

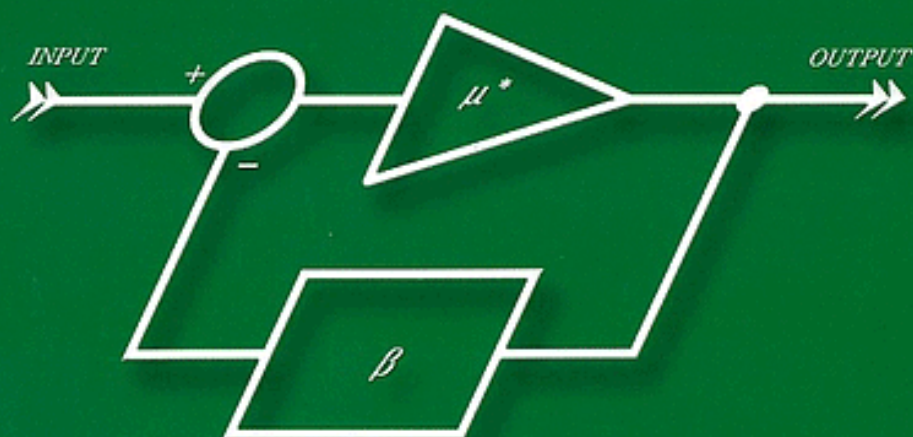
OPアンプの歴史と 回路技術の基礎知識

OPアンプ大全 第1巻



アナログ・デバイス 著

電子回路技術研究会 訳



OPアンプの歴史と 回路技術の基礎知識

OPアンプ大全 (第1巻)

 ANALOG DEVICES アナログ・デバイセズ 著
電子回路技術研究会 訳

本書は下記の出版物を著作権者の許諾に基づいて全5巻に分けて日本語訳したものです。

Op Amp Applications

Copyright © 2002 By Analog Devices, Inc.

Original : Printed in the United States of America (ISBN 0-916550-26-5)

All rights reserved. This book, or parts thereof, must not be reproduced in any form without permission of the copyright owner. Information furnished by Analog Devices, Inc. is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices, Inc. for its use.

Analog Devices, Inc. makes no representation that the interconnections of its circuits as described herein will not infringe on existing or future patent rights, nor do the descriptions contained herein imply the granting of licenses to make, use, sell equipment constructed in accordance therewith. Specifications are subject to change without notice.

謝 辞

本書のような規模の書籍は、多くの人々の協力がなければ完成させることはできません。この“Op Amp Applications”の編纂を通して、多大の貢献、協力を提供してくれた以下の方々に、心からの謝意をおくります。

まず、このプログラムの推進を励まし、助力してくれたアナログ・デバイセズ社 (ADI) にお礼を述べたいと思います。

次に、ADI セントラル・アプリケーション・グループのウォルト・ケスター氏に深く感謝いたします。かれは、ADI での長年にわたるセミナーノート編纂に携わった経験による、多くの知識や助言を惜しみなく提供してくれました。本書の材料となる資料の著者である、ケスター氏とそのグループの方々に感謝いたします。

同じく、多くのコメントや書評を寄せていただいた、ADI フィールド・エンジニアリング・グループとセントラル・アプリケーション・グループのスタッフにお礼を申し上げます。エド・グロカススキ氏、ブルース・ホームマン氏、ボブ・マーウィン氏、そしてアーノルド・ウィリアムズ氏には、多くの有用なコメントをいただきました。加えて、かつて ADI 社のアプリケーション・エンジニアであったウェス・フリーマン氏には、ほとんどの原稿に目を通していただき、有益なフィードバックをいただきました。

ADI 社のダン・シャインゴールド氏には、特に感謝の意を示したいと思います。氏は、本書の内容に対する数え切れないほどの指摘や書評を提供してくれただけでなく、氏が真空管 OP アンプ時代に過ごしたジョージ・A・フィルブリック・リサーチ社 (GAP/R) の頃からの長年にわたる経験をもとにした、多くの示唆にとんだ見識を示してくれました。

このほか、それぞれのセクションの最後に特記してある、個別のコメントなどを提供してくださった多くの協力者の皆さんに感謝します。

ジュディス・ドーヴィル女史には、索引の作成および原稿に対する多くの助言をいただき、感謝しています。

最後に、スライドの準備、タイピング、文章スタイルのデザイン等を行ってくれた W² グラフィックス社に感謝いたします。

ウォルト・ユング (Walt Jung), 2002 年 8 月
Analog Devices Inc. Central Applications Department.

まえがき

オペレーショナル・アンプリファイア、あるいは単にオペアンプ(OPアンプ)と呼ばれる電子回路は、今ではアナログ信号処理のあらゆる場面に利用されています。これほど一般化され、多種類にわたる製品が送り出されているアナログ素子はほかにないでしょう。

この事実は、OPアンプが電子回路システムのなかで、いかに重要な役割を果たしているかを示しています。またOPアンプは、アナログ回路あるいはディジタル/アナログ混在回路のなかで最も基本的な構成要素でもあります。

本書は、米国アナログ・デバイセズ社が発行した2002年版“Op Amp Applications”の内容の一部を和訳したもので、残りの部分も今後逐次、翻訳出版される予定です。原著のChapter構成と本「OPアンプ大全(全5巻)」の各巻の構成の対応については、下記を参照してください。

本書(第1巻)の前半(第1部)では、OPアンプの誕生から現在にいたる開発の歴史を、その回路構成、設計技術を含めて解説しています。また後半(第2部)では、OPアンプの内部構造、動作特性とその回路技術、電圧帰還型OPアンプと電流帰還型OPアンプの特徴、高精度アンプと高速アンプの回路的特徴など、OPアンプの基本について説明しています。

OPアンプの歴史を振り返ることは、現在のOPアンプを実際に使用するうえでは、あまり必要ではないかもしれませんが、しかし、OPアンプの歴史上で初期に活躍した人々の多くがすでに故人となり、記録のうえだけに名を留めるようになりつつある今、彼らの業績から現在にいたるOPアンプの発展を体系的にまとめることは、意義のあることと考えます。本書では、これらの技術開発過程を示す多くの論文、特許、技術書などを参考文献としてあげています。

過去の技術を検討することは決して懐古趣味ではなく、新しいアンプ素子を実現するアイデアのきっかけとなることがあります。たとえば、最近の高速アンプの大きな流れである電流フィードバック・アンプは、決して最近開発されたものではなく、真空管を使用したOPアンプの時代にすでに実用化されていました。コンプリメンタリ・バイポーラという新しい半導体プロセスを得たことにより、ICとして復活したものです。また、最新のモノリシックICとして実用化された、オフセット・ドリフトがほとんどないチョッパ型OPアンプは、かつて真空管OPアンプのドリフトの大きさに苦しんだ技術者が、機械式スイッチング素子(リレー)と組み合わせて実現したアンプ回路を、最新のテクノロジーで作り直したものです。なかにはバラクタ・ブリッジ・アンプのように、現時点でICタイプのOPアンプが性能的に足元にも及ばない微少バイアス電流性能と広同相電圧性能を実現した回路もあり、これは35年以上も前にモジュール型のOPアンプとして製品化され

たものです。本書では、これらの技術的背景についても解説しています。

歴史部分以外の本書で取り上げる OP アンプは、ほとんど集積化された IC タイプのアンプです。後半ではこれらの OP アンプのさまざまな特性と、それを実現するための回路技術、基本的な OP アンプの特性の見かたを解説しています。電源電圧までの信号を扱えるレール・ツー・レール・アンプ、そして電流帰還型 OP アンプ(カレント・フィードバック・アンプ)と電圧帰還型 OP アンプ(ボルテージ・フィードバック・アンプ)の基本回路とその特性について、内部構造を含めて詳しく述べています。OP アンプを利用しようとするとき、これらの基礎知識が手助けとなるでしょう。

OP アンプは、今後もアナログ信号処理回路の基本素子として使われつづけることに間違いありません。OP アンプの構造と動作、およびその使いかた(応用回路、周辺技術)について、本書とその続編が多くのの方の役に立てば幸いです。

最後に、翻訳にあたって多大なご協力をいただいた電子回路技術研究会の方々に感謝いたします。

訳者代表：藤森 弘己

▶ OP アンプ大全(全5巻)の構成と原著との対応

- | | | | |
|-----|-----|----------------|--------------------------------------|
| 第1巻 | 第1部 | …… Chapter - H | Op Amp History |
| | 第2部 | …… Chapter - 1 | Op Amp Basics |
| 第2巻 | 第3部 | …… Chapter - 2 | Specialty Amplifiers |
| | 第4部 | …… Chapter - 3 | Using Op Amps with Data Converters |
| | 第5部 | …… Chapter - 4 | Sensor Signal Conditioning |
| 第3巻 | 第6部 | …… Chapter - 5 | Analog Filters |
| 第4巻 | 第7部 | …… Chapter - 6 | Signal Amplifiers |
| 第5巻 | 第8部 | …… Chapter - 7 | Hardware and Housekeeping Techniques |

目次

第1部 OPアンプの歴史

第1章	イントロダクション	15
1-1	OPアンプの登場まで	15
1-2	ブラックのフィードバック・アンプ	16
第2章	電子管式OPアンプ	21
2-1	差動アンプの技術開発	21
2-2	OPアンプとアナログ・コンピュータの開発	26
	●カール・スワーツェルのOPアンプ	27
	●ベル研究所から見たM9システム	29
	●世界的に見たM9システム	29
2-3	OPアンプの命名	30
2-4	電子管OPアンプの発展	31
	●電子管チョッパ型OPアンプ	32
	●OPアンプの非反転入力の使用	34
	●ジョージ・フィルブリックとGAP/R社	35
	●電子管OPアンプのたそがれ	37
第3章	ソリッドステート技術によるモジュール型およびハイブリッド型OPアンプ	45
3-1	トランジスタの誕生	45
3-2	集積回路の誕生	46
3-3	プレーナ・プロセス	46
3-4	ソリッドステートによるモジュール型/ハイブリッド型OPアンプの設計	47
	●バラクタ・ブリッジ型OPアンプ	51
	●アナログ・デバイセズ社の誕生	53
	●バラクタ・ブリッジ型OPアンプ，モデル3xxシリーズ	53
	●さまざまなOPアンプのカテゴリ	54
	●モデル121型OPアンプ	54
	●アナログ・ダイアログ誌の誕生	55
	●高速FET OPアンプ・ファミリの設計	56



第4章 IC OP アンプ

63

4-1	モノリシック IC による OP アンプの誕生	63
	● μ A709	63
	● LM101	65
	● μ A741	68
	● LM101A	69
	● μ A748	69
	● 1 パッケージに複数の 741 が実装されているタイプ、 汎用単電源タイプ	69
	● AD741 …高精度な 741	70
4-2	スーパーベータ IC OP アンプ… LM108 から OP97 へ	71
	● AD508 と AD517	76
4-3	高精度バイポーラ IC OP アンプ… μ A725 から OP07 ファミリへ	76
	● OP27 と OP37	80
	● OP07 とコンパチブルで単電源/小型パッケージ化	82
4-4	高精度 JFET IC OP アンプ… AD503 から AD820/822/824/823 ファミリへ	83
	● AD711/712/713, OP249 IC OP アンプ	87
	● 電位計用の IC OP アンプ	87
	● 低ノイズ JFET IC OP アンプ AD743/745	90
	● AD820/822/824, AD823 シリーズ JFET IC OP アンプ	90
4-5	高速 IC OP アンプ	91
	● フランク・グッディナフの『エレクトロニック・デザイン』誌における OP アンプの記事	92
	COLUMN 回想 ボブ・ワイドラー…リニア IC の先駆者の人柄	98

目 次

第2部 OPアンプの基礎

第1章 イントロダクション 103

1-1	理想 OP アンプの特性	104
1-2	標準的な OP アンプのフィードバック接続	107
	●非反転増幅回路	107
	●反転増幅回路	110
	●差動増幅回路	112
1-3	理想ではない OP アンプ	
	有限のゲインによって引き起こされる定常誤差	113
	●ノイズ・ゲイン (NG)	114
	●ゲインの安定性	115
	●ループ・ゲイン	116
	●ループ・ゲインの周波数依存性	117
1-4	OP アンプのコモンモード・ダイナミック・レンジ	119
	●出力のダイナミック・レンジ	120
	●入力のダイナミック・レンジ	121
1-5	両電源と単電源 OP アンプの機能的な違い	122
1-6	OP アンプの選定条件	124
	COLUMN 歴史の一場面	126

第2章 OPアンプの回路構成 129

2-1	電流帰還型アンプの基本	130
2-2	真空管を使用した電流帰還型アンプ	132

第3章 OPアンプの構造 137

3-1	単一電源 OP アンプの課題	137
3-2	OP アンプの入力段	140
	●バイポーラ入力段	140
	●バイアス電流補償型バイポーラ入力段	143



● バイアス電流補償型スーパーベータ・バイポーラ入力段	145
● FET 入力段	146
● レール・ツー・レール入力段	148
● 入力の過電圧に関する注意事項を忘れずに	152
3-3 出力段	153
● 出力段のサージ保護	156
● オフセット電圧のトリミング・プロセス	156
3-4 OP アンプのプロセス技術	160

第 4 章 OP アンプの特性仕様

163

4-1 入力オフセット電圧 V_{OS}	163
● オフセット調整 (内部回路による調整)	166
● オフセット調整 (外部回路による調整)	167
● 入力オフセット電圧ドリフトとエージング効果	168
4-2 入力バイアス電流 I_B	169
● バイアス電流の影響の除去 (外部回路)	171
● I_B と V_{OS} による出力オフセット誤差の計算	173
4-3 入力インピーダンス	174
4-4 OP アンプのノイズ・ゲインと信号ゲインの取り扱い	175
4-5 オープンループ・ゲインとオープンループ・ゲインの非直線性	176
4-6 OP アンプの周波数応答	181
● 周波数応答…スルー・レートとフルパワー・バンド幅	182
● 周波数応答…セトリング時間	183
● 周波数応答…電圧帰還型 OP アンプの利得帯域幅積	187
● 周波数応答…電流帰還型 OP アンプ	189
● 帯域幅の平坦度	190
4-7 OP アンプのノイズ	191
● ポップコーン・ノイズ	197
● ノイズの実効値に関する考察	197

目 次

第2部 OPアンプの基礎



●トータル出力ノイズの計算	201
4-8 OPアンプの歪み	206
4-9 同相信号除去比 (CMRR) と電源変動除去比 (PSRR)	207
●電源とデカップリング	211
●電源と消費電流	211

第5章 高精度OPアンプ 213

5-1 高精度OPアンプの直流誤差の解析	215
5-2 チョップ・スタビライズド・アンプ	216
5-3 チョップ・スタビライズドOPアンプのノイズに関する考察	220

第6章 高速OPアンプ 223

6-1 電圧帰還型OPアンプ	224
●コンプリメンタリ・バイポーラ・プロセスにより設計された 電圧帰還型OPアンプ	230
●新しい電圧帰還型OPアンプの構成… カレント・オン・デマンド, 低電力, そしてスルー・レートの改善	234
6-2 電流帰還型OPアンプ	235
6-3 OPアンプの帰還容量の影響	242
6-4 高速の電流-電圧変圧器と反転入力端子の入力容量の影響	245
6-5 電圧帰還型と電流帰還型OPアンプでのノイズの比較	250
6-6 高速OPアンプのDC特性	251

索引	254
----	-----

OPアンプ大全 **第 1 部**
OPアンプの歴史
Chapter-H OP Amp History

イントロダクション	15
電子管式 OP アンプ	21
ソリッドステート技術によるモジュール型 およびハイブリッド型 OP アンプ	45
IC OP アンプ	63

はじめに

第1部のテーマは、オペレーショナル・アンプリファイア (operational amplifier；演算増幅器、以下では「OP アンプ」と略す) の開発の歴史的背景を、わかりやすく解説することです。その内容は、真空管の時代に始まり、今日 (2002 年) に至るまでを含みます。最近の多くの OP アンプ・ユーザにとっては、おそらく集積回路 (IC) の形をした OP アンプの歩みについては馴染みがあることでしょう。しかし、IC ではない半導体 OP アンプについては知る人が少なく、ましてや OP アンプの基礎となった真空管 OP アンプについては、1950 年代、1960 年代に真空管を使った経験のある古くからのエンジニアでも、その歴史的経緯を知る人は大変少なくなりました。第1部では、これらの OP アンプがどのように生まれて改良されてきたかということだけでなく、その誕生を促した重要な要因についても解説します*1。

OP アンプ誕生のためのバックグラウンドは、20 世紀初めにすでに基本的な開発が始まっていました。このなかで二つの重要な発明が、世紀初頭に現れました。最初のものは増幅器ではないのですが、2 個の電極 (エレメント) を内蔵した二極真空管 (diode；ダイオード) で、フレミング (J. A. Fleming) により開発されたので「フレミング・ダイオード (Fleming diode)」と名づけられました [1904 年特許、文献 (1)]。この素子は、エジソンの白熱電灯を一步大きく進歩させたもので、プレートと呼ばれる陽極をフィラメントと同封し、このプレート電位がフィラメント電位より高ければ、フィラメント (カソード) から放出された電子を受け取るという動作をします。この素子は、電子を一方向のみに流すので、整流子として動作します。この特許は、フレミングが 19 世紀後半から続けてきた研究の成果でした。

もう一つの発明は、より増幅という動作に密接なもので、リー・ド・フォレスト (Lee De Forest) が 1906 年に「オーディオン (Audion)」として紹介した、三極真空管 (triode；トライオード) でした。この素子は、信号の増幅を可能にした最初の能動部品です [文献 (2)]。リー・ド・フォレストは、二極管のプレートとフィラメントの間にグリッドと呼ぶエレメントを挿入することにより、この増幅素子を生み出しました。これらの 20 世紀初頭に作られた真空管は、まだいくつもの欠点、弱点をもっていました。ここから近代エレクトロニクスが生まれ、多くの発明が後に続くことになります。

OP アンプにとって、1920 年代から 1930 年代にかけての Bell Telephone Laboratory

*1：この第1部は、実際に OP アンプを利用するうえでは、特に必要のない部分であり、読み飛ばすことも可能である。それでも、歴史の始まり部分を理解すると、現在の素子に対する正当な評価を下すことができ、興味深いバックグラウンドとなることだろう。

(「ベル研究所」として知られている)でのフィードバック・アンプの原理に関する多くの考案が、真の意味での開発を可能にしました。これらの画期的な考案は、1940年代初頭に始まり第二次世界大戦にかけて、最初の世代の真空管 OP アンプ、すなわち真空管による汎用フィードバック・アンプの技術を直接リードしました。

第二次世界大戦後、真空管 OP アンプは、回路的に工夫を加え、改良されて一般の用途に広がっていきました。しかしこれらの真空管 OP アンプは、その成り立ちからして巨大でかさばり、大きな電力を必要としました。十数年がたち、1950年代から1960年代になるとこれらのアンプは、より小型の半導体アンプに置き換えられるようになります。そしてその最後に来た大きな変化は、1960年代に始まった集積回路による OP アンプ IC の開発です。20世紀後半に IC 技術が広く使われるようになると、この動きは加速されていきました。素子の性能は、いくつもの重要なステップを越えて進歩してきたのです。

●初期の OP アンプの定義

第1部に出てくる初期の OP アンプをいまここで定義することは適切ではないかもしれませんが、後の章を読み進めていくために必要なので簡単に説明しておきます。というのは、ごく初期の時代の OP アンプは、われわれが今日 OP アンプとしてよく知っているものと異なる部分があるからです。次の第1章の導入部分では、下記にその意味を説明しているように、より今日的な OP アンプの定義を元にして話を進めています。

ごく初期の OP アンプは、「演算増幅器」すなわち「オペレーショナル・アンプリファイア」という名称では呼ばれてはいませんでした。この名称は、戦後の1947年以降に一般化したものです。

この歴史解説では初期の OP アンプを、その特徴をより明確に表す、汎用、DC 結合、高ゲイン、反転フィードバック・アンプと呼ぶべきかもしれません。もちろん、これでも大まかな定義ですが、よりわかりやすいでしょう。

「汎用」という意味は、このアンプあるいはアンプ群がバイポーラ電源で動作し、信号入出力レンジが0V(グラウンド・レベル)を含んでいるということです。

「DC 結合」応答特性とは、信号の DC レベルから AC レベルにいたるまでを扱うことができるということを示しています。

「高ゲイン」とは、DC ゲインで1000倍(60 dB)以上をもち、規定内の負荷に対してシステム誤差を必要な範囲に収めることができることを示しています。

「反転モード動作」とは、このアンプがフィードバック・アンプであり、信号の入力ノードを一つもち、信号のリターン信号はグラウンドあるいはコモンに対して流れることです。複数の信号がこのポイントで抵抗を介して加算され、フィードバック信号も同じように抵抗を通して接続されます。このシングルエンド動作モードは、今日の一般的な OP ア

ンプと大きく異なるところです。これら初期のフィードバック・アンプの動作はシングルエンド・モード動作のみで、差動入力動作が広く使われるようになるまでは、長年この方式で開発されていました。

「フィードバック・アンプ」は、その帰還素子に使う要素の特性によってさまざまな働きが実現できます。いろいろなアプリケーションに対して、どのようにその機能を満足させるかということについては、このあと本書のなかで取りあげていきます。

さて、これらの予備知識をもって、OP アンプの歴史をひもといていくことにしましょう。

Walt Jung / 訳：藤森 弘己

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ツマス (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

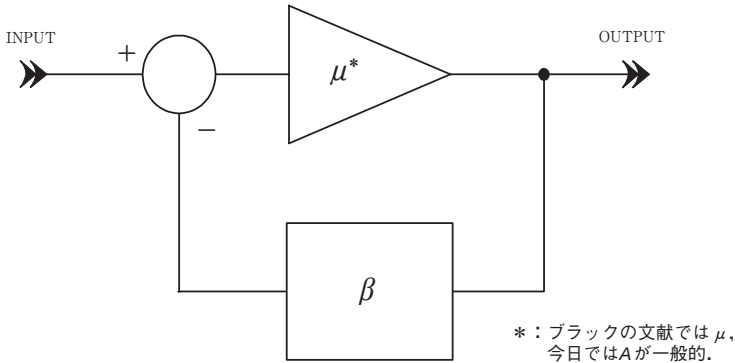
ブラックのフィードバック・アンプの基本的な考えかたは、出力の一部を入力に戻すというアプリケーションにもとづいており、したがって全体のゲインは、元のものより低下します。この動作を適切に設定することができれば、アンプはゲインの安定度や帯域幅が向上し、ひずみも減少させることができ、また入出力インピーダンスを効果的に変更することができます。

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、ポスツ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覧)
- (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。

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ッシュューズ (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)]。マッシュューズのアンプは確かに差動入力を備えているのですが、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に、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。

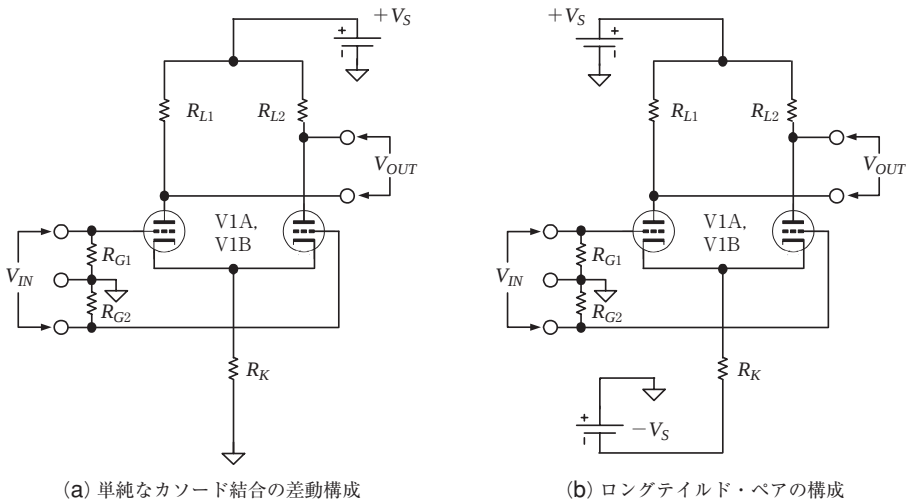
同じく、1937 年にオットー・シュミット (Otto Schmitt) が双五極管を共通カソード形式で使い、双方のカソードを接地した回路について議論しています[文献(4)]。この回路では、五極管のスクリーン・グリッドの動作について新規性が見られますが、コモンモード入力信号への応答を低減させていません(この点で、前述のマッシュューズの回路と類似している)。

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っています。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す(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・ゴールドバーク (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)]。ゴールドバークは、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、 $2\mu\text{V}$ 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、トーンニーズの設計[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・ペアを使っている、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

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。この後、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、彼自身の会社を起こすことになります (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、グラウンド共通電位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)。

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。

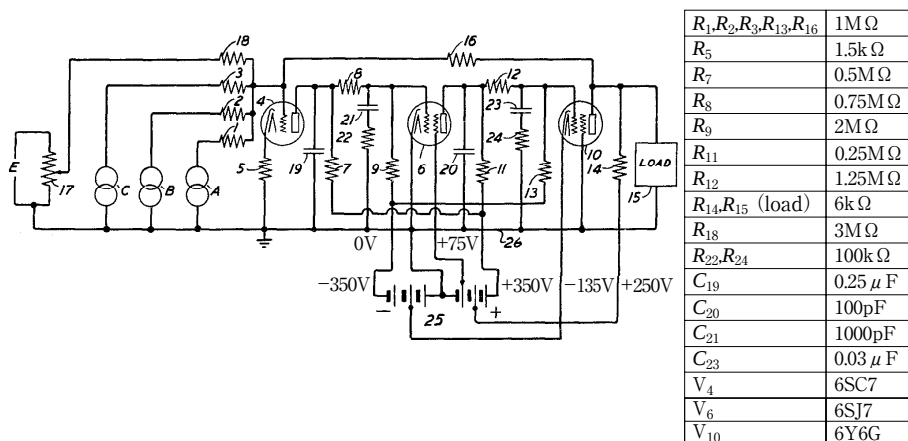
しかしながら、全体的なM9の技術的な成果という点で、おそらくもっとも決定的といえる議論をベル研究所のウィリアム・ボゴウシアン (William Boghosian)、シドニー・ダーリントン (Sidney Darlington)、ヘンリー・オッホ (Henry Och) らによる“Artillery Director (砲弾誘導器)” (米国特許2,493,183) のなかに見ることができます [文献 (29)]。この重要な文献では、アナログ計算機の設計を無数のサブシステムに分解しています。OPアンプは特許図面のいたるところに姿を現して、パッファ、加算器、微分器、インバータなどの機能を果たして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

●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：この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(95dB)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、実戦において大いに成功を収めたのでした…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。

ロバート・ブデリ (Robert Buder) は、第二次世界大戦でのレーダ開発の詳細な物語を書いています。そこで M9 システムの役割について興味深い記述をしています [文献 (38)]。ミンデルの論文 “Datum for its Own Annihilation” [文献 (39)] には、幅広い、他に見られないコンピューティング、制御、そして歴史的な洞察を見ることができます。ミンデルはまた、その第8章で、M9/SCR584 システムの成功について言及しています。

2-3 OP アンプの命名

戦時下、OP アンプの開発はニューヨークのコロンビア大学の研究所においても進められていて、研究責任者のジョン・ラガツィーニ (John Ragazzini) 教授により 1947 年に発表されました [文献 (40)]。この引用回数の多い重要論文は、おそらくオペレーショナル・アンプリファイア (演算増幅器) という言葉を生み出したという点でよく知られているのですが、もちろん、これは今日我々が OP アンプと呼んでいるものです。この論文から、OP アンプの命名に関する部分を引用してみましょう。

「そのアンプは、入力に与えられた複数の電圧について、数学的な演算および計算に相当する動作をするように構成されているので、これ以降、オペレーショナル・アンプリファイアと呼ぶことにする。」

ラガツィーニの論文は、入出力関係の定義式と一緒に、OP アンプのさまざまな使用法の概要を述べています。またこの論文は、M9 火器管制装置となったベル研究所での開発を、特にそこで使用された OP アンプの回路に注目して参考文献にあげています。

前述の論文で取り上げられた開発は、第二次世界大戦後半のコロンビア大学の NDRC Division 7 契約によるものです*2。当時、レーベ・ジュリー (Loebe Julie) はコロンビア大学研究所の聡明な若いリサーチ・エンジニアでした。ジュリーは、契約によるところの “Fire Control Electronics” として、M9 火器管制計算機の改善を目指して、これら初期の OP アンプの開発に力を注ぎました。

伝えられるところでは、ラガツィーニの意にそわない仕事をしたため、ジュリーは Division 7 チームの一員で、アナログ計算機エンジニアであったフィルブリックの指示をうけて開発にたずさわることになりました [文献 (41) (42)]。ジュリーは、6SL7 双三極管のペアを差動入力-差動出力の形式で使った電子管 2 本の OP アンプを設計しました [既出文献 (41)]。しかし、どういう事情があったのか、研究所のボスであるラガツィーニは、

*2：ミンデルの著書 [既出文献 (39)] はその表 6-1 のなかに、1943 年 11 月 15 日から 1945 年の 9 月 30 日まで続き、85000 ドルを費やした契約番号 76, “Fire Control Electronics” の発明者にラガツィーニをあげている。コロンビア大学プロジェクト Division 7 の管理者としては SHC, すなわちサミュエル・コールドウェル (Samuel H. Caldwell) の名があげられている。

ジュリーの OP アンプについて、論文の最後で簡単に触れているにすぎません。

ラガツィーニの論文での OP アンプ回路 [文献 (40) の第 1 図] は、ジュリーの発明した OP アンプ回路 [既出文献 (41)] とは異なるものです。性能の低い例としてあげたと推定しないとすれば、この回路の仕様についてラガツィーニは何も述べていませんので、出典や用途がわかりません。いくつかの点で、その回路が M9 システムに使えるものだったとは思えないのです。

たとえば、文献 (40) の第 1 図のラガツィーニの OP アンプを簡単に調べると、この設計が本当に、もともとの M9 システムの OP アンプと同じ環境で動作するように意図されているのか、疑問が生まれます [既出文献 (30) の第 H-3 図]。1 本の三極管と 2 本の五極管を使ったスワーツェルの 3 段増幅回路では、五極管のうちの 1 本を電力出力段に使用しています。そのため、おそらくラガツィーニの回路は、スワーツェル設計のアンプと同等のゲイン特性にはならないと思われます。なぜなら、3 本のカスケード接続された三極管を使っているからです。また、その回路は 6SL7 を出力段に使ったせいで、300 k Ω の負荷に対してスワーツェルの回路と同等の出力能力をもってはいないと思われます。

2-4 電子管 OP アンプの発展

そのようなことがあったものの、ジュリーの設計した OP アンプは、いくつかの点で注目すべきものです。ロングテイルド構成の 6SL7 双三極管ペアを平衡負荷で使用した優秀な入力段をそなえています。この特徴により、三極管や五極管をシングルエンドで使用した従来の OP アンプ回路に比べて、ドリフト特性が本質的に改善されています。

あとでわかるように、ジュリーの回路が従来のシングルエンド型の入力段設計に優っている真に重要な特徴は、従来は単一の反転入力 (図 2-2 参照) があっただけであるのに対して、二つの入力を用意されたという根本的な事実です。積極的に OP アンプの両方の入力を使うことによって、信号のやりとりをするうえではるかに大きな設計自由度が得られます。実際に、ほぼ 60 年たった今日では、この特徴こそが機能的に完結した OP アンプの証になっているのです。差動入力段構成には、ドリフト性能を改善するだけでなく、OP アンプを使いやすくするうえで計りしれないメリットがあります。しかし皮肉なことに、OP アンプの第 2 の入力が使えるようになるまでには、今しばらく時間が必要だったのです。

大戦中とその終結後に、これ以外のさらに多くの業績が直結アンプの改善についてなされました。ミラー、ギンズトン、アーツといった人達が、ヒータ電圧の変動に対する入力段ドリフトの安定化、段間の結合とレベル・シフトの方法、電源インピーダンスによる相互作用といった点の改善に関して論文を発表しています [文献 (43) ~ (45)]。そのほかの

直流アンプの改善例をバレーとウォールマンの著作に見ることができます[文献(46)]。

1940年代の終わるまでに、OPアンプとアナログ計算機技術にすでに投資を始めた会社がありました。シーモア・フロスト(Seymour Frost)はREACと呼ばれたリープス社(Reeves Instrument Corporation)によるアナログ計算機の開発について述べています[文献(47)]。この計算機は、その根幹としてスワーツェルのM9システムと似た設計のOPアンプを使っています。リープス社の回路では、最初の増幅段はミラー補償された低ドリフト構成の6SL7双三極管に変更されています[既出文献(43)]。

●電子管チョッパ型OPアンプ

しかし、平衡した双三極管を入力段に使ったとしても、依然としてドリフトは初期の電子管OPアンプが引きずる大問題でした。多くのユーザは、現実にはたいいて数Vにもなる入力換算ドリフトを、mVレベルに押さえ込む手段を探し求めました。ドリフトには、電子管のウォームアップによるものと、ランダムで長期的なものの二つの要素があって、どちらも頻繁にOPアンプのゼロ点調整をしなければならぬものです。この問題は、少なくとも部分的には1949年に、ゴールドバーグのチョッパ型OPアンプの発明により解決されました[文献(48)]。

チョッパ型OPアンプでは、第2の高ゲインの交流結合アンプを使っています。そのアンプは、メインのアンプのサイドパスとなるように構成されています。チョッパ回路は、メインの直流アンプの反転入力に交流結合された入力信号経路と、グラウンドとの間を60 Hzあるいは400 Hzの周波数で断続するスイッチで構成されています。スイッチの動作が、微小な直流入力信号を交流信号に断続(チョップ)し、それは大きく(1000倍以上)に増幅されます。チョッパ回路の交流出力は同期検波され、フィルタを通り、メイン・アンプの第2の入力に加わります。結果として得られる複合アンプでは、メイン・アンプでのドリフトは、およそチョッパのゲインのオーダーで減少します。

チョッパ技術で安定化することで、OPアンプのオフセット電圧は数 μV に抑えることができ、長期のドリフト電圧も手でゼロ調節を取りなおす必要がないほど十分に小さくなります。もう一つ大事な利点は、チョッパ回路により得られる追加のゲインだけ、直流と低周波のゲインが増大することです。このことで、チョッパ・アンプの直流オープンループ・ゲインは、100000倍(100 dB)を容易に越えることができます。たとえば、文献(8)のゴールドバーグのアンプでは、150000000倍(163 dB)の直流ゲインをもっています。

上で述べたことの結果として、チョッパ・アンプの直流ゲインに関連する精密度は、追加されるオープンループ・ゲインのおかげで、通常のOPアンプよりはるかに高いものです。この基本的なメリットは、オフセット、ドリフトがゼロという動作特性とあいまって、チョッパ安定化電子管OPアンプを精密なアナログ装置の定番にしました。一般的に言っ

て、この点は今日の IC 化されたチョッパ型 OP アンプに関しても変わることがありません(今日のチョッパ・アンプは異なる回路手法により実現されているが、直流オフセット、ドリフト、ゲインにおいてやはり大きな改善効果をもたらしている)。

しかし、これらの初期のチョッパ・アンプには、いくつかの重大な問題点がありました。上で述べた基本的なチョッパ回路の構成では、直流オフセットの補正信号を加えるために、双三極管ペアによる OP アンプの非反転入力はどうしても使い切ってしまうのです。したがって、初期のチョッパ型 OP アンプはすべて反転増幅だけで使用されました。やがて、この制約を打ち破る改善されたチョッパ・アンプのアーキテクチャが開発されたことで、反転/非反転のどちらの動作でも非常に高い直流精度が達成できるようになりました。

第二の制約は、はじめに使用されたチョッパ装置が、機械式スイッチ(パイプレータ)であったということです。そのため、それらは一緒に使われている電子管よりもしばしば先に故障しがちでした。やがて、ソリッドステート化されたチョッパ装置が開発されることになるのですが、電子管式チョッパ・アンプにはその恩恵はおよびませんでした。

1952 年に、リープス社のフランク・ブラッドレイ(Frank Bradley)とロウレイ・マッコイ(Rawley McCoy)は、M9 システムの OP アンプの設計のさらなる派生回路について議論しています[文献(49)]。ブラッドレイ-マッコイの回路では、M9 型の構成に似た回路(ただし双五極管を初段に使用)にチョッパ側路を設けて強化しています。最終的なアンプの直流ゲインは、30000000 倍(150 dB)に達し、ドリフトとオフセット電圧は非常に低くなっています。

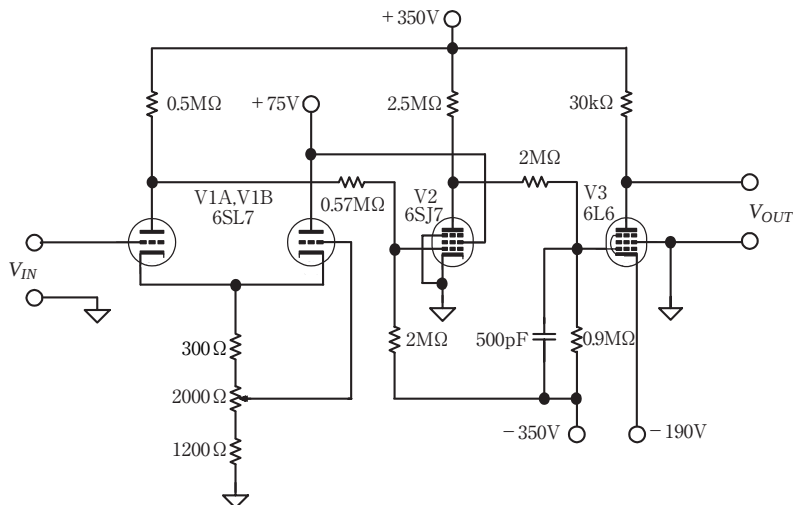
1950 年代の中ごろから終わりにかけて、多くの会社がチョッパ型 OP アンプを使ったアナログ計算機を提供しはじめました。しかし、これは 1950 年代初期にチョッパ・アンプが使えるようになってすぐのことではなく、しばらく後になってのことです。

1950 年の直後、グラニーノ(Granino)とテレサ(Theresa)は、一連のアナログ計算に関する教科書の最初のものとなる“Electronic Analog Computers”[文献(50)]を出版しています。この本は、1956 年発行の第 2 版とともに、初期の OP アンプ・ユーザが標準的な教科書として参考にする名著となりました。第 1 版の第 5 章の OP アンプの例には、いくつかのチョッパ安定化アンプの例が取り上げられていて、ゴールドバーグの業績についても述べられています。1956 年の第 2 版の時点では、チョッパ・アンプが事例の多くを占めるようになりました。

コーン達による“Electronic Analog Computers (第 1 版)”で示された回路のなかには、M9 システムのためにベル研究所により設計された OP アンプの後期バージョンがあります。図 2-3 に示すように、この回路には明らかに画期的な点があります。

このバージョンでは、入力段が三極管 1 本から双三極管に変えられており、安定度を改善するためにミラー補償されています(2 k Ω の可変抵抗器で調整)。詳細に比較すると、

〈図 2-3〉 ベル研究所で設計された後期型の M9 システムの OP アンプ



フロストのアンプ [既出文献 (47)] の構成は、この M9 システムの OP アンプとほぼ同一であることがわかります。そして図 2-2 のおおもたであるスワツェルの設計と比較すると、さらに交流補償ネットワークに微妙な違いが見つかります。

● OP アンプの非反転入力の使用

この当時、まだ変化が見られなかった点に、OP アンプの入力が一つしか使われていなかったことがあります。コーン達の著作 [既出文献 (50)] にある回路例は、すべて片方の入力のみを使った並列帰還タイプです。実際には、この本に載っていた OP アンプ回路例のいくつかは、平衡した双三極管の入力部をもっていたのですが、現実の実用例はまだ反転増幅回路だけに限定されていました。図 2-3 のような回路構成に目をやると、コモンモード入力を加えることが困難であったことがわかります。このアンプは、そのような信号を扱うようには設計されていないのです。この点はやがて改善されるのですが、すぐにそうなったわけではありません。

もちろん、OP アンプがあまり非反転増幅モードで使われなかったことには、無理からぬ技術的な理由がありました。たぶん、その最大の理由は、多くの用途で必要とされる ($\pm 100\text{ V}$ というような) 広いコモンモード電圧範囲で OP アンプを動作可能にすることが非常に大変であったという事実でしょう。これには、初段の大々的な再設計が必要となることに加え、まずはチョッパによる安定化手法も捨てざるをえないでしょう。

それにもかかわらず、OP アンプを非反転モードで使った初期の例として、1951 年に特許となったオマー・パターソン (Omar Patterson) による回路があります [文献 (51)]。パターソンの特許は、大規模なアナログ計算回路の配列構成に関するものではありませんでしたが、それらには特許の第 1 図に示されているように、同一構成の OP アンプを用いた構成が使われました。

このパターソンの設計では、完全に平衡化した双三極管によるフロントエンドを使い、そのロングテイルド形式になったカソードの電流は三極管により決められていました。平衡したプレート負荷と安定化されたカソード電流により、この回路構成は良好なコモンモード応答を示し、かなり広いレンジのコモンモード電圧に対処することができたと思われます。この OP アンプは、10000 倍 (80 dB) のゲインをもったと言われますので、まずまずの精度で使用できたでしょう。

パターソンは特許のなかで、この OP アンプ (特許の第 10 図) を使ったボルテージ・フォロウの概要についても述べています。この回路は 100 % の帰還をかけた極限ではゲインは 1 となり、非常に高い入力インピーダンスを示します。これは、性能を改善したカソード・フォロウとして使えることを意味します。特許から直接引用すると、「この回路の有利な点は、非常に出力インピーダンスが低く、それが電子管の特性にはほとんど影響されないということにある」と述べています。

● ジョージ・フィルブリックと GAP/R 社

第二次世界大戦後、フィルブリックもまた、OP アンプの開発を継続していました。彼は、ほどなく自分の名前を冠した会社 George A. Philbrick Researches, Inc. (GAP/R) を 1946 年に設立しています。フィルブリックの業績は、OP アンプ技術の開発における多くの点で、大きな貢献となりました。彼の会社は、電子管技術の時代にとどまらず、シリコン時代にはいっても成長を続けることになります。

GAP/R 社を設立してまもなく、フィルブリックは K2-W として知られる市販部品としての OP アンプを世界で初めて発表しました。この 8 ピン・オクタール・ソケットのプラグイン式 OP アンプ・モジュールは 1952 年に開発され、1953 年の 1 月に発売されました [文献 (52)]。20 ドルで販売されたこの OP アンプの外観を写真 2-1 に、回路を図 2-4 に示します。

K2-W では 2 本の 12AX7 双三極管を使っていて、そのうち 1 本はロングテイルド形式の入力段になっていて、入力において完全な差動動作をしています。±300 V 電源で動作している K2-W では、入力段の 220 k Ω のテイル抵抗が -300 V 電源に接続されていて、ロングテイルド・ペア形式の動作条件を満たしています。

残りの 12AX7 双三極管の半分は 2 段目の増幅段として動作していて、8355037 (通常は

サイライト素子) をレベル・シフト用に使っています。そして残った 12AX7 のセクションをカソード・フォロウ出力段としてドライブします。K2-W の全体のゲインは、150 k Ω の抵抗器を経由して 2 段目のカソードに正帰還をかけることで増大されています。

± 300 V 電源を使って 4.5 mA で動作することで、K2-W は入力と出力の双方で ± 50 V の信号レンジを達成しています。直流ゲインは標準で 15000 倍であり、全体の回路は扱いやすいプラグイン式として、オクタ管ソケットを使ったパッケージに収納されています。

電子管 OP アンプの製造会社のいくつかは、チョッパにより安定化したアドオン・ユニットを提供していました。GAP/R 社の製品では、GAP/R K2-P がこれになります。このユニットは、K2-W と一緒に使うことで、低ドリフト、ハイゲインを併せもった OP アンプを構成します [文献 (53)]。

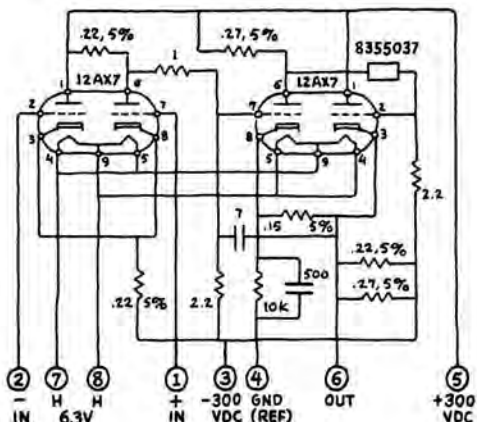
GAP/R 社の K2-W と関連するアンプに関する 1956 年版のマニュアルは非常な人気を博し、1963 年までに少なくとも 10 版を重ねました。これで GAP/R 社はいち早く OP アンプの応用情報の優れた業界標準を確立することになりました [既出文献 (53)]。GAP/R 社はその製品について有益な応用資料を作っただけでなく、アナログ計算に関する定期雑誌 “Lightning Empiricist” も刊行しました。それには技術的な記事と新製品情報が掲載されました。

また、GAP/R 社は現在、一連の復刻版の出ている名著 “Palimpsest” [文献 (54)] を刊行しました。フィルブリックこそが、まぎれもない OP アンプ創出の父であったと考えて

〈図 2-4〉 GAP/R K2-W OP アンプの回路図 (元 GAP/R 社員の Dan Sheingold の好意による…回路定数は M Ω と pF)



〈写真 2-1〉 GAP/R K2-W
OP アンプの外観



いる研究者もいます。たとえば、ローデル (Roedel) は彼の著作 “An Introduction to Analog Computers” [既出文献 (54)] のなかで、フィルブリックとロベルに対して、最初に OP アンプを使いこなしたと認知を与えています。

GAP/R 社が電子管とソリッドステートの双方の OP アンプについて、最上のドキュメントと応用サポートを提供したということもまた、異論のないところです。多くの OP アンプの基本原理は普遍的なものであるため、GAP/R 社のアプリケーション・ノートに注ぎ込まれた多くの技術的知識は、それが書かれた 1950 年代と同様に今日においても有用です。この最上の例としてあげられるのは、少し後に発行されたダン・シェインゴールド (Dan Sheingold) による名著、GAP/R 社の 1965 年版の OP アンプ文献 “Applications Manual for Computing Amplifiers” [文献 (55)] であるといえます。

この著作 (それとおそらくは、コーン達の “Electronic Analog Computers”) を武器として、1960 年代後半の OP アンプのユーザ達は、OP アンプ回路の応用に挑戦する十分な準備が整ったのです。これは、アナログ計算に関するだけでなく、OP アンプがその後見出していった膨大な応用分野のすべてについて言えることでした。

●電子管 OP アンプのたそがれ

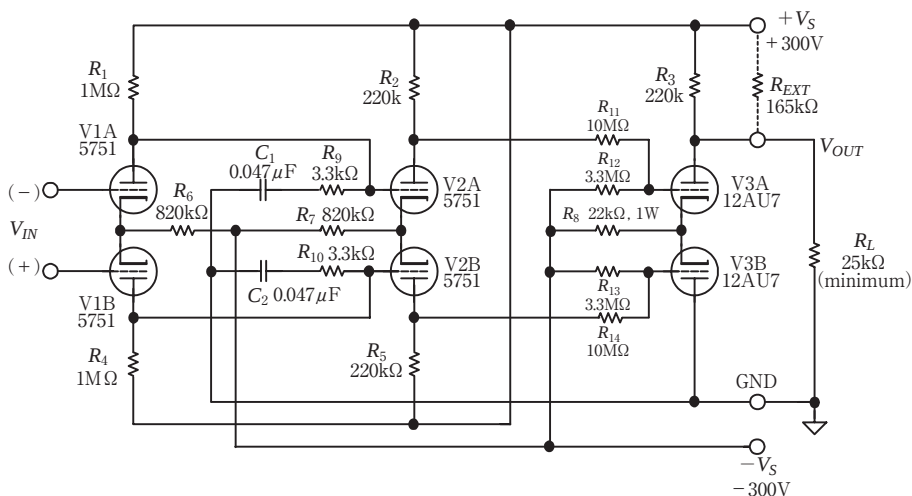
1950 年代の後半と 1960 年代の前半において、少なくとも内部回路的には、電子管 OP アンプは技術的洗練の頂点にほぼ達しました。もちろん、パッケージングと形状寸法の問題は、システム設計者に訴求するうえでの大きなポイントであり、この領域での改善が図られました。

図 2-5 に示すのは、3 本の 9 ピン・ミニチュア双三極管を使った興味深い設計例です。このコンパクトな設計は、Op Amp Labs のベラ・ロスマンディ (Bela "Bel" Losmandy) によるもので [文献 (56)]、彼はその後 1956 年に Micro-Gee Products, Inc. に移っています [文献 (57)]。

この回路には、興味深い点があります。第一に、12AU7 の出力段にいたるまで、完全に差動化されています。これにより、小さな誤差でコモンモード入力電圧を扱えるようになっていて、ドリフト特性が改善されています。また、お気づきのように、 V_1 - V_2 の直結差動回路のあとには、一つ (2 回路) のレベル・シフト回路があるだけです。これでゲインロスが最小ですみ、全体の性能を改善しています。アンプ全体としては、 $\pm 300\text{ V}/8\text{ mA}$ で動作し、 $25\text{ k}\Omega$ 負荷で動作して 10000 倍以上のゲインをもっています。

1950 年代後半と 1960 年代に、OP アンプ開発の物語を記した文献がさらに二つ発表されました。一つは、1955 年のコニグスバーグ (Königsberg) による、開発史を要約した長い論文です [文献 (59)]。もう一つは、1962 年のアナログおよびデジタル指向のコンピューティング・ハンドブックであるハリー・ハスキー (Harry Husky) とグラニーノ・コ

〈図 2-5〉 Micro-Gee Products, Inc.のロスマンディによる全差動化 OP アンプ



ーン (Granino Korn) による “Computer Handbook” です。この本はおそらく電子管 OP アンプへの最後の貢献とも言えるもので、詳細な設計情報を豊富に載せています。

1960 年代が始まるまでに、ソリッドステート技術はすでに発展途上にありました。電子管 OP アンプの時代は終わりを告げようとし、まもなく、より小さくローパワーなソリッドステート素子が電子管に代わって、OP アンプ・アプリケーションの主役になりました。

◆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)

・差動アンプの技術開発

- (1) B. H. C. Matthews, "A Special Purpose Amplifier", Proceedings of the Physiological Society, Vol.81, March 1934, pp.28 ~ 29. (双三極管を使った差動アンプで、高抵抗で接地された共通カソードでバイアスされ、出力が AC 結合されている)
- (2) A. D. Blumlein, "Improvements in or Relating to Thermionic Valve Amplifying Circuit Arrangements", UK Patent 482,740, 申請日：July 4, 1936, 交付日：April 4, 1938. (双三極管を使った差動アンプで、基本形である、接地した抵抗によりバイアスした共通カソード形式、入出力が AC 結合されている)
- (3) Franklin Offner, "Push-Pull Resistance Coupled Amplifiers", Review of Scientific Instruments, Vol.8, January, 1937, pp.20 ~ 21. (交流結合された、カスケード接続の差動アンプであり、双三極管の共通カソードが高抵抗を通して接地されている)
- (4) O. H. Schmitt, "A Simple Differential Amplifier", Review of Scientific Instruments, Vol.8,

No.4, April, 1937, pp.126 ~ 127. (双五極管を使った差動アンプで、基本形である、接地された共通カソード形式、プレートとスクリーン・グリッドが接続され、シングルエンドで出力が DC 結合されている)

(5) J. F. Toennies, "Differential Amplifier", Review of Scientific Instruments, Vol.9, March, 1938, pp.95 ~ 97. (差動増幅回路で、共通カソード形式で三極管と五極管を使ったもの。高抵抗を介して負電源に接続されている)

(6) O. H. Schmitt, "Cathode Phase Inversion", Journal of Scientific Instruments, Vol.15, No.3, 1938, pp.100 ~ 101. (入力がひとつのインバータとして提示された回路であるが、DC 結合された差動入力/差動出力アンプの構成である。双三極管の共通カソードが、高抵抗を介して負電源に接続することでバイアスされている)

(7) Lionel Jofeh, "Improvements in Electric Circuits Comprising Electronic Discharge devices", UK Patent 529,044, 申請日: May 9, 1939, 交付日: Nov. 13, 1940. (カソード結合の仕方のバリエーションを含んだ、双三極管、双五極管使用の差動アンプ回路のさまざまな形式の一覧)

(8) Harold Goldberg, "A High-Gain DC Amplifier for Bio-Electric Recording", Transactions AIEE, Vol.59, January 1940, pp.60 ~ 64. (生体医学の研究のための、完全に差動化された、多段構成、直結、高ゲイン・アンプ。コモン・モード感度を減少させるための共通カソード・バイアス抵抗の使用について説明している)

(9) O. H. Schmitt, "Cathode Phase Inversion", Review of Scientific Instruments, Vol.12, No.11, November 1941, p.548. (このまえの同一タイトルの著作を発展させたもの。DC 結合、差動入力/差動出力アンプであり、双三極管の共通にしたカソードを高抵抗で負電源に接続してバイアスしている)

(10) Walther Richter, "Cathode Follower Circuits", Electronics, November 1943, pp.112 ~ 117, p.312. (Long-Tailed pair 形式を含む、さまざまなカソード・フォロワの解析)

(11) Harold Goldberg, "Bioelectric-Research Apparatus", Proceedings of IRE, Vol.32, June 1944, pp.330 ~ 336. (別のタイプの生体医学の研究用の差動、多段構成、直結、ハイゲイン・アンプ。Long-Tailed pair 形式での五極管のバイアス抵抗の使用の説明をしている。フロントエンドが電池動作になっている)

(12) G. Robert Mezger, "A Stable Direct-Coupled Amplifier", Electronics, July 1944, pp.106 ~ 110, p.352, p.353. (安定で、高ゲイン、差動入力/差動出力、直結アンプの回路。新しい技術として能動素子による段間接続を使っている)

(13) Franklin Offner, "Balanced Amplifiers", Proceedings of IRE, Vol.33, March 1945, pp.202. (他の差動アンプに関する論文への批評)

(14) D. H. Parnum, "Biological Amplifiers, Parts 1 and 2", Wireless World, Nov. 1945, pp.337 ~ 340, and Dec. 1945, pp.373 ~ 376. (さまざまな差動アンプの技術に関する調査であり、多段、AC 結合アンプの設計例を含む)

(15) Denis L. Johnston, "Electro-Encephalograph Amplifier, Parts 1-3", Wireless Engineer, August 1947, pp.231 ~ 242, Sept. 1947, pp.271 ~ 277, October 1947, pp.292 ~ 297. (さまざまな生体計測用差動アンプ技術にかんする包括的なまとめ。DC 結合と AC 結合双方について、豊富な実例回路を含んでいる。61の参考文献をあげている)

(16) D. H. Parnum, "Transmission Factor of Differential Amplifiers", Wireless Engineer, April 1950, pp.125 ~ 129. (差動アンプにおけるコモンモードと差動信号のレスポンスに関する解析)

(17) P. O. Bishop, E. J. Harris, "A DC Amplifier for Biological Application", Review of Scientific Instruments, Vol.21, No.4, April 1950, pp.366 ~ 377. (コモン・モード帰還、能動差動ペア電流源、入力シールドのブートストラップ、電源安定化などを取り入れた、非常に洗練された差動増幅システム。多くの参考文献に言及している)

(18) Richard McFee, "Improving Differential Amplifier Rejection Ratio", Review of Scientific Instruments, Vol.21, No.8, August 1950, pp.770 ~ 771. (帰還を変更することにより標準的な双三極管差動増幅段のコモンモード除去比を改善した)

(19) Harry Grundfest, "Biological Requirements for the Design of Amplifiers", Proceedings of the IRE, Vol.38, September 1950, pp.1018 ~ 1028. (生体計測に必要なアンプの仕様に関する概要, 差動アンプの開発の歴史についての解説を含む)

(20) C. M. Verhagen, "A Survey of the Limits in D.C. Amplification", Proceedings of the IRE, Vol.41, May 1953, pp.615 ~ 630. (DCの安定性に影響する電子管と回路定数の双方に関する技術的議論)

(21) George A. Philbrick, "Designing Industrial Controllers by Analog", Electronics, June 1948. (図3bは初期のアナログ計算回路の例)

(22) Per A. Holst, "George A. Philbrick and Polyphemus - The First Electronic Training Simulator", IEEE Annals of the History of Computing, Vol.4, No.2, April 1982, pp.143 ~ 156. (1930年代のおわりにGeorge A. PhilbrickがFoxboroで開発したアナログ計算回路)

(23) H. C. Higgins, et al, "Defense Research at Bell Laboratories: Electrical Computers for Fire Control", IEEE Annals of the History of Computing, Vol.4, No.3, July 1982, pp.218 ~ 236. また次も参照のこと; M. D. Fagen, Ed., A History of Engineering and Science in the Bell System, Vol.2, "National Service in War and Peace, 1925-1975", Bell Telephone Laboratories, 1978, ISBN 0-0932764-001-2. (ベル研究所における, さまざまな火器管制アナログ計算機の開発のまとめ. OPアンプとフィードバック部品を含んでいる. このIEEEの記事は, さらに広範で詳細な, ベル電話研究所の書籍からのリプリント版である)

(24) James S. Small, "General-Purpose Electronic Analog Computing: 1945-1965", IEEE Annals of the History of Computing, Vol.15, No.2, 1993, pp.8 ~ 18. (初期のOPアンプについての議論を含む, アナログ計算についての概要)

(25) David A. Mindell, "Automation's Finest Hour: Bell Labs and Automatic Control in World War II", IEEE Control Systems, December 1995, pp.72 ~ 80. (ベル研究所におけるT10コンピュータ・システムとM9火器管制装置の開発に関する記録)

(26) C. A. Lovell, et al, "Artillery Predictor", US Patent 2,404,081, filed May 1, 1941, issued September 24, 1946. (リポート, 反転, サミング, そして微分の機能を果たすOPアンプを使ったアナログ計算機における数学)

(27) C. A. Lovell, et al, "Electrical Computing System", US Patent 2,404,387, filed May 1, 1941, issued July 23, 1946. (制御のためにOPアンプを用いたアナログ計算機システム)

(28) C. A. Lovell, "Continuous Electrical Computation", Bell Laboratories Record, 25 March, 1947, pp.114 ~ 118. (T10とM9システムのさまざまな火器管制アナログ計算回路の概要. 多くの図でOPアンプが使用されている)

(29) W. H. Boghosian, et al, "Artillery Director", US Patent 2,493,183, filed May 21, 1942, issued Jan. 3, 1950. (制御のためにOPアンプを用いた火器管制システム)

(30) K. D. Swartzel, Jr., "Summing Amplifier", US Patent 2,401,779, filed May 1, 1941, issued July 11, 1946. (サミング・アンプとして用いられた最初のOPアンプ)

(31) Recognition of Harold Black, "Historic Firsts: The Negative Feedback Amplifier", Bell Laboratories Record, Vol.22, No.4, December 1943, pp.173. (Blackの負帰還アンプの発明についてベル研究所が与えた顕彰)

(32) "Electrical Gun Director Demonstrated", Bell Laboratories Record, Vol.22, No.4, December 1943, pp.157 ~ 167. 次も参照のこと; "Development of the Electrical Director", Bell Laboratories Record, Vol.22, No.5, January 1944, pp.225 ~ 230. (M9火器管制システムの実

証と開発に関するベル研究所の記録)

(33) J. R. Weeks, "Polystyrene Capacitors", Bell Laboratories Record, 24 March, 1946, pp.111 ~ 115. (電子アナログ計算機の部品としての新しいコンデンサ用誘電体膜の開発)

(34) E. C. Hageman, "Precision Resistance Networks for Computer Circuits", Bell Laboratories Record, 24 December, 1946, pp.445 ~ 449. (電子アナログ計算機のための精密抵抗ネットワークの開発)

(35) C. Pfister, "Precision Carbon Resistor", Bell Laboratories Record, 26 October, 1946, pp.401 ~ 406. (精密カーボン抵抗)

(36) D. G. Blattner, "Precision Potentiometers for Analog Computers", Bell Laboratories Record, 32 May, 1954, pp.171 ~ 177. (電子アナログ計算機で使用する精密巻き線ポテンシオメータの開発)

(37) Recognition of M9 Designers C. A. Lovell, D. B. Parkinson, and J. J. Kuhn, "Medals for Merit", Bell Laboratories Record, Vol.27, May 1947, p.208. (1947年4月8日にM9システムの設計者に与えられた功績記念メダルは、米国で市民に対する最高の賞である)

(38) Robert Buder, The Invention That Changed the World, Simon and Schuster, 1996, ISBN : 0-684-81021-2. (主としてMIT レーダ実験室チームに焦点を当てた、第二次世界大戦中のレーダの開発に対する優れた記録。M9 火器管制システムを SCR-584 レーダとしてまとめあげる過程と優れたシステム動作に関する物語を含む)

(39) David A. Mindell, "Datum for its Own Annihilation", Feedback, Control and Computing 1916-1945, PhD thesis, MIT, May 2, 1996. (計算制御システムの歴史的な調査の記録。この著作の第8章の「レーダとシステム・インテグレーション」ではベル研究所の T10 と M9 火器管制装置プロジェクトについて述べている)

・ OP アンプの命名

(40) John R. Ragazzini, Robert H. Randall, and Frederick A. Russell, "Analysis of Problems in Dynamics by Electronic Circuits", Proceedings of the IRE, vol.35, May 1947, pp.444 ~ 452.

(OP アンプの利用法に関する概要であり、はじめてその用語をきちんと定義している)

(41) George Rostky, "Unsung Hero Pioneered Op Amp", EE Times, March 24, 1997, or, <http://www.eetonline.com/anniversary/designclassics/opamp.html> (生きているリンク、第二次世界大戦中のコロンビア大学の Loebe Julie による OP アンプの開発の記録であり、Ragazzini の論文の脚注で触れられている。Julie の OP アンプの回路図が含まれている)

(42) Bob Pease, "What's All This Julie Stuff, Anyway?", Electronic Design, May 3, 1999, or, <http://www.elecdesign.com/1999/may0399/pease/0503bp.shtml> (ダウンロードリンク、41 と同様の第二次世界大戦中のコロンビア大学の Loebe Julie による OP アンプの開発の記録。Ragazzini の論文の脚注で触れられている)

・ 電子管 OP アンプの発展

(43) Stewart E. Miller, "Sensitive DC Amplifier with AC Operation", Electronics, November 1941, pp.27 ~ 31, pp.106 ~ 109. (ヒータ電圧の変動に対するカソード補償、グロー管を使った段間結合、商用電源で動作する安定な直流電源などを使った、安定で高ゲインの直結アンプの設計例)

(44) Edward L. Ginzton, "DC Amplifier Design Techniques", Electronics, March 1944, pp.98 ~ 102. (直結アンプを改善するためのさまざまな設計手法)

(45) Maurice Artzt, "Survey of DC Amplifiers", Electronics, August 1945, pp.112 ~ 118. (高い安定度を重視した、シングルエンドと差動の双方の直結アンプの設計に関する調査)

- (46) George E. Valley, Jr., Henry Wallman, Vacuum Tube Amplifiers, MIT Radiation Labs Series No.18, McGraw-Hill, 1948. (古典的な 第二次世界大戦での Radiation Lab 開発チームによる教科書であり, John W. Gray による第 11 章では直結アンプについて扱っている)
- (47) Seymour Frost, "Compact Analog Computer", Electronics, July 1948, pp.116 ~ 120, p.122. (M9 システムの OP アンプと似た回路であった計算アンプとして使われた, Reeves Electronic Analog Computer [REAC] の説明)
- (48) E. A. Goldberg, "Stabilization of Wide-Band Direct-Current Amplifiers for Zero and Gain", RCA Review, June 1950, pp.296 ~ 300. 次も参照のこと; "Stabilized Direct Current Amplifier", US Patent 2,684,999, filed April 28, 1949, issued July 27, 1954. (電子管 OP アンプのオフセット電圧, ドリフト, ゲイン・エラーを, AC 結合した並列信号経路, 同期検波, DC 信号再注入などの手段で低減したシステム. つまり, これはチョッパ安定化 OP アンプである)
- (49) Frank R. Bradley, Rawley McCoy, "Driftless DC Amplifier", Electronics, April 1952, pp.144 ~ 148. (M9 システムの OP アンプと部分的に類似した回路である, 計算アンプを用いた Reeves A-105 Analog Computer の説明. 低ドリフトのためにチョッパで安定化されている)
- (50) Granino Korn and Theresa Korn, Electronic Analog Computers, McGraw-Hill, 1952. (アナログ計算の用途と手法に関する古典的な初期の著作. 第 5 章で, 他の多くの設計例や設計の詳細とともに, ベル研究所と M9 プロジェクト開発の OP アンプ回路を説明している)
- (51) Omar L. Patterson, "Computing Circuits", US Patent 2,855,145, filed July 30, 1951, issued Oct. 7, 1958. (完全に差動入力であり, ボルテージ・フォロワの構成を含む OP アンプを基本にしたアナログ計算回路の目録)
- (52) Data Sheet For Model K2-W Operational Amplifier, George A. Philbrick Researches, Inc., Boston, MA, January 1953. 次も参照のこと; "40 Years Ago", Electronic Design, December 16, 1995, p.8. (George A. Philbrick Research の, 双三極管を使った電子管 OP アンプの最初の市販品である K2-W のデータシート)
- (53) Henry Paynter, Ed., Applications Manual for PHILBRICK OCTAL PLUG-IN Computing Amplifiers, George A. Philbrick Researches, Inc., Boston, MA, 1956. (最初の OP アンプのアプリケーション・マニュアル)
- (54) Jerry Roedel, "An Introduction to Analog Computers", within A Palimpsest on the Electronic Analog Art, George A. Philbrick Researches, Inc., Boston, MA, 1955. (Roedel の論文は, 前述の Ragazzini その他の論文を含む多数のアナログ計算に関する論文の一つである)
- (55) Dan Sheingold, Ed., Applications Manual for Operational Amplifiers for Modeling, Measuring, Manipulating, and Much Else, George A. Philbrick Researches, Inc., Boston, MA, 1965. (今は収集家の注目するところとなった, 古典的な GAP/R の OP アンプ・マニュアル)
- (56) Opamp Labs Inc., 1033 N Sycamore Avenue, Los Angeles, CA, 90038 (323) 934-3566. <http://www.opamplabs.com/bel.htm>
- (57) Bela Losmandy, Three Stage Micro-Gee Products, Inc. Op Amp, 1956.
- (58) Granino Korn and Theresa Korn, Electronic Analog Computers, 2 nd Ed., McGraw-Hill, 1956. (前述文献 50 の第 2 版, 第 5 章では, さらに多くの OP アンプ回路を載せていて, チョッパ安定化 OP アンプも多く含まれる)
- (59) R. L. Konigsberg, "Operational Amplifiers", Advances in Electronics and Electron Physics, Vol.11, 1959, pp.225 ~ 285. (電子管 OP アンプといくつかのソリッドステート OP アンプについての概要. 75 の参考文献を載せている)
- (60) Harry Husky, Granino Korn, Computer Handbook, McGraw-Hill, 1962. (アナログ計算全般に関するよりどころとなる著作. Edward Billinghamurst による詳細な OP アンプの設計の章を含み, 加えて, 広範な OP アンプの仕様をともなった回路例の一覧がある)

謝辞：

この文章を執筆しているあいだにいただいた、たくさんのご意見のすべてに深い感謝の意を表します。

とりわけ、電子管の歴史に詳しい Gary Longrie 氏から提供を受けた差動アンプに関する多くの参考資料は大変に役に立ちました。また氏には、原稿に目を通して、多くの指摘をしていただきました。彼の熱心な貢献がなければ、この本の電子管の章は極めて不完全なものになっていたことでしょう。

Dan Sheingold 氏には参考文献を提供し、また原稿に目を通して、多くの建設的な意見を寄せていただきました。彼の助力がなければ、電子管 OP アンプの歴史に関する項はこれほど良いものにはならなかったでしょう。

Bel Losmandy 氏には、彼の 1956 年の電子管 OP アンプの設計例を含めて、多くの役立つ文案を用意していただきました。また原稿に目を通して、多くの意見を寄せていただきました。

Paul De Raymond Leclercq 氏と Morgan Jones 氏からは Blumlein の差動対アンプの使用に関する特許を参照するよう指摘をいただきました。

Bob Milne 氏には、原稿に目を通して、多くの改善意見をいただきました。

Steve Bench 氏には、原稿に関連して役立つ意見をいただきました。

第 3 章

ソリッドステート技術によるモジュール型 およびハイブリッド型 OP アンプ

Walt Jung / 訳：曾布川 慎吾

真空管方式の OP アンプは、1950 年代から 1960 年代には、まだ繁栄の段階にありました。しかし、ソリッドステート (solid-state ; 固体式) 技術の発展により、ついにその競争者が現れました。いくつかのキーとなる革新があり、ソリッドステート OP アンプの設計には、これらすべてを必要としました。ここでは、IC 型 OP アンプに先行した、モジュール型とハイブリッド型の OP アンプについて解説します。

キーとなる開発とは、トランジスタの発明、集積回路 (IC) の発明、そしてプレーナ IC プロセスの発明の三つです。詳細な歴史については、トランジスタ誕生 50 周年を記念して 1997 年の秋に発行されたベル研のテクニカル・ジャーナルに収録されています [文献 (1) (2)]。

3-1 トランジスタの誕生

ベル研究所でゲルマニウム半導体材料の研究をしていたジョン・バーディーン (John Bardeen)、ウォルター・ブラッテン (Walter Brattain)、ウィリアム・ショックレー (William Shockley) の 3 人は 1947 年の 12 月に、世界で初めてトランジスタ効果を発見しました。もちろんこの最初のステップは、真空管とはまったく異なる半導体材料を用いた新しい増幅原理の実証となりました。しかし、商業ベースでのトランジスタの出現には幾多の問題が残っており、まだ少し先の話です。トランジスタ発明の功績により、彼ら 3 人は 1956 年にノーベル物理学賞を受賞しています。真空管に加えて、回路設計者は低電圧/低消費電力の小型増幅素子を利用できるようになったのです [文献 (3) (4)]。

それからの 10 年間は、ゲルマニウム・トランジスタの特性改善に費やされました。最良のゲルマニウム・トランジスタでも、まだ相対的に (真空管と比べて)、漏れ電流、一般的な安定性、最大接合温度、周波数特性が制限されていました。それらのいくつかの問

題は解決の見込みさえありませんでした。多くの性能改善が行われている間に、半導体材料としてのシリコンがより多くの可能性を秘めていることは認識されていました。したがって、多くの研究者はシリコンの研究に没頭していきました。

1954年の5月に、テキサス・インスツルメンツ社のゴードン・ティール (Gordon Teal) は、成長接合型シリコン・トランジスタを開発しました。このトランジスタは、ゲルマニウムよりはるかに高い150℃まで動作しました。シリコン・トランジスタは、より低リークで、一般特性も優れた増幅素子でした。初期のシリコン・トランジスタのプロセス改良の作業は、1950年代の後半、ついに最初の集積回路の発明を導きました。

3-2 集積回路の誕生

1958年に、テキサス・インスツルメンツ社のジャック・キルビー (Jack Kilby) は、集積回路 (integrated circuit) を発明しました。今では一般にICとして知られています [文献 (5)]。この努力の結果、彼は2000年のノーベル物理学賞の共同受賞者になりました。

キルビーの仕事が重要だったことに変わりはありませんが、彼が集積回路の最初で唯一の発明者であることに議論の余地があります。1959年初頭に、フェアチャイルド・セミコンダクター社の技術者ロバート・ノイス (Robert Noyce) もまた、集積回路のコンセプトを開発していました [文献 (6)]。

ノイスのコンセプトの重要な部分、つまり、トランジスタと抵抗器の間を金属の配線層で相互接続する方法は、今日の集積回路のコンセプトにより近い方法でした。これに対して、キルビーのICはワイヤ・ボンドによる接続でした。

案の定、二つのキーとなる発明の差異から、どちらが真のICの発明者であるかについては、簡単な合意はえられませんでした。二つの会社の特許上の争いは1960年代まで続き、今日では両者ともICの発明者であると承認されています。

3-3 プレーナ・プロセス

初期のノイスのICの開発と並行して、やはりフェアチャイルド社にいたジーン・ヘルニ (Jean Hoerni) は、シリコン・ダイオードとトランジスタの特性の安定化と保護の研究に従事していました。それまでのメサ・プロセスの接合では、本質的にすべての接合部が露出していました。これは、メサ・プロセスの非常に深刻な欠点でした。

プロセスの名称となったメサ (mesa ; 頂上が平らな崖地) は、中央のベース-エミッタ領域を囲むエリアを高原状にエッチングして露出させるところから名付けられたものです。実際、この工程は汚染物質の影響を受けやすく、安定性を欠くもので、ヘルニの発明

が指摘したメサ・プロセスの致命的な弱点でした。

ヘルニの解決方法は、トランジスタの配置を平面の表面に、平らに (planar) 再整理することであり、これが新しいプロセスの名前になりました [文献 (7) (8)]。しかしながら、デバイスの保護という面での重要なポイントは、プレーナ・プロセスを使用しなければ露出されたままになってしまう領域をシリコン酸化物で覆うことができるということです。このプロセスの利点が、デバイスの汚染物質に対する影響を軽減し、より良好で安定なトランジスタおよび IC の生産を可能にしました。

デバイスの端子を平面状に配置するヘルニの発明は、金属の導体で配線するノイズの IC 発明の本質によく適合するものでした。さらに、プレーナ・プロセスは、実現化する際に追加のプロセスを必要としなかったため、高性能を経済的に達成することができました。プレーナ・プロセスの開発が、半導体の発展のもう一つの鍵であったことは歴史が示しています。プレーナ・プロセスは今日でも、トランジスタや IC の生産に幅広く使われています。

1960 年代初頭、プレーナ・プロセスの発明によって、三つのキーとなる開発のすべてが完了しました。すなわち (シリコン) トランジスタ、IC、そしてプレーナ・プロセスです。それを受けてソリッドステート OP アンプの開発は重要な段階に入りました。三つの段階があり、第 1 段階はディスクリート・トランジスタによるモジュール型 OP アンプ、第 2 段階は 2 種類の方法で作られたハイブリッド型 OP アンプです。一つの方法はチップ・サイズの個別トランジスタを接続して OP アンプ回路を作成する方法、もう一つは特別にマッチングしたペア・トランジスタと IC OP アンプを組み合わせることで特性を改善したものです。第 3 段階は、完全に集積された専用 IC による IC OP アンプです。IC OP アンプの開発については、次章で詳しく述べることにします。

もちろん、これらの開発段階では、デバイス性能もかなり改良されました。また、真空管からソリッドステートへの移行時と同様に、それぞれの段階は前後にかなりの幅で重なっています。

3-4 ソリッドステートによるモジュール型/ ハイブリッド型 OP アンプの設計

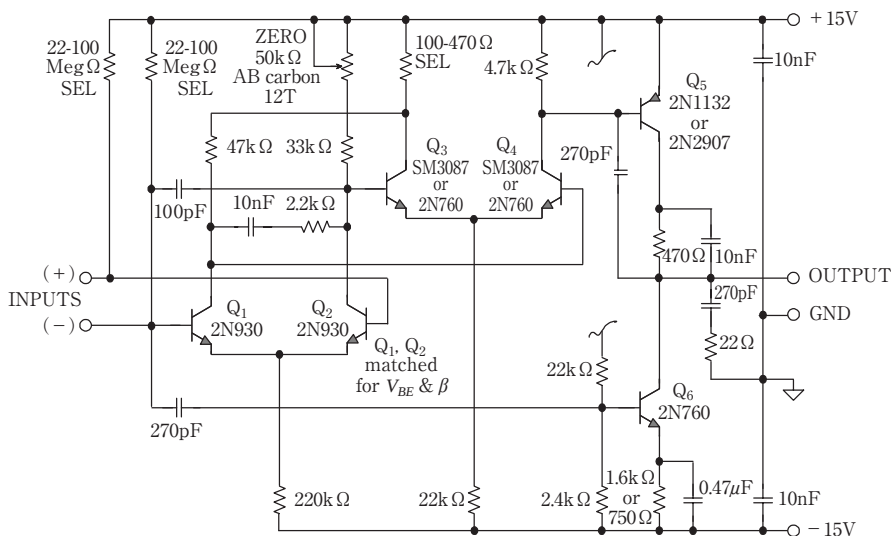
多くの新しい会社 (古くからの会社も含めて) が、ソリッドステート OP アンプに参入しました。GAP/R 社 (George A. Philbrick Research) は、すでに相当量の真空管型 OP アンプを供給するメーカーになっていました。したがってソリッドステート OP アンプは、新しいビジネスの柱となる製品でした。GAP/R 社をはじめとする多くの会社によって、1960 年代のボストン地区は、ソリッドステート OP アンプの中心地になりました。

別の場所では別の会社が、さらにコンパクトなトランジスタ式 OP アンプの市場要求を満たすために設立されていました。アリゾナのバー・ブラウン社 (Burr-Brown Research Corporation) は、このカテゴリに属しています。1956 年、ロバート・ページ・バー (Robert Page Burr) とトーマス・ブラウン (Thomas Brown) によって設立されたバー・ブラウン社は初期のモジュール型 OP アンプの主要メーカーの一つであり、アプリケーション・ブックで彼らの製品をサポートしました [文献 (9)]。バー・ブラウン社の製品は、毎年着実に成長し、高精度アンプと計装用アンプの大手メーカーになりました。2000 年になって、テキサス・インスツルメンツ社はバー・ブラウン社を買収し、両社の生産ラインは統合されています。

いっぽう、1960 年の GAP/R 社は過渡期の状態を迎えており、真空管式 OP アンプの製品ラインをメンテナンスしながら、高品位のシリコン・トランジスタが見つかるまではソリッドステート OP アンプに手を付けませんでした。1960 年代の初めになって、GAP/R 社はソリッドステート式 OP アンプの開発を始めました。ジョージ・フィルブリックは、ゲルマニウム・トランジスタによるソリッドステート OP アンプの生産にはまったく気が進みませんでした。彼は最適な増幅器の構成方法について、すでに明確なアイデアをもっていたのです (詳しくは後述)。

ソリッドステート OP アンプの登場によって、電源電圧と信号レンジは当時の ±

〈図 3-1〉 GAP/R 社のモデル P65 ソリッドステート OP アンプの回路



300 V/±150 V から、今日の標準的な ±15 V/±10 V に変化しました。そしてもちろん、新しい OP アンプのパッケージもいくつかの形状のものが出現しました。

図 3-1 に示す GAP/R 社の P65 は汎用デバイスでした。それはアラン・パールマン (Alan Pearlman) によって設計され、ボブ・マルター (Bob Malter) によって後期の改定版が出され、1961 年から 1971 年まで販売されました。初段の Q_1 と Q_2 は特性の揃ったペアの 2N930 トランジスタです。動作電流は $66\ \mu\text{A}$ で、人手による選別で、入力バイアス電流の補償をしていました (SEL 印の抵抗)。P65 の 2 段目の Q_3 , Q_4 は十分な大きな電流で動作しており、利得を増大させるためのポジティブ・フィードバック・ループ (SEL 印の抵抗と $47\ \text{k}\Omega$) があります。出力段の Q_5 は PNP のエミッタ接地接続で、負荷は Q_6 の NPN の定電流源です。2 段の差動 NPN ペアを従属接続した P65 のデザインは、他の GAP/R 社の OP アンプ、たとえば後述する P45 などの基本構成となりました。

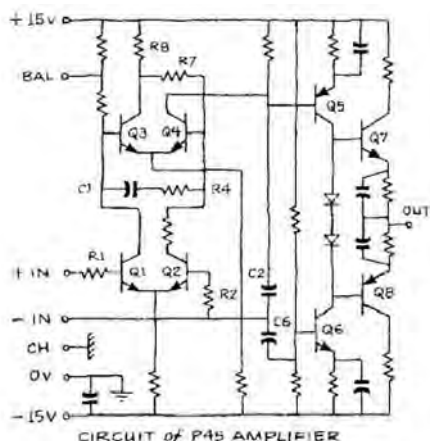
小さな値のフィードフォワード・コンデンサは交流応答をスピードアップし、出力段の RC スナバは安定度の改善用で、 Q_1 と Q_2 のコレクタ間のコンデンサは位相補償用です。トランジスタの型名はオリジナルの P65 に使用されたもので示しています。しかし、P65A ではより良いトランジスタ (たとえば 2N2907 など) が使用されており、出力の駆動能力が改善されています。

もう一つの GAP/R 社のソリッドステート OP アンプが P45 です。カードマウント・タイプの外観を写真 3-1 に、回路図を図 3-2 に示します。P45 はボブ・ピーズ (Bob Pease)

〈図 3-2〉 GAP/R 社のモデル P45 ソリッドステート OP アンプの回路



〈写真 3-1〉 GAP/R 社のモデル P45 ソリッドステート OP アンプの外観



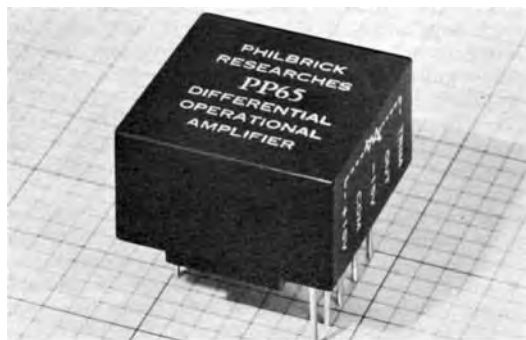
により設計され、1963年に発表されました[文献(10)]。多くの他のGAP/R社のソリッドステート・アンプと同様に、P45とP65もカードエッジ・コネクタ・パッケージを使用しています。

P45の設計は、高速な反転モードのアプリケーションを目標にしていました。AB級の出力段によって、P45Aは $\pm 10\text{ V}$ 、 $\pm 20\text{ mA}$ で負荷の駆動ができました。利得は 25°C 、負荷が $500\ \Omega$ のとき、最小で50,000倍ありました。P45のさらに傑出した仕様は、利得帯域幅が100 MHzの製品だったということです。1966年に、P45Aの価格は118ドル(数量1~4個)でした[文献(11)]。P65とP45は両方とも、新しい電源電圧の標準となる $\pm 15\text{ V}$ で動作し、入出力の信号電圧範囲は $\pm 10\text{ V}$ でした。

すでに述べたように、P45およびP65の設計に使われたNPNを2段縦続接続した入力差動部の構成は、その後のGAP/R社のOPアンプの基本構成になりました。この設計の特徴は、 Q_3 のコレクタから Q_4 のベースに逆帰還されるコントロールされた正帰還にあります。オフセットの調整はP65の設計(図3-1参照)をアレンジし、P45では+15 VとBAL端子の間に可変抵抗器を接続することにより行います。

P45において、最初の2段の利得ステージは、PNPのエミッタ接地トランジスタ Q_5 によって非常に大きな電圧利得を得ています。エミッタ・フォロワの Q_7 、 Q_8 は高インピーダンス・ノードである Q_5 のコレクタをバッファして、低インピーダンスの負荷から分離しています。

1962年にアラン・パールマン(Alan Pearlman)とそのパートナーであるロジャー・ノーブル(Roger R. "Tim" Noble)は、ボストン地区に彼らの会社ネクサス・リサーチ研究所(Nexus Research Laboratory, Inc.)を設立しました。ネクサス社は、GAP/R社とパー・ブラウン社の2社に対して、成長するソリッドステートOPアンプの分野で(最終的には



〈写真 3-2〉 GAP/R社のモデルPP65、ポット型モジュールのソリッドステートOPアンプの外観

第三の現地会社とともに) 競い合いました。ネクサス社の業務は、ソリッドステート OP アンプをプリント基板に実装する顧客に届けることにありました。このため、ネクサス社は長方形のポット型モジュール・パッケージを採用しました。そしてそれは、GAP/R 社の設計においても採用されるほどポピュラーになりました。

1962 年に、ジョージ・フィルブリックは、もう一つの P65 として派生品の PP65 (GAP/R 社で初のモジュール型) のレイアウトを彼自身で行いました。写真 3-2 に示すように正方形で、0.2 インチのグリッドに乗った 7 ピンのフット・プリントは、その後のモジュール型 OP アンプのピン配置の標準となりました。片側 5 ピンが電源、出力、オフセット調整のために使われ、2 個の入力ピンは反対側に配置されました。

OP アンプの進化を語るとき、パッケージ・デザインについてそれほどの重要性を感じない人も多いかもしれません。しかしながら、モジュール型パッケージの出現は新しい可能性をもたらしました。すなわち、OP アンプを 1 個の部品として扱うことを初めて可能にしたのです。このことによるアプリケーション拡大のチャンスが、OP アンプの成長を著しく高めたのです*1。

●バラクタ・ブリッジ型 OP アンプ

ジョージ・フィルブリックは新しいタイプの OP アンプ、バラクタ・ブリッジ型 OP アンプを積極的に推進し、それは後に GAP/R 社にとって大きな収益源となりました。この回路においては、電圧可変キャパシタ (バラクタ) が入力段に使われ、OP アンプの誤差電圧と同様に交流キャリアに対して位相センシティブな処理を行っています。注意深くブリッジ部品を配置することによって、その OP アンプの入力端子には非常に小さな直流漏れ電流 (1 pA 以下) しか流れません。

その結果、バラクタ・ブリッジ型 OP アンプは、ソリッドステート時代に入って利用可能なあらゆる OP アンプより低い入力バイアス電流特性を実現しました。事実、それは一般の真空管より低く、さらに入力に直流の流れる経路がないので、バラクタ・ブリッジ型 OP アンプの入力の同相電圧範囲は非常に高く、 ± 200 V 以上ありました。

図 3-3 にバラクタ・ブリッジ型 OP アンプのブロック図を示します。回路は、初段のブリッジ回路と高周波発振器、ブリッジの誤差電圧を増幅するための交流アンプ、交流の誤差信号を直流に変換するための同期整流器 (位相検波器)、そして直流利得と負荷駆動を担う出力アンプの四つの要素で構成されています。

この回路は次のように動作します。マッチングしたバラクタ D_1 と D_2 に加えられた小

*1：このようなパターンは OP アンプとともに何度も繰り返され、小型の SOIC パッケージが DIP などのスルーホール・パッケージを置き換えてしまったように、今日でもなお続いている。

さな直流誤差電圧 V_{IN} は、交流ブリッジに不均衡を引き起こし、交流アンプに加えられます。この交流電圧は位相センシティブで、入力直流誤差に依存します。ループの後半部分は増幅された交流を検波して、直流誤差を検出します。

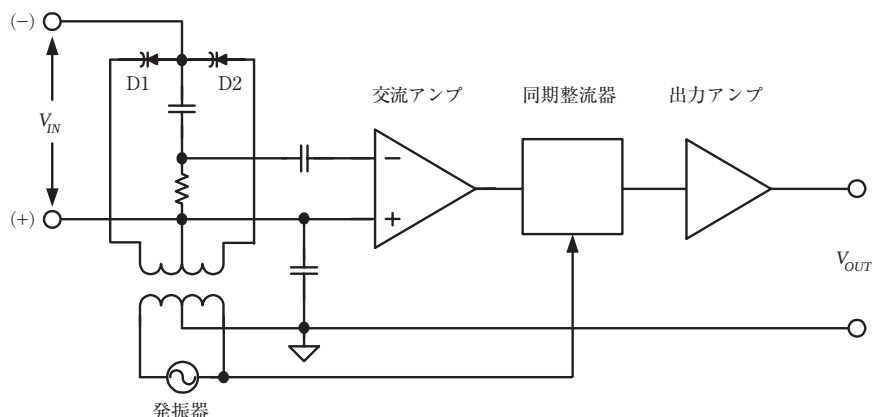
増幅器として使用するためには、通常の OP アンプと同様に V_{OUT} から反転入力端子に外部から帰還をかけます。通常の OP アンプとの差異は、バラクタ・ブリッジ型 OP アンプにはバイアス電流と同相電圧のどちらにも並外れた自由度が存在したという事実にあります。

GAP/R 社のバラクタ・ブリッジ型 OP アンプのモデルは P2 と命名されました。P2 はスピードではなく、直流仕様に関して注目を集めました。事実、ユニティ・ゲイン周波数はほんの 75 kHz ですが、人々が注目する仕様すなわち入力オフセット電流は $\pm 10 \text{ pA}$ でした。同じく、 $\pm 200 \text{ V}$ の同相電圧範囲は、それまで真空管アンプでなければ実現できなかったアプリケーションへの応用を可能にしました。

1966 年、SP2A は当時としては天文学的な価格である 227 ドルで売れました [既出文献 (11)]。ボブ・ピースは、GAP/R 社のエンジニアであるジョージ・フィルブリックとボブ・マルターによる P2 開発のすばらしい物語を書いています [文献 (12)]。1968 年にジョージ・フィルブリックは、バラクタ・ブリッジ・アンプの特許を取得しました [文献 (13)]。1966 年に GAP/R 社とネクサス・リサーチ社はテレダイン社に買収され、合併された生産ラインはハイブリッドや IC 生産に投入されていきます。

しかし後になって、GAP/R 社の歴史について悲しい出来事がありました。GAP/R 社の創設者であり、主たる革新者でもあるジョージ・フィルブリックが 1974 年、61 歳の若

〈図 3-3〉 バラクタ・ブリッジ型ソリッドステート OP アンプのブロック構成



さで他界しました。彼のパートナーであり協力者であった MIT の教授ヘンリー・ペインター (Henry Paynter) から、ジョージ・フィルブリックに賛辞が送られています [文献 (14)]。

●アナログ・デバイセズ社の誕生

1960 年代の半ばになって、ボストン地区に第三の OP アンプ・メーカーが出現しました。1965 年 1 月にマット・ローバー (Matt Lorber) とレイ・ステータ (Ray Stata) により、アナログ・デバイセズ社 (Analog Devices Inc.; ADI) が設立されたのです。当初はマサチューセッツ州のケンブリッジから、新会社の最初の製品である OP アンプが出荷されました。初期の大部分の OP アンプはモジュール型でした (詳しくは後述)。

ダン・シェインゴールド (Dan Sheingold) は、社名の中から意図的に「リサーチ」という言葉を除外するように ADI 社の設立者たちに奨めました [文献 (15)]。このことは、新しい会社を当時の競合 3 社…バー・ブラウン社、GAP/R 社、ネクサス・リサーチ社と区別し、OP アンプをアピールしてその市場を広げました。

新しいベンチャ企業である ADI 社は、すぐに販売を開始するよう見えました。しかし、ADI 社の最初の「製品」の一つは、OP アンプのアプリケーションのサポートでした [既出文献 (15)]。最初の年にレイ・ステータは、OP アンプの包括的なガイドブックを制作したのです [文献 (16)]。このようなアプリケーション・サポートは初期の頃からずっと続いており、後にビジネスの成功例として GAP/R 社が追随するようになりました。

ADI 社は最初の何年かで、たくさんの新型 OP アンプを発表しました。それらの多くはモジュール型で、バイポーラ・トランジスタと FET の両方の技術を使っていました。それらの完全な目録は紹介しきれないので、ここではいくつかのハイライトを取り上げるに留めます。

●バラクタ・ブリッジ型 OP アンプ、モデル 3xx シリーズ

GAP/R 社の P2 と競うため、ADI 社は市場に多くのバラクタ・ブリッジ入力型 OP アンプを投入しました。最初のバラクタ・ブリッジ OP アンプはモデル 301, 302, 303 です。それらはすべて似てはいましたが、入力形式の詳細が異なっていました。301 は差動入力型、302 は反転入力型、303 は非反転入力型です。301 の最大入力電流は 2 pA、他の二つは 0.5 pA 以下でした。301 は 198 ドル、302 と 303 は 110 ドルで販売されました。

ルイス・スミス (Lewis R. Smith) が、後継のモデル 310 と 311 と同様に、これらのアンプを設計しました [文献 (17)]。後継モデルの設計では、著しく入力電流が改善され、両アンプの入力電流は ± 10 fA を達成しました (これは GAP/R 社の P2 シリーズより 3 桁小さい値)。この入力電流値の小ささは (現在でも) 十分に感銘を与えられる功績でしょう。おもしろいことにモデル 310 と 311 は、75 ドルという低価格で販売されました。

ルイス・スミスもまたバラクタ・ブリッジの設計で特許を取得しています [文献 (18)]。モデル 310 と 311 の設計はすばらしく、2002 年になってもそれらは生産されています。これらのデバイスはイントロニクス社 (Intronics) から入手可能です [文献 (19)]。

●さまざまな OP アンプのカテゴリ

初期の ADI 社のモジュール型 OP アンプは、大部分が入力段にバイポーラ・トランジスタを使用していました。そして、後段はすべてバイポーラ・トランジスタを使用していました。特性の揃ったデュアル・トランジスタ、デュアル FET は 1960 年代初頭にはわずかな品種しかありませんでしたが、それらが発表されるとすぐ自社の設計に取り入れました。初期の ADI 社の OP アンプには五つのカテゴリ、汎用、低バイアス電流、低ドリフト、広帯域、高電圧/大電流がありました [文献 (20)]。ただしこのリストは、わずか 1 年で相当に拡張されました [文献 (21)]。

汎用タイプでいえば、モデル 111 と後の 118 は、良好な基本仕様と魅力的な価格でポピュラな製品でした。低バイアス電流タイプは、すでに述べたバラクタ型が性能でリードしていましたが、初期の FET 入力型のモデル 142 のバイアス電流も 10 pA クラスでした。

低ドリフト・タイプの分野では、たくさんのチョッパ型アンプ、たとえばモデル 210、211、220、そして後の 232、233、260 が性能でリードし、高精度バイポーラ・トランジスタを初段に使用したチョッパレスのアンプとしてモデル 180、183 もありました。以後の数年間、チョッパ・アンプに関する重要な技術サポートが続きました [文献 (22) ~ (24)]。

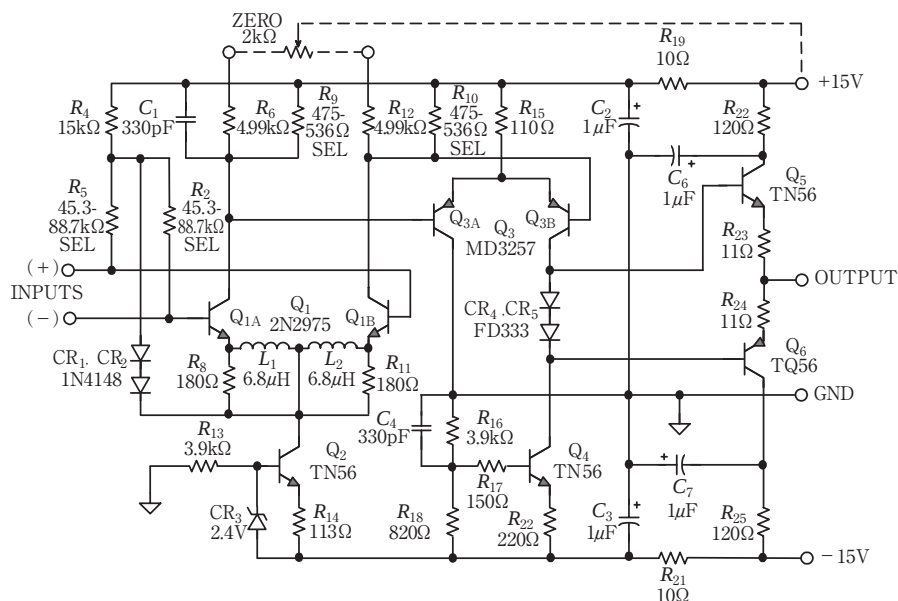
●モデル 121 型 OP アンプ

1966 年に、ADI 社のディック・バーウエン (Dick Burwen) が設計したモデル 121 は、完全な差動入力の高速 OP アンプでした。この設計は図 3-4 にあるように、いくつかの有益な回路技術を示しています。

技術のうちの一つは、いかに高速で低雑音の入力段を得るかにあり、これは L_1 と L_2 のチョークによって達成されています。低い周波数では、雑音発生源となる局所帰還抵抗 R_g 、 R_{11} をチョークが短絡します。さらに、OP アンプ内部としては比較的に太いバイパス経路を内蔵しています (実用時に必要な手段であるが、モジュール内に実装できた)。

モデル 121 の NPN 入力段は、スルー・レートを上げるため大きな電流で動作しています。しかし、そのままでは大きくなってしまいう入力バイアス電流を、 R_2 と R_5 で補償していることに注目してください。これらの (選別された) 抵抗は、温度トラッキングしたフローティング・バイアス源 (CR_1 と CR_2 のダイオードによる) から供給を受けます。このバイアス回路はバーウエンが特許を取得し、ADI 社の他の OP アンプでもたびたび使われました [文献 (25)]。

〈図 3-4〉 ADI 社のモデル 121 広帯域 DC OP アンプ



このほかにモデル 121 の注目点をあげるとすれば、入力段のマッチド・ペア・トランジスタ 2N2975 に、 Q_2 による定電流源を使用して同相除去を最適化している点です。さらに、重要な部分には 1% の金属皮膜抵抗が使われています。利得 5 倍で安定に動作するモデル 121 は、オープンループ・ゲインが 25000 倍 (88 dB) でスルー・レートは $250 \text{ V}/\mu\text{s}$ 、1968 年に 98 ドルで販売されました [既出文献 (20)]。

● アナログ・ダイアログ誌の誕生

ADI 社が続けていたアプリケーション情報の提供によるユーザ・サポートは、1967 年にはかなり拡大していました。そして、その年に『アナログ・ダイアログ』誌 (Analog Dialogue) が発刊されています [文献 (26)]。この雑誌の初期のサブタイトルは「OP アンプ技術の交換のための雑誌」でしたが、後にこれは拡張されて「アナログ技術の交換のための雑誌」になりました。

OP アンプ情報の普及には初期の『アナログ・ダイアログ』がおおいに貢献しました。創刊号は、レイ・ステータによる OP アンプに関する記事の特集で、それは現在でもアプリケーション・ノートとして入手可能です [文献 (27)]。さらに、その続編についても同様

です[文献(28)].

1969年に、ダン・シェインゴールドが編集長に着任し、若い雑誌に転機が訪れました[文献(29)]. OPアンプについてすでに豊富な経験をもち、GAP/R社の真空管と初期のソリッドステート・アンプのマニュアルなどの編著者として活躍したダン・シェインゴールドは、『アナログ・ダイアログ』誌の編集方針にそのユニークな経歴を活かしました。ダンの編集者としてのリーダーシップは2002年の今日でも続いています。33年以上もの間、彼の高度な技術情報の伝達技法が産業界の基準となっています。

●高速FET OPアンプ・ファミリの設計

ADI社のOPアンプの製品ファミリのなかで最も輝かしい開発の一つが、高速なFET入力モジュール型とハイブリッド型の製品です。このファミリの設計は1970年のモデル45に始まりました[文献(30)]. ジョン・カデガン(John Cadigan)がこれらのアンプすべてを設計し、それらはその後10年以上、発展しつづけました。

この製品群が長寿命だった(IC OPアンプ時代までつづいた)ことの理由は単純で、これらのアンプが非常に難しい技術要求を満たしたことにあります。それらの要求は初期のIC型OPアンプでは難しく、より良い製造技術が利用可能になるまで、要求に適合するICはまったくありませんでした。高速性(規定された誤差範囲に収束するまでのスピード)と、優れた直流特性をあわせもつFETアンプは、高精度A-Dコンバータや高い精度を必要とする増幅器への応用に最適でした。

▶モデル45, 44, 48 FET OPアンプ

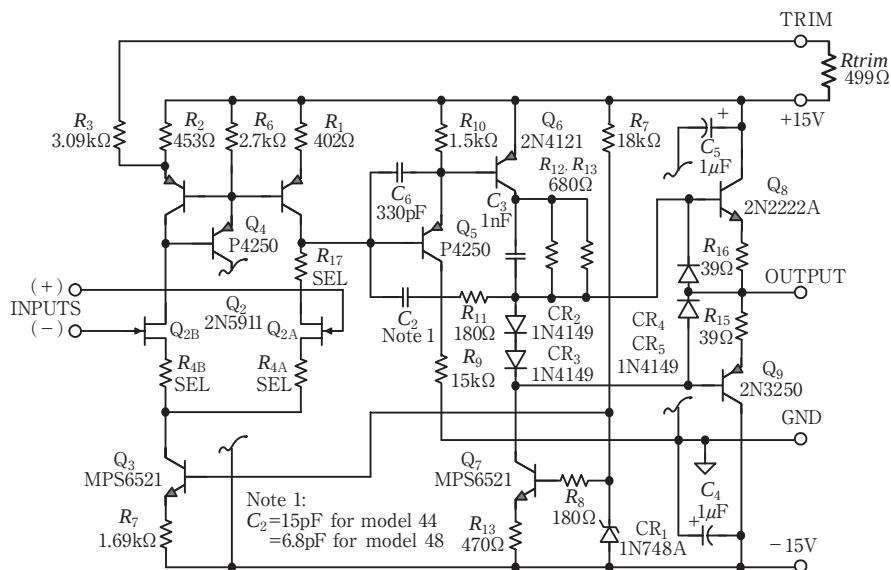
最初に出荷されたモデル45は、0.01%のセトリング時間が $1\mu\text{s}$ 以下という特性で、低コストを目標としていました。シリーズの次のモデル、44と48について、図3-5に簡略化した回路図を示します。モデル45の回路は44と48によく似ており、わずかに簡略化されています。

これらすべてのアンプはFET入力で、 Q_2 の高速のNチャネル・デュアルFETがベースとなっています。モデル44と48ではバランスしたPNPのカレント・ミラーが入力段の負荷です。ミラー段からの出力信号は、ダーリントン接続された Q_5 と Q_6 による積分器に入ります。入力段の動作電流は片側1mAで、44と48のスルー・レートはそれぞれ $75\text{V}/\mu\text{s}$ 、 $110\text{V}/\mu\text{s}$ でした。

モデル45と同様に、44と48のキーとなる特長は誤差範囲0.01%に収束するまでの高速性でした。これらのアンプは0.01%に達するまでのセトリング時間が仕様として規定されており、 $\pm 10\text{V}$ の出力時、反転/非反転どちらのモードでも、44が1000ns、48が500nsでした。

加えて、それらすべてのモデルはAB級の出力段をもち、同軸ケーブルの駆動にも適し

〈図 3-5〉 ADI 社のモデル 44 とモデル 48, 高速 FET 入力モジュール OP アンプ



ていました。パッケージは標準の 1.25 インチ角のモジュール型で、ピンアウトが印刷されていました。499 Ω の抵抗を V_{CC} 端子と TRIM 端子の間に接続することにより、調整なしに規定の DC オフセット特性が得られ、より精度が必要な場合は 1 k Ω の可変抵抗器を接続して調整します。

モデル 44 と 48 の後も、モデル 46/47 シリーズを含め、開発は引き続き発展しました。

► モデル 50 FET OP アンプ

1973 年に、シリーズ最速のバージョンであるモデル 50 OP アンプが登場しました [文献 (35) (36)]。モデル 50 の回路の詳細については、次の HOS-050 の項で解説します。

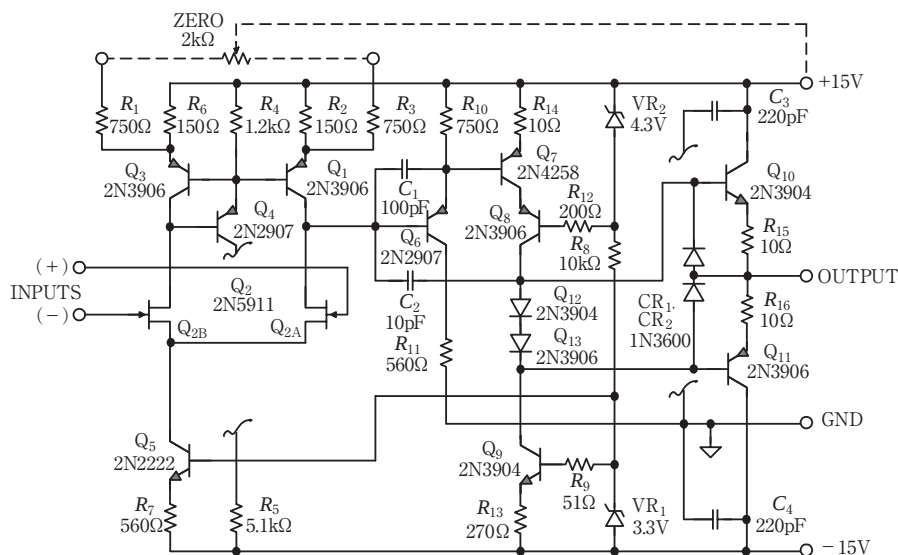
► HOS-050 FET OP アンプ

ADI 社が 1979 年に吸収する以前、ノースカロライナ州グリーンズボローのコンピュータ・ラボ社 (Computer Labs) は、高速のデータ・アキュイジション・システムの製作を業務としていました。彼らのシステム構成では高速 OP アンプで A-D コンバータを駆動するため、ADI 社のモデル 50 に似た特性のアンプが必要でした。

1977 年にコンピュータ・ラボ社は、ADI 社のモデル 50 のハイブリッド IC バージョンである HOS-050 を開発しました [文献 (37)]。HOS-050 の回路を図 3-6 に示します。

図 3-5 に示した初期のアンプと多くの点で同じであり、違いはスピードに関連する部分

〈図 3-6〉 ADI 社の HOS-050 高速 FET 入力ハイブリッド OP アンプの回路



だけでした。注釈を付けるとすれば、HOS-050 の入力段は、より高いスルー・レートと広い帯域のために、より大きな電流で動作しています。同様に、 Q_7 の積分器段とカスケード接続された Q_8 も、より大きな電流で動作しています。HOS-050 はバランス・タイプの DC オフセット調整方法を使っているのも、何も（オフセット調整器を）接続しなくとも OP アンプとしての機能は良好です。

出力段には高速のトランジスタが使われ、出力の電流制限値もより大きくなっています。全体の回路は高温域で動作しており、消費電力は $\pm 15\text{ V}$ 供給時に約 600 mW でした。モデル 50 と HOS-050 は、出力 $\pm 10\text{ V}$ 、 $\pm 100\text{ mA}$ で 100 MHz の帯域幅をもち、HOS-050 は出力誤差 0.01% へ 200 ns で収束しました。

モデル 50 と HOS-050 は、疑いなく最も高いレベルの性能を達成していました。付け加えるならば、小型の TO-8 パッケージに最上級の仕様を詰め込んだ HOS-050 は、おそらく ADI 社を代表する最も感動的なハイブリッド IC のうちの一つです。ADI 社がコンピュータ・ラボ社を取得したので、ADI 社のユーザは二つの最高品質のハイブリッド IC 生産設備を利用可能になりました。一つはボストン地区、もう一つはグリーンズボローにある以前のコンピュータ・ラボ社です。

1970 年代から 1980 年代にかけて、いくつかの種類のハイブリッド IC 型 OP アンプが ADI 社で作られました。それらのなかに HOS-060、ADLH0032、AD3354 があります。ハ

(4) W. Shockley, "The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors", Bell System Technical Journal, Vol.28, No.4, July 1949, pp.435 ~ 489. (ゲルマニウム・トランジスタの理論的背景)

・ IC の誕生

(5) J. S. Kilby, "Invention of the Integrated Circuit", IRE Transactions on Electron Devices, Vol.ED-23, No.7, July 1976, pp.648 ~ 654. (TI 社のキルビーによる IC の発明)

(6) Robert N. Noyce, "Semiconductor Device-and-Lead Structure", US Patent 2,981,877, filed July 30, 1959, issued April 25, 1961. (フェアチャイルド社のノイスによる IC の発明)

・ プレーナ・プロセス

(7) Jean A. Hoerni, "Method of Manufacturing Semiconductor Devices", US Patent 3,025,589, filed May 1, 1959, issued March 20, 1962. (半導体の保護と安定化に関するプレーナ・プロセスの工業的手法)

(8) Jean Hoerni, "Planar Silicon Diodes and Transistors", IRE Transactions on Electron Devices, Vol.8, March 1961, p.168. (プレーナ・プロセスを利用したデバイスに関する技術的考察)

・ ソリッドステート式モジュール型とハイブリッド型 OP アンプの設計

(9) Burr-Brown Applications Staff, Handbook of Operational Amplifier Applications, 1st Ed., Burr-Brown Research Corporation, 1963. (バー・ブラウン社の初期の半導体 OP アンプのマニュアル)

(10) Robert A. Pease, "Design of a Modern High-Performance Operational Amplifier", GAP/R Lightning Empiricist, Vol.11, No.2, April 1963. (P45 型 OP アンプの設計者による解説. Note: Q8 polarity correction via RAP to WJ email of 5/23/2001)

(11) Philbrick Solid-State Operational Amplifiers, GAP/R bulletin of 3/1/1966.

(12) Bob Pease, "Chapter 9, The Story of the P2", within Jim Williams, Ed., Analog Circuit Design, Butterworth-Heinemann, 1991, ISBN: 0-7506-9166-2.

(13) George A. Philbrick, "Electronic Amplifier", US Patent 3,405,366, filed June 30, 1965, issued Oct. 8, 1968. (バラクタ・ブリッジ増幅器)

(14) H. M. Paynter, "In Memoriam: George A. Philbrick", ASME Journal of Systems, Measurement and Control, June 1975, pp.213 ~ 215.

(15) Dan Sheingold, "Analog Dialectic", Analog Dialogue, Vol.30, No.4, p.1.

(16) Ray Stata, "Operational Amplifiers, Parts I and II", Electromechanical Design, September and November, 1965. (アナログ・デバイス社の最初の OP アンプ応用マニュアル)

(17) Data sheet for Model 310, 311 Ultra Low Bias Current Varactor Bridge Operational Amplifiers, Analog Devices, Inc., December 1969.

(18) Lewis R. Smith, "Operational Amplifier with Varactor Bridge Input Circuit", US Patent 3,530,390, filed Dec. 28, 1966, issued Sept. 22, 1970. (バラクタ・ブリッジ増幅器)

(19) ADI Modular Products, <http://www.intronics.com/products/analogproducts/>

(20) Capsule Listing of Analog Devices Op Amps, ADI bulletin of April 1968.

(21) Selection Handbook and Catalog Guide to Operational Amplifiers, ADI catalog of January 1969.

(22) Ray Stata, "Applications Manual 201, 202, 203 & 210 Chopper Stabilized Operational Amplifiers", ADI application note, 1967. (チョッパ安定型モジュールの 200 シリーズの使用法)

(23) ADI Staff, "Circuit Advantages of Chopper Stabilized Operational Amplifiers", ADI appli-

- cation note, September 1970. (反転型チョッパ安定型 OP アンプ・モジュールの動作と使用法)
- (24) Peter Zicko, "Designing with Chopper Stabilized Operational Amplifiers", ADI application note, September 1970. (非反転型チョッパ安定型 OP アンプ・モジュールの動作と使用法)
- (25) Richard S. Burwen, "Input Current Compensation with Temperature for Differential Transistor Amplifier", US Patent 3,467,908, filed Feb. 7, 1968, issued Sept. 16, 1969. (差動増幅回路のバイアス電流の補償方法)
- (26) Analog Dialogue, Vol.1, No.1, April 1967. (「アナログ・ダイアログ」誌の創刊号. 'A Journal for the Exchange of Operational Amplifier Technology')
- (27) Ray Stata, "Operational Integrators", Analog Dialogue, Vol.1, No.1, April, 1967. (AN357 として再発行されている)
- (28) Ray Stata, "User's Guide to Applying and Measuring Operational Amplifier Specifications", Analog Dialogue, Vol.1, No.3. (AN356 として再発行されている).
- (29) Analog Dialogue, Vol.3, No.1, March 1969. (ダン・シェインゴールド編集指導による最初の号)
- (30) Data sheet for Model 45 Fast Settling FET Operational Amplifier, Analog Devices, Inc., May, 1970.
- (31) "New Modular Op Amps", Analog Dialogue, Vol.5, No.2, p.12. (モデル 43, 44 OP アンプ)
- (32) "Op Amp Settles to 0.01% in 300ns", Analog Dialogue, Vol.6, No.2, p.11. (モデル 48 OP アンプ)
- (33) Data sheet for Model 48 Fast Settling Differential FET Op Amp, Analog Devices, Inc., June 1972.
- (34) Data sheet for Model 44 Fast Settling High Accuracy Op Amp, Analog Devices, Inc., August 1972.
- (35) Data sheet for Model 50 Fast Settling 100mA Output Differential FET Op Amp, Analog Devices, Inc., May 1973.
- (36) "Model 50: Wideband, Fast Settling Op Amp", Analog Dialogue, Vol.7, No.2, p.13. (モデル 50 OP アンプ・モジュール)
- (37) "Low-Cost HOS-050C is Internally Compensated, Settles to 0.1% in 80ns, 0.01% in 200ns", Analog Dialogue, Vol.16, No.2, p.24. (Computer Labs によるハイブリッド OP アンプ HOS-050C の最初の紹介, 1977 年)

謝辞：

この章をまとめるにあたり、非常に多くの有益なコメントをいただき、非常に感謝しています。特に GAP/R 社の卒業生、Dan Sheingold 氏と Bob Pease 氏からは非常に有益な情報を提供してもらいました。両者とも初期の GAP/R 社での作業の詳細の多くを提供し、Bob Pease 氏にいたってはそれまで公開されていない P65 の回路を提供してくれました。

Dick Burwen 氏には初期の ADI 社で彼のかかわった設計の詳細な情報を提供してもらい、物語の発展についての貴重なコメントをいただきました。

Steve Guinta 氏および Charlie Scouten 氏からは ADI 社の中央アプリケーション部門のアーカイブからモジュール型 OP アンプの回路図を提供してもらいました。

Lew Counts 氏からは高速のモジュール型 FET OP アンプ発展の背景について詳しいコメントをいただきました。

Walt Kester 氏からはコンピュータ・ラボのハイブリッド IC の製品として、HOS-050 型アンプおよびその開発について詳しい情報を提供していただきました。

第 4 章

IC OP アンプ

Walt Jung / 訳：瀬川 毅

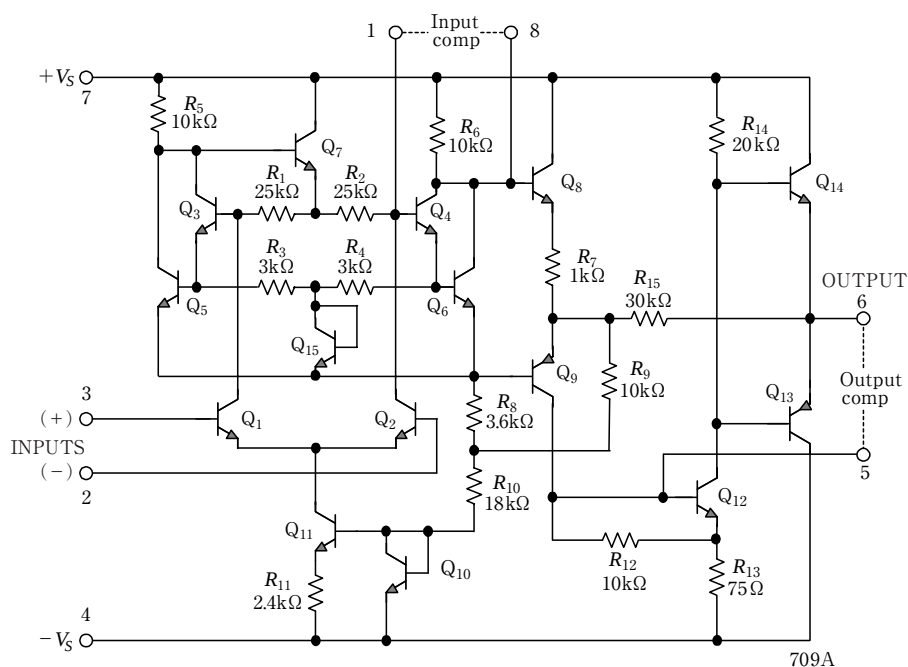
4-1 モノリシック IC による OP アンプの誕生

モノリシック IC の OP アンプとして一般に認められた最初の OP アンプは、フェアチャイルド社 (Fairchild Semiconductor Corporation ; FSC) の μ A702 でした。 μ A702 は、若きエンジニア、ボブ・ワイドラー (Robert J. "Bob" Widlar) が設計しました。後に述べるように、ワイドラーは IC 世界で不滅の業績を残した人間です。しかし、 μ A702 が世に出た 1963 年、 μ A702 が世界をすぐさま心酔させたわけではありません。 μ A702 の変わった癖…非対称の供給電圧、低い入出力のスイング幅、低いゲイン、などなど…のため、世の中には受け入れられなかったのです。それでも、これらの欠点にもかかわらず μ A702 は、いくつかの重要な IC OP アンプ設計の方向性を確立しました。ボブ・ワイドラーによって考え出されたこれらの設計思想は、未来の OP アンプに残ることになりました [文献 (1)]。実際、その設計思想は現在でも標準のリニア IC の中に生きています。ここでは μ A702 については詳細に説明しませんが、詳しくは文献 (2) を参照してください。

● μ A709

μ A702 から間もない 1965 年、フェアチャイルド社でワイドラーが設計したもう一つの OP アンプ μ A709 が発表され、IC OP アンプの歴史に銘を刻むこととなります [文献 (3)]。 μ A709 *1 は μ A702 と比べると著しく特性が改善されていたのです。 μ A709 は、高いゲイン (45000 倍, 94 dB)、大きな入出力幅 (± 10 V)、低い入力電流 (200 nA)、大きな出力

*1 : 当初のフェアチャイルド社の型番は " μ A709" だったが、その設計はセカンド・ソースとして広まった。広く使われた総称は、ただの "709" になった。同様に " μ A702" は "702" として知られている。

〈図4-1〉 $\mu A709$ モノリシック IC OPアンプの等価回路

電流，対称な電源電圧 ($\pm 15\text{ V}$) で動作，という特徴を備えていたのです。 $\mu A709$ は，あっという間にOPアンプの標準になり，その後何十年間も生産されました。図4-1は $\mu A709$ の等価回路です。

$\mu A709$ は，IC OPアンプの原点とみなすことができるほど普遍的な製品でした。個々の性能は後につづく多くのOPアンプの設計によって越えられましたが， $\mu A709$ は最初に広く実用された汎用モノリシックIC OPアンプとして画期的な製品でした。

初段と2段目に特性のそろったトランジスタを使用したり，また対数特性にバイアスされた (ΔV_{BE}) 電流源 Q_{10} - Q_{11} を使ったりと，702の多くの設計原則が再び709で使われました。しかし新しい工夫も加えられています。709が基本的にNPNのICプロセスを使ったので，ワイドラーはPNP機能を作るためにいくつかの聡明なトリックを駆使しています。彼は，レベル・シフタのトランジスタ Q_9 と出力トランジスタ Q_{13} の2個のPNPトランジスタのために，NPN構造を修正して使いました。出力段では， Q_{13} - Q_{14} をバイアスなしでBクラスで動作させています。 R_{15} による出力段付近の局部フィードバックは，Bク

ラス動作によるデッドゾーンを最小限にするためです。

709 では 1-8 ピン間と 6-5 ピン間の二つの RC 回路で、周波数位相補償ができるようになりました。これら 4 個の回路素子を最適化することで、0 ~ 60 dB のゲイン幅のなかで最善の AC レスポンスを得ることができます。

709 は、702 を大きく越える改善でしたが、まだ奇妙な癖があり、これらは OP アンプ使用時の問題を生み出しました。たとえば、短絡保護用の直列抵抗がないので、出力段は短絡が続くと破損してしまいました。多くのエンジニアが、異常発振を防ぐ周波数位相補償技術を難しく感じており、そのうえ位相補償用の部品はプリント基板面積を無駄に占有するとみなしました。また、入力段が十分に飽和するような高いコモンモード電圧が入力に加わると、709 はすぐにラッチアップしてしまいました。それに加えて、過大な差動入力電圧は入力側のトランジスタを破損してしまいます。経験が豊富なエンジニアであれば、これらの 709 の利用上の課題を解決できたのですが、そのためには余分な部品を必要としました。ある意味では、上述した使用時に発生する問題点が「さまざまな用途の要求に対して、IC 化 OP アンプには壊れずに安定に動作する堅牢性が必要だ」という一般的な教訓を導き出したといえるでしょう。

● LM101

ボブ・ワイドラーは、702 や 709 の過去の栄光に満足せず、別の会社、ナショナル セミコンダクター社 (National Semiconductor Corporation ; NSC) に移りました。彼が次に設計した IC OP アンプ LM101 は、1967 年に発表されました [文献 (4)]。IC OP アンプの第 2 世代が始まったのです (709 が一般に第 1 世代の IC OP アンプとみなされる)。

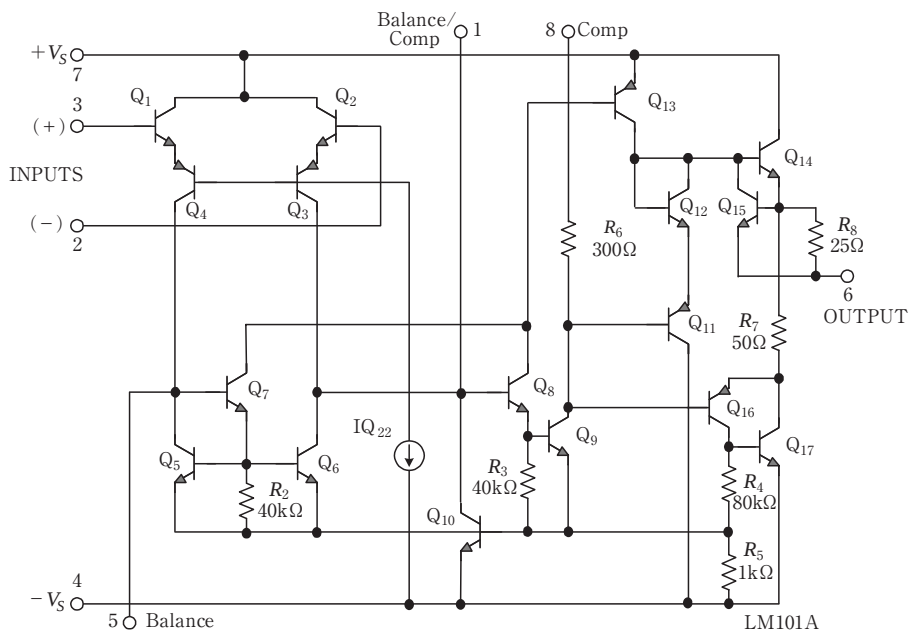
LM101 ファミリー*2 は、709 で発生した応用上のいくつかの問題に対処して、よりシンプルな 2 段の回路構成を採用しました。その構成は、後に設計される非常に多くの OP アンプに影響を与えた設計でした。101 の等価回路を図 4-2 に示します。

LM101 の設計目標は、709 が抱えていた下記の問題を解決することでした。

- 出力の短絡保護回路がない
- 複雑な周波数補償
- 大きなコモンモード電圧が入力されたときのラッチアップ
- 大きな差動電圧が入力されたときの入力回路の破損
- 消費電力の多さと狭い電源電圧範囲

* 2 : LM101 ファミリーは、三つの温度レンジ…軍用の LM101、産業用の LM201、民生用の LM301 から構成されている。型番は 101 として一般的に知られている。同様に、改良型の LM101A シリーズのデバイスは、101A、201A、301A、などとして知られるようになった。

〈図4-2〉 LM101 モノリシック IC OP アンプの等価回路



●負荷が容量性のときの不安定性

709が歴史的に重要な意味をもつと同じ理由で、次世代OPアンプ技術のレベルを説明する場合、LM101も歴史的に重要な意味もっています。実際、使われているほとんどの用途のOPアンプの回路構成は、LM101の設計の変形であり、広い範囲で他の多くの汎用OPアンプの基礎となっているのです。

新しい101の設計は、709が抱えていた問題を解決し、なお一層の改良を加えたものです。ゲインは160,000倍(104dB)で、使用できる電源電圧範囲は $\pm 5\text{V} \sim \pm 20\text{V}$ に増えました。101への変更が楽なように、101は入力、出力、電源のピン配置は709と同じ配置になっていました。

101の設計のおもな目標は、位相補償を簡単にすることでした。これを可能にするために101は、アンプの段数が少ないほど位相補償が簡単になるので、2段アンプの構成の設計を採用しました。しかし、高い電圧ゲインを保つために、2段のアンプは709の3段構成と同じゲインを必要としたのです。101では、有効ゲインを最大限に引き出すアクティブ負荷を使って、各アンプ段ごとの高ゲインを実現しています。一つの例は Q_{13} で、 Q_9

のコレクタ負荷となっています。

101 の 1 段目では同様に、アクティブ負荷として Q_5 - Q_6 が使われています。ここで、 Q_1 - Q_4 と Q_2 - Q_3 は等価的な PNP の差動アンプのペアを形成しています。PNP のペアは低ゲインですが、高ゲインの NPN のペア Q_1 - Q_2 によってバッファリングされます。正味の入力電流は 120 nA でした。

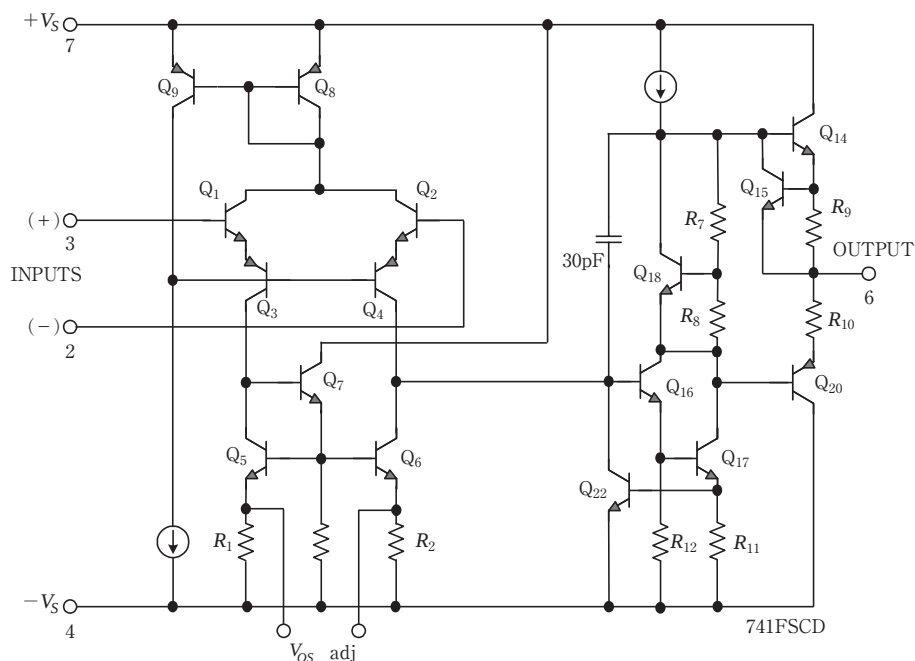
Q_1 - Q_2 が $+V_S$ まで振れることができるため、この段のコモンモード入力範囲がプラス側ではとても高いことに注目してください。マイナス側のコモンモード電圧の限界は、 $-V_S$ 電圧からおよそ V_{BE} の 4 倍上の電圧までです。この広いコモンモード範囲は、入力段の飽和とラッチアップを防ぎます。この NPN-PNP で構成された入力段のもう一つの特徴は、PNP トランジスタの高いベース-エミッタ間ブレークダウンのために、非常に高い差動電圧定格が得られることです。この入力段は、 ± 30 V の入力を安全な範囲として許容できるのです。

101 の 2 段目は、普通のエミッタ・コモン型のアンプ Q_9 です。前述のように、 Q_{13} の負荷によって 2 段目のアンプ段は約 60 dB の電圧ゲインを実現しており、OP アンプの総合的なゲインは代表値で 100 dB を越えています。AB 級の出力段は、NPN トランジスタ Q_{14} と PNP と等価なトランジスタ Q_{16} - Q_{17} から構成されたものが使われています。これらのトランジスタは Q_{11} - Q_{12} によってバイアスされています。 Q_{16} と Q_9 - Q_{10} で構成される精巧なループに加えて、電流検出抵抗 R_7 、 R_8 とトランジスタ Q_{15} は過電流保護回路を実現しています。

709 に対する 101 の重要な違いは、とても単純な位相補償方式です。101 での位相補償は、ピン 1 とピン 8 間に接続する 30 pF の外付けコンデンサ 1 個によって実現できたのです。101 の内部回路からわかるように、この位相補償コンデンサによって 2 段目のアンプ Q_9 は積分回路となり、OP アンプ全体のゲインは 10 Hz で 104 dB の最大値から 6 dB/oct. の率で減衰し、ユニティ・ゲインは約 1 MHz で 0 dB を横切る周波数特性となっています。この位相補償によって 101 は、どのようなフィードバックをかけてもユニティ・ゲインまでで安定となります。

解析的に見ると OP アンプ 101 の回路構成は、積分回路段 Q_9 や位相補償コンデンサをドライブする Q_1 - Q_6 から構成されている入力 g_m 段と、ユニティ・ゲイン出力バッファ Q_{11} - Q_{17} の 2 段の電圧アンプのように見えます。このタイプの回路構成については、本書の第 2 部でさらに詳しく解説します。

しかし、ここで注目すべき顕著なポイントは、この位相補償の方式が、ロールオフを安定な -6 dB/oct. にするために補償用コンデンサの値を増加させるので、アンプの 2 段目でポールを分割できる利点があるという事実なのです [文献 (5)]。OP アンプ全体の補償を 30 pF の小さなコンデンサ 1 個で可能にしたことは、その時代では非常に重要なポイント

〈図 4-3〉 μ A741 モノリシック IC OP アンプの等価回路

でした。オリジナルの 101 が発表されて以来、多くの 2 段構成の IC OP アンプの回路設計で似通った信号経路と位相補償方法が使われるようになったのです。

● μ A741

101 が発表されて 1 年も経たないうちにフェアチャイルド社は、101 への回答としての OP アンプ μ A741 を発表しました。デイブ・フラガー (Dave Fullagar) の設計により 1968 年に発表された μ A741 は、LM101 とよく似た信号経路となっています [文献 (6)]。 μ A741 の等価回路を図 4-3 に示します。

バイアス回路に明らかな相違がありますが、741 は信号経路が基本的に 101 と等価であることや、入力過電圧保護や出力短絡保護回路、同程度の帯域幅があることなどによって 101 と似通った特徴となっています。にもかかわらず、741 が OP アンプの標準*3 になったのは、チップ内に 30 pF の位相補償コンデンサを内蔵していたからです。

これは、OP アンプの使いやすさは回路の自由度よりもユーザにとって役立つ、という

教訓になっています。ユーザが補償用のコンデンサを接続した 101 は、機能としては 741 に相当します。実際、1968 年の初めにナショナル セミコンダクター社は、LM101 チップに補償用の 30 pF のコンデンサを付け加えたハイブリッド版の LH101 を発表しています。しかし、それにもかかわらず 741 は、IC OP アンプの偉大な標準になったのです。

● LM101A

ボブ・ワイドラーは、LM101 の基本的な設計を LM101A で更新しました。ナショナル セミコンダクター社は、1968 年の終わりに LM101A を発表しています。LM101A は、低く安定した入力バイアス電流を特徴とした OP アンプ LM101 の回路構成をより洗練させた製品でした [文献 (7)]。

ほとんど同時に、ナショナル セミコンダクター社は LM107 を発表しています。LM107 は、LM101A のモノリシックのチップ上に 30 pF の補償コンデンサを内蔵させた製品でした。107 と 741 は、AC 特性のうえでは同程度でしたが、DC 特性では 107 が優れていました。

● μ A748

μ A748 は、 μ A741 を外部で位相補償するタイプで 1969 年にフェアチャイルド社によって発表されました。これは、ナショナル セミコンダクター社の LM101/LM101A シリーズに対するフェアチャイルド社の答えでした。748 は、ピン 1-8 間に外部補償コンデンサを実装して、ちょうど 101/101A タイプのように機能しました。

● 1 パッケージに複数の 741 が実装されているタイプ、汎用単電源タイプ

741 のようなポピュラなデバイスでは、同じパッケージ中に OP アンプが 2 個入り（以下、デュアル・タイプ）や 4 個入り（以下、クワッド・タイプ）のものがすぐに加わりました。紙面の都合ですべてを説明できませんが、ポピュラなものでは、8 ピンの DIP で 2 個の 741 が入ったモトローラ社の MC1558/1458 がありました。それ以来デュアル・タイプが、IC OP アンプのとてもポピュラなパッケージになったのです。また、モトローラ社の MC4741 やナショナル セミコンダクター社の LM148 のようなクワッド・タイプの 741 も入手できるようになりました。

* 3：フェアチャイルド社に勤めていたとき、事務所を設計者のデイブ・フラガーと共有していたジョージ・エルディ (George Erdi) が μ A741 の起源について面白い話をしている。LM101 が発表された直後のことと思われるが、2 人は補償に必要なコンデンサがなぜ外付けだったのか議論していた。フラガーの結論は、そのときに使用していたナショナル セミコンダクター社のプロセスでは、単に内部にコンデンサを入れることができないということだった。「だが、我々にはできる！」と彼が言って、そしてまもなく補償用コンデンサを内蔵した μ A741 が生まれたという。

1972年に、ナショナル セミコンダクター社のラッセル (Russell) とフレデリクセン (Frederiksen) は、低電圧で単電源の動作に適した OP アンプ技術を発表しました [文献 (8)]。LM324 と名付けられたこの OP アンプは、低価格な工業標準の汎用クワッド・タイプの OP アンプになりました。同じようにデュアル・タイプでは、LM358 がそのあとに続きました。この論文で提案された主要な概念の一つは、ジェームズ・ソロモン (James Solomon) の功績による入力段の g_m を抑える方法でした [既出文献 (5)]。

IC OP アンプの歴史からすると、上述した汎用 IC OP アンプは 30 年も経った古いものなので、とっくに消えただろうと思うかもしれませんが、しかし、この場合はそうではなくて、今現在でもそれら多くの OP アンプは入手可能なのです。

● AD741 …高精度な 741

741 も 101A も真の高精度アンプとしては設計されていませんでした。741 や 101A といった OP アンプが開発されたあとの数年間、他の IC メーカーは高精度アナログ回路の市場に向けて、これらのポピュラな OP アンプの性能を改良する研究を行いました。1971 年にアナログ・デバイセズ社は、これに向けた大事な一步を踏み出し、「マサチューセッツ州 ウィルミントンの新星」となるデバイスを開発しました。それらの技術や設計能力は ADI 社に蓄積され、リニア IC の製造に直ちに役立つことになりました。

最初に ADI 社で生産された IC の一つは、741 の設計を改良した OP アンプ AD741 です [文献 (9)]。この OP アンプの等価回路を図 4-4 に示します。

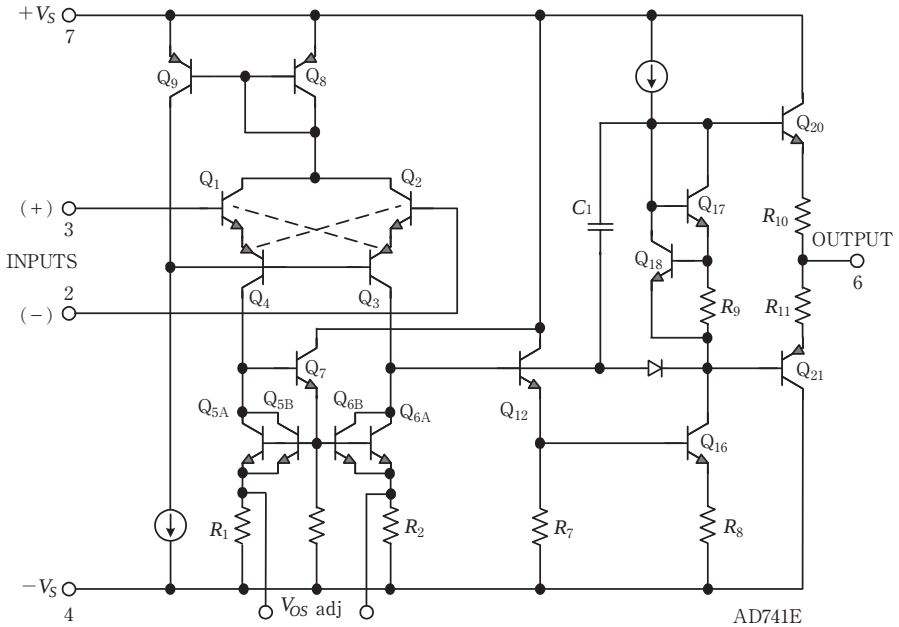
この回路は、図 4-3 の $\mu A741$ とほとんど同じように見えますが、データシートには必ずしも現れないような IC の性能に影響するたくさんの微妙な工夫があることは、知られてよいでしょう。この場合、 $\mu A741$ とのおもな相違点は、クロス配置させた 4 個のトランジスタによる入力段 (Q_1 - Q_4 の交差した破線で表示されている) の使用や、負荷として 4 個のカレント・ミラー・トランジスタ Q_5 - Q_6 を使用したことから明確なように、熱的にバランスの良いレイアウトを実現したことです。さらに、高い効率のトランジスタを使用したため、より良い出力段となっています。

この設計の高性能版が AD741L で、オフセット電圧 $500 \mu V_{(max)}$ 、電圧ドリフト $5 \mu V/^\circ C_{(max)}$ 、バイアス電流 $50 nA_{(max)}$ 、最小ゲインは $2 k\Omega$ 負荷で 50,000 倍 (94 dB) を実現しました。ADI 社はまた、DC 特性を AD741L とそっくり同じにして改良した 301A タイプの OP アンプ AD301AL を開発しました。

1973 年当時、AD741L は 100 個注文時で 1 個あたり 6.00 ドルで販売されましたが、AD741J は、同じ数量でたったの 1.25 ドルで購入できました。

汎用 IC OP アンプが完成したのを受けて OP アンプの設計者は、より高精度な用途に焦点を合わせはじめます。つまり、バイアス電流をより低く、オフセット電圧をより低く、

〈図 4-4〉 AD741E モノリシック IC OP アンプの等価回路



ゲインをより高くといった、さまざまな問題を減らすことに目標を絞ったのです。より高精度な IC OP アンプ開発の一般的な道筋について、次節で解説することにししょう*4。

4-2 スーパーベータ IC OP アンプ… LM108 から OP97 へ ●

OP アンプ 101 を開発したあと、ボブ・ワイドラーはスーパーベータ*5のバイポーラ・トランジスタ技術を探しはじめました。スーパーベータ・トランジスタとは、普通なら 200 程度である h_{FE} を、数千あるいはそれ以上を得られるように特別な拡散プロセスを経

*4：話の筋道をはっきりさせると、このスーパーベータ・トランジスタによる高精度 OP アンプ（他の OP アンプも含めて）の話題は、連続した OP アンプの発展の流れのなかでは一つの事件である。もちろん、現実の時間ではおのおのの技術は、多くの他の同時代の IC OP アンプの発展と多くの類似点があった。

*5：混乱を避けるためには、「スーパーベータ (super β)」という用語は、実際には「高 h_{FE} 」と示すべきだが、巷には「スーパーベータ」の名が行き渡っている。

てできるものです。1組のスーパーベータ・トランジスタをOPアンプの入力段に使うと、入力電流を1/10～1/20に減らせる可能性があります。

しかし、OPアンプにスーパーベータ・トランジスタを使うことは、スーパーベータのプロセスが降伏電圧を5V以下に減らしてしまうため簡単ではありません。したがって、高い電圧を正常にバッファする目的で、スーパーベータ・トランジスタ周辺に回路を追加する必要があります。

スーパーベータ・トランジスタを使った最初のICは、ボブ・ワイドラーによって1967年に開発されたボルテージ・フォロワLM102で、それは1970年に改良されてLM110になっています[文献(10)]。また、ボブ・ワイドラーは、スーパーベータ・トランジスタの動作を一般的に解説した文献を上梓しています[文献(11)]。

102および110ボルテージ・フォロワICは、少々特別なICでした。内部回路はゲイン1のバッファとして構成されているので、回路エンジニアによる設計の必要(もちろん可能ではあるが)がありません。それにしても、スーパーベータ・トランジスタが少なくとも一つの製品に応用できたので、スーパーベータ・トランジスタ入力のOPアンプを実現する可能性が明確になりました。

一方、このような技術の初期の発展段階で、スーパーベータ・トランジスタをOPアンプに取り入れる設計に取り組んでいるエンジニアはボブ・ワイドラーだけではありませんでした。モトローラ社ではソロモン(Solomon)、デービス(Davis)、リー(Lee)が、1969年の初めの報告[文献(12)]にあるようにOPアンプMC1556を開発しています*6。

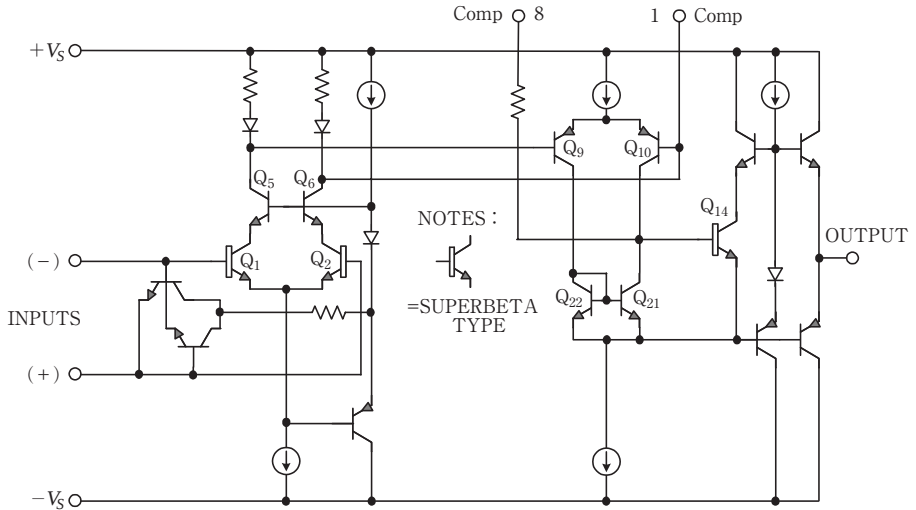
MC1556は2段構成のOPアンプで、スーパーベータNPNトランジスタのペアが、入力段のPNPトランジスタのペアと組み合わせられていました。 h_{FE} が4000を超えるスーパーベータ・トランジスタの採用によって、設計的には2nAの入力電流となったのです。また、741や当時入手可能な他のデバイスより目に見えて高いスルー・レートを示したことで、広く世に知られることになりました。

1969年の終わりにボブ・ワイドラーは、もう一つのIC OPアンプLM108の設計に貢献しました[文献(13)]。LM108は、入力段にスーパーベータ・トランジスタを使った効果で低入力電流を実現した高精度IC OPアンプの長い系統の、その最初となるOPアンプでした。LM108の等価回路を図4-5に示します。

この回路で、ベース部分が白抜きのトランジスタ記号で描かれているのがスーパーベータ

*6：かなり皮肉なことに、OPアンプ1556は、おそらく汎用OPアンプにスーパーベータ・トランジスタをもっとも早く使用したので、スーパーベータ・トランジスタへの信頼を落としてしまったかもしれない。もうひとつの意外な成行きは、スルー・レートを高くする手段として入力段の g_m を減少させる手法を確立したことで、この論文自体がよく知られている(そしてしばしば引用されている)ことである。

〈図 4-5〉 LM108 スーパーベータ入力モノリシック IC OP アンプの等価回路



タ NPN トランジスタで、他のトランジスタは高電圧のタイプです。Q₁-Q₂ はスーパーベータ入力の差動アンプを形成し、Q₅-Q₆ でカスコード接続しています。このカスコード接続によってバイアスされたダイオードの順方向電圧降下は、Q₁-Q₂ の V_{CE} が 0 V と見えるように働きます。108 の 2 段目は、PNP の差動アンプ Q₉-Q₁₀ とバランスした負荷 Q₂₁-Q₂₂ で構成されています。出力電圧は Q₁₄ のエミッタから、AB 級の出力段によってバッファして出力しています。

108 の設計は、室温で 1 nA (typ) 以下という著しく低いバイアス電流を実現しました。オフセット電圧は、代表値で 700 μ V、最大値で 2 mV、利得は 300,000 (110 dB) です。108 は ± 15 V 電源での動作時に ± 14 V の非常に広い入出力レンジをもち、無信号時の消費電流は 300 μ A です。さらに、 ± 2 V の電源電圧で動作することができ、電源電圧 5 V での使用に有効でした。ここで注意すべきポイントは、108 はワイドラゲが以前に設計した LM101/101A の 10 k Ω の負荷定格とは異なることです (実際には 101/101A は所定のゲインで 2 k Ω 負荷で動作することができた)。これは、108 の設計が低電力を特徴としたために生じた副産物でした。

基本的な LM108 の設計は、ナショナル セミコンダクター社によって LM108A として改良されています。これは、LM108 のオフセット電圧を 500 μ V (max) にしたものです。また、内部位相補償タイプが LM112 としてリリースされました。

その後、しばらくして他の多くの会社は、108と112の競合製品を似たような型番で、いくつかは特性を改善して発表しました。1970年代のアナログ・デバイセズ社はそのような会社の一つとして、オリジナルの108と112に似た仕様のAD108とAD108Aを販売しています。

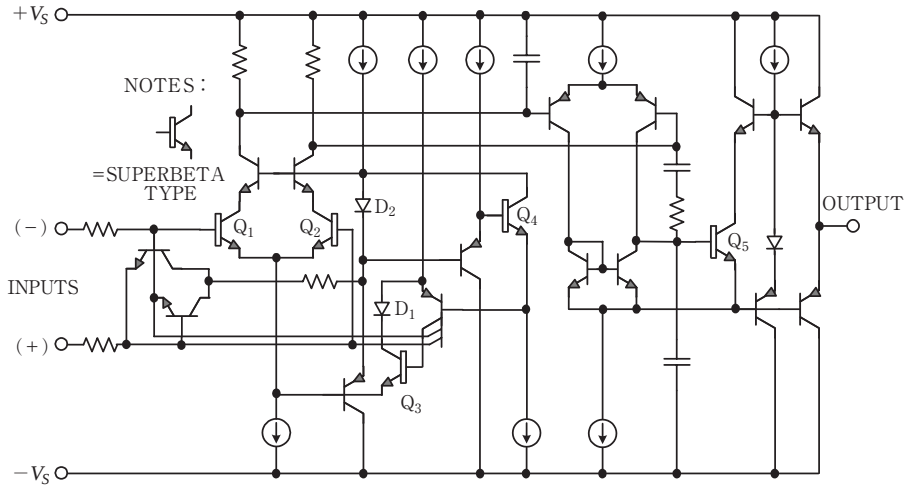
1969年に、マルフ・ルーディン (Marv Rudin) とガース・ウィルソン (Garth Wilson) が、高精度リニアICを指向した新しいブランドの会社、プレジジョン・モノリシック社 (Precision Monolithics Incorporated ; PMI) を設立しました。PMI社は、1976年に108Aに対抗するOPアンプOP08を発表しています。OP08は、ジョージ・エルディ (George Erdi) とラリー・ファーンズレイ (Larry Farnsley) によって修正/改良された設計で、単なる108Aのセカンド・ソースではありません。このエルディは、フェアチャイルド社の $\mu A725$ (PMI社のSSS725)の父として知られています。エルディは、すでに何種類か主要なOPアンプの設計思想 (725からOP07へとつながる) を確立していたフェアチャイルド社から、1969年にPMI社に移籍したエンジニアです。

新しいOP08の設計では、オフセット電圧を減らしゲインを増やすために、熱均衡がとれたレイアウトを加味しました。この成果は、 $2\text{ k}\Omega$ 負荷で最小ゲイン仕様50,000 (94 dB)、オフセット電圧が最高グレードで $150\text{ }\mu\text{V}_{(\text{max})}$ という性能を実現しました (他の仕様は108Aに匹敵)。同じ頃、PMI社のOP12が発表されています。これは112に匹敵する性能ですが、内部に位相補償がついたこと以外はOP08とそっくりなOPアンプでした。

108/112と同様の設計でOPアンプを発表したもう一つの会社は、リニア・テクノロジー社 (Linear Technology Corporation ; LTC) でした。1981年にナショナル セミコンダクター社とプレジジョン・モノリシック社のエンジニアたちによって設立されたリニア・テクノロジー社は、スーパーベータOPアンプLT1008とLT1012を1983年に発表しました [文献 (14)]。LT1008は、PMI社に在籍していたOPアンプの設計エンジニアであるジョージ・エルディによって率いられたチームが設計したもので、オフセット電圧は $120\text{ }\mu\text{V}_{(\text{max})}$ 、電圧ドリフトが $1.5\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}_{(\text{max})}$ にトリミングされ、ゲインは $2\text{ k}\Omega$ 負荷で最小120,000倍 (102 dB) という性能でした。初期の108Aに対して注目すべき特徴は、入力バイアス電流のキャンセル回路の採用で、LT1008が $\pm 100\text{ pA}_{(\text{max})}$ 以下の低バイアス電流を実現している点でしょう。

一方PMI社は、OP08とOP12の設計を追求してPM1008とPM1012を1987年に発表しました。これらは、トゥイックナム英国デザイン・センタのピーター・ガウセン (Peter Gaussen) が設計したものです。PM1008にはLT1008に、PM1012にはLT1012に、それぞれ匹敵する性能がありました。また1987年、さらに洗練された設計によるPMI社のOP97の発表で、OPアンプの性能は一段と向上しました。OP97は、機能的には112や1012と同等で、内部位相補償されたスーパーベータ入力型のOPアンプでした。OP97フ

〈図 4-6〉 OP97/297/497 スーパーベータ入力モノリシック IC OP アンプの等価回路



ファミリの等価回路を図 4-6 に示します。

OP97 の最高グレード (A, E) は、オフセット電圧が $25 \mu V_{(max)}$ 、電圧ドリフトが $0.6 \mu V/^{\circ}C_{(max)}$ 、バイアス電流が $\pm 100 pA_{(max)}$ 、最低ゲインが $2 k\Omega$ 負荷時で 200,000 倍 (106 dB) の性能です。技術的な話とは別ですが、OP97 が「低消費電力の OP07」として販売されたことは注目に値します*7。OP97 は 2 段の回路構成ですが、OP07 は 3 段の回路構成です。OP97 と OP07 は、少しも同じ内部構成ではないのですが、内部回路の違いを論点にすることよりも、多くのユーザには OP アンプが高精度で低消費電力であることのほうが重要なのです。

OP97 は今日現在でも入手可能で、OP97 ファミリのデュアル・タイプの OP297 やクワッド・タイプの OP497 も同様に入手可能です。OP297、OP497 はデレク・パウワーズ (Derek Bowers) が設計し、それ以前の OP アンプが「ツェナー・ザップ (Zener-zap)」トリミングを使っていたのとは対照的に、レーザ・トリミングを加えて 1990 年と 1991 年に

*7：前の PMI 社と ADI 社の OP アンプ製品担当の重役ジェリー・ジズ (Jerry Zis) は後に、「OP97 は、より低消費電力のデバイスを求めている OP07 のユーザに受け入れられるだろうと考えていたが、そんな特定の市場が本当に存在したのだった」と語っている。このことは、OP97 が素晴らしいスペックであっただけでなく、標準の OP07 になかった 1 パッケージに 2 個入り (OP297) タイプ、4 個入り (OP497) タイプをデバイス・ファミリに加えたことも一因となっている。

発売されました。

● AD508とAD517

ADI社は、入力段に独自のスーパーベータ・トランジスタを使った外部位相補償型の高精度OPアンプAD508で、スーパーベータOPアンプの市場に早い段階から参入しました[文献(15)]。AD508は、ノバ・デバイセス社(Nova Devices)からADI社に転職したモデスト・マイディーク(Modesto "Mitch" Maidique)によって設計され、1972年に発売されました。AD508は、彼自身が1971年にADI社で設計した非常に高性能の高精度OPアンプであったAD504を、さらに改良したものでした[文献(16)]。

AD508は、108シリーズのOPアンプの内部回路構成とはまったく異なり、本質的にとても高精度なOPアンプ設計であるといわれています。このOPアンプは、薄膜抵抗の採用、バランスしたアクティブ負荷をもつスーパーベータ・トランジスタの入力段、熱的にバランスしたレイアウトなどの特色がありました。設計は、非常に重い負荷や熱に対する堅牢性を高める目的で、3段のバッファ出力を備えた2段の二重積分回路という構成を採用しています。AD508Kは、 $2\text{ k}\Omega$ 負荷で $138\text{ dB}_{(\text{typ})}$ のオープンループ・ゲイン(108や112の回路構成のOPアンプよりもずっと高い値)、 10 nA 以下のバイアス電流、 $0.5\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}_{(\text{max})}$ の低電圧ドリフトを達成しました[文献(17)]。

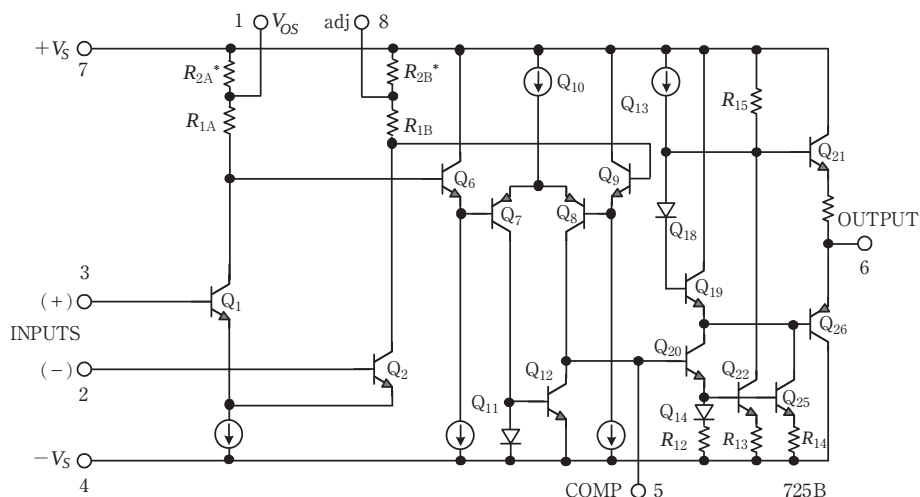
AD508の内部位相補償タイプは、1978年にAD517として発表されています[文献(18)]。このアンプもまた、スーパーベータ・トランジスタの入力段を採用して、レーザによるウェハ・トリミングを行ったことが大きな特徴です[文献(19)]。このトリミングが、もっとも高いグレードのAD517Lでオフセット電圧 $25\text{ }\mu\text{V}_{(\text{max})}$ 、電圧ドリフト $0.5\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}_{(\text{max})}$ という性能を可能にしたのでした。

ずっとあとになってADI社は、OP97シリーズの流れに沿って設計した内部位相補償タイプのスーパーベータOPアンプのシリーズを発表しました。それは、AD705(シングル)、AD706(デュアル・タイプ)、AD704(クワッド・タイプ)シリーズです[文献(20)～(22)]。リード・スナイダー(Reed Snyder)が設計したこれらのOPアンプは、1990年と1991年に発表されました。

PMI社は1990年にADI社によって買収されて、2社のOPアンプ製品のラインアップは一つになりました。今日、ADI社の製品カタログには、多くのオリジナルADI製品(ADxxx)と同じように、多くのオリジナルPMI製品(OPxxx)が並んでいます。

4-3 高精度バイポーラIC OPアンプ… $\mu\text{A}725$ からOP07ファミリへ●

1969年、高精度OPアンプ開発の第二幕が、LM108の設計とほぼ同時に始まりました。

〈図 4-7〉 μ A725 モノリシック IC OP アンプの等価回路

当時フェアチャイルド社で働いていたジョージ・エルディ (George Erdi) は、高精度 OP アンプを一から設計したいという気持ちを込めた最初の IC OP アンプ、 μ A725 を開発しました。

725 や一般的な高精度 OP アンプ設計に関するかなりまとまった研究論文で、エルディは多くの条件のもとで絶対的な真理となっていくつかの規則を定めました [文献 (23)]。725 の等価回路を図 4-7 に示します。

725 は、NPN 差動アンプ入力段の Q_1 - Q_2 、それに続く差動アンプ段の Q_7 - Q_8 、AB 級動作のエミッタ・フォロワ Q_{21} と Q_{26} によってバッファされる最終のシングル・エンド出力段の Q_{22} 、基本的に以上の 3 段構成の設計となっています。回路は、外部の 4 素子の RC 回路で 5 番ピンから位相補償されます。このような 3 段の回路構成は、より複雑な位相補償を必要とする犠牲をとまいましたが、以前の 2 段構成の OP アンプよりずっと高いゲインをもたらしました。

入力オフセット電圧のトリミングは、100 k Ω のポテンショメータの両端を 1-8 番ピン間に接続し、ポテンショメータの摺動端子を $+V_S$ につないで、もっとも低いオフセット電圧となるように調節して行います。この推奨方法で調整することにより、もっとも低い電圧ドリフトが得られます。

図 4-7 の等価回路は単純化されているので回路の微妙な点が隠れています。実際には、 Q_1 と Q_2 は熱的に対称なチップの軸に並列に並べられた 2 組ペアによる 4 個のトランジスタです。これは、出力段の電力消費による温度変化を、二つの入力段で熱的に生じたオフ

セット電圧と等価とみなして、それを排除しようというアイデアだったのです。この原理は、最初に725の設計で確立して以来、高精度OPアンプ設計の基本原理となっています[既出文献(15)、文献(23)の図2にチップ写真]。

もう一つの725での性能の最適化のキープポイントは、文献(23)(24)でエルディがいくつか詳細に記述しているように、入力オフセット電圧がゼロとなることを条件としたオフセットのゼロ調整と電圧ドリフトに関連するものです。725は、オフセット電圧の仕様が $600\text{ }\mu\text{V}_{(\text{typ})}$ 、推奨どおりにオフセット電圧がゼロ調整されると結果的な電圧ドリフトが $0.6\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ でした。入力バイアス電流は $45\text{ nA}_{(\text{typ})}$ 、オープンループ・ゲインは132 dBでした。

ジョージ・エルディは、新しく設立されたPMI社に参加するため1969年にフェアチャイルド社を退職しています。PMI社で彼は、725の高精度OPアンプの考えかたを進めて、SSS725を設計しました*⁸。このOPアンプは、機能的にはオリジナルと同じでしたが、性能は改善されていたのです。後にこのOPアンプは、PMI社からOP06として発表されました。このOP06は、差動入力のプロtection回路を除けば725とそっくりでした。

PMI社ではSSS725のあと、ほどなくしてOPアンプOP05を1972年に発表しました[文献(25)]。新しいOP05の設計でジョージ・エルディは、入力バイアス電流キャンセル回路と差動入力の過電圧保護を加え、位相も内部補償として、とても簡単に使える高精度OPアンプを実現しました。回路構成から見ればOP05は、725の3段回路構成と同じと見なすことができます。

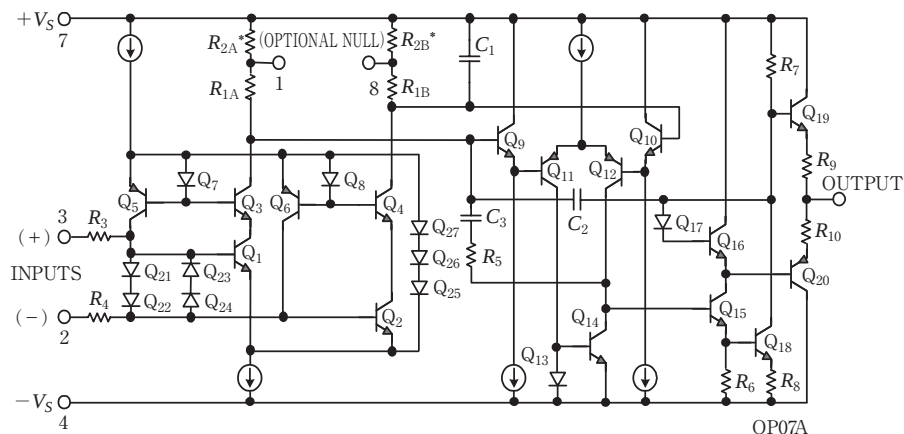
ここまでくると高精度OPアンプは、ユーザにとって使いやすいデバイスとなりました。しかし、オフセット電圧という高精度OPアンプの問題は、まだユーザ任せになったままです。OP05は、オフセット電圧調整を $20\text{ k}\Omega$ のポテンショメータによって行う725とそっくりな手動調整を採用しています。OP05の未調整時のオフセット電圧の最大値は $500\text{ }\mu\text{V}$ で、電圧ドリフトはゼロ調整後で $0.6\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ でした。

OP05は成功を取りましたが、オフセット電圧の課題は残っていたのです。この当時、他のICメーカは、前述のADI社のレーザ・ウェハ・トリミング[既出文献(19)]のような積極的にウェハにトリミングする方法に方向転換していました。725やOP05の進化の次の段階は、製造段階でOPアンプが高精度を維持できるようにするため、オフセット電圧の積極的なトリミングを行う方向に向かっていました。

1975年にエルディは、 300 mA の電流パルスを使って一列になったツェナー・ダイオードを漸次短絡してオフセット電圧をトリミングする技術について発表しています。OPア

* 8：“SSS”の記号は、初期のPMI社のOPアンプで使われ、優れたセカンド・ソースの象徴となった。そうしたもう一つの例はPMI社のSSS741である。

〈図 4-8〉 OP07 モノリシック IC OP アンプの等価回路



*NOTE:

R2A AND R2B ARE ELECTRONICALLY ADJUSTED ON CHIP AT FACTORY

ンプの入力段の負荷抵抗に列になったツェナー・ダイオードを意図的に並べる、このいわゆる“Zener-zapping (ツェナー・ザッピング)”が、ウェハ上での OP アンプのオフセット電圧のトリミングを可能としたのです [文献 (26)]。この新しいトリミング技術を利用した最初の OP アンプは、エルディの設計した OP07 で、1975 年に PMI 社によって発表されています [文献 (27)]。

図 4-8 に示す OP07 の等価回路において、列になったツェナー・ダイオードは図では描かれていませんが、分割された負荷抵抗 R_{2A} と R_{2B} と並列に接続されています。この方式の等価回路は、参考文献 (27) の図 3 で見ることができます。本質的なことを述べれば、列になったツェナー・ダイオードは分割された負荷抵抗と並列に接続され、その値は漸次大きなオフセット電圧をコントロールするように決められています。

実際のトリミングでは、コンピュータが実際に OP アンプのオフセット電圧を測定して、オフセット電圧がより小さいレベルになるように適切なツェナー・ダイオードを選び、大きな電流のパルスでそのツェナー・ダイオードを短絡します。

この電流パルスは、効果的にツェナー・ダイオードを短絡し、並列に接続された負荷抵抗も短絡されることになります。このプロセスは、オフセット電圧をこれ以上減らすことができなくなるまで繰り返し行われるのです。

このようにして作られた新しい OP07 は、かなり印象的なオフセット電圧の仕様となっています。トリミングされた OP07 の全体の分布データでは、オフセット電圧は $150 \mu\text{V}$ あるいはそれ以下となっていて、最上級グレードの OP07A では、オフセット電圧が $25 \mu\text{V}_{(\text{max})}$

に区分けされていると報告されています。重要なことはこのトリミング方法によって、オフセット電圧が0Vに調整されると同時に電圧ドリフトを減らしたので、トリミングされたOP07は最大値で $0.6\ \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ 、代表値ではそれよりかなり低い電圧ドリフトになりました。

ツェナー・ザッピングというトリミング技術は、誤差を減らす目的で他のデバイスの製造にも応用することができ、製造工程への追加費用も低くてすむので、まぎれもなく価値のある技術革新でした。その技術は、現在でも高精度OPアンプの製造に使われる多くのアクティブなトリミング技術の一つです（トリミング技術の詳細については本書の第2部を参照）。

OP07は、高精度OPアンプの標準デバイス、いうなれば高精度OPアンプの741になりました。そして間もなく、OP07のセカンド・ソースが広く普及していきます。

PMI社はOP07の改良を続け、1988年にOP07より高いオープンループ・ゲインをもつOP77を発表しました。最上級グレードのOP77Aは、代表的なゲインで142dB、オフセット電圧 $25\ \mu\text{V}$ 、電圧ドリフト $0.3\ \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}_{(\text{max})}$ を達成しました。その後、OP177が追加され、デバイス一覧表に加わったのです。このOP177はOP77Aに相当する性能をもち、OP177Fでは産業用の温度範囲で仕様化されました。

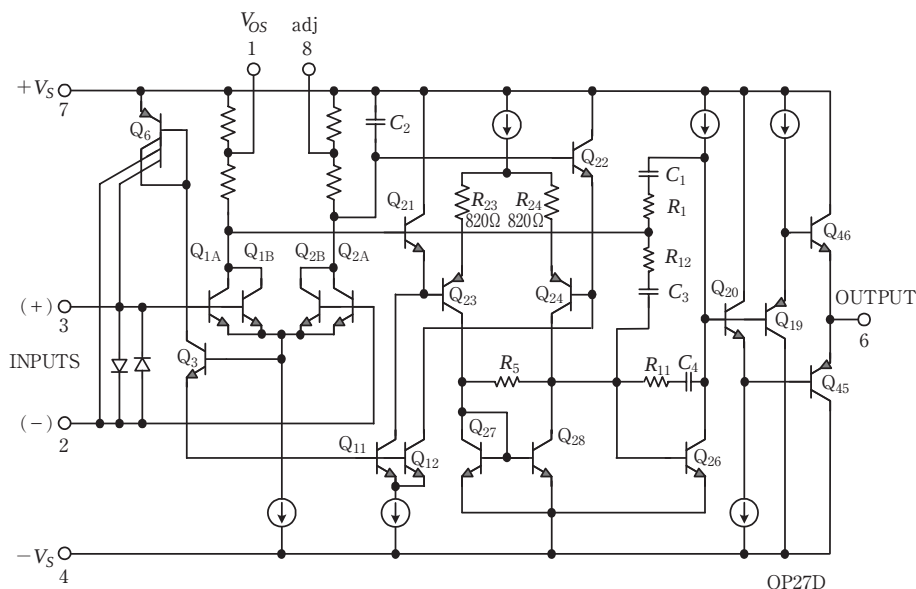
1990年にADI社がPMI社を買収する少しまえに、ADI社のエンジニアたちは、紛れもなく優れていたOP07タイプのOPアンプを上回るOPアンプを開発しています。モシェ・ゲーテンハバー（Moshe Gerstenhaber）の設計によるAD707は、民生用途と産業用途の温度範囲で動作し、OP77やOP177と仕様のうえで本質的に適合していました〔文献(28)〕。AD707は、1988年に発表されました。1パッケージに2個のAD707が入ったAD708は、1989年にリリースされました。モシェ・ゲーテンハバーは、同様にAD708も設計しています〔文献(29)〕。

● OP27とOP37

これまでの話でお気づきのことと思いますが、OP07の系統には、他にも似たようなOPアンプが含まれていました。その2種類のOPアンプの例としては、ともにPMI社のジョージ・エルディが設計したOP27とOP37があげられます。OP27とOP37は、ともに1980年に発売されています〔文献(30)(31)〕。OP27とOP37の等価回路を図4-9に示します。

図4-9のOP27/37と図4-8のOP07の等価回路とを比べると見かけ上よく似ているところから、これらのOPアンプがOP07の類似品だったと断定するのは簡単かもしれませんが、しかし、二つのOPアンプの類似点は、3段構成のOPアンプであるということだけで、本当の設計の違いは、異なる用途に応じてそれぞれに最適化された結果である、というこ

〈図 4-9〉 OP27/OP37 モノリシック IC OP アンプの等価回路



とを心にとめておきましょう。

OP27/37 の設計の段階でさまざまなノイズ源についての調査がなされた結果、OP27/37 の 3 段構成 OP アンプは、低い入力ノイズと速い応答特性を目的とした回路構成になっています [文献 (31)]。この結果、入力段の動作電流は OP07 と比較して多くなったため、位相補償を少なくしたタイプとして OP37 が用意されました (それでも OP37 はゲイン 5 で安定である)。これは、基本となる OP27 がユニティ・ゲイン範囲内で安定なことから、OP37 では位相補償用コンデンサ C_1 を小さくすることで実現しました (記者注: OP37 は OP27 よりゲイン帯域幅が 7 倍以上も大きい)。また、入力ノイズを低くする目的で、直列に接続された過電流保護抵抗は取り除かれました。

OP27 は、入力ノイズ電圧 $3.0 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ (@1 kHz)、これ以下の周波数では $1/f$ ノイズが支配的となるコーナ周波数は 2.7 Hz 、スルー・レート $2.8 \text{ V}/\mu\text{s}$ 、ユニティ・ゲイン帯域幅 8 MHz という低い入力ノイズ性と高速性の両立を実現しました。OP27/37 は、いま述べた新たな AC 特性水準を実現させる一方、DC 特性においても同じくらい印象的な OP アンプだったのです。OP27/37 は入力 1 段目にツェナー・ザップ・トリミングを行うことで、オフセット電圧 $25 \mu\text{V}_{(\text{max})}$ 、電圧ドリフト $0.6 \mu\text{V}/^\circ\text{C}_{(\text{max})}$ 、ゲイン $126 \text{ dB}_{(\text{typ})}$ という特性を実現しています。OP27、OP37 はセカンド・ソースも広く普及し、低ノイズで高精度

なDCアンプの用途で標準のOPアンプになりました。

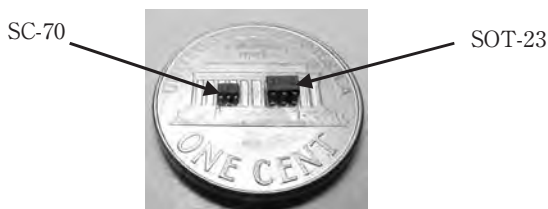
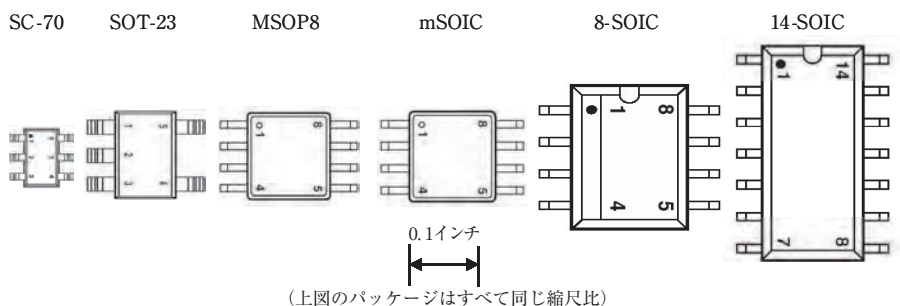
● OP07 とコンパチブルで単電源/小型パッケージ化

OP07やOP27, それに相当する特性の高精度OPアンプは, ほとんどの用途にとって十分な性能をもつことは, 多くの回路エンジニアに理解していただけるでしょう。しかし最近, そうした基本原則が変わってきたようです。

高精度OPアンプはまだまだ必要ですが, より小さなパッケージのOPアンプや, 単電源OPアンプの需要も多くなっています。回路設計が単電源動作を必要とし, 小型パッケージには古い製品の大きなICチップは入らないので, OP07/27世代の伝統的なICチップ設計は新しい用途では使うことができなくなってきました。

現代のIC OPアンプ・パッケージの外観を写真4-1に示します。写真の上部に相対縮尺で示した図を見ると, 14ピンSOICからSC-70パッケージへとサイズが減少していることがはっきりとわかります。写真ではSC-70とSOT-23パッケージを, 米国1セント硬貨との比較で示しました。

つい最近, ADI社が発表したOP07系統の二つのOPアンプは, このような問題への提案となっています。一つは, OPアンプOP777シリーズで, OP777(シングル), OP727



〈写真4-1〉 相対縮尺で示したIC OPアンプ・パッケージ

(デュアル・タイプ)、OP747 (クワッド・タイプ) で構成されています [文献 (32)]。デレク・バウワーズ (Derek Bowers) の設計により 2000 年に発売されたこの新しい OP アンプは、0 V まで入力できるバイポーラ PNP 入力段、270 μ A の動作電流、レール・ツー・レールの CMOS 出力段を特徴としています。またこの OP アンプは、MSOP、SOIC、TSSOP パッケージで製品化され、2.7 ~ 30 V の電源電圧で動作します。

もう一つは、さらに最近の話ですが同しくデレク・バウアーによって設計されて、2001 年に発売された OP1177 シリーズです。このシリーズは、OP1177 (シングル)、OP2177 (デュアル・タイプ)、OP4117 (クワッド・タイプ) で構成されています [文献 (33)]。このシリーズの設計は、動作電流が OP777 シリーズよりわずかに大きい 400 μ A (1 個のアンプ当たり) で、それが $\pm 2.5 \sim \pm 15$ V の両極性の電源で動作します。単電源の用途を目的としなかった代わりに、この OP アンプは小さいパッケージで、かつ $-40 \sim +125$ °C の広い温度範囲で該当する仕様を満足しています。

4-4 高精度 JFET IC OP アンプ… AD503 から AD820/822/824/823 ファミリーへ

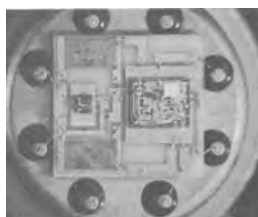
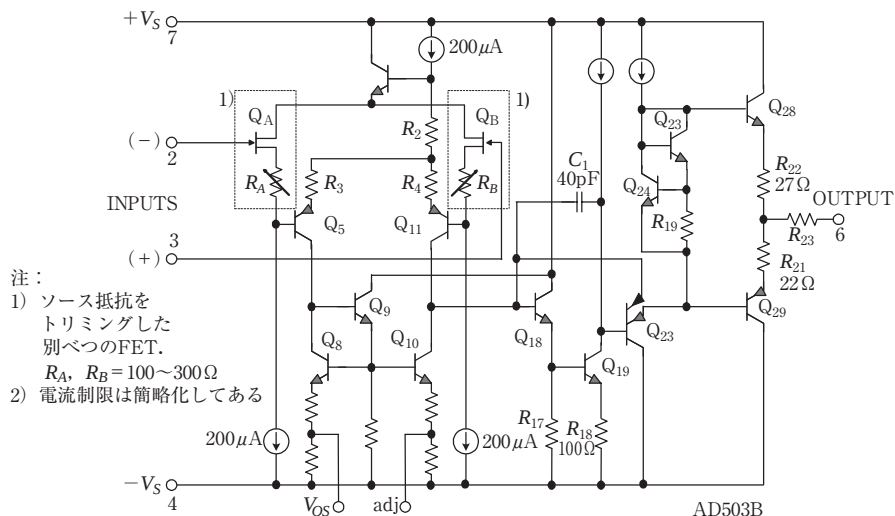
FET 入力 IC OP アンプの開発は、バイポーラ IC OP アンプの発展ほど簡単ではなく、また急速でもありませんでした。これにはいろいろと事情があり、この物語が進むことで少しずつ明らかになるでしょう。

最初の事情から述べると、IC の歴史において初期の段階では、入力段に高品質な FET を採用した OP アンプが相対的に不足していたことは確かな事実です。もちろん誰もそれを望んでいなかったのではなく、むしろ非常に少数しか FET 入力 OP アンプを作ることができなかったのです。多くの FET 入力 OP アンプは、モジュール OP アンプやハイブリッド OP アンプの時代からすでに存在し (前章参照)、FET 入力アンプは高速の信号処理や低入力電流の計装用途にはとても重要でした。しかし残念ながら、高性能のモノリシック FET 入力 IC OP アンプの開発には長く苦悩の道をたどらなければなりませんでした。

初期の FET 入力 OP アンプは、ダグラス・サリバン (Douglas Sullivan) とモデスト・マイディーク (Modesto "Mitch" Maidique) によって設計されました。この ADI 社の OP アンプは AD503、AD506 として知られていて、1970 年に発売されました。AD503、AD506 の等価回路を図 4-10 に、設計のために使われたチップの写真を写真 4-2 に示します。

図 4-10 の等価回路からあきらかなのは、この OP アンプは二つのチップを使っているということです。一つのチップはアンプの主要部分で、入力段の後は 741 と少々似ています。入力段は、選別された N チャネル JFET のペア Q_A - Q_B で構成されています。写真 4-2 で、二つのチップはそれぞれ中心より右と左に配置されていることがわかります。また、1 組のトリミングされた抵抗 R_A と R_B の様子を、サブストレートの左上と左下の角に見る

〈図 4-10〉 AD503, AD506 … 2 チップ構成のハイブリッド IC OP アンプの等価回路



〈写真 4-2〉 AD503, AD506 のチップ

ことができます。

AD506J, AD506K の場合、それぞれ最大オフセット電圧が 3.5 mV (J グレード), 1.5 mV (K グレード) 以下でユーザーに届くように、抵抗 R_A と R_B はもっとも低いオフセット電圧にレーザ・トリミングされています。トリミングされていない AD503 も、オフセット電圧以外は同様に機能します (オフセット電圧はオフセット電圧調整ピンによってユーザーがトリミングできる)。ブートストラップ構成を採用したので、この OP アンプは入力電圧範囲内で一定のバイアス電流と、優れた CMR 特性 (代表値で 90 dB) をもっていました。

AD503/506 のバイアス電流 (後の ADI 社の FET 入力 OP アンプと同程度の少なさ) は、

5分のウォーミングアップ期間後と規定されていることは注目に値します。しかし、この方法はすべての OP アンプ・メーカによって使われているわけではない保守的なやりかたでした。

AD503/506 ファミリの使いかたは、1971 年のアプリケーション広報に書かれています [文献 (35)]。AD503/506 に関連した内部位相補償のないタイプの OP アンプ、すなわち AD513, AD516 についても同様に発表されています [文献 (36)]。後に、オフセット電圧 $1\text{ mV}_{(\text{max})}$ 、電圧ドリフト $10\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}_{(\text{max})}$ の特性をもつ、さらに優れた AD506L が発表されました [文献 (37)]。

初期のバイポーラ OP アンプの開発から少し遅れて、完全なモノリシック FET 入力 IC OP アンプ、たとえばフェアチャイルド社の $\mu\text{A}740$ 、インターシル社の ICL8007 など、いくつかがリリースされていました [文献 (38)]。ICL8007 は、おそらくいまあげた初期の完全モノリシック P チャネル FET 入力 OP アンプのなかでもっとも良いものですが、その性能はとても自慢できるものではありません。オフセット電圧が何十 mV もあり、電圧ドリフトは数十 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ もあったのです。入力電流が低かったのが、せめてもの救いでした。

1970 年代の初め、すべてのモノリシック FET の問題点は、単純に FET デバイス自身が貧弱に作られたことにありました。モノリシック FET OP アンプの材質の改善を図るためには、良い半導体プロセスが必要だったのです。

1974 年に、2 人のナショナル セミコンダクター社のエンジニア、ロッド・ラッセル (Rod Russell) とデビッド・カルマー (David Culmer) による論文によって、革新は起こされたのです [文献 (39)]。この論文でラッセルとカルマーは、イオン打ち込み (ion-implantation) を使って FET デバイスを作る新しい製造技術について発表しました。NPN バイポーラ・トランジスタの品質と変わらない、とても安定した P チャネル JFET を作ることが可能になりました。同じ論文では、新しい FET 入力の OP アンプ、LF155/LF156/LF157 シリーズも発表されていました。これらの OP アンプは、それ以前のすべてのモノリシック FET OP アンプよりも、低いオフセット電圧 $5\text{ mV}_{(\text{max})}$ と電圧ドリフト $5\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}_{(\text{typ})}$ を実現していました*9。

イオン打ち込み技術の概念が理解され、IC 製造の工業標準的な方法になりましたが、それで OP アンプ LF155/156/157 の製造技術が本当に完成したわけではありません。セカンド・ソース (現在でも入手可能) が出されていたにも関わらず、多くのエンジニアは FET 入力 IC OP アンプの標準となるべき回路構成をさらに模索したのです。実は LF155 シリーズは非対称の回路構成であったため、無信号時の電源電流をコントロールすること

*9：仕様は、OP アンプ LF155, LF156 の 2001 年 12 月版データシートを参照した。

に苦勞したのです。

PMI 社ではジョージ・エルディ (George Erdi) が、ナショナル セミコンダクター社の LF155/156/157 と競うように OP15, OP16, OP17 という FET 入力 OP アンプ・シリーズを設計しました。それらの OP アンプ・シリーズは、ツェナー・ザップ・トリミングとバイアス電流キャンセル回路を採用し、もっとも高い A/E グレードの OP アンプでは、オフセット電圧 $500 \mu\text{V}_{(\text{max})}$ 、電圧ドリフト $5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}_{(\text{max})}$ の性能を達成しました。

また、RCA 社は 1974 年に、汎用 FET 入力 OP アンプとして CA3130 を発表しました [文献 (40)]。P チャネル入力段と CMOS 出力段を採用したこの OP アンプは、低い電源電圧や単一電源の動作に適しました。しかし、MOS タイプの OP アンプがもつ不安定性のため、高精度 OP アンプとはいえませんでした。それでも、後の CA3140 や他のセカンド・ソースは汎用的な実用性が高かったのです。

テキサス・インスツルメンツ社は、1978 年にオリジナルの OP アンプ・シリーズで FET 入力 OP アンプ市場に参入しました [文献 (41)]。これらの OP アンプは、いくつかの電源定格と応答速度、シングル・タイプ、デュアル・タイプ、クワッド・タイプの 3 シリーズで供給され、101 や 741 と同じ回路構成ながらより高速化された伝統的な 2 段構成と、カレント・ミラーで動作する入力 P チャネル FET のペアを採用しています。この TL06x, TL07x, TL08x のシリーズは、標準的なデバイスになっていて、現在でも回路設計に使用できます。とても高速なスルー・レートや OP アンプ内部の対称的な信号経路は、交流信号の処理用途には適したのですが、高精度を要求される回路設計には使用されませんでした。

ADI 社は、FET 入力モノリシック IC OP アンプの改良に取り組み、それ以後長く続いたシリーズの最初の製品として AD542 を 1978 年に発表しました [文献 (42)]。この 2 段構成の OP アンプは、P チャネル JFET 入力の差動ペアを採用し、2 段目は積分回路となっています。細心の OP アンプ設計とレーザ・トリミングは、AD542L では 0.5 mV 以下の低い最大オフセット電圧と最大 $10 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ の電圧ドリフトを実現しました。この性能は、もっとも高性能のバイポーラ・トランジスタ入力の OP アンプには及ばなかったのですが、他のいかなるモノリシック FET 入力 OP アンプよりも良かったのです。

AD542 と同じ方向性でより高速化された OP アンプ AD544 が、1980 年に発表されています [文献 (43)]。AD542 と AD544 は、どちらも高速のデータ処理用途に使う目的で、ルー・カウンツ (Lew Counts) が設計しました。さらに、AD542 や AD544 によく似たデュアル OP アンプとして AD642, AD644 が 1981 年に発表されています [文献 (44)]。上述した OP アンプは、全体的な安定度を高めスルー・レートのバラツキを抑えるため、電源温度係数や入力段の電流が調整されています。こういった特徴は、あとから発売された高精度 OP アンプにも生かされています。

1982 年、AD547 の発表によってこの一連の JFET 入力 OP アンプは、もっとも高精度になりました [文献 (45)]。スコット・ウーサー (Scott Wurcer) が設計したこの OP アンプは、AD547L グレードでモノリシック FET 入力 OP アンプとしては初めてオフセット電圧 $250 \mu\text{V}_{(\text{max})}$ 、最大電圧ドリフト $1 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ を達成しました。そのような低いオフセット電圧と電圧ドリフトは、ウェハ・レベルでのレーザ・トリミングによって可能になったのです。この方法は、以後のすべての ADI 社の高精度 FET 入力 OP アンプの通則となっています。

● AD711/712/713, OP249 IC OP アンプ

AD711/712, AD548/648 の FET 入力 OP アンプ・ファミリは、ADI 社によって 1986 年に発表されました [文献 (46)]。AD711/712 はそれぞれシングル/デュアル・タイプの OP アンプで、見事に調整された性能をもちながらほどほどの低価格であり、中程度の精度でよい用途と汎用用途の両方に適用できるように設計されています。AD712KN は 100 個ロットで 1 個 1.90 ドルで販売されましたが、AD648KN は同じ量で 1 個 2.60 ドルという価格でした。

この OP アンプのシリーズは、AD711K でオフセット電圧 $500 \mu\text{V}_{(\text{max})}$ 、電圧ドリフト $10 \mu\text{V}/^\circ\text{C}_{(\text{max})}$ 、静止時には 3 mA の電源電流といった特徴があります。AD548K では、AD711K に対して同等のオフセット電圧と $1/2$ の電圧ドリフトとなり、電源電流が $200 \mu\text{A}$ という性能でした。ジョアン・クローズ (JoAnn Close) は、ウーサーとカウンツからのアドバイスを得て、AD548/648 シリーズを設計しました。またウーサーは、AD711/712 シリーズを設計しました。AD711, AD712 シリーズには、後にクワッド・タイプの AD713 が加わりました。この JFET 入力 IC の OP アンプ・ファミリは、発表以来非常に人気があって、現在でも回路設計に使用することができます。

ところで PMI 社は、ADI 社によって 1990 年に吸収合併されるまえに、デュアル・タイプの JFET 入力 IC OP アンプ OP249 を発表しています。ジム・バトラー (Jim Butler) が設計した OP249 は、同様なデュアル・タイプの OP アンプ AD712 と市場で直接競合することになりました。

● 電位計用の IC OP アンプ

OP アンプに高い性能を期待する用途の一つは、従来から電位計 (electrometer) 用の増幅器で、入力電流は 1 pA 以下であることが必要とされます。個別トランジスタによる OP アンプ・モジュールの時代は、モデル 310, 311 バラクタ・ブリッジ・アンプのような超低入力電流のデバイスが、この役割を担っていました。これらのアンプについての基本的な解説は、前の章を参照してください。エレクトロメータ・アンプという用語は、超低

バイアス電流のすべての増幅器を意味することは理解していただけるとと思います。それはバラクタ・ブリッジ・アンプを基にした設計がよいかもしれませんが、あるいは数種類の半導体、たとえばMOSFETやJFETなどを採用して超低バイアス電流を実現した入力段をもつ回路がよいかもしれません。

▶ ハイブリッドICエレクトロメータOPアンプAD515, AD545

ハイブリッドICならば、初期のICエレクトロメータOPアンプはADI社で製造していました。最初のタイプはAD515で、AD503(図4-10参照)と回路構成が類似した2チップ構成のハイブリッドICでした。AD515は、無信号時の電源電流1.5mAという低電力で動作しました[文献(47)]。また、AD515は $1\text{mV}_{(\text{max})}$ の低オフセット電圧を維持しながら、もっとも上のAD515Lグレードでは75fAという驚異的な低入力電流を実現していました。AD515は、他社ではすぐには追いつけない性能で成功した製品だったのです。

初期の2チップ・ハイブリッドICエレクトロメータ用OPアンプのもう一つは、1978年に発表されたAD545でした[文献(48)]。このAD545は、AD545LグレードでもAD515より大きい1pAの最大入力バイアス電流でしたが、AD515と同程度の低電力で動作できたのです。

▶ モノリシックICエレクトロメータOPアンプ

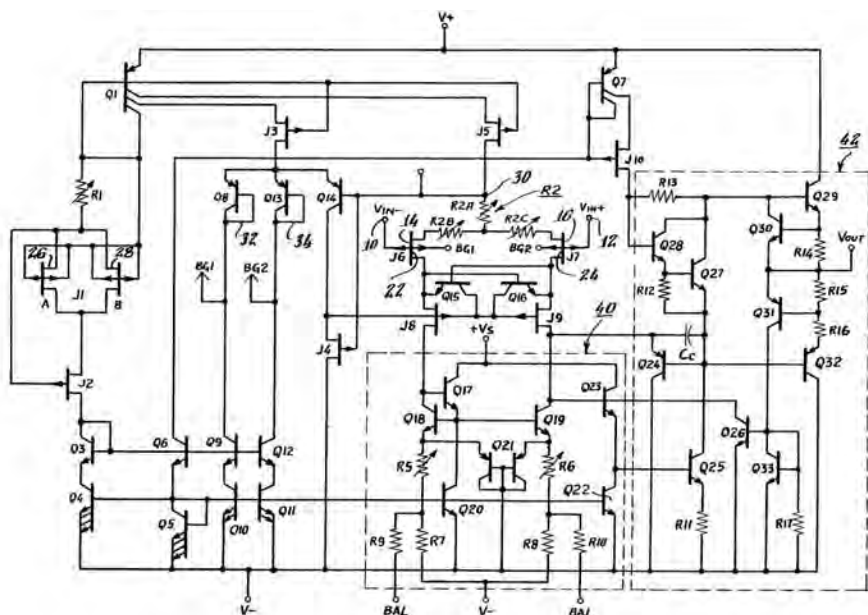
初期のモノリシックICによるエレクトロメータOPアンプの一つはOPA111でした。パー・ブラウン社(Burr-Brown Corporation)は、1984年にこのOPアンプを発表しました[文献(49)]。スチーブ・ミラウエイ(Steve Millaway)の設計によるOPA111は、製造に誘電体分離プロセスを使いました。

OPA111の内部回路は、入力段と2段目にPチャネルJFETが使われ、入力のコモンモード電圧の変化による低バイアス電流の変動のために1段目をカスコード接続とした設計になっています。つまりこの設計は、以前のLF155/156/157シリーズの下記の弱点の改善に取りかかったものです[既出文献(39)]。参考文献(49)では、いくつかのLF15xの回路の弱点について述べています。一つは、入力JFETがベアになるので電流ソースを負荷としたこと、もう一つは、オフセット電圧のトリミング手段、さらにもう一つは、2段目のバイポーラ・トランジスタの差動アンプのベアのノイズ電流によりポップコーン・ノイズに潜在的に敏感なことでした。これらの弱点は、OPA111の設計によって改善されました。

OPA111という型番は、三つの主要な仕様、オフセット電圧 $1\text{mV}_{(\text{max})}$ 、電圧ドリフト $1\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}_{(\text{max})}$ 、10Hz～10kHzの帯域幅で $1\mu\text{V}_{\text{RMS}}$ の入力換算電圧ノイズの組み合わせに基づいているといわれています。この三つの特性を他社が越えることは難しく、したがってOPA111はIC OPアンプとして成功を収めました。

クローズとカウンツが設計したAD549は、1987年に発売され、ADI社の最初の本格的なモノリシックICエレクトロメータOPアンプとなりました[文献(50)]。このOPアン

〈図 4-11〉 AD549 エレクトロメータ用 IC OP アンプの等価回路 (US 特許 4,639,683 より引用)



プは、クリティカルな入力 P チャネル JFET ペアの周辺に精巧な工夫を施したブートストラップ回路を加え、ジョディ・ラーファン (Jody Lapham) とポール・ブロコウ (Paul Brokaw) の設計による新しい「トップゲート FET (topgate FET)」の採用による効果で低バイアス電流を実現しています [文献 (51)]。

関連する超低入力電流の JFET 入力 OP アンプの特許から引用した AD549 の等価回路を、図 4-11 に示します [文献 (52)]。入力信号は、AD549 では図 4-11 の入力 JFET の J₆ と J₇ のゲート 10, 12 に加わります。バックゲートの BG₁, BG₂ のペアは、Q₁₄ と Q₁₃-Q₈ を通したブートストラップのループによって、ほぼ等しい DC 電圧にバイアスされています。J₄ と J₈-J₉ を通る 2 番目のブートストラップのループは、J₆-J₇ のドレインをブートストラップしています。このようにして AD549 は、±10 V レンジを越えるコモンモード電圧とは無関係に入力バイアス電流レベルが決まります。

この回路では、ジャンクション・アイソレーション・プロセスを用いて、AD549L はオフセット電圧 500 $\mu\text{V}_{(\text{max})}$ 、電圧ドリフト 10 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}_{(\text{max})}$ とともに、60 fA 以下のバイアス電流を実現しています。また AD549L は、内部回路をガードするため 8 番ピンはケースに

接続されたハーメチック・シールの TO-99 パッケージで供給されました。AD549L は、100 個ロットで 1 個 15.45 ドルという価格で販売されました。

1988 年に ADI 社は、AD549 の設計に基づいた別のエレクトロメータ OP アンプ AD546 を発表しています [文献 (53)]。クローズが同じくこの OP アンプを設計し、AD549 に比して汎用的な仕様であるプラスチック・パッケージで発売されました。AD546KN は、バイアス電流 $500 \text{ pA}_{(\text{max})}$ 、オフセット電圧 $1 \text{ mV}_{(\text{max})}$ 、電圧ドリフト $20 \mu\text{V}/^\circ\text{C}_{(\text{max})}$ という性能でした。AD546KN は、100 個ロットで 1 個 4.50 ドルで販売されました。

このシリーズのなかでもっとも新しいエレクトロメータ OP アンプは、現在でも販売されている AD795 です。AD795 は、SOIC パッケージで入手可能で、 1 pA 以下のバイアス電流です [文献 (54)]。

●低ノイズ JFET IC OP アンプ AD743/745

1990 年頃より以前は、JFET 入力 IC OP アンプの入力電圧ノイズは、多くが $3 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下を実現していた最良のバイポーラ・デバイスとは競合できなかったのです (OP27 の項を参照)。

1990 年に ADI 社は、低い電圧ノイズと低い電流ノイズを同時に必要とする水中聴音器の増幅器用途に使える OP アンプを発表しました。この新しい OP アンプはスコット・ウーサーの設計によるもので、AD743、AD745 という型番です [文献 (55)]。これらの OP アンプの設計は、参考文献 (56) で述べられているように、非常に大きな入力トランジスタを 4 列に並べて、電圧ノイズの難問を解決しました*10。

結果は、二つの OP アンプとも入力換算ノイズは $2.9 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ (@10 kHz) で、高精度 DC OP アンプの性能と変わらないものとなっています。AD743 はユニティ・ゲインの範囲で安定で、より高速の AD745 はゲイン 5 倍以上で安定です。

●AD820/822/824, AD823 シリーズ JFET IC OP アンプ

1990 年代の初めに、ADI 社の CB (Complementary Bipolar) プロセスによる最初の JFET OP アンプ・シリーズが発表されました。このプロセスは、ジョディ・ラーファン (Jody Lapham) とブラッド・シャーフ (Brad Scharf) によって設計されたもので、応答速度とゲインともに NPN や PNP のバイポーラ・トランジスタ OP アンプに匹敵する性能を特徴としました [文献 (57) (58)]。そのプロセスは N チャネル FET 構造もっており、ピンチオフ電圧によって FET を OP アンプ入力段の差動ペアとして使えるようにしたこ

* 10 : もちろん、「非常に大きな」は相対的な表現である。しかし参考文献 (56) の図 6 は、四つの入力段のトランジスタがおおよそ 1/2 のチップ・エリアを使っていることを示している。

とと、二つのゲート電圧がマイナス電源付近まで直線的に使えるという巧妙な特徴をもっています。さらにコモン・エミッタのコンプリメンタリ・バイポーラ出力と組み合わせることにより、レール・ツー・レール出力段ができあがりました。これらの二つの重要な特色の組み合わせで、低バイアス電流の JFET 入力段をもった単一電源（あるいは両電源）の OP アンプが可能となったのです。

このようなタイプの OP アンプで最初の製品は単一電源で低電力のタイプで、1993 年に発売された AD820 です [文献 (59)]。AD820 は、ジョアン・クローズ (JoAnn Close) とフランシスコ・ドス・サントス (Francisco dos Santos) によって設計されました。この OP アンプの回路構成は非常に柔軟で、3 V 程度の低い単一電源から ± 18 V の両電源までの広い範囲で動作させることができました。AD820B の入力バイアス電流は $10 \text{ pA}_{(\text{max})}$ で、静止時の電源電流は $800 \text{ } \mu\text{A}_{(\text{typ})}$ でした。

AD820 の成功により、仕様を AD820 と同一にしたデュアル・タイプが AD822 として 1994 年に発表されました [文献 (60)]。さらに、この OP アンプ・ファミリを完成させるために発表されたのが AD824 で、それは 1995 年のことでした [文献 (61)]。

AD820/822/824 は、ほどほどのスピードで比較的低電力で動作しました。1995 年、同じ回路構成でより高速なデュアル・タイプの AD823 が発表されました [文献 (62)]。ジェフ・タウンゼンド (Jeff Townsend) が設計した AD823 は、16 MHz の帯域幅と $22 \text{ V}/\mu\text{s}$ のスルー・レートをもっていました。また AD823 は、 $\pm 1.5 \sim \pm 18 \text{ V}$ の 2 電源、または $+3 \sim +36 \text{ V}$ の単一電源の広い電源電圧幅で動作できました。

4-5 高速 IC OP アンプ

IC OP アンプの創生期には皆が、基本的に同じ NPN バイポーラ・プロセスを使っている、その応答速度は利用できる PNP トランジスタの低速さのためにひどく制限されていました。PNP トランジスタによるボトルネックを不十分ながら克服した初期の設計は、1971 年にナショナル セミコンダクター社のボブ・ドブキン (Bob Dobkin) が設計した LM118/218/318 です [文献 (63)]。ADI 社は、LM118/218/318 の自社製品版の OP アンプ AD518 をデイブ・クレス (Dave Kress) の設計で発表しました。これらの OP アンプは、高速のスルー・レートや広い帯域幅を実現しましたが、セトリング時間が長く、低いインピーダンスの負荷をドライブするには適切ではありませんでした。

1970 年代の初め頃、真に高速の IC プロセスはハリス社 (Harris Semiconductor) が所有しているものでした。この誘電体分離プロセスは、ほぼ同等のスピードをもつ NPN/PNP を実現し、ハリス社の HA2500 シリーズはセトリング時間の短さで人気を博しました。その後、ADI 社が 1973 年に高速の OP アンプ AD509 を発売して、ハリス社と人気を分かち

ことになります[文献(64)].

ジャンクション・アイソレーションによるCBプロセスが登場するまで、誘電体絶縁プロセスによるOPアンプは、高速用途で優位を占めていました。しかし、この一般則に注目に値する例外があったのです。それはウーサーが設計したOPアンプAD744で、1988年の発表です[文献(65)]。このOPアンプは、まだ基本的なNPNプロセスを使っていましたが、入力差動アンプ段にイオン打ち込みによるPチャネルFETを利用して、応答が安定した時点に対するズレ幅が0.01%以内に達する時間、つまりセトリング時間が900 nsという高速性を実現できたのです。

ADI社は1988年に、いくつかの高速IC OPアンプとともに、耐圧36 Vの高速CBプロセスを発表しました[既出文献(57)(58)]。すべてがウイン・パルマー(Wyn Palmer)による設計ですが、これらのなかには高速の電圧帰還型グループのAD840シリーズと電流帰還型OPアンプAD846が含まれていたのです。このシリーズの後、ほかにもCBプロセスを使って成功したOPアンプが続きました。そのなかでも注目すべきは、これもパルマーが設計したユニティ・ゲインの範囲で安定なAD847と外部位相補償を行うAD829です。後にデイブ・ホイットニー(Dave Whitney)が設計したAD811は、CBプロセスで入手できる最初の高性能電流帰還型OPアンプの一つで、ビデオ帯域で超低ひずみ率を実現し、75Ωの同軸ケーブルをドライブ可能です[文献(66)]。

●フランク・グッディナフの『エレクトロニック・デザイン』誌におけるOPアンプの記事

これまで述べてきた高速OPアンプの発展史のなかで注目に値する技術的資料は、アナログ担当編集者のフランク・グッディナフ(Frank Goodenough)による『エレクトロニック・デザイン(Electronic Design)』誌の連載記事です[文献(67)～(71)]。

CBプロセスは、ちょうどADI社が高速IC OPアンプを製造しはじめた頃に登場して、その後10年以内に性能が飛躍的に向上しています。それは1993年に発表された、12 V耐圧のXFCB(eXtra Fast Complementary Bipolar)プロセスです[文献(72)(73)]。この技術は、ウーサーの設計によるAD8001のような主要なOPアンプを生み出しました[文献(74)]。AD8001は、ビデオ帯域で超低ひずみ率を実現し、±5 V電源で800 MHzの広帯域幅を打ち立てて、新しい性能の標準となりました。

グッディナフのOPアンプの連載記事は、歴史的なOPアンプに関する記事ばかりでなく、1990年代の後半にわたってさまざまなIC OPアンプの性能について貴重な情報を提供しつづけてきました[文献(75)～(78)]。彼は1998年の2月に亡くなりましたが、『エレクトロニック・デザイン』誌のロジャー・アラン(Roger Allan)によって彼の業績を讃えた記念式典が催されました[文献(79)]。

◆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)

・モノリシック IC OP アンプの誕生、汎用 IC OP アンプ

- (1) Bob Widlar, "Design Techniques for Monolithic Operational Amplifiers", IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol.SC-4, August 1969. (μ A709, LM101A, LM108 で使用された設計手法)
- (2) "The μ A702 Wideband Amplifier", Chapter 5 within James N. Giles, Editor, Fairchild Semiconductor Linear Integrated Circuits Handbook, Fairchild Semiconductor, 1967, pp.33 ~ 55. (μ A702 の設計と応用に関する詳細な考察)
- (3) R. J. Widlar, "A Unique Circuit Design for a High Performance Operational Amplifier Especially Suited to Monolithic Construction", Proceedings of the NEC, Vol.XXI, October 1965, pp.85 ~ 89. (最初に広く使用された IC OP アンプ μ A709)
- (4) Robert J. Widlar, "Monolithic Op Amp with Simplified Frequency Compensation", EEE, July 1967. (LM101 について)
- (5) James Solomon, "The Monolithic Operational Amplifier: A Tutorial Study", IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol.SC-9, No.6, December 1974. See also National Semiconductor AN-A. (IC OP アンプの設計技術に関する古典)
- (6) Dave Fullagar, "A New High Performance Monolithic Operational Amplifier", Fairchild Semiconductor Application Brief, May 1968. (μ A741 の発表)
- (7) Robert J. Widlar, "IC Op Amp with Improved Input-Current Characteristics", EEE, December 1968. (LM101A の発表)
- (8) Ronald Russell, Thomas Frederiksen, "Automotive and Industrial Electronic Building Blocks", IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol.SC-7, December 1972, pp.446 ~ 454. (LM324 などの単電源 IC)
- (9) Data sheet for AD741J, K, L, S Lowest Cost High Accuracy IC Op Amps, Analog Devices, Inc., January 1973.

・スーパーベータ IC OP アンプ

- (10) Robert J. Widlar, "The LM110 An Improved IC Voltage Follower", National Semiconductor LB-11, March 1970. (LM102, LM110 におけるスーパーベータ・トランジスタの利用)
- (11) R. J. Widlar, "Super Gain Transistors for ICs", IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol.SC-4, August 1969, pp.249 ~ 251. (IC OP アンプにおけるスーパーベータ・トランジスタの一般原理)
- (12) Jim Solomon, William Davis, P. Lee, "A Self-Compensated Monolithic Operational Amplifier With Low Input Current and High Slew Rate", ISSCC Digest of Technical Papers, February 1969, pp.14 ~ 15. (MC1556 におけるスーパーベータ・トランジスタの利用)
- (13) Bob Widlar, "IC Op Amp Beats FETs on Input Current", EEE, December 1969. (スーパーベータ・トランジスタ入力 LM108)
- (14) George Erdi, Jim Williams, "Precision Op Amp Serves Host of Needs", Electronic Design, September 1, 1983. (スーパーベータ・トランジスタ入力の LT1008, LT1012)
- (15) Modesto Maidique, "A High Precision Super Beta Operational Amplifier", IEEE Journal of Solid State Circuits, Vol.SC-7, December 1972. See also : "AD508: Monolithic Chopperless Op Amp Super β Inputs, $<1 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ Drift", Analog Dialogue, Vol.6, No.1, 1972. (スーパーベータ・トランジスタ入力の AD508)
- (16) Modesto Maidique, "Monolithic Operational Amplifier With $1 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ Drift", Analog Dialogue, Vol.5, No.3. (AD504 に関して)

- (17) Preliminary Data sheet for AD508J, K, L IC Chopperless Low Drift Operational Amplifier, Analog Devices, Inc., June 1972.
- (18) Doug Grant, "Low Drift Super Beta Op Amp", Analog Dialogue, Vol.12, No.1. (AD517に関して)
- (19) Richard Wagner, "Laser-Trimming on the Wafer", Analog Dialogue, Vol.9, No.3. (オフセットとゲイン調整のための薄膜抵抗のレーザ・ウェハ・トリミング)
- (20) "Precision Op Amp", Analog Dialogue, Vol.24, No.1. (スーパーベータ・トランジスタによる高精度 IC OP アンプ, AD705)
- (21) "Two Precision Dual Op Amp Families", Analog Dialogue, Vol.24, No.3. (スーパーベータ・トランジスタによるデュアル高精度 IC OP アンプ, AD706/OP297)
- (22) "Quad Op Amp", Analog Dialogue, Vol.25, No.1. (スーパーベータ・トランジスタによるクワッド高精度 IC OP アンプ, AD704)

・高精度バイポーラ IC OP アンプ

- (23) George Erdi, "A Low Drift, Low Noise Monolithic Operational Amplifier For Low Level Signal Processing", Fairchild Semiconductor Application Brief APP-136, July 1969. (μ A725に関して)
- (24) George Erdi, "Minimizing Offset Voltage Drift With Temperature In Monolithic Operational Amplifiers", Proceedings of NEC, 1969, pp.121 ~ 123. (高精度 DC アンプで最小ドリフトを実現するオフセット調整の方法)
- (25) George Erdi, "Instrumentation Operational Amplifier With Low Noise, Drift, Bias Current", Precision Monolithics APP Note, 1972. (OP05に関して)
- (26) George Erdi, "A Precision Trim Technique for Monolithic Analog Circuits", IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol.SC-10, December 1975, pp.412 ~ 416. ("Zener-zap"によるオフセット調整)
- (27) Donn Soderquist, George Erdi, "The OP-07 Ultra-Low Offset Voltage Op Amp", Precision Monolithics AN-13, December 1975. (OP07に関して)
- (28) "Precision Bipolar Op Amp Has Lowest Offset, Drift", Analog Dialogue, Vol.22, No.1. (AD707に関して)
- (29) Bill Schweber, "Dual Bipolar Op Amp Provides Superior Matching of Specs", Analog Dialogue, Vol.23, No.1. (AD707のデュアル・タイプ高精度 IC OP アンプ AD708)
- (30) George Erdi, Tom Schwartz, Scott Bernardi, and Walt Jung, "Op Amps Tackle Noise-and for Once, Noise Loses", Electronic Design, December 12, 1980. (OP27, OP37に関して)
- (31) George Erdi, "Amplifier Techniques for Combining Low Noise, Precision, and High-Speed Performance", IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol.SC-16, December 1981, pp.653 ~ 661. (OP27/OP37の設計テクニック)
- (32) "Precision Micropower Single-Supply Op Amps Have 100 μ V max Offset", Analog Dialogue, Vol.34, No.4. (高精度, 単電源/両電源 IC OP アンプ, OP777, OP727, OP747)
- (33) Data sheet for "Precision Low Noise Low Input Bias Current Operational Amplifiers OP1177/OP2177", <http://www.analog.com>

・高精度 JFET IC OP アンプ

- (34) Doug Sullivan, Modesto Maidique, "High Performance IC FET-Input Op Amp", Analog Dialogue, Vol.4, No.2, 1970. (2チップ・ハイブリッド IC OP アンプ AD503, AD506)
- (35) Richard S. Burwen, Doug Sullivan, "AD503, AD506 IC FET Input Operational Amplifiers

- Technical Bulletin", Analog Devices Application Bulletin, August 1971. (2チップ・ハイブリッドIC OPアンプAD503, AD506の設計と応用)
- (36) "FET-Input ICs Can Slew at $50\text{V}/\mu\text{s}$ ", Analog Dialogue, Vol.5, No.3, 1971. (2チップ・ハイブリッドIC OPアンプAD513)
- (37) "AD506L: Economical Low-Drift FET-Input", Analog Dialogue, Vol.7, No.1, 1973. (2チップ・ハイブリッドIC OPアンプAD506L)
- (38) Dave Fullagar, "Better Understanding of FET Operation Yields Viable Monolithic JFET Op Amp", Electronics, November 6, 1972. (ICL8007に関して)
- (39) Ronald W. Russell, Daniel D. Culmer, "Ion-Implanted JFET-Bipolar Monolithic Analog Circuits", ISSCC Digest of Technical Papers, February 1974, pp.140 ~ 141, p.243. (イオン打ち込みJFET, LF155/156/157シリーズFET IC OPアンプ)
- (40) Otto Schade, Jr., "CMOS/Bipolar Linear Integrated Circuits", ISSCC Digest of Technical Papers, February 1974, pp.136 ~ 137. See also : R. L. Sanquini, "Building C-MOS, Bipolar Circuits on Monolithic Chip Enhances Specs", Electronics, October 3, 1974. (CMOS IC OPアンプCA3130)
- (41) Dale Pippenger, Dale May, "Put BIFETs Into Your Linear Circuits", Electronic Design, January 4, 1978, pp.104 ~ 107, pp.109 ~ 111.
- (42) Lew Counts, Rich Frantz, "High-Performance, Low-Cost Bipolar-FET Op Amp", Analog Dialogue, Vol.12, No.3, 1978. (モノリシックFET IC OPアンプAD542)
- (43) "Fast FET Op Amp", Analog Dialogue, Vol.14, No.1, 1980. (AD544に関して)
- (44) "High-Performance Dual FET Op Amps", Analog Dialogue, Vol.15, No.2, 1981. (AD642/644に関して)
- (45) "First Monolithic FET Op Amp with $1 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ Drift", Analog Dialogue, Vol.16, No.1, 1982. (ドリフト/オフセット調整済みIC OPアンプAD547)
- (46) "Highest-Performing Low-Cost BiFET Op Amps", Analog Dialogue, Vol.20, No.2, 1986, p.22.
- (47) Dave Kress, "FET-Input Electrometers", Analog Dialogue, Vol.10, No.1, 1976, p.11.
- (48) "FET-Input AD545", Analog Dialogue, Vol.12, No.3, 1978, p.18.
- (49) Steve Millaway, "Monolithic Op Amp Hits Trio of Lows", Electronic Design, February 9, 1984. (低バイアス電流IC OPアンプOPA111)
- (50) JoAnn Close, Lew Counts, "Junction-Isolation Process Yields 50-fA Op Amp", Electronic Design, July 10, 1986, pp.99 ~ 102, p.104. See also : JoAnn Close, "Monolithic Electrometer Has 60fA Max Bias Current", Analog Dialogue, Vol.21, No.2, 1987, p.22. (エレクトロメータ用IC OPアンプAD549)
- (51) Jerome F. Lapham, Adrian P. Brokaw, "Low-Leakage JFET", US Patent 4,985,739, filed April 27, 1987, issued January 15, 1991. ("top-gate"による低リーケージJFET ICプロセス)
- (52) Lewis Counts, JoAnn Close, "Very Low Input Current JFET Amplifier", US Patent 4,639,683, filed February 7, 1986, issued January 27, 1987. ("top-gate"による低リーケージJFET ICプロセスとAD549)
- (53) "High-Performance Electrometer Op Amp in Plastic 8-Pin DIP", Analog Dialogue, Vol.23, No.4, 1988, p.12. (エレクトロメータ用IC OPアンプAD546)
- (54) "Low-Noise, Low-Drift Precision Op Amps for Instrumentation", Analog Dialogue, Vol.27, No.1, 1993. (低ノイズ/低入力電流AD795, デュアル単電源, 高精度OP213)
- (55) "FET-Input Op Amp Has Lowest Combined V and I Noise", Analog Dialogue, Vol.25, No.1, 1991, p.12. (低ノイズIC OPアンプAD743, AD745)

- (56) Scott Wurcer, "A $3nV/\sqrt{Hz}$, DC-Precise, JFET Operational Amplifier", Proceedings of BCTM, 1989, pp.116 ~ 119. (低ノイズ IC OP アンプ AD743, AD745 の設計)
- (57) "Op Amps Combine Superb DC Precision and Fast Settling", Analog Dialogue, Vol.22, No.2, 1988. (高速 CB プロセスを使用した AD846, AD840 シリーズ)
- (58) Jerome F. Lapham, Brad W. Scharf, "Integrated Circuit with Complementary Junction-Isolated Transistors and Method of Making Same", US Patent 4.969,823, filed May 5, 1988, issued Nov. 13, 1990. (ADI 社の CB プロセス)
- (59) "Single-Supply FET", Analog Dialogue, Vol.27, No.2, 1993, p.26. (単電源, レール・ツー・レール出力 IC OP アンプ AD820)
- (60) "Dual FET, 3 to $\pm 18V$ ", Analog Dialogue, Vol.28, No.1, 1994, p.24. (単電源, レール・ツー・レール出力デュアル IC OP アンプ AD822)
- (61) "Quad JFET, Single-Supply Op Amp", Analog Dialogue, Vol.29, No.1. (単電源, レール・ツー・レール出力クワッド IC OP アンプ AD824)
- (62) "Dual 16MHz Rail-Rail FET", Analog Dialogue, Vol.29, No.2. (単電源, レール・ツー・レール出力デュアル IC OP アンプ AD823)

・高速 IC OP アンプ

- (63) Bob Dobkin, "LM118 Op Amp Slews $70 V/\mu s$ ", National Semiconductor LB-17, September 1971. (高スルー・レート IC OP アンプ LM118)
- (64) "AD509: Fast Op Amp $2 \mu s$ to 0.01%", Analog Dialogue, Vol.7, No.1, p.10. (高速 IC OP アンプ AD509)
- (65) Kristen Dinsmore, "Fast, Accurate BIFET Op Amp Settles to 0.01% in 900ns Max", Analog Dialogue, Vol.21, No.2, 1988, pp.14 ~ 15.
- (66) Dave Whitney and Walt Jung, "Applying a High-Performance Video Operational Amplifier", Analog Dialogue, Vol.26, No.1, 1992, pp.10 ~ 13. (高速, 高出力ビデオ IC OP アンプ AD811 とその応用)
- (67) Frank Goodenough, "Focus Monolithic IC Op Amps: Faster and More Precise", Electronic Design, February 4, 1988, pp.127 ~ 132. (高速 IC OP アンプに関する概観)
- (68) Frank Goodenough, "A Slew of New High-Performance Op Amps Shatters Speed Limits", Electronic Design, March 3, 1988, pp.29 ~ pp.32. (高速 IC OP アンプとプロセス, ADI 社の CB プロセスを含む)
- (69) Frank Goodenough, "New Processes, Designs Boost IC Op Amp Speeds", Electronic Design, April 12, 1990, pp.45 ~ 48, pp.52 ~ 56. (CB プロセスと電流帰還アーキテクチャによる高速 IC OP アンプの概観)
- (70) Frank Goodenough, "Linear ICs Attain 8-GHz NPNs, 4-GHz PNP's", Electronic Design, December 19, 1991, pp.35 ~ 37, p.40, pp.43 ~ 45. (ハリス社の高速 'UHF-1' プロセス)
- (71) Frank Goodenough, "New Processes to Spawn Next-Generation Analog, Mixed-Signal, Power ICs", Electronic Design, January 2, 1992, pp.59 ~ 62, pp.64 ~ 66, p.68, p.70. (高速なプロセスの開発に関する概観)
- (72) Frank Goodenough, "Wideband IC Op Amps Reach New Bandwidth Highs", Electronic Design, September 2, 1993, p.48, p.50, p.52, p.56, p.58, p.63, pp.64 ~ 66. (ADI 社の XFCB プロセス, 他の高速プロセスについての概観)
- (73) Frank Goodenough, "IC Op Amps Combine Low Cost and Performance", Electronic Design, September 2, 1993, pp.39 ~ 40, p.42, p.46. (高速プロセスについての概観, ADI 社の XFCB プロセスによる IC OP アンプ AD8001, AD96XX シリーズ)

- (74) "Fast Op Amp: High Performance, Low Power, Low Cost", Analog Dialogue, Vol.28, No.2, 1994, p.11. (XFCB プロセスによる最初の高速 IC OP アンプ AD8001)
- (75) Frank Goodenough, "Silicon, Analog Processes Becoming More Sophisticated", Electronic Design, May 2, 1994, p.97, p.98, pp.100 ~ 103. (コンプリメンタリ/ミックスド・シグナルの調和性についての概観)
- (76) Frank Goodenough, "Rail-Rail In-and-Out IC Op Amps Run Off 2.7V", Electronic Design, May 16, 1994, p.51, p.52, p.54, p.56, p.60, pp.64 ~ 65. (レイル・ツウ・レイル, 低電圧/単電源動作に関する設計テクニックとデバイス)
- (77) Frank Goodenough, "Single-Supply Op Amps Come of Age", Electronic Design Analog Applications Issue, November 7, 1994, pp.52 ~ 61. (レイル・ツウ・レイル設計テクニックに関する概観とデバイス)
- (78) Frank Goodenough, "Op Amp, ADC Topple Old Price/Performance Marks", Electronic Design, December 5, 1994, p.75, p.76, p.78, p.80, p.81, p.84, p.87. (高速/低電力 IC OP アンプ AD8011, A-D コンバータ AD878 の新製品紹介)
- (79) Roger Allan, "Frank Goodenough: 1925-1998", Electronic Design, March 9, 1998, p.6.

謝辞：

この章を執筆している間にたくさんの有用なコメントをいただいた、次の方々に感謝します。
Derek Bowers, JoAnn Close, Lew Counts, George Erdi, Bruce Hohman, Dave Kress, Bob Marwin, Bob Milne, Reza Moghimi, Steve Parks, Dan Sheingold, Scott Wurcer, Jerry Zis.

回想 ボブ・ワイドラー…リニアICの先駆者の人柄

話を1960年代の初めにさかのぼると、IC OPアンプ発展の歴史はボブ・ワイドラー (Bob Widlar) の功績から始まりました。成功を収めた最初のIC OPアンプ μ A709から始まり、ボブ・ワイドラーは、一連のIC OPアンプの成功を事実上達成したのです。本書ではボブ・ワイドラーのOPアンプに関する有名な業績だけを紹介しましたが、読者はボブ・ワイドラーをただのOPアンプ設計者と受け止めるべきではありません。すでにお気づきのように、彼が開発した多くのリニア集積回路の設計技術は、当初から標準的な方法になったのです。彼が他のIC回路にも大きな貢献をしたこと、たとえばICバンド・ギャップ電圧リファレンスや3端子レギュレータなど…は広く知られてよい事実です。



1977頃、自身が設計したOPアンプLM10を検討するボブ・ワイドラー

(撮影：ナショナル セミコンダクター社のボブ・ピーズ)

彼の経歴全体を見渡すと、ボブ・ワイドラーはICの革新的なエンジニアというだけでなく、とても個性的な人柄の持ち主としても有名でした。ボブ・ワイドラーについての逸話は、ボブ・ピーズの想い出話からうかがい知れるでしょう*1。ボブ・ワイドラーへのもう一つの賛辞はジム・ソロモンによって捧げられており、ワイドラーとともに仕事をした何人かのエンジニア達から見た、この魅力的な設計者に対する個人的な見解も含んでおり、その人となりが偲ばれます*2。

ボブ・ワイドラーは、1991年の2月に53歳という若さで亡くなりました。そのとき彼は、メキシコにある彼の家の近くで気分転換に大好きなジョギングをしていたのです。ボブ・ワイドラーの仕事への真摯な努力は（そして彼の滑稽な気晴らしも）、けして忘れられてしまうべきではありません。

* 1 : Bob Pease, "What's All This Widlar Stuff, Anyhow?", Electronic Design, July 25, 1991, p.146, p.148, p.150.

* 2 : James E. Solomon, "A Tribute to Bob Widlar", IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol.SC-26, No.8, August 1991, pp.1087 ~ 1089.