

SPICE

実用電子回路講座

第5回 負帰還の落とし穴「異常発振」

遠坂 俊昭
Toshiaki Enzaka

負帰還は、OPアンプなどの増幅素子の出力信号を、抵抗などで構成されたβ回路を介して入力に戻すだけの簡単なテクニックです。しかし**負帰還を不用意に利用すると、「異常発振」というあってはならない症状に見舞われます。**

写真5-1に示すのは、NJM5534を使ってゲイン10倍の増幅器を作り、負荷に4700 pFのコンデンサを接続したときの出力波形です。10 kHzの入力信号のほかに、約1.4 MHzの異常発振波形が重畳しています。この例では発振が持続していますが、不規則に断続することもあります。

今回は、異常発振しない増幅器を作るためにどうしたらよいかを解説します。

● 発振が起きるとどんな症状が出る？

OPアンプ増幅器の出力に長いケーブルを接続したりすると、とたんに異常発振に見舞われることがあります。異常発振が起きると、次のような症状が現れます。

- 入力信号がないのに出力に信号が現れる
- 入力信号とまったく異なる周波数成分が出力に現れる
- 出力信号レベルが、あるレベルから突然大きなレベルに急変する
- 少しの負荷変動で出力レベルが大きく変動する

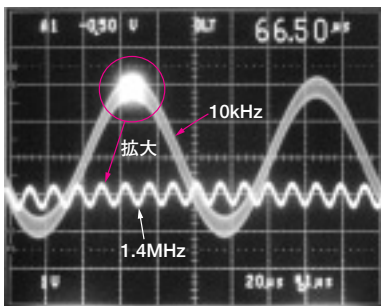


写真5-1 異常発振しているOPアンプ増幅器の出力波形 (1 V/div., Ach : 20 μs/div., Bch : 1 μs/div.)

異常発振は大きく分けると2種類あります。一つは、今回説明する負帰還ループによるもの、もう一つはパラスティック発振と呼ばれるものです。負帰還ループによる発振は、比較的低い周波数です。パラスティック発振は100 MHz前後の高い周波数で、広帯域オシロスコープでないと観測できないこともあります。

負帰還の落とし穴

● OPアンプ自体のゲインと負帰還増幅器の入出力ゲインの関係

トランジスタは、信号の振幅を増幅してくれる便利な素子です。しかし負帰還をかけていないトランジスタ単体のゲインは、扱う信号の大きさや周囲温度によってつねに変化してしまいます。ですから、ひずみのない信号を入力しても、トランジスタによって増幅されて出力される信号はひずんでしまいます。これは、負帰還をかけていないOPアンプでも同じことがいえます (OPアンプはゲインが大きすぎて負帰還なしでは使えない)。

では、信号の振幅や温度が変動しても、ゲインが一定の低ひずみの増幅器を作るにはどうしたらよいのでしょうか？増幅器のゲインが安定していなければ、実用に供することはできません。

ここで、図5-1に示す負帰還をかけたOPアンプ増幅回路の入力信号と出力信号の比、つまりクロズド・ループ・ゲインとOPアンプ単体のゲイン (オープン・ループ・ゲインまたは裸ゲインともいう) の関係を数式を使って考えてみます。図5-1に示すように、負帰還増幅器の出力は、β回路を通して入力に戻します。通常増幅器では、β回路のゲインは1よりも小さく、抵抗で構成されています。図5-1の回路からOPアンプの入力間の電圧 v_D を求めると、

$$v_D = v_{in} - \beta v_{out} \dots\dots\dots(5-1)$$

またOPアンプの裸ゲインが A_O のので、

$$v_{out} = A_O v_D \dots\dots\dots(5-2)$$

式(5-1)を式(5-2)に代入して v_{out} について解くと、

$$V_{out} = \frac{A_0}{1 + A_0\beta} V_{in} \dots\dots\dots(5-3)$$

OPアンプの裸ゲイン A_0 がとても大きく、 $A_0\beta \gg 1$ ならば、

$$V_{out} \approx V_{in}/\beta \dots\dots\dots(5-4)$$

になり、OPアンプの裸ゲイン A_0 が消えて、 β 回路の抵抗値だけが残ります。実際のOPアンプの A_0 は、100 dB (= 10^5 倍) 程度もあり、 $A_0\beta \gg 1$ という仮定はたいていのOPアンプ回路において成立します。

式(5-4)は、**負帰還をかけることによって、入力信号と出力信号の比、つまり増幅器のゲインがOPアンプ単体のゲイン(裸ゲイン)に依存しなくなり、抵抗の比で決まるようになる**ことを意味しています。

抵抗などのパッシブ素子は、トランジスタなどのアクティブ素子に比べてきわめて安定で、信号レベルや周囲温度が変化しても値はほとんど変化しません。つまり負帰還を施した増幅器のクローズド・ループ・ゲインは、とても安定しています。ただし、負帰還をかけることによって、OPアンプの裸ゲイン A_0 は $1/\beta$ に低減します。

● 負帰還をかけるとゲインが ∞ になる!?

▶ 「ゲイン」と聞いたら位相まわりも忘れずに

ここで重要なことを言っておかなければなりません。上記は「OPアンプ自体の入力信号と出力信号の位相が一致している」という条件が満たされている場合に限った話です。残念ながら実際のOPアンプでは、この条件が常に満たされるわけではありません。**扱う信号の周波数によって、入力信号に対する出力信号の位相が変化する**のです。

負帰還をかけると、ゲインが小さくなる代わりに、ゲインの安定性が得られると説明しました。ところが**増幅器のゲインと位相の周波数特性によっては、そのゲインがなんと ∞ 倍にまで増大することがあります**。これが、OPアンプの位相遅れによる異常発振につながります。

式(5-3)を図に示すと、**図5-2**のようになります。負帰還を施さないOPアンプ単体のゲイン (A_0) は、

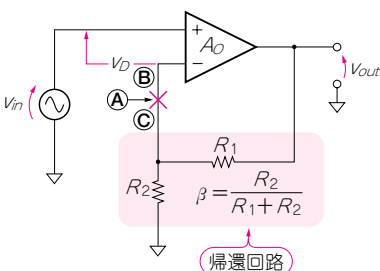


図5-1 負帰還増幅器を構成する回路各部のゲインの関係を式で表す

負帰還を施すと減少します。

この二つのゲインは、振幅の比と位相の比という二つの要素で表されます。どちらか一方だけを考えてはいけません。位相と振幅という二つの要素を一つの数値で表すためには、複素数を使う必要があります。これは β も同様です。

▶ $A_0\beta = -1$ のとき発振する

$A_0\beta$ (還送比またはループ・ゲインと呼ぶ) も複素数ですから、ある周波数で負になることがあります。例えばある周波数 f_0 で $A_0\beta = -1$ のとき、式(5-3)の分母は0になり、ゲインは無限大になります。 f_0 でゲインが無限大の増幅器は、わずかな雑音の f_0 成分を過大に増幅し、電源電圧まで、あるいはスルー・レートで制限される値にまで増幅されます。これが負帰還回路で発生するトラブル「異常発振」のメカニズムです。

後で説明しますが、式(5-3)の分母は0でなくても、 $A_0\beta > 1$ で**位相遅れが 180° 以上になると発振**します。

● $A_0\beta = -1$ の意味

$A_0\beta$ は、**図5-1**の点(A)を切り離れた回路において、点(B)からOPアンプを経由し点(C)に戻ってくるまでのゲインです。**図5-2**ではおよそ A_0 と A_C の比に相当します。 $R_1 = 9\text{ k}\Omega$ 、 $R_2 = 1\text{ k}\Omega$ と仮定すると $\beta = 0.1$ です。 $A_0 = 10$ 倍になる周波数で、 $|A_0\beta| = 1$ となります。同様に $\beta = 0.01$ ならば、 $A_0 = 100$ 倍のとき、 $|A_0\beta| = 1$ です。

$A_0\beta = -1$ とは、**図5-2**において点(B)から点(C)までのゲインが1で、位相が 180° 遅れているまたは進んでいることを意味しています。したがって、負帰還増幅器が発振するのは、 $|A_0\beta| = 1$ のときに位相がちょうど 180° 遅れる、または進むときです。

● $A_0\beta$ を図にプロットして発振の可能性を判定する

位相比と振幅比という二つの要素をもつ複素数 $A_0\beta$ (ループ・ゲイン) は、X軸が実軸、Y軸が虚軸の**図5-3**のような平面上に一度に表すことができます。

$A_0\beta$ は周波数の関数なので、周波数の変化とともに

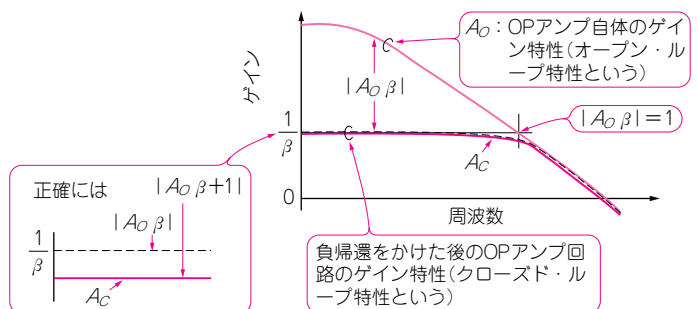


図5-2 負帰還をかける前後のゲイン特性の変化