

第3章

制御を知る

電源は、出力電圧を一定に保つという制御回路です。ここでは、制御とはどういうものなのか、また制御の基礎知識について述べます。

3-1 電源って制御だったんだねえ

電源回路は制御回路である。まともに電源を設計したことのある方は、「確かにそりゃそうだ」とうなずくでしょう。ですけど、私は、「電源を勉強すると、本当に制御のことがよく分かるぞ」という話を聞いて、「はぁ？」なんてすっとぼけた顔をしてしまった記憶があります。電源が制御回路であることなんて意識したことなかったものですから、「電源と制御ってどうつながるんだ？」なんて思ったのです。いま思えば赤面ものですが、当時電源といえば三端子レギュレーターを使ったものしか頭に浮かばなかったものだから無理からぬ話し。

そんな私に突然DCDCコンバータを設計しろというお達しが来ました。ひいこら電源の本やデータブックを見ながら、やっとこさ組み上げた電源は見事に発振。こんな、ひいこら回路をくみ上げるような奴が、発振の原因なんて判るはずがありません。とりあえず、電源に詳しい人に原因を聞いてみたとき、はじめて電源が制御回路であることを実感しました。ではではの制御工学の専門用語。制御工学の勉強なんてほとんどしたことのない私にはちんぷんかんぷん。「こいつはたまらん！」ってんで、できるだけやさしい制御工学の専門書を探してきて付け焼き刃の知識をつけて一言、

「ふっふっふ……電源って制御だったんだねえ」

3-2 電源のどの辺りが制御なのか

電源、とりあえずここでは出力電圧を一定に保つ定電圧源を電源と呼ぶことにしますが、この電源、出力電流が変化しようとして、また入力電圧が変化しようとして出力電圧は常に一定電圧を保つような仕組みとなっており、これぞまさしく制御なわけです。多くの定電圧電源は、出力電圧を監視し、出力電圧が高くなろうとすれば下げる方向に、逆に出力電圧が下がるとうすれば高くする方向に制御が働くような仕組みとなっております。

3-3 理論は難しそうだが

制御なんてのは、周りを見渡せばいくらかでも見つけることができます。暗くなると明かりが灯る街灯、時間がくると電源が入ったり切れたりする電気製品など。そうそう、制御装置の見学ということで、ビール工場にいった(というか連れていかれた)ことがありますが、結構な装置が並んでいて驚かされたもんです。何でも、ビール生成に必要な工程を自動でやるための制御ということで、原材料の流量制御から箱詰めに至るまでの制御装置を見させていただきました。装置がやっている内容の説明は忘れてしまいましたが、見学の後の、できたてビールがこんなにうまいもんだったのかということはいっしょに覚えています。ビールがあまり好きでない私がこうですから、ビール好きの人にはたまらなかつたんだらうなあ。

制御といえば、学生の時分、実験項目の中に温度制御というものがあって、随分苦労した思い出があります。内容は、水

の温度を50 から80 にするというものでした。人間が温度計を見ながら火加減を調節するのなら簡単なのですが、こいつを制御回路でやらせることにより、制御とはいかなるものかを知るのが目的、と実験指導書に書かれておりました。で、制御理論と実験方法が実験書に書いてあるのですが、そこにはなんだか分からない複雑な数式の大群。わけも分からないまま実験を行い、なんだかよくわからないまま得られたパラメーターを温度制御装置とやらに与え、ほんとに温度制御ができるかを確認して……てなくあいで実験を行ったわけですから、実験目的である制御の理解など到底達成できませんでした。でも一応レポートは受けとってもらえたわけで、参考資料となった先輩方のレポートにおおいに感謝しております。

さて、こんな私がおそまつながらも制御理論を理解しはじめたのは、電源を設計するようになってからでした。そして、制御のことが分かるようになると、他にいろいろな応用が効くようになり、設計レパトリーの幅がいきなり広がりました。

長いまえおきはこれぐらいにしておいて、いよいよ知っておきたい制御の基礎理論について述べることにいたします。

3-4 プログラム制御とフィードバック制御

水の流れ、電気の明るさ、部屋の温度、これらを目的の値になるようにする、または、機械をある決った順序(プログラム)にしたがって動作させること、これが制御です。

制御は大きく二つに分けることができます。例えば、部屋の温度を変えることを考えてみましょう。

いまは真夏。とある企業、定時の午後5時15分を過ぎるやいなや、びたり! と冷房がきれる。これは、この時間になったら冷房がきれるようプログラムされているためです。冷房がきれると暑いってんで、その部署専用に用意してある(こういう部署は非常に幸運である)冷房の電源を入れる。ちょっと(かなり)古い型の冷房だと温度調節なんて無いもんだから、ちょうどいい温度になるように、スイッチを入れたり切ったりする。

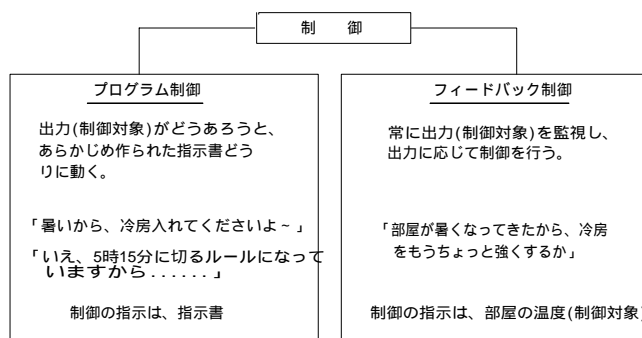
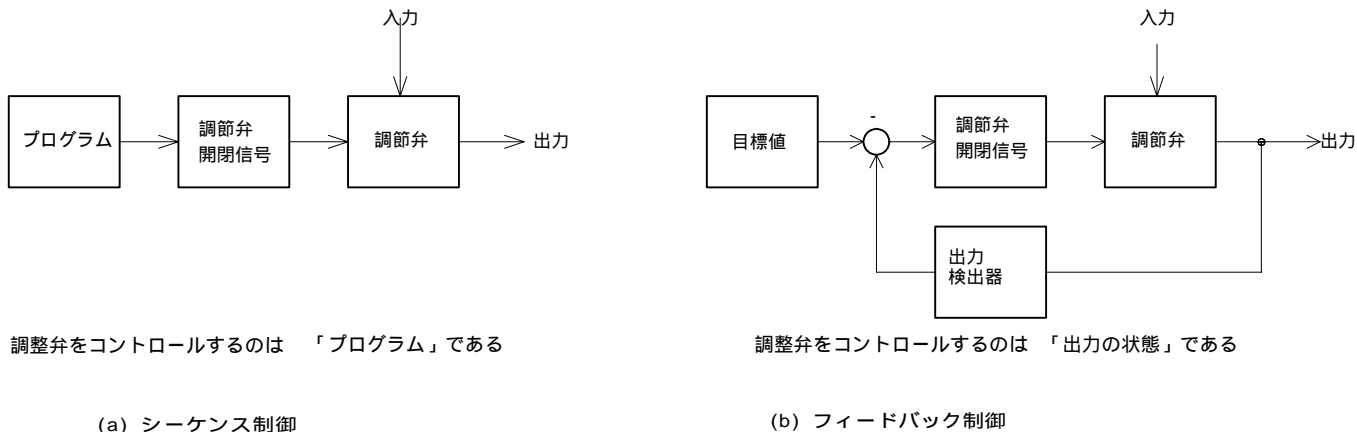


図3-1 制御の種類



調整弁をコントロールするのは 「プログラム」である

調整弁をコントロールするのは 「出力の状態」である

(a) シーケンス制御

(b) フィードバック制御

図3-2 シーケンス制御とフィードバック制御

「時間がくると無差別に冷房がきれる」、「ある一定の温度になるようスイッチを開閉する」とどちらも制御になりますが、それぞれ性格の違う制御です。時間がくると冷房がきれるというような、あるプログラムに沿って動作させる制御を、「シーケンス制御」といい、温度を監視して、それに応じて冷房を入れたり切ったりするような制御を「フィードバック制御」といいます。制御を大きく分けるとこの二つに分類できるのです。

シーケンス制御、フィードバック制御をブロック図で表わすと図1-2のようになります。この二つの制御の大きな違いは、「調整弁を開閉する信号は何か」です。シーケンスは、あらかじめ与えられたプログラム通りに動作が進むものであり、フィードバック制御は常に出力を見て、それに応じて動作を進めるのです。フィードバック制御のブロック線図を見ると、ループを形成しており、これを閉回路といいます。また、シーケンス制御のようにループを形成してないものを開回路といいます。

電源は制御だ！なんて言ったからには、電源はこのどちらかの制御に入る訳です。電源における制御は、フィードバック制御に入ります。ですから、このフィードバック制御についてもうちょっと詳しく述べることにしましょう。

3-5 正帰還と負帰還

フィードバックには、正帰還(PFB:PositiveFeedBack)と負帰還(NFB:NegativeFeed Back)の二つがありますが、制御に使うフィードバックは負帰還の方です。正帰還と負帰還の違いは、出力変化に応じて、弁をどう調節するかです。正帰還は出力変化を増長する方向に、負帰還は出力変化を抑える方向に帰還がかかります(出力の変化を入力に戻している状態にあることを、帰還がかかるという)。正帰還、負帰還を一般化し

たブロック線図で書くと、図3-3のようになります。

ブロック線図では、全体を一つ一つ目的ごとに要素分解して表現します。こうして表された一つ一つの系を要素、もしくは系といいます。また、二つの信号を合成する働きを持つものを、加算点といい、図3-3の「+」がそれです。加算点という名はついているものの、実際は、「足すという動作」も「引くという動作」も加算点と呼んでいます。ですから、足す動作をする加算点は「+」印を、引く動作をする加算点は「-」印を加算点に付けます。図3-3(b)では、入力と要素2の出力の差を要素1へ与えています。

いま、各要素を通過する信号の位相が変わらない(すなわち、各要素の入力を大きくすれば要素出力も大きくなり、小さくすれば出力も小さくなるということ)ものとすれば、加算点の足すか引くかの動作により二つの制御ループを考えることができます。

- 1)加算点において、入力とフィードバック信号を足す。
 入力と同相の信号を加算点で加えている状態です。このようなフィードバックを正帰還といいます。出力に変化があればそれを増長する方向にフィードバックがかかります。例えば出力が増加したらフィードバック信号も増加、要素1の入力も増加し、出力が更に増加というループができてしまい、要素1が出せる最大まで出力が上昇します。このように正帰還は出力が最大にへばりついてしまい、制御には使えません。
- 2)加算点において、入力からフィードバック信号を引く
 図3-3(b)のように、加算点において出力と同相の信号を引いてあげます。このように帰還をかけると、出力に変化があればそれを抑える方向に制御が働きます。例えば図3-3(b)において、出力が低下したとします。すると

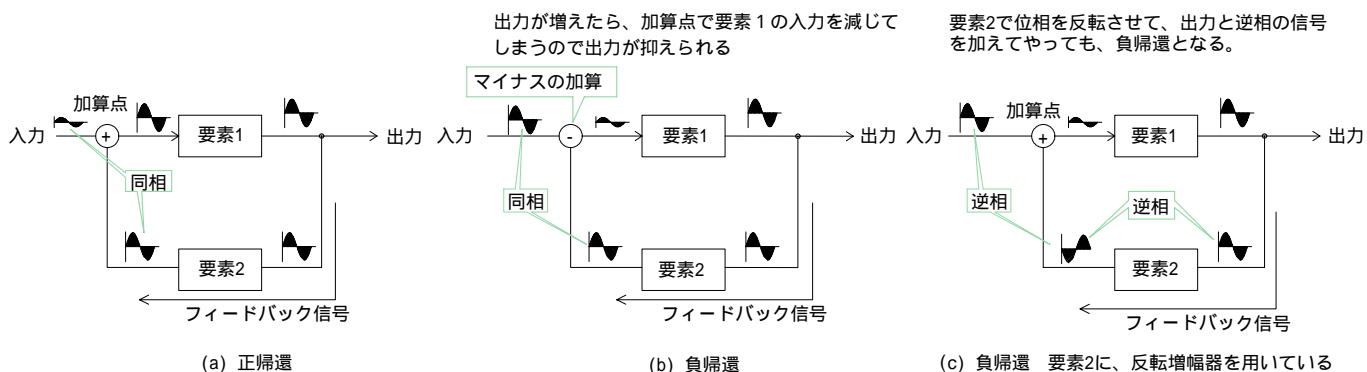


図3-3 一般化したフィードバックのブロック線図

フィードバック信号が低下しますから、加算点の出力は増加し、結果として要素2の出力低下を抑えてくれます。ですから、制御にはこの負帰還が使われるのです。このように動作するような帰還を負帰還といいます。

なお、図3-3(c)のように加算点は「+」のままでも、その前の要素2を反転増幅器などを用いて位相を180°反転(図3-4)させてあげれば、制御全体は負帰還となります(位相を180°ずらすということは、波形の上下をひっくりかえすということ。こうすれば、増大が減少に転じる)。

3-6 フィードバック制御を電源に応用すると

さて、電源においてこの負帰還という制御回路はどのように実現されているのでしょうか。電源回路におけるブロック線図を図3-5に示します。いきなり誤差増幅器とかでてきましたが、後でちゃんと説明しますから御安心ください。リニアレギュレーターであろうが、スイッチングレギュレーターであろうが、基本はこの形です。

図3-3(b)と図3-5を見比べると、入力基準電圧、加算点は誤差増幅器、出力は安定化回路の出力となっていることがわかるでしょうか。では各要素についてもう少し詳しく見てみることにしましょう。

1) 基準電圧発生

出力に応じて調整弁を調整するといったって、基準がなければいったい出力がどのくらい変化しているのかわかることはできません。電源では、この基準電圧に対して出力がどの程度変化しているのかを検出し、出力が基準電圧と違っていたら調整弁を調整して出力電圧を基準電圧にするように動作します。そこで、精度のいい基準電圧が必要となるのです。制御において精度のよい基準電圧が必要だというのなら、いちいち制御回路なんぞ組まずに最初からこの基準電圧を電源出力にすればいいじゃないかという話も出そうですが、ここに使われる基準電源は出力電流があまり取り出せないのが普通です。

制御における入出力を考えた場合は、この基準電圧を「制御の入力」と考えます。この制御は、入力電圧 V_i がいくらであろうと出力電圧は基準電圧 V_{REF} になるよう制御が働くわけですから、基準電圧 V_{REF} に対し出力電圧 V_0 がいくらになったかが重要なわけです。ですから、 V_{REF} を入力、 V_0 を出力と見ます。 V_i がいくらであろうと、 V_0 は V_{REF} となるよう制御が働くわけですから、入力電圧 V_i という値

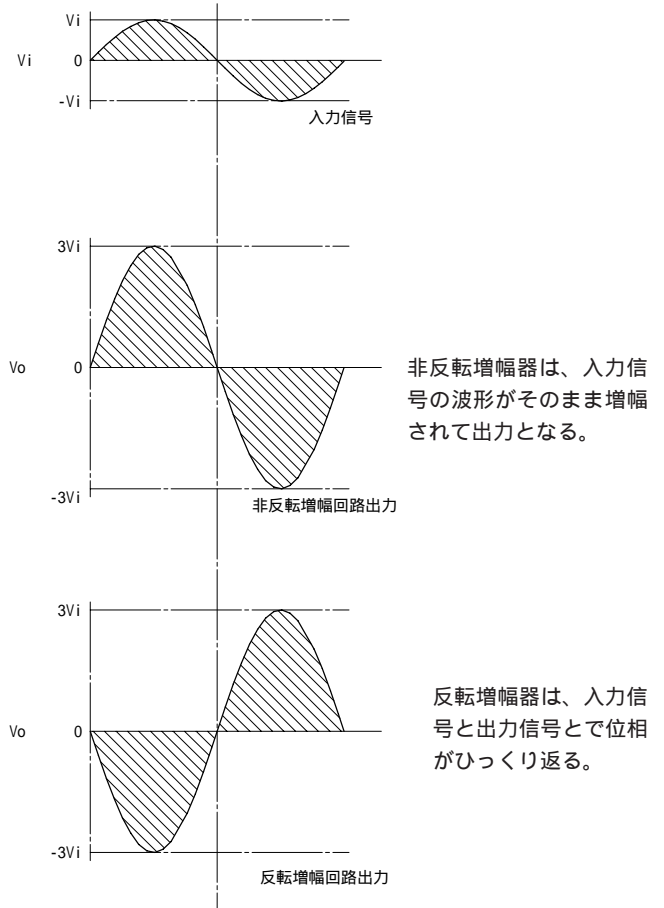


図3-4 反転増幅と非反転増幅

は制御においてあまり重要性はありません。

2) 誤差増幅器

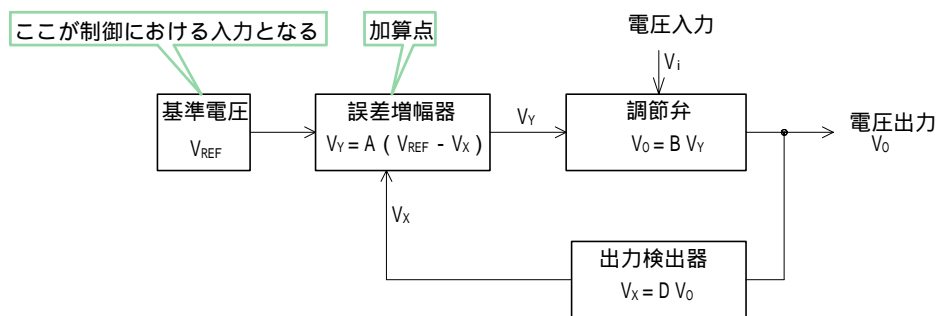
加算点にあたります。基準信号 V_{REF} と出力検出回路の出力 V_X の差をとり、それを増幅度 A にて増幅して出力します。式で表すと、この要素の入出力関係は

$$V_Y = A(V_{REF} - V_X) \quad (3-1)$$

となります。

3) 調整弁

出力に出す電圧を調整するところです。たとえば調整弁の調整電圧である V_Y が1Vの場合は調整弁出力 $V_0=5V$ 、 V_Y が2Vの時は $V_0=10V$ というように、 V_Y に応じて出力電圧を出



制御は、基準電圧に対し出力はどうなるか ということなので

入力 = 基準電圧 V_{REF}
出力 = 電圧出力 V_0

図3-4 安定化回路に制御を応用するとこうなる

します。式で表すと

$$V_O = B V_Y \quad (3-2)$$

となります。ここでBは弁の調整感度といえます。

さて、「 V_Y に応じて V_O が決まるのだったら、5Vの安定化電源を作りたければ $V_Y=1V$ を与えておけばそれで終わりじゃないか」と思われるかもしれませんが、この調整弁、実際には $V_Y=1V$ のときに必ず5Vになってはくれず、調整弁を流れる電流により4Vになったり6Vになったりと必ずしも正確な出力電圧はだせません。つまり、おおよその値でしかないのです。これは、調整感度であるBが、電流などにより変動してしまうということ意味しています。

3)出力検出

基準電圧を必ずしも出力電圧と等しい電圧に選ぶ必要はありません。例えば、出力電圧が5V、基準電圧が2.5Vなら、出力電圧を半分にして基準電圧と比較をすればいいのです。出力電圧を半分にするのは、単純な抵抗による分圧回路で実現できます。やる回路(分圧器)を入れてやるのです。分圧器はただ電圧を半分にするだけで、分圧器の入出力間でちゃんと線形性が保たれていますから、制御において何ら問題は起きません。このように出力を(線形性を保ったまま)基準電圧に変換してやる回路を、出力検出、とここでは呼ぶことにします。出力検出の出力電圧を V_X とすれば、

$$V_X = C V_O \quad (3-3)$$

と表せます。先の例では、 $C=0.5$ になります。

4)電圧入力

出力を作り出すためのもと(原材料)である電気を入力するところです。整流直後のあまりきれいでない電気とか、負荷電流により電圧が動いてしまうような電源の出力が、安定化した電源を作る原材料となります。制御における入力・出力を考えた場合、この端子は入力とは考えません。

この制御の重要な点は、出力を監視し、出力変化に応じて調整弁を調整するというループを形成していることです。まずは簡単に制御動作を見てみることにしましょう。出力電圧が下がった場合を考えてみます。すると出力電圧検出回路出力 V_X の電圧も下がります。誤差増幅器では式(3-1)のとおり、 $V_{REF}-V_X$ にAを乗じた出力電圧が得られますから、もし V_X が下がれば誤差増幅器出力、すなわち調整弁入力 V_B が大きくなり、出力電圧が下がるのを抑えます。仮に出力電圧が上昇しようとした場合は、出力電圧を抑えるように制御が働きます。こうして、出力電圧がある決まった値に定まり、上がることも下がることもできない、すなわち安定した電圧が得られるというわけです。

では、もう少し詳しくこの制御を見てみましょう。ここからは数式を用いて、AやBやCの値が出力電圧 V_O に及ぼす影響というものを見てみることにします。

出力電圧 V_O は、式(3-2)より

$$V_O = B V_Y$$

ここに V_Y は誤差増幅器の出力ですから式(3-1)を代入して

$$V_O = BA(V_{REF} - V_X) \quad (3-4)$$

さらに、出力検出器出力 V_X は式(3-3)で表されますから、この式を代入してあげると

$$V_O = BA(V_{REF} - C V_O) \quad (3-5)$$

となります。この式を $V_O =$ の式に直しましょう

$$\begin{aligned} V_O &= B A V_{REF} - B A C V_O \\ V_O + B A C V_O &= B A V_{REF} \\ V_O(1 + B A C) &= B A V_{REF} \end{aligned}$$

$$V_O = \frac{B A V_{REF}}{1 + B A C} \quad (3-6)$$

となりました。ここに、

BA: オープンループゲイン

フィードバックである出力検出器を取っ払ったばあい、出力電圧は、入力電圧 V_{REF} に誤差増幅器の増幅度Aと、弁の調整感度Bを掛け合わせたという単純な増幅回路出力で表されます。

$$V_O = B A V_{REF}$$

つまり、フィードバックのない場合の入力に対する出力のゲインを表しています。

BAC: ループゲイン

出力からぐるりと一周してどのくらいのゲインかを表します。つまり、出力検出回路利得C × 誤差増幅器利得A × 弁調整感度Bというわけです。

BA/(1+BAC): クローズドループゲイン

制御が働いているとき、基準電圧を入力として出力電圧はどうなるかを表します。つまり V_{REF} に対する出力電圧は

$$V_O = \frac{B A}{1 + B A C} V_{REF}$$

と表せます。

さて、ちょっと前に調整弁の感度Bは変動しやすいといいました。もしここでAが非常に大きければ、たとえBが変動しても出力電圧は V_{REF} とCで決まってくれます。式で表すと

$$\lim_{A \rightarrow \infty} V_O = \lim_{A \rightarrow \infty} \frac{V_{REF}}{\frac{1}{BA} + C} = \frac{V_{REF}}{C} \quad (3-7)$$

となります。つまりループゲインが大きければ大きいほど、出力電圧は他の影響を受けず V_{REF} とCでのみ決まってくれます。

なお、この回路の制御方式は、比例制御と呼ばれる部類のもので、式(3-7)からわかるように、Aが無限大に大きくなることは現実的でないため、 $V_O = V_{REF}$ とはならず必ず誤差が残ります。この誤差を定常偏差といい、比例制御は必ず定常偏差を持ってしまうという欠点を持ちます。この定常偏差は増幅器の利得を大きくすれば少なくすることができます。なお、制御には、比例制御のほかに積分動作の制御というものもあり、その違いは、弁をどう開閉するかです。図3-6に比例動作と積分動作の違いを掲げます。

こうして、制御を電源に応用した結論として以下のことが言えます。

- 1) 制御の中には増幅器が必要であり、その利得が大きいほど外乱に影響されず基準値に近くなる。すなわち、出力の精度が高くなる。
- 2) どんなに利得を大きくしても、出力電圧は完全に基準電圧で求まる値に等しくならない。
- 3) 増幅器の利得が減ると、出力電圧が基準電圧より小さくなってしまふ。

ちょっと難しい話になりましたが、ようは、電源には誤差増幅器と基準電圧が必要であり、誤差増幅器の利得が高いほうが基準電圧に近い値を出力に出せるということを頭においておいてください。

3-7 正帰還と発振

フィードバック制御が負帰還でちゃんと動作していればよいのですが、実際にはさまざまな理由により負帰還が正帰還になってしまう場合があります。どうして負帰還が正帰還になってしまうのか、詳しいことは後で述べるとして、ここでは正帰還になってしまった場合、どうなるのかを見ていくことにしましょう。

ちょっとまえに正帰還についてかるく述べましたが、覚えているでしょうか(1-4負帰還と正帰還のところです)。あのときは、出力は各要素の出せる最大電圧に張り付いてしまふと述べました。あれは、直流において正帰還になった場合を示しています。では、もうちょっと話を進めて、直流では正帰還にはならず、ある周波数 f において正帰還になってしまう場合を考えてみましょう。たとえばこの f が1kHzであったとします。

1kHzでのみ正帰還となる回路では、出力において1kHzの振動波形が見られます。これは、1kHzの周波数信号がちょろっとでも入ると、その信号が入力に戻り、さらに増幅され出力され、そしてその出力がまた入力に戻りさらに増幅され.....という動作をするため、その結果、要素が出力できる最大電圧で発振するというわけです。

1kHz以外の周波数、たとえば直流は正帰還になっておらず負帰還のままですから、出力が最大出力にへばりつくようなことはありませんし、1kHz以外の周波数でも同様に、正帰還になっていませんからその周波数信号がどんどん増大していくことはありません。

このようにある周波数において正帰還となるという制御系は、その周波数で発振してしまうのです。ただもうひとつ付け加えますと、ループ利得が1以上でないと発振しません。いくら出力が同相で入力に戻っても、増幅されなければ、やがてその信号は減衰してしまいます。

以上をまとめると、

ある周波数で位相が 180° 回り、なおかつその周波数のループゲインが1以上あれば、制御系はその周波数で発振してしまう

ということです。

実際のところ、すべての要素は周波数特性や遅延特性を持っているため、ある周波数で位相が 180° 回ってしまつて発振、ということをおかかなければなりません。では、この要素の周波数特性だとか遅延特性だとか、制御にどう影響するのかをみてみることにしましょう。

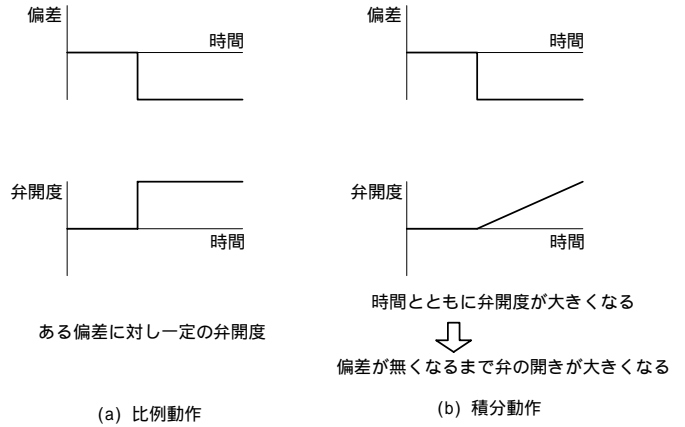


図3-6 比例制御と積分制御

3-8 ループゲイン、そして遅延特性と位相について

まずは利得について考えてみます。通常、制御の各要素は周波数が高くなると利得が落ちます。これは外乱の周波数が高くなるとループゲインがさがり、制御が効かなくなるとことを示しております。電源で言えば、入力電圧変動の周波数が高いと、制御がきかなくなり、その入力変動がそのまま出力電圧に現れてしまうということです。また、出力電流変動が早い周波数で起こった場合にも出力電圧は安定しなくなります。入力にしろ出力にしろ早い周波数の変動でも出力電圧を一定に保つためには、その周波数まで各要素、というか制御系全体で、その周波数まで利得を持たなければなりません。電源の場合は、だいたい数kHzから数十kHzまで利得を持たせるようにし、それ以上の周波数ののが外乱に対してはフィルタにて抑えるようにします。次に、位相特性についてみてみましょう。

出力を安定させるのに、フィードバック制御では、出力の変化を相殺する方向に出力調整回路が作用するよう制御が働きました。ところが実際は、出力が外乱により変化したときから調整回路に作用するまでの信号の流れに、時間的なおくれが生じます。このような、信号の時間的な遅れを遅延といいいます。たとえば図3-7のような入出力波形の場合、その要素による遅延時間は2usであるといいいます。この遅延があるということは、入力信号と出力信号の間に位相ずれを生じさせることとなります。一般的にこの遅延は、あまり周波数に依存しません。入力が1kHzであろうと、100kHzであろうと、入力に対し2usという一定値の時間おくれるということです。これは、図3-8が示すように周波数が高くなるに従いどんどん位相ずれが発生するということとなります。そして、つい

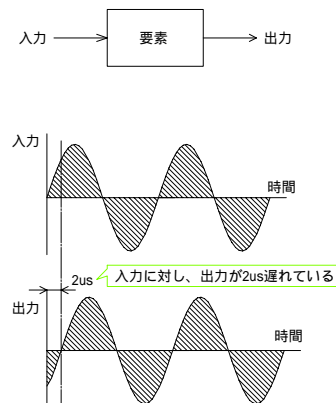


図3-7 遅延

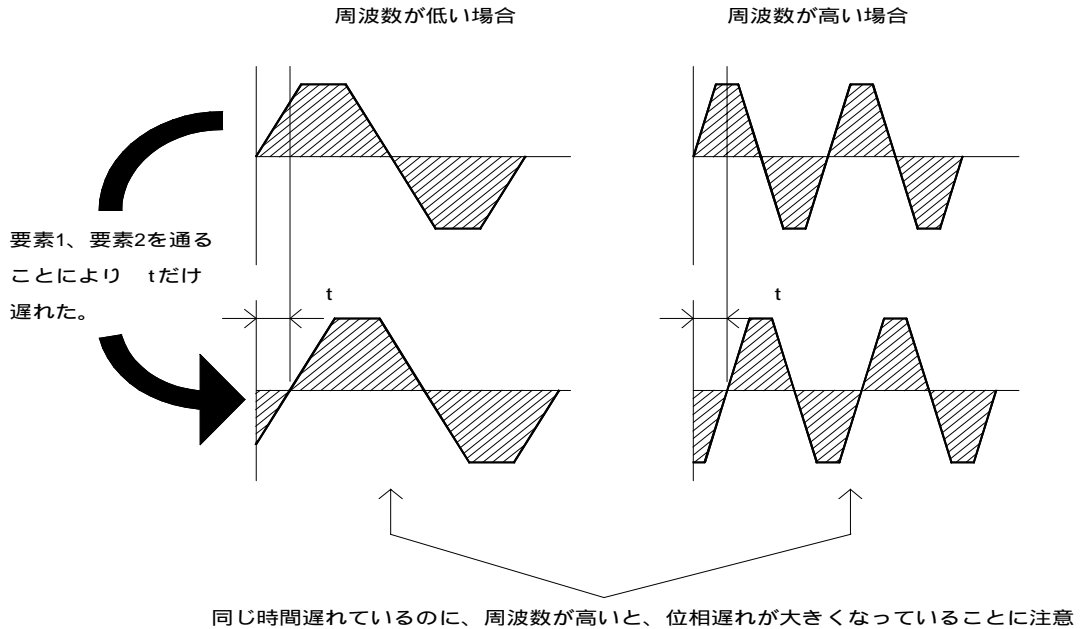


図3-8 遅延時間による位相遅れ

にはこの位相ずれ 180° となり(2usなら 250kHzで 180° ずれます)負帰還が正帰還へ変貌してしまいうのです。このとき、もしループゲインが1以上あれば、制御系は発振してしまいます。したがって、制御を考える上で、この位相ずれを考えておくことは非常に重要です。

なお、実際に制御回路を作ったとき、出力の変動分がフィードバック信号としてもどってきて、加算点を通して補正するまで、要素1、要素2を通してこななければならないので、どうしても若干の位相遅れが生じるのですが、実際には多少位相が遅れても位相が 180° ひっくり返らなければ制御はちゃんと制御となっていてくれています。

さて、以上のように、利得、位相の両方とも、周波数特性を持ってあります。この制御系における利得と位相の周波数特性を図にあらわしたものをボード線図といい、図3-9にその例を示します。この図は、制御系に、ある周波数の外乱を与え、その外乱によるループゲインと位相を見ていったものです。周波数が低いとき、利得は大きく、位相も 0° 付近で、ちゃんと制御回路として働いているといえます。ここで、外乱周波数を上げていくと、外乱に対しフィードバック信号の位相がどんどん遅れていきます。また、利得も周波数の上昇とともに減少していきます。ここでのポイントは、

- ・周波数が高くなってゆくと利得が落ちる
周波数が高い外乱に対しては、制御がついていかなくなる。
- ・位相が -180° に回ってしまう前に利得が1(0dB)以下になっている。
利得があるうちは、どの周波数の外乱が合っても正帰還になることはないので、この制御系は安定している。

の二点です。では、図3-10を見てください。このボード線図は利得が0dBになった時点で、まだ位相は -150° 、つまり制御が不安定となる -180° になるまでに、まだ 30° の余裕があるわけです。このように、利得が0dBになったとき、 -180° になるまであとどれだけ位相に余裕があるのかを、位相余

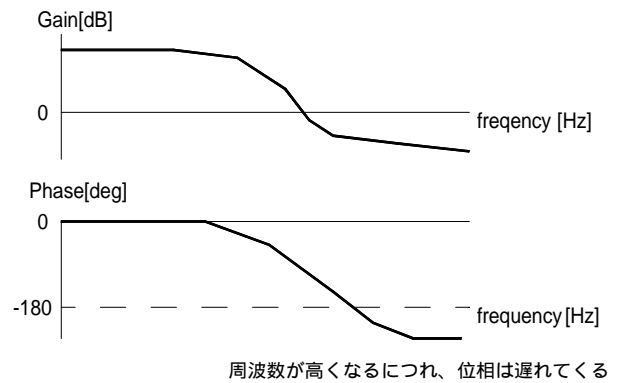


図3-9 ボード線図

裕といいます。また、位相が -180° になったとき、利得がどれだけ0dB以下になっていてくれるかを表したものをゲイン余裕といいます。なお、利得が0dBとなる周波数を交差周波数といいます。

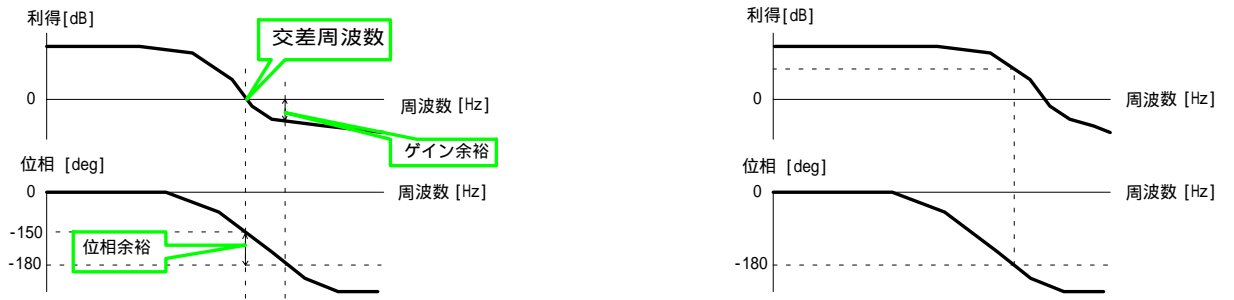
制御における利得・位相の周波数特性は、温度や入出力状態によって少し変化します。もし、位相余裕やゲイン余裕が少ないと、こういった外部状況の変化によって、いとも簡単に制御が不安定な状態になります(図3-11)。

3-9 位相保証について

早い周波数まで制御が追従させようと交差周波数を高くすると、位相が先に 180° 回ってしまつて発振を起こしてしまいます。望む周波数まで制御が追従し、なおかつ位相が 180° まわらないようにする手法が位相保証です。ようは、交差周波数まで位相が 180° 回らないようにすればいいわけで、以下の三つの方法があります。

1)遅れ位相保証

図3-12(a)のように位相特性をそのままに、交差周波数を下げる。いちばん簡単な方法だが、交差周波数を下げてしまうため、制御の応答が悪くなる。



位相が180°になってしまう前に、ゲインが0(dB)以下になる。
 つまり、正帰還になってしまうときには、すでに弁を調整する力がないので、発振はしない。

(a) 安定な系

位相が180°になっても、まだゲインがある。
 つまり、正帰還になったときに、まだ弁を調整する力があるために、発振してしまう。

(b) 不安定な系

図3-10 制御の状態とボード線図の関係

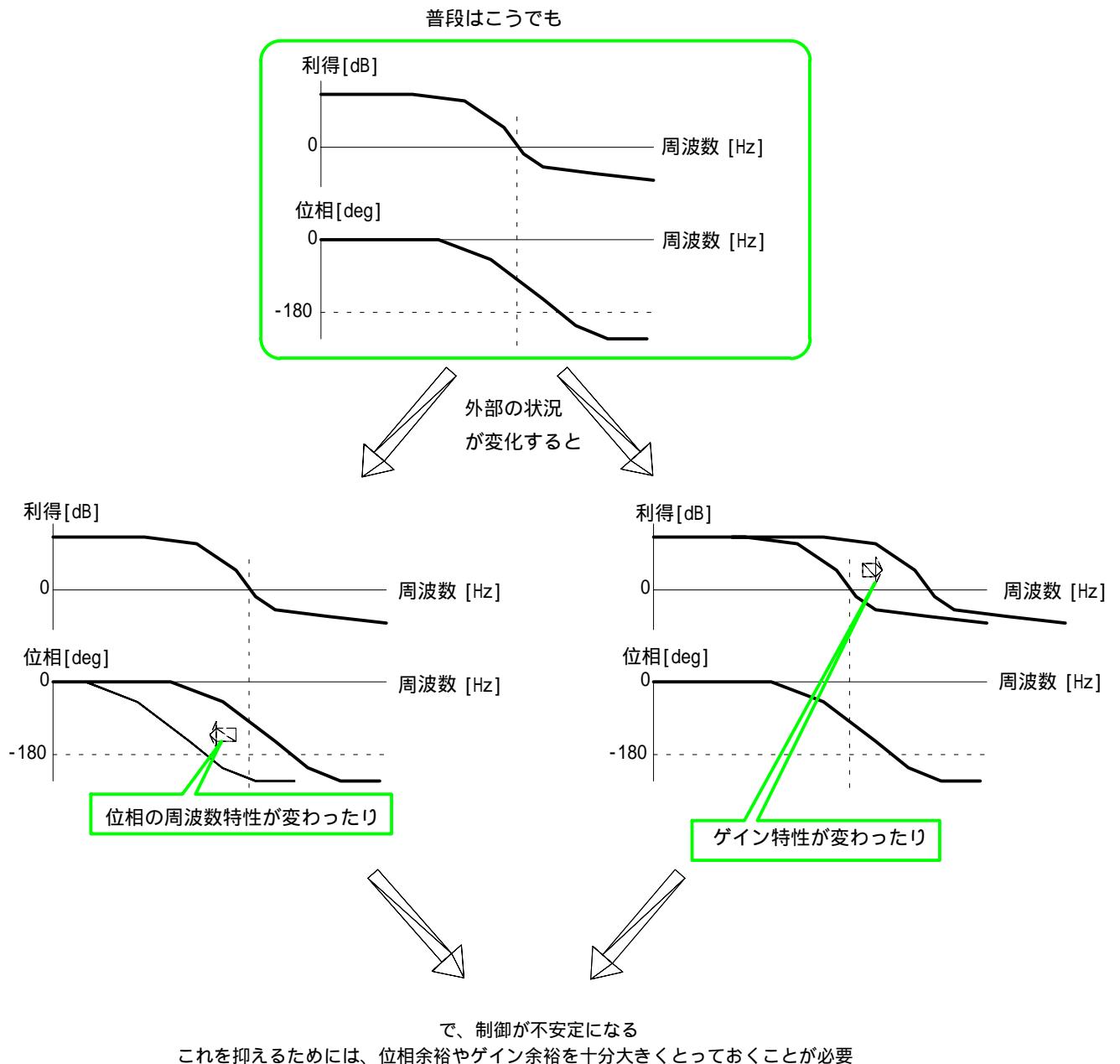


図3-11 位相余裕・ゲイン余裕を大きくとっておく理由

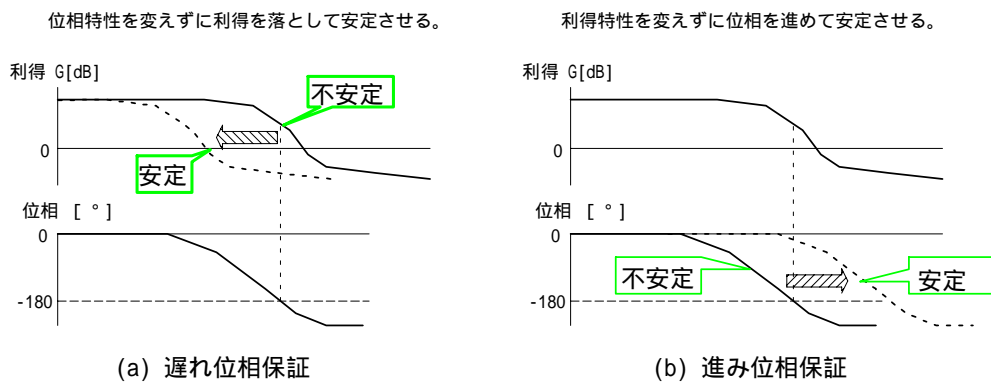
2) すすみ位相保証

図3-12のように利得特性をそのままに、位相を進めてしまう。利得特性をそのままに位相だけを進めるということは結構難しく、ボード線図をみながらしっかりと計算が必要。交差周波数が下がらないので、制御の応答特性も悪くならない。

3) 遅れ位相保証 + すすみ位相保証

1)と2)の組み合わせ。

具体的に、これら保証をどのように行うのかは、実際の電源の回路で実演することになりますので、ここでは、位相保証とは、ボード線図上でどのような特性を作り出すものなのかということだけ覚えておいてください。



利得特性や位相特性をいじって、制御が安定するようにする。

図3-12 位相保証とは