



## 12 OP アンプ回路の異常発振の原因と対策

馬場 清太郎  
Seitaro Baba

これまでの説明では、OP アンプ回路は負帰還をかけても安定に動作するものとしてきました。しかし、実際に作ってみると、動作が不安定になり、発振に見舞われることがあります。

そこで今回は、OP アンプ回路はなぜ不安定になるのか、安定に動作させるためにはどうしたらよいかについて考えてみることにしましょう。どのようなタイプの OP アンプ増幅回路が発振しやすいのかについても説明します。

### 増幅回路が発振する条件

#### ● OP アンプが発振しているときの出力波形

OP アンプ増幅回路の出力波形を観測したとき、図 12-1 に示すような波形が観測されたら、OP アンプが発振している可能性があります。

図 12-1(a) に示すように、信号出力に一樣に高周波の発振波形が重畳されていたり、図 12-1(b) に示すように、出力波形の一部に発振波形が重畳されていたり、図 12-1(c) に示すように、入力をグラウンドに短絡しても、大振幅の発振波形が現れる場合もあります。

#### ● 発振の条件は？…「 $A\beta = -1$ 」

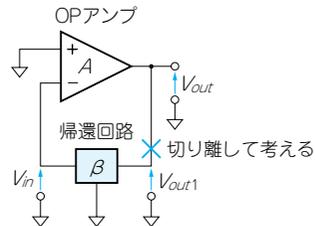
OP アンプ増幅回路が負帰還をかけたことによって発振するのは、図 12-2 に示すように帰還ループを一巡した出力信号  $V_{out}$  が、元の信号  $V_{out1}$  とレベルが等

しく位相が同じときです。

元の信号は帰還回路で分圧され、OP アンプの反転入力端子に戻されていますから、正常であれば出力信号は元の信号に対して、位相が  $180^\circ$  回っているはず

です。ところが、出力信号の位相がさらに  $180^\circ$  余分に回り、元の信号と同じ位相、同じレベルになると発振します。このとき、帰還回路を切り離し外部から  $V_{out1}$  を加えると、 $V_{out}$  が出力されます。両者はレベルと位相が等しいので、切り離れた帰還回路を再接続すれば、外部から  $V_{out1}$  を注入しなくても  $V_{out}$  は出力され続け

〈図 12-2〉 OP アンプ増幅回路の発振の条件



$$V_{out} = -AV_{in} \dots\dots\dots (12-1)$$

$$V_{in} = \beta V_{out1} \dots\dots\dots (12-2)$$

ここで、 $V_{out} = V_{out1}$  になると、

$$A\beta = -1 \dots\dots\dots (12-3)$$

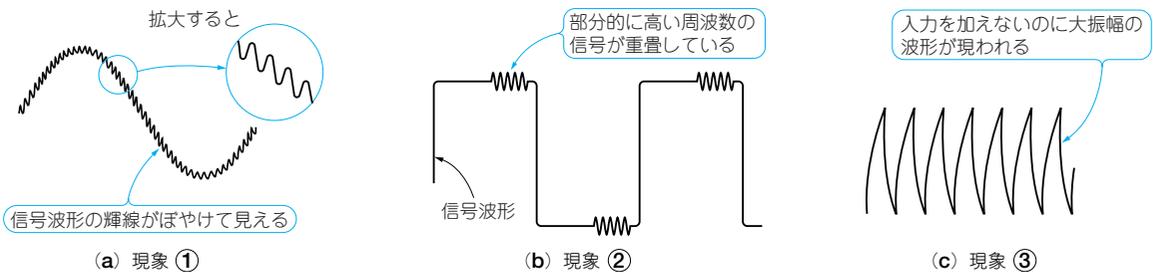
が成り立つ。つまり、

$$\bullet |A\beta| = 1 \dots\dots\dots (12-4)$$

$$\bullet \angle A\beta = -180^\circ \pm (n \times 360^\circ) (\because n=0, \pm 1, \pm 2, \dots) \dots\dots (12-5)$$

が成り立つ。この条件で上記の増幅回路は発振する。

〈図 12-1〉<sup>(1)</sup> OP アンプが発振しているときの出力波形



て、発振するというわけです。

式で表すと、

$$A\beta = -1 \dots\dots\dots (12-3)$$

ただし、 $A$ ：OPアンプのオープン・ループ・ゲイン、 $\beta$ ：帰還率

となります。この $A\beta$ をループ・ゲインと呼びます。

式(12-3)は、ループ・ゲインの大きさ $A\beta$ が1で、位相が $-180^\circ$ 回転したときに発振することを意味しています。

図12-2の発振の条件を示す式(12-5)では、 $-180^\circ$ を基準にしていますが、これは位相が高周波で遅れるためです。 $+180^\circ (= -180 + 360)$ としても間違いではありませんが、一般にはこのようにします。

▶位相が $180^\circ$ 回っても $|A\beta| < 1$ では発振しない

負帰還とは、 $|A\beta|$ の位相の回転が $-180^\circ$ よりも小さいときの動作モードのことで、この状態では発振はしません。

位相が $-180^\circ$ 回っているときの動作モードは負帰還とはいいません。正帰還と呼びます。このとき $|A\beta| < 1$ なら、正帰還された信号は徐々に減衰しますから、オーバーシュートなど、一時的に変な出力が出て発振状態にはなりません。

▶位相が $180^\circ$ 回り、かつ $|A\beta| \geq 1$ のとき発振する

位相が $-180^\circ$ 回って、 $|A\beta| = 1$ になるとOPアンプは発振します。

$|A\beta| > 1$ の場合、OPアンプ内部では、クリップなどが起きてゲイン $A$ が低下します。その結果、実効的に $|A\beta| = 1$ となって発振が持続します。

図12-1(c)に示す波形が、このときの典型的な波形です。

発振しない増幅回路を設計するための基礎知識

● ボーデ線図を使って発振しそうかどうかを判別する

OPアンプが発振の条件に対して、どのくらいの余裕があるかを判別するには、図12-3に示すように負帰還ループの一巡ゲイン、つまりループ・ゲインの伝達関数 $A\beta$ のボーデ線図を利用します。

負帰還安定度の判別には、次に示すゲイン余裕と位相余裕が現場で利用されています。

▶ゲイン余裕

図12-3において、位相が $-180^\circ$ になる周波数におけるループ・ゲイン $|A\beta|$ が、0dB(1倍)よりもどのくらい負になっているのか見ます。この負の値をゲイン余裕といいます。ゲイン余裕が正の場合は発振します。

▶位相余裕

ループ・ゲイン $|A\beta|$ が0dB(1倍)になる周波数における位相が、 $-180^\circ$ に対してどのくらい内輪にな

っているのか見ます。この位相と $-180^\circ$ との差を位相余裕といいます。 $-180^\circ$ 以上回ってれば発振します。

● ゲイン余裕と位相余裕の最適値は？

ゲイン余裕と位相余裕はどの程度とったらよいのでしょうか。

表12-1に示すのは、ゲイン余裕と位相余裕の目安です。一般の増幅回路では位相余裕 $60^\circ$ 以上、定電圧電源では $45^\circ$ 以上が望ましいといわれています。詳しいことは、稿末の文献(1)と(2)にわかりやすく説明されています。

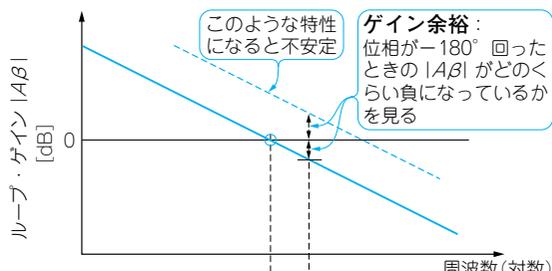
▶大きすぎても小さすぎてもだめ…「応答速度とのトレードオフ」

余裕が小さすぎると回路の安定度が悪くなります。逆に大きすぎると、種々の理由からループ・ゲインが小さくなってゲイン誤差が大きくなり、応答速度が遅くなります。

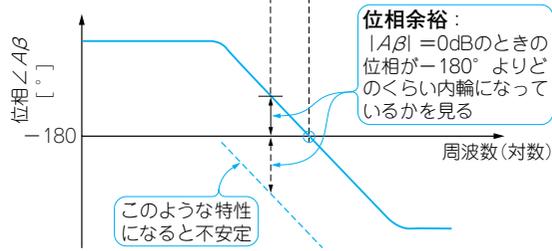
● 2次遅れ回路は発振しやすい

▶実際のOPアンプの多くは2次遅れ回路

〈図12-3〉OPアンプ増幅回路の位相余裕とゲイン余裕



(a) ループ・ゲインの絶対値の周波数特性とゲイン余裕



(b) ループ・ゲインの位相の周波数特性と位相余裕

〈表12-1〉<sup>(2)</sup>位相余裕およびゲイン余裕とステップ応答

ゲイン余裕	位相余裕	特徴
3 dB	$20^\circ$	ひどいリンギング
5 dB	$30^\circ$	多少のリンギング
7 dB	$45^\circ$	応答時間が短い
10 dB	$60^\circ$	一般的に適切な値
12 dB	$72^\circ$	周波数特性にピークが出ない

