

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)]。

見本
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 Volgt) 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 を明らかにすることです。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、ブラックの増幅器より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

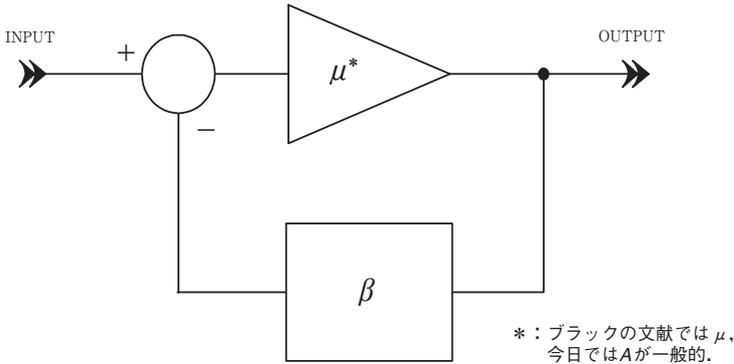
ブラックのフィードバック・アンプの基本的な考えかたは、出力の一部を入力に戻すというアプリケーションにもとづいており、したがって全体のゲインは、元のものより低下します。この動作を適切に設定することができれば、アンプはゲインの安定度や帯域幅が向上し、ひずみも減少させることができ、また入出力インピーダンスを効果的に変更することができます。

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、ボ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、ボ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“ β ”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“ β ”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ないことは，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歪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ことと展望)
- (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

見本

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。



第 2 章

電子管式OPアンプ

Walt Jung / 訳：細田 裕司

2-1 差動アンプの技術開発

帰還技術を使うものも使わないものも、アンプとしての回路形式が1930年代後半から1940年代を通じて洗練されていきました。そしてこの時期には、差動アンプの分野においても、非常に重要な技術開発が行われました。

今日、OPアンプは差動回路を全面的に取り入れています。電子管アンプの時代では、それは当たり前のことではありませんでした。実際のところ、差動増幅技術を十分に使いこなしたと言える電子管式OPアンプが登場するのは、電子管全盛時代がその陰りを見せるようになった頃です。しかしながら、その技術が十分に研究/理解されるようになったと言える1950年頃までに発表された、注目すべき差動アンプの回路について調べてみることは、現在においてもなお有益なことなのです。当時における、完全に差動化された、ゲインの規定された電子管式精密直流アンプといえば、言うまでもなく、今の時代では計装アンプ（インストルメンテーション・アンプ）として知られているアンプ回路の前身にあたります[第2巻、第1部、第1章(原著ではChapter2, Section1)参照]。

電子管式差動アンプが最初に発表されたのは、1930年代までさかのぼる昔のことで、その後15年から20年かかって着実に発展をとげました。それらの回路の開発者の多くは、生体組織から発生する電気信号を測定するために使われた、微小信号用計装アンプ回路の問題点の解決に力を注いでいた人たちでした。このことから、それらの装置はしばしば「生体計測アンプ」と呼ばれていました。

この分野の初期の開発者の一人であるマシューズ(B. H. C. Matthews)は、1934年に特殊な差動入力アンプについて発表しています[文献(1)]。マシューズのアンプは確かに差動入力を備えています。しかしながら、使用されている電子管の共通カソードが電源のアースに直接接続されているため、コモンモード入力信号に対する応答を減少させるような最適化

がされていません。この当時、二つの入力端子で同相になっている信号という意味で、コモンモード信号はプッシュ・プッシュ信号と呼ばれていました。

アラン・ブルムレイン (Alan Blumlein) による 1936 年の英国特許 482470 は、この点において一歩進んだものでした。そこでは、対となる差動電子管の共通カソードを共通の抵抗でアースに接続してバイアスをかけています [文献 (2) の第 2 図にある双三極管を参照]。ブルムレインの特許は、交流結合を使っていて、生体信号ではなく広帯域信号の増幅に関連したものでした。それでも、コモンモード信号除去に適したバイアス条件を用いている点で、マッシュューズのアンプより性能の改善が図られています。

1937 年に、フランクリン・オフナー (Franklin Offner) がさまざまなタイプの差動アンプについて検討を加えています。そのなかには、ブルムレインのアンプに類似したものも見つかります [文献 (3) の第 3 図]。ブルムレインと同様に、オフナーの回路も交流結合を使っていました。この論文で提示された有効な回路手法として、コモンモード除去比を向上するためにコモンモード信号が帰還されていることがあげられます [文献 (4) の第 4 図]。その回路では、帰還のためにアンプの後段から取り出したコモンモード信号を初段に注入しています。この帰還がコモンモード利得を減少させ、コモンモード除去比を向上させるのです。

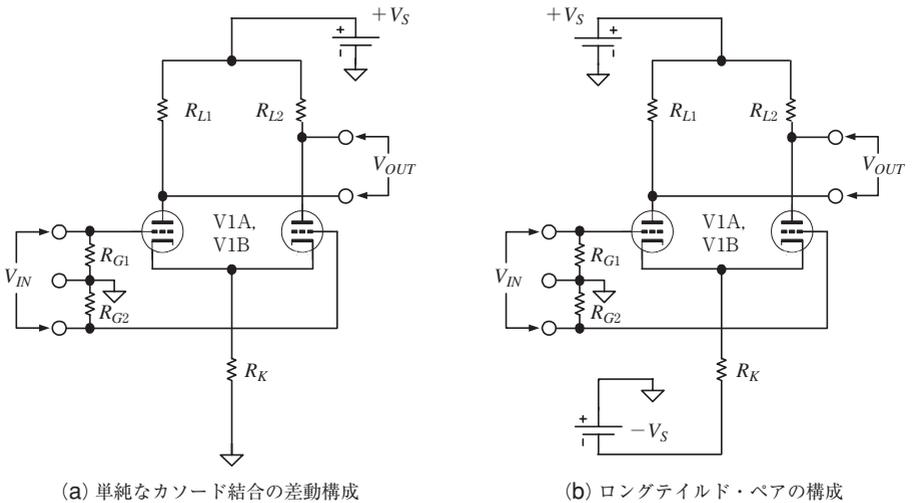
同じく、1937 年にオットー・シュミット (Otto Schmitt) が双五極管を共通カソード形式で使い、双方のカソードを接地した回路について議論しています [文献 (4)]。この回路では、五極管のスクリーン・グリッドの動作について新規性が見られますが、コモンモード入力信号への応答を低減させていません (この点で、前述のマッシュューズの回路と類似している)。

1938 年には、トーニーズ (J. F. Toennies) により、後に「ロングテイルド・ペア (long-tailed pair)」として知られるようになった回路形式の、おそらく最初のもの論じられています [文献 (5)]。この差動入力アンプの形式では、プッシュ・プル入力信号は、入力段の二つのグリッドに印加され、カソードは共通の高抵抗を介して負の高電圧に接続されています。トーニーズの基本回路 [文献 (5) の第 1 図] では双三極管が使われていて、それぞれプレートには 135 V、カソード・バイアスとして -90 V が印加されていました。

図 2-1 に示すように、負の高電圧でバイアスされた高いカソード抵抗の効果により、コモンモード信号に対する応答が減少すると同時に、この段の差動結合が良好になります。これは、図 (b) の回路において、負の高電圧 $-V_S$ へ接続している高いカソード抵抗による効果と、図 (a) の回路での単純なカソード結合の回路を比べることで、直感的に理解できます。図 (a) の回路では、カソード抵抗 R_K は接地されていますが、ここはグリッドに対する共通電位で、プレート電源 $+V_S$ の接地点)。

図 2-1 (b) の回路でのロングテイルド (long-tailed) バイアス方式における定電流動作が、

〈図 2-1〉 差動入力段の比較



コモンモード入力への応答を低減させるうえで有効に働きます（その一方、差動信号への応答は損なわれない）。この後に発表されたより進んだ設計では、五極管の高出力抵抗を利用するため、ロングテイルド・ペアの共通カソード・バイアス回路に五極管を取り込むことさえ行われました。

1938年にシュミットは再び、ロングテイルド・ペア形式のアンプについて論じています [文献 (6)]。その議論の方向は、コモンモード除去比の向上よりは、むしろ回路を位相反転回路として使うことに向けられています。片方の入力を接地して、もう一方の入力をシングルエンドで駆動することで、あい等しいプレート負荷抵抗に位相の反転した信号が発生します。シュミットは多くの発明をしており、この後で再び取り上げることになります。

1939年に、ライオネル・ジョフエ (Lionel Jofeh) は英国特許 529044 で、カソード結合アンプの八つの形式を網羅して示しました [文献 (7)]。

1940年には、ハロルド・ゴールドバーグ (Harold Goldberg) が、完結した多段直結差動アンプを提案しています [文献 (8)]。ゴールドバーグは、電力増幅五極管による、他に例を見ない低電圧差動入力段を使うことで、 $2 \mu V$ の等価入力雑音を得られたと述べています。この業績は独自に成し遂げられたものであり、これまでに述べた他の開発者の業績にも比肩するものです。

1941年にシュミットは差動アンプに関する研究の新たな成果を出版して、かなり詳細な解析を行っています[文献(9)]。そこで、彼は位相反転の特性に関して、ロングテイルド・ベア形式アンプの優位性を明らかにしています。また、彼はカソード-カソード間の共通抵抗を使ってゲイン調整を行う、変形ロングテイルド・ベア形式のアンプについても触れています。その回路では、従来のカソード結合段の場合より2倍高い抵抗により、それぞれのカソードが負にバイアスされています。

ワルサー・リヒター (Walther Richter) は1943年に、カソード・フォロワと差動回路について述べています[文献(10)]。その著作では主として、シングルエンドのカソード・フォロワに焦点を当てていますが、他方でロングテイルド・ベア形式アンプの解析も行っています。

1944年に、再びゴールドバークが、彼が発明した多段差動アンプについて発表しています[文献(11)]。この1944年の設計では、まだ大部分の電源には電池が使用されていますが、追加された五極管が初段用のロングテイルド・ベアのバイアス電流を供給するようになりました。

1944年の著作において、ロバート・メッツァー (G. Robert Mezger) は段間のレベル・シフト結合に新しい手法を導入した差動アンプを示しました[文献(12)]。それまでの回路では、ナイキストのように抵抗によるレベル・シフト回路か、新しくはミラーによるグロー放電管による手法を使っていました。メッツァーの回路では、三極管12J5を定電流源として、レベル・シフト用の素子に使っています。上側につながる固定抵抗との動作により、この構成で広帯域のレベル・シフトが可能になります。差動とコモンモードの両方の帰還を使った設計例では、オーバーオールの良い安定性が得られたと報告されています。プレート電源と、電子管の動作に影響を与えやすいヒータ電源は安定化されています。

オフナーは、1945年に学会誌に送った書簡のなかで、他の差動アンプに関する論文の著者について批判的に述べています[文献(13)]。彼はそのなかで、トーンブースの設計[既出文献(5)]について、「カソードに高抵抗を使った単なる同相負帰還にすぎない」と言っています。オフナーもまた、ブルムレインの特許を見逃していたのです。

1945年にパーナム (D. H. Parnum) は差動アンプ技術を研究した、2部からなる著作を出版しました[文献(14)]。この本では、それまでに発表されたいくつかの設計例を解析し、また、直流結合と交流結合のそれぞれについて、入力から出力までを完全に差動構成としたアンプの設計例を提示しています。

デニス・ジョンストン (Denis L. Johnston) は1947年から始めた差動アンプ設計に関する広範な研究のなかで、完成した設計例を含んだ、設計手法に関する3部からなる著作を出版しました[文献(15)]。この文献は豊富な詳細情報を含んでいるだけでなく、関連する業績についての61点もの参考文献目録をあげていて、重要なものです。

ジョンストンのアンプの設計例では、入力段に双三極管 6CS7 を使用し、そのカソード電流を五極管 6J7G で供給するロングテイルド・ペア形式を使用しています [文献 (15) の図 10a]。2 段目もロングテイルド・ペアを使っていて、コモンモードの帰還がされ、初段に直結されています。各段の電源は安定化されています。

1950 年にパーナムが差動アンプに関して別の著作を発表しています [文献 (16)]。この論文では、ジョンストンの設計例の入力段について批判していて、多段アンプのコモンモード除去を最適化するための必要条件を指摘しています [既出文献 (15)]。

1950 年のビショップ (P. O. Bishop) とハリス (E. J. Harris) の設計は、全体的な見地では上記のジョンストンの業績と似ていると言えます [文献 (17)]。それは、生体計測の分野における多くの設計者の業績を概観したうえで、洗練された設計例を提示しています。この回路 [文献 (17) の第 3 図] では、五極管 954 が入力のカソード・フォロウに使われ、双三極管 6J6 のロングテイルド・ペア形式回路を駆動しています。テイル側の電流源として、初段および続く二つの増幅段で、五極管 12SH7 が使われています。プレート電源は非常に安定化されており、影響を与えやすいヒータ電源も安定化されています。

1950 年に、リチャード・マクフィー (Richard McFee) は単一の双三極管増幅段のコモンモード除去性能を改善するうえで有用な手法を発表しました [文献 (18)]。

ここで述べている電子管差動アンプの歴史について、本書よりすぐれた記録といえる論文の一つが、同じ 1950 年にハリー・グランドフェスト (Harry Grundfest) により著されています [文献 (19)]。また、彼はその論文で、当時の生体計測アンプの使用法について深い考察を展開し、さらに他の差動アンプの業績に関する参考文献を多数あげています。

ここで、ロングテイルド・ペア形式回路の発明について、グランドフェストがオフナー [既出文献 (3)] を認知している点が注目されます。しかしながら、オフナー発表の回路に本当のロングテイルド・ペア回路が使われた…とは同意しにくいところです (その回路ではカソード抵抗が負電源に接続されていない)。オフナーおよびブルムレインが使った共通カソードから接地点に単純に抵抗をつなぐバイアス方法では、通常、数ボルト程度のバイアス電位がかかるだけですし、また、より重要なこととして、抵抗値がおおむねカソード・インピーダンスと同程度になってしまうという点があります。

あいにくと、グランドフェストも、類似の回路をオフナーに先行して発表していたブルムレイン [文献 (2)] を見逃しています。ブルムレインの著作の第 2 図とオフナーの著作の第 3 図を比べれば、バイアス方法という点で、その類似性はあきらかです。

1953 年にバーゲン (C. M. Verhagen) が出した論文 [文献 (20)] では、直流差動アンプの話題に関して、非常に踏み込んだ技術的な議論を行っています。彼は、動作の安定性への影響という観点から電子管アンプ回路について詳しく述べるとともに、電子管の電子物理まで踏み込んで議論しています。この論文には、従来の発表に関する詳細な数式と批評

見本

も含まれています。また、ここまでで述べてきたものを含め、他の多くの論文が項目別に参照されています。

さて、本章のここまでの解説は、OPアンプの設計に影響を与えた直流差動アンプ開発の歴史を導入部分として述べたものです。ごく一部を取り上げたものですので、この話題に関しては他に有用な論文がいくつもあることでしょう。しかしそれでも、ここで解説したことは、安定な直流差動アンプを目指して行われた多くの設計事例について、読者に身近に感じていただくのに役立つものと思います。

2-2 OPアンプとアナログ・コンピュータの開発

先に述べた差動アンプ開発例のなかには、その後、OPアンプへと発展していったものが含まれています。しかし、それ以外にも、非常に重要なアンプの開発がベル研究所をはじめとして、米国および世界中のさまざまな場所で行われました。このOPアンプ開発の物語は、いよいよ最初のOPアンプの応用例となった、アナログ計算機に注目することになります。

1930年代の後半、フォックスボロー社 (Foxboro Corporation) のジョージ・フィルブリック (George A. Philbrick) は、電子管と受動部品を使ってアナログ・プロセス制御のシミュレーション回路を開発していました。彼は、多くの興味深い回路を開発しましたが、そのなかにはOPアンプの前身と呼べるものがありました [文献 (21)]。

実際に彼は、文献 (21) の第3A図に、OPアンプのいくつかの機能をもつ単球電子管回路を提示しています。その直結回路では入出力間の演算関係が成立しており、電圧出力は二つのインピーダンスの比に比例して発生します。この回路 (電池を使用したフローティング電源を使用) は、汎用OPアンプとはいえないものの、実用的なOPアンプの原理のいくつかを実証しているものです。文献 (22) で、パー・ホルスト (Per Holst) は、このフィルブリックの初期の開発成果について述懐しています。その後、10年ほどのうちに、フィルブリックはアナログ・シミュレータで使用される電子管OPアンプや他の部品を製造する、彼自身の会社を起すことになりました (後述)。

しかし、OPアンプの定義を解説しようとする本章の趣旨にそう最初の電子管アンプは、戦時下の1940年代に登場していました。全体の背景となったのは、第二次世界大戦の連合軍用にベル研究所が設計したM9火器管制システム用の構成部品として、このアンプを使用することでした。これらのOPアンプ回路は、正負の電源電圧を使用して、グラウンド共通電圧に対して正負両極の入出力を扱える、汎用的なものでした。その定義どおりに、全体の伝達関数は外部に接続される入力と帰還回路のインピーダンスにより決定されるものです (後に詳述)。

見本

これらの初期のアンプは、特定用途のアナログ計算機の構成要素であり、敵の目標を狙う火砲の正確な照準を計算するよう設計されたものです。このプロジェクトは1940年にスタートし、クラレンス・ロベル (Clarence A. Lovell)、デビッド・パーキンソン (David Parkinson) をはじめとするベル研究所の多くの技術者により進められました。彼らの開発の軌跡は、ヒギンズ (Higgins) 他、あるいはジェームス・スモール (James S. Small) といった人々により詳細に記録されています [文献 (23) (24)]。

このベル研究所での開発プロジェクトは、1941年12月には、T10と呼ばれた火器管制システムのプロトタイプを生み出しました。T10は最初の試作品ですが、のちに生産されるようになって、Western Electric M9として知られるようになりました [文献 (25)]。この開発に関する他の記録として、米国特許2,404,081と2,404,387 [文献 (25)]に加え、ロベルが書いた論文があります [文献 (28)]。これらの特許には、さまざまな用途に向けた、共通的なフィードバック・アンプの設計例が図示されています。

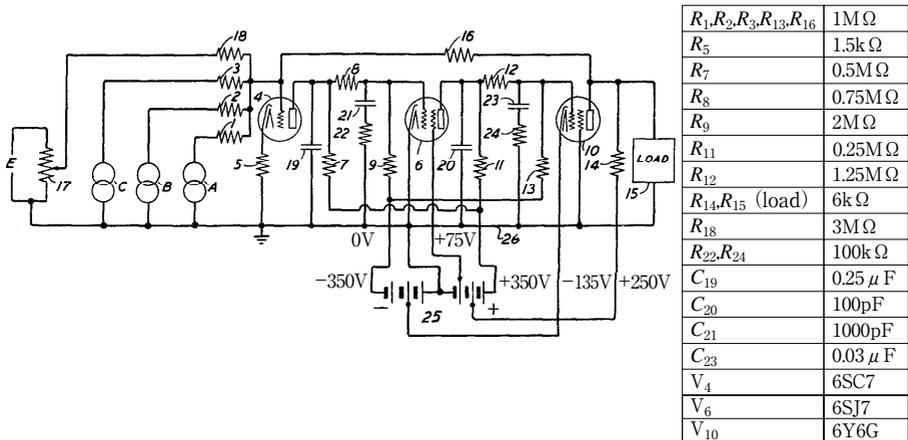
しかしながら、全体的なM9の技術的な成果という点で、おそらくもっとも決定的といえる議論をベル研究所のウィリアム・ボゴウシアン (William Boghosian)、シドニー・ダーリントン (Sidney Darlington)、ヘンリー・オッホ (Henry Och) らによる“Artillery Director (砲弾誘導器)” (米国特許2,493,183) のなかに見ることができます [文献 (29)]。この重要な文献では、アナログ計算機の設計を無数のサブシステムに分解しています。OPアンプは特許図面のいたるところに姿を現して、パッファ、加算器、微分器、インバータなどの機能を果たしています。

●カール・スワーツェルのOPアンプ

OPアンプの詳細という点では、前述のボゴウシアンらによる特許は、別の重要な特許を参照しています。そして、他のたくさんのベル研のM9システム関連特許もまた、同じ特許を参照していて、その特許が後の発展の基礎となる重要性をもっていたことを裏付けています。ここで取り上げたいこの特許とは、ベル研究所のカール・スワーツェル (Karl D. Swartzel Jr.) による米国特許2,401,779, “Summing Amplifier (加算増幅器)” [文献 (30)] です。それは、OPアンプの始まりと言ってさしつかえない設計です。皮肉なことに、ベル研究所の方針により、このスワーツェルの業績は伏せられたままにされました*1。1941年5月1日の日付で受理されたまま、戦時下において封印されてしまった彼の特許が、最終的に公にされたのは1946年のことでした。むろん、同様のことは戦時下に出された他の多くの特許にも言えたことで、現実に他の多くのベル研究所の特許が同じ運命をたど

*1 二章の参考文献でわかるように、ベル研究所は、事実上M9システムに関するすべてのことをBell Laboratories Recordに記録している。しかし、この長大な文献のなかにはOPアンプの回路図が見当たらない！

〈図 2-2〉 加算増幅器の回路図と定数 (ベル研究所による米国特許 2,401,779)



りました。

この特許からひろった部品定数の一覧表とともに、スワーツェルのOPアンプの回路を図2-2に示します。特許の意図は「加算増幅器としての応用に関して」となっていますが、これが汎用で高ゲインのアンプであって、適当な帰還要素を外付けの部品で加えることでさまざまな用途にあわせて動作させることができるのは明らかです。そしてこれこそ、OPアンプの最重要ポイントです。

図の加算アンプの回路において重要な点を、以下に指摘しておきます。

- (1) 入力管4のグリッドに対して最終的に位相反転となる、高ゲイン増幅を達成している直結された3本の電子管。
- (2) タップをとった電池25で供給されている正負電源。

アンプの出力は、負荷15において、共通端子26に対して両極性でスイングします。この用途例において、抵抗 R_{16} は帰還をかけていて、入力抵抗 R_1, R_2, R_3 を介して入力共通端子26との間に印加される三つの信号が加算されます。入力抵抗 R_{18} から入ってくる入力はオフセット調整のために使われます。

特許によるとアンプのゲインは60000倍(95 dB)であり、回路図にあるように6kΩの負荷を駆動することができた点は特筆に値するでしょう。このアンプは、前述のようにタップ電圧を含めて、-350Vの電源で動作します。段間のレベル・シフト回路は、ナイキストによるもので、安定化のためにいくつかのRCネットワークが使われています。

やがて、この基本的な設計に後述するいろいろな変更が加えられました。スワーツェル

の OP アンプは、第二次世界大戦での戦闘において重要な役割を果たした、非常に洗練されたアナログ計算機を生み出すことを可能にしたという点で、真に独創的な発明でした。それはまた、その基本回路構成から派生した、多くのアンプ設計を生み出していくことになりました。

●ベル研究所から見た M9 システム

戦時下での軍事関連技術情報の公開に対する全面的な禁止令により、オリジナルの発明の時点から相当の月日がたってから、初めて明らかにされた多くの発明がありました。OP アンプを含めて、M9 システムの構成要素の細部の多くがこの例に当てはまりました。

それでも、ベル研究所は戦争が終結するまえから、M9 システム関連の開発を記録しつづけていました。1943 年 12 月の記録 (Bell Laboratories Record) には、ブラックのフィードバック・アンプの業績に対しての発明褒賞記録が載っています [文献 (31)]。同じ号とその次の号には、M9 システムの公開とその開発過程についての二つの記事が載っています [文献 (32)]。

コンデンサ、抵抗ネットワーク、精密ポテンショメータといった、いくつかの重要な電子部品の開発についても、記録が残っています [文献 (33) ~ (36)]。

Bell Laboratories Record のなかに、1947 年 4 月のロベル、パーキンソン、クーンの功績に対するメダルの授与式のおりに、M9 システムの設計に言及している箇所があります [文献 (37)]。ベル研究所から見たこの研究の重要性は、開発プロジェクトに関連した著名な人々の名前から想像することができます。すでに述べた人々に加えて、ボーデ (Hendrick Bode)、クロード・シャノン (Claude Shannon)、その他の優秀なベル研究所のメンバが名をつらねていました。

さて、重要な出来事がこの時代に起きていたことにはなりますが、それは後になるまで認識されることはありませんでした。つまり、以上のようにして(まだ名前を付けられていなかったとしても) OP アンプの概念の実用性が実証されたのです… OP アンプの誕生です。

●世界的に見た M9 システム

歴史的に眺めてみると、戦争に勝つために必要とされ、その出現が掛け値なしに何百万もの人間の命に影響を与えたとしても、ロベルとパーキンソン、そしてその他のベル研究所の設計者のなしとげた仕事は非常に重要なものでした。その開発では、アナログ制御計算機を戦争のための火器管制システムに応用し、目標に対して 90% に近いとも言われた高い命中率を達成したのです。SCR584 レーダ・システムに組み合わされた M9 システムは、**見本** 実戦において高い成功率を収めたのでした…それは、まさしく自由主義世界を守るうえで幸運なことでした。