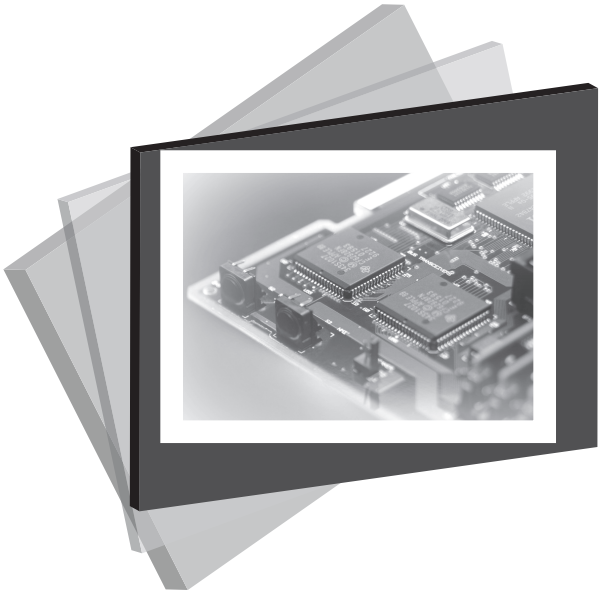
実務に役立つ電気電子シリーズ

ーアナログ回路設計・センサ技術コースー

NO.1

アナログ回路設計



コガク

目　次

学習のねらい **1**

第 1 週　OP アンプの基礎 **3**
1.1　OP アンプの基礎 4
1.1.1　OP アンプ 4
1.1.2　反転増幅器 5
1.1.3　理想 OP アンプ 9
1.2　差動増幅回路 12
1.2.1　基本的回路 12
1.2.2　バイアス電流とオフセット電圧 13
1.3　OP アンプの諸特性 15
1.3.1　入力特性 17
1.3.2　出力特性 22
1.3.3　伝達特性 23
1.3.4　交流特性 25
1.3.5　絶対最大定格 28
『まとめと練習問題』 **30**

第 2 週　増幅回路 **33**
2.1　OP アンプの増幅回路 34
2.1.1　反転増幅器 34
2.1.2　非反転増幅器 37
2.1.3　差動増幅器 42
2.2　微小電圧の増幅 45
2.2.1　増幅回路方式 45
2.2.2　インストルメンテーション増幅器 47
2.2.3　微小電圧増幅上の注意 49
2.3　電流増幅回路 52
2.3.1　増幅回路の方式 53
2.3.2　微小電流測定上の注意 55
2.4　その他の種々の OP アンプ 59
2.4.1　低消費電力 OP アンプ 59
2.4.2　高速広帯域 OP アンプと高電圧 OP アンプ 60
『まとめと練習問題』 **62**

第 3 週　アクティブフィルタ **65**
3.1　フィルタ回路とアクティブフィルタ 66
3.1.1　フィルタの種類 66
3.1.2　フィルタ特性 67
3.1.3　フィルタ回路と特徴 70
3.1.4　フィルタ特性と周波数特性 72

3.2　アクティブフィルタ 74
3.2.1　正帰還形フィルタ 75
3.2.2　ステートバリアブルフィルタ 81
3.2.3　スイッチトキャパシタフィルタ 84
3.3　高次フィルタ 87
3.3.1　表による高次 LPF，HPF の設計法 88
3.3.2　表による高次 BPF の設計法 90
3.4　設計上の注意 92
3.4.1　OP アンプ 92
3.4.2　抵抗とコンデンサ 93
3.4.3　実装上の注意 93
『まとめと練習問題』 94

第 4 週　応用回路 97
4.1　OP アンプとダイオード 98
4.1.1　理想化ダイオード 98
4.1.2　絶対値回路 100
4.1.3　信号選択回路 101
4.2　サンプルホールド回路 103
4.2.1　サンプルホールドと A/D 変換器 103
4.2.2　サンプルホールド回路 104
4.2.3　サンプルホールド回路の具体例 107
4.3　ピーク値ホールド回路 109
4.4　発振回路 113
4.4.1　正弦波発振器 113
4.4.2　方形波発生回路 115
4.4.3　三角波と鋸歯状波発生回路 116
『まとめと練習問題』 119

STEP UP 121
付録 123
練習問題の解答 136
索　引 142

学習のねらい

アナログ回路の中心となるOPアンプは動作させるのが簡単で，性能のよい増幅，演算ができるため，多くのシステムで幅広く使用されています。しかし，発振などの異常動作，誤差や雑音，ドリフトなどの安定性の問題や，応答特性などのトラブルも絶えません。

この分冊の第1週では，OPアンプの種々のパラメータや特性についての基礎知識を整理し正しい理解を深めることと，使用目的に合致したOPアンプの選択基準などを最初に学びます。第2週では，OPアンプの最も基本となる増幅回路について，その回路方式と設計上の注意事項について学習します。OPアンプは半導体技術の著しい進歩によって，高性能の製品が安価に入手できますが，すべての特性を満足するOPアンプは存在しません。目的に合致し，安価で安定性の高い回路を設定することが最良の設計技術です。

次に学ぶ信号処理は，一般的には応答特性，S/N，ダイナミックレンジ，コスト，大きさなどの視点で実用設計を行いますが，アナログ信号処理はデジタル信号処理に比べて，種々の特長があると同時に欠点もあります。このことを十分に理解し，特徴を有効に利用することが大切です。

第3週では線形信号処理としてアクティブフィルタを取り上げ，第4週は非線形信号処理その他を取り上げています。サンプルホールド回路はアナログ信号とデジタル信号の接点にある非常に重要な回路です。

アナログ回路は，理論面も部品実装の面でもやさしくありません。しかし，電気回路（デジタル回路を含む）の重要技術であり，センサ，光，サーボ，電源といった幅広い方面に使用されているので，しっかり学んでいただきたいところです。

■ 第 1 週 ■

OP アンプの基礎

【学習のポイント】

回路設計をするときに誰もが見る OP アンプのカタログのデータも，記載してあるパラメータの意味を正しく理解していないと，目的に合致した OP アンプを選ぶことができません。ここでは OP アンプの基本回路や，OP アンプの持っている入力バイアス電流やオフセット電圧など種々のパラメータについて学びます。また，その温度依存性などの特性がどのように回路の動作に影響するかを整理し，OP アンプの基本的知識の正しい理解を深めることを学習の目的とします。

1.1　OP アンプの基礎

1.1.1　OP アンプ

OP アンプ（オペアンプ）は Operational Amplifier（演算増幅器）の略で，一般に IC 化された差動入力の直接結合形高利得電圧増幅器のことをいいます。多目的に使える多くの特徴があり，アナログ信号処理のための基本的な素子として多種の製品が市販されています。OP アンプは，外部に抵抗，コンデンサ，ダイオードなどを接続し，信号の増幅や加算，積分，微分，絶対値演算や非線形演算のほか，発振回路など多くの目的に利用することができます。

OP アンプは**図 1.1** に示す三角形で表示され，二つの入力端子と一つの出力端子と正負の電源端子を持っています。この他に入力オフセット電圧調整用端子や周波数補償端子を持っているものもあります。

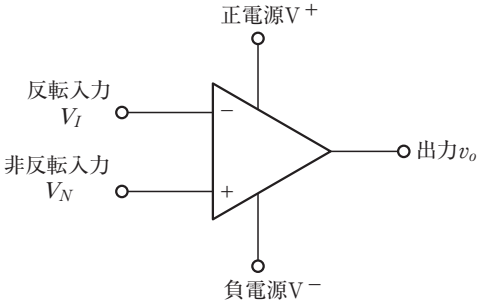


図1.1　OPアンプの回路記号

二つの入力端子のうちマイナス（−）記号のついた入力端子は Inverting Input または反転入力と呼ばれ，印加した信号電圧 V_I と出力電圧の極性が逆，つまり 180 度位相のずれた出力が得られます。プラス（＋）の記号のついた入力端子は Non Inverting Input または非反転入力と呼ばれ，印加した信号電圧 V_N と同極性の出力が得られます。

電源端子は正電源 V^+ と負電源 V^- を必要とするものと，V^+ と GND の単一電源のものがあります。

入力オフセット電圧調整用端子は，入力信号が 0 V のとき出力電圧が正しく 0 V になるように直流的平衡をとるための端子で，推奨回路がカタログなどに記載されています。

OP アンプによっては，周波数補償回路が必要なものもあります。

いま OP アンプの電圧利得を A_V とし，二つの入力端子にそれぞれ V_I，V_N の電圧を印加すると，出力電圧 v_o は

$$v_o = A_V(V_N - V_I) \tag{1.1}$$

となります。電圧利得 A_V が大きければ，同じ出力電圧を得るのに入力電圧 $V_N - V_I$ は小さい値でよいことになります。通常の OP アンプの電圧利得 A_V は非常に大きく約 10^5 倍程度ですから，出力電圧 10 V を得るための入力電圧（$V_N - V_I$）は 100 μV あればよいことになります。

ここで**図 1.2** に示すように，V_N を 0 V に接地して反転入力に電圧 V_I を印加して OP アンプを動作させた場合を考えます。$V_N = 0$ ですから（1.1）式は

$$v_o = A_V(0 - V_I) = -A_V V_I$$

とかけます。$v_o = -10$V を得るための V_I は A_V が 10^5 なら 100 μV になります。

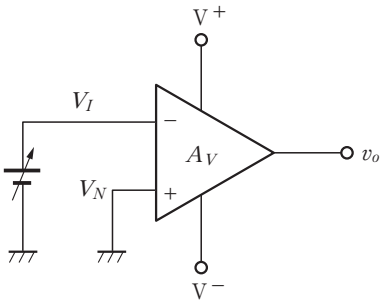


図1.2　OPアンプの入力電圧と出力電圧

1.1.2　反転増幅器

（1）反転増幅器の動作

OP アンプを使用する場合には，外部に抵抗，コンデンサ，ダイオードなどのインピーダンスを接続し，負帰還回路を構成して使用します。**図 1.3** のように，OP アンプの反転入力に抵抗 R_i，たとえば 5 kΩ を接続します。次に，出力電圧を反転入力に帰還し，負帰還回路を構成するための抵抗 R_f，たとえば 10 kΩ を反転入力端子と出力端子の間

に接続します。この R_i を入力抵抗，R_f を帰還抵抗と呼んでいます。ここで，入力抵抗 R_i を通して入力電圧 v_i を印加したときの出力電圧 v_o について考察します。出力電圧 v_o が－10 V になるためには，OP アンプの反転入力電圧 V_I は電圧利得 A_V が 10^5 倍の OP アンプなら $V_N=0$ ですから

$$V_I=\frac{-v_o}{A_V}=\frac{10}{10^5}=10^{-4}=100\ \mu\mathrm{V} \tag{1.2}$$

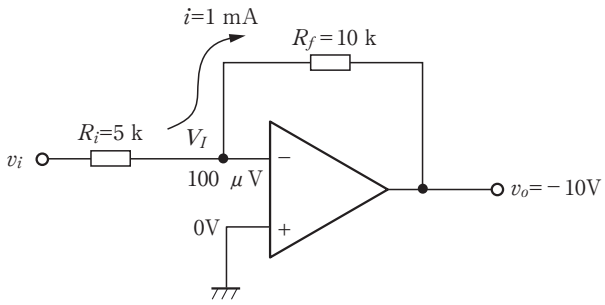


図1.3　負帰還増幅回路（反転増幅回路）

V_I は 100 μV と非常に小さい値となります。次に，帰還抵抗 R_f に流れる電流について考えますと，出力電圧 v_o が－10 V ですから R_f の両端の電圧は，

$V_I-v_o=100$〔μV〕－（－10〔V〕）＝10.0001〔V〕≒10〔V〕

となります。10 kΩ の R_f に流れる電流 i は

$$i=\frac{V_I-v_o}{R_f}=1.00001\ \mathrm{mA}\fallingdotseq 1\ \mathrm{mA} \tag{1.3}$$

です。この電流 i は，OP アンプの入力インピーダンスが大きく，入力端子からの電流の流入，流出はないものとすれば，入力電圧 v_i から 5 kΩ の R_i を通して流れてくるはずです。**図 1.3** から，反転入力端子の電圧 V_I は入力電圧 v_i から R_i に流れる電流 i による電圧降下を差し引いた値です。すなわち，

$$v_i-R_i i=V_I$$

$$v_i=V_I+R_i i \tag{1.4}$$

V_I は 100 μV，R_i は 5 kΩ，i は 1.00001 mA ですから，

$v_i=5.00015\ \mathrm{V}\fallingdotseq 5\ \mathrm{V}$

となり，出力電圧－10 V を得るのに必要な入力電圧は約 5 V です。