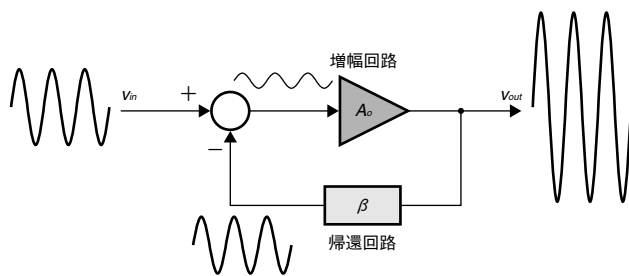


アナログ回路の万能薬 — フィードバック回路

谷口研二

今回は、アナログ信号の帰還(フィードバック)についてお話しします。帰還回路はそれだけでは何の役にも立ちませんが、アナログ回路の特性を変えることができる不思議な回路です。この技術が開発されていなければ今日のアナログ電子回路はなかったと言っても過言ではありません。増幅回路や電流源回路などを野菜や肉などの素材だと考えれば、帰還回路は素材の旨みを引き出す調味料に例えることができます。つまり、しょうゆが日本の伝統的な料理に欠かせないように、アナログ回路に帰還回路は不可欠なのです。トマト・ソースのないイタリア料理や、スパイスのないインド料理などを考えると、調味料を使わない料理がどんなに味気ないものであるかがわかるでしょう。(筆者)

電子回路に帰還を取り入れるアイデアは、80年前に米国ベル研究所のブラック氏が考案しました。当時、電話線を伝わってくる音声信号を真空管回路で増幅していましたが、回路の利得を上げると音声信号がひずんで使い物になりま



〔図1〕 帰還増幅回路の概念図

出力信号の一部を負帰還することによって増幅器の低ひずみ化、高帯域化、インピーダンス変換を実現することができる。

せんでした。ブラック氏はこの問題を解決する技術の開発に寝食を忘れて取り組みました。1921年のある日、彼はニューヨークからニュージャージーへ向かう通勤フェリーの中でこの帰還のアイデアにたどりついたのです。

余談ですが、この例のように潜在意識の中に問題点が明確にたたきこまれていれば、リラックスした瞬間に新しい発見が生まれることが多々あります。化学者のケクレがベンゼン環を思いついたのも「しっぽをくわえた蛇」の夢を見たからだと言われています。潜在意識の中にまで染み込むほど考え抜いた問題は、ある偶然のきっかけで解決法が見いだせることが多いようです。このような偶発的な発見を「セレンディピティ(serendipity)」と呼ぶそうです。読者のみなさんも解決が困難な問題にぶち当たったときには十分に悩み抜いてください。そうすると息抜きをしたとたんに新しいアイデアが生まれてくるかもしれません。

帰還回路の概念

帰還回路は、アナログ回路のさまざまな病気につける万能薬です。しかし、帰還量をまちがえると毒になることもあります。まちがった処方をして電子回路をおしゃかにしないように注意しましょう。

出力信号の一部を入力にフィードバックする帰還増幅回路の概念図を図1に示します。この図には、電源やグラウンドなどの信号情報を含まない配線は削除し、簡略化した信号伝達の経路のみを示しています。

入力信号を v_{in} 、出力信号を v_{out} とすると、帰還回路を通して β 倍した出力信号を入力側に戻すことで入出力信号の間には次の関係式が成り立ちます。

$$v_{out} = A_o(v_{in} - \beta v_{out}) \quad (1)$$

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{A_o}{1 + \beta A_o} \rightarrow \frac{1}{\beta} \quad (2)$$

増幅回路が十分大きな利得 A_o を持っていれば、利得の大きさによらず入力信号の $1/\beta$ 倍の値が出力されます。帰還増幅回路の利得が帰還量 β だけで決まるということは、増幅回路の利得 A_o が外部温度や製造時のばらつきなどで大きく変動しても帰還増幅回路の利得にはほとんど影響しないことを意味しています。

特に量産されるアナログ製品の場合には、この「帰還」の効果がとても大きいのです。つまり、製品を構成する電子部品の特性にばらつきがあっても帰還を施すことによって性能が均質化されるため、製品検査を多少手抜きしても製品の販売が許されるのです。しかも、ユーザがその製品を灼熱のサハラ砂漠で使用しても、極寒の南極で使っても性能にはほとんど差が認められません。だからこそ、テレビ、DVDなどの製品が世界中に普及し、さまざまな環境の中でも安心して使用されているのです。

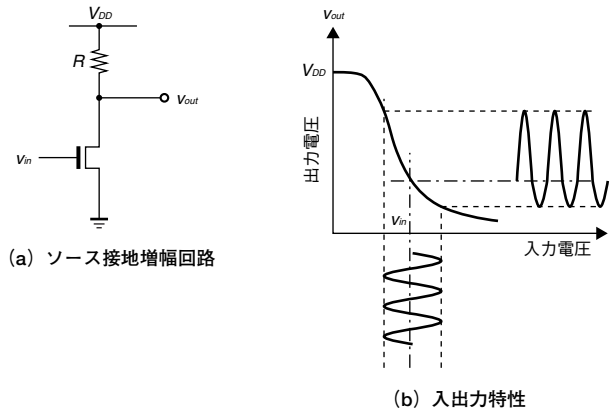
帰還回路の効用

帰還回路の効用としては、回路の低ひずみ化、高帯域化、入出力インピーダンスの変換などがあります。これらを順番に説明していきながら帰還増幅回路の原理を理解していきましょう。

●出力信号を帰還するとひずみが小さくなる

今から35年ほど前になるでしょうか。ある家電メーカーが開発したオーディオ・アンプの宣伝広告に「高調波ひずみ0.007%以下、ひずみ率測定器の測定限界を切る」という表現がありました。たとえアンプのひずみを完全に排除してもレコード・プレーヤのピックアップやスピーカで生じるひずみのほうが大きいので意味がないのに…と思ったものです。でもアンプのひずみを低減することはアナログ技術者にとって永遠の課題のようで、最近でも携帯電話の高周波アンプのひずみ低減化に関する技術の研究・開発が盛んに行われています。

ひずみを低減するには「帰還」がもっとも効果的です。一例として図2(a)のソース接地増幅回路を思い浮かべてく



〔図2〕ソース接地増幅回路

入力バイアス電圧 v_{in} を中心に振動する正弦波を入力すると、出力には入出力特性を反映したひずんだ信号が得られる。

ださい。このゲート電極にバイアス電圧 v_{in} を中心とした正弦波を入力します。入力信号の振幅が小さければ出力端子には正弦波状の信号が出てきますが、信号振幅が大きいと図2(b)に示すように正弦波と異なる出力信号が得られます。図2(b)の例では、周期の半分は出力信号が大きく引き伸ばされた形をしていますが、もう一方の半周期では波形が押しつぶされた格好となっています。このように入力信号と出力信号の波形が変わるのは、バイアス電圧 v_{in} の近傍で入出力特性のこう配が一定でないためです。逆に、こう配、すなわち利得が一定であれば出力信号はひずまないことは図2(b)から明らかです。

ここで、帰還による効用を確認するために、極端な例ですが、入力バイアス電圧付近で利得が2倍違っている増幅回路を考えてみましょう。例えば、バイアス電圧の上下で、利得 A_o がそれぞれ100倍と200倍と仮定します。式(2)によれば、出力信号の1%($\beta=0.01$)を帰還すると帰還増幅回路の利得はそれぞれ50倍と67倍になります。たった1%を帰還(フィードバック)するだけで倍も違っていた増幅回路の利得の差が30%まで近付くのです。さらに、帰還量を10%にまで増やすと、利得はそれぞれ9.1倍と9.5倍になり、その差は4%まで急接近します。

このように帰還増幅回路の帰還量 β を高めると、バイアス電圧近傍の入出力特性のこう配(利得)が直線に近づくため、出力ひずみも小さくなるのです。しかし、帰還することによる副作用、すなわち、利得の低下が避けられません。もっとも、帰還による利得の低下は帰還増幅回路を多段に接続することで補うことができます。