

第 1 章

イントロダクション

Walt Jung / 訳：藤森 弘己

1-1 OP アンプの登場まで

OP アンプは高ゲインの増幅器で、ほとんどの場合、特定の帰還(フィードバック・ループ)とともに使用します。フィードバック・アンプの原理は、その利用範囲の広さと技術的な価値に関して、飛行機や自動車と並んで 20 世紀の記録に残る発明のひとつといえます。最も重要なことは、フィードバック・システムはもともと通信機器の障害を解決するために考えられたにもかかわらず、今ではさまざまな異なった状況で使用されているということです。これは、コンセプトそのものに根源的な価値があったことによる恩恵と言えるでしょう。

今日では、負帰還(ネガティブ・フィードバック)はあまりにも一般的であり、実際に多少軽視されがちです。しかしながら、当時はこれが新鮮な考えかたであったことは確かです。ウェスタン・エレクトリック社(Western Electric Company)の電話用アンプ部門に勤めていた若い技術者であったハロルド・ブラック(Harold S. Black)が最初に、このフィードバック・アンプの原理に思い至りました。明記しなければならないことは、この考えかたが単純なひらめきではなく、極端に専門的な思考から生まれたものであるということです。実際のところこの特許は、申請(1928年)から発効(1937年)されるまでに、およそ9年かかっています[文献(3)]。このときの特許は、非常に広範囲にわたるものでした。ちなみにブラックは、フィードバックの概念について後年(1950年代)、“Bell System Technical Journal”の50周年記念号に、これらの開発過程の努力について詳細を寄稿しています[文献(4)(5)]。

しかし、他の画期的発明の事例と同じように、負帰還増幅器(ネガティブ・フィードバック・アンプ)に関する業績が、当時ほかにもいくつか現れていました。一例として、ポール・ボイト(Paul Voigt)による1920年代中ごろの研究があります[文献(6)(7)]*1。

また、オランダのフィリップス(N. V. Philips)の研究グループが、ブラックとほとんど同じ頃にフィードバック・アンプに関する研究開発を行ったといわれています(1920年代後半から1930年代前半にかけて)。1937年には、テレヘン(B. D. H. Tellegen)が、ブラックのみならずポストマス(K. Posthumus)にも帰するフィードバック・アンプに関する論文を出版しています[文献(8)(9)]*2。このテレヘンの発表原稿のなかには、しばしばブラックと同じ式が使われていましたが、細かいところは異なっており、たとえばブラックが使用した μ が、テレヘンの論文のなかではAとなっていたりしました。

しかし、この章の目的はブラックの功績を問題にすることではなく、いくつかの重要な考案を含む開発が、あるときは並行し、またオーバーラップしながら進んでいたということを示すことです。同じような例として、このあと解説する差動増幅回路の技術開発の過程があります。長い間には、広範囲の基本技術で広く受け入れられているものが、目覚ましい業績であると見られがちです。この点で、ブラックのフィードバック・アンプが、めざましい業績であることは疑いようがありません。この技術は広く受け入れられ、また広範囲に適用されています。

なお、正帰還(ポジティブ・フィードバック)の使用に関しては、ブラックの増幅器の前に多くの例が見られますが、この経緯については、文献(10)にまとめられています。

1-2 ブラックのフィードバック・アンプ

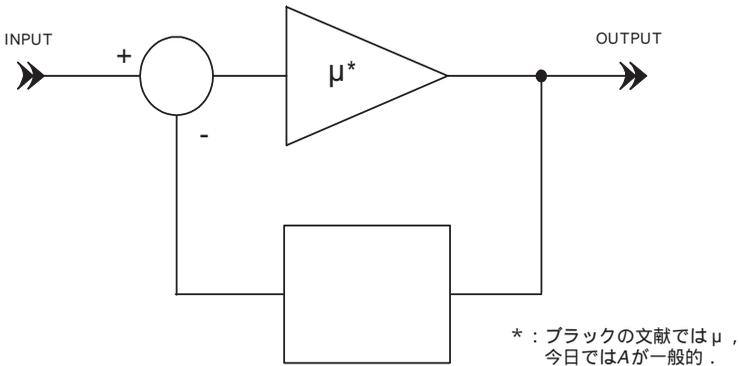
ブラックのフィードバック・アンプの基本的な考えかたは、出力の一部を入力に戻すというアプリケーションにもとづいており、したがって全体のゲインは、元のものより低下します。この動作を適切に設定することができれば、アンプはゲインの安定度や帯域幅が向上し、ひずみも減少させることができ、また入出力インピーダンスを効果的に変更することができます。

図1-1に、ブラックによるフィードバック・アンプ・システムの基本形を示します。ブラックの図に使用されているフォワード・ゲインを表す“ μ ”という記号は、今日では一般的に“A”という記号に置き換えられています。同じように、フィードバック・ネット

*1：人によっては、ポイトがフィードバックOPアンプの真の考案者であり、ブラックではないという説をとる[文献(6)(7)]。しかし彼のUK特許231,972の審査では、フィードバック・アンプの原理に関して、文献(3)(4)に記されたブラックの詳細にわたる説明と同等の内容を示すことができなかった。事実、ポイトのシステム動作に関する記述には、計算式が示されていなかった。

*2：UK特許323,823の審査では、ポストマスによる同時代のフィリップスのUK特許をもとにした実験に関して引用した部分を参照できなかった。この特許には初歩的なフィードバック・アンプについて記されていたが、残念ながら文章や図などに多くの改版や修正があり、全体としての明確さに欠けていた。

図 1-1 フォワード・ゲインを“ μ ”，フィードバック・ゲインを“ ”とした，ブラックのフィードバック・アンプのブロック図



ワーク“ ”は、アンプ全体の伝送特性を規定します。したがって、この部分に使われるいくつかの受動素子、一般的には抵抗や誘導性のネットワークにより、このシステムのゲインや周波数応答などの特性が設定されます。

ブラックが研究をスタートした頃に直面していた問題は、直熱三極管を使った電話信号用のリピータを、数百基(まだ数千基ではなかった)直列に接続したシステムをどのように実用化するかということでした。それぞれのアンプのゲイン安定性を 1 dB 以下にすることが困難で、またこの点での特性が最高であっても各段での歪み特性が許容できず、これらの状況を考えると問題の大きさは深刻でした。

ブラックの考案によるフィードバック・アンプは、ウェスタン・エレクトリック社のリピータだけでなく、数え切れないほど多くの他のアプリケーションに広く利用されています。たとえば、ほとんどの OP アンプ応用回路は、このフィードバックを内包しています。数十種類のタイプ、あるいは個別のモデルでいえば数千種類に上る近代的な OP アンプが存在する事実を見ると、今日の回路設計にフィードバック原理が果たした重要性に感謝しなければならぬことは、容易に理解できるでしょう。

しかし、ブラックのフィードバックの概念が根付き、育ってきた大きな理由は、それがただ単に有用で適切な考えであっただけではありませんでした。確かに新しい考えかたでしたが、一方で異質でもあったため、多くの経験をつんだエンジニアが「増幅率(ゲイン)を捨てる」という考えに抵抗をもちました。しかしながらブラックには、この進歩的な考えかたを広めるための援助、すなわち複数の開発者たちの手助けがありました。この援助という意味では彼は、新技術の概念をより進歩させ推進することを提唱したベル社(Bell

Telephone System)から十分なバックアップを受けました。フィードバック・アンプの開発と、その間のブラックと協力者たちのやりとりについての興味深い物語は、デビッド・ミンデル(David Mindell)による“Opening Black's Box : Rethinking Feedback's Myth of Origin”のなかで述べられています[文献(11)]。

1930年代から1940年代にかけては、ベル研究所の黄金時代と言ってもよいでしょう。ここでは、ブラックのフィードバック・アンプの開発のみならず、アンプ(増幅器)の可能性を広げ、またその働きを支える多くの技術が開発されました。これらの周辺技術開発には、ベル研究所だけではなく世界中の多くの優秀なエンジニアが関わりました。

この画期的な業績に対するベル研究所での関連技術の開発について、ブラックは次のように述べています。「数年のうちに、ナイキスト(Harry Nyquist, サンプリング定理などで有名)がフィードバック・アンプの安定動作に関する一般ルールを発表し、ボーデ(Hendrick W. Bode, ボーデ線図はよく知られている)は規定の動作条件以外でもナイキストの安定動作の基準を満たす設計条件を系統的に求める方法を開発しました。[既出文献(5)]。

ナイキストとボーデによるフィードバック・アンプに関する論文や特許は、近代的なフィードバック・アンプ設計時の強固な基本として、ブラックのオリジナルの成果を補完しています。ボーデは後に、フィードバック・アンプの古典とも言える参考書を出版しています[文献(14)]。また、その後もフィードバック・アンプ開発に関する考えを口述したものをまとめています[文献(15)]。

ナイキストには、彼の有名な安定動作条件に加え、インターステージ段のダイレクト接続に関する特許などのように、回路構成に関する功績もあります[文献(16)]。この考えかたは、その後、真空管式OPアンプの標準的な段間接続の手法となりました。

ベル研究所以外でも、その他のエンジニアたちがそれぞれの確信をもって、さまざまなアプリケーションにおけるフィードバック・アンプの考案を進めていました。フレデリック・ターマン(Frederick Terman)は、1938年に発表した記事で、初めてACフィードバック・アンプの概念を公にしています[文献(17)]。

シングルエンド信号を扱うDCアンプに関しては、第二次世界大戦の間に多くの記念すべき論文が記されています。スチュワート・ミラー(Stewart Miller)による1941年の論文では、DCレベルからの高ゲイン、高安定のためのテクニックが記されています[文献(18)]。この論文では「カソード補償」と呼ばれる、後にゲイン安定化のための標準的な手法となった考えかたを紹介しています。これは、2段目の双三極管により、ヒータ電圧変化に対する感度を小さく抑える技術です。ギンズトン(Ginzton)による1944年の直結アンプに関する論文は、ミラーのカソード補償の考えかたと、ナイキストのレベル・シフトの方法を利用したものです[文献(19)]。このレベル・シフトに関しては、ブルベーカー

(Brubaker)に帰属していますが、彼は明らかにナイキストの先の業績をなぞっていました。アーツ(Artzt)は、1945年に特にDCアンプの安定動作に関して注目し、調査した論文を発表しています[文献(20)]。

第二次世界大戦の後、MIT(マサチューセッツ工科大学)放射線研究所発行のテキスト・シリーズに多くの価値ある電子技術が掲載され、そのなかに真空管アンプに関する巻も含まれていました。このバリーとウォールマンによる古典の第18巻には、一般的なアンプに関する記述だけでなく、DCアンプに関する章が含まれていました[文献(21)]。この本のなかではOPアンプという名前を使っていませんでしたが、DCフィードバック・アンプを例として取りあげていました。OPアンプという名称は1947年に名づけられましたが、それ自身はこの本が出版される少し前から存在していたのです。

□参考文献□(注：OPアンプの歴史と関連する部分についてコメントを付け加えた)

- (1)J. A. Fleming, "Instrument for Converting Alternating Electric Currents into Continuous Currents", US Patent 803,684, filed April 19, 1905, issued Nov. 7, 1905. See also UK Patent 24,850, filed Nov. 16, 1904. (「フレミング・ダイオード」, 最初の真空管整流器)
- (2)Lee De Forest, "Device for Amplifying Feeble Electrical Currents", US Patent 841,387, filed October 25, 1906, issued January 15, 1907. (三極真空管, 最初の能動素子「オーディオン」)
- (3)H. S. Black, "Wave Translation System", US Patent 2,102,671, filed August 8, 1928, issued December 21, 1937. (フィードバック・アンプの基礎)
- (4)H. S. Black, "Stabilized Feedback Amplifiers", Bell System Technical Journal, Vol.13, No.1, January 1934, pp.1 ~ 18. (フィードバック・アンプの実用技術)
- (5)Harold S. Black, "Inventing the Negative Feedback Amplifier", IEEE Spectrum, December, 1977. (フィードバック・アンプの発明者による50周年記念寄稿)
- (6)Geoffrey Horn, "Voigt, not Black", Stereophile, Letters, April 1998, p.18, p.21.
- (7)Paul G. A. H. Voigt, "Improvements in or Relating to Thermionic Amplifying Circuits for Telephony", UK Patent 231,972, filed January 29, 1924, issued April 16, 1925. (モーショナル・フィードバックによる増幅器)
- (8)B. D. H. Tellegen, "Inverse Feedback", Philips Technical Review, Vol.2, No.10, October, 1937. (ブラックの発明と並行したもう一つのフィードバック・アンプの開発)
- (9)"Improvements in or Relating to Arrangements for Amplifying Electrical Oscillations", UK Patent 323,823, filed October 18, 1928, issued January 16, 1930 (original filing), filed July 18, 1929, final approval January 1938 and February 1939 (amended filing). (シンプルな1段構成のフィードバック・アンプ)
- (10)D. G. Tucker, "The History of Positive Feedback", Radio and Electronic Engineer, Vol.42, No.2, February 1972, pp.69 ~ 80.
- (11)David A. Mindell, "Opening Black's Box: Rethinking Feedback's Myth of Origin", Technology and Culture, Vol.41, July, 2000, pp.405 ~ 434. (フィードバック・アンプの発明にまつわる周辺のできごとと展望)
- (12)Harry Nyquist, "Regeneration Theory", Bell System Technical Journal, Vol.11, No.3, July, 1932, pp.126 ~ 147. See also: "Regenerative Amplifier", US Patent 1,915,440, filed

May 1, 1930, issued June 27, 1933 .(ゲイン - 位相の円形グラフによるフィードバック・アンプの安定性の予測方法)

(13)Hendrick Bode, "Relations Between Attenuation and Phase In Feedback Amplifier Design", Bell System Technical Journal, Vol.19, No.3, July, 1940 . See also : "Amplifier", US Patent 2,173,178, filed June 22, 1937, issued July 12, 1938 .(ゲイン・位相のセミログ・グラフによるフィードバック・アンプの安定性の予測方法)

(14)Hendrick Bode, Network Analysis and Feedback Amplifier Design, Van Nostrand, 1945 .(ボーデによるネットワーク解析の古典, フィードバック・アンプの設計についても述べている)

(15)Hendrick Bode, "Feedback - the History of an Idea", Proceedings of the Symposium on Active Networks and Feedback Systems, Polytechnic Press, 1960 . Reprinted within Selected Papers on Mathematical Trends in Control Theory, Dover Books, 1964 .(フィードバック・アンプの開発にまつわるボーデの回想)

(16)Harry Nyquist, "Distortionless Amplifying System", US Patent 1,751,527, filed November 24, 1926, issued March 25, 1930 .(段間結合の抵抗ネットワークを介した多段アンプの直結方法)

(17)F. E. Terman, "Feedback Amplifier Design", Electronics, January 1937, pp.12 ~ 15, p.50 .(フィードバック・アンプを実現する AC 結合の回路構成)

(18)Stewart E. Miller, "Sensitive DC Amplifier with AC Operation", Electronics, November, 1941, pp.27 ~ 31, pp.106 ~ 109 .(フィラメント電圧の変動に対応する「カソード補償」をグロー管による段間結合, 安定化電源とともに用いた安定で高増幅率の直結アンプの設計例)

(19)Edward L. Ginzton, "DC Amplifier Design Techniques", Electronics, March 1944, pp.98 ~ 102 .(直結アンプのさまざまな設計手法)

(20)Maurice Artzt, "Survey of DC Amplifiers", Electronics, August, 1945, pp.112 ~ 118 .(シングルエンド/ディファレンシャルで安定な直結アンプの設計法についての概論)

(21)George E. Valley, Jr., Henry Wallman, Vacuum Tube Amplifiers, MIT Radiation Labs Series No.18, McGraw-Hill, 1948 .(第二次世界大戦当時の Radiation Lab のテキスト, 第 11 章で John W. Gray が直結アンプについて論じている)

謝辞 :

この章の執筆を準備している段階で, たくさんの有用なコメントを寄せていただいた方々に感謝します .

この仕事にとってとくに有用だったのは, 真空管の歴史に詳しい Gary Longrie 氏からの参考文献の情報でした . 彼は初期の真空管アンプ, およびフィリップス社でのテレヘンによるフィードバックの実験について情報を提供してくれ, さらに拙稿に多くの有意義なコメントを加えてくれました .

Dan Sheingold 氏は, 拙稿に建設的なコメントを加えてくれました .

Bob Milne 氏からたくさんのコメントをいただき, 拙稿をさらに良いものにすることができました .