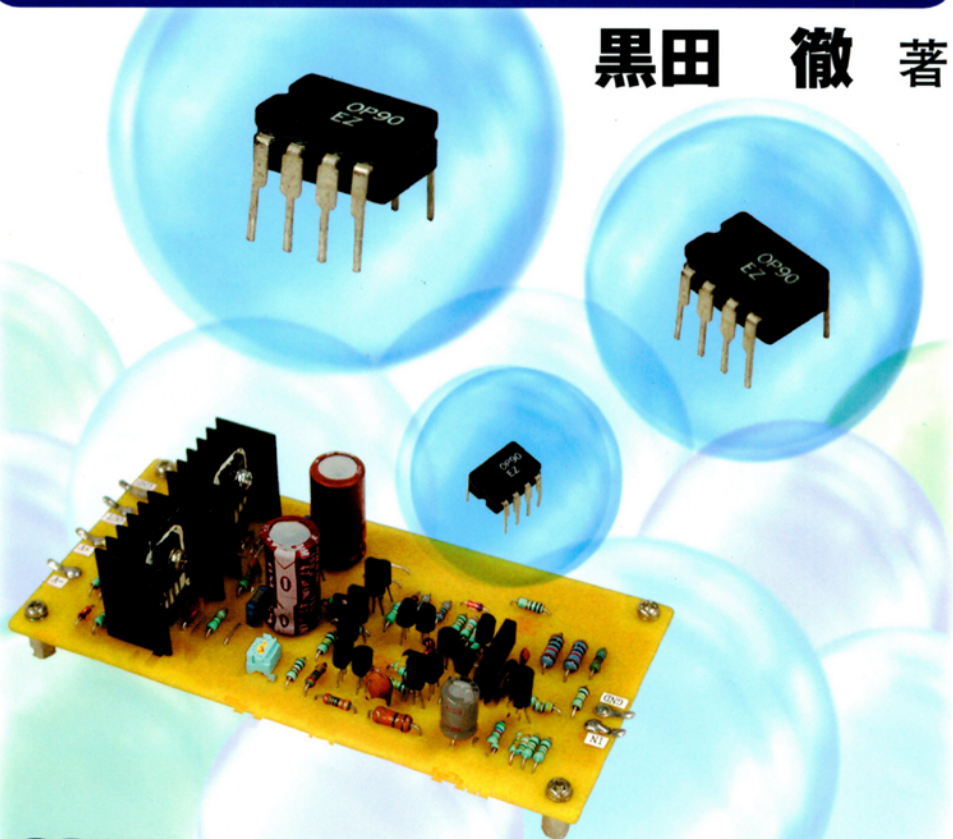


解析 OPアンプ & トランジスタ活用

増幅回路設計の真髄を検証する

黒田 徹 著



CQ出版社

解析OPアンプ& トランジスタ活用

増幅回路設計の真髄を検証する

黒田 徹 著

CQ出版社

CQ出版社

見本

まえがき

筆者が初めてOPアンプを手にしたのは30年ほど前のことで、モノリシックICのOPアンプは μ A709など、わずかに数種類でした。翻って現在は、選択を迷うほど多くの型名のOPアンプICがあります。そしてOPアンプに関する名著も枚挙に事欠きません。ただ、これらの書物はOPアンプの使い方や応用回路の紹介を重視するものがほとんどです。

私はそれらの書物から貴重な情報を得ましたが、若干のモノ足りなさも抱いておりました。その訳は「OPアンプのデータシートに、その型名固有の欠点が積極的に記されることはない。それゆえ隠れた欠点をあぶり出すには、OPアンプの内部回路を解析するしかない」ということを常日頃、肌身に感じていたからです。

そこで私は十数年間、めばしいOPアンプの内部回路の解析に没頭しました。そして、内部回路の解析は次のメリットをもたらしました。

- ・データ・シートを深く読む力がつく
- ・基本的なアナログ回路の設計法を習得できる
- ・OPアンプの間違った使い方を避けることができる
- ・OPアンプ固有の潜在能力を目一杯引き出すことができる
- ・回路の美しさを感じる心を養い、回路設計の意欲を高める

本書はこの考えに基づき、次のシナリオでOPアンプの内部回路を解析します。

第1章：個別のトランジスタ5石で簡単なOPアンプを作り、基本的な特性を測定しながら、OPアンプの用語と動作を学びます。

第2章：代表的な汎用OPアンプIC 4558の内部回路を解析し、第1章の5石OPアンプと比較します。

第3章：回路シミュレータSPICEを使い、第1章の5石OPアンプを改良して特性を飛躍的に高めます(トランジスタ技術2001年11月号、特設記事を補筆)

第4章：市販のOPアンプICでは実現困難な高性能アンプを、個別トランジスタ回路で製作します。また、トランジスタの寄生容量に起因する非直線ひずみを計算し、独自の回路でひずみをキャンセルします。

第5章：Bi-FET型OPアンプと5532型OPアンプを解析し、ウィルソン型カレント・ミラーなどの動作を学びます。

第6章：定番・高精度OPアンプと低雑音OPアンプAD797を解析し，高度の回路テクニックを学びます。

第7章：高速・広帯域型OPアンプの解析と応用例。

第8章：5V以下の低電圧単一電源で動作する高性能CMOS型OPアンプの紹介(トランジスタ技術2001年3月号特集記事および追加の応用回路)。

なお予備知識として，必要な最小限のトランジスタ物理をAppendixにまとめました。

本書が，アナログ回路の設計を目指す学生諸氏，OPアンプの応用回路を設計するエンジニア諸兄，また趣味でアンプを自作する諸兄のお役に立てれば幸いです。

最後になりましたが，本書の執筆に暖かい励ましを戴いた遠坂俊昭氏，出版の機会を与えてくださったCQ出版株式会社，企画・編集を賜った蒲生良治氏に深くお礼申し上げます。

2002年8月 黒田 徹

謝 辞

本書の第4章～第7章は，(株)アイエー出版発行の「ラジオ技術」誌に連載しました「実験トランジスタアンプ設計講座・実用技術編」の記事を使用しております。記事使用の許可を戴いたアイエー出版社ならびに十数年に及ぶ編集を賜った堀井資朗氏に深く感謝申し上げます。

目次

第1章 OPアンプを手作りトランジスタ回路で学ぶ	11
1.1 OPアンプのあらまし	11
OPアンプのもつ基本端子は五つ	11
二つの入力端子と一つの出力端子	12
OPアンプの増幅度…差動電圧利得 A_{VD}	12
OPアンプの電源電圧	12
設計するときに便利な理想OPアンプの考え	13
1.2 5石OPアンプの実験	13
OPアンプの中身…トランジスタによる増幅回路	13
5石OPアンプを製作する	14
5石OPアンプの回路動作	16
非反転増幅器としての実験	18
ボルテージ・フォロワ回路の実験	21
反転増幅器の実験	22
1.3 OPアンプの交流(AC)特性	23
最大出力電圧振幅対周波数特性	23
スルーレート(Slew Rate)	24
その他の交流特性	25
1.4 OPアンプの直流(DC)特性	25
入力バイアス電流 I_B とオフセット電流 I_{IO}	25
入力オフセット電圧 V_{IO}	26
最大出力電圧対負荷抵抗特性	28
同相入力電圧範囲	28
1.5 OPアンプを負帰還で使うときの安定性	28
増幅器と発振回路は表裏一体	28
利得は複素数で表す	29
周波数特性を表すボーデ線図	30
オープン・ループ・ゲインのボーデ線図	30
ボーデの安定判別法	31
〈コラム〉アナログIC設計に関する参考文献紹介	34

第2章 汎用 OP アンプ IC 4558 の解析	35
2.1 4558 の基本回路解析	35
オリジナル型名は RC4558	35
カレント・ミラー (Current Mirror) 回路の基本	36
エミッタ抵抗を挿入したカレント・ミラー回路	38
RC4558 内部回路のカレント・ミラー回路	38
カレント・ミラーを負荷にする差動増幅回路	39
<コラム> エミッタ抵抗を挿入したカレント・ミラーの解析	40
ダーリントン接続回路	43
コンプリメンタリ・エミッタ・フォロウ	44
出力段の動作階級	46
出力段バイアス電圧の温度補償	47
2.2 4558 の等価回路と電気的特性	48
トランジスタの小信号等価回路	48
h パラメータの一部を省略した小信号等価回路	49
カレント・ミラー負荷・差動増幅回路の小信号等価回路	50
エミッタ・フォロウの小信号等価回路	51
RC4558 のオープン・ループ・ゲイン対周波数特性	51
スルーレートと位相補償容量の関係	55
スルーレートと利得帯域幅の関係	56
4558 の雑音・ひずみ率特性	56
4558 の DC 特性	59
第3章 回路シミュレータでつくる本格 OP アンプ	61
3.1 アナログ回路シミュレーションには SPICE	61
なぜ回路シミュレータか	61
SPICE とは	61
SPICE の回路ファイル	63
モデル・パラメータも必須	63
SPICE によるシミュレーションの種類	63
5石 OP アンプのシミュレーション	65
3.2 5石 OP アンプを改良する	69
最大出力電流を増やすための改良	70
オープン・ループ・ゲインを増やすための改良	70
入力オフセット電圧を最小化する	73

入力オフセット電圧が増加した理由	75
入力オフセット電圧を減らす簡単な方法	77
カレント・ミラー回路とダーリントン回路で入力オフセット電圧を減らす	78
初段トランジスタの選別が重要	80
飽和防止回路	81
10石非反転増幅器の周波数特性	83
電源電圧除去比 (Supply Voltage Rejection Ratio) の解析	89
10石OPアンプのスルーレート	91
Appendix 1 SPICE モデルを理解するために——	
トランジスタの等価回路	92
エバース・モル・モデル	92
▶ 活性領域 ▶ 逆接続領域 (逆方向活性状態ともいう) ▶ 飽和領域 (飽和状態ともいう)	
周波数特性の計算に役立つハイブリッド π 型モデル	95
▶ ベース-実効ベース間コンダクタンス g_b ▶ 相互コンダクタンス g_m ▶ 実効ベース-エミッタ間コンダクタンス g_π ▶ アーリ電圧 ▶ 接合容量 ▶ 遷移時間と拡散容量 ▶ f_T と τ_F の関係	
<コラム> 順方向遷移時間 τ_F を測定する	104
Appendix 2 周波数特性改善のために ベース接地回路のおさらい	105
▶ ベース接地回路の特徴 ▶ ベース接地回路の出力静特性 ▶ ベース接地回路の小信号等価回路 ▶ ベース接地回路の入力抵抗 ▶ ベース接地回路の出力抵抗 r_{ob} ▶ ベース接地増幅回路の電圧利得 ▶ ベース接地増幅回路の高域・周波数特性 ▶ 電流源でドライブされたベース接地回路	
第4章 トランジスタによるICを越えるOPアンプの設計	111
4.1 なぜ個別半導体アンプか	111
OPアンプICのもつ弱点	111
個別半導体…トランジスタによるOPアンプ回路	112
4.2 トランジスタによるOPアンプ回路のあらまし	112
設計するOPアンプ回路の骨格	113
フォールデッド・カスコード回路を採用する	113
4.3 初段FET差動回路を設計するために	115
接合型FETの基本特性	115
カスコード回路の電圧利得と周波数特性	116
初段FETの選択	118

2段目トランジスタ $Tr_1 \cdot Tr_2$ と出力段 $Tr_5 \cdot Tr_6$	119
4.4 基本回路に肉付けする	120
初段をカスコード・ブートストラップにする	120
2段目出力電圧のひずみ率を計算する	124
C_{ob} キャンセル回路でひずみ率を激減させる	127
2段目の実際の回路設計	129
出力段トランジスタの C_{ob} をキャンセルする	130
AB級コンプリメンタリ C_{ob} キャンセル回路	131
A級コンプリメンタリ C_{ob} キャンセル回路	132
4.5 シミュレーション&製作・実験	132
位相補償容量の最適値を求める	132
スルーレートを確認する	134
製作に使用する部品	138
電気的特性の測定	140
Appendix 3 C_{ob} の電圧依存性によるひずみを解析的に計算する	144
第5章 汎用OPアンプICの解析	147
汎用OPアンプとは	147
5.1 Bi-FET型OPアンプTL07xシリーズの解析	147
Bi-FETプロセス	147
2種類のカレント・ミラー	149
TL07xとTL08xの雑音特性	151
5.2 Bi-FET型OPアンプLF353の解析	153
ワイドラー型カレント・ミラーとウィルソン型カレント・ミラー	153
LF353の初段・共通ソース電流	156
スルーレートの算出	156
出力電流の制限回路	157
出力インピーダンス対周波数特性	157
Q_s の飽和防止回路	158
ひずみ率特性と周波数特性	158
5.3 バイポーラOPアンプNE5532の解析	159
入力端子間ダイオードの役割	159
カレント・ミラーと飽和防止回路	161
ラテラル(Lateral)PNPトランジスタ	161
フィード・フォワード(位相)補償	163
非対称AB級動作の出力段	167

第6章 高精度および低雑音 OP アンプ IC の解析	169
6.1 高精度 OP アンプの構成と OP07	169
高精度 OP アンプとは	169
入力バイアス電流打ち消し回路	170
入力オフセット電圧を小さくする工夫	172
OP07の AC 特性と雑音特性	173
高精度 OP アンプを DC サーボ回路に使う	174
6.2 低雑音 OP アンプと雑音解析の基礎	176
雑音波の大きさは二乗平均値で表す	176
〈コラム〉 アンサンブル平均とは	176
抵抗で発生する熱雑音	177
理想バイポーラ・トランジスタのショット雑音	178
理想バイポーラ・トランジスタの雑音等価回路	178
差動増幅回路の雑音等価回路	179
OP アンプの雑音等価回路	180
OP アンプの入力換算雑音電圧密度	181
OP アンプの入力雑音電流密度	182
信号源抵抗の影響	182
OP アンプの全入力雑音電圧密度	183
帰還率の逆数…ノイズ・ゲイン	185
6.3 低雑音 OP アンプ AD797 の構成	186
AD797のオープン・ループ・ゲイン	186
AD797の位相補償容量	189
出力段のひずみ打ち消し回路	190
第7章 高速・広帯域 OP アンプ IC の解析	193
7.1 普通的高速・広帯域 OP アンプ	193
高速・広帯域 OP アンプには二つのタイプがある	193
高速 PNP トランジスタを作る VIP プロセスの LM6361 シリーズ	193
LM6361/6364 は局部電流帰還で安定化	195
〈コラム〉 局部電流帰還について	196
オープン・ループ・ゲインを確認すると	197
大きな負荷容量でも発振しない仕組み	197
LM6361 シリーズのその他の特性	197
LM6361 シリーズ上位…CB プロセスによる AD847 シリーズ	198

ダーリントン出力段でも容量負荷に強い仕組み	199
JFETソース・フォロワ入力 <small>の</small> OPA655 <small>…</small> <i>DG</i> と <i>DP</i> が小さい	200
7.2 カットオフ周波数<small>が</small>変化しない電流帰還型 OP アンプ	201
普通のOPアンプ <small>…</small> 電圧帰還型OPアンプ <small>の</small> 欠点	201
電流帰還型OPアンプ <small>の</small> 動作原理	203
トランス・インピーダンス(Trans-impedance)の概念を使うと	205
反転増幅器で使うときのクロズド・ループ・ゲイン	207
電流帰還型OPアンプ <small>の</small> 出力インピーダンス <small>は</small> どうなるか	208
スルーレートを制約するもの	209
許容差動入力電圧 <small>は</small> 低いので要注意	210
広帯域AC-DCコンバータへの応用	210
7.3 JFET入力・高速広帯域 OP アンプ	212
CBプロセスによるAD845	212
DifetプロセスによるOPA627/637	212
高速性を示す重要パラメータ <small>…</small> セトリング時間	215
広帯域・平衡増幅器へのOPA627 <small>の</small> 応用	216
平衡増幅器における同相信号除去比 <small>とは</small>	217
CMRRを改善する同相負帰還技術	218
第8章 CMOS型OPアンプICの解析	220
8.1 CMOS OPアンプ<small>の</small>登場と高性能化	220
低消費電力化とレール・ツー・レール動作	220
CMOSレール・ツー・レールOPアンプAD8532	221
低ひずみのOPアンプOPA340/350/2340/2350	223
R-R入力特有のミッド・スイングひずみに注意	224
ミッド・スイングひずみを避ける方法	226
CMOSの低雑音OPアンプLMV751	228
8.2 さらに発展するCMOS OPアンプたち	229
入力オフセット電圧を自己補正するCMOS OPアンプTLC4501/4502	229
オフセット電圧打ち消しのメカニズム	230
TLC4501を用いた高精度電圧源	232
2V以下で動作するCMOS OPアンプNJU7096	233
低電源電圧で安定に発振する正弦波発振器への応用	233
参考文献・引用文献	237
索引	238

第1章

OPアンプを 手作りトランジスタ回路で学ぶ

はじめに個別のトランジスタ5石で簡単なOPアンプを作ります。そのOPアンプで基本的な特性を測定しながら、OPアンプの用語と動作を学びましょう。

1.1 OPアンプのあらまし

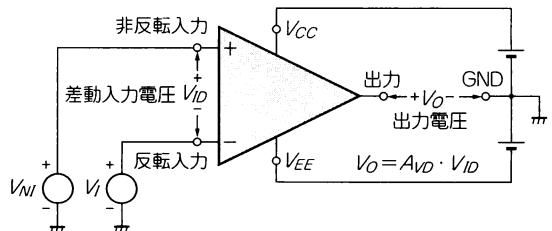
● OPアンプのもつ基本端子は五つ

図1-1をご覧ください。OPアンプには必ず以下の5個の端子があります。

- ・ 非反転入力端子 (NonInverting Input)
- ・ 反転入力端子 (Inverting Input)
- ・ 正電源端子 (V_{CC} , $+V_{CC}$, V^+ , $+V_S$ などと記す)
- ・ 負電源端子 (V_{EE} , $-V_{EE}$, V^- , $-V_S$ などと記す)
- ・ 出力端子 (Output)

このほかに「位相(周波数)補償端子」や「オフセット・ゼロ調整端子」などをもつことがあります。

〈図1-1〉
OPアンプの基本端子と
端子に加える電圧



● 二つの入力端子と一つの出力端子

▶ 反転入力と非反転入力

二つの入力端子はOPアンプ記号の中に+と-を記し、つぎのように識別します。

- +：非反転入力端子
- ：反転入力端子

二つの入力端子のどちらにも信号を加えることができます。OPアンプの非反転入力端子～グラウンド間電圧を「非反転入力電圧 V_{NI} 」、反転入力端子～グラウンド間電圧を「反転入力電圧 V_I 」と呼びます。なお、以降はグラウンドをGNDと記します。

▶ 二つの入力電圧の差…差動入力電圧 V_{ID}

これは非反転入力端子と反転入力端子間の電圧です。すなわち、

$$V_{ID} = V_{NI} - V_I \dots\dots\dots (1-1)$$

▶ シングル・エンド出力(Single End Output)

OPアンプの出力端子は一つで、出力端子～GND間電圧が出力電圧です。このように信号端子対の一端が接地されることを「シングル・エンド」といいます。

● OPアンプの増幅度…差動電圧利得 A_{VD}

理想的なOPアンプの出力電圧 V_O は、差動入力電圧 V_{ID} に比例します。その比例定数つまり増幅度を「差動電圧利得 A_{VD} 」といいます。すなわち、

$$V_O = A_{VD} \cdot V_{ID} \dots\dots\dots (1-2)$$

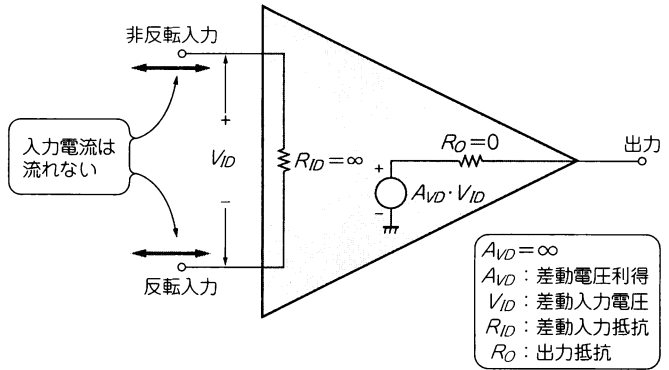
交流信号に対する差動電圧利得を「オープン・ループ・ゲイン(Open Loop Gain)」とか「開ループ・ゲイン」と呼びます。OPアンプのデータ・シートに記載されている電圧利得は一般に直流・差動電圧利得で、無限と言って良いほどの大きな利得が特徴です。

● OPアンプの電源電圧

OPアンプは基本的には2電源で使用します。正電源端子～GND間には+5～+15Vぐらいの電圧を与え、負電源端子～GND間には-5～-15Vぐらいの電圧を与えます。しかし、負電源端子を接地して1電源で使用する場合があります(最近はとくに5V 1電源で使うケースが多くなってきている)。

なお図面上で回路をすっきり見せるために、OPアンプの電源端子や電源ラインをあえて回路図に記さないことがあります。もちろん実際には図1-1に示したように電源を接続しなければなりません。

〈図1-2〉
理想OPアンプ



● 設計するとき便利な理想OPアンプの考え

図1-2に示す、つぎの条件を満足するOPアンプを「理想OPアンプ」といいます。実際にはもちろん存在しませんが、応用回路の設計や解析を行うときは理想モデルとして考えると簡単になります。

- ・ 入力オフセット電圧がゼロ。
- ・ DC入力電流がゼロ
- ・ 入力抵抗が ∞
- ・ 出力抵抗がゼロ
- ・ 差動電圧利得が ∞
- ・ 無限の高速応答
- ・ 雑音を発生しない

理想に近いOPアンプが優れたOPアンプということになりますが、実際は用途によってそれぞれのパラメータが理想に近づいたものが使用されています。

1.2 5石OPアンプの実験

● OPアンプの中身…トランジスタによる増幅回路

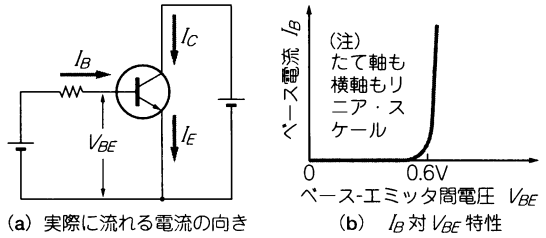
OPアンプを製作する前に、簡単にトランジスタの動作を復習しておきましょう。図1-3をご覧ください。

NPN型トランジスタのベース-エミッタ間に正の電圧を加え、コレクタ-エミッタ間に正の電圧を与えると、図(a)に示す向きに電流が流れます。そして、エミッタ電流 I_E 、コレクタ電流 I_C 、ベース電流 I_B の間には常に次式が成り立ちます。

$$I_E = I_C + I_B \dots\dots\dots (1-3)$$

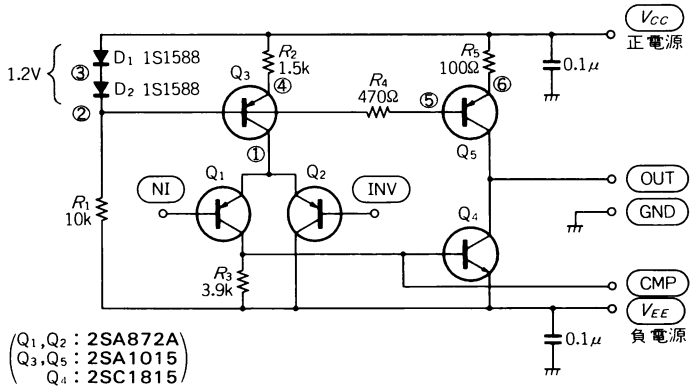
〈図1-3〉

NPN型トランジスタの端子電流と端子電圧



〈図1-4〉

5石OPアンプの回路構成



コレクタ電流はベース電流に比例します。

$$I_C = h_{FE} I_B \dots\dots\dots (1-4)$$

このときの比例定数 h_{FE} を「直流電流増幅率」といいます。

ベース-エミッタ間電圧 V_{BE} とベース電流 I_B の間には図(b)に示すような関係があります。PNP型トランジスタは、NPN型トランジスタと電圧と電流の向きがすべて逆ですが、やはり式(1-3)と式(1-4)および図(b)に示す関係が成り立ちます。

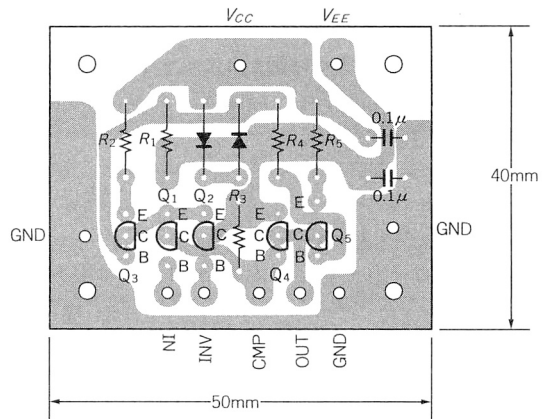
● 5石OPアンプを製作する

ここで製作するトランジスタによるOPアンプ回路を図1-4に示します。これは拙著「はじめてのトランジスタ回路設計」(CQ出版社)で設計した物です。本物のOPアンプICにはもっと多くのトランジスタが集積されていますが、ここでは動作を理解するのが目的なので、簡易型OPアンプとなっています。

NIが非反転入力端子、INVが反転入力端子です。電源端子～GND間の2個のコンデン

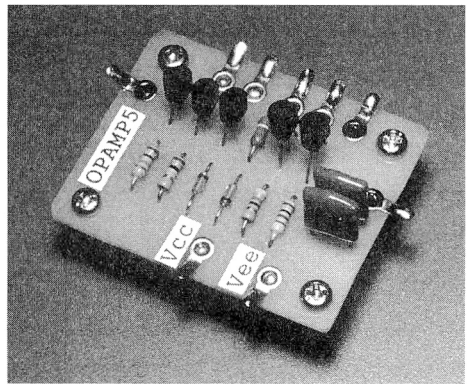
〈図1-5〉

5石OPアンプの部品配置とプリント・パターン(銅箔面)



〈写真1-1〉

製作した5石OPアンプの基板
(拙著「はじめてのトランジスタ回路設計」(CQ 出版社刊)で
詳しい設計例を紹介している)



サは高い周波数での電源インピーダンスを下げるためのもので、通称は「パスコン」。正式には「バイパス・コンデンサ」といいます。電源電圧が $\pm 15\text{V}$ ですから、耐圧が 25V 以上のセラミック・コンデンサかマイラ・コンデンサが適当です。

トランジスタ Q_4 のベースから引き出されたCMPは位相補償のためのコンデンサを付けるための端子です。CMP～OUT端子間にセラミックあるいはマイカ型コンデンサを位相補償用として接続します。

このOPアンプ回路のプリント基板パターンを図1-5に、完成基板を写真1-1に示します。製作はユニバーサル・プリント基板でも構いませんが、配線距離は短く、GNDラインはできるだけ太くします。

索引

【数 字】

1/fコーナ周波数174
 1/f雑音174
 1チップ・デュアルFET113
 1チップ・デュアル・トランジスタ143
 3dBカットオフ周波数20
 3端子電圧リファレンス232

【欧 文】

AB級47
 AC-DCコンバータ210
 AC解析63
 A級46
 BF94
 Bi-CMOS型147
 Bi-FET型147
 Bi-FET技術148
 BR95
 B級47
 CBプロセス198
 CCCS50
 CJC99
 CJE99
 CMOS型147
 CMOS型OPアンプ220
 CMU87
 C_{ob} キャンセル回路127, 131
 CPI85
 C_{μ} 87
 C_{π} 85
 DC解析63
 DCサーボ回路174
 DFT145
 DG200
 Difet プロセス212
 DP200
 FET入力型147
 FETの出力静特性115
 FETの飽和領域116
 GBP56
 GB積31
 g_{π} 97
 h_{fe} 49
 h_{ie} 49
 h パラメータ49
 $I_C - V_{BE}$ 特性曲線47
 $I_C - V_{CE}$ 特性曲線97
 I_{DSS} 116
 IR138

IKF138
 LED123
 Micro-Cap V/CQ版65
 NPN型BJTのダイオード接続167
 Nチャネル接合型FET115
 OPアンプの雑音等価回路180
 R-R出力221
 R-R入出力OPアンプ220
 R-R入力221
 SAR230
 SBD210
 SPICE61
 SPICE2G662
 SPICE362
 VA98
 VAF98
 V_{BE} の温度係数48
 VCCS50
 VIPプロセス195
 V_P 116
 XTB73, 74
 y パラメータ49
 β_F 94
 β_R 95
 π 型モデル116

【ア 行】

アーリ効果98
 アーリ電圧98
 アイドリング電流46
 アクティブ・ロード39
 アンサンブル平均176
 イオン打ち込み148
 異極性ダーリントン・
 エミッタ・フォロワ198
 位相29
 位相・周波数特性30
 位相特性30
 位相補償15
 位相補償容量20, 55, 203, 206
 位相余裕33, 54
 ウィルソン型カレント・ミラー154
 エバース・モル・モデル92
 エミッタ接地・
 逆方向電流増幅率95
 エミッタ接地・
 順方向電流増幅率94
 エミッタ接地・
 小信号電流増幅率 h_{fe} 109
 エミッタ接地増幅回路16

エミッタ・フォロワ44
 エミッタ・フォロワの
 小信号等価回路51
 エミッタ面積37
 オープン・ループ・ゲイン12
 オフセット・ゼロ調整回路81
 温度解析73

【カ 行】

カーボン皮膜抵抗143
 開ループ・ゲイン12
 開ループ出力インピーダンス158
 回路図エディタ63
 回路図ファイル63
 拡散97
 拡散容量99
 角周波数29
 過剰少数キャリア158
 カスコード回路113, 116
 カスコード・
 ブートストラップ123, 170
 活性領域93
 カットオフ周波数20
 過渡解析63
 カレント・ミラー36, 37, 222
 カレント・ミラー負荷・
 差動増幅回路42, 50
 帰還率 β 18
 帰還量19
 逆接続領域94
 局部電流帰還195
 許容・差動入力電圧210
 金属皮膜抵抗143
 クローズド・ループ・
 カットオフ周波数33
 クローズド・ループ・ゲイン19
 ゲート・リク電流120
 高域ロールオフ30
 高精度OPアンプ169
 高速PNPトランジスタ193
 高速型193
 広帯域型193
 コレクタ接地回路44
 コンパレータ233
 コンプリメンタリ・
 エミッタ・フォロワ44

【サ 行】

最大出力帯域幅 B_{OM} 24
 最大出力電圧振幅23

雑音波の大きさ	176
差動出力ライン・ドライバ	227
差動増幅回路	17, 39
差動増幅回路の雑音等価回路	180
差動電圧利得 A_{VD}	12
差動入力電圧	12
差動利得	217, 218
サブストレート (Substrate)	
PNP トランジスタ	167
サレン・キー・ローパス	
フィルタ	235
三極管領域	116
時間平均	176
二乗平均値	176
実行ベース	96
従属電流源	50
周波数応答法	29
周波数特性	30
出力コンダクタンス g_o	72, 98
出力段のひずみ打ち消し回路	190
出力抵抗 r_o	72, 98
出力電流制限回路	157
順方向遷移時間	99
小信号電流増幅率	43, 49
小信号等価回路	48
少数キャリアの移動	97
ショット雑音	178
シングルエンド	12, 217
振幅・周波数特性	30
スルーレート	24, 55, 56, 118, 136
正弦波発振器	233
接合容量	98
セトリング時間	215
遷移時間	99
線形領域	116
全帰還	21
全入力雑音電圧密度	183
相互コンダクタンス g_m	43, 96, 116
相補エミッタ接地	203
相補ソース接地	222
相補ベース接地	203
素子モデル	63
【タ行】	
ダーリントン接続	43
第3次高調波ひずみ率	126
ダイナミック・レンジ	220
直流電流増幅率	14, 43
チョッパ型	229
ツェナ・ザップ・トリミング	172
突き抜け	111
定電流回路	16
電圧帰還型	193
電圧制御・電流源	50
電源電圧変動除去比 $SVRR$	89
伝達インピーダンス	205

伝達抵抗	205
伝達容量	205
電流帰還型 OP アンプ	202, 203
電流制御・電流源	50
電流制限抵抗	161, 222
等価入力容量	87
動作階級	46
動作点	76
同相出力電圧	217
同相信号除去比	218
同相入力電圧	28, 217
同相負帰還	218
同相利得	217, 218
トランジション周波数 f_T	100
トランジット時間 τ_F	111
トランス・インピーダンス	205

【ナ行】

入力オフセット電圧	26, 172
入力オフセット電流	26
入力換算雑音電圧	178
入力換算雑音電圧密度	181
入力雑音電流密度	182
入力バイアス電流	26
入力バイアス電流打ち消し回路	170
熱結合	80
熱雑音	177
熱雑音電圧密度	177
熱電圧	43
ネット・リスト	63
ノイズ・ゲイン	185, 198
濃度勾配	97
ノード(節点)番号	65

【ハ行】

ハイブリッド π 型モデル	49, 96
バイポーラ型	147
バイポーラ入力型	147
バスコン	15
反転増幅器	22
反転入力端子	11
反転入力電圧	12
汎用 OP アンプ	147
非反転増幅器	18
非反転入力端子	11
非反転入力電圧	12
微分位相誤差	200
微分利得誤差	200
ピンチオフ電圧	116
フィード・フォワード	
(位相)補償	164
ブートストラップ	186, 199, 235
フォールデッド・カスコード	
回路	113, 186, 195, 222
不感帯	210
負帰還	18

副作用	196
フル・パワー応答周波数	24
ブレイクダウン防止用	
ダイオード	138
平衡増幅器	216
閉ループ・ゲイン	19
閉ループ出力インピーダンス	158
ベース-エミッタ間抵抗	49, 73
ベース接地回路	105
ベース接地回路の出力抵抗 r_{ob}	108
ベース接地・逆方向電流増幅率	93
ベース接地・出力抵抗 r_{ob}	106
ベース接地出力容量 C_{ob}	105
ベース接地(順方向)	
電流増幅率 α_F	17
ベース接地	
順方向電流増幅率	93
ベース接地	
小信号電流増幅率 h_{fb}	109
ベース接地	
小信号等価回路	105
ベース幅	97
ベース広がり抵抗	96
別名 (Alias)	67
方形波	25
飽和電流	37, 76, 94
飽和防止回路	81, 158
飽和領域	95, 116
ボーデ線図	30, 54
ボーデの安定判別法	32
ボルテージ・フォロウ	21
ホワイト・ノイズ	177

【マ行】

ミッド・スイングひずみ	224
ミラー効果	86
モデル・パラメータ	63
モデル・ライブラリ	65

【ヤ行】

ユニティ・ゲイン周波数 f_T	52, 165
-------------------	---------

【ラ行】

ラテラル PNP トランジスタ	162
利得交点周波数	33
利得帯域幅積	31, 56, 165
ループ・ゲイン	19
レール・ツー・レール (Rail-to-Rail)	
入出力 OP アンプ	220
ローパス・フィルタ	232

【ワ行】

ワイドラ型	
カレント・ミラー	153

〈著者略歴〉

黒田 徹 (くろだ とおる)

1945年 兵庫県に生まれる

1970年 神戸大学 経済学部卒業

1971年 日本電音(株)入社、技術部勤務

1972年 同社退社

現在 黒田電子技術研究所 所長

〈主な著書〉

- ・ はじめてのトランジスタ回路設計 (CQ出版社)
- ・ 基礎トランジスタ・アンプ設計法 (ラジオ技術社)
- ・ 最新トランジスタ・アンプ設計法 (ラジオ技術社)

●本書記載の社名、製品名について — 本書に記載されている社名および製品名は、一般に開発メーカーの登録商標です。なお、本文中では™, ®, ©の各表示を明記していません。

●本書掲載記事の利用についてのご注意 — 本書掲載記事は著作権法により保護され、また工業所有権が確立されている場合があります。したがって、記事として掲載された技術情報をもとに製品化をするには、著作権者および工業所有権者の許可が必要です。また、掲載された技術情報を利用することにより発生した損害などに関して、CQ出版社および著作権者ならびに工業所有権者は責任を負いかねますのでご了承ください。

●本書に関するご質問について — 文章、数式などの記述上の不明点についてのご質問は、必ず往復はがきか返信用封筒を同封した封書でお願いいたします。ご質問は著者に回送し直接回答していただきますので、多少時間がかかります。また、本書の記載範囲を越えるご質問には応じられませんので、ご了承ください。

Ⓜ 〈日本複写権センター委託出版物〉

本書の全部または一部を無断で複写複製(コピー)することは、著作権法上での例外を除き、禁じられています。本書からの複製を希望される場合は、日本複写権センター(TEL: 03-3401-2382)にご連絡ください。

解析 OP アンプ & トランジスタ活用

2002年9月15日 初版発行

2005年2月1日 第2版発行

2010年12月1日 デジタル/CD-R版 rev.1

© 黒田 徹 2002

(無断転載を禁じます)

著者 黒田 徹

発行人 増田 久喜

発行所 CQ出版株式会社

〒170-8461 東京都豊島区巢鴨 1-14-2

☎ 03-5395-2123 (出版部)

☎ 03-5395-2141 (販売部)

振替 00100-7-10665

(定価はカバーに表示してあります)

乱丁、落丁本はお取りかえします

DTP・印刷・製本 三晃印刷(株)

Printed in Japan

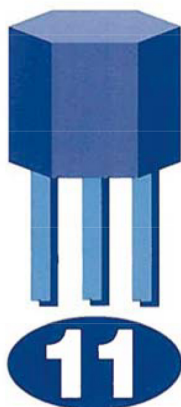
解析 OPアンプ&トランジスタ活用
デジタル/CD-R版

SD32691

価格:本体1,714円(税別)

価格:1,800円(税込)5%

CQ出版社



OPアンプの内部回路を解析・理解すると、貴方のアナログ回路設計力を飛躍的に向上させることができます。

本書では、これまであまり詳しく語られることのなかった市販OPアンプICの内部回路に焦点をあてて、如何にして増幅度を稼いでいるのか、なぜ高精度になっているのか、どのようにして低雑音を実現しているのか、どのようにして高速・広帯域化を実現しているのかななどを徹底検証しています。

また学習結果として、OPアンプICの性能を凌駕する個別トランジスタによるアンプの設計技術を公開しています。回路シミュレータの回路設計への効果的な利用方法も紹介しています。

読み進んでいくだけで、アナログ回路設計の楽しさを感じることできる一冊です。
