

23 演算増幅器(OP アンプ)の利用

演算増幅器(Operational Amplifier: OP アンプ、オペアンプなどと呼ばれる)は、アナログ電子回路の中核となる構成素子である。オーディオ信号・ビデオ信号・センサからの計測信号などの増幅・フィルタ処理において、OP アンプはなくてはならない素子となっている。OP アンプはすでに教養の物理実験においても学習しているが、再度ここで OP アンプの動作原理を学び、理解を深めてほしい。

1 実験の原理

1.1 演算増幅器とは

演算増幅器(以降 OP アンプと呼ぶ)は、+ 端子(非反転入力端子)と - 端子(反転入力端子)にかかる電圧の差を、約 $10^3 \sim 10^6$ 倍に増幅して出力する、高利得の作動増幅器である。すなわち図 23.1 において、共通電位(アース)から測定した + - 各端子の電圧を v_P 、 v_N とすると、出力電圧 v_o として

$$v_o = A(v_P - v_N) \quad (23.1)$$

を出力するような素子である。この A は開ループ増幅率とか、あるいは単に増幅率(ゲイン)と呼ばれる。OP アンプでは、入力インピーダンス Z_i が $10^6 \sim 10^{12} \Omega$ 程度と非常に大きく、一方出力インピーダンス Z_o は 1Ω 程度と小さい。このため信号源の出力インピーダンスが小さくても電圧信号を精度良く入力できるし、出力負荷が大きくても出力電圧の変動が小さい。回路図では OP アンプは図 23.1(b) のように描かれる。入出力端子の他に、増幅に必要な電力を供給する端子(図中の $+V_{CC}$ 、 $-V_{CC}$)があるが、これは省略されることも多い。

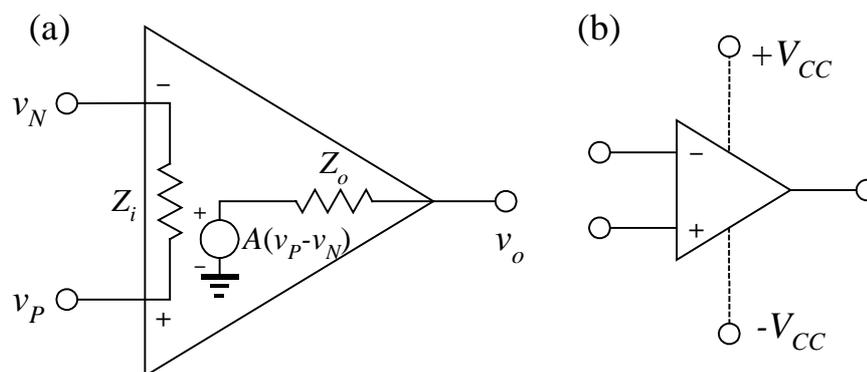


図 23.1 OP アンプの機能と回路記号

このような OP アンプは、特殊な用途のものを除けば、現在では 100 円前後で容易に入手できる。形状もいくつかあるが、プラスチックモールドから 8~16 ピンの端子がムカデ状に出ている DIP (Dual-In-Line Package) が工作には手軽であるため、本実験でもこれを利用する。ただし機器の小型化に伴い、現在では SOP、TSSOP と呼ばれる、より小さなパッケージが主流になりつつある。

個々の OP アンプの特性には、先に述べた増幅率や入出力インピーダンスのほかに、入力オフセット電圧、入力オフセット電流、入力バイアス電流、ゲインや位相シフトの周波数特

性・スルーレート、ノイズ特性などがある。これらの詳細に付いては例えば文献[2]などをあたってほしい。個々の OP アンプの特性は、メーカーから出ているスペックシートにまとめられている。最近ではインターネットから入手できることも多い。

1.2 フィードバックと仮想短絡

OP アンプを使う場合には、通常その出力をフィードバックする。例えば図 23.2 のような回路を考えてみよう。ここでは出力電圧 v_o を、2 つのインピーダンスで分圧して - 端子に入力し、負帰還(ネガティブ・フィードバック)をかけている。いま + 端子に入力電圧 v_i がかった場合、まず (23.1) 式から

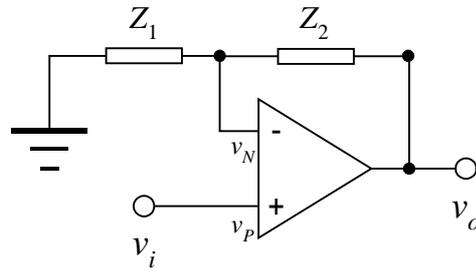


図 23.2 負帰還回路(非反転増幅器)

$$v_o = A(v_i - v_N) \tag{23.2}$$

が導ける。また - 端子の入カインピーダンスが Z_1 や Z_2 に比べて十分大きいとすれば、 Z_1 と Z_2 を流れる電流は一定なので、 v_o と v_N の間には

$$v_N = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} v_o \tag{23.3}$$

という関係が導ける。これらから v_N を消去すれば

$$v_o = \frac{A}{1 + AZ_1/(Z_1 + Z_2)} v_i \tag{23.4}$$

が得られる。いま

$$AZ_1/(Z_1 + Z_2) \gg 1 \tag{23.5}$$

という関係が成立している場合には、(23.4)式は結局

$$v_o = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1} v_i \tag{23.6}$$

となり、フィードバックを加えたこの回路全体のゲイン(閉ループゲイン)には、開ループゲイン A は現れない。例えば Z_1 や Z_2 を周波数成分のない純抵抗 R_1 や R_2 で置き換えれば、 A の周波数依存性を除去できる。式 23.3 にある $Z_1/(Z_1 + Z_2)$ はフィードバックゲインと呼ばれる。閉ループゲインがこのフィードバックゲインの逆数となっていることにも注目してほしい。

このようなフィードバックをかけた OP アンプの動作は、図 23.1 のモデル図において

- (1) 入力インピーダンス Z_i が
- (2) 出力インピーダンス Z_o が 0
- (3) A が

と考えると理解しやすい。条件(1)からは、+ - の入力端子に流れ込む電流が 0 であるとみなせる。また通常の動作では v_o は有限の値に留まっている(飽和していない)はずだから、条件(3)と式 23.1 とから v_p と v_N とが同電位であることが言える。これらを用いれば、図 23.2 から式 23.6 を導くことは容易だろう。

この「 v_p と v_N とが同電位」という考え方は、仮想短絡(Virtual Short)と呼ばれており、OP アンプ回路の設計・理解にあたって非常に重要なので、良く理解してほしい。ただしこの仮想短絡が成立するためには、式 23.5 の条件が満たされている必要があることも忘れてはならない。一般に OP アンプの開ループ増幅率は周波数に反比例するかたちで減少するの

で、高周波領域ではこの条件が満たされないこともある。

1.3 OP アンプを利用した回路

ここでは OP アンプを利用した代表的な回路をいくつか紹介する。なおフィルタとしての利用例は、実験課題 24 で別にまとめて紹介する。

非反転増幅器

すでに説明した図 23.2 の回路で、インピーダンスを純抵抗で置き換えたものが非反転増幅器である。入力信号が直接 OP アンプの入力端子に接続されているので、入力インピーダンスが高いという OP アンプの特長をフルに利用できる。このため、出力インピーダンスの不定な信号源や、微小電圧の増幅に良く用いられる。

反転増幅器

図 23.3(a) に示すのが反転増幅器の回路である。仮想短絡の考え方を適用すると、 v_N の電位は 0 なので、

$$v_i = iR_1 \quad (23.7)$$

となる。また入力端子の入力インピーダンスは R_2 なので、この電流はすべて R_2 に入り、

$$v_o = -iR_2 \quad (23.8)$$

が成立する。この 2 式より結局、

$$v_o = -\frac{R_2}{R_1}v_i \quad (23.9)$$

となる。反転増幅器は入力インピーダンスが小さいので微小電流の電圧変換に適しているほか、非反転増幅器に比べて高速に動作させることができる。

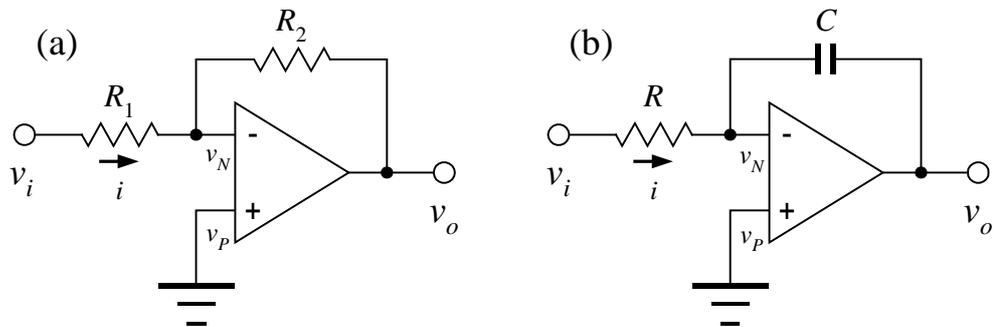


図 23.3 (a) 反転増幅器 と (b) 積分器

積分器・微分器

反転増幅器の R_2 をコンデンサ C で置き換えると積分器として動作する。つまり

$$v_i = iR \quad (23.10)$$

であり、コンデンサの電位差は Q/C なので

$$v_o = -\frac{\int i dt}{C} \quad (23.11)$$

が成り立つ。よってこの 2 式から

$$v_o = -\frac{\int v_i dt}{RC} \quad (23.12)$$

が得られる。また図 23.3(b)で、 R と C を入れ替えたものは微分器となる。

Q. このようにすると微分器が実現できることを説明してみよ。

加算器

加算器とは 2 つ以上の電圧入力に対し、この電圧に比例するアナログ出力電圧を得る回路で、図 23.4 はその一例である。いま $R_1 \sim R_3$ を流れる電流をそれぞれ i_n ($n=1,2,3$) とすると、各 n について

$$i_n = v_n / R_n \quad (23.13)$$

という関係が成立する。 R_B を流れる電流はこれらの和となるから、結局出力電圧 v_o は

$$v_o = -R_B \sum_{n=1}^3 \frac{v_n}{R_n} \quad (23.14)$$

となり、電圧の加算特性が実現できる。また例えばこの R_n を倍々の関係にしていけば、デジタル - アナログ変換器として利用できる。

発振器

OP アンプに正帰還(ポジティブ・フィードバック)を加えると、発振回路として用いることもできる。図 23.5 はウィーンブリッジ型発振器と呼ばれる、正弦波電圧を出力するような回路である。アンプの出力端子の一部を + 端子にし、正帰還をかけている。ただし最近では発振回路用のモジュール IC が使われることが多く、OP アンプで発振回路を作製することはあまりない。

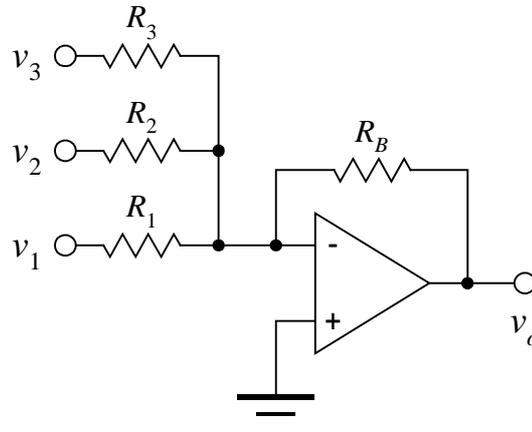


図 23.4 反転加算器

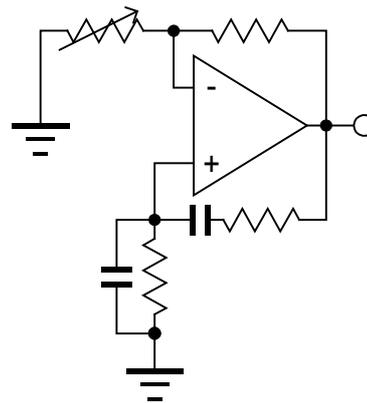


図 23.5 ウィーンブリッジ発振器

2 実験

2.1 実験装置

配線用ブレッドボードおよび配線ケーブル、DC 電源 ($\pm 15V$)、ファンクションジェネレータ、オシロスコープ、OP アンプ (LF356)、各種抵抗・コンデンサ

ブレッドボードはボード上の穴に IC や抵抗、コンデンサなどの部品を挿入し、必要な配線をジャンパ線で行う試作基板である。挿入点は適当な個数ごとに、互いに接続されたグループになっているので、それを利用して回路を作製する。なお多数回の抜き差しを行うと端子のバネが弱くなって接点が取れなくなるので、無用の挿抜をしなくてすむよう、まず紙の上でじっくりと回路を考えてから実際の回路を作製すること。

本実験で用いる OP アンプ LF356 は、FET 入力型のアンプとして最も古くからあるもののひとつで、現在でも幅広く利用されている。LF356 の外形図は図 23.6 の通りである。2 つの

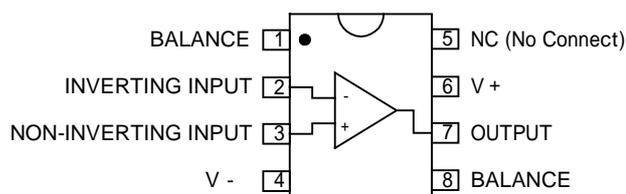


図 23.6 LF356 の内部接続(上から見た図)

BALANCE 端子は、入力オフセット電圧(+ - 各入力端子の間にわずかに生じる電位差)の補償回路を取り付けるためのものだが、本実験では使用しない。1.3 節で示した回路図ではV + と V - への $\pm 15\text{V}$ の配線は省略してあるので、これらを忘れないように注意する。

なお LF356 のスペックシートは、<http://www.national.com/JPN/ds/LF/LF356.pdf> から入手できる(2003 年 8 月現在)。実験室にもコピーを置いておくので、参照したい場合は申し出ること。

2.2 実験の手順

1. ブレッドボード上に図 23.2 (ただし Z_1 や Z_2 はそれぞれ純抵抗 R_1 や R_2 とする)の非反転増幅回路を作製する。このとき R_2 は $30\text{k}\Omega$ とし、 R_1 にはいろいろな抵抗を利用できるよう、ワニ口クリップのピンを挿しておく。
2. 入力に、ファンクションジェネレータから 270 Hz 、 $200\text{ mV}_{\text{p-p}}$ の正弦波信号を加える。このときの入力、出力をオシロスコープの DC 結合モードで観測し、それぞれの波高値をスケールで測って増幅度を決定する。入力信号の波高値も実測すること。また入出力電圧の測定値には、スケールによる測定に対応する精度(誤差)をメモしておく。

この測定は、 R_1 が $100\ \Omega$ 、 $200\ \Omega$ 、 $300\ \Omega$ 、 $500\ \Omega$ 、 $1\ \text{k}\Omega$ 、 $2\ \text{k}\Omega$ 、 $5\ \text{k}\Omega$ 、 $10\ \text{k}\Omega$ 、 $20\ \text{k}\Omega$ 、 $50\ \text{k}\Omega$ において行う。なおこれらの抵抗の実際の抵抗値は、前もってテスターを用いて測定し、ノートに記録しておくこと。後に増幅度の理論値を求める際には、これらの抵抗の誤差を考慮すること。

3. 入力抵抗 R_1 が $2\ \text{k}\Omega$ の場合について、入力信号の周波数を $270\ \text{Hz}$ 、 $1\ \text{kHz}$ 、 $3\ \text{kHz}$ 、 $10\ \text{kHz}$ 、 $30\ \text{kHz}$ 、 $100\ \text{kHz}$ 、 $300\ \text{kHz}$ 、 $1\ \text{MHz}$ と変化させ、増幅度の周波数依存性と、入出力の位相関係の変化を確認する。位相変化は、正弦波間の時間ずれを測定して周期で割り、 2π をかけることによって求めても良いし、あるいはリサージュ図形を観測して行っても良い。リサージュ図形を観測する場合は、入力を X 軸に、出力を Y 軸に入れ、X-Y モードで画面に現れる図形をスケッチする。このとき X 軸および Y 軸のスケールを記録しておくのを忘れないこと。
4. 3 と同様の実験を、入力抵抗 R_1 が $300\ \Omega$ の場合についても行う。
5. 配線を変更して図 23.3 (a) の反転増幅器を作成し、上記 2~4 の実験を行う。
6. 図 23.3(b)の積分回路において、 $R=10\ \text{k}\Omega$ 、 $C=0.1\ \mu\text{F}$ とした回路を組み立てる。入力信号を $270\ \text{Hz}$ 、 $200\ \text{mV}_{\text{p-p}}$ の双極性矩形波とし、出力として矩形波の積分波形である三角波が得られることを確認し、スケッチする。また入力に正弦波を加えた場合、位相のずれた正弦波が出力に現れることを確認し、両信号をスケッチするとともに、入出力間の位相を、リサージュ図形を利用して決定する。

3 解析

1. 各増幅器の増幅率の R_1 依存性をグラフにする。このとき横軸は R_1 の対数軸とし、縦軸は増幅度 $G(=v_o/v_i)$ の dB 値 ($20\log_{10} G$) とする。このとき理論値も同時に求め、同じグラフ上にプロットする。
2. 各増幅器の増幅率の周波数依存性をグラフにする。横軸は周波数の対数軸、縦軸は 1 と同じく増幅度の G の dB 値とせよ。ここから OP アンプ本体の開ループ増幅率 A がどのような周波数依存性を持つか考察せよ。
3. 実験の手順 3 で得たりサージ図形から、入力信号と出力信号の間の位相差を導出せよ。またその周波数依存性をグラフにせよ。
4. 積分回路の測定結果に対し、両極性矩形波・正弦波を入力としたそれぞれの場合について理論曲線を書き、実測結果と比較・考察せよ。

参考文献

- [1] 成蹊大学工学部教養物理教室編「物理実験テキスト」
- [2] 岡村迪夫「定本 OP アンプ回路の設計」CQ 出版社 (1990)
- [3] 桜井捷海、霜田光一「応用エレクトロニクス」裳華房 物理学選書 17 (1979)
- [4] 黒田 徹「解析 OP アンプ&トランジスタ活用」CQ 出版社 (2002)