物質生命理工学実験 I　第 9 テーマ

計測回路の作製　実験要領

2017 年 3 月改訂

１，オペアンプによる計測回路の製作

実験の目的等は配付されたテキストに示されているので、ここでは実験方法の詳細のみを述べる。実験ではオペアンプを用いた増幅回路(Amplifier)を作製する。増幅回路は入力された小さな信号を大きな信号にして出力する回路で、今回は電圧を 10 倍に増幅する回路を作製する。

回路に使用するオペアンプ（Operational Amplifier : 演算増幅器）は多くのトランジスタやその他の素子を 1 チップ上に集積した IC(Integrated Circuit:集積回路)増幅回路である。オペアンプは、もともとはアナログ・コンピュータを作るための素子として、線形増幅を行うために設計されたので、その名前がついている。内部の回路構成により理想的な線形動作を実現していて、その特性だけを知っていれば、わずかな素子を付加することでさまざまな機能を実現できる。

オペアンプの回路記号を図１に示す。反転入力(-)と非反転入力(+)の二つの入力端子と一つの出力端子、そして正負二つの電源端子がある。入力端子のインピーダンス(=とりあえず抵抗と思っても良い。詳細は付録を参照)が高いのでほとんど電圧だけで駆動される。出力端子からは、非反転入力電圧 V+から反転入力電圧 V-を引いた差の電圧に比例した電圧が出力される。この比例定数を電圧利得(電圧の増幅率)と呼ぶ。電源端子にはそれぞれ正と負の電源を接続する。回路図では省略されることが多いが、オペアンプは能動素子なので電源をつながないと動かない。

理想的なオペアンプには､以下の特徴がある。

1, 入力インピーダンスが無限大

2, 出力インピーダンスが 0

3, 電圧利得が無限大

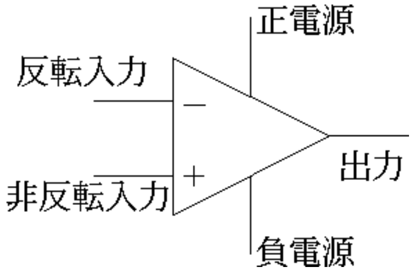


図１

実際のオペアンプは一定の電圧、電流、周波数の範囲内で、ほぼこの特徴を満たすことができる。電圧利得は 10^3～10^6 と非常に大きいため、そのまま増幅回路に使うと増幅率が高過ぎて使いにくい。また動作が不安定になるので、通常は出力から入力に負帰還（ネガティブ・フィードバック）をかけて増幅率を下げて動作させる。負帰還を用いた基本的な増幅回路には反転増幅回路と、非反転増幅回路があるので、それぞれについて動作を説明する。

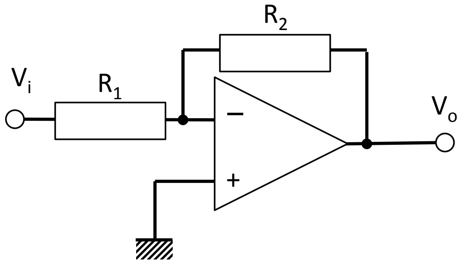


図２　反転増幅回路

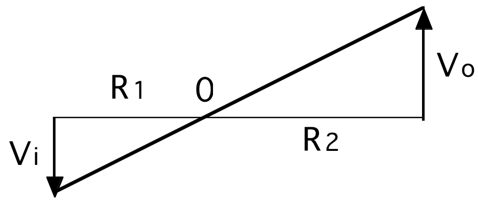


図３　電圧増幅率

1-1. 反転増幅回路

図２は反転増幅回路の回路図である。非反転入力はグランドに接続されているので常に 0V になる。このため、出力からは反転入力電圧 V-に増幅率 α をかけた電圧が正負反転して出力される。この出力電圧は R_2 を通して反転入力にフィードバックされ、V-を引き下げる。電圧増幅率が大きいため、このフィードバックは V+と V-の電位差がほとんどなくなるまで続く。その結果、安定状態では V-もほぼ 0V になる。つまり、フィードバックにより反転入力の電位は非反転入力の電位と等しくなるよう制御されるので、V+と V-はつながっているかのように同じ電圧になる。これを**ヴァーチャル・ショート**と呼ぶ。

反転入力の入力抵抗は無限大なので、R_1 と R_2 を流れる電流 i は等しい。このため R_1、R_2 を介した電圧 V_i と V_o の比率は、オームの法則からそのまま抵抗の比率となる。よって図３に示すように、V- = 0V を中心に、回路の電圧増幅率 A は(1)式のようになる。

$$A = -\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1} \qquad (1)$$

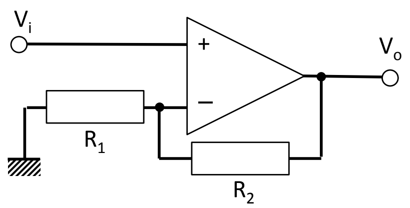


図４　非反転増幅回路

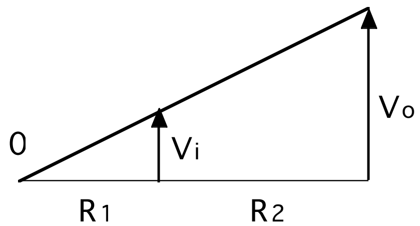


図５　電圧増幅率

1-2. 非反転増幅回路

図４は非反転増幅回路の図である。入力電圧を非反転入力に入れることにより、入力と同じ符号の出力を得る。出力はR_2を通して反転入力にフィードバックされる。この回路でも反転入力と非反転入力はヴァーチャル・ショートで同じ電圧になる。抵抗R_1、R_2を流れる電流は等しいので、**図５**の関係から、出力電圧 V_oは$(R_1+R_2)/R_1$に分割されて V- = Vi にフィードバックされる。このときの電圧増幅率 A は

$$A = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \qquad (2)$$

となる。

2. 実験の進め方

今回の実験では反転増幅回路を作ってみよう。回路の作製にはブレッドボード（**図６**）を使用する。ブレッドボードの差し込み穴の裏にはピンクの矢印の方向に電極があり、差し込んだ素子が電気的に接続される。そのため、半田づけをしなくても回路を作ることができる。両側の細い区画は長さ方向につながり、内側の広い区画は直交する方向につながっている。それぞれの電極にオペアンプ、抵抗、配線コード（**図７**）など部品を差し込んで接続し、回路を作る。この実験では**図２**の反転増幅回路を作製する。入力抵抗

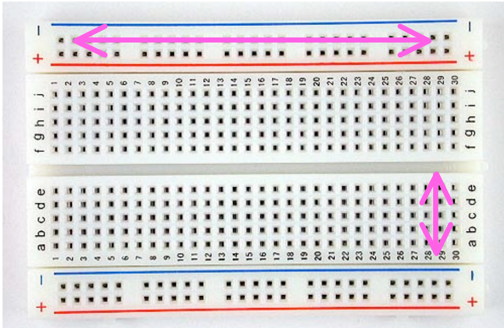


図６ ブレッド・ボード

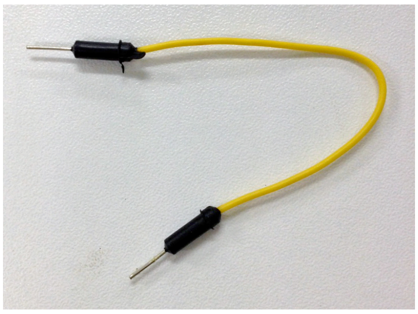


図７ 配線コード

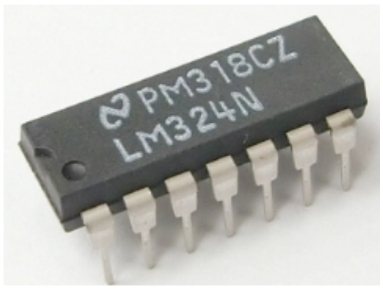


図８ ML324 の外観。左手前が１番ピン

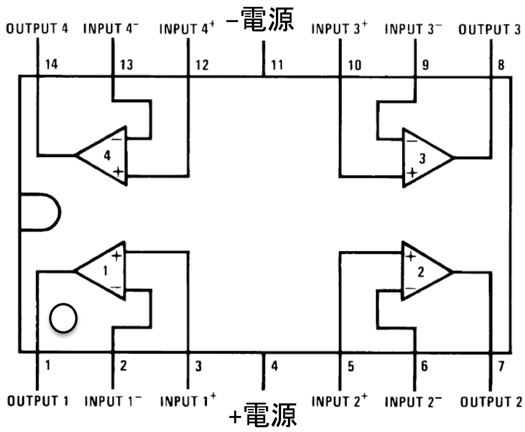


図９ ML324 ピン配置

R_1は1kΩ、フィードバック抵抗R_2は10kΩとする。オペアンプは4回路パッケージの LM324（図８）を用いる。各ピンの役割は図９で調べること。実際に使用するのは4回路の内の1回路だけである。

オペアンプには＋と−の2つの電源が必要になる。電池ボックスから赤(+)、青(−)、黄(０V=GND,アース)の３つの線を、上下の細長いラインに接続する。上の赤に(+)、下の青に(-)、上下の余ったラインに 0V を接続するのが吉。後は自由に作ってみよう。入力、出力、グラウンドの電極にも必ず一本ずつコードを刺して、すぐに計測器が接続できるようにしておくこと（図10)。最後にオペアンプに電源を配線したらできあがり。発信器から正弦波を入力して、10 倍の出力電圧が出かどうかをオシロスコープで確かめよう。

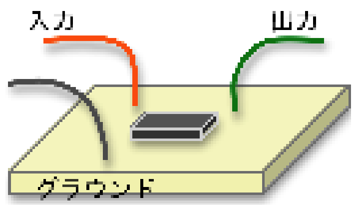
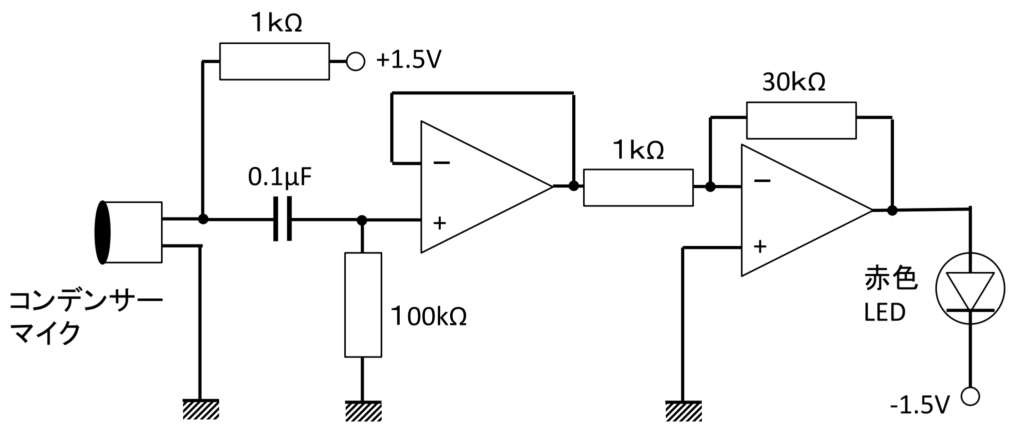


図10 接続用の配線

3. レポート作成

レポートはテンプレートをバイオエレクトロニクス研究室のホームページからダウンロードして作成する。実験前にプリントアウトして実験中に気づいたことなどを書き込むと非常に良いレポートになるだろう。空き時間を利用して作成を進めておけば、のちのちレポートにあまり多くの時間をとられなくてすむ。なぜなら実験中の記憶が最も新しく確実なので、一番楽にレポートが書けるからだ。<u>**必要事項と考察の質問は必ず埋めてから提出**</u>すること。

※オマケ
時間が余って、ヒマでヒマでしょうがない人はこの回路を作ってみよう。



計測回路の作製　付録：インピーダンスとは何か

インピーダンスとは交流回路における電気抵抗の拡張概念である。インピーダンスを用いることで、直流における抵抗と同様に、コイル（インダクタ）,抵抗（レジスタ）、コンデンサ（キャパシタ）を統一して扱うことができるようになる。

受動的な電気回路は上記３つの素子、抵抗、キャパシタ、インダクタで構成される。それぞれの働きについて詳しくは電磁気学の教科書で勉強してもらいたい。ここではその回路素子としての動作にのみ注目する。抵抗の大きさレジスタンスRは電圧が電流を流そうとする作用に対抗する性質で、抵抗に反比例した大きさの電流が流れる。キャパシタの大きさキャパシタンスCは電圧によって電荷を蓄える性質で、C に比例した電荷 Q が蓄えられる。インダクタの大きさインダクタンス L は、電流の変化を押しとどめようとする性質で、電流の時間変化に対して L に比例した電圧が発生する。

以上、各素子(R,C,L)にかかる電圧 v と流れる電流 i の関係をまとめると以下のようになる。

$$v = Ri \qquad (3)$$

$$v = \frac{Q}{C} = \frac{1}{C}\int_0^t idt \qquad (4)$$

$$v = L\frac{di}{dt} \qquad (5)$$

抵抗だけからなる回路に直流電圧がかかっている場合は、電圧と電流が比例するので、オームの法則で動作を計算することができた。しかし、これらの素子が混在する回路では電圧と電流は単純に比例せず、回路の動作を知るためには時間に関する微分方程式を解かなければならない。それでは、受動回路の動作を考えるのに多くの時間と労力を要することになる。そのような不便を解消するため、一定角周波数 ω の正弦波交流電流を用いて回路の動作を考えてみる。

交流電流と電圧

角周波数 ω の正弦波電流 i は、電流の最大振幅(0 からの大きさ)を I とすると一般に、

$$i = I\cos(\omega t) \qquad (6)$$

とあらわすことができる。オイラーの定理

$$\exp(\theta) = \cos(\theta) + j\sin(\theta) \qquad (7)$$

を用いれば、正弦波 cos(ωt)は複素関数 exp(jωt)の実部と考えることができるので、次のような表記も可能である。

$$i = \mathrm{Re}\left[I\exp(\omega t)\right] \qquad (8)$$

さらに位相 θ と振幅 A をガウス平面上の複素定数 C で表すなら、C=Aexp(jθ)の関係により、任意の位相と振幅の正弦波は

$$f = A\cos(\omega t + \theta) = \mathrm{Re}\left[C\exp(j\omega t)\right] \qquad (9)$$

の形で表される。全ての変数を複素数で表して計算し、結果の実部をとれば正弦波の解が得られる。実は計算自体は複素数の方が遙かに簡単なので、このような複素数表記を行う。例えば周波数 ω の正弦波では、微分は $j\omega$ 倍、積分は $j\omega$ 分の 1 となるので、単なる $j\omega$ の掛け算と割り算になる。電流 i を複素振幅 I を用いて以下のように表記すると

$$i = I\exp(j\omega t) \qquad (10)$$

電流の積分、および微分はそれぞれ

$$\int_0^t idt = \frac{1}{j\omega}I\exp(j\omega t) = \frac{1}{j\omega}i \qquad (11)$$

$$\frac{di}{dt} = j\omega I\exp(j\omega t) = j\omega i \qquad (12)$$

である。（ただし、積分は時間 0 で 0 となるよう基準をとると考える。）この複素数表記をもちいて L,R,C にかかる電圧 v_L, v_R, v_C を求めると、

$$v_L = j\omega Li \qquad (13)$$

$$v_R = Ri \qquad (14)$$

$$v_C = \frac{1}{j\omega C}i \qquad (15)$$

と書くことができる。このとき、各回路素子の定数 L,R,C を周波数を含む表記に改めて $j\omega L$、R、$1/j\omega C$ と定義すると、電流と電圧の間には直流と同じ比例関係が成立する。ただし、このときの比例定数は複素数である。ガウス平面上で考えると、コイルでは電流に対して電圧の位相が j すなわちπ/2 だけ進み、コンデンサでは電圧の位相がπ/2 だけ遅れる。

インピーダンス

直流回路における電圧と電流の比例定数 R は実数だが、複素数表記を用いた場合、L,C,R で構成された回路上の交流電流 i と交流電圧 v の比例定数は複素量となる。この量をインピーダンス:Z と呼ぶ。素子のインピーダンス Z を

$$Z = Ae^{j\theta} \qquad (16)$$

とあらわした場合、インピーダンスの絶対値 A は抵抗と同じ役割（電流と電圧の大きさの比を決める）で、角度成分 θ は電流に対する電圧の位相差を与える。この関係を利用すると、回路に正弦波交流を流したときの動作を容易に求めることができる。

交流電流 i を流したときに素子にかかる電圧 v は

$$v = Ae^{j\theta}i \qquad (17)$$

となる。実際の正弦波電圧は、複素数 v の実数部で、複素共役との和の 1/2 すなわち

$$v = AI\left(\frac{e^{j\omega t + j\theta} + e^{-j\omega t - j\theta}}{2}\right) = AI\cos(\omega t + \theta) \qquad (18)$$

で求められる。

素子が複数個ある場合も、抵抗の計算と同様に合成インピーダンスが求められる。例えば L、R、C が直列接続されている場合、合成インピーダンス Z は

$$Z = j\omega L + R + \frac{1}{j\omega C} \qquad (19)$$

$$= R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \qquad (20)$$

と求められる。また、素子が並列に接続されている場合、合成インピーダンス Z は

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{j\omega L} + \frac{1}{R} + j\omega C \qquad (21)$$

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)} \qquad (22)$$

$$= \frac{R(\omega L)^2}{R^2(\omega^2 CL - 1) + \omega^2 L^2} - j\frac{R^2\omega L(\omega^2 CL - 1)}{R^2(\omega^2 CL - 1) + \omega^2 L^2} \qquad (23)$$

となる。