

電気学第一：回路の基礎(4. 増幅回路・オペアンプ)

担当：荒井滋久 (南 9 号館 704 号室、arai@pe.titech.ac.jp)

4. 増幅回路・オペアンプ

これまで述べた電気回路では、抵抗、インダクタンス、キャパシタンスの回路部品に電気信号を加えたとき、その振幅と位相がどのように変化するかという受動的な解析であった。しかし、受動的動作だけでは回路の働きは限定されてしまう。これにトランジスタによる増幅作用などの能動的動作を組み合わせることにより、電子回路の多彩な働きを実現できる。

電子回路の最も基本的な能動動作である増幅という作用を理解するために、演算増幅器(オペアンプあるいは OP アンプともいう)を考えてみよう。オペアンプは数十個のトランジスタや抵抗で構成された IC(集積回路)で、数個の外付け回路部品を接続することにより、増幅ばかりではなく、加算、フィルタ回路、微分・積分回路などを簡単に構成できるので、回路部品の一つとして考えられるようになっている。すなわち、その内部の動作原理を理解しなくても、キルヒホフの法則を利用して増幅作用を含めた回路の動作を理解することができる。

4.1 オペアンプの基本構成

典型的なオペアンプである $\mu A741$ の端子結線図を図 4-1 に示す。

二つの電源 $+V_{dc}$ と $-V_{dc}$ を要し、通常は $\pm 12 \sim \pm 15$ V を用いる。また、電源電圧は通常結線図には書かれない。

二つの入力 v^+ 、 v^- と出力 v_o があり、出力は入力電圧の差に比例する。すなわち、

$$v_o = Av_d = A(v^+ - v^-) \quad (1)$$

であり、 A は増幅度を表し、 $v_d = v^+ - v^-$ である。

図 4-2 に入出力関係を示す。出力 v_o は電源電圧より僅かに低い電圧 V_s で飽和する。すなわち、 $-V_s \leq v_o \leq V_s$ である。例えば $\mu A741$ の典型的な増幅度 $A = 2 \times 10^5$ では、 $V_s = 14$ V のとき $v_d \leq 70 \mu V$ でなければ正確な増幅作用とならない。

理想的なオペアンプでは次のように仮定される。

$$v_d = 0, i^+ = 0, i^- = 0, A = \infty \quad (2)$$

これは、オペアンプを含む回路の解析を容易にする。

この他に、出力電流の大きさは $|i_o| < i_{sat}$ という制限がある。通常のオペアンプでは出力電流の飽和値 i_{sat} は数 mA のオーダーである。

さらに出力電圧の変化率はスルーレート(slew rate)により制限され、その典型的な値は $1 \text{ V}/\mu s$ であ

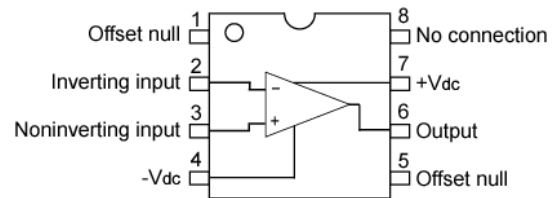


図 4-1 オペアンプ $\mu A741$ の端子結線図

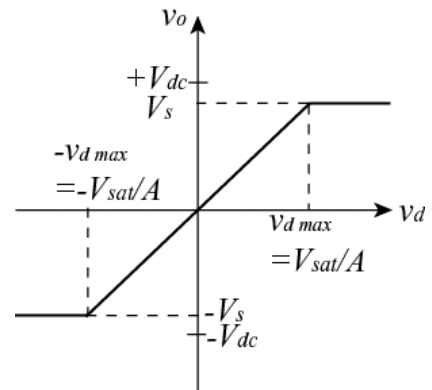


図 4-2 オペアンプの入出力関係

る。例えば、正弦波出力 $v_o = V \sin \omega t$ を最大振幅 $V = 10 \text{ V}$ で得る場合、

$$\frac{d}{dt}v_o = \omega V \cos \omega t$$

であるから、出力電圧の最大変化率は ωV となり、スルーレートを $1 \text{ V}/\mu\text{s}$ とすると、歪のない出力が得られる最大周波数は $\omega = (1 \text{ V}/\mu\text{s})/10 \text{ V} = 10^5 \text{ /s}$ 、あるいは 15.9 kHz となる。これ以上の周波数では、出力は歪む。出力電圧を下げれば、より高い周波数まで歪のない出力が得られる。

入力電圧を 0 V 、すなわち $v_d = 0 \text{ V}$ としたとき、出力電圧も 0 V になるべきであるが、実際のオペアンプでは 0 V にならない場合がある。このときの電圧をオフセット電圧といい、図 4-1 の端子 1 と 5 を用いて調整できる。

4.2 反転増幅器回路

オペアンプを用いた代表的な増幅回路の接続を、図 4-3 に示す。いずれも外付け抵抗によって増幅度を調整できる。図(a)の反転増幅回路は最も一般的に用いられているものであり、出力信号は入力信号に対して逆位相になるが、図(b)の非反転増幅回路では同位相である。

最初に、増幅度 A は有限であると仮定してキルヒホフの法則を図(a)の反転増幅回路に適用すると、次の関係式を得る。

$$v_i + v_d = Z_i i_i \quad (3.a)$$

$$v_o + v_d = -Z_f i_f = -Z_f i_i \quad (3.b)$$

$$(\text{オペアンプに流れ込む入力電流}=0) \quad (3.b)$$

$$v_o = A v_d \quad (3.c)$$

この関係式から、次のようになる。

$$\frac{v_o}{v_i} = -\frac{A \frac{Z_f}{Z_i}}{A + 1 + \frac{Z_f}{Z_i}} \quad (4)$$

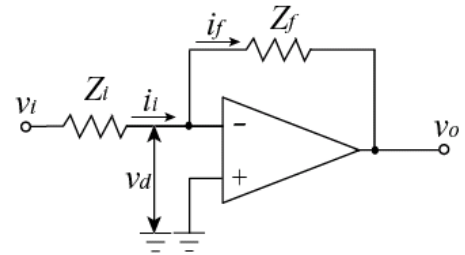
ここで、オペアンプの増幅度を $A \rightarrow \infty$ とすると、次のようになる。

$$\frac{v_o}{v_i} \rightarrow -\frac{Z_f}{Z_i} \quad (5)$$

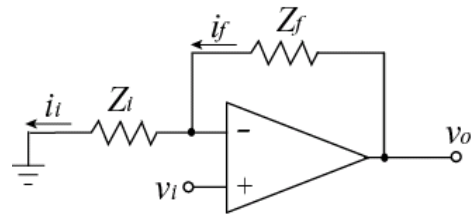
すなわち、この回路の増幅度は外付け抵抗の比 $-\frac{Z_f}{Z_i}$ で決まる。

$A \rightarrow \infty$ は $v_d = 0 \text{ V}$ を意味するので、最初に $v_d = 0 \text{ V}$ を仮定すれば $v_i = Z_i i_i$ 、 $v_o = -Z_f i_i$ となり、電圧比をとることにより回路の増幅度は式(5)で与えられることがただちにわかる。(このことは、式(2)の条件がオペアンプを含む回路の解析を容易にすることに対応している)

ここで、オペアンプを図 4-2 に示す線形領域で動作させるために、出力の一部を入力に負帰還していることに注意せよ。出力を飽和させないためには、負帰還は必要になる。



(a)反転増幅回路



(b)非反転増幅回路

図 4-3 オペアンプによる増幅回路

【例題 4-1】

図 4-4 に示す回路において、入力電圧として $v_i(t) = 0.5\sin\omega t$ [V]を与えると、出力電圧の最大値とオペアンプの出力電流の最大値を求めよ。ただし、電源電圧は ± 15 V とする。

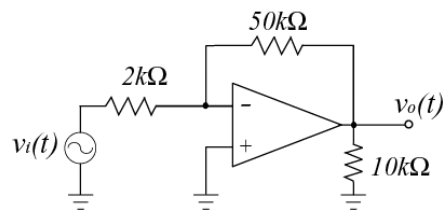


図 4-4 例題 4-1(反転増幅回路)

(解答 4-1)

この回路の増幅度は $-50\text{ k}\Omega / 2\text{ k}\Omega = -25$ となり、出力電圧の最大値は $0.5 \times 25 = 12.5\text{ V}$ となる。電流は $10\text{ k}\Omega$ と $50\text{ k}\Omega$ の抵抗を通して接地電位に流れるので、

出力電流の最大値は $\frac{12.5\text{ V}}{10\text{ k}\Omega} + \frac{12.5\text{ V}}{50\text{ k}\Omega} = 1.5\text{ mA}$ となる。

4.3 非反転増幅回路

図 4.3(b)において、式(2)を仮定してキルヒホフの法則を適用すると、次の関係式を得る。

$$v_i = Z_i i_i \quad (6.a)$$

$$v_o = Z_f i_f + Z_i i_i = (Z_i + Z_f) i_i \quad (\text{オペアンプに流れ込む入力電流}=0) \quad (6.b)$$

したがって、

$$\frac{v_o}{v_i} = 1 + \frac{Z_f}{Z_i} \quad (7)$$

となり、やはり外付け抵抗の比によって回路の増幅度が決まる。ただし、出力信号の位相は入力信号に対して反転することはない。

【例題 4-2】

図 4-5 に示す回路において、入力電圧として $v_i(t) = 10\sin\omega t$ [V]を与えると、出力電圧の最大値を求めよ。さらに、オペアンプの飽和電圧および電流を、それぞれ 14 V、2 mA とすると、飽和しているかどうか調べよ。

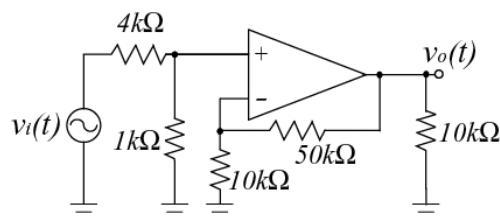


図 4-5 例題 4-2(非反転増幅回路)

(解答 4-2)

この非反転増幅回路の増幅度は $1 + \frac{50\text{ k}\Omega}{10\text{ k}\Omega} = 6$ である。入力電圧は $4\text{ k}\Omega$ と $1\text{ k}\Omega$ の抵抗で分割され

ているので $2\sin\omega t$ となるので、出力電圧の最大値は 12 V である。

このとき、電流は $10\text{ k}\Omega$ と $(50\text{ k}\Omega + 10\text{ k}\Omega)$ の並列に接続された抵抗を通して接地電位に流れるので、

出力電流の最大値は $\frac{12\text{ V}}{10\text{ k}\Omega} + \frac{12\text{ V}}{60\text{ k}\Omega} = 1.4\text{ mA}$ となる。最大電圧、電流ともにオペアンプの飽和電

圧、電流よりも小さいので、いずれも飽和していない。

4.4 加算回路

図 4-6 のように回路を構成すると、抵抗 R_i を流れる電流は $I_i = v_i / R_i$ であるから、

$$v_o = -R_f (I_1 + I_2 + \dots + I_n) = -\frac{R_f}{R_1} v_1 - \frac{R_f}{R_2} v_2 - \dots - \frac{R_f}{R_n} v_n \quad (8)$$

となり、入力電圧の加算ができる。

なお、式(8)では入力電圧にかかる係数は全て負となるが、係数を正にするには増幅度-1 の反転増幅回路を加算回路の前に挿入すればよい。

【例題 4-3】

次の加算を行う回路を設計せよ。

$$v_o = -2v_1 + v_2 - 4v_3$$

(解答 4-3)

図 4-7 のように加算回路を組む。ここで、 $R_f = 40 \text{ k}\Omega$ とおくと、 $R_1 = 20 \text{ k}\Omega$ 、 $R_2 = 40 \text{ k}\Omega$ 、 $R_3 = 10 \text{ k}\Omega$ であり、入力 2 の前に増幅度-1 の反転増幅回路を挿入してあるのは、 v_2 の加算係数を正とするためである。

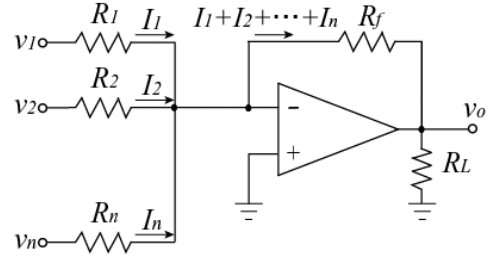


図 4-6 加算回路

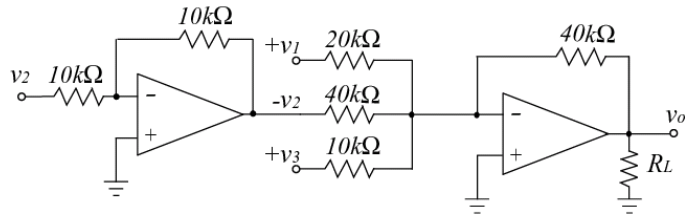


図 4-7 例題 4-3(加算回路)

4.5 積分・微分回路

図 4-8(a)の回路において、入力電圧と入力電流の関係は反転増幅回路と同様に $v_i = Ri_i$ である。また、入力電流は全てキャパシタンスの充電電流となるから、キャパシタンス両端の電圧 v_c および出力電圧は次の式で表される。

$$v_o = -v_c = -\frac{1}{C} \int i_i dt = -\frac{1}{C} \int i_i dt = -\frac{1}{CR} \int v_i dt \quad (9)$$

すなわち、入力電圧の積分が出力電圧として得られる。

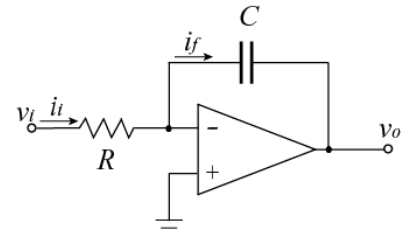
また、図 4-8(b)に示す回路の入力端で

$$i_i = C \frac{d}{dt} v_i \quad (10)$$

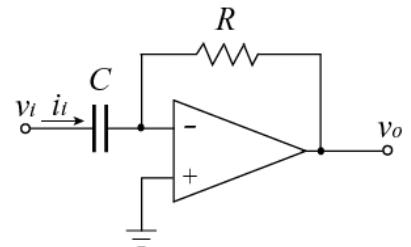
が成立つので、出力電圧は次のようになる。

$$v_o = -Ri_i = -RC \frac{d}{dt} v_i$$

すなわち、入力電圧の微分が出力電圧として得られる。



(a)積分回路



(b)微分回路

図 4-8 オペアンプによる演算回路。