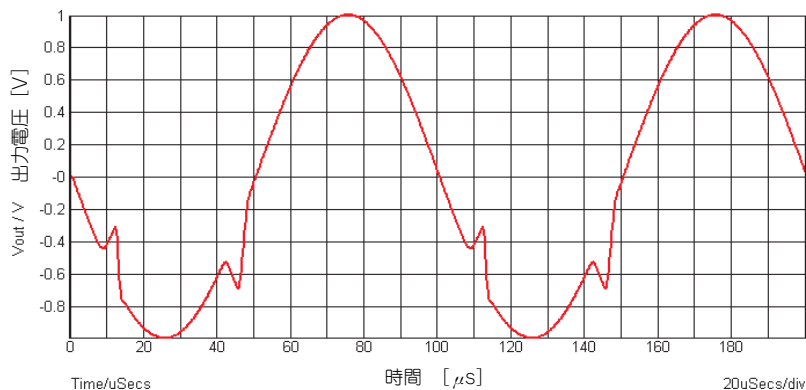


図8 図7をシミュレーションすると写真4と同じ波形が出力される

見本

す。

この図7に示した回路のシミュレーション結果を図8に示します。写真3とよく似た結果になりました。

▶原因はトランジスタの動作にある

波形を出力する途中にトランジスタがONしたりOFFしたりするのが原因です。

抵抗を加えると、トランジスタに電流を流し続けることができ、ひずみの発生を防げます。

● ちょっとしたことと特性向上が望める

このトラブルは、LM358という設計の古いOPアンプだから発生したもので、一般的な話ではありません。

しかし、ここまで極端な話はなくとも、ちょっとしたことで特性が向上することは十分にありえます。

そのためには、ICを完全なブラックボックスとして扱うのではなく、内部回路まで立ち入ることが必要なのです。

本書のねらい

● 低周波増幅回路は電子回路設計の基礎になる

本書は、低周波増幅回路に的を絞りました。トランジスタ回路設計の基礎を十分に学べて、実験しやすいからです。

また、低周波増幅回路は、負帰還を学ぶのに格好の教材です。負帰還とは、誤差を検出し、誤差を自動的に減少させる技術です。詳細は第6章で解説します。

▶低周波というけれど具体的には？

昔は、音声信号の上限周波数、つまり20 kHzまでを低周波と呼んでいました。しかし、時代とともに、より高い周波数まで利用するようになり、低周波の上限も上がっていきました。

今では100 MHzぐらいまでを低周波と呼ぶ場合もあるようです。本書では、1 MHzまでを低周波と

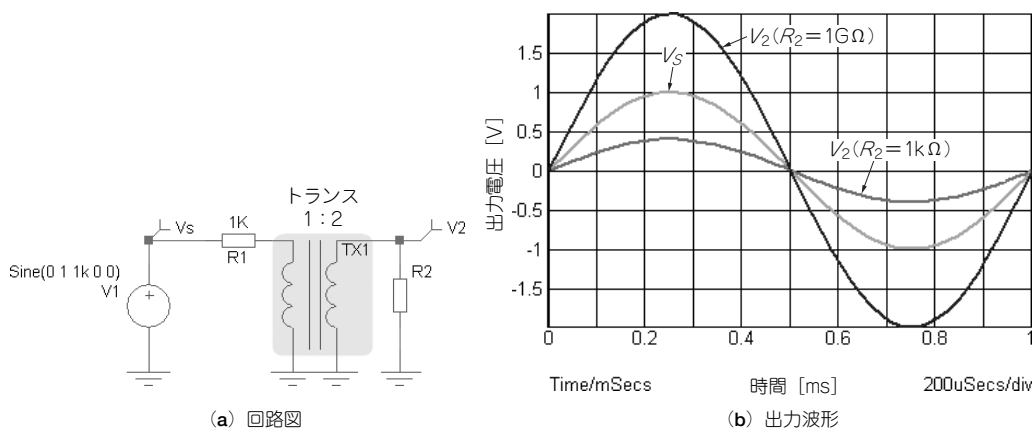


図9 トランスで電圧を大きくしても増幅とはいわない

エネルギー源がないので、2次側にエネルギーを消費する抵抗を接続すると電圧が小さくなってしま

見本

みなします。

●「増幅」とは何か？

簡単に言えば、増幅とは信号の振幅を拡大することです。そうすると、次のような疑問が生じます。

「電圧を大きくできれば増幅器？トランスは？」

トランスは増幅器ではありません。図9のように、巻き線比が1対2のトランスの1次側に内部抵抗1 k Ω 、出力電圧1 V_{peak}の信号源をつないだとき、もし負荷抵抗が1 k Ω より十分に高ければ、2次側に2 V_{peak}の信号電圧が現れます。しかし、これは増幅ではなく「昇圧」です。

増幅ではない証拠に、2次側に1 k Ω の負荷抵抗をつなぐと、2次側電圧は信号源電圧より低い0.4 V_{peak}になってしまいます。

▶ 入力信号と相似なエネルギーを負荷に送る

電源のない回路は増幅器ではありません。増幅とは、

「電源のエネルギーを利用して、入力信号と相似の信号を負荷に送り込むこと」

と考えればよいでしょう(図10)。

● 増幅器での相似の概念は正弦波を基本に考える

増幅器でいう、相似、あるいは線形(リニア)の概念は、普通の相似のイメージと少し違います。

正弦波を入力したとき、出力が正弦波ならば、位相や時間がずれていても、相似と考えます(図11)。

これは、増幅器の動作を「周波数領域」で考えているからです。

▶ 増幅器の解析は周波数領域で行う

学術的には「周波数応答法」と呼んでいるもので、時々刻々変化する信号 $x(t)$ そのものを考察するのではなく、 $x(t)$ のフーリエ変換形(スペクトラム)を考察する解析法です。

周波数応答が求まれば、任意の波形に対する時間応答が求まることが、その根底にあります。

入力信号に対して出力がどれくらい相似か、という性能を、「周波数特性」や「高調波ひずみ率」という単純明快な指標で評価できます。

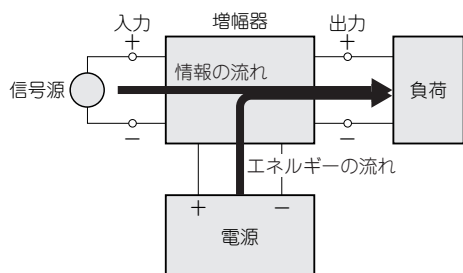


図10 増幅の概念は「電源のエネルギーを利用して、入力信号と相似の信号を負荷に送り込むこと」

見本

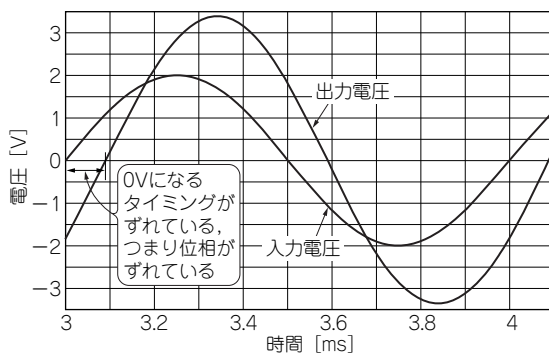


図11 位相がずれていても同じ正弦波が出力されていれば相似と考える

● 増幅器の特性…その1：周波数特性

正確には「ゲイン対周波数特性」というべきですが、一般的に「周波数特性」で通用しています。

「ゲイン (gain)」とは、回路に正弦波を入力したとき、出力に現れるだいたい正弦波に近い信号の振幅を、入力正弦波の振幅で割ったものです。

アンプのゲインは周波数によって変わるので、ゲイン対周波数特性を考えます。

なお、正弦波を入力したときの出力波形が正弦波と著しく異なるときは、ゲインという概念は使えません。

数学でいう正弦波は $\sin(2\pi ft)$ ですが、電子工学では、位相のずれた正弦波 $\sin(2\pi ft + \Phi)$ も、正弦波 (正確には Sinusoidal Wave) といいます。

数学でいう余弦波も、電子工学では一般的に正弦波に含めます。ただし、電子工学でも、余弦波と正弦波を明確に区別する場合もあります。

● 増幅器の特性…その2：高調波ひずみ率

波形が正弦波とどのくらい異なっているかを示す値です。この値が小さいほど、正弦波に近い波形です。高調波ひずみ率が0.1%以下だと、オシロスコープなどで波形を見てもまったくわからないほどきれいな正弦波になっています。

出力波形の高調波ひずみ率が小さく、正弦波に近いほど、その増幅器は線形性が良い、つまり出力は入力によく相似しているといえます。

● そのほかに耳にする言葉

▶ インピーダンス

よく耳にするわりに、意味がわかりにくい用語ですが、これは「交流電圧/交流電流」と思ってください。いわば抵抗のようなものです。

本当の意味は違っていて、周波数応答法の基になる「ヘビサイドの演算子法」と密接に関係する概念です。

▶ ラプラス変換とフーリエ変換

回路設計に不可欠な理論ですが、ここでは触れません。文献(3)(4)などを参照してください。

1 石アンプから OP アンプへ

● 個別トランジスタで OP アンプを製作する

アナログ回路は多種多様で、なかには複雑な回路もあります。しかし、複雑な回路も、多くの場合は基本回路の組み合わせにすぎません。

アナログ回路でひんぱんに現れる OP アンプの内部回路は、まさに基本回路の宝庫です。

したがって、OP アンプの内部回路を理解できていれば、他のさまざまなアナログ回路 (発振回路、変調回路、アナログ信号処理など) の設計も、短期間でマスタできます。

見本

表1 実験用プリント基板に実装する部品

記 号	品 名	値(型番)	数量	特記事項
R_{22}, R_{23}	1/4 W J 級 炭素皮膜抵抗 (J 級とは± 5 % 精度のこと.) (K 級は± 10 % 精度である)	100 Ω	2	金属皮膜でもよい
R_{29}		220 Ω	1	
R_{21}		330 Ω	1	
R_{17}		390 Ω	1	
$R_3, R_7, R_{11}, R_{18}, R_{19}, R_{20}$		1 k Ω	6	
R_4, R_{13}, R_{16}		2.2 k Ω	3	
R_{14}		2.7 k Ω	1	
R_9		7.5 k Ω	1	
$R_1, R_8, R_{10}, R_{12}, R_{15}, R_{28}$		10 k Ω	6	
R_1, R_2		22 k Ω	2	
R_6		33 k Ω	1	
R_1, R_5		100 k Ω	2	
R_{27}		300 k Ω	1	
R_{26}	1 W J 級 酸化金属皮膜抵抗	33 Ω	1	
R_{24}, R_{25}	2 W J 級 酸化金属皮膜抵抗	3 Ω	2	
VR_1	半固定抵抗器 7 mm 角 上面調整型	10 k Ω	1	
C_1	25 V 耐圧アルミ電解コンデンサ	10 μ F	1	
C_2, C_4, C_8		100 μ F	3	
C_{10}		1000 μ F	1	
C_5	50 V 耐圧 セラミック・コンデンサ B 特性または CH 特性	100 pF	1	500 V 耐圧でも可
C_3, C_6, C_7	50 V 耐圧セラミック・コンデンサ	0.1 μ F	3	
C_9	50 V 耐圧 K 級 マイラ・フィルム・コンデンサ	0.047 μ F	1	
$D_1 \sim D_8$	小信号スイッチング・ダイオード	1N4148	8	
Q_1, Q_2, Q_4, Q_5	小信号 NPN 型トランジスタ	2SC1815	4	
Q_3, Q_6, Q_7	小信号 PNP 型トランジスタ	2SA1015	3	
Q_8	小信号 NPN 型トランジスタ	2SC4408	1	2SB647/D667, 2SB647A/D667A, 2SA1020/C2655 も可
Q_9	小信号 PNP 型トランジスタ	2SA1680	1	
Q_{10}	NPN 型パワー・トランジスタ	2SD2012	1	2SB834/D880 も可
Q_{11}	PNP 型パワー・トランジスタ	2SB1375	1	
ピン・ヘッダ(基板端子)	オス 2.54 mm ピッチ 20 ピン(10 個× 2 列)		2	
ピン・ソケット	メス 2.54 mm ピッチ 20 ピン(10 個× 2 列)		1	
ショート・ピン	2.54 mm ピッチ		2	
スペーサ	M3 ねじ付き		4	
配線用線材	ϕ 0.3 塩化ビニル被覆撚り線		適量	ジャンパ配線などに使う

● 1石アンプからスタートする

この理由は二つあります。

一つは、ビギナがトランジスタの動作を学ぶには、簡単な回路から始めたほうが動作を理解しやすいからです。

もう一つは、アンプの設計思想の変遷を学ぶためです。1石アンプからOPアンプに到達する過程は、生物の進化と似ています。激変する環境に適応できる種だけが存続する生物の世界ですが、それは電子



表2 実験用プリント基板に実装する以外に必要な部品類

区分け	品 名	型名・仕様	数量	備 考
パソコンとの インターフェース	可変抵抗器 (ボリューム)	2 k Ω (A) または (B) 10 k Ω (A) または (B)	1 1	半固定でもよい 半固定でもよい
	炭素皮膜抵抗 1/4 W J 級	470 Ω	1	発振防止用
		1 k Ω	1	第5章の負荷抵抗
		3.3 k Ω	1	減衰器
		10 k Ω	2	減衰器と Z_{in} 測定
	フィルム・コンデンサ	1500 pF	1	マイラでよい
	アルミ電解コンデンサ	10 μ F/25V	1	
	酸化金属皮膜抵抗	8 Ω /3 W 以上, ダミーロード	1	8.2 Ω や 10 Ω でもよい
	ϕ 3.5 ステレオ・ジャック	接続ケーブルのプラグを受ける	2	
	接続ケーブル	両端ステレオ・ミニ・プラグ	2	
電源 (単電源 11 石 アンプ用を除く)	整流用ダイオード	10DDA10(100 V/1 A 程度)	2	10E1, 1N4002 でもよい
	AC アダプタ	スイッチング型 9 V/1 A 以上	2	
	ポリ・スイッチ	0.5 A	2	ヒューズでもよい
	3 端子レギュレータ	AN8005(出力電圧 5 V)	1	78L05 でもよい
	アルミ電解コンデンサ	47 μ F/25 V	2	
	DC ジャック	AC アダプタのプラグに合うもの	2	
	発光ダイオード	高輝度タイプ	1	
	炭素皮膜抵抗 1/4 W J 級	10 k Ω	1	
	トグル・スイッチ	2 P 125 V/0.3 A 以上	1	3 P でもよい
	9 V 電池	006P	1	
	電池スナップ	006P 用	1	
	耐熱電線(3 色)	ϕ 0.8 ~ 1.0	適量	

回路も同じです。

真空管→個別トランジスタ→ICに至る環境の変化は、必然的に回路の設計思想を変えていきます。

2石アンプは、1石アンプの単純な2段重ねではありません。1石から2石への変化は、えら呼吸が肺呼吸に変わったほどの違いがあります。

1石から11石へと姿を変えるアンプを製作し、設計手法の進化を学びます。

実験に必要な部品を表1と表2にまとめました。部品集めの参考にしてください。

見本

第1章

小さな信号を増幅してくれる

トランジスタの動かしかた

さっそく製作…といきたいところですが、その前にある程度基礎知識を身に付けておきましょう。

すぐに製作したいという方は、本章を飛ばして第2章を見てください。

本章では、増幅器の設計に必要なさまざまな概念、用語、数式のなかから、特に重要なものを取り上げます。

数式が多くて面食らうかもしれませんが、計算なしでは実際に回路を設計できません。

1-1 トランジスタのしくみ

● トランジスタは半導体素子の一つ

半導体とは、導体と不導体(絶縁体)の中間的な性質をもつ物質という意味です。

導体とは金属などの電気を通す物質のことで、絶縁体とはプラスチックなどの電気を通さない物質のことです。

半導体の代表的な例は、IV族元素のシリコン(ケイ素)です。本書で扱う半導体はすべてシリコンでできています。

高純度のシリコンなど半導体の単結晶にIII族の元素をごく微量添加するとP型領域が作れます。また、V族の元素をごく微量添加するとN型領域が作れます。半導体の単結晶の中に、P型領域とN型領域を適切に作ると、ダイオード(diode)やトランジスタ(transistor)が作れます。

半導体についての詳細は、参考文献(1)(2)などを参照してください。ここでは概要だけ解説します。

二つの領域の組み合わせで作られるダイオード

P型領域とN型領域を図1-1(a)のように形成した半導体を、PN接合ダイオードと言います。P型領域とN型領域の境界付近を、PN接合と言います。ダイオードの回路図記号を図1-1(b)に示します。

● 電圧の加えかたによって2種類の状態になる

図1-1(c)に示すように、電圧の加えかたによって、順バイアスと逆バイアスという二つの状態にな

ります
見本

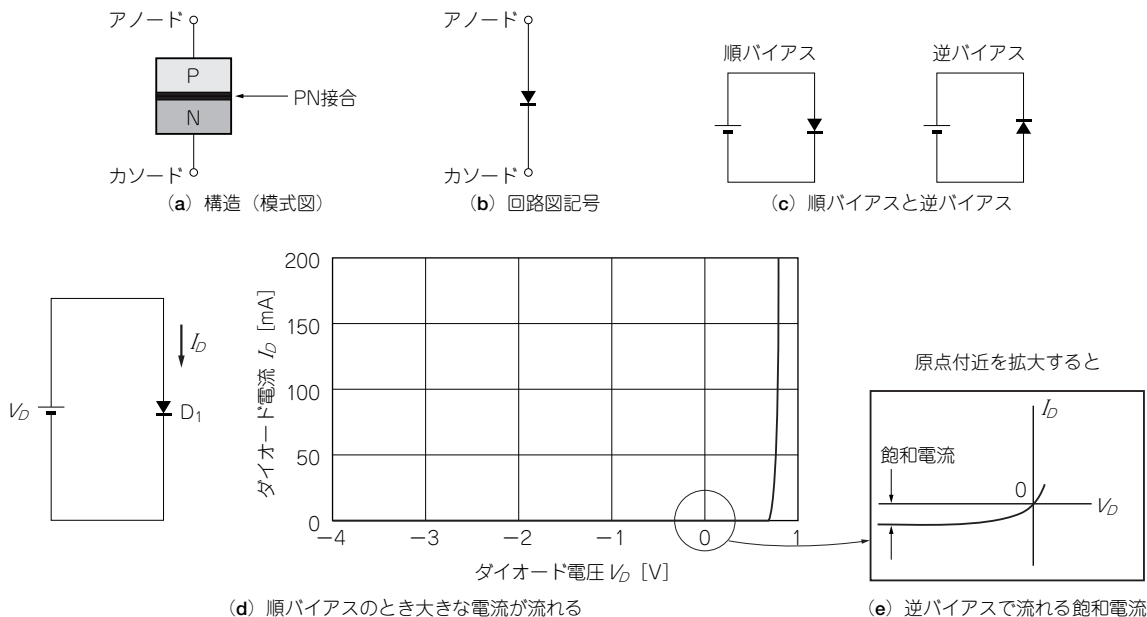


図1-1 PN接合ダイオードの構造と電流の流れかた

ダイオードのP型領域につながる端子をアノード(anode)，またN型領域につながる端子をカソード(kathode)と言います。

アノードがカソードに対しプラスになるように電圧を加えることを順バイアスと言い，カソードがアノードに対しプラスになるように電圧を加えることを逆バイアスと言います。

● 電流は順バイアスのときにしか流れない

ダイオードの電流-電圧特性を図1-1(d)に示します。

ダイオードに順バイアス電圧を加えると，電流(順電流)が流れます。

一方，ダイオードに逆バイアス電圧を加えた場合は，ほとんど電流は流れません。

逆バイアスを加えた場合の理論上の電流値は， $10^{-10} \sim 10^{-16}$ A程度です。この電流は逆バイアス電圧を大きくしても，理論上はある値以上にはなりません。値が飽和して増えないので，この電流値を飽和電流〔図1-1(e)参照〕と言います。

三つの領域で作られるバイポーラ・トランジスタ

図1-2(a)のように，P型領域を中間に挟んだNPN構造の半導体をNPN型トランジスタと言い，図1-2(b)のようにN型領域を中間に挟んだPNP構造の半導体をPNP型トランジスタと言います。

● PN接合そのものはダイオードと同じ

図1-2(a)，(b)で明らかなように，トランジスタには，

①ベース-エミッタ間PN接合

②ベース-コレクタ間PN接合

見本