



⑤ リニア・レギュレータを
安定に動作させる
～出力端子に付けるコンデンサが鍵を握る～
馬場 清太郎
Seitaro Baba

直流定電圧電源の目的は、負荷となる電子回路に安定な直流電圧を供給することです。リニア・レギュレータICの場合、出力に付加するコンデンサによっては発振して不安定になる場合があります。ここでは、どのような場合に発振するのか、なぜ発振するのか、どうすれば安定な直流電圧を出力できるのかを実験しながら考察します。

レギュレータが発振するメカニズム

● 位相の回りすぎた信号が入力に戻ることで発振する
シリーズ・レギュレータは図5-1の簡略化等価回路で示されるように、負帰還によってゲインを適切に設定したパワーOPアンプと、基準電圧 V_{ref} で構成されています。発振の原因は一般の増幅回路と同じですが、出力に付加される大きな容量 C_{out} について考慮する必要があります。

増幅回路の発振原因は、ループ・ゲイン(loop gain)と呼ぶ負帰還回路を一巡したゲインの周波数特性で考察します。増幅回路の発振は交流で起きますから、直流基準電圧 V_{ref} は交流では短絡されていると考えます。

図5-1(a)で、A - A_{α} 間を切り離し、 A_{α} 点に出力信号 V_{out} の代わりに $V_{out\alpha}$ を与えて、ループ・ゲイン $A\beta$ を計算します。図5-1(c)で示すように、帰還ループを一巡した出力信号 V_{out} が、元の信号 $V_{out\alpha}$ とレベルが等しく位相が同じときに増幅回路は発振します。元の信号は帰還回路で分圧され、増幅回路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° 回っているはずですが、

ところが、出力信号の位相がさらに 180° 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。そのとき帰還回路を切り離して外部から $V_{out\alpha}$ 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 $V_{out\alpha}$ を注入しなくても V_{out} は出力され続けます。これが発振です。

図5-1(d)の式では、

$$A\beta = -1 \dots\dots\dots (5-3)$$

となります。式(5-3)は、ループ・ゲインの大きさ $|A\beta|$ が $1 (= 0 \text{ dB})$ で、位相が -180° 回転したときに発振することを意味しています。

● 位相が 180° 回っても $|A\beta| < 1$ なら発振しない

負帰還とは、 $A\beta$ の位相の回転が -180° よりも小さいときの動作モードのことです。位相が -180° 回っているときの動作モードは負帰還ではなく、正帰還と呼ばれます。

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、オーバーシュートやリングングなどにより一時的に出力は乱れますが、発振状態にはなりません。

位相が -180° 回って、 $|A\beta| = 1$ になると増幅回路は発振します。

$|A\beta| > 1$ の場合、増幅回路内部では、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。

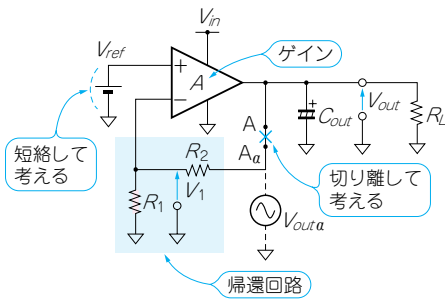
● 位相余裕とゲイン余裕という発振に対する評価基準

増幅回路が発振条件に対してどのくらいの余裕をもっているかを判断するには、ボデー線図と呼ぶループ・ゲインの周波数特性のグラフを見ます。図5-2のボデー線図で示すように発振に対する余裕は、ゲイン余裕と位相余裕で判断します。

ゲイン余裕は、位相 $\angle A\beta$ が -180° 回っている周波数において、ループ・ゲイン $|A\beta|$ が 0 dB (1倍) よりもどのくらい負になっているかを見ます。この負

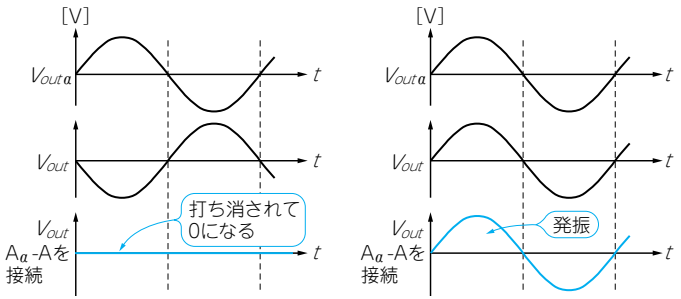
Keywords

発振条件, ループ・ゲイン, 位相余裕, ゲイン余裕, 位相補償, リプル・フィルタ, ボデー線図, ポール, ゼロ, 段違い特性, NJM7805, NJM7905, NJM2396F05, NJM2885DL1-05, TK70008S



(a) シリーズ・レギュレータの等価回路

図5-1 シリーズ・レギュレータの発振条件



(b) 正常なとき

(c) $A\beta = -1$ のとき

表5-1 ゲイン余裕/位相余裕とステップ応答

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

$$\text{帰還率} : \beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \dots (5-1)$$

$$V_1 = \beta V_{out}$$

$$V_{out} = AV_1 = A\beta V_{out}$$

よって、一巡ループ・ゲインは、

$$\frac{V_{out}}{V_{out}} = A\beta \dots (5-2)$$

発振しているときは、 $V_{out} = V_{out}$ から

$$A\beta = -1 \dots (5-3)$$

つまり、

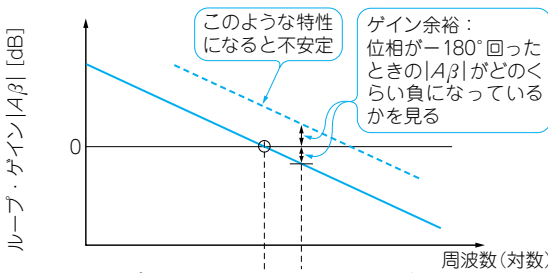
$$|A\beta| = 1 \dots (5-4)$$

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

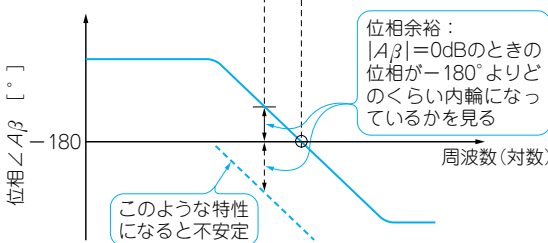
(d) 発振の条件

の値をゲイン余裕と言います。

位相余裕は、ループ・ゲイン $|A\beta|$ が 0 dB になる周波数において、位相 $\angle A\beta$ が -180° よりもどのくらい内輪になっているかを見ます。この位相と -180° との差を位相余裕と言います。



(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

図5-2 ゲイン余裕と位相余裕

増幅回路の発振に対する安定度は、ボーデ線図でゲイン余裕と位相余裕を見て判断する。電源回路では、ゲイン余裕で 7 dB かつ位相余裕で 45° を目安にするのが一般的である

表5-1に、ステップ信号を入力したときのゲイン余裕/位相余裕と出力応答との関係を示します。一般のOPアンプ回路では位相余裕は 60° を目安にしていますが、電源回路では応答時間を重視しますから 45° を目安にします。

● 発振を起こさせないための手法…位相補償

発振させないために、位相余裕とゲイン余裕を増加させる手法を**位相補償**と言います。詳しくは以降の連載中に述べますが、不要なゲインを削るためのポールを与えることで、元の下降特性 -6 dB/oct. に加えて -12 dB/oct. とします。さらに、ループ・ゲインが 0 dB になる周波数 f_T 近傍で位相余裕を確保するために、ゼロを与えて -6 dB/oct. の下降特性に戻すのが一般的です。

レギュレータ IC の位相補償は内部で行われていますから、発振する場合は、出力コンデンサで対策する以外ありません。

● 出力コンデンサが発振に対する余裕に影響する

レギュレータ IC には、出力電圧変動を低減するため出力に大きな容量 C_{out} が付加されます。レギュレータ IC の出力抵抗 R_{out} とコンデンサの等価直列抵抗 (Equivalent Series Resistance ; ESR) R_C を含めた出力コンデンサ部分の周波数特性は段違い特性で、図5-3のようになります。出力コンデンサに大きな ESR があれば、高域で位相は元に戻って 0° になりま