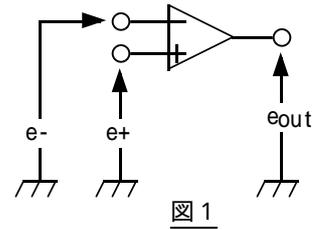


# オペアンプ

## オペアンプとは

- (1) 図1の記号のように2つの入力端子+、入力端子-と1つの出力端子を持っており、入力端子+の電圧を $e_+$ 、入力端子-の電圧を $e_-$ 、出力電圧を $e_{out}$ とすると次の関係が成り立つ。

$$e_{out} = [(e_+) - (e_-)] \times A \quad \dots (1)$$



式1で「A」はオペアンプの裸利得と呼ばれるもので、理想のオペアンプでは $A = \infty$ である。 $A = \infty$ 大なら、 $e_+ = e_-$ のとき以外では $e_{out} = \pm \infty$ となってしまう。実際のオペアンプでは $A$ は無限大ではなく、例えば10万倍というような値である。それで、たとえば $A = 10$ 万倍とすると、 $e_+ = 10 \mu V$ 、 $e_- = 0 V$ のとき $e_{out} = 1 V$ となる。

式1は、+入力と-入力の差を増幅度倍したものがオペアンプの出力となることを表している。すなわち、 $e_+ = 1.000 V$ 、 $e_- = 1.000 V$ のときも、 $e_+ = 10.000 V$ 、 $e_- = 10.000 V$ のときも同様に $e_{out} = 0 V$ になる。このように、 $e_+$ と $e_-$ に共通に加わっている電圧を「同相入力」という。  
 $e_+ = 10.0001 V$ 、 $e_- = 10.0000 V$ のときも、 $e_+ = 0.0001 V$ 、 $e_- = 0.0000 V$ のときも、出力 $e_{out} = 10 V$ となる。このような $e_+$ と $e_-$ の電圧差を「差動入力」という。

オペアンプの中味はトランジスタ、ダイオード、抵抗とコンデンサの集積回路で、増幅度の極めて大きい増幅回路であり、図1には示していないが、実際のオペアンプでは電源電圧を供給するための電源端子を2つ持っている。入力と出力の関係は式1で表されるが、式1の関係が成り立つのは通常、入力、出力ともに電源電圧の範囲内の場合であり、入力が電源電圧の範囲を超えれば正常に動作しないのが普通であり、又、出力が電源電圧の範囲を超えることはない。

- (2) 理想のオペアンプのもう一つの特徴は、入力のインピーダンスが無限大、出力のインピーダンスはゼロということである。すなわち、図1のように入力端子に電圧 $e_+$ 、 $e_-$ を加えても、電流は流れないし、出力にゼロでないどんな小さな抵抗値を負荷としてつないでも $e_{out}$ は影響されず必要な電流を負荷に供給することができる。

実際のオペアンプでは入力端子のインピーダンスは無限大ではなく、電流が流れる。その値はオペアンプのよって異なり、数 $pA$ のものから数百 $nA$ のものまでいろいろであり、電流の方向も、流れ出るものと流れ込むものがある。また出力電流は通常その最大値が $10 mA$ 程度であり、出力インピーダンスもゼロではなく数 $\Omega$ はある。

- (3) 基本回路1

図2に示す回路で、式1の条件と、上記(2)の条件が成り立つものとして $e_{in}$ 、 $e_{out}$ に関して式をたてると次のようになる。ここで $e_-$ とはオペアンプの-入力端子の電圧である。

$$e_{out} = -(e_-) \times A \quad \dots (2)$$

$$e_- = e_{in} \times \frac{R2}{R1+R2} + e_{out} \times \frac{R1}{R1+R2} \quad \dots (3)$$

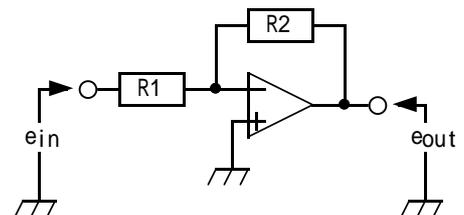


図2

ここで式2は式1において $e_+ = 0$ とおいたものである。また式3はオペアンプの入力端子には電流が流れないという原則を当てはめて、 $e_{in}$ 、 $e_{out}$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ からなる図3の回路に対して、流れる電流から式4をたて、これを变形したものである。

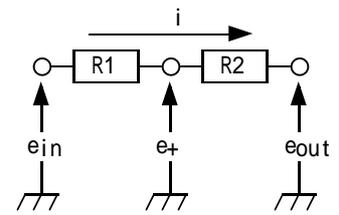


図3

$$i = \frac{e_{in} - e_+}{R_1} = \frac{e_+ - e_{out}}{R_2} \quad \dots (4)$$

式3を式2に代入して $e_{out}$ と $e_{in}$ の関係を求めると式5を得る。

$$\frac{e_{out}}{e_{in}} = - \frac{R_2}{R_1 + \frac{R_1 + R_2}{A}} \quad \dots (5)$$

式5で、 $R_1 = 10\text{ k}$ 、 $R_2 = 22\text{ k}$ とし、オペアンプとしてNECのuPC4558Cを使うとしてデータブックから $A = 100000$  (代表値)の値を代入すると、図2の回路の電圧増幅度 $G_v$ は

$$G_v = \frac{e_{out}}{e_{in}} = - \frac{22000}{10000 + \frac{10000+22000}{100000}} = -2.1999296 \quad \dots (6)$$

となる。ここで、分母の第2項が第1項にくらべて十分に小さいことからこれを省略すれば式7を得る。

$$G_v = \frac{e_{out}}{e_{in}} = - \frac{R_2}{R_1} \quad \dots (7)$$

式7は、式5において $A = \infty$ とおいた理想のオペアンプの場合に相当する。実際のオペアンプでも、 $A$ の値は十分に大きく、式6のように、式7で計算した増幅度との誤差は小さいので、通常の計算では式7を使う。

<図2の回路は $e_{in}$ と $e_{out}$ の極性が逆になるところから「反転増幅回路」と呼ばれ、その電圧増幅度はオペアンプにはよらず、外付けの抵抗 $R_1$ 、 $R_2$ の値のみによって決まる。>

#### (4) 基本回路2

図4に示す回路で、式1の条件と、前記(2)の条件が成り立つものとして $e_{in}$ 、 $e_{out}$ に関して式をたてると次のようになる。ここで $e_-$ 、 $e_+$ とはそれぞれオペアンプの-入力端子、+入力端子の電圧である。

$$e_- = e_{out} \times \frac{R_1}{R_1+R_2} \quad \dots (8)$$

$$e_+ = e_{in} \times \frac{R_4}{R_3+R_4} \quad \dots (9)$$

この式8、9を式1に代入して $e_{in}$ と $e_{out}$ に関して解き、図4の回路の電圧増幅度 $G_v$ を求めると式10を得る。

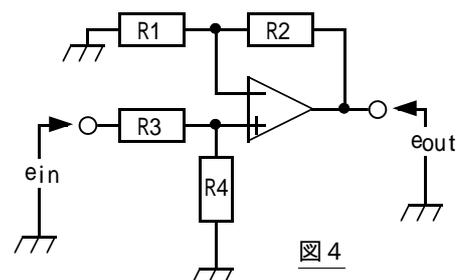


図4

$$G_v = \frac{e_{out}}{e_{in}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + \frac{R_1 + R_2}{A}} \times \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad \dots (10)$$

式10において、 $R_1 = R_3 = 10\text{ k}$ 、 $R_2 = R_4 = 22\text{ k}$ 、 $A = 100000$ として $G_v$ を求めると、式11となる。

$$G_v = \frac{e_{out}}{e_{in}} = \frac{10000+22000}{10000+\frac{10000+22000}{100000}} \times \frac{22000}{10000+22000} = 2.1999296 \quad \dots (11)$$

式10において、第1項の、分母の第2項が第1項にくらべて十分に小さいことからこれを省略すれば式12を得る。

$$G_v = \frac{e_{out}}{e_{in}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \times \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad \dots (12)$$

式12は、式10において $A = \infty$ といた理想のオペアンプの場合に相当する。実際のオペアンプでも、 $A$ の値は十分に大きく、式11のように、式12で計算した増幅度との誤差は小さいので、通常の計算では式12を使う。

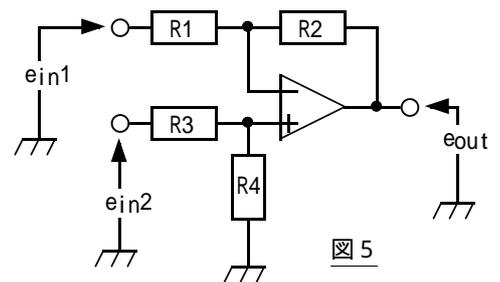
<図4の回路は $e_{in}$ と $e_{out}$ の極性が同じになることから「非反転増幅回路」と呼ばれ、その電圧増幅度はオペアンプにはよらず、外付けの抵抗 $R_1 \sim R_4$ の値のみによって決まる。>

### (5) 基本回路3

図5に示す回路で、式1の条件と、前記(2)の条件が成り立つものとして $e_{in}$ 、 $e_{out}$ に関して式をたてると次のようになる。ここで $e_-$ 、 $e_+$ とはそれぞれオペアンプの-入力端子、+入力端子の電圧である。

$$e_- = e_{in1} \times \frac{R_2}{R_1+R_2} + e_{out} \times \frac{R_1}{R_1+R_2} \quad \dots (13)$$

$$e_+ = e_{in2} \times \frac{R_4}{R_3+R_4} \quad \dots (14)$$



ここで式13は式3と、式14は式9と同じものである。これらの式を式1に代入して $e_{in1}$ 、 $e_{in2}$ と $e_{out}$ の関係を表す式を求めると、式15を得る。

$$e_{out} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + \frac{R_1 + R_2}{A}} \times \frac{R_4}{R_3 + R_4} \times e_{in2} - \frac{R_2}{R_1 + \frac{R_1 + R_2}{A}} \times e_{in1} \quad \dots (15)$$

さらに、式15で、 $A = \infty$ 、 $R_1 = R_3$ 、 $R_2 = R_4$ とおくと式16を得る。

$$e_{out} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \times \frac{R_4}{R_3 + R_4} \times e_{in2} - \frac{R_2}{R_1} \times e_{in1}$$

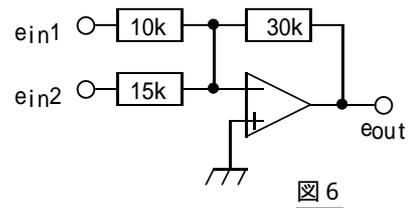
$$= \frac{R_2}{R_1} \times (e_{in2} - e_{in1}) \quad \dots (16)$$

図5の回路の最も一般的な例では  $R_1 = R_3$ 、 $R_2 = R_4$  であり、そのとき  $e_{in1}$ 、 $e_{in2}$  と  $e_{out}$  の関係は式16のようになって、2つの入力電圧の差を増幅する回路、すなわち「差動増幅回路」となっていることがわかる。

### 問題1

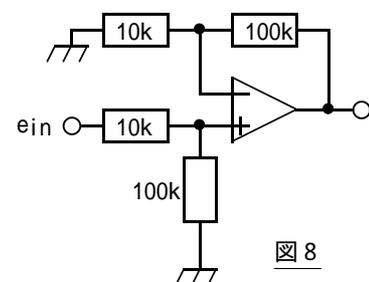
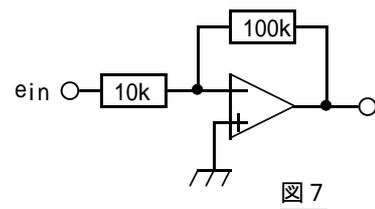
図6の回路で、 $e_{in1}$ 、 $e_{in2}$  と  $e_{out}$  の関係をあらわす式を求めよ。

<この回路は加算回路 ( $Z = AX + BY$ ) として機能する。>



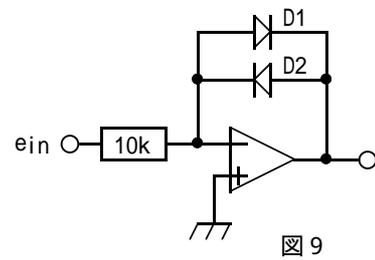
### 問題2

図7の回路の入カインピ - ダンス (入力抵抗) はいくらか。図8はどうか。



### 問題3

図9の回路で  $e_{in}$  を  $-2V$  から  $+2V$  まで変化させたとき、 $e_{out}$  がどのように変化するかグラフに表せ。



交流増幅回路

オペアンプは、もとは直流信号を扱うためのものであったが、現在では高周波、大電流、高電圧あらゆる分野で使用されている。ここではオペアンプの交流信号特性について調べる。

(1) 図10の回路で入力信号として交流信号を入力すると出力はどうなるか。

理想のオペアンプでは式5が常に成り立つ。したがって、入力信号が時間的に変化しても、その瞬間瞬間での電圧に応じて、式5で決まる出力が出る。したがって図10の回路に対して、 $e_{in}$ 、 $e_{out}$ を交流信号とみなして式5がそのまま成り立つ。

$$e_{out} = - \frac{R2}{R1 + \frac{R1 + R2}{A}} \times e_{in} \quad \dots (17)$$

式17で右辺のマイナス符号は、交流信号が反転されて出力されることを意味し、入力と出力をオシロで見ると図11のように見える。

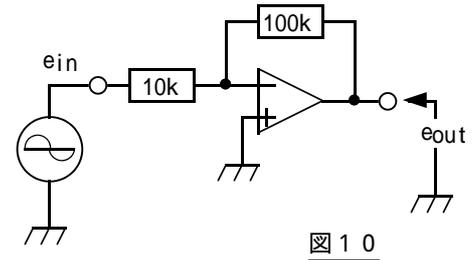


図10

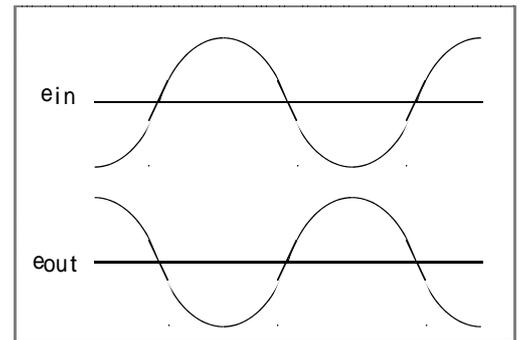


図11

(2) 周波数特性

オペアンプの裸利得Aは直流に対しては10万倍というような値であるが、周波数がある程度よりも高くなると、周波数に反比例して小さくなる。たとえばuPC4558Cの場合、データブックのグラフ(図12)によると裸利得Aは周波数20Hz付近を境にしてそれ以上では周波数に反比例して低下しているの、概略次のような式で表せる。

$$A = A_0 \times \frac{1}{1 + j \times \frac{f}{f_0}} \quad \dots (18)$$

式18で $A_0$ は直流における裸利得、 $f_0$ は裸利得のカットオフ周波数である。

式18によれば、uPC4558Cの裸利得は直流においては100dB(10万倍)、1kHzにおいては67dB(2200倍)、100kHzにおいては27dB(22倍)である。

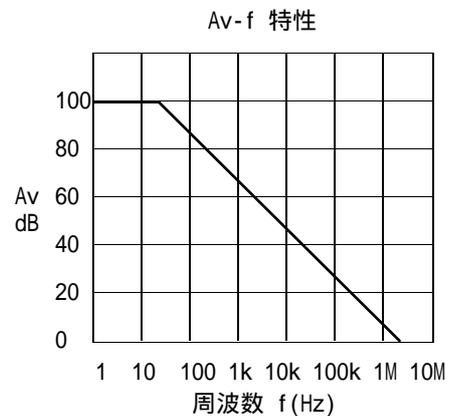


図12

式18の裸利得Aを式17に代入すると、図10の回路の周波数特性を含む利得 $G_v(f)$ を表す式19となる。

$$G_v(f) = \frac{e_{out}}{e_{in}} = - \frac{R2}{R1 + \frac{R1 + R2}{A_0 \times \frac{1}{1 + j \times \frac{f}{f_0}}}} \quad \dots (19)$$

式19を変形すると

$$G_v(f) = - \frac{R_2}{R_1 + \frac{R_1 + R_2}{A_0} \times (1 + j \times \frac{f}{f_0})}$$

$$= - \frac{R_2}{R_1 + \frac{R_1 + R_2}{A_0} + \frac{R_1 + R_2}{A_0} \times j \times \frac{f}{f_0}}$$

ここで、 $A_0 = 100000$ であり、 $R_1 \gg (R_1 + R_2) / A_0$ であるので、分母の $(R_1 + R_2) / A_0$ の項を省略すると、

$$G_v(f) = - \frac{R_2}{R_1 + \frac{R_1 + R_2}{A_0} \times j \times \frac{f}{f_0}}$$

さらに、 $R_2 / R_1 = G_{v0}$ において、分母の虚数項を変形すると式20となる。

$$G_v(f) = - \frac{R_2}{R_1 + \frac{R_1(1 + G_{v0})}{A_0} \times j \times \frac{f}{f_0}} = - \frac{R_2}{R_1} \times \frac{1}{1 + j \times \frac{f}{f_0 \times \frac{A_0}{1 + G_{v0}}}} \dots (20)$$

式20と式18を比べてみると、図10の回路の増幅度が低下しはじめる周波数 $f_c$ (カットオフ周波数)は、オペアンプの裸利得のカットオフ周波数 $f_0$ に対して $f_c = f_0 \times A_0 / (1 + G_{v0})$ であり、 $R_1 = 10k$ 、 $R_2 = 100k$ とすると、 $G_{v0} = 10$ であるから、 $f_c = f_0 \times 100000 / 11 = 182kHz$ であることがわかる。図10の回路の増幅度の周波数特性を、オペアンプの裸利得のグラフと重ねて示せば、図13となる。

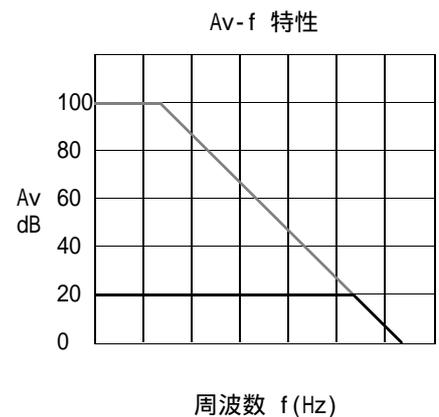


図13

図10のように出力の一部を入力に戻すことを「帰還をかける」という。また図10では、入力と出力は極性が逆であり、入力を打ち消すように出力を戻している。これを「負帰還」という。

負帰還をかけることにより、回路の増幅度がオペアンプ固有の裸利得によらず、外付けの素子の値で決まるようになり、また式20のように、周波数特性が改善される。