

# 帰還回路の解析

佐藤 武治

The Analysis of Feedback Circuits

Takeji Sato

(昭和48年10月31日受理)

## 1. ま え が き

負帰還の概念は大分古くからあったようであるが、その本質を明らかにしたのは、H. S. Black である。負帰還によって増巾器の諸特性を改善することは常識であり、真空管ばかりでなくトランジスタ増巾器に対しても、この負帰還が有効であることは論をまたない。むしろトランジスタにおいては真空管以上に負帰還の効果が力説される。トランジスタは周知の如く、温度により特性が変化すること、周波数特性が悪いこと、入力インピーダンスが低い等の欠点をもっているが、負帰還によりそれらを大きく改善することが可能である。

負帰還が特に増巾器の周波数特性の改善、歪率、雑音の減少、入出力インピーダンスの調整、安定性の向上に役立つことから、Black の単一帰還に対してその誘導形と看做される多くの方式が発表されている。ここでは基本的な回路構成について簡単な安定判別の解析を試みる事にする。

## 2. 帰還の原理

帰還増巾回路において、増巾回路と帰還回路との合成の四端子  $h$  パラメータを使用し、入力側は直列、出力側は並列接続とし、その等価回路を図1で表わす。ここで  $R_s$  は入力信号の内部抵抗、 $Y_e$  は負荷アドミタンスである。等価回路から次式が得られる。

$$E_s = (h_{11} + R_s) I_1 + h_{12} V_2 \quad (1)$$

$$I_2 = -Y_e V_2 = h_{21} I_1 + h_{22} V_2 \quad (2)$$

式(2)より

$$I_1 = -\frac{(h_{22} + Y_e)}{h_{21}} V_2 \quad (3)$$

ここで帰還比  $B$  を次のように定める。

$$B = \frac{-h_{21} V_2}{(h_{11} + R_s) I_1} \quad (4)$$

したがって式(2)より、式(4)は次のようになる。

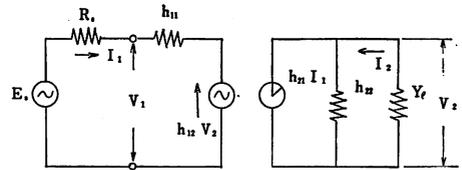


図1 帰還回路の等価回路

$$B = \frac{h_{12} h_{21}}{(h_{11} + R_s)(h_{22} + Y_e)} \quad (5)$$

ここで式から、電圧利得  $\mu'$  を求めると、

$$\mu' = \frac{V_2}{E_s} = \frac{-h_{21}}{(h_{11} + R_s)(h_{22} + Y_e) - h_{12} h_{21}} \quad (6)$$

また  $h_{12} = 0$  は帰還のない時の利得であるから、それを  $\mu$  とすると、

$$\mu = \frac{-h_{21}}{(h_{11} + R_s)(h_{22} + Y_e)} \quad (7)$$

$B$  を  $\mu$  で表わすと

$$B = h_{12} \mu \quad (8)$$

$\mu'$  を  $\mu$  で表わすと

$$\mu' = \frac{\mu}{1 - B} = \frac{\mu}{1 - h_{12} \mu} \quad (9)$$

$h_{12}$  を  $\beta$  とおけば

$$\mu' = \frac{\mu}{1 - \mu \beta} \quad (10)$$

となり、帰還回路の一般形が得られる。

特に

$$\mu \beta = 1 \quad (11)$$

では  $\mu'$  は無限大となり、回路が発振することを意味する。実際の増巾回路には必ずといってよい位、コンデンサまたは変成器があるので、3段以上では有限の周波

数で回路の位相推移は $180^\circ$ に達し、帯域内の低周波では負帰還であっても、帯域外の高周波では正帰還となり発振をおこす可能性がある。

### 3. 安定の判別と解析

多段にわたる負帰還をかける場合の問題点は、位相のずれであって、このために予定の負帰還がかからなかったり、場合によっては正帰還になって発振するおそれがあることについては、前節で述べた。特に真空管と異なり、トランジスタでは位相のずれが大きいため、なるべく局部的に負帰還をかけることが、よい結果を与える。ここでは周波数をゼロから無限大まで変化した場合のCR結合増巾回路継続の場合における負帰還の安定判別について検討する。

まず基本的な解析を容易にする為に、増巾器1段の低域ならびに高域のシャ断周波数 $f_1$ および $f_2$ が与えられたとし、これを $N$ 段縦続接続の場合の増巾器は、今述べた1段の増巾器と等しい帯域をもつものとし、この場合の出力電圧を入力側に帰還する場合、総合の電圧利得 $\mu$ を周波数の如何にかかわらず一定と看做し、且つ $\beta$ は周波数の函数であると仮定する。したがって式(9)、(10)によって $h_{12}$ は周波数によって大きく位相量の変化するベクトル量であり、一般には $\mu\beta$ が更に複雑に変化するベクトル量になるのであるが、上のように仮定したので解析は比較的容易になる。

安定を簡単に判別するには、増巾器のインパルス応答を実験的に調べればよい。また安定を解析的に判別する方法は他にもあるが、ここでは帰還量のベクトル軌跡が与えられれば、それから容易に安定を判別し得るナイキスト線図を用いる。

今、 $N$ 段の増巾器における帰還量 $\mu\beta$ を求めると、次のように簡単に与えられる。

$$\mu\beta = \frac{\mu}{\left(1 - j \frac{\omega_1}{\omega}\right)^N} \quad (1)$$

$$\mu\beta = \frac{\mu}{\left(1 + j \frac{\omega}{\omega_2}\right)^N} \quad (2)$$

ただし式(1)、(2)はそれぞれ低域、高域における帰還量を示したものであり、 $\omega_1$ 、 $\omega_2$ は低域および高域のシャ断角周波数である。

さて、 $\mu$ を任意の負の実数とし、 $\beta$ をCR結合 $N$ 段の帰還回路と仮定して、 $C = 1 [F]$ 、 $R = 1 [\Omega]$ とおけば $\omega_1$ および $\omega_2$ が1となり、ナイキスト線図が容易に画ける。

まず、図2は $N = 1$ の場合における $\mu\beta$ 軌跡であり、

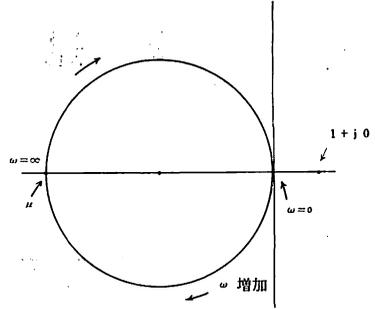


図2 CR回路1段における $\mu\beta$ 軌跡

この場合の軌跡の形は完全に負領域に存在する円であって、この場合の増巾器は常に安定である。

次に図3は $\beta$ がCR結合2段における帰還回路として与えられた場合のナイキスト線図であり、ハート形となる。ここでも位相角が $180^\circ$ では $\mu\beta$ はゼロであり、その点は位相の進み、遅れの限界となっている。軌跡上の任意の点から、正の実軸上の点 $(1 + j0)$ までの距離は $(1 - \mu\beta)$ に等しい。 $|1 - \mu\beta| > 1$ であって $(1 + j0)$ 点を中心とした半径1の単位円の外部に存在する $\mu\beta$ 軌跡の部分が、負帰還に相当することは当然であり、また単位円の内側に存在する軌跡は、それに相当する周波数に対しては正帰還になる。したがって極めて低い周波数と極めて高い周波数において発振する可能性を有する。即ち帰還回路をもつ回路の電圧増巾度 $\mu$ は帰還なしの電圧増巾度 $\mu$ より大となり、帰還は負から正に変化している。ただ図3はなお安定である。というのは非常に低い周波数と非常に高い周波数において、 $\mu\beta$ が1より極めて小であっても、 $(1 - \mu\beta)$ の値は今の場合、ゼロにはなり得ないからである。しかし乍ら、 $N = 3$ 以上の場合には不安定性は増加する。図4はCR3段結合の場合であり、図5はCR4段結合の帰還回路をもつ $\mu\beta$ 軌跡を示す。3段のCR結合回路を使っている図4では、その総合中域周波数に対する位相推移は $\pm 270^\circ$ になるはずであり、図4では点 $(1 + j0)$ は $\mu\beta$ 軌跡の外側にあり $(1 - \mu\beta)$ は今の場合ゼロではない。したがって回路は一応安定であり、そして非常に低い周波数と非常に高い周波数において、帰還は正であっても発振はおこり得ない。図5では点 $(1 + j0)$ は $\mu\beta$ 軌跡の中に包まれ、回跡はなお安定といえよう。しかし乍ら、若し $(1 - \mu\beta)$ が $\beta$ の変化によりゼロになれば $\mu\beta$ 軌跡は点 $(1 + j0)$ を通過し、回路は発振する。つまり図4と図5との間の $\beta$ の或値の時に発振する。

ここでは増巾度 $\mu$ を一定とし、 $N$ 段のCR結合回路を $\beta$ 回路として、それに位相推移を含め解析を容易にした

のであるが、微分方程式をたてることにより、ナイキスト線図を画く解析の方法にしたがって、安定判別を求めることも出来る。しかしふつうこのような微分方程式をたてて安定判別を求めることは、実際にやってみると少なからず困難である。

### 1. む す び

以上、帰還回路の解析を容易にする為、若干の仮定を設け、ナイキスト線図により、その安定判別を試みた。仮定の中には必ずしも現実的ではないものもあり、妥当性を欠くものもあるが、一応解析の結果から、技術的なことはともかくとして、次のことが結論される。

帰還回路が増巾回路に使用された場合、結合回路としては各段当り  $\pm 90^\circ$  をこえないように考慮されねばならない。特に最初の2段についてはこれで十分である。3段目については、非常に低い周波数と非常に高い周波数とにおける位相推移の無視し得る様な周波数特性をもつ回路に設計されるべきことが大切である。

簡単に帰還回路の解析を試みたのであるが、独断的な仮定も見られ、各位のご寛容を乞う次第である。

### 文 献

- (1) 黒川：電通誌，29，4—5（1946）
- (2) F. E. Terman："Electronic and Radio Engineering" p. 374. 1955, 好学社

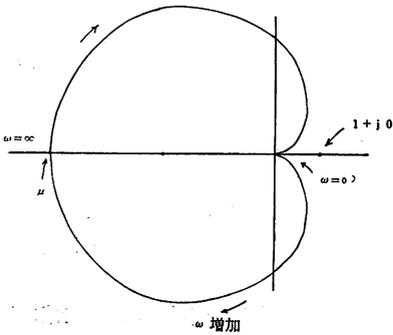


図 3 CR 回路 2 段における  $\mu\beta$  軌跡

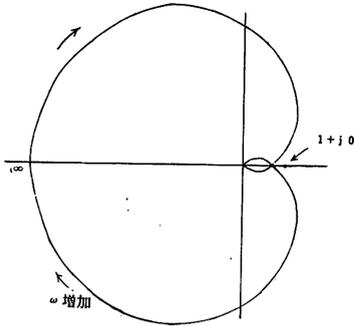


図 4 CR 回路 3 段における  $\mu\beta$  軌跡

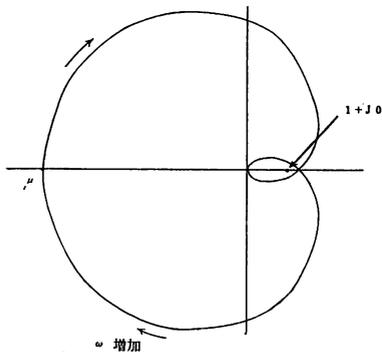


図 5 CR 回路 4 段の  $\mu\beta$  軌跡