正帰還から負帰還回路へ

松本栄寿

いまでは負帰還（ネガティブフィードバック）という言葉になんの違和感も覚えない。しかし、なんと不思議な回路なのだろうか。せっかく真空管やトランジスタを使って増幅するのに、その増幅度を制限してしまう。そこに至るまではどんな道筋があったろうか。

正帰還増幅器（再生検波回路）

前回フレミングの発明による二極管検波回路、ド・フォレストの発明した三極管を使った検波回路にふれた。真空管が使われはじめた頃は、なにしろ真空管は高価であった。できるだけ少ない真空管で回路の増幅度を上げようと、さまざまな回路が工夫された。

再生検波器と呼ばれる回路は、検波管のプレート側から検波された高周波の一部を同調回路に送り返して、受信器を発振しかかりの状態にする方式である。そうすると受信器の感度が向上し、選択度も良くなることを発見した。正帰還方式である。アームストロング（Edwin Armstrong、1890–1964）が1912年に発明したが、ド・フォレスト（de–Forest）、フランクリン（Charles Franklin、1876–1958）も、それぞれ発明にかかわった。

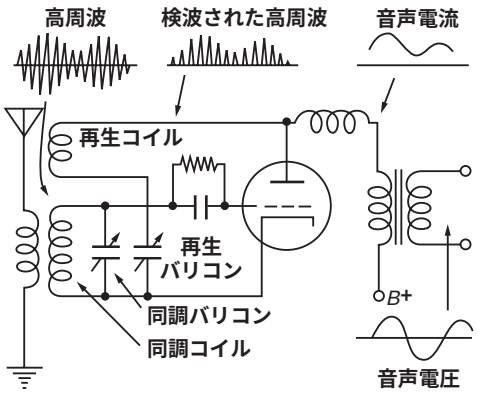


図1　再生検波回路（正帰還回路）
ラジオ受信機に使われた。

このような再生回路は1950年代までは、日本のラジオの大部分に使われていた。**図1**の再生バリコンを受信者が加減して感度の一番良い点を選ぶのだが、帰還量を多くするとピーピーと音がして発振器になってしまい、近隣のラジオに妨害をあたえる欠点があった。

一本の真空管を徹底的に利用しようとするアイデアはまだあった。この再生回路の発振を制御しようとしたのが、超再生回路である。これは発振しようとするのをときどきブロックするように工夫された回路で、主として超短波の受信器に使われた。また、高周波増幅と低周波増幅を一本の真空管でやってしまおうとのアイデアもあった。レフレックス方式といって、高周波増幅器つきのラジオで、検波したオーディオ信号をもう一度高周波増幅段に戻してオーディオ増幅もしようとした。いずれにしてもきわどい技術である。

電話のレピーター

真空管の発明は、電話に使われる音声の増幅を可能にしたが、さらに高性能の増幅器を求めだしたのは中距離電話網であった。とくにアメリカは東海岸と西海岸3500キロを超える大陸横断電話線の実現を目指していた。電信と違い電話は継電器リレーでは中継できない、ある距離ごとに電話信号を増幅してやるレピーターが必要になった。発明されたばかりの三極真空管から、高性能な中継器レピーターに使う試みがはじめられベル研究所はそれを目指した。

しかし肝心の真空管の性能のバラツキが大きかった。また寿命も有限であった。長時間メンテナ

ンスなしに動作する安定な電話中継器はできないか、手をかけずに安定に動作する方法はないか、そこで生まれたのがブラックの負帰還回路である。

一説には、なんとも無茶な話だが、長距離電話網で、「真空管が切れても動くレピーターを作れ」との要請であったと言われる。ブラックはそれに応えた。

現在では、負帰還回路はどんな電子回路、ICの中にも、宇宙のかなたに使われる通信機器でも、人の健康を監視する医療機器にも、家庭のテレビにも、デジカメにも、負帰還回路が使われている。目立たないが内部にもぐり込んでいる。あるいは負帰還回路は、20世紀電子回路の最大の発明はかもしれない。

発明者、ハロルド・ブラック(Harold S. Black、1898–1983)はエジソンと同様な、早くから家計のために働き苦学して、のちウォーチェスタ・ポリテクニークに学んだ人物である。真の発明家として生涯の特許は347件におよんだ。1920年当時、若者にとってあこがれの場、電話産業ウエスターン・エレクトリックに職を得たブラックは、電話伝送システムの改善に取り組む機会を得た。

1906年のド・フォレストのオーディオンの発明は真空管増幅器の可能性を開いたが、つづいて長距離伝送のためには高真空の真空管が使用されるようになった。やがて1015年には初めて大陸横断電話をアレクサンダー・ベルが使ったし、1914年にはアームストロングの再生回路が革命的な回路として披露されている。1921年当時、ベルの研究所の主要な研究は搬送電話のレピーター3チャネルのC型変調器であった。

ブラックは過去のデータを慎重に調べて伝送ひずみは、プッシュプルレピーターに主要な原因があること突き止めた。増幅器出力には真空管の非直線性から二次高調波が発生してしまう。レピーターを数多く直列につながってしまうので大きな歪みが発生する。C型レピーターでは1000マイル以上は考えていなかったし、4チャネルまでしか取り扱えなかった。経済的な大陸横断網には不十分であった。

1921年の暮れ、数千マイルま可能なマルチチャネルアンプの直線化、安定化の取り組みに着手したブラックは、いろいろな資料を調べた結果、超高性能な増幅器が必要だとわかった。しかし、ド・ハーティのような技術者でも、そのような安定な増幅器の実現が不明なので解決は不能と言っていた。ブラックはのちベル研の所長になったケルヴィン・ケリーと低ひずみの真空管の改良に取り組んだが成功しなかった。

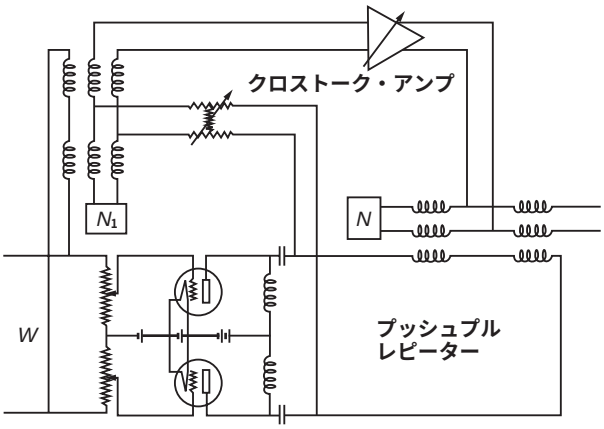


図2　プッシュプル増幅フォワード補償レピータ
上部はクロストークアンプ
下部はプッシュプルレピーター

1923年の春、ブラックはたまたまスタインメッツ(Charles Proteus Steinmetz、1865–1923の講演を聴く機会があり、彼の明確で明晰な論理に感銘を受けた。原点に返ることを悟ったのである。そのときに増幅器の出力から歪みを取り去ることを考えだした。原因が非直線性であれ、真空管のゲインの変化であれ、それを取り出して除去することを追求した。出力から入力と同じ振幅で引き算する。そのためには歪みを別の増幅器を通して、出力でキャンセルすることにした。出力側のトランスかブリッジ回路で加えて取り除く回路である。実験では歪みは従来の40dB減となった。この方式をフィードフォワード増幅器と名づけ特許出願をした。

しかし、この方法では一日中誰かが調整しなければならなかった。フィラメント電流を1時間おきに、6時間おきにプレート電圧を調整して増幅器の特性を維持するのである。そうすると増幅度は1/2から1dBの変動に収まるが、なんとかも

っと手のかからない方式を探す必要があった。

負帰還のアイデアと実現

1927年8月2日のこと、突然、ブラックに負帰還のアイデアがひらめいた。ニュージャージーからニューヨークへ通勤するフェリーボートの中のことだった。増幅器の出力を入力に、逆相でもどし、出力から歪みをキャンセルでする方法を思いついた。その着想は、すぐさま手に持ったニューヨークタイムズ紙に走り書きした。

ついで、三段の広帯域増幅器のアイデアも思いついた。レピータ増幅器に必要なことは、入力、出力インピーダンスがラインインピーダンスとマッチすることである。このときもフェリーの中であった。思いついた着想は、やはりニューヨークタイムズ紙の1927年8月6日号に書き留めた。そして、とうとうその年の暮れにこの考えに基づいて、4～45kHz、1/100,000(50dB)と歪み削減を達成できた。

1928年1月、大陸横断電話ケーブルで、4--40kHz、16番線で9チャンネル、地下ケーブル68組みのペアケーブル、25マイル間隔で実現する案を立てたが、所内で負帰還増幅器は動作しない、コルピッツ・プッシュプル回路が良いとの反対にあった。しかしとうとう1930年、78の負帰還増幅器をニュージャージーで試用する機会がやってきた。実験は68対の25マイル長、68レピーターで行われた。これは9チャネルの7650マイル、306レピーターと等価である。

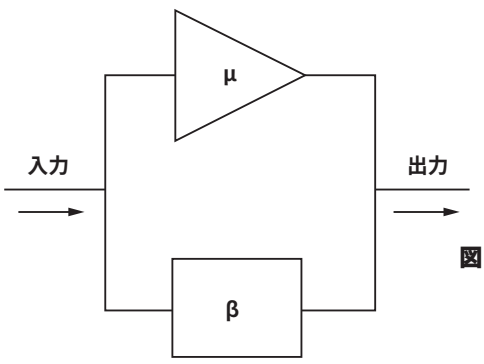
数年後にはナイキスト(Harry Nyqusit、1889-1976)が負帰還増幅器の不安定をさける手法を解析し、ボード(Heinrich Bode、1905-1982)がシステム的手法を編み出した。ようやく負帰還回路の理論が確立したことになる。やがて、ベル研所長のKellyの言うように、「負帰還はあらゆる目的につかわれる増幅器に採用されるだろう」は現実のものとなっていく。

負帰還をめぐる特許

しかし、1928年8月8日、特許庁に出願した負帰還回路は確定するには長い時間を要した。9年後の1937年12月21日までかかったのである。特許庁の係官は負帰還回路は動作しないとみて、その証拠を求めた。英国特許庁は永久運動の出願と同等とみなし、実際に稼働する装置の提出を求めた。その時は、ニュージャージーのモリスタウンでの証拠を提出することになる。

実は、英国特許庁も米国特許庁も、長らく永久運動の特許申請には悩まされてきた背景がある。永久運動は熱力学第二法則で不可能と分かった後でも、発明者の特許申請は絶えず係官を悩ましつづけた。特許の申請には、動く試作品を付けることを要請されることになったのは、思い違いをしている発明家を思いとどまらせ、止めることを意図したものである。つまり負帰還回路も永久機関と同様に扱われたわけである。

もう一つは特許申請書の長さである、42ページにわたる説明、126項目の請求範囲、75もの図、難解な式が含まれている膨大な申請書であった。申請書が異常に長くなったのは、原理が明らかでなかった新分野を解説したからである。それはあらゆる範囲の増幅器、制御システムに及んでいる。機械、音響、化学、水力、複雑な工業、軍事制御システム、単純なシステムから全システムまでも



$$\frac{\text{出力}}{\text{入力}} = A_f = \frac{\mu}{/-\mu\beta} \quad -\frac{1}{\beta}$$

図3　ブラックの負帰還回路の概念
1927年8月2日、通勤途上のフェリーの中でひらめいた。

対象なるし、しかも、請求範囲は広く認められるように工夫した。これらも遅れの原因になった。

前回紹介した1920年当時のA型バルボルはそれまでの電圧計に比して、インピーダンスが高く、測定対象からエネルギーをとらない大きな進歩であったが、バルボルの目盛りはリニアではなく、読みにくい。真空管の非直線性がそのまま現れているからである。ヒューレットはこのバルボルに負帰還回路を採用した。1930年代末にはバランタイン、GR、RCA社などからも発売される。直流から高周波までをカバーし、目盛りもリニアでゼロ点調整も不要になった。

この負帰還を採用した真空管増幅器に、1936年のブラムレイン（A. D. Blumlein）が差動回路が採用されるようになると、入力ドリフトの小さい安定な直流増幅器ができてさらにバルボルの測定範囲がひろがった。負帰還回路には真空管を何本も必要とするが、1950年代にはミニアチュア管が発明され、実用的な小型真空管電圧計が完成したと言えよう。また、トランジスタが使われるようになって以来、バルボルとは呼ばれなくなった。

負帰還回路が日本の計測器にも使い出されるのは、第二次世界大戦後のことである。戦後の空白技術を埋めようと、当初、計測器の技術者は文献をたよりに研究したと伝えられている。

現代では負帰還増幅器と負帰還システムは、あらゆる形の通信システムに見られる。地下、水面

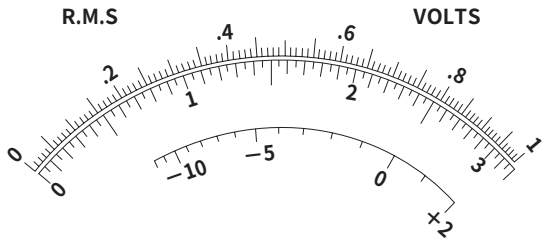


図4　負帰還回路を採用したバルボルの目盛（hp−400シリーズ）

下、空中、衛星を通して宇宙に拡がっている。さらに重要なのは、従来関連の薄かった分野に拡がり続けている。バイオケミカル、バイオエンジニアリング、サイバネティックス、コンピュータ、従来看護士や医師、外科医で使われてきた医療機器、身体不自由者の方々の使う道具にもある。

<参　考　文　献>

1) Harold Black, "Inventing the negative feedback amplifier", IEEE Spectrum, 55/60, (1977/12)
2) 米国特許2，102，671（1937/12/21，1928/8/8申請）"Wave Translation System",
3) アーサー・オードヒューム（高田、中島訳）：『永久運動の夢』朝日選書（1998）
4) F. E. Terman, R. R. Buss, W. R. Hewlett, F. C. Cahill, "Some Application of Neagtive Feedback with Particular Reference to Laboratory Equipment", IRE Proc. 649/655, (1939/10)

『工場管理』5月号　★好評発売中!!　定価1380円（税込）

特集 アジア"共創"時代を生き抜く工場経営のあり方

■第1章 何で生き残るか、どこに針路を見出すか
●グローバル時代の生産戦略…椙山女学園大学　澤田善次郎
●国内空洞化にどのように対応するか
……高垣経営技術　高垣俊壽
●日本のモノづくりは中国に勝てないか?
……高垣経営技術　高垣俊壽
●海外資本を活用する方法
……ドルフィン・トレーニング&コンサルティング　田中元二

■第2章 海外進出成功の要素を探る
●注目の的、中国各地域の現況〜大連が注目される理由
……高垣経営技術　高垣俊壽
●大連進出企業の傾向と経営課題…高垣経営技術　高垣俊壽
●中国での製造業経営の留意点…高垣経営技術　高垣俊壽
●中国進出で失敗を少なくする方法
……大連藤洋鋼材加工有限公司　中村修三

■第3章 現地企業の経営管理の実態
●中国国内顧客へのサービス強化を目的に上海へ進出
〜日高精機……高垣経営技術　高垣俊壽
●人を育て、能力を発揮できる環境を整備した中国東北部進出例
〜北陸エステアール協同組合/サカエ金襴…高垣経営技術　高垣俊壽
●市場としての成熟を待ってタイへ進出
〜日本精工…ドルフィン・トレーニング&コンサルティング　田中元二
●ISOへの取り組みで体質強化し成功したマレーシア進出例
〜東伸精機…ドルフィン・トレーニング&コンサルティング　田中元二
●東南アジア進出事例に学ぶ日本国内製造業のあり方
……ドルフィン・トレーニング&コンサルティング　田中元二
●NBLの珠海進出に学ぶ日本企業の経営条件
……近畿大学　森山真光

日刊工業新聞社 出版局販売部 ☎03(3222)7131