

OP アンプの基本

(読んでほしい人：電気系の高専生と大学生)

2014/7/31 舞鶴高専 平地克也

OP アンプは電気系の高専生と大学生は電子回路の授業で必ず勉強しますが、動作の基本、特に負帰還やイマジナリーショートが正確に理解できてない人が多いようです。ここでは OP アンプの基本構成からイマジナリーショートまで分かり易く説明しますので動作の基本を確実に理解して下さい。

OP アンプの基本構成と特性

図 1 に OP アンプの基本構成を示します。3 つの増幅回路が直列接続されています。差動増幅回路は 2 つの入力 v_{in^-} と v_{in^+} の差を増幅します。電圧増幅回路では差動増幅回路の出力電圧をさらに増幅します。電流増幅回路では電圧は増幅せず、電流を増幅します。図 2 に OP アンプの例を示します。普通の IC と外観は同じです。図 2 は NEC の μ PC451C という OP アンプで、図 1 の回路が 4 ヶ入っています。

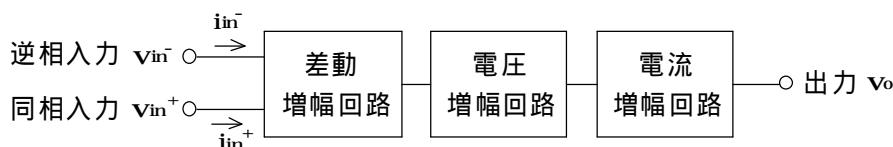


図 1 OP アンプの基本構成



図 2 OP アンプの外観

図 3 に OP アンプの部品記号を示します。逆相入力には -、同相入力には + の記号を付けます。 V^+ と V^- は電源電圧です。通常正負両電源で使用します。電源電圧の表示は便宜上省略しても OK です。前記のように、差動増幅回路は 2 つの入力の差を増幅するので、出力電圧 v_o は次の式で与えられます。

$$v_o = A_v(v_{in^+} - v_{in^-}) \dots (1) \text{式}$$

A_v は電圧増幅率ですが、図 1 のように差動増幅回路と電圧増幅回路の直列接続となっているので A_v は非常に大であり、通常無限大と考えて OK です。電流増幅率も非常に大きく、入力電流 i_{in^+} と i_{in^-} は通常 0A と考えて OK です。

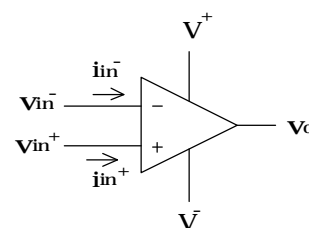


図 3 OP アンプの部品記号

OP アンプの飽和動作

図 4 (a) では $v_{in^-} = 1.1V$ 、 $v_{in^+} = 1.0V$ です。 A_v は 10000 のので(1)式に代入すると $v_o = -11V$ となります。しかしながら、OP アンプは発電機ではないので電源電圧を超える電圧を出力することはできません。よって、図 4 (a) では $v_o = -12V$ となります。同様にして図 4 (b) では $v_o = +12V$ となります。このように、OP アンプは A_v が非常に大きいので 2 つの入力の間に少しでも差があると出力は電源電圧となります。このような動作を OP アンプの飽和動作と言います。次節で詳しく説明しますが、出力

電圧が電源電圧以外の値、即ち $V^+ > v_o > V^-$ となるのは2つの入力完全に等しい時、即ち $v_{in^-} = v_{in^+}$ の時に限られます。

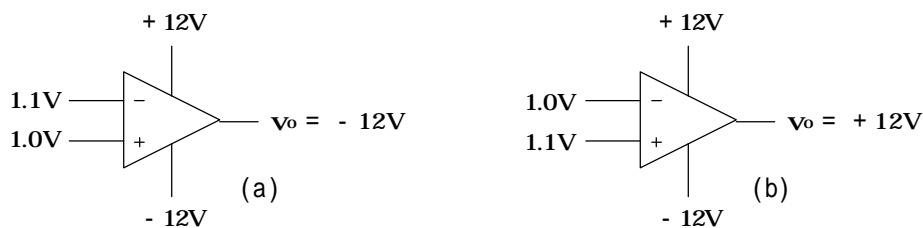


図4 OP アンプの飽和動作

OP アンプの負帰還動作とイマジナリーショート

次に図5の回路の動作を考えます。OP アンプの出力端子と逆相入力端子の間に抵抗 R_f が挿入されています。これを負帰還抵抗(フィードバック抵抗)と言います。前記のように i_{in^-} は非常に小さく、ゼロと見なして良いので $i_1 = i_2$ となります。したがって R_1 と R_f は図6のような単純な直列回路と同じであり v_i と v_o を R_1 と R_f で分圧していると考えられます。図のように $R_1 = R_f = 10k$ なら

$$v_{in^-} = (v_i + v_o) \div 2$$

となります。以下、3つの場合に分けてこの回路の動作を考えます。

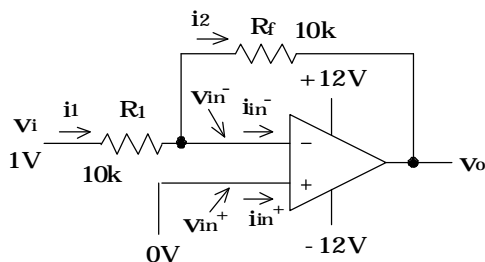


図5 負帰還回路

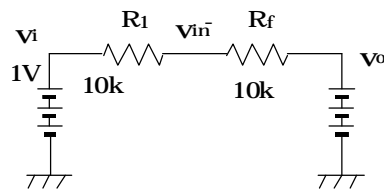


図6 分圧回路

$v_i = 1V$ 、 $v_o = -1V$ の時

$v_{in^-} = (v_i + v_o) \div 2 = 0V$ なので、

$v_{in^+} = v_{in^-}$ となりこの回路は平衡状態となっています。

$v_i = 1V$ 、 $v_o > -1V$ の時

$v_{in^-} = (v_i + v_o) \div 2 > 0V$ なので、

$v_{in^-} > v_{in^+}$ となり(1)式より v_o は低下します。

$v_i = 1V$ 、 $v_o < -1V$ の時

$v_{in^-} = (v_i + v_o) \div 2 < 0V$ なので、

$v_{in^-} < v_{in^+}$ となり(1)式より v_o は上昇します。

以上をまとめると次のようになります。

$v_o = -1V$	$v_{in^+} = v_{in^-}$	平衡状態	
$v_o > -1V$	$v_{in^-} > v_{in^+}$	v_o 低下	$v_o = -1V$ となって平衡
$v_o < -1V$	$v_{in^-} < v_{in^+}$	v_o 上昇	$v_o = -1V$ となって平衡

このように図5では $v_o = -1V$ が唯一の平衡点であり、 v_o が $-1V$ より大きいと v_o は低下し、 $-1V$ より小さいと v_o は上昇し、結局 $v_o = -1V$ の状態で平衡します。このように、OP アンプの出力電圧が OP アンプの入力に影響を与えて平衡状態に引き戻す動作を負帰還動作といいます。

そして、平衡状態では必ず $v_{in^+} = v_{in^-}$ が成立しており、 v_{in^+} と v_{in^-} があたかも短絡しているように見えます。よってこの状態をイマジナリーショート（仮想短絡）といいます。

OP アンプの正帰還動作

OP アンプの負帰還動作はその逆の動作である正帰還動作を考えるとさらに理解が深まるでしょう。図7を見て下さい。図5と同じに見えるかもしれませんが、1ヶ所だけ違いがあります。OP アンプ入力の+と-が逆になっています。つまり、フィードバック抵抗 R_f が同相入力端子と出力端子の間に挿入されています。この1ヶ所の相違により上記の動作は以下のようになります。

$v_i = 1V$ 、 $v_o = -1V$ の時

$v_{in^-} = (v_i + v_o) \div 2 = 0V$ なので、

$v_{in^+} = v_{in^-}$ となりこの回路は平衡状態となっています。

$v_i = 1V$ 、 $v_o > -1V$ の時

$v_{in^+} = (v_i + v_o) \div 2 > 0V$ なので、

$v_{in^+} > v_{in^-}$ となり(1)式より v_o は上昇し、 $v_o = +12V$ となります。

$v_i = 1V$ 、 $v_o < -1V$ の時

$v_{in^+} = (v_i + v_o) \div 2 < 0V$ なので、

$v_{in^+} < v_{in^-}$ となり(1)式より v_o は低下し、 $v_o = -12V$ となります。

以上をまとめると次のようになります。

$v_o = -1V$	$v_{in^+} = v_{in^-}$	平衡状態	
$v_o > -1V$	$v_{in^+} > v_{in^-}$	v_o 上昇	$v_o = +12V$ となる（飽和動作）
$v_o < -1V$	$v_{in^+} < v_{in^-}$	v_o 低下	$v_o = -12V$ となる（飽和動作）

このように、OP アンプ入力の+と-が逆になると上記の動作が全く逆になり、平衡状態に引き戻されるのではなく、平衡状態から引き離されて飽和動作となってしまいます。よって、たとえ平衡状態にあって平衡していたとしても、ノイズが入るなどして少しでも $v_o \neq -1V$ となるとたちまち平衡状態から引き離されて飽和状態となってしまいます。このような動作を正帰還動作といいます。

負帰還動作と正帰還動作は図8のように考えると分かり易いでしょう。負帰還はお椀の中にボールが入っている状態であり、ボールに衝撃を加えてもお椀の底（唯一の平衡点）に戻ります。正帰還は

山の上にボールが乗っている状態であり、たとえ頂上で平衡していても少しでも衝撃が加わるとたちまち転げ落ちてしまいます。

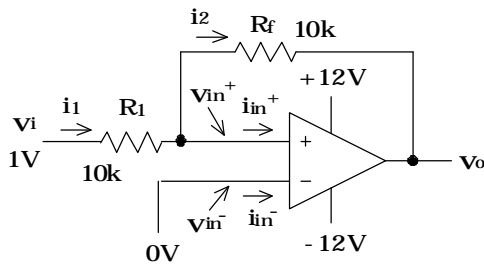


図7 正帰還回路

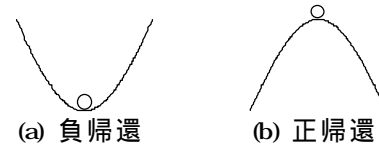


図8 負帰還と正帰還

OP アンプの負帰還動作の応用

前記のように図5では $v_o = -1V$ が唯一の平衡点であり必ずこの状態になります。同様にして図9 (a)では $v_o = -2V$ となるのが容易に推定できるでしょう。(b)なら $-6V$ です。(a)(b)の回路は反転増幅回路と言い、 $v_o = -(R_2 / R_1)v_i$ の関係があります。 R_1 と R_2 を定めることにより正確に任意の増幅率の回路を構成することができます。(c)の回路は $v_o = (1 + R_2 / R_1)v_i$ の関係があり、非反転増幅回路と言います。また、(d)の回路では $v_o = -\frac{1}{CR} \int v_i dt$ となり積分回路と言います。さらに、微分回路、加算回路、絶対値回路、ローパスフィルタ、ハイパスフィルタなど、OP アンプの負帰還動作を使うことによりほとんどどんな回路でも構成できます。沢山の参考書や回路集が市販されています。

なお、正帰還動作は悪者のように説明してしまいましたが、実は正帰還動作も有用な動作であり、発振回路やヒステリシス回路などに利用されます。参考書を見ると OP アンプの正帰還動作を使ったいろんな回路を学習することができます。

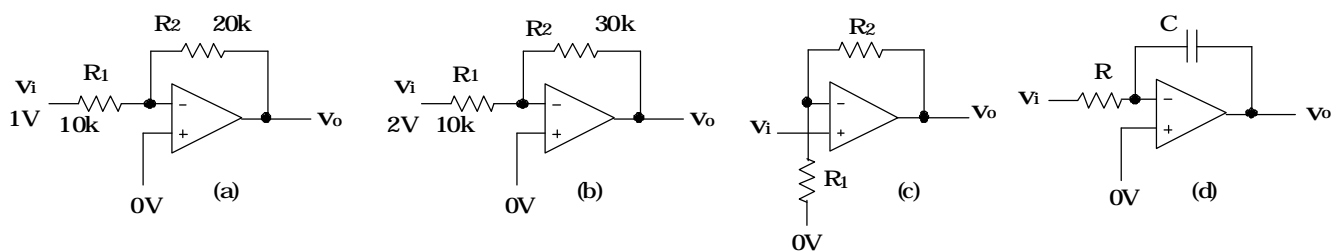


図9 OP アンプの負帰還動作の応用回路

OP アンプの基本は理解できたでしょうか？ それではあとは教科書や参考書で勉強して下さい。

以上