即戦力！研究や実務に役立つエレクトロニクスの参考書

2017 Summer No.139

トランジスタ技術 SPECIAL

1石アンプからカスタム・アナログまで，フルディスクリートで高性能仕上げ！

実践式！トランジスタ回路の読解き方＆組合せ方入門

作れる！動かせる！

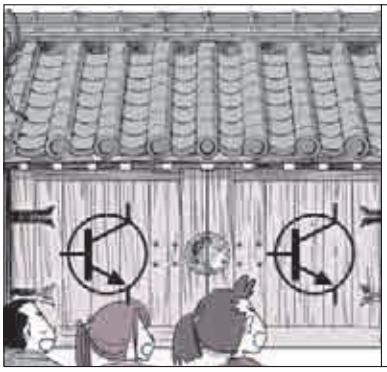
電流・電力制御弾！

実務教科書

CQ出版社

購入はこちら。
「学びを広場」
http://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/MSP/MSP201707.htm
見本

見本 PDF



第1章 オームの法則だけで大丈夫！私のお勧めトランジスタ攻略法

エミッタの気持ちになれ！

加藤 大 Dai Katoh

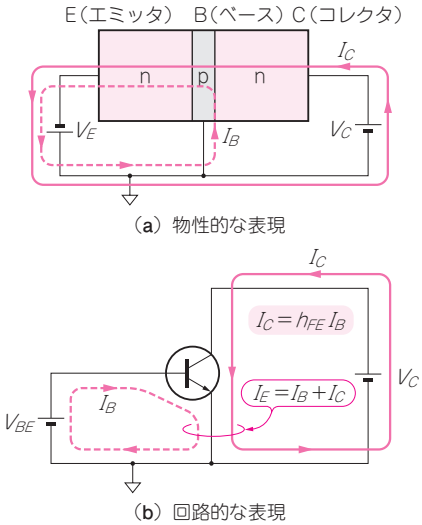


図1 教科書などでよく見かけるトランジスタの説明
間違ってはいないのだが，構造の模式図を示されても使い方はイメージできないし，この性質を思い描きながら回路設計をすることはない．まず忘れよう

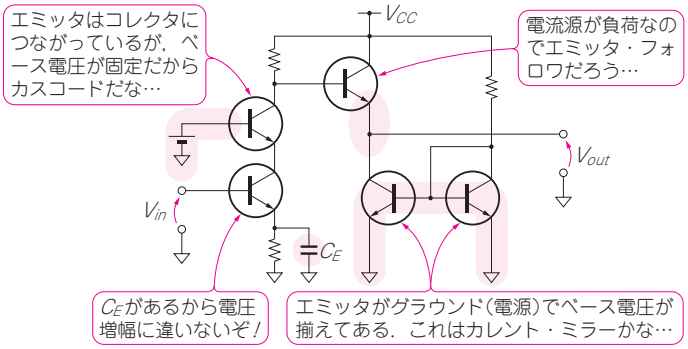


図2 トランジスタは，周辺回路との繋がりで役割が変わる
トランジスタ回路の「イディオム」をたくさん覚えると，回路を読みこなして楽しむ「読解力」と美しく優れた回路の「記述力」が身に付く

電子回路の授業や教科書でトランジスタ回路を勉強したのに，今一つ分かった感じがしない，しっくりとしない，という方は案外多いのではないでしょうか．

トランジスタ回路設計をしているとき，私はトランジスタを教科書にある等価回路などではなく，もっと抽象的なイメージでとらえていることに気づきました．本稿では，イメージを中心としたトランジスタの動作の説明と，そのイメージを駆使したトランジスタ・アンプの設計法を解説します．

エミッタに注目！

● トランジスタの構造や原理，性質は忘れよう

図1は，バイポーラ・トランジスタの説明図としてよく使われます．ベース-エミッタ間に電圧源，コレクタ-エミッタにも電圧源を配置し，ベース電流I_Bを流すと，直流電流増幅率であるh_{FE}倍のコレクタ電流I_Cが流れるという説明です．

これらは，間違ってはいません．しかし，本章を読む間はこれらの図は忘れてください．

なぜなら，**図1**は，トランジスタの構造や原理，性質を示していますが，使い方を示すのではないからです．これだけを覚えても，トランジスタを使いこなせません．

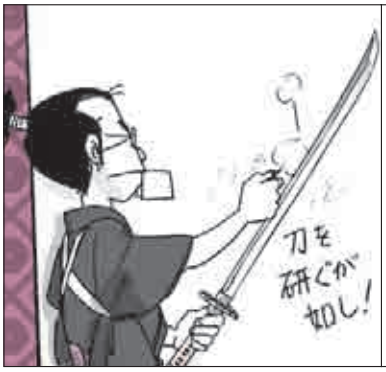
● トランジスタを知りたければエミッタの気持ちになりきれ！

私は，トランジスタの何が一番大事かと言われれば，「エミッタの気持ち」と答えます．

感覚的な表現ですが，回路図に向かうときは，いつもまずエミッタの矢印を見ます．エミッタをどう取り扱っているのか，エミッタに繋がっている配線を見ると，その回路の設計意図がわかります．なぜなら，大抵のトランジスタの「イディオム」はエミッタにかかっているのです(**図2**)．「イディオム」は，慣用句や独特の言い回しのことで，ここでは周辺を含めたトランジスタの「使い方」を表そうとしています．

見本

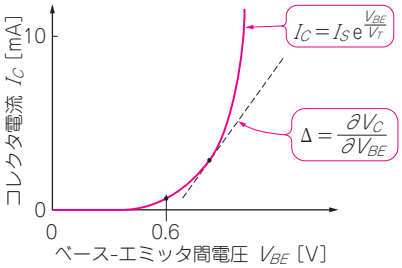
見本 PDF



第2章 恐れるに足らず！ 電卓片手に2石のシンプルな回路でやってみよう

初体験！トランジスタ・アンプの設計と実験

加藤 大 Dai Katoh



$$g_m = \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} = \frac{\partial}{\partial V_{BE}} I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} = \frac{I_C}{V_T}$$

$\exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right)$とも書く

図1 重要なトランジスタの基本特性①…ベース-エミッタ間電圧V_{BE}とコレクタ電流I_Cの関係
とても重要な式なのでぜひ覚えよう．V_{BE}の変化に対するI_Cの変化量＝グラフの傾き＝g_m．特性式を偏微分するとg_mが求まる

第1章では，トランジスタをどう使ったらいいか，どうとらえたらいいかをイメージ中心にお話をしました．そろそろトランジスタの特性について少し詳しく見ていきましょう．

前章では無視したトランジスタ自体の特性を具体的な数字を使って考察してみましょう．すると，トランジスタの動作に必要な条件が見えてきます．

トランジスタの五つの基本特性

❶ ベース-エミッタ間電圧にコレクタ電流は敏感に反応する

アナログ回路設計では，具体的な数値や関係を覚えることも大切です．ちょっと数式が出てきますが，単純化して細かいことは気にしないことにします．

トランジスタの特性を示す基本は次式です．これだけは覚えてください．

$$I_C = I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \quad \cdots\cdots (1)$$

I_C：コレクタ電流［A］，I_S：飽和電流［A］，V_{BE}：ベース・エミッタ間電圧［V］，V_T：熱電圧［V］，e：自然対数の底

飽和電流I_Sは，V_{BE}に逆向きに電圧を加えた時に流れるほんの少しの電流のことで，デバイスにより値は異なります．ポピュラな2SC1815では0.01 pAのオーダです．熱電圧V_Tは，温度（絶対温度）に比例する電圧で，室温（300 K）では約26 mVです．

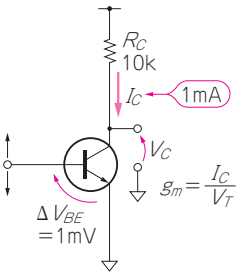
式(1)は指数関数なので，**図1**に示すようにV_{BE}のわずかな違いで，I_Cが大きく変わります．これは，「素」のトランジスタ，すなわち第1章で解説した回路ブロックVCCS（Voltage Controlled Current Source，電圧制御電流源）の$R_E = 0\,\Omega$のときのg_mを表します．

❷ コレクタ電流を大きくすると増幅パワーが上がる

図1のグラフの傾きは，VCCSが電圧を電流に変換する係数，相互コンダクタンスg_mを意味します．g_mは，I_CをV_{BE}で偏微分して（V_{BE}の変化に対するI_Cの変化だけを考えて），以下のように求められます．

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} \quad \cdots\cdots (2)$$

例えば，$I_C = 1$ mAのとき$g_m = 38$ mSで，V_{BE}を1 mV動かすと電流は38 μA変化します（**図2**）．コレクタに10 kΩの抵抗R_Cをつなげば，その電圧変化は

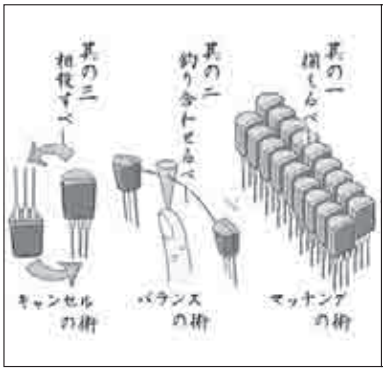


$\Delta I_C = \Delta V_{BE} g_m = \Delta V_{BE} \frac{I_C}{V_T}$
ΔV_{BE}=1mV，I_C=1mAのとき，
$\Delta I_C = 1\text{mV} \times \frac{1\text{mA}}{26\text{mV}} = 38\,\mu\text{A}$
$\Delta V_C = R_C \Delta I_C = 10\text{k}\Omega \times 38\,\mu\text{A} = 380\text{mV}$

図2 重要なトランジスタの基本特性②…コレクタ電流I_Cと電圧増幅能力g_mの関係
V_{BE}を1 mV動かすとV_Cは380 mVも動く．エミッタ抵抗を付けない，トランジスタの能力は非常に高いが，安定に動作させる[illegible]難しい

見本

見本 PDF



第3章 直流から10MHzまで一直線！0.5 Ωでグイグイ駆動

無帰還でひずみ0.003%以下！フルディスクリート・ヘッドホン・アンプ

加藤 大 Dai Katoh

エミッタの気持ちが理解できるようになると，ダイヤモンド・バッファのような定番回路ではなく，オリジナルの回路を設計製作して楽しむことができます．

本章では，ヘッドホン・アンプをディスクリート・トランジスタで設計しました．電圧ゲイン1倍の無帰還型のバッファ・アンプで，スマホやディジタル・プレーヤの出力とヘッドホン間に挿入して，音質向上を狙います(**写真1**)．

三つの設計目標

①出力の低インピーダンス化

低インピーダンスで駆動すると，ヘッドホン・ダイアフラムの不要な機械振動を電気的に制動できます[注1]．ダンピング・ファクタ(*DF*)[注2]を改善して「締まりのある音」を狙います．iPhoneの出力インピーダンス

写真1　製作したひずみ0.003%以下の無帰還フルディスクリート・アンプ
ゲイン1倍，カットオフ周波数11.5MHz，出力インピーダンス0.5Ω

Z_{out}＝2～4Ωに対して目標性能はZ_{out}＝0.5Ωとします．

②無帰還で低ひずみ化

バッファ回路の多くはOPアンプなどを使い出力を帰還して，特に終段回路のひずみを補償します．帰還の有無がサウンドにどう関わるかはずっと議論されてきました．本アンプでは，無帰還型で構成していますがひずみ率0.01%にチャレンジします．

③DCアンプ

DCアンプ構成とし交流結合のコンデンサ[注3]を廃して音質向上を図ります．一方，温度ドリフトなどの動作安定性の工夫が必要になります．

ダイヤモンド・バッファ出力回路を検討

● 温度安定性が悪い

電流バッファ回路の基本はエミッタ・フォロワです(**図1**)．エミッタ・フォロワを使って，プッシュプル型の形にしたものでは「ダイヤモンド・バッファ」が有名です(**図2**)．このエミッタ・フォロワは，無帰還で簡単な構成ですが，ひずみが発生する欠点があります．

このダイヤモンド・バッファは，出力トランジスタの発熱や，前段との電流差によるV_{BE}のミスマッチン

注1：ヘッドホンはボイス・コイルに固定されたダイアフラムの振動により音が鳴る．構造上，不要な機械振動が起こるため，それを電気的に抑える．
注2：ダンピング・ファクタ(*DF*)とはアンプのスピーカに対する制動力を表す指標．
注3：コンデンサの交流特性は損失やひずみなど[illegible]

見本

見本 PDF

第4章 IC の回路技術を駆使！ひずみ 0.02%，10Hz ～ 100kHz フラット，消費 2.7mA

強力ドライブ！ポータブル・ヘッドホン・アンプ

小川 敦 Atsushi Ogawa

図1　重低音までバッチリ再生するアンプとは？

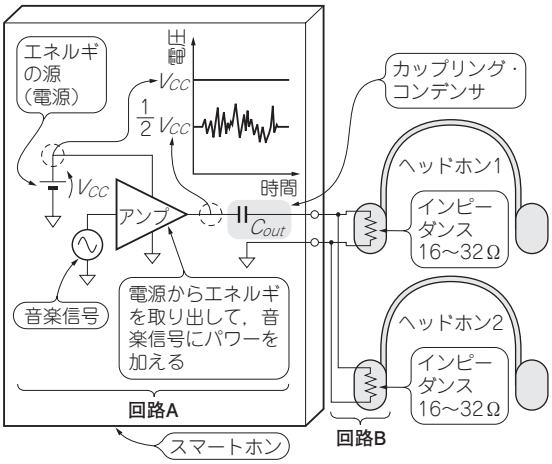


図2　重低音が出ないようにしているのは出力部にあるコンデンサ

● 重低音が出るヘッドホン・アンプを作りたい

最近は，数万円もする高級なヘッドホンをスマートホンにつないで音楽を楽しんでいる人も多いようですが(**図1**)，古いタイプのスマートホンの中には，200 Hz 以下の重低音が十分に出ない(カットされてしまう)ものがあります．

本章では，どんなスマホでも重低音がバッチリ出るアンプ(ヘッドホン・アンプ)をディスクリート・トランジスタで作ります．フルディスクリート・アンプは，オリジナルのアナログ回路を生み出すために必要なアンプやトランジスタの基本を理解するための最適な素材です．また，自分の理解度をチェックしたり，定数のチューニングにとても便利なシミュレータ(LTspice)を利用します．最終的には，最大2台のヘッドホン(8 Ω)をつないでも，重低音をバッチリ再生できるアンプです．

● じゃあ作ろう！

次に示す仕様のヘッドホン・アンプを作ります．

- 電源：乾電池2本(3 V)
- 最大出力：2.4 V_{P-P}以上
- 負荷抵抗：32 Ω
- 周波数特性：10 Hz ～ 20 kHz 以上
- ゲイン：10 dB
- 無信号消費電流：10 mA 以下
- 最低動作電圧：1.8 V(電池1本あたり 0.9 V)

出力レベルの大きなものにつないで使うことが多いと思うので，ゲインは低めに設定しました．基本設計は，ヘッドホン1台をつなぐことを考えて負荷抵抗32Ωで行いますが，最終的には16 Ωのヘッドホンを2台並列接続できるよう，8 Ωの負荷抵抗にも対応します．

重低音が出ないのはなぜ？

● 俺の古いスマートホンは重低音が出てない気がする…それには理由があります

図2に示すのは，スマートホンのヘッドホン出力端子内部の回路イメージです．音楽信号にエネルギを供給するアンプがあり，その出力にはコンデンサ C_{out}

見本

見本 PDF

第5章 JFETパラレル入力！ 街で売ってるフツウの部品で作れる

抵抗の熱雑音が見える！ 1nV/√Hz低雑音プリアンプ

小川 一朗（おじさん工房） Ojisankoubou

信号が小さいと，回路の内部雑音に紛れて，うまく観測や処理ができません．そのようなときは，低雑音アンプで信号を増幅してやる必要があります．

ところが，超低雑音OPアンプのほとんどは，バイポーラ・トランジスタ入力のタイプです．汎用的に使えるFET入力のOPアンプでは，少しノイズの多い製品しかありません．

そこで，ディスクリートのトランジスタを使い，超低雑音なアンプLNA-1（**写真1**）を作りました．低雑音アンプを設計するときの考え方を解説します．

〈編集部〉

写真1 製作した10 Hz～1 MHz，1 nV/√Hzのロー・ノイズ・アンプLNA-1

製作の動機と本器の魅力

● 50 Ωの熱雑音1 nV/√Hzを目指して

1 nV/√Hzの雑音密度のアンプは，50 Ωの抵抗の熱雑音と同じくらい低雑音のアンプです．といわれても，よくわからないかもしれません．そこで，1 nV/√Hzが果たしてどの程度の値なのか，CDと比較してみます．

CDの理論的S/Nは，量子化ビット数16ビットから計算できる量子化雑音で決まります．余談ですが，S/Nはノイズ・シェーピングをしても変わりませんし，ディザを入れても悪くなるだけです．ただ量子化雑音が白色雑音だという仮定は誤りだと思っています．

$$S/N_{(CD)} = 6.02 \times 16 + 1.76 \fallingdotseq 98\ \mathrm{dB}$$

CDの出力が1 V_{RMS}のとき量子化雑音電圧$v_{N(CD)}$は，

$$v_{N(CD)} = 10^{-98/20} \fallingdotseq 13\ \mu V_{RMS}$$

となります．一方1 nV/√Hzのアンプで1 V_{RMS}を出力し，CDと同じ22.05 kHz帯域とすると，

$$v_{N(LNA)} = 1\ \mathrm{nV} \times \sqrt{22.05\ \mathrm{k} \times 10^3} \fallingdotseq 148\ \mathrm{nV_{RMS}}$$
$$S/N_{(LNA)} \fallingdotseq -20 \log(148 \times 10^{-9}\mathrm{V}) = 137\ \mathrm{dB}$$

となります．

低雑音化は山登りと同じ！ 0.5 nV/√Hzの世界を見てみたい　Column 1

入力換算雑音密度が1 nV/√Hzというのは，今まではなかなか到達困難な値でしたが，近年はデバイスの性能が良くなってきて，本稿で紹介するように割と簡単に作れるようになりました．

しかし，これをさらに半分の0.5 nV/√Hzにしようとするとまだなかなか難しいです．イメージ的には富士山とエベレストのような差でしょうか．高さが倍になっただけで，難しさは天と地です．

私の次の目標は切りのよい0.5 nV/√Hzですが，これが達成できたとして，何が新たに測定できるようになるのかはわかりません．何のためにつくるのかと言われたら，そこに山があるからかな…．

〈小川 一朗〉

見本

見本 PDF

第6章 μsの超高速ON/OFF! 劣化なしで微小～大電力をロスレス伝送

MOSFETで作るオン抵抗5mΩ，35V/18Aの無接点双方向リレー

西村 康 Yasushi Nishimura

そもそもリレーとは

● 電子制御で二つの回路を切り離したり，つないだりする部品

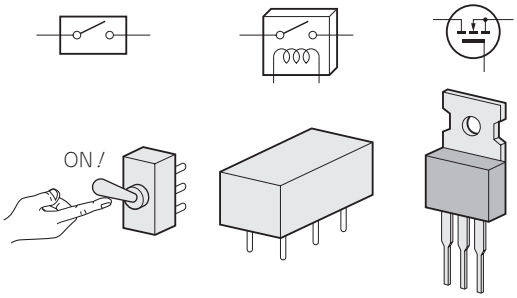
電子回路では，回路の途中にスイッチを挿入して，これを閉じたり開いたりすることで，電源や信号の流れを遮断したり(ON)，導通させたり(OFF)します．

手動で制御する部品をスイッチ，電子的に制御する部品をリレーと呼んでいます(**図1**)．

昔は，可動接点をもつメカ式リレーがほとんどでしたが，半導体の性能向上により，MOSFETなどを使ったリレーに置き換えられるようになってきました．

リレーの用途はさまざまです．

図2に示すように，アンプの出力電位が不安定な電源ON直後や壊れたときに，異常な信号が負荷に漏れるのを防ぐことができます．電気ポットなどでは，お湯が沸くと自動的に電源を切るためにリレーが使われます．



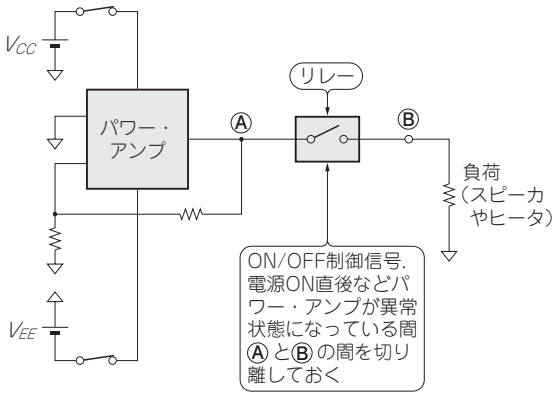
(a) スイッチ　(b) メカ式リレー　(c) 半導体リレー(MOSFETなど)

図1　電子回路で利用されている3種類のリレー

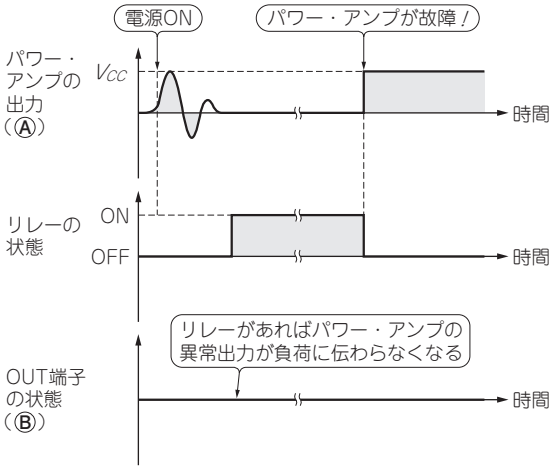
● 理想的なリレーとは

接触抵抗0Ω，遮断抵抗∞Ω，ON⇔OFF切り替え時間0s，電圧と電流のリミットなし，駆動回路がシンプルで0Wで動く，ON/OFFを繰り返しても劣化しない….

そんな万能リレーがあればどんな用途にも使えるのですが，現実的には存在しないため，用途に応じたリレーが各種作られています．



(a) 接続図

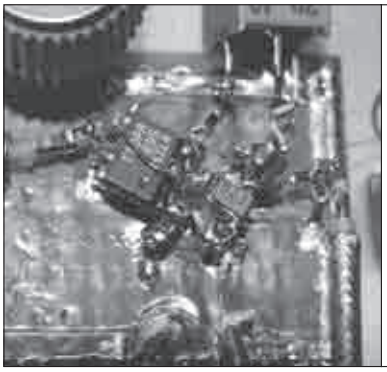


(b) 各部の波形

図2　リレーの使い方の例
リレーはパワー・アンプの異常な出力が負荷に伝わらないようにする回路の開閉部品

見本

見本 PDF



第7章 高周波性能を蝕(むしば)む容量との戦いに勝つための実装ノウハウ

0.26pF, 785MHz の低入力容量広帯域アクティブ・プローブ

登地 功 Isao Toji

USB，HDMI，無線LAN，携帯電話のLTE通信など，身の回りに高周波システムが増えています．回路設計で扱う機会も増えています．

本稿では，高周波信号の観測に使えるアクティブ・プローブの作り方を通して，部品選択，回路の工夫，実装のポイントを解説します．

図1に今回製作したプローブの回路図を示します．－3 dB周波数は1 GHzを目指しましたが，実測で785 MHzになりました．測定器メーカのアクティブ・プローブは高価なので，測定中に壊しても懐が痛まないプローブとして活用できそうです．〈編集部〉

高周波計測には静電容量の小さなプローブが要る

● 高周波の測定は50 Ωマッチングが定番，しかし回路に当てて測りたいならプローブが必要

高周波アナログ回路は，一般的には50 Ωの伝送線路で接続するので，コネクタがついていれば同軸ケーブルで接続できるのですが，プリント基板上ではコネクタ接続ではないのが普通です．

基板上の回路は，必ずしも50 Ωになっているわけではありません．したがって，信号を引き出し，観測したくても，同軸ケーブルをはんだ付けして，というわけにはいかないことも多いです．

信号を観測するたびに，回路を切り離して同軸ケーブルを取り付けるのも手間がかかります．できれば，プローブでちょこっと触って観測したいところです．

● プローブの入力容量は測定したい信号の波形を変えてしまう

オシロスコープで信号を観測するとき，低い周波数ではオシロスコープの入力抵抗だけが問題になりますが，一般的に使われているパッシブ・プローブ(**写真1**)と呼ばれるプローブの入力抵抗は10MΩくらいあるので，特に高インピーダンスの回路でないかぎりは，あまり問題になりません．

ところが，高周波信号や高速ディジタル信号を観測しようとすると，プローブの入力静電容量が問題になります．

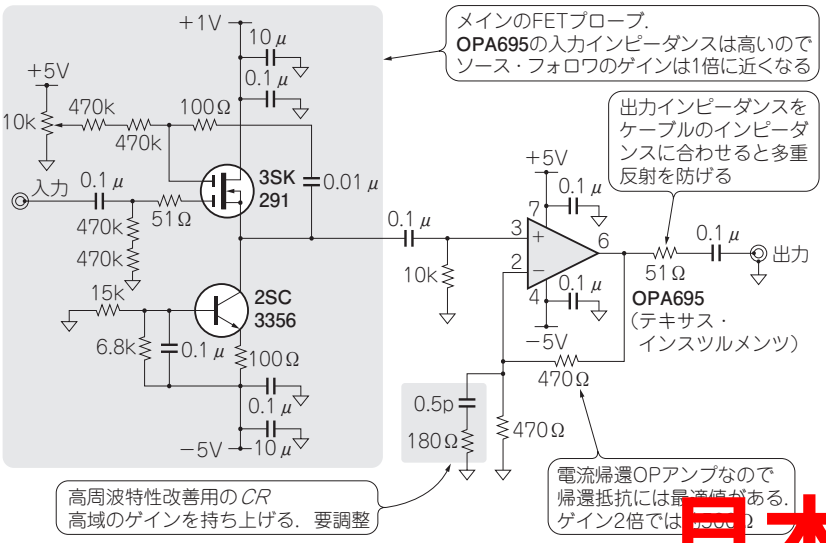
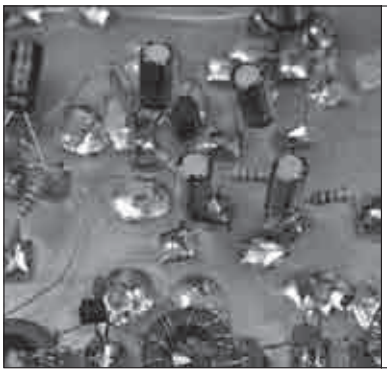


図1 FETプローブの最終回路
入出力のレベルを同じにするためゲイン2倍のアンプを付ける

見本

見本 PDF



第8章 発振，共振，フィルタ，周波数変換，検波…無線技術の基本丸わかり

情熱のフルディスクリートFMラジオ

別府 伸耕 Nobuyasu Beppu

トランジスタを使う回路の中でも，昔から親しまれているものにラジオがあります．ここではトランジスタをフル活用してFMラジオを作ります(**写真1**)．

回路は，増幅/発振/周波数変換/検波で構成されている「スーパーヘテロダイン方式」です．この回路は専用ICで作るのが一般的ですが，すべてディスクリートで作るため，ブラック・ボックスは一切なくなり，回路の動作をすべて見られます．

部品点数が多く，コイルを手作りする際の調整が必要などの手間がかかりますが，回路動作の本質を理解するにはもってこいです．〈編集部〉

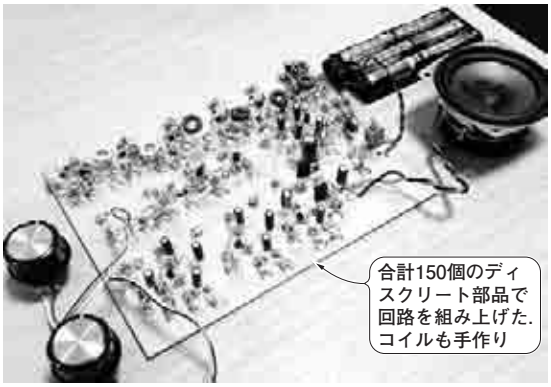


写真1　FMラジオをフルディスクリートで手作り！
FMラジオICの中に入っている回路を全てひっぱり出すと，この程度の規模になる

こんな製作物

● フルディスクリートで作るメリット

本章で紹介するFMラジオは，抵抗，コンデンサ，コイル，トランジスタ，ダイオードなど，ディスクリート部品だけで構成されています．

フルディスクリートは次のメリットがあります．

① 専用ICがなくても，ゼロから作れる
② ゼロから作るので，回路の動きがよく見える
③ 回路の細かいチューニングを自分の手でできる
④ なぜ「FMラジオが難しい」といわれているのかわかる
⑤ 高周波回路の基本的なセンスが身に付く

FMラジオの回路は，特別にニッチなものではありません．いわゆる無線機の構成に沿った，素直な形の回路です．そのため，回路をブロックごとに組み上げていくことで，増幅回路，発振回路，ミキサ，検波回路など，ほかの回路に応用が利くような設計の基本を身に付けることができます．

専用ICを使うと組み立てや調整は簡単ですが，そのICが入手できなければ製作すること自体が不可能になります．フルディスクリートなら，その心配は不要です．

表1　製作するフルディスクリートFMラジオの仕様

項　目	内　容
受信周波数	80 M ± 2 MHz(中心周波数は調整可能)
感度	市販のポケット・ラジオ程度
音量	スピーカを鳴らして，部屋で静かに聞ける程度

● FMラジオの目標仕様

製作するFMラジオの性能は，**表1**のとおりです．

FMラジオは，国内では76 M～90 MHzで放送されていますが，このすべての周波数に対応するのは大変です．

ラジオの受信機には，通過させる周波数を狭めるフィルタが必要です．しかし，ある周波数だけを通すことと，選択する周波数を広く動かすことを両立するフィルタ回路を設計するのは大変です．そこで，ここでは受信する周波数帯域幅を“4 MHz”と狭めることにします．

中心周波数は80 MHzとしています．私がTOKYO FM(80.0 MHz)を聞きたいと思ったのが理由です．中心とする周波数は可変できるので，例えば“78 M ± 2 MHz”などのように，自分が住んでいる地域

見本

見本 PDF

第9章 IC依存症のあなたに！ 電圧安定化のしくみから熱設計の基本までゼロからマスタ

四つの構成回路を一つずつ！ モジュール交換式チュートリアル電源

小山 丸穂 Maruo Oyama

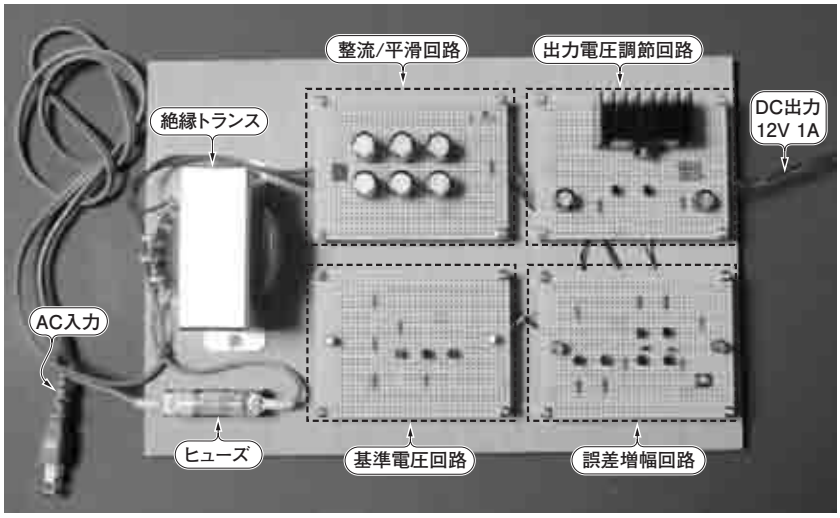


写真1　学習用のモジュール交換式電源シリーズ・レギュレータを製作
機能ごとに基板を分けた．整流/平滑回路，出力電圧調節回路，誤差増幅回路，基準電圧発生回路の四つの基板で構成される．出力や精度を改善したいときなどには，交換できる．基板を分けたのでパワー・グラウンドと信号グラウンドに分離して配線した．AC電圧はトランスで絶縁する

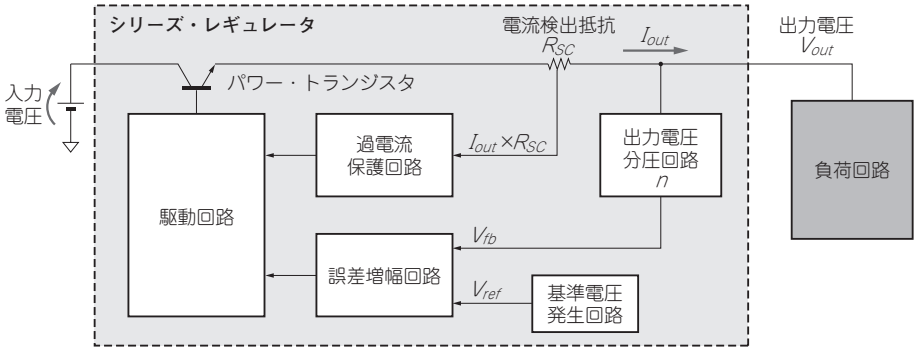


図1　ベーシックかつオーソドックスな回路方式である「シリーズ・レギュレータ」をテーマにする回路構成
定電圧回路の一般的な構成．フィードバック制御で安定化する

安定化電源の回路方式として，シリーズ方式とスイッチング方式があります．FPGAなどのディジタル回路用の電源として，スイッチング電源が主に使われています．電波妨害が気になる無線機やラジオなどでは，シリーズ・レギュレータの出番はまだあります．

本稿では，四つのディスクリート回路基板で構成されたシリーズ・レギュレータの電圧安定化のしくみから熱設計の基本を解説します．本器は，モジュールのように交換することができ，回路を自由にカスタマイズすることもできます．〈編集部〉

● バイポーラ・トランジスタで回路づくり

今回，製作するシリーズ・レギュレータは，最大出力12 Wです．

本器は，次の四つのディスクリート基板で構成しています(**写真1**)．

見本

見本 PDF

第 10 章 低ひずみ 0.001%，低雑音0.5 μVRMS，RIAA 偏差± 0.5dB の MM カートリッジ用

アナログ・レコード再生用 500円イコライザ・プリアンプ

黒田 徹 Tooru Kuroda

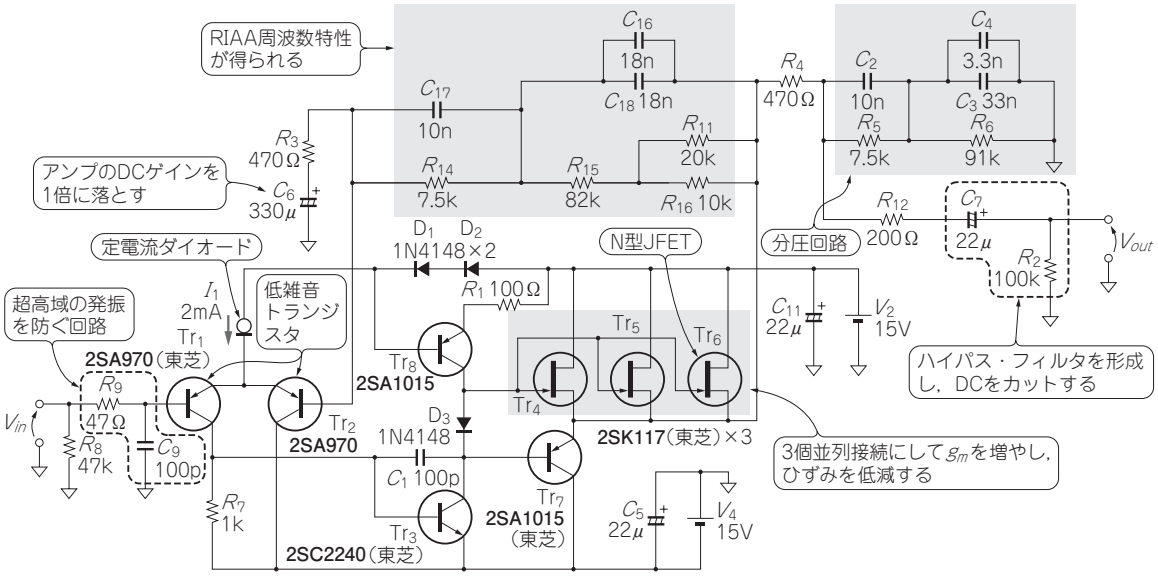


図1　本器の回路図
帰還回路と分圧回路は図7と同じ．増幅部は高性能が得られる

プリアンプは，音楽プレーヤなどからの出力を受けて音質を調整したり，音量を調整するアンプです．

本稿では，アメリカで人気が再燃しているアナログ・レコード用のプリアンプに内蔵されているRIAAイコライザ・アンプの作り方や低雑音化の方法を解説します．本器の回路を**図1**に示します．**表1**は，本器の増幅部を代表的なオーディオ用低雑音OPアンプに置き換えたときの出力雑音です．500円のディスリート部品であっても，1,200円のOPアンプICに負けないくらいです．〈編集部〉

表1　本器の増幅部分を代表的なオーディオ用低雑音OPアンプに置き換えたときの出力雑音比較
雑音帯域：40 Hz～100 kHz，1 kHz
ゲイン：26.45 dB．測定系残留雑音：4 μVRMS

機種名	出力雑音電圧
本アンプ	13.3 μVRMS
OPA1612A	7.4 μVRMS
LME49880MR	10.9 μVRMS
OPA2134PA	16.9 μVRMS
MUSES8920D	18.8 μVRMS
NE5532P	28 μVRMS
LME49720NA	31.5 μVRMS
LME49860NA	41 μVRMS
LM4562NA	52 μVRMS

● 今こそLPレコードを再生したい

このところ，ハイレゾ音源でなければ，Hi-Fiにあらず，と言わんばかりの雰囲気が世間にあふれています．一方では，アナログ音源を再評価する風潮も出てきました．

アナログ音源と言えば，真っ先にアナログ・レコード(LP，Long Playing)が思い浮かびます．1982年にCDが現れたとき，LPは早晩，消え去る運命と思われました．たしかに一時は衰退しました．が，どっこい生き残っています．それどころか，最近はアルバムをLPで出す事例も少なくありません．

LPを良い音で鳴らすにはお金がかかりますが，

見本