

増幅器
真空管

講座

歴史絵巻

電子回路

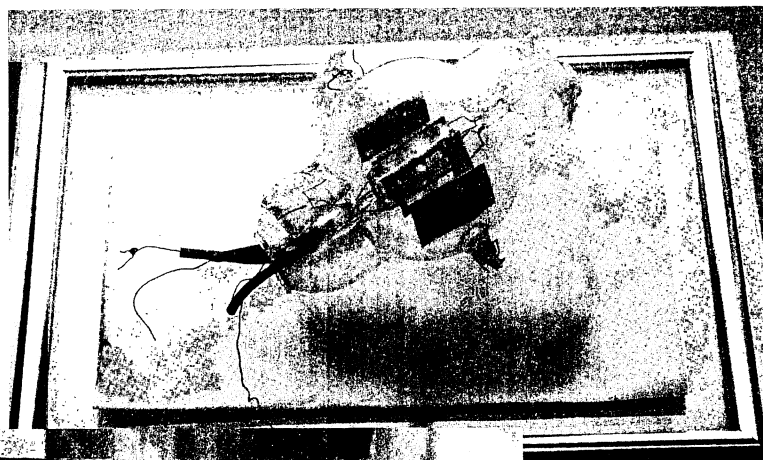
増幅器の登場が エレクトロニクスを躍進させる 20世紀エレクトロニクスの歩み(7)

相良 岩男

KOA 顧問

電子回路の2回目を掲載する。1回目は、受動部品の誕生から電子回路の概念が生まれるまでを追った。今回は、能動部品（真空管）と電子回路の開発史が中心となる。真空管が発明されたことによって、電子回路が飛躍的に発展していく。特に増幅器の登場が電子機器の発展を支えることになる。まずラジオ受信機というアプリケーションの登場によって電子回路の発展が加速する。これがテレビ受像機へと引き継がれ、エレクトロニクス産業がどんどん大きくなっていくのである。

(本誌)



安藤博氏が試作した多極真空管

相良 岩男(さがら いわお)氏

1932年東京生まれ。1956年東京理科大学理学部物理学卒業。同年沖電気工業入社。半導体応用技術者として、オーディオ機器やゲーム機などに向けたICの設計開発に従事。1990年ED事業部・電子応用技術部 技師長で退職し、同年KOA常務取締役。1996年6月から現職。

なお、ラジオの歴史は1996年4月8日号(no.659)に、テレビの歴史は1996年4月22日号(no.660)と1996年5月20日号(no.662)に、電話の歴史は1996年8月19日号(no.668)と1996年9月9日号(no.670)に、電子回路の歴史の1回目は1996年9月23日号(no.671)に掲載した。



安藤博発明研究之地

当研究所創立者安藤博(1902~1975)は、世界的発明家多極真空管を創案し、我国初の無線実験放送局を開設、NHK創立者の1人となり、当地でテレビジョン技術等多数の発明をなし、電子工学の発展に貢献した。

- 1919年 多極真空管の発明
- 1933年 当財団を設立
- 1939年 10大発明家として宮中勲賞の栄
- 1954年 藍綬褒章受章
- 1972年 勲二等瑞宝章叙勲

財団法人 安藤研究所

人間は、視覚・聴覚・触覚・味覚・臭覚という5感からの微弱な感覚を刺激(入力)として感じとり、相応の行動(出力)を起こす。もしこの刺激を基に、危険と判断した場合は、

大声で叫んだり、手をたたいたりして行動する。

このように直接的に他に働きかける行動を能動と呼んでいる。この「行動」が人間の能力を高めていく。

第2世代 エレクトロニクス飛躍の原点となった能動部品の誕生

エレクトロニクスでも同様な能動的な部品があり、これをアクティブ・デバイス(能動素子)、または能動部品と呼んでいる。これに対し非能動体をパッシブ・デバイス(受動素子)、または受動部品という。

本格的な能動素子のない時代、先人技術者は電信機や電話機を作るにも大変な苦労を重ね、創意工夫を凝らしていた。

すでに、素晴らしい解決法を知っている現代人のなかには、これらの創意工夫を奇怪に捉える人もいるだ

ろう。とんでもないことだ。

まったく未知で解決法に糸口がないとき、いかにして先人たちは知恵を生み出していったのか。その背景をぜひ考えてほしい。彼らは解決のヒントを意外なことから得ている場合が多い。このことは現在でも同じだ。難問を解決するときには、技術者は専門外の知識についても関心をもちたねばならないことを、彼らは示唆しているといえよう。

その後、真空中を移動する電子を利用した能動素子、つまり真空管の

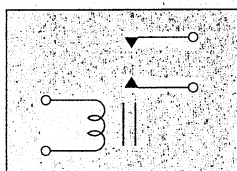
時代を迎えている。真空管は、初めから能動素子を開発しようという明確な目標をもって研究されたわけではない。多くの好奇心おう盛な物理学者が漠然とした数々の物理現象をそれぞれ無関係に研究しているうちに、偶然に発見されたのだ。

1904年、T. エジソンの白熱電球を基に考案したJ. フレミングの2極真空管をヒントに、1906年にド・フォレストが3極真空管を発見した。確固たる目標のもとに発見された能動素子、すなわちトランジスタとは動機が異なっている(図1)。

やがて真空管を応用して、電信機や電話機のみならず、ラジオ放送やテレビ放送が発展した。この能動素子の登場は、エレクトロニクスに無限の力を与えたといってもよいだろう。このきっかけとなったのが真空管だった。

その後、能動素子はトランジスタ

前哨時代



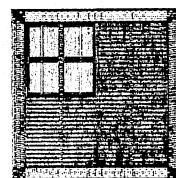
- ▷ 真空管やトランジスタのない時代には電磁リレーが唯一の増幅器だった。
- ▷ ただし電磁リレーは周波数応答が良くないため、その応用は限られていた。

真空管増幅器の時代



- ▷ 真空管はド・フォレストが発明した。
- ▷ 真空管によって増幅が可能になった。
- ▷ 真空管を利用して、ラジオやテレビが実用化した。

固体増幅器の時代



- ▷ W. ショックレーと、W. ブラッテン、J. バーディーンがトランジスタを発明した。
- ▷ J. キルビーと R. ノイスがそれぞれ IC を発明した。
- ▷ トランジスタや IC の発明によってエレクトロニクスは飛躍的に発展した。

← 第1段階 →

← 第2段階 →

← 第3段階 →

図1 能動素子の変遷 電子回路の歴史は、大きく三つの世代に分けられる。受動部品が誕生した世代、能動部品の世代、電子回路の世代である。能動部品の世代をさらに3段階に分けた。電磁リレー、真空管、トランジスタの段階である。トランジスタはさらにICへと発展した。

へ、そして IC へと発展していくのである。

真空の存在を提唱した G. ガリレイ

古代の哲学者デモクリトス(紀元前 460 年～紀元前 370 年)は、「存在」とは、ただ「物質」のみである、という有名な原子論的な考えをもつ唯物論を唱える学者で、物質のないところは「真空」であると信じていた。

しかし 17 世紀の欧州では、宗教が絶対的な権威をもっており、こちらは唯心論を柱としていた。このころの宗教は「神は真空を嫌っている。真空は神聖な神の権威を汚すものだ」と決めつけ、真空など存在しないといっていた。

この背景として、欧州の宗教界はアリストテレス(紀元前 384 年～紀元前 322 年)の形而上学によって思想を支配していたからだ。形而上学とは、形に触れることのできないものは精神的なものだけだという考えである。このため当時、触れることのできない、精神的なものとならわしい「真空」という言葉はまったくのタブーだった。

このような状況下において、1624 年にフランスの P. ガッサンディはデモクリトスと同様に、真空のなかに原子が存在するという原子論を提唱している。

1605 年、ピサ寺院のランプが揺れるのを見て、振り子の等時性を発見したイタリアの G. ガリレイは 1630 年、10 m 以上の深い井戸から水を汲み上げることができないことから、真空の存在を暗にほのめかした(図 2)。さらに彼は落下運動の法則、つまり落下速度 v と落下時間 t

1638 年	真空の存在を提唱	G. ガリレイ
1643 年	トリチェリーの真空	E. トリチェリー
1650 年	真空ポンプの発明	O. ゲーリッツ
1876 年	負の微粒子発見	S. クルックス
1878 年	白熱電球の開発	J. スワン, T. エジソン
1879 年	電子の発見	J. トムソン
1883 年	エジソン効果の発見	T. エジソン
1904 年	2 極真空管の発明(検波用)	J. フレミング
1906 年	3 極真空管の発明(増幅用)	D. フォレスト

図 2 真空管発明へ道のり

の関係から落下距離 S は t^2 に比例することを 1638 年に発見した。「もし空気のない真空中ならば、重さの異なる物体といえども、 S は t^2 に比例する」と彼は考えていた。

この発見に先立ち G. ガリレイは、イタリアの斜めに傾いたピサ寺院で 1585 年に実験し、この事実を発見したという有名な話がある。しかし、どうもこれは事実とは異なっているようで、1605 年に考えだしたことらしい。これに対しアリストテレスは、10 倍重い物は 10 倍早く落ちるという学説を唱えていた。両者は真向から対立していたのである。

G. ガリレイが、このことを発表することは、前述した宗教上の理由から、命がけて対決しなければならず、実験内容はついに公表されなかった。

1640 年になるとイタリアのペルティは長さ 10 m くらいの鉛管に水を満たしたのち、逆さにして水の入った桶の中に入れると、水の高さが常に一定(1 気圧、+25°C で 10.33 m)であることを発見した。水の重

さと大気の重さがバランスすることから生じる真空のためではないかと考えた。この大発見も迫害を恐れて 8 年間も発表されなかったという。なんとも悲惨な話だ。

トリチェリーの真空

やがて 1643 年になるとイタリアの E. トリチェリーが空気をほとんど含んでいない Hg(水銀)を用いてベルティと同様な実験を行ない、上部になにもない空間が生じることを発見したのである(図 3)。これを「トリチェリーの真空」と呼んだ。

彼は、真空を証明するために次のようなことを考え、実験している。つまり Hg の入った溜りの上部に水を入れておき、水銀柱を徐々に引き上げていく。水銀柱が水の部分に触れるや、水と Hg とが入れ代わり空間は水で満たされてしまうのである。つまり真空が水で満たされるのである。このときの水銀柱の高さは 1 気圧、+25°C のもとで 760 mm となった。この発見によって、初めて「真

空」の存在が証明されたのである。1648年、ようやくこの事実が世間に知れわたることとなった。

初め、真空度の単位は Torricelli の Torr が用いられていた。トリチェリーの実験によって生じた空間の真空度は、Hg の飽和圧によって 10^{-2} Torr となる。

その後、真空度は Pa (パスカル) で表されることとなった。新しい単位となった Pa とは、フランスの B. パスカルのことで、彼は病気のためペニエに依頼して実験データを集め、ここから高い山とふもとでは水銀柱に差があることを発見し、1647年に大気圧の実証を行ない、空気圧のあることを発見した人である。

これに伴い、現在の気象における気圧表示もミリ・バールからヘクト Pa (ミリ・バール = Torr, $133 \text{ Pa} = 1 \text{ Torr}$) という表現に1984年7月から変更している。1 Pa とは 1 m^2 当たり 1 N (ニュートン, 1 N は 1 cm^2 当たり 0.01 g) の圧力が加わるこ

である。ヘクトは 10^2 。

やがて真空が存在するという事実は、多くの人たちに認められるようになった。宗教と対立するといえども、事実は絶対的な力をもっているのだ。

当時の宗教における思考のみの常識のように、現在でも実験もしないのに、学問的な考察だけで常識とすることがしばしばまかり通っている。

一見して常識だと思われることに對して、もう一度原点に戻り根本から実験によって確認してみることも必要だろう。そこから思わぬ新しい事実が浮かび上がってくるかもしれない。

真空ポンプの登場

1650年になるとドイツの O. ゲーリックは真空ポンプを考案している (図4)。彼は種々の実験から水の汲み上げポンプと同様な構造で空気を抜く木製の真空ポンプを考えた。

その後、この往復運動に用いるピ

ストン・ポンプは木製から金属製へと代わった。なんと、この真空ポンプで $1.33 \times 10^{-1} \text{ Pa}$ (10^{-3} Torr) の真空度が得られたのである。そして、この真空ポンプが、やがて誕生する真空管の重要な基盤技術となったのだ。

10年経過した1660年、英国の R. ボイルは O. ゲーリックの真空ポンプを R. フックとともに改良したのち、G. ガリレイが1638年に予測した「真空中では異なる物体の速度は常に一定である」ことを Pb (鉛) と羽毛で確認した。今日のエレクトロニクスの基礎を築いた真空技術は、自分の命を断ってまで研究をした G. ガリレイの功績が大きい。当時、宗教の壁は厚く、彼の実験に基づく研究内容は伏せられていた。

1632年に G. ガリレイは『天文学対話』という本を出版している。このなかでコペルニクスの地動説とプトレマイオスの天動説について比較しながら書き、古い思想をもつ天動説学者を批判した。このことから1633年には宗教裁判を受け、失意のなか1642年に78歳で亡くなった。このとき「それでもやはり地球は動く」と有名な言葉を残している。

真空管誕生は白熱電球がきっかけ

真空ポンプを O. ゲーリックや R. ボイルが発明してから、なんと20年間も、真空を応用しようという発想は生まれてこなかったのだ。この間、真空の唯一の利用法はショーとして人々を驚かす見せ物となっていただけである。O. ゲーリックは Cu (銅) の半球を密着させ、内部の空気を抜き8頭の馬で引かせて真空と大気のある存在を見せる街頭演芸などで活

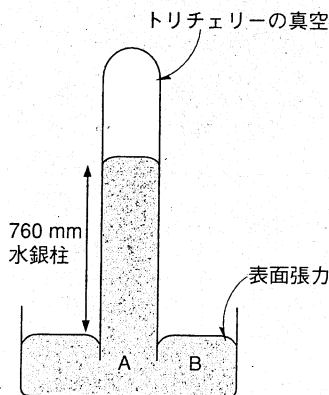


図3 初めて確認された「真空」 A点の水銀柱とB点の大気圧とがバランスしている。1気圧で水銀柱は760mmとなる。真空の発見はエレクトロニクスの発展に夢を与えた。当時は、これが何に役立つか、だれもわからなかった。

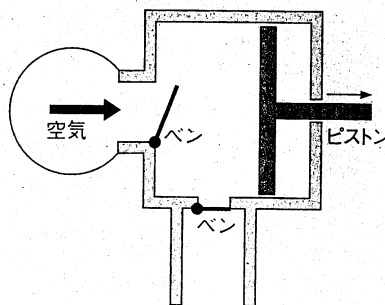


図4 O. ゲーリックが発明した真空ポンプ 樽に水をいっぱい入れてから水を引くことによって真空を得ようとした。その後、空気そのものを引いて真空にすることを考えている。やがてフイゴによる真空ポンプを考案している。

躍していた。

実用的な応用としては真空を利用した揚水用の空気ポンプを1698年に英国のT.セヴァリーが作ったくらいである。真空ポンプが発明されて187年後の1837年ころから、真空による二つの物理実験が始まった。

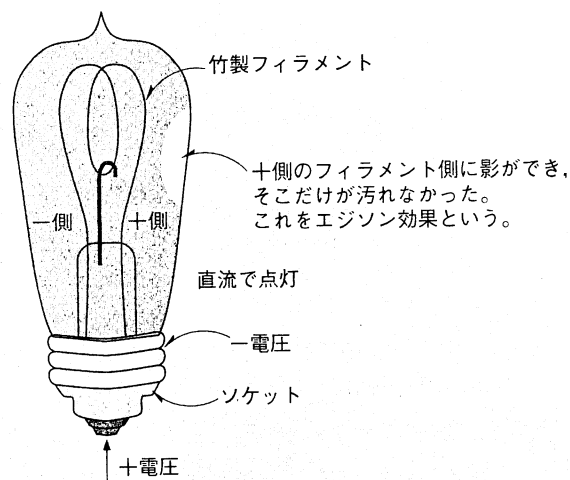
一つ目は真空中の電極に+1kV～+3kVの高圧を加えて真空放電を発生させる陰極線の研究である。この研究から、1837年に英国のM.ファラデーは真空中でグロー放電陽光柱の前に暗部があることを発見した。

この実験を進め1876年には、英国のS.クルックスが陰極から負の微粒子が飛び出すことを発見した。だが微粒子が何であるかは不明だった。これこそが、真空管やトランジスタの動作をつかさどる、重要な「電子」だったのである。

1857年になるとドイツのJ.ブリュッカとH.ガイスラによって真空度の高い水銀式真空ポンプが開発され、1873年になるとドイツのH.スプレングルは、これをさらに改良し真空度 1.33×10^{-3} Pa (10^{-5} Torr)が得られるようになった。このような真空技術の進歩が、グロー放電の実験を支えたのである。

二つ目の応用が長時間点灯できる実用的な白熱電球だった。この白熱電球について、1878年に英国のJ.スワンが木綿糸を炭化させた白熱電球を、1879年には米国のT.エジソンが竹の繊維を炭化させた白熱電球を発明した(図5)。この竹は日本製だったのである。T.エジソンは、中国、インド、中南米の竹を調査したが、結局、日本の京都八幡で取れ

図5 T.エジソンが発明した白熱電球
抵抗値の大きい炭素をフィラメントに使った。電球が真空管発明への第一歩となった。



た和竹が最も適していた。新しく誕生した電球市場を専有すべく、この2人はしのぎを削っていた(p.153の「白熱電球にからむ激烈な特許論争」参照)。

特にT.エジソンは2年ほど前から電話機用送話器に使用する炭素の圧力変化を研究しており、炭素に精通していた。これも白熱電球の炭化に対し、一つのヒントとなったのかもしれない。

やがてガス灯に打ち勝つために、より明るく効率の良い白熱電球が求められるようになってきた。そこで炭素フィラメントに代わるものとして、融点の高い金属を採用しようということになった。このきっかけを作ったのはオーストリアのK.アウエルである。彼は寿命の短い炭素フィラメントに代わるものとして金属によるフィラメントを思いついた。そこで、当初、Os(オスミウム)を使用したのが振動や電圧に弱いことがわかった。

しかし炭素フィラメント推進派は、市場を荒らされることを恐れ、わざと送電電圧を上げOs電球を断線さ

せる妨害をしたという。このようなことはいつの時代でもある。やがてオスラムがW(タングステン)フィラメント(電気抵抗率5.33, 融点3410°C)を開発したのである。

さらに1909年、米国のI.ラングミュアがWを蒸発しないようにAr(アルゴン)ガスを封入し、より明るくするために螺旋状にした。3年後にはW上に酸化トリウムを形成した白熱電球を作っている。これによって電球の寿命は桁違いに伸びていった。これはやがて真空管ヒータとなる。そして陰極線と白熱電球の成果が結びつき、真空管の開発へと進んでいく。

エジソン、直流送電を主張し失敗

白熱電球の第一の競争相手はアーク灯だったが、ほかにもあった。アーク灯は主として人の集まるところで用いられていたが、実は白熱電球以前の1815年ころからガス灯がすでに都市周辺の街路灯や室内灯として用いられていた。ガス灯会社は白熱電球の普及を阻止するため、電線の設置に政治的圧力をかけたといわ

れている。ガス灯も改良され、より明るくなったものの、しょせん白熱電球にはかなわなかった。

その後、T. エジソンは 1896 年に蛍光灯を発明した。現代の照明は T. エジソンの功績に負うところが大きい。だが T. エジソンはその後、白熱電球に電気を送る発電機について、交直(交流か直流か)論争を起こし、大きな問題となった。

そもそもこの問題は、T. エジソンの研究所にいたハンガリー生まれの N. テスラが感情的なもつれから応用科学研究所を飛び出して独立し、1887 年に交流発電機を発明したことから始まっている。

N. テスラの発明した交流発電機のアイディアを米ウエスチングハウス社がいち早く採用のうえ、ナイアガラの水力発電所に納入し、交流方式がスタートした。

これに対し T. エジソンは直流方

式にあくまでも固執し、N. テスラの交流方式と闘争を繰り広げたのである。やがて交流の優位性が認められ T. エジソンは敗北した。電話機でコイルを通して交流信号を取り出し通話距離を飛躍的に伸ばした彼が、なぜ直流方式に堅守したか不明である。一つ考えられることは N. テスラとの感情的なしこりがあったのではないだろうか。これは一般の技術者にもいえることで、非のあることをあまり意地になって固持せず妥協することも大切だろう。

敗北したとはいえ、発明王の T. エジソンはズバ抜けた頭脳と強烈な個性と独創性を持ち、この時代をリードしてきた偉大な人物である。彼の数々の発明によってエレクトロニクスは大きく弾みをつけて動き始めたといえよう。1931 年、「自分のできる最善のことを成し遂げた」という言葉を最後に 84 歳で亡くなった。

真空管の登場 エレクトロニクス産業が起こる

時代の最先端技術と、もてはやされた白熱電球は初めのころ直流電源で点灯されていた。このとき電球内にあるフィラメントの+側のガラス内壁面に汚れない部分が生じたのである。

これを 1883 年に見つけた T. エジソンは、この原因として炭素や微粒子が陰極からガラス面に真っすぐ放射され、陽極の部分の電極に遮られるため生じると考えた。加えて、この微粒子は電荷をもっているかもしれないと考えた。

これを実証するため Pt (白金) 板

を電球内に封入し、電流計を Pt 板とフィラメントの間に挿入した。電流計をフィラメントの+側に接続すると電流が流れ、一側に接続すると電流が流れない。この結果、彼の予測通りフィラメントから負の電荷をもった微粒子が放出されるということがわかり、これは整流作用の発明となった。

だが残念なことに T. エジソンは、この現象についてこれ以上追求したり、なにかに応用したりしようとは発想しなかったようだ。微粒子が何であるかはまだ明らかではなかった。

微粒子を「電子」と命名

物理実験家たちは S. クルックスの陰極線問題に頭を悩ませていた。1897 年、英国の J. トムソンはクルックス管で発生する陰極線に静電偏向と磁場偏向とをかけて実験している。その結果、陰極線は負に帯電した微粒子であり、この微粒子は電荷の最小単位をもっているということがわかった。

J. トムソンはこれを「コーパスル (corpuscle: 微粒子)」と呼び、J. ストリーニが 1874 年に「エレクトロン (electron: 電子)」と命名したと言われている。

しかしこの電子が物質とどのようなかわりをもっているのか不明だった。その当時、水素原子が物質のなかで最小粒子と考えられていたからだ。では微粒子と水素原子とは、どのような関係があるのだろうか。謎だったのである。

原子核のなかに電子が存在し、いかなる物質からも電子が放出されることがわかったのは、なんと 37 年後の 1911 年、E. ラザフォードの原子模型や、1911 年の R. ミリカンによる電子の電気量測定、1923 年の A. コンプトンのコンプトン効果などによってだった。

電子の仮面がようやくはがされた

電子が真空中または固体中を移動するとき、電子はどのような振る舞いをするのだろうか。いまでこそ電子の輪郭は明らかとなっているが、19 世紀末ころ、電子の性質はまだ漠然としていたのである。このような混とんとしたなかで、20 世紀の幕が開かれると同時に、電子に関する

る大きなドラマが始まったのだ。

まず早々の1900年、ドイツのM. プランクがエネルギーは連続ではなく最小単位の n 倍のみが存在するという量子論を、続いて1905年には

ドイツのA. アインシュタインが光の粒子性、つまり光量子説を発表し、このなかでエーテルではなく、真空そのものが光を伝えるのだと提唱した。エネルギー E と質量 m との間に

$E=mc^2$ (c は光の速さ)という特殊相対論を発表している。この意表を突く論文に人々はろうばいした。当時の常識をまったくくつがえした内容だったからである。

白熱電球にからむ激烈な特許論争

照明に対する研究はJ. スワンが初めてではない。すでに1810年、英国のS. デーヴィーがHgを浸した木炭片を電極とするアーク灯を発明した。発電機が実用化し始めた1870年ころから、このアーク灯が照明に用いられている。

だが、アーク灯は安定性に欠けるため、1810年、S. デーヴィーらはフィラメントにPt(白金)を用いる白熱電球開発を積極的に進めていた。だがPt(電気抵抗率10.42, 融点1772°C)は低抵抗のため、電流が流れすぎ、すぐに容断し実用的でなかった。

このため高温に耐える材料として注目するようになったのが炭素(C, 電気抵抗率44.00, 融点3550°C)だったのである。彼はこれを偶然、机の上にあった竹による扇子から考えついたという。炭素は高抵抗であり、これをフィラメントとして使おうと多くの技術者が挑戦した。

だが成功しなかった。その原因はフィラメントを封入するガラス・バルブ(ガラス管)の真空度が低いため炭素が酸化してしまうのである。このためJ. スワンはコツコツと1人で研究を重ね、木綿糸

を苛性ソーダに浸して炭化(均一な構造とする)させたり、さらにフィラメントを挿入したガラス・バルブから空気を排気するとき、熱を加えながら内蔵ガスを放出させたり、さらに封入前に一度フィラメントをフラッシュ点灯させて内蔵ガスを取り除くなどして真空中に若干残った酸素を取り除いて長寿命化を図った。

このようにコツコツと実験して技術を積み重ねていくJ. スワンは、初めのころ特許にはまったく無関心だった。

一方のT. エジソンは白熱電球の開発が話題となっているものの、技術的問題で手こずっていることを知った。そこで彼は1878年、電気によって点灯する照明を開発すると宣言し、応用科学研究所を組織し100人もの技術者を動員して研究を開始している。

フィラメント材に関する実験はことごとく失敗していたが、ついに1879年10月、木綿糸をコールタールで浸して加熱した材料がフィラメント材として適するということを見いだしている。J. スワンと同じようなことをしていたのだ。このとき水銀式真空ポンプが使わ

れた。

さらに研究を進めているうちに、フィラメント材には竹の皮膜が最も良いということとなった。このようなT. エジソンの研究の進め方は、研究テーマを組織的に運営し、特許で押さえるという近代的な「研究所」の走りだった。

やがてT. エジソンは白熱電球に竹による炭素フィラメント(繊維構造を若干残す)を発明した。加えて、断線したときに使用者が交換しやすいように、ねじ込み口金も考案し、着々と特許を取得していった。

まもなくJ. スワンはT. エジソンの特許に包囲されるようになってきた。あわてたJ. スワンは、炭素フィラメント材に関する特許を初めて提出し、T. エジソンと激烈な特許論争を繰り広げたのである。さらにT. エジソンはほかからも炭素フィラメントについて訴訟を起こされ、三つどもえの混戦となったという。

決着がつかず、結局、1883年、J. スワンとT. エジソンは共同で「エジソン・スワン電灯会社」を設立し、英国と米国で協力しあって生産することとなった。

さらに1913年には英国のE. ラザフォードやデンマークのN. ボア、日本の長岡半太郎らによる原子模型、1923年にはフランスのド・ブロイによる電子の波動性が提唱されたのである。驚嘆すべき理論の展開が矢継ぎ早に繰り広げられていった。

やがて、電子は粒子性と、波動性(速度に反比例する波の存在)をもつと同時にエネルギー $E = h\nu$ (h はプランク定数, ν は振動数)と静止質量 m をもつという性質が明らかとなったのである。

これに対し光は、波動性と同時に粒子性をもつが、静止質量はゼロの光子であることがわかってきた。信じがたい性質を電子はもっていたのだ。それまで暗中模索だった電子の性質がようやく明らかになってきた。

この電子こそがエジソン効果の微粒子だったのである。このようにして一見なんの関係もないと思われていた陰極線の物理実験と、白熱電球によって発見されたエジソン効果が

結びつき真空管を発明するきっかけを作った。さらに、白熱電球のフィラメント技術と高真空技術がこれを支えたのである。それまでに養われてきた総合技術力の集積によって、真空管が誕生するのである。

ついに登場、検波用の2極真空管

英国のJ. フレミングは無線電気で有名な英マルコーニ社で働いていたが、より安定した検波器を開発すべく調査をしていた。このときエジソン効果の整流作用を検波器として利用できないだろうかと思いついたのである。

整流作用と検波作用とは一見して同じように見えるが、整流は大電流領域であり、検波は微小電流領域であるといった違いがある。J. フレミングは検波器を、高周波交流の整流器だといっていた^{注1)}。

そこで彼は、Pt板を内蔵する白熱電球において、より効率よく電子を集めるために、Pt電極を円筒形にした構造をもつ2極真空管(別名、

熱電子管)を1904年に発明したのである。ここでPt電極を陽極(プレート)、フィラメントを陰極(カソード)と呼んだ。これを用い、無線によって送られてきたモールス信号を受信したところ、2乗検波によって非常に鮮明に受信できるようになった。エジソン効果が発見されてから21年目のことだった。

この2極管は電子の流れを、電極に加わる信号電圧によって自分自身でオン/オフすることから電子弁(エレクトリック・バルブ)と名付けられた。ただし、いずれの極性でもオン/オフできる本当の意味での弁とはいえないが、これ以上の発想は浮かばなかった。

ド・フォレストが3極真空管を発明

米国のド・フォレストは2年間、米ウエスタン・エレクトリック社の

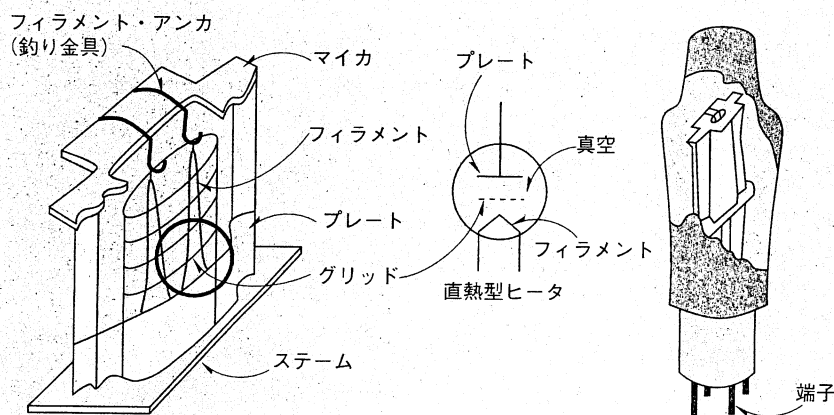


図6 3極真空管の構造 ヒータでカソードを加熱し真空中に電子を放射する。カソードに対してプレートを+電圧とする。プレート電流はグリッドを+にすると流れ、-にすると流れなくなる。小さなグリッド電圧に対して、プレート電流による電圧変化は大きくなる。

注1) 2極真空管における陽極-陰極間電圧対電極間電流との関係について述べてみよう。陽極電圧が+の場合、電圧の増加に伴って陽極電流は指数的つまり非直線的に増加していく。これを順方向という。-の場合、電圧の増加に伴って電流はほとんど流れない。これを逆方向という。さてこの特性を変調信号の検波として用いる場合、2通りの方法がある。一つ目は、信号が小さいときはこの順方向のみを使う方法である。このとき順方向に若干バイアスすることにより、非直線特性のため非対称電流が流れるようになる。この非対称電流から元の変調信号を取り出すことができる。これを2乗検波という。若干、変調信号が歪むが、モールス電信や普通のラジオ放送ではあまり問題ない。二つ目は、音質を重要視するラジオ受信機などでは、信号振幅を大きくしてから整流と同様に順方向と逆方向を利用する検波、つまり整流方式を用いる方法である。整流検波という。これはSiダイオードでも同じである。

研究所で研究していたが、29歳のとき退社し、自ら無線電信の会社を創立した。初めころ検波器の開発に没頭し、コヒーラ検波器や電解検波器の改良をしていた。だがこれらは性能が十分ではなかった。さらに特性の良い検波器を開発するため、J. フレミングの2極真空管に注目したのである。

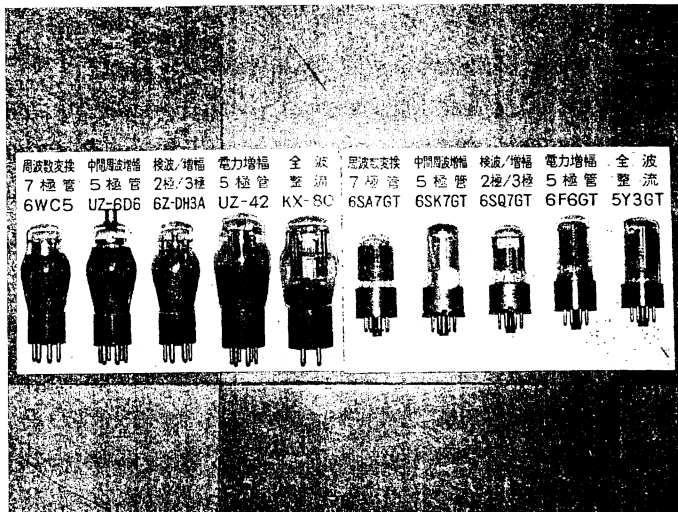
この2極真空管では、フィラメント電流によってフィラメント温度を変え陽極電流を制御していた。これに対し、彼は、フィラメント電流を制御するのではなく、陽極と陰極以外に三つ目の電極を挿入し、この電極の電圧によって、陽極電流値を制御しようと考えたのである(図6)。この考えは見事に的中し、新しい真空管による検波器は、彼の予想通りの特性を示し、成功した。

この新しい電極は、のちに格子(グリッド)と呼ばれるようになった。ところが驚いたことに新しい真空管検波器は、高感度の検波器と同時に、このグリッド電圧と陽極電流との間にわずかな増幅能力があることを実験中に発見したのである。大発見だった。

どこに問題点があるか、これをどのように解決するか、ということに対する彼の洞察力と着想はたいしたものだ。彼は、初めから増幅器開発を意図したものではなく、あくまでも検波器の性能向上が目的だった。

早速、ド・フォレストは1906年10月25日、3極真空管の特許を申請している。しかし実際には利得があまりにも小さく、増幅器として使えるようになるまでなんと6年の歳月が必要だった。

図7 ST管(左5本)とGT管(右5本)



原因の一つは、真空度が低かったことにあった。ただし彼はそれに気づかなかつたらしい。3極真空管は初めころ「オーディオン (audion: オーディオ管)」と呼ばれていたが、その後、「トライオード (triode: 3極管)」と呼ばれるようになった。

ド・フォレストがラジオ放送の父に

ド・フォレストの発明した性能の良くない3極真空管を最初に使い始めたのが米国のE. アームストロングで、彼はこれをなんとしても使いこなそうとした。彼はまず性能の良くない3極管を使った再生回路を考えだしている。

この再生回路とは、微弱な入力高周波信号を増幅したのち、出力の高周波信号の一部を入力に戻し、再び入力の高周波信号と重ねるのである。こうすると、ラジオの感度が実に良くなることを発見した。

たちまち3極真空管が注目され始めたことはいうまでもない(図7)。増幅できる真空管の発明に対しJ. フレミングは大変に残念がると同時

に、自分の持つ特許に抵触すると主張しド・フォレストに対して訴訟を起こしている。

結局、ド・フォレストの権利が認められ、J. フレミングは敗訴した。3極真空管の出現によって火花放電による無線電信は衰退し、本格的な増幅器を用いたラジオへ、そしてテレビへと飛躍し、エレクトロニクスに大革命をもたらしたのである。

ド・フォレストは3極真空管のほかに、高周波増幅と低周波増幅とを1本の真空管で行なうレフレックス方式を考案するなど実に多くの特許を取得している(図8)。

彼の創立した無線電信の会社は、発明を中心としたため、まもなく倒産した。その後、ラジオ受信機メーカーのド・フォレスト・ラジオ社を設立している。だがそのころ、米ゼニス・ラジオ社をはじめ多くのメーカーが乱立し、お互いに足の引っ張り合いをした。これをシェイク・アウトと呼んでいる。そしてまたしても彼の会社は倒産した。

彼はのちに、米国のラジオ放送事業開始に向けて尽力しラジオ全盛時

代を築き上げ、ラジオ放送の父と呼ばれるようになった。

その後、IRE (Institute of Radio Engineers: 米国無線技術者協会) の会長に選ばれ 1930 年 1 月 8 日に就任講演をしている。ここで彼は「人々は広告放送が嫌いで、ラジオ受信機を買わなくなったのだ」と痛烈な批判演説をした。

なぜこのような内容になったのだろうか。実は、この講演をする 2 カ月ほど前の 1929 年 10 月 24 日に米国では株価が暴落したことが原因で、「暗い木曜日」と呼ばれる世界大恐慌の真っ只中にあったのだ。当時、エレクトロニクスの花形商品であるラジオ受信機はまったく売れなくなり、せっかく成長し始めていたエレクトロニクス産業は苦境に追い込まれていた。

これは経済状態が悪いせいだと、すべての人々は考えていたが、ド・フォレストの考えは違っていた。同年 8 月に開催された IRE の第 5 回年次大会では、「ボクシングの結果を知らせる号外や野球の新聞報道はラジオ放送の登場によってあまり意味をもたなくなった」とラジオのも

つリアルな娯楽放送の有用性を彼は強調している。

ちょうどそのころ、映画は、弁士が熱弁を振るった無声から、スピーカから音が出るトーキに代わりかけていた。だが音質はきわめて良くなかった。「技術が未熟すぎる。人間の声が不快に聞こえ、音楽を聞くのは苦痛だ」とド・フォレストは音質改善の必要性を技術者に忠告したりもした。

彼は、1948 年に電波高度計を発明するなど、発明が趣味でもあった。この年、75 歳になったド・フォレストは日本でのテレビ放送を事業化するため正力松太郎に話を持ち込んでいる。ラジオ放送、テレビ放送に生涯情熱を傾けたド・フォレストは 88 歳でこの世を去った。

高性能真空管に向けて開発が活発化

一つの重要な物理現象が天才たちによって発見されるや、多くの技術者によって改良が行なわれ、特性が飛躍的に向上していくことを歴史は示している。

J. ワットの蒸気機関も、T. エジソンの白熱電球も、W. ショックレーの半導体素子もそうだったように、

ド・フォレストの真空管も大きく発展することとなった。ド・フォレストが 3 極真空管を発明して 1 年後、米国の H. アーノルドは真空度低下の原因として、ガスの発生とフィラメントの蒸発を指摘し高真空化を計った。

その後、高性能真空管の開発に多くの貢献をした米国の I. ラングミューアについて述べてみよう。彼はまず 1913 年に W (タングステン) に酸化トリウムを添加し、これを還元加熱して表面に Th (トリウム) の薄い分子層のある ThW フィラメントを開発した。

これによって真空管の性能向上に必要な一つの鍵を握るフィラメントの動作温度 (1000 K~1500 K) が下がり、熱電子放射数が W より向上したのだ。これを酸化物陰極という。これを用いた新しい真空管は初め電話の中継増幅器から使用され、やがて家庭用ラジオにも採用されるようになっていった。

次にこの年、I. ラングミューアは、2 極真空管の陽極電圧と陽極電流との間に $3/2$ 乗則が成り立つという理論を発表すると同時に、理論から真

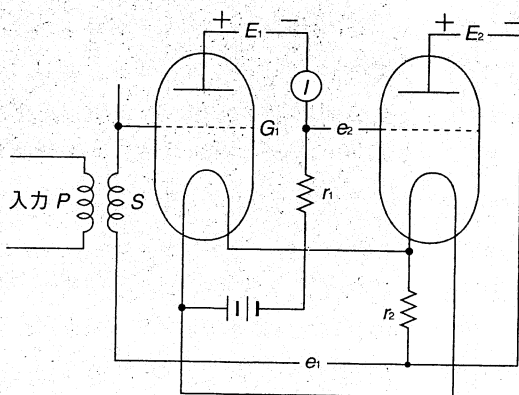
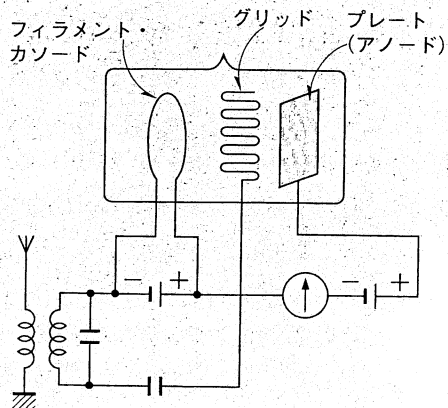


図 8 初期のラジオに使った同調回路 左図はド・フォレストが 1907 年に特許を取得したオーディオ・ラジオの応用例。Science America (Chipman, R. A., no.212, March 1965) より。右図はフリップフロップ回路。参考文献 1) を参照。

空管の増幅度を高める鍵として高真空が重要であると発表している。この高真空問題に対し、早速1913年にドイツのW.ゲーテが高真空可能な分子真空ポンプを発明している。これによって1914年にI.ラングミューアはバラツキのない特性の良い3極真空管を作り上げている。

2年後の1916年になると、W.ゲーテはユニークなHg拡散ポンプ方式による真空装置を考案した。この原理はまず高温にしてHgの蒸気を発生させる。次にHgの蒸気の流れに気体の分子を乗せて運んだあと、Hg蒸気のみを冷却して液体のHgに戻し、これを回収して高真空を得ようという画期的なアイデアだった。だが、残念ながらうまく動作しなかった。

これに注目したI.ラングミューアは、Hg拡散ポンプで問題点となったHg蒸気の流れをノズルにして噴き出すような形状とするなどの改良を行ない、ついにHg拡散ポンプが1915年に完成したのである。この新しい真空ポンプは素晴らしい成果を得ることができた。

なんとしても高性能真空管を開発したいという情熱が彼に超高真空ポンプを作らせたのだろう。これによって3極真空管の性能は飛躍的に上昇したことはいうまでもない。

認められた安藤の4極真空管特許

1914年7月28日、オーストリアがセルビアに宣戦布告し、やがて米国や日本も巻き込む第一次世界大戦が勃発した。ちょうど実用化され始めていた無線技術は軍用無線通信機へと転用され、数多くの真空管が用

いられるようになった。同時に、通信技術は飛躍的に進歩している。当然の成り行きとして、高感度で混信や雑音の小さい高周波受信機の要求が強まってきたのである。

この要求にこたえるため、利得を上げようとして3極真空管を多段につなぐと、発振によって余分な高周波成分が発生し雑音となる。この原因は、陽極(プレート)と格子(グリッド)間に静電容量が存在するためだった。

これを防止するため、ドイツのW.ショットキーは1915年、陽極と格子の間に遮蔽格子(スクリーン・グリッド)を挿入した4極真空管を発明している。これによって余分な高周波成分を接地して取り除く。

やがて世界を巻き込んだ悲慘な戦争は1918年11月11日終戦を迎え、一時の平和が訪れた。ドイツは致命

的な破壊を受けており、残念なことにこの発明は長期にわたってドイツ国外へ流出しなかったという。

これとはまったく無関係に安藤博は、1919年に同様な4極真空管を発明し、多極真空管として特許を申請している。一方、米国ではA.ハルが1926年に4極真空管を発明したのである。

その後、ドイツ、日本、米国の間で4極真空管に関する特許係争があったが、安藤の特許が、係争ののち1929年に認められたのだ。

電話機のA.ベルとE.グレーなどもそうだが、とりまく環境条件が同じような状態の場合、同じ内容の発明がほぼ同じところに複数の人間によってなされるものである。新しい事実が発明・発見されたなら、特許申請が一刻を競うのは、いまでも昔も変わらない。

ラジオ放送が始まり、真空管とのシナジー効果を生む

すでに1920年から米国ではラジオ放送が始まっており、真空管は本格的に普及し始めていた。

当時、真空管の陰極はすべて直熱加熱構造だった。陰極は酸化物(酸化バリウムなどの層をもつ)の中心にNi(ニッケル)を配置した構造となっており、Niに直接電流を流して加熱する。

直熱加熱方式はわずかな電圧変動でも、敏感に電子の量が変化する。もし交流電源で使用した場合には、フィラメントから発生する電子が交流波形に連動し、ハム(ブーンという音)と呼ばれる雑音が発生するの

である。

このため、ラジオ受信機は、直流電源の電池式にならざるを得なかった。ところが、真空管の消費電力が大きいため、すぐに電池が消耗してしまう。電池でなく、商用電源を用いることができないだろうか、と多くの人たちが熱望していた。

現在のトランジスタ・ラジオは真空管と比較して低電圧であるうえに、消費電力がきわめて小さく、電池で長時間動作が可能となったが、現代人はこのような過去の技術者の苦労をなかなか理解できないだろう。技術が驚異的に進歩したのである。

さて当時すでに、米国における家庭用電灯の電力送電は直流送電から交流送電へと代わり、広く普及するようになっていた。この理由は、直流送電では電力損失が大きく、遠くへ行くほど電圧が落ち、しかもこの電圧降下した直流電圧を上昇させることが当時の技術ではできなかったからだ。

これに対し交流送電では1882年フランスのL.ゴラームの発明したトランス（原理はM.ファラデー）を使えば、電圧が下がっても自由に電圧を上昇させることが可能なのである。このトランスは、そのころ2次発電機とも呼ばれていた。

当時の成り行きとして、ラジオ受信機の電源を電池から供給するという煩しさを避け、商用電源（交流送電）から直接供給しようということになった。しかしここで問題となったのが電流容量の大きいフィラメント電源だった。電流容量の小さい高圧の真空管回路は商用電源を整流すれば実現できる。

このためフィラメントを、直流ではなく、交流で点灯できる真空管の開発が始まっている。

この新しいフィラメントは傍熱型

加熱と呼ばれ、表面に酸化バリウム層をもつNiの中に酸化アルミニウムで絶縁したW（タングステン）があるという構造になっていた。電流はこのWに流すのである。この構造は、交流でフィラメントの発熱が変動しても、変動に無関係に一定の熱温度を得られる。このため、ハム雑音は発生しなかった。1926年ころのことである。こうしてようやくラジオ受信機は商用電源で動作できるようになったのである。

その後、4極真空管の欠点として、陽極に衝突する電子によって2次電子が放出されるため、陽極電圧と陽極電流とに歪みが生じることがわかった。この歪みのため、大出力が必要なスピーカを動作させることは困難だった。これを防止するため、陽極と遮蔽格子との間に目の荒い抑制格子（サブレッサ・グリッド）を挿入する5極真空管が発明されている。サブレッサ・グリッドの電位は陽極と同電位とし、2次電子はこれによって再び陽極へ追い返されるのである。

このような構造は、1927年に英国のH.ランド、および1929年にオランダのホルストとテレゲンが考案したといわれている。

真空管にダウンサイジングが始まる

当時、「ダウンサイジング」という言葉はまだ存在していなかったが、真空管は形状が大きすぎると電子機器設計者からやり玉に上がっていた。そのうえ、壊れやすく発熱することも問題となっていたのである。

真空管設計者は決してだまっていたわけではない。

1929年ころ、真空管の形状は茄子のような形をしていたので、「茄子管」と呼ばれていた。その後、1927年になると、管部の上部から格子電極を出すST（スタンダード・チューブ）管が標準管として開発され、25年近く使われていた。

だが、飛行機や野戦に用いる無線機では小型化と丈夫さを、ラジオ・ゾンデ（無線気象観測器）では超小型化を要求するようになってきた。このため1937年、小型化、小電力化、高周波化に向けてGT（ガラス・チューブ）管が、1939年にMT（ミニチュア・チューブ）管が、さらに1955年にSMT管（サブミニチュア・チューブ）が開発されている。特に無線機には丈夫なメタル・チューブが米国で開発された。そのなかの一つに有名な「6L6」がある。

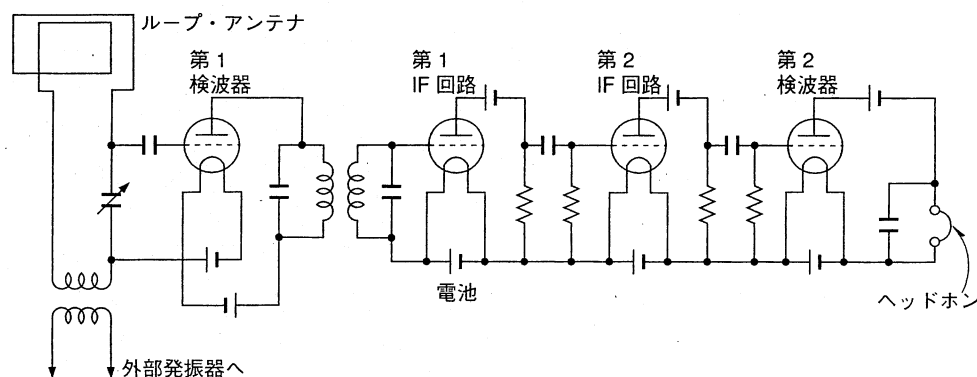


図9 スーパーラジオの回路
E. H. アームストロングはスーパーヘテロダイン回路を考案した。図は *Radio's Conquest of Space* (McNicol, D., Murray Hill, 1946) より。

真空管からトランジスタへ

第一次世界大戦は1918年に終わり、1920年から米国を皮切りに世界的にラジオ放送が普及していった。受信機メーカーとして、米国ではRCA (Radio Corporation of America)社、GE (General Electric)社、シルバニア社、ウエスチングハウス社、レイセオン社が誕生した。

日本では本堂平四郎が東洋レディオという会社を設立している。

米国では1922年ころ東部から西部へとラジオ放送は広がりラジオ産業は絶頂期にあった。米国におけるラジオの生産は急増し、半月以上待たないと庶民の手に入らないという黄金時代を迎えたが、たちまち生産過剰に陥った。「1924年以来、毎年のように生産過剰を繰り返す、バーゲン価格で放出している。なにが手は打てないのか」と米 *Electronics* 誌は1930年7月に非難の記事を掲載している。

その後30年～60年も経過した日本でも、トランジスタ・ラジオ、テレビ受像機、VTR、パソコンなどが同様な状態になった。売れる商品にメーカーが群がり、たちまち市場を食い潰すのは古今東西を問わず同じで、なんの解決策もないようだ。

ラジオの需要を大きくするために、1930年ころから米国では二つの動きがあった。一つは車載用ラジオ市場を新しく開拓することであり、もう一つはVHF帯にさらに新しいラジオ局を開局しようとしたのである。

真空管の開発も、小型化する、複合化を図る、動作周波数を上げる、種類を増す、といった方向に進んだ。1932年にフィラメント電圧を+6.3

Vとした統一シリーズを米シルバニア社が開発している。その後、1937年には真空管の小型化ということで多くの真空管が開発され、なんと一時期は2300種を超えるまでに増えた。1938年までが真空管開発の全盛時代だったのである。

1939年になると、第二次世界大戦が勃発（日本は1941年より参戦）し、米国も日本もラジオの生産を中止し、軍用無線の開発が中心となっていた。その後、軍用では真空管の標準化が進み、米国軍の標準真空管は224種に絞られたという。

やがて戦争が終わり、1948年から1949年にかけて真空管はトランジスタに置き換わり始めてきたが、多くの技術者は真空管の扱いに慣れており、年輩の技術者ほどトランジスタ導入に抵抗を示していた。このため、真空管を作っている大手企業は、当初はトランジスタを脅威と感じなかったようだ。

第3世代

能動素子の登場により電子回路が続々誕生

抵抗器、コンデンサ、コイルなど受動素子と、能動素子である真空管との組み合わせによって、技術者はようやく増幅器を手に入れた。だが使ってみると意外に使いにくい。「なんだこれは」と思う人と、「なんとしてでも使いこなす」と思う人に分かれた。

ほとんどの技術者が前者だったが、後者のなかに天才E. H. アームストロングがいたのだ。彼はこの困難のなかからラジオ用の再生回路やスーパーヘテロダイナミクス回路といった電子

だが、1955年から1960年にかけてトランジスタは、若手の技術者集団であるベンチャー企業の東京通信工業（現在のソニー）によってラジオ受信機に採用され、瞬く間に真空管を駆逐してしまったのである。

まさに劇的なシフトが行なわれていった。この時代の流れについていけないメーカーは淘汰され、新しいメーカーがこれに代わって誕生してきたのである。

革新技術は否応なしに旧技術を駆逐し、瞬く間に根底から産業界の構造が破壊されるという恐ろしさをもっている。エレクトロニクス隆盛へと導いた真空管は重任を果たし、過去の遺産となりつつある。

だがその技術は決してなくなっていない。真空管を支えた真空技術は現在でもブラウン管やプラズマ・ディスプレイのみならず、ICの製造工程などにも必須の技術となっているのである。

回路を次々に発明している（図9）。

さらにもう1人、H. S. ブラックがいた。当時、ラジオ受信機と同様に普及しつつあった電話では多重化が計画された。だがこれに用いる増幅器の安定化が問題となっていた。この問題に対し多くの技術者はまず安定した真空管を求めようとした。当時の技術レベルではそのようなことは無理だった。

このとき彼はまったく奇想天外な負帰還 (negative feedback) という他の技術者と異なるアイデアを思い

ついたのだ。そして、多くの技術者によって、現在の電子機器を支えるアナログやデジタルの基本回路が続々と生みだされていったのである。その一部を紹介してみよう。

電子回路の基盤となる増幅器

増幅器は英語では“amplifier”という。辞書によれば「信号となる電力、つまり電流・電圧の振幅を入力時より増大させて出力することである」と記述してある。ただしエネルギーを生み出す玉手箱ではない。増幅器のエネルギーは、電源から加えられており、増幅器が出力する電力エネルギーに加え、増幅器自身もエネルギーを消費している。

さて、人類がこの増幅器を手に入れたことで、20世紀のエレクトロニクスは急速に発展できたのである。エレクトロニクスの最も重要なインフラとも言える増幅器はいったい、いつごろ発見され、どのような発展を成し遂げたのだろうか。

少なくとも増幅器の開発は現在までに三つのステップを踏んでいる。まず電磁リレー増幅器である。次が真空管増幅器であり、やがて半導体、つまりトランジスタを経てICの固体増幅器へと変遷していった。

だが、新しい増幅器の開発はこれで終わりではない。次世代に向けて量子効果素子や究極の素子、いわゆる人間の細胞と同様なバイオ素子を用いた増幅器などが注目されてきつつある。

電磁石リレー増幅器による電信技術

電信機の基本動作は、電池の出力をオン/オフして電流を流すことで

ある。だが距離が長くなると電信線の抵抗値が高くなり、電流が流れにくくなる。この解決法は、高感度の電流検出器を開発するか、低抵抗値の電信線を開発するか、電池の電圧を上昇させるかしかなかった。

だが、その当時、いずれも技術が未熟であり実現は大変に困難をきわめた。このなかで実用化された方法を三つほど紹介しよう。

一つ目は電気を音に変換する方法である。1833年、ドイツのK. ガウスとW. ウェーバは共同で、出力用電流計の代わりに高感度電磁石で音を発するようにして、往復3kmの電信通信に成功している。

これは送信側の電流エネルギーを使って、受信側でそのエネルギーを音に変換する方法である。感度の高い電流計を注意して見る代わりに、ピアニシモな音を敏感に聞くことのできる人間の耳を利用したのだ。増幅器のない時代の一つのアイデアだった。

二つ目が電磁リレーを用いる方法である。1837年、米国のS. モールスは電磁石を用いた本格的な電信機を発明している。これが、増幅器を用いた初めての電気装置ではないだろうか。

この電信機は、送られてきた微弱な入力信号で動作する電磁石リレーと、ゼンマイの力によって動作する紙送り機構で成り立っている。微弱な入力信号のみで、紙送りを直接動作させるほどのエネルギーはない。

そこで、まず微弱な入力信号で電磁石リレーを動作させて鉄片を引きつけ、次にこの引きつけられた力を利用してゼンマイをスタートさせたのである。鉄片の力を利用し、大き

なエネルギーをもつゼンマイにバトン・タッチした。この電磁リレーは一種の増幅器ということになろう。このS. モールスの電信機によって長距離通信が可能となり、広く世界で使われていった。

三つ目は昇圧する方法である。1857年の大西洋横断海底電線の敷設では、あまりにも信号が微弱となるため高圧で信号を送っていたが、電線の被覆技術が未熟なため、わずか2カ月で通信不能となっている。本格的な増幅器のない時代は大変に苦労していたことがわかる。

この時代、電磁リレーは一種の増幅器と考えられていた。さて、なぜ電磁リレーが増幅器と呼ばれたのか、簡単に説明しよう。

一般に電磁石リレーは、電磁石を駆動するコイルと、電磁石によって引きつけられる電気接点とから成る。このときコイルを駆動する入力電流と、電気接点を通して電源から流すことのできる出力電流との比は少なくとも10倍以上得ることができるのだ。このため電磁石リレーは別名「リレー増幅器」とも呼ばれていた。

リレー増幅器は機械式であるため、真空管やトランジスタなどと比較して、周波数応答特性が良くなく、直流に近い信号のみに有効だった。このため電話の自動交換機用など、限られた応用分野にしか使えなかった。

明瞭となったエジソンの電話機

A. ベルの発明した電話機はまず、送話側で音声を振動板によって捕らえ、これを電磁石を通して電気信号とし、この電気信号をそのまま電話線で伝える。次に受話側で電磁石を

通して振動板を動かし音声に変換していた。つまり電池の電流は、電話線にそのまま流していたのである。

このため電気信号は、電話線が長くなれば長くなるほど電話線による

抵抗のため電圧低下を起こし、初めのころわずか 30 m ほどしか届かなかったという。これを解決するため電話線を太くしたり、電池の電圧を上昇させるなど工夫していたが、大

声で怒鳴らないと聞き取れないという欠点は克服できなかったのである。

このようななかで、T. エジソンはまったく新しいアイデアを考案した。この電話機の送話側には、炭素

天才たちが激論を交わした電磁波と電子の正体

電磁波はいったい波動なのだろうか、粒子なのだろうか。この問題に対し 17 世紀から 19 世紀にかけて、光は波動である、いや粒子であると 2 派に分かれて論争が続いていた。

この論争の論点とは、もし光が波動なら横波で伝播するエーテル(光を媒介する物質)を必要とするのに発見されてない。もし粒子とするならば、光の干渉を説明できないという点だった。

この疑問に対し解決の糸口を作ったのが J. マクスウェルではないだろうか。英ロンドンのキングス・カレッジの教授だった J. マクスウェルは、1864 年、電磁波の存在を予想したうえ、この電磁波よりも波長の短い波が光であるという大胆な説を提唱している。

やがて彼は世紀の天才たちを生み出したケンブリッジ大学キャベンディッシュ研究所の初代所長となる。この得体の知れない電磁波は、1888 年、ようやく H. ヘルツによって確認され、1895 年には W. レントゲンによって X 線(見えない光)が発見されたのだ。

電磁波、X 線、光は、お互いどのような関係があるのだろうか。

天才たちは躍起になってその追究に没頭することになる。

このような状況下で M. プランクが想像を絶することを言い出した。連続値を持つと考えられていたエネルギーが、最小エネルギー単位 $h\nu$ (h : プランク定数, ν : 振動数)の整数倍しか取り得ない、つまり不連続値になるというのだ。1900 年のことだった。

光も電磁波だ

1905 年になると A. アインシュタインは、1888 年に W. ルールウアッシュの発見した外部光電効果を用いて照射する光の強弱に関係せず波長が短くなるほど、金属から飛び出す電子のエネルギーが増加することを見いだした。このことから彼は「光は $h\nu$ なるエネルギーをもつ粒子のように振る舞って空間中を伝わっていく。ここにエーテルは必要ない」と提唱した。この $h\nu$ を光子という。

1912 年、M. ラウエは硫化亜鉛の結晶に X 線を照射し、干渉によって生じる斑点模様の写真を撮り、X 線は波動であるとの確認を得たのだ。

1923 年に A. コンプトンが炭素

に X 線を照射すると、もとの X 線よりも波長の長い X 線が存在することを発見した。ここから X 線は A. アインシュタインのいう光子をもつという結論を導きだした。X 線も光と同じ電磁波であり、波長のみが異なるのだ、ということになった。

さて、こういった実験から「光は波動と粒子の 2 重性をもつ」という信じがたい結論を導き出したのだった。

さらに 1924 年になると、フランス・ソルボンヌ大学のド・ブロイは、物質にも波動としての性質があるはずだという、これまた意表を衝いた概念を発表した。これを物質波という。多くの科学者たちはこの奇妙な提案に戸惑ったが、A. アインシュタインは直ちに称賛したという。

光は、エネルギーをもち、光速で動くにもかかわらず、常に質量は零である。そして波動と粒子の性質を併せもつ。一方の電子は、エネルギーをもち、光速に近づくにつれて無限の質量となり、波動と粒子の性質をもっているというのが、世紀の天才たちによって導き出された結論だった。

粉が用いられていた。炭素粉は細かい粒子になってお互いに軽くくっついた状態で送話器に入れてあった。音声の振動板圧力によって、粒子のくっつき方は変化し、粒子と粒子との抵抗値が変化するのである。つまり音声信号はこの抵抗値変化によって生じる音声電流として取り出すようにした。

さらに工夫を凝らし、この音声電流の変化分のみを取り出すために誘導コイルを用いて、送話と受話の電池を分離したのである。この電流変化のみを電話線を通して相手側に送り、誘導コイルを通して相手側の電話機に与え、相手側の誘導コイルによって電磁石を通して音声に変換するようにした。送る側の電池から電流を電話線に直接流す必要はない。

つまり変化分のみ小さな音声信号を送り、相手側の誘導コイルと電池によって昇圧し大きい音声を出力することができる。コイル間のインピーダンスが比較的高いため、線間の抵抗損失をほぼ無視でき、長距離通話が可能となったのだ。これは真の意味で増幅とは異なるが、増幅器と同等の役割を果たしていた。

この発明によって電話の通話距離が飛躍的に伸びると同時に、大声で怒鳴らないと聞き取れないという電話機問題は解消した。現在の近距離アナログ電話機でもまだこの原理を一部応用している。

増幅器のない時代の無線電信・電話

無線電信の黎明期は発振源として火花放電を送信機に用いることから始まった。受信機ではかすかな電磁波を、増幅なし、電池なしで、同調

検波したのち、直接聞いていた。技術者は、長距離送信機用としていっそう強力な火花放電装置を開発することによって、あるレベル以上の信号しか受信できない受信機の到達距離を伸ばすことに力を注いだ。

だが火花放電による無線電信は、周波数が不安定で、かつ広い周波数成分が含まれていたため、混信に悩まされた。

このころの受信用同調回路にはルーズ・カプラ・コイルが用いられ、受信しながら調整していた。このコイルは1次と2次のコイルを重ね、「結合が密」のとき、感度は良くなるが、混信しやすくなる。離れた「結合が粗」のとき、感度は悪くなるが、混信しにくくなる。粗を「ルーズ」というところからコイルの名称がついた。

その後、火花放電には、モータ駆動による強力で安定かつ単一周波数の得られる高周波発電機が用られるようになっていった。

やがてこの高周波発電機による電磁波のみの無線電信から、電磁波と音声とを変調する無線電話へと発展することとなる（p.161の「天才たちが激論を交わした電磁波と電子の正体」参照）。

しかし受信機はなんら発展しなかった。受信機の感度をもう少し高めたい、雑音を小さくしたいと思っても、これを実現する方法は見つからず、なんらかの技術的ブレイクスルーが必要だったのである。

このように、有線による電信機や電話機、無線による電信機は、発明された当時、増幅器がなかったため技術的に大変な苦勞を重ねて作って

いた。このように苦勞して作られた装置は初めから多くの人たちに好意をもって受け入れられたわけではない。人々は強力な火花放電を気味悪がる傾向にあり、使用することにちゅうちょしたりしていた。しかしほかに通信手段がなかったため、主として航海用船舶の通信手段として用いられていた。

やがて真空管という増幅素子が開発され、大きな飛躍があった。真空管を使うと、周波数が安定して、混信が少なくなり、かつ火花はいらないのだ。ようやく多くの人々に受け入れられ始めている。無線電信では送信機の出力を増大するよりも、受信機の感度を高めたほうが効率的だといわれるようになってきた。

エレクトロニクスの玉手箱

エレクトロニクスにとって、能動素子を用いた増幅器は魔法の玉手箱だ。この増幅器を基本に、あらゆる電子機器が誕生してきた。いまや増幅器は、エレクトロニクスを支える重要な基盤となる電子部品であり、人間における頭脳をつかさどる細胞と同じ働きを行なっているのだ。

一般に電子機器にはアナログとデジタルとがあるが、いずれも増幅器が基本となっている。

では、増幅器はどのように進化しながら変遷してきたのだろうか。

増幅器は無線機やラジオ受信機とともに発展してきた。1920年、米国で最初のアナログによるラジオ放送局 KDKA 局が誕生したとき、すでに増幅能力をもつ3極真空管は、1906年にド・フォレストによって発明されており、ラジオ受信機の基

本となるシステムは、天才 G. M. マルコーニと E. H. アームストロングによって、ことごとく考案されていたのだ（本誌 1996 年 4 月 8 日号，no.659，p.175 参照）。

だがラジオ放送が実用化してみると、ラジオ受信機に思わぬトラブルが続発している。

火花放電と比較して周波数が安定していることを理由に、あまりにも放送局が乱立したため、再び混信の問題が生じ始めている。このほか、雷などによる雑音、音量が変動すると

いうドリフト問題なども生じている。

ここからフィルタ回路やフィードバック（帰還）回路という新しい回路が次々と派生的に誕生してきた。

ラジオ受信機の性能は、雑音（noise）と信号（signal）との比、いわゆる S/N （信号対雑音比）で表すようになってきた。

この S/N 向上を目標に、増幅器は技術的に大きく発展していった。まさに増幅器はエレクトロニクス発展の玉手箱となったのである。現在でも、そうだろう。

米国における初期のラジオ受信機

米国も日本もラジオ放送開始直後には、真空管の価格が高いこともあって、電池の必要のない単純な鉱石ラジオ受信機が一般的だった。この鉱石ラジオ受信機は同調回路と鉱石検波回路（本誌 1996 年 4 月 8 日号，no.659，p.165 参照）とレシーバより成り立っている。一見して、このラジオ受信機は理想的だ。なにしろ電池が不要で、保守など考える必要がないからだ。

このなかで G. M. マルコーニは、

ラジオの初まり、日本の場合

日本の正式なラジオ放送が 1925 年に開始する数年前から、試験用ラジオ放送が始まっていた。このなかで逓信省はラジオ受信機の型式証明を義務づけている。

ここで重要なのが、ラジオ受信機からの電波再放射を厳しく規制していることである。このとき日本政府は、電磁波障害に対し先見性のある処置を取ったのだ。つまりラジオ受信機から電波の飛び出す可能性がある再生検波を禁止してしまった。だが製造者は、再生検波が使用できないとラジオ受信機の感度が上らないため、この処置は大変に不満だった。

このころ、二つのラジオ受信機開発が進められている。一つが鉱石式で、安中電機製作所（石杉社と 1931 年に合併。現在のアンリツ）の凹型や、日本無線の M 型型式番号 15 号、早川電機（現在のシ

ャープ）の製品などが 1925 年から売り出されている。

もう一つが真空管式だった。1925 年に東京電気（現在の東芝）は、3 極真空管サイモトロン UV-199 を 2 本用いたサイモフォン A-2 型型式番号 9-2 号ラジオ受信機を発売した。そのころの東京電気は、GE 社と技術提携し、真空管を生産していた。このため真空管の商標を GE 社と同じマツダ・ランプ（光の神）と呼び、東京電気の真空管は有名ブランド品となっていた。

1945 年、日本が第二次世界大戦の終戦を迎えた年、真空管が極端に不足したため、マツダ真空管の劣悪なニセ物が多量に市場へ出回っている。これを「神マツ（神田マツダの略）」と呼んだ。神田マツダという名称は、東京・神田の露天商（秋葉原電気街の前身）で売ら

れていたからだ。

ところでこのラジオ受信機は同調回路と再生検波の組み合わせではなく、グリッド検波回路とトランス結合による低周波回路より成り立っていた。当然、再生回路がないので感度が良くなかった。しかし政府の規制のため、どうにもならなかった。

だが、このラジオ受信機が発売される 1 年前から型式証明の代わりに所轄逓信局長の許可のみでもよいということになり、次第に型式証明は有名無実となった。暗黙のうちに日本でも再生検波回路が採用されるようになっていったらしい。

その結果、再生電波がアンテナから放射され、ビービーと悩まされるようになった。これに代わる高感度なスーパーヘテロダインは高価で庶民には手が出なかった。

送受信アンテナと同調回路の基本特許を取得すると同時に、耳にレシーバを掛けて聞くことを考案している。いまや世界の若者は、家庭にいるときも歩いているときも音楽を聞くことができる「ヘッドホン・ステレオ」をレシーバで聞くのが普通だ。だからといって G. M. マルコーニを思い出す人はいないだろう。

さて、このラジオ受信機は鉱石検波の性質から受信状態が不安定で、かつ放送局から離れるほど音量が小さくなってしまふ。なにしろこのラジオを駆動させるエネルギーは電波そのものであり、仕方のないことだった。

このような状況下で、庶民は主として鉱石ラジオでラジオ放送を楽しんでいた。米国ではラジオ放送が始まった 1920 年ころ、主にアマチュアが鉱石ラジオ受信機のみならず、真空管を利用した高性能ラジオ受信機を自分で組み立てていた。ラジオは、自分で作って楽しむものだという風潮があったようだ (p.163 の「ラジオの始まり、日本の場合」参照)。

当時、米国では、ラジオ・メーカーは高級なラジオ受信機を販売していたが、米グレーベ社が初めて庶民を対象に、安い価格で、CR-8 というラジオ受信機を 1921 年に売り出している。フォード社が安価な自動車を実現して、市場を広げたのと同じである。

このラジオ受信機は大変にユニークな回路構成となっていた。当時、同調用のバリコンと増幅用の真空管の価格が非常に高かったため、同調回路には、コイルとコイルの回転を利用してインダクタンスを変化させ

る方式を採用している。コイルを結合しやすい球形にし、かつバリコンは用いず、コイル間の浮遊容量を利用したのである。

検波と増幅は UV-201 という真空管を 1 本用い、グリッド検波すると同時に真空管出力のプレートからグリッドに、浮遊容量によってフィードバックする再生検波が用いられていた。米国ではこの再生方式をごく普通に採用していたのである。

1926 年になるとスーパーヘテロダイン方式による GE (ゼネラル・エレクトリック) 社製のラジオラ 24 が RCA 社から発売されている。この方式は E. H. アームストロングが考案した。

なぜ GE 社製を RCA 社が売ったのか、と疑問に思うが、当時、特許の関係で設立された RCA 社は GE 社とウエスチングハウス社の製品を販売していたのである。

スーパーヘテロダイン方式に対抗して 1923 年ころには日本の安藤博、米国の L. A. ハゼルチンがニュートロダイン方式を考案している。音質が良いため注目されたという。

発展のかなめとなった増幅器物語

エレクトロニクス発展のかなめはなんといっても増幅器だ。とはいえ、初めから性能の良い理想的な増幅器が存在していたわけではない。今日の増幅器は、歴代にわたる無名の技術者一人ひとりがコツコツと築き上げていったものである。新技術の創出には天才も必要だが、このような地道な技術者が築いてきた技術によって進歩するものなのである。

初期の真空管によるラジオ受信機

は、検波回路までは鉱石方式とほぼ同じで、このあとレシーバやスピーカを鳴らすため、まず低周波回路への増幅器の導入が始まった。この低周波回路での増幅器の目的は検波後の低周波、つまり音声周波数を波形が歪まないように電圧利得を得ることである。

3 極真空管が実用化されたころ、低周波増幅器間の結合はトランス結合で、1930 年代まで用いられていた (図 10)。このトランス結合の特徴は大きな利得が得られやすいことである。ここで利得とは入力に加えられる電圧 E_1 と、3 極真空管のトランス端に生じる電圧 E_2 との比である。さらにトランスの 1 次側と 2 次側が直流的に分離されており、使用上便利だった。

問題点の解決が技術発展の源

初期の真空管によるラジオ受信機は、実際に使ってみると、問題点が多く発生している。まず電源の問題である。そのころの真空管は直流型のため、フィラメントは直流電源にしなければならない。さらにグリッド・バイアス用とプレート用の高压直流電源を別々に必要とする。つまり三つの電源を用意しなければならなかった。

次が増幅器の特性の問題である。大きい利得を得るために 1 次側のコイルのインダクタンスを大きくすると、寄生容量や漏洩磁束によって音声周波数が非常に劣化するのである。

現在、低周波増幅器では少なくとも 20 Hz~20 kHz の周波数帯域が必要といわれているが、このトランス結合では、たかだが 200 Hz~3

kHz どもりだった。通常のアナログ電話機の 30 Hz~3.2 kHz よりも帯域幅が狭い。加えて、トランスの形状が大きく重いのである。とはいえ真空管方式は、トランス結合といえども鉱石方式と比較して、音量が大きいという格段の進歩があった。レシーバに代えて、スピーカで聞くことができたのである。

このスピーカのアイデアは 1877 年、米国の C. カットリスが考えていたが、本格的なのはマグナボックス社が 1921 年に開発したホーン・スピーカだ。これは振動板と聴診器を組み合わせている。1925 年にはウェスタン・エレクトリック社の C. ライスと E. ケログが可動線輪型スピーカを開発している。技術者は電源や音質の問題を解決するために猛烈な開発を始めている。

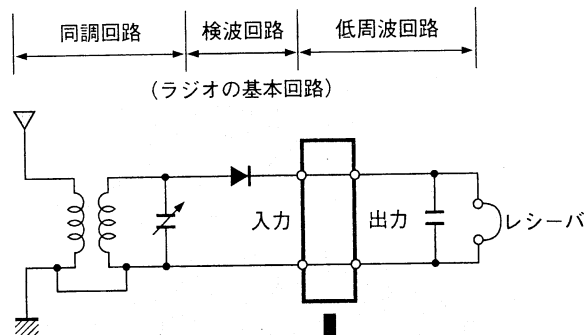
一つが真空管の改良であり、一つが新しい電子部品の考案だった。真空管はやがて傍熱型となり、フィラメントは交流電源となり、増幅性能を示す g_m (相互コンダクタンス) は高まった。トランス結合は新しく登場してきた抵抗器とコンデンサの組み合わせによる抵抗器結合へと 1930 年ころから代わり始めている。

抵抗器結合は、あまり高い利得が得られない代わり、周波数特性がきわめてフラットになり、音質が良くなる。これを高い利得の真空管で解決を図った。抵抗器結合では電源は二つとなり、非常に便利となったうえ、特性が優れかつ軽いという特徴があった。しかし、技術者はこれで満足していなかったのである。

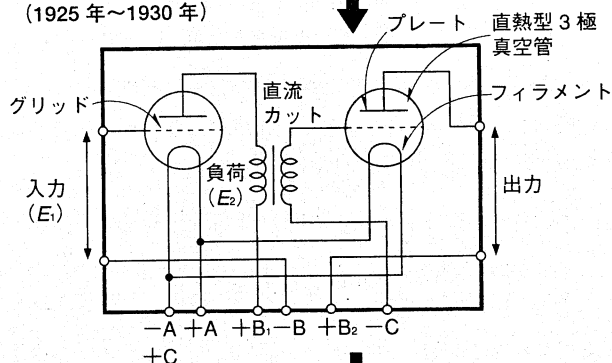
次の目標はさらに周波数特性を良くすること、つまり音質の良い増幅

図 10 エレクトロニクス発展の基礎を築いた増幅器の変遷
増幅器は、入力振幅に応じて出力振幅を大きくする回路である。真空管からトランジスタへという変化だけではなく、トランス結合から抵抗器結合へという流れもあった。

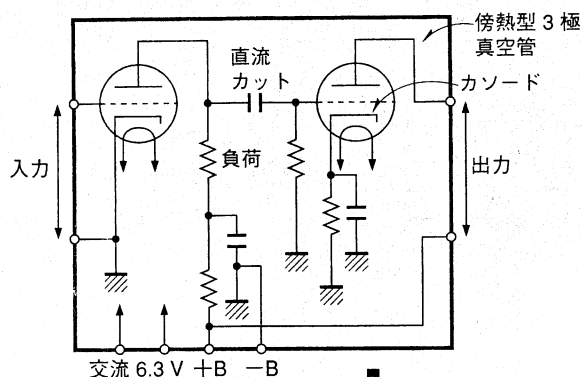
(a) 増幅器なし
(1923 年ころ)



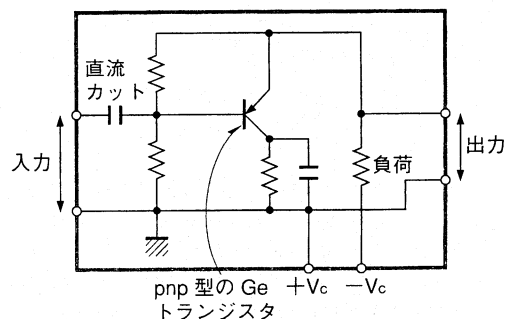
(b) 真空管によるトランス結合
(1925 年~1930 年)



(c) 真空管による抵抗器結合
(1930 年~1955 年)



(d) トランジスタによる抵抗器結合 (1 段)
(1955 年以後)



器と、低消費電力で動作する増幅器を開発することである。音質ではフィルタ回路やトーン・コントロール回路などの開発みならず、スピーカの改良が進み、飛躍的に発展していった。

だが増幅器について真空管技術者は真空管を固体化したいという発想をもたなかったようである。

これに対し固体化は思わぬところから始まった。電話交換機のクレーム対策からトランジスタが誕生したのである。この固体増幅(能動)素子の登場により、低周波増幅器は大きな変革を遂げるようになった。初めのころ真空管技術者は、これを無視したが、やがて大きな技術変革点が発生したのである。

1955年ころになるとGe(ゲルマニウム)トランジスタが登場し、真空管ではなくGeトランジスタと抵抗器の結合へと変遷していった。Geトランジスタでは、電源はつい一つとなり、かつSi(シリコン)トランジスタの登場によって消費電力はグッと小さくなったのである。

1990年代になると、さらに低消費電力化、低電圧化に向けてMOSトランジスタによるIC(集積回路)開発が進められ、いまや驚異的な低電圧・低消費電力による低周波増幅器が実現しているのである。

広帯域化と高周波化で困難に直面

増幅器は初め、ラジオ受信機の低周波回路の用途に向けて発達していたが、その後、開発はいくつかの方向へと進んでいった。一つが広帯域増幅器や高周波増幅器であり、一つが電力増幅器である。いずれも、真空管や電子部品そのものの特性改善のみでなく、増幅器そのものについても実に多くの提案があった。

まず広帯域増幅器についてである。このなかで印象的なのが、テレビ開発に携わった高柳健次郎だろう。1930年によく受像用ブラウン管が完成し、これを用いてテレビ受像機を試作しようとした。当然そこには増幅器が必要となる。

だが、テレビ受像機は、音声信号よりもはるかに周波数帯域の広い映

像信号を扱う。ラジオ受信機用に開発された低周波回路用の増幅器は使えない。このとき目標とした周波数帯域は、ただだか150kHz(現在のNTSC方式テレビ信号の帯域幅は4MHz)程度だったが、当時このように広帯域な増幅器は存在していなかった。

仕方なく、すでに当時実用化されている抵抗器結合による増幅器を用いて試作しようとした。だがうまくいかない。半年かけてようやくその原因がおぼろげながら見えてきた。初めの実験では、増幅器の利得を高くするため、真空管の負荷抵抗器は高い抵抗値にしていた。なにも知らないときは、これがベストだとだれしも考えるだろう。

しかし高抵抗になるほど浮遊容量が大きくなるのである(図11)。抵抗器は純抵抗のみと信じていたのに浮遊容量があるとは驚きだ。ここで初めて電子部品にはすべて周波数特性があることが判明し、等価回路によって表現しなければならないことが明らかになったのである。つまり、この抵抗器が高周波特性を劣化させていたのだ。しからずんば、どうすべきか。

原因が明確になれば解決の糸口はつかみやすい。やがて解決策として、まず広帯域・高周波の増幅器では、浮遊容量の影響を極力小さくするために、負荷の抵抗値を下げる。これだけでは当然、利得は下がる。そこで、真空管を多段にして、利得を稼げばよいという素晴らしいアイデアを思いついたという。

その後、抵抗器結合だけでは広帯域化は困難なので、コイルを挿入し

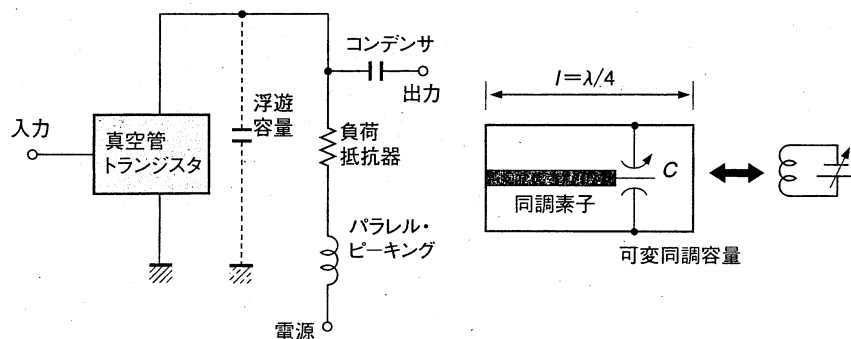


図11 テレビ用に開発した広帯域増幅器 高柳健次郎はテレビの広帯域増幅器の開発に悩んだ(左図)。利得を高くしようとして、高抵抗値の負荷抵抗にすると、周波数特性が劣化した。劣化の原因は、浮遊容量だった。現在は、UHF帯(3GHz~30GHz)以上の周波数では集中定数回路ではなく、右図のように分布定数回路で設計する。

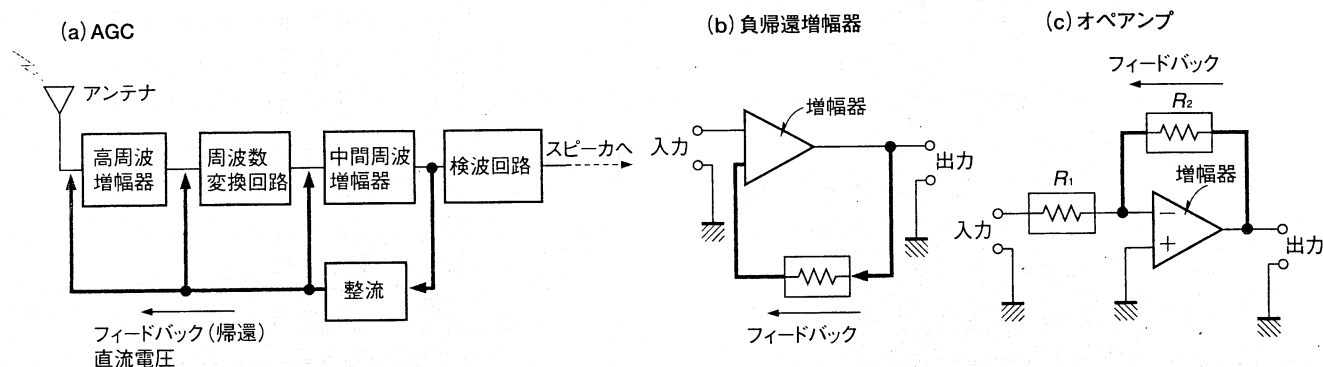


図 12 帰還回路の誕生 中間周波数増幅器から出力を抽出し、前段にフィードバックし音量を自動的に調節する AGC (automatic gain control) ループを構成した(a)。この構成は H. A. ホイーラが考案した。(b)は H. S. ブラックの考案。増幅器にフィードバックをかけると増幅器が安定に動作する。(c)はオペアンプ(演算増幅器)である。利得を A とすると、 $A = -R_2/R_1$ となる。内部増幅器の利得とは無関係に利得を決められる。G. A. フィルブリックが提案した。

て並列共振または直列共振を行なうようになっていった。こうして広帯域増幅器は、ようやく目的の特性を示すようになり、現在、テレビの映像信号処理回路などで用いられている。

いまでは広帯域の増幅器設計は、当時に比べて格段に進歩している。ほとんどが実験ではなく、CAD (computer aided design) によるシミュレーション(模擬実験)で最適化できる時代となってしまった。だがシミュレーションでは、結果は簡単に得られるが、新しいアイデアはそこから見いだせないのではないだろうか。ハードによる実験が必要なはずだ。現在の技術者は、先輩たちの苦闘の姿を思い浮かべ、シミュレーションに頼りすぎることをないようにすべきだ。

高周波にチャレンジ

次に高周波増幅器について述べてみよう。

AM(振幅変調)ラジオ放送がスタートしたころ、高周波増幅できる真空管はまだ開発されていなかった。

これを解決するために奇想天外のスーパーヘテロダイン方式を E. H. アームストロングが考案し、問題の解決をねらったのである(本誌 1996 年 4 月 8 日号, no.659, p.175 参照)。

やがて真空管の高周波化が進むとともに、高周波増幅器も歩調を合わせて、開発が進められていった。高周波増幅器の応用には、レーダや、無線機、FM(周波数変調)ラジオ、テレビ受像機などがある。開発では、高周波真空管や高周波電子部品の開発、プリント基板の高周波対応、高周波増幅回路設計が重要だった。

一般に、高い周波数を受信する場合、まずアンテナから希望電波のみ取り出し、その他の電波はすべて減衰させる必要がある。このために考えだされたのが、共振による同調回路で、G. M. マルコーニとオリバー・ロッジによって発明された。

同調回路、つまり周波数選別フィルタという素晴らしい発想が、ラジオ受信機やテレビ受像機のみならず、携帯電話なども含めてあらゆる無線機器の発展を支えたといってもよい

だろう。

UHF 帯など極端に高い周波数では個別電子部品による集中定数型は困難で、図 11 のような分布定数型の同調回路が用いられている。

UHF 帯で用いる分布増幅器を考案したのは、E. L. ギンズトンで、1948 年ころのことだった。この同調回路を通った信号が高周波増幅器に入力されるのである。

さて、高周波増幅器の鍵を握るのが高周波増幅素子である。増幅素子の問題点は、高周波化するほど、電力消費が増大する点である。低消費電力で高周波化したい。このための真空管開発が始まった。

そして増幅用にエーコン管やクライストロン、電力用にマグネトロンなどが開発された。とはいえ、これ以上の特性を得るためには、真空管とは異なる構造の素子が必要となってきた。ところで、レーダ用に開発されたマグネトロンは電子レンジ用として思わぬところで活躍している。

このブレイクスルーとして、1965 年ころから Si トランジスタが、さ

らに1980年ころから化合物半導体が次々と開発され、高周波で、かつ低消費電力で動作する電子回路が実用化したため、小型の電子機器がどんどん開発されたのである。こういった新しい高周波技術は、いまでは800 MHz帯または1.5 GHz帯の携帯電話に使われている。当然、電池駆動で長時間動作が可能となった。

負帰還という素晴らしい発想

米国で1920年にラジオ放送が開始されたころ、真空管式ラジオ受信機は人々にとって購入したいあこがれの商品だった。

だが、せっかく手に入れても、混信が激しく、音量がいつのまにか変化してしまうのだ。なんとか改善できないものだろうか。混信はラジオ放送局の乱立とラジオ放送の周波数安定度の問題であり、音量変化はフェージング（電波干渉などによって受信電力が変動する）や温度上昇による利得の変動などによるものだった。ここからフィルタや負帰還（フィードバック）といった概念が考えだされるようになった。

ここでは負帰還について述べてみることにしよう。

1926年、米国の代表的なラジオ受信機メーカーの一つだったハゼハチン社で働いていたH. A. ホイーラは、ラジオ(AM)受信機の音量をなんとか安定化できないかと知恵を絞っていた。このとき彼は、電子回路全体に負帰還をかけて安定化することを、ふと考えついたという。人間は食事をするとき、お腹が満腹になり始めると脳が食べるスピードを制限し、お腹が空くと脳が食べたいという意

欲を駆り立てる。ここでは脳が口に対して負帰還をかけたのである。ここからヒントを得たという。

あるアイデアが生まれると、その欠点は、だれでもがすぐに気がつき文句を言う。だが、文句を言うのではなく、この欠点を克服し、自然界で起こっている現象を巧みに応用しながら解決するのが天才なのかもしれない。

そこで彼はスーパーヘテロダイン方式ラジオ受信機の高周波増幅器、同調回路、中間周波増幅器の全体に負帰還をかけてみることにした（図12）。最終段の中間周波電圧を取り出して整流した直流電圧を初段の高周波増幅器の真空管グリッドに加えられるようにした。もし出力振幅が大きければ利得が小さくなるし、検波後の振幅が小さいときは自動的に利得が大きくなることを期待した。

その結果、音量変化の原因となる高周波RF (radio frequency) 信号の変動に対して音量は著しく改善され、ほぼ一定となった。この素晴らしいアイデアは自動音量(利得)調整AGC (automatic gain control) と呼ばれ、いまでも使われている。これはシステムとして負帰還を実現したわけだ。

さて負帰還にはもう一つの方法がある。増幅器それ自身に負帰還をかけるという方法である。

増幅器自身に負帰還をかける

実はラジオ放送開始と同じ1920年ころ、米国や日本では電話で大きな問題に遭遇していた。需要増大の一途をたどっていた長距離通話に、どのように対応するかだったのである。やがて中継器や多重搬送電話装置などが次々と提案された。

これらの装置にも増幅器が、当然、用いられることとなった。だが、この増幅器の利得が、もし変動すると、音が歪んだり他の電話の声が漏洩してくるのである。なんとしても安定化させねばならない。

中継器開発を担当していたベル研のH. S. ブラックは、真空管の安定度のみ追求していたのでは不可能であると判断し、ついに1927年増幅器そのものに負帰還をかけるという方法を考案した。

この方法は出力の一部を逆位相で入力に戻すという方法である。これによって増幅器は安定し、かつ非線形が線形とみなせるようになるのではないかと予測した。

実験の結果、増幅器の歪みは広い周波数帯域にわたって減少し、利得が安定したのだ。この発明は基本的な電子回路の一つとなった。

負帰還について、H. A. ホイーラはシステムの制御として考え、H. S. ブラックは増幅器として考えたのである。

オペアンプなど 基本回路が続々誕生

1938年になるとG. A. フィルブリックが増幅器をベースにした新しい回路構成を編み出した。これは演

算増幅器（オペアンプ）^(#2)と呼ばれるもので、まず入力と出力の間に位相が反転する増幅器を用意する。次

に、この回路の外部に出力から入力に抵抗器を接続して負帰還をかけ、入力に直列接続した抵抗器との抵抗値の比のみで回路の利得(伝達関数)が決まるようにした。これは大きな発明となり、その後のエレクトロニクス発展に大きく寄与することになった(下掲の「正帰還もある」参照)。

オペアンプの大きな特徴は、利得が非常に安定していることであり、これによってアナログの加算や減算が初めて可能となった。この特徴を利用し、オペアンプは米国で1950年代のアナログ・コンピュータに用いられていた。

増幅素子には当初、真空管を使っていたが、その後トランジスタへと代わった。さらに1965年になると米フェアチャイルド・セミコンダクタ社がICによるオペアンプ「 μ A702」と「 μ A709」を発売し、あらゆる電子装置に用いられるようになっていった。

不要周波数を除去するフィルタ出現

電子回路設計者にとってフィルタ(濾波器)はきわめて重要な電子回路である。いつころから誕生したのだろうか。

フィルタとは、汚泥状態の水からきれいな水を取り出す働きをするのと同じで、雑音や広い周波数に分布した信号から必要とする周波数の信号のみを取り出す働きをする回路である。実はラジオ受信機などで用いられるアナログのフィルタという概念は、自動車の雑音対策と、ラジオ

注2) 現在は「オペアンプ」と呼ぶのが一般的だが、OPアンプと表記することもある。英語は operational amplifier。

放送局の乱立に関係があるのだ。

すでに米国では、自動車は1920年4月1日からヘンリー・フォードによって「T型フォード」の大量生産が始まっていた。ラジオ放送が開始された1920年には、自動車は1家に1台の時代となっており、早くも交通渋滞が発生していたというから驚きだ。この時代、人々は競って文明の利器である二つの商品、つまり自動車とラジオ受信機を買い求めている。

一般の給与所得者の年間収入が1750米ドルだった1924年、自動車は290米ドル、ラジオ受信機は125米ドルしたというから、ラジオ受信機は非常に高価だったのである。

だが、せっかく購入したラジオ受信機が自動車のイグニッション(高圧の火花放電)や他のラジオ放送電

波を雑音として受信してしまうのである。当然これはクレームとなってラジオ受信機メーカーを悩ませた。とはいえ、簡単に対応できるものではなかった。

まず自動車雑音についてはどう対応したのだろうか。ラジオ放送が普及し始めて20年近くの年月が経過した1936年、J.J.ラムはイグニッション雑音除去回路を考案した。この回路を内蔵したラジオ受信機はイグニッションによるスパイク雑音を受信したときのみ雑音処理回路を通すようにし、受信しないときは通さないようにしたのである。これをノイズ・レクチファイヤという。ここには検波回路で用いられる真空管と同じ2極真空管が用いられていた。

従来の雑音防止回路はスパイク雑音のピーク値を制限する方法だった

正帰還もある

負帰還とは逆の考え方、つまり正帰還(フィードフォワード)という概念はあるのだろうか。

正帰還の応用として、すでに1912年、E.H.アームストロングはコイルの正帰還と同調回路の共振周波数とを組み合わせる任意の周波数を連続的に発生させる回路を、さらに類似の回路をR.フェッセンデンやド・フォレストも考えている。

R.ハートレーは真空管のプレートからグリッドへ正帰還をかけるハートレー回路を発明している。そして、発振回路に関

する特許を巡って激しい戦いがあった。

1913年になると、ウェスタン・エレクトリック社のR.ハイジングが、真空管のプレートにコイルを挿入して定電流化しながら、グリッドに音声信号を加えて発振周波数の変調を行なう変調回路を1913年に発明し、これによって1920年からの本格的なラジオ放送が可能になったのだ。

R.A.フェッセンデンの高周波発電機による変調と比較して格段の進歩があった。

ので、新しい方法の導入により非常に効果があつた。これも一種のフィルタの始まりだったといえよう。

次に他のラジオ放送の混信に対する対応である。当時、米国ではラジオ放送の乱立による電波干渉は深刻な問題だった。1934年から通信法によって統制が強化されたり、雑音

に弱いAMに対抗して、雑音に強いFMラジオが登場している。このなかでスーパーヘテロダイン方式によるラジオ受信機は圧倒的強みを発揮した。スーパーヘテロダイン方式はIF(中間周波)段に、IF信号のみ通過させ、不要な信号を取り除くIFトランスというフィルタを挿入

することによって選択性をきわめて高くすることができた。

IFトランスの特徴は、同調回路と異なって単一周波数のみでよいため、設計が容易なことである。これにはコンデンサによるC同調型とコイルによるμ同調型があつたが、小型化に向けて後者が主流になって

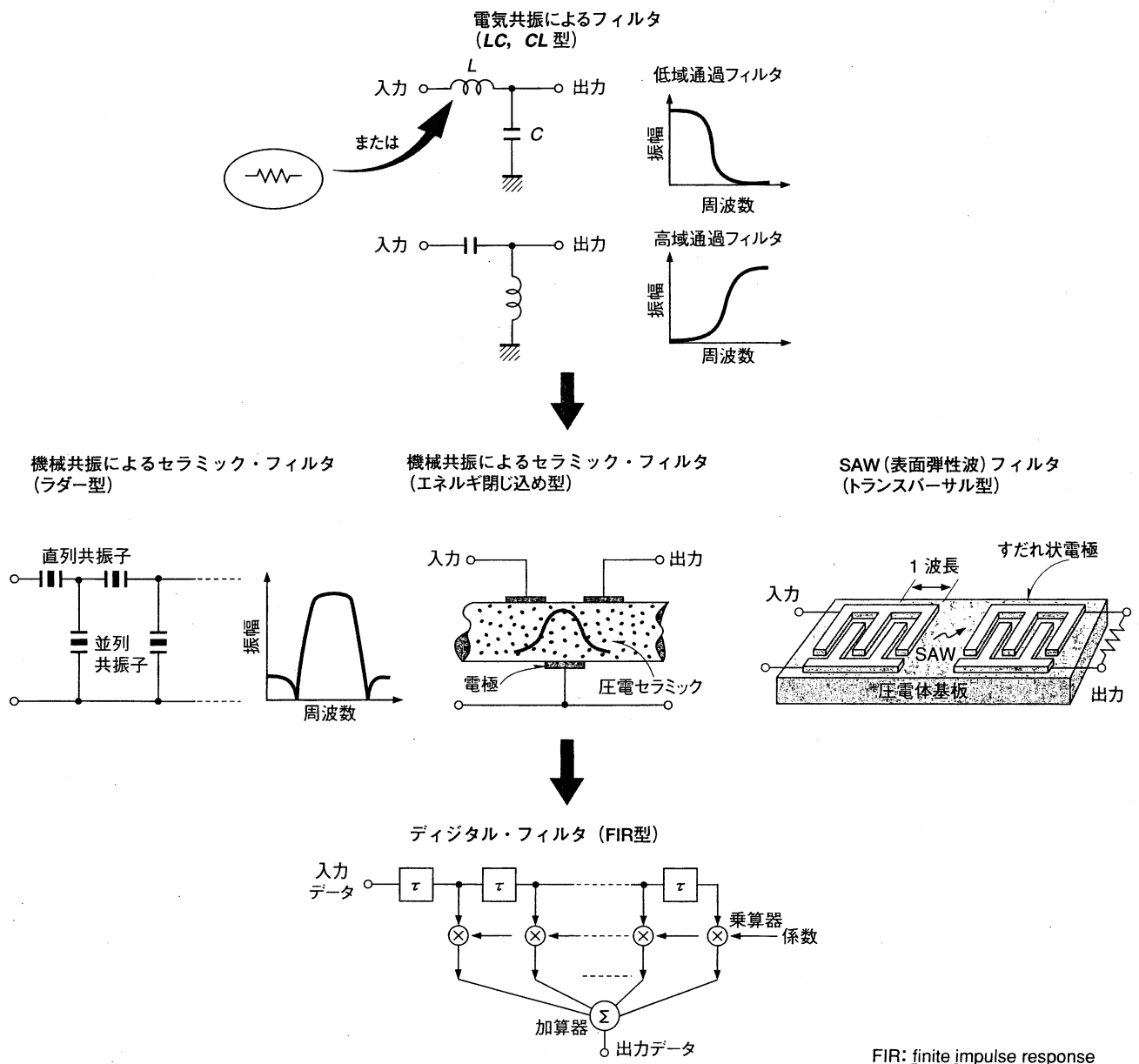


図 13 フィルタの進化 電気共振から機械共振へ。現在は、デジタル・フィルタ IC にどんどん置き換わっている。

いった。ここでフェライトによるダスト・コアが用いられている。

日本の家庭事情は米国とは違う

さて1945年ころの日本では、自動車は高根の花であり、イグニッション雑音が問題になるほどではなかった。ところが思わぬところで雑音に悩まされたのである。

1948年ころまで並4球再生方式ラジオ受信機が一般的だった(本誌1996年4月8日号, no.659, p.181参照)。ところが、これから発生するピーピーという妨害電波が隣近所のラジオ受信機のみならず、進駐軍の通信隊を悩ませたため、1948年より「今後のラジオ受信機はすべてスーパーヘテロダイン方式のみ認める」という指令がGHQ(連合軍最高司令部)からでたのだ。

当時、IFトランス用ダストコアを製造していたのは東京電気化学工業(現TDK)のみで、同社に注文が殺到している。ダスト・コアにはフェライトが用いられていた。

フェライトは、日本が世界に先駆けて発明した重要な電子材料の一つである。Zn(亜鉛)鉱からZnを得る実験のなかから見いだされた。このとき生じた ZnFe_2O_4 と Fe_3O_4 を焼結固溶させると、大きな保持力が表れることを加藤与五郎と武井武が1930年に発見している。初めてフェライト磁石が実用化したのだ。

フェライトは透磁率が高く、ヒステリシス損失が少ないという特徴があった。さらに CuFe_2O_4 などの亜鉄酸塩は高周波特性が優れていた。実は、 MgFe_2O_4 という構造の化合物が存在するということは1928年

にフランスのH. フォレストニアによって確認され、これをフェライトと呼んでいた。

1936年、この新しい焼結固溶体をオキサイド・コアまたはダスト・コアと呼び、これを生産する東京電気化学工業が設立されたのである。初めから磁石を作る目的で、この新しい焼結固溶体を開発したわけではない。実験中に、磁気分離できない物質が含まれていることがわかり、その物質を確認しているうちに発見されたのである。

こうして生まれたフェライトのIFトランスもやがてセラミック・フィルタへと置き換えられていった。

電信・電話でも問題が発生

ラジオ放送とは異なるが、電信・電話分野でも、周波数分離に関する問題点がクローズ・アップしつつあった。

そのころの電信は、1対の電信線で一つの電信しか送れない方式だった。あまりに効率が良くないので、なんとか有効に利用する方法はないだろうかということになった。やがて1対の電信線で多数の電信を送ることのできる多重電信が考えだされた。だが、この素晴らしい発想は、周波数を分別する方法が解決されず、実用化されずにいた。

1915年、ドイツのK. ワグナと米国のG. キャンベルは、それぞれこの目的に適するフィルタを発明している。このフィルタはコイル(L)とコンデンサ(C)によって構成された低域通過フィルタだった(図13)。これを用いてようやく1918年に多重電信が完成したのである。

やがてO. ゴッセルが定K型や誘導m型の低域通過フィルタを、さらに帯域通過フィルタも開発された。そのころからフィルタに関する理論面での解析がカーソンやダーリントンによって進められ、電子回路的には振幅の周波数特性を平坦にしたバタワース特性、振幅がリップルをもつチェビシェフ特性などが登場してきた。このチェビシェフは19世紀のロシアが生んだ有名な数学者の名前である。

さて低域通過フィルタはLC受動フィルタとも呼ばれるが、形状が大きく、減衰も大きいという欠点をもっていた。

やがてトランジスタが普及するにつれ、フィルタも大きく姿を変え始めた。そのスタートとなったのが、オペアンプと、抵抗器(R)、コンデンサ(C)を組み合わせたRC能動フィルタ(アクティブ・フィルタ)である。従来のフィルタと異なり、この新しいフィルタは小型で、振幅を増幅できるという特徴をもっていた。

1960年代になると、フィルタは、より新しい方向へと歩み始めている。その一つが、振動を利用した機械共振型フィルタであり、もう一つがいままでのアナログ・フィルタとは異なるデジタル・フィルタだった。

電気共振から機械共振へ

1922年、W. キャディは、水晶を使ったまったく新しい発想に基づくフィルタを提案した。これは従来のLCなど電氣的な共振回路によるものではなく、圧電物質を利用した機械共振を利用したものである。

その動作原理は次のようなる。幅広い周波数成分を含む電気信号をいったん機械的な振動信号に置き換える。この振動信号を圧電特性をもった物質に印加すると、その形状によって決定される弾性固有周波数 f_0 と同じ周波数成分があれば、周波数 f_0 で強く振動するという共振現象を起こす。そのほかの周波数はすべて減衰してしまう。

この振動には、屈曲振動や、厚みすべり振動など種々のモードがある。そこでこの共振した f_0 という周波数のみを取り出し、再び電気信号に

置き換えるのである。この機械共振によるフィルタは狭帯域化、安定性化、無調整化、小型化が可能という特徴がある。これは一種の共振子である。

1934年になると W. マーソンは、この共振子を複数個並べると、さらに狭帯域化が可能になることを示唆した。この考えに基づき、1960年、1枚の水晶基板に電極を近接して配置するモノリシック水晶フィルタ(MCF: monolithic crystal filter)が開発され、通信用に使われた。優れた特性が得られている。だが非常

に高価で、一般に用いることは不可能だった。

機器開発に伴ってフィルタ開発も

真空管式スーパーラジオ受信機の需要が急増しつつあったころ、IF (455 kHz) トランスはダスト・コアのタイプが中心だった。

これに対し村田製作所は、低コストのメカニカル・フィルタの開発を1956年からスタートしている。その動作原理は、素材として代表的な水晶の代わりに、金属棒の固有振動による共振現象を利用し、この金属

セラミック・フィルタの特許問題

米国電気試験所の B. ヤッフエは、1955年に電気機械結合係数がチタン酸バリウム(チタバリ)の2倍以上という画期的な圧電材料であるチタン酸ジルコン酸鉛(PZT)を発表した。

やがてこの PZT を用いたセラミック・フィルタが村田製作所によって開発され、大成功する。だが、この PZT はすでに2年も前の1953年に東京工業大学の沢口悦郎が発見していた。ただ残念なことに彼は最も重要な圧電現象に気がつかなかったのだ。もちろん、圧電に関する特許は申請していない。

このことに気づいたのが B. ヤッフエで早々と、1955年に圧電に関する特許を取得している。これは一見して「してやられた」と考えられなくもないが、技術の世

界はクールなのだ。結果が出たときに、多くの可能性を追求しておくことが技術者にとって重要だという教訓である。

PZT の将来性に着目したクレバイト社は早速、米国電気試験所の B. ヤッフエを引き抜き、PZT 材料を量産化することにした。仕方なく日本では特許を回避するため、PZT とは異なった材料の模索を進めたが、ついに発見することができず、やむなくクレバイト社の特許を使用することになったのである。

だが、クレバイト社は契約を渋った。このため、なんと5年の年月を必要とし、かつ膨大なロイヤリティ(特許使用料)を払うことでようやく解決を図ったのである。もし沢口が、もうひと押しして圧電現象が発見されていたならば、

日本と米国の立場は逆転していたかもしれない。

新しい振動モードのセラミック

セラミック・フィルタ材料 PZT の特許問題に一応の目安がつくや否や、続いてセラミック・フィルタの発振に関する特許問題が発生している。

従来の方で FM ラジオの IF (中間周波) に用いる周波数 10.7 MHz のセラミック・フィルタを作るには、長さを 0.2 mm 以下で加工する技術を必要とする。だが、当時の技術では至難の業であり、一見、開発することは不可能と思われた。

しかし、村田製作所の藤島啓は従来の考え方とは異なるまったく別の新しい方法で解決できないものだろうかと考え、これにあえて

棒にチタン酸バリウム（チタバリ）圧電現象によって振動を与えようとした。だが所望の特性が得られず、開発を断念している。

そうこうしているうちに、1955年から東京通信工業（現ソニー）が、電池駆動の携帯型トランジスタ・ラジオを売り出し、大きなブームを巻き起こした。そして小型 IF フィルタの需要が急増している。これにこたえるため、村田製作所は、小型の IF セラミック・フィルタを開発することにした。

当初は、圧電材料としてのチタバ

リを用いたが、キュリー温度（比誘電率が急激に低下する温度）が低く、周波数の温度特性が良くないため、使えない。そこで PZT（チタン酸ジルコン酸鉛）に注目し、1962年に商品化に成功した。だが、従来からある μ 同調型 IF トランスよりコストが高いというほかに、振動漏れという技術的問題があった。

その後、AM ラジオ用に低コストの正方形板広がり振動を、さらに性能向上を目標に、PZT による 455 kHz ラダー・フィルタ（電極をはしご型に連結）を 1962 年に開発して

いる。次のフィルタ開発は、1963 年から始まった FM ラジオ用である。このフィルタの中心周波数は 10.7 MHz である。これを解決したのが、エネルギー閉じ込め振動という新しい原理だった。やがてこの原理を採用した 2 重モード・セラミック・フィルタが実現している。

このほか、1975 年から米国でブームとなった CB (citizen band) トランシーバ用、テレビ音声用 (4.5 MHz)、NTT (日本電信電話) のポケベル用などに幅広く使われるようになった。

挑戦した。

ここで彼が注目したのは、クレバイト社のカランによって、すでに 1961 年に発見されていた PZT の新しい振動方法だった。当時、なぜ振動するのか、その振動メカニズムは不明だった。原因究明のため、なんとトランジスタを発明した W. ショックレーが解析に当たったという。彼はベル研究所を退社したあと、1958 年にショックレー半導体研究所を設立し、ショックレー・トランジスタ研究所を経て、スタンフォード大学で教鞭をとるかたわら、クレバイト社の研究顧問をしていた。

だが、この原理解明の糸口を作ったのは日本である。1962 年には日本の東洋通信機にいる中沢祐三が水晶の閉じ込み振動を発見すると同時に、東京大学の尾上守夫がエネルギー閉じ込め振動理論を解析によって導きだした。やがて実

験によって、この理論の正しさを確認している。尾上によって、ついに従来と異なった振動による 2 重モード・フィルタが 1964 年に完成し、研究会で発表した。しかし残念なことに、ここでもこのフィルタの特許は申請しなかった。

一方、米国のベル研究所では、PZT ではなく水晶について同様なエネルギー閉じ込めフィルタを開発し、多くの特許を取得していた。やがてベル研究所はこれを武器に、日本が特許を侵害していると訴訟してきたが、尾上の研究会発表資料が立派な証拠として役立ち、勝つことができたのである。

1967 年、藤島は尾上理論をベースに 10.7 MHz の 2 重モード・セラミック・フィルタを商品化した。このとき彼は、選択度を上げるためにコンデンサを内蔵するという素晴らしいアイデアを思いつき、早速、日本で特許を取得している。

だが、外国へは申請していなかった。

この技術を知ったクレバイト社は、米国と欧州で特許を申請した。

この結果、村田製作所は輸出する製品について、特許料をクレバイト社に払わざるを得なかったという。だが技術力をもつ村田製作所は、次々に新製品を開発し、やがて世界のラジオ受信機、テレビ受像機、携帯電話などのフィルタで圧倒的な強さで市場を拡大していった。この開発を進めてきた藤島啓は、1983 年、科学技術庁長官から表彰されている。

この話を振り返ると、フィルタ分野で日本は実に素晴らしい技術開発をしたことがわかる。世界をリードしたのである。だが、特許問題で悩んだ姿が浮かび上がってくる。特許問題がきわめて重要であることを、あらためて印象づける技術開発だったといえよう。

このセラミック・フィルタは非常に選択性に優れているため、日本では1979年、米国では1977年(商用試験)から始まった自動車電話や携

帯電話でも採用されている。先端機器に不可欠で重要な電子部品の一つであるセラミック・フィルタが完成するまでに、なんと数十年の歳月を要したのだ(pp.172-173の「セラミック・フィルタの特許問題」参照)。

だが、これで新しいフィルタへの挑戦が終わったわけではなかった。その開発方向がテレビ受像機の映像信号用IFフィルタに向けられた。

テレビの映像信号用フィルタに挑戦

ここでも難問に突き当たった。いったいどのような振動モードを利用したらよいのだろうか。試行錯誤の末、1940年にカルマンが発見したトランスバーサル・フィルタの原理をベースに、さらに1985年にホワイトが発見した圧電体の表面にすだれ状電極を構成したときに生じる表面波の原理を採用することになった。これをSAW(表面弾性波)フィルタという。

日本では塩川祥子が1987年ころ研究していた。圧電材料には、 LiNbO_3 や LiTaO_3 、さらに水晶などが用いられている。このSAWフィルタは、優れた特性をっており、テレビ受像機の映像用IFフィルタ(54.25 MHz~58.75 MHz)に採用され、テレビ受像機の画質は著しく改善されたのである。

このトランスバーサル・フィルタ

はアナログ信号処理だが、これをデジタル化したのがデジタル・フィルタである。

デジタル・フィルタは複雑な処理を必要とするが、ICの発展がこれを可能にしたのである。従来のフィルタはLCによる電気共振からセラミックによる機械共振へと代わってきたが、基本的にはアナログ信号処理だった。だがIC技術によって、またしても機械共振からデジタルによる論理演算フィルタへ代わろうとしているのだ。すべてのフィルタがデジタル・フィルタに置き換わるわけではないが、デジタル・フィルタはますます大きな市場を形成するだろう。

このほか、高周波向けにマイクロ波フィルタがある。マイクロ波フィルタには、100 μm 程度の高誘電体セラミックの上に金属膜を形成し、誘電体層を重ねて作る積層集中定数型LCフィルタと、金属で囲まれた空洞共振と同様に誘電体による空洞誘電体共振器フィルタがある。1970年ころから開発されている。

電子機器において、トランジスタやICのみが常に華やかに見えるが、これだけでは電子機器は成り立たない。一見地味だが、フィルタは重要な電子部品である。フィルタが電子機器の性能を決めている、といっても過言ではない。

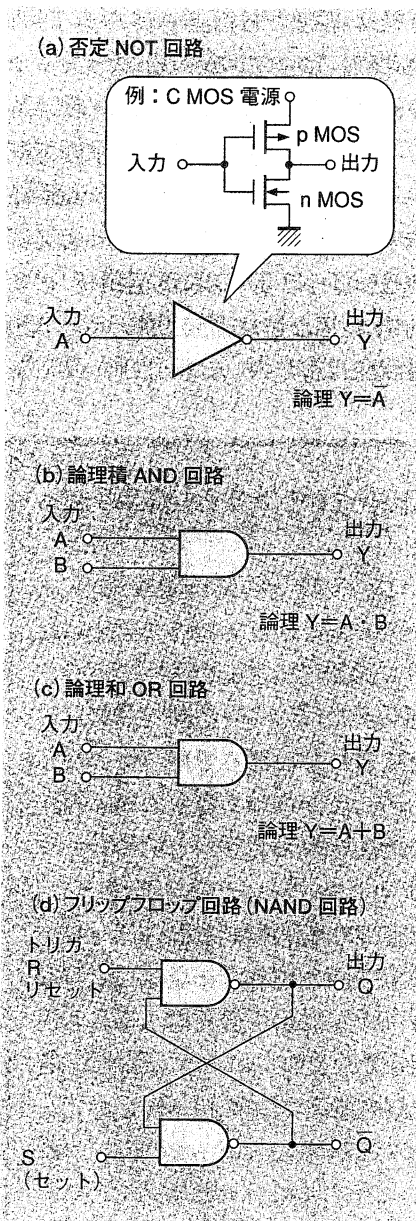


図 14 デジタル回路の基本回路

デジタル回路は真空管の時代に生まれ、トランジスタへと置き換わった。現在、高速化にはバイポーラ・トランジスタ、低消費電力化には MOS トランジスタが使われる。(a), (b), (c) の論理自体は、1847年に G. ブールが編み出した。順序論理に必要なフリップフロップ回路は1919年、W. エクルズと F. ジョーダンが発明した。

デジタルへの道 論理用基礎回路を開発へ

指で数を表すことを、人類は昔から自然に使っていた。いわゆる10進数だ。これを「指で示す」といい、

英語ではデジットという。

「無からあらゆるものを生み出すには1があれば十分である」とドイ

ツの G. W. ライブニッツは考え、たった二つの記号“0”と“1”の組み合わせであらゆる数を表す2進数を考えだしたのである。今日のコンピュータ社会を予測した先見性はさすがに歴史に残る大数学者だったといえる。デジタルの基本として、2進数は非常に重要な役割を果たすことになるが、そのころはまったく数学の遊びにすぎなかったのではないだろうか。

2進信号を巧みに組み合わせて表現する数学的な信号法を編み出したのは、英国の数学者である G. ブールで、1847年のことだった。ここから四則演算のベースとなる否定(NOT)や論理積(AND)、論理和(OR)というブール論理が確立されている。

このブール論理を具体的にデジタルによる OR 回路や AND 回路といった電子回路に応用していったのは、日本電気の中島章や榛沢正男が1937年に、米国では E. シャノンが1938年にそれぞれ行なっている(図14)。

これをのちにデジタルの論理回路と呼ぶようになったが、このデジタル回路を構成するためには、やはり増幅器が必要となる。アナログ回路では、入力信号を反転し、利得倍した振幅の出力信号が得られる。これを非飽和状態にあるという。デジタル回路では、出力信号と入力信号は同じ振幅で反転した出力が基本となるが、非反転の出力になることもある。これを増幅器が飽和状態にあるという。

飽和状態が続く限り原理的にはいくらでも出力を取り出せる。取り出

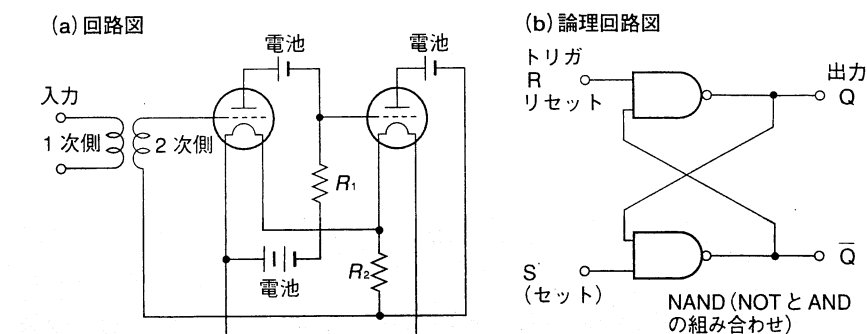


図15 フリップフロップ回路が誕生 順序論理に必要なフリップフロップ回路が発明された1919年は、真空管の時代だった。

せる最大の出力数をファン・アウトと呼ぶ。このほかに高速用デジタル回路では電流切り換えによる非飽和を用いる場合もある^{注3)}。いずれにせよデジタル回路でも増幅器は重要なのだ。最初のデジタル回路は真空管による増幅器を使って構成していた。

せっかく日本でもデジタル回路が考えだされていたのに、これらがいったい何に役立つのか当時でははっきりしていなかった。ましてコンピュータなどに応用しようという発想など、まったくなかったようだ。

だが、米国は違った。膨大な数の真空管と想像を絶する空間を必要とするにもかかわらず、あえて挑戦したのが、1946年に完成した米国のコンピュータ ENIAC^{エニアク}ではないだろうか。やがて続々とコンピュータ開

発が進められたのである。原理はわかっている、一見不可能と思われることにチャレンジする米国の発想と実行力は素晴らしい。

順序回路が必要

コンピュータ用電子回路（ハードウェア）を設計するには単なるブール論理を基本とした組み合わせ論理回路のみでは成り立たない。計算するには、入力として情報を読み込み、記憶し、計算し、その結果を出力することが基本である。このなかで記憶し計算するところに、新しく順序論理が必要となってくる。つまり両方が必要なのである。

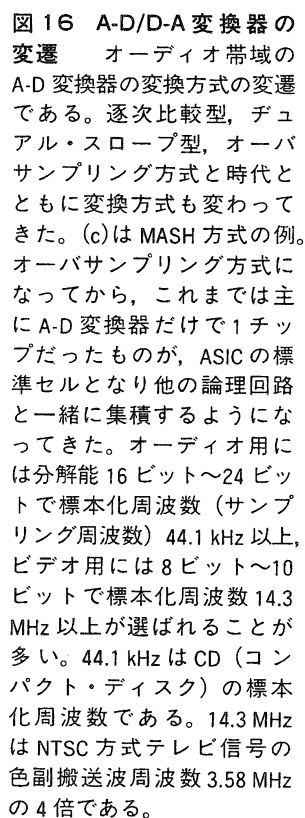
順序理論とは、時間の関係が入ってくる理論で、記憶（メモリ）回路が必要となる。すでに米国ではコンピュータ開発の段階で命令とデータを電子的に記憶させておくという概念が考えだされていた。これを最初に試みたのは、英国の T. キンバーンと F. ウィリアムズである。彼らは CRT（ブラウン管）の蛍光面を利用してデータを記憶するウィリアムズ記憶管を発明し、これをコンピュータ「マーク I」に採用していた。

注3) たとえば、論理回路の TTL (transistor transistor logic) はトランジスタを飽和させて動作させている。これに対し ECL (emitter coupled logic) は非飽和で動作させている。高速化するためである。飽和させると、トランジスタの接合容量や寄生容量に多くの電荷がたまるため、動作が遅くなるが、非飽和ではこのような影響が小さい。

これを基にシフト・レジスタや、分周カウンタ、メモリ回路へと発展し、これでやっと順序論理が使用できるようになった。初めのころ、フリップフロップは真空管を使って構

コンピュータではこの順序回路に加えて、論理回路、メモリ回路で構成している。

アナログは連続量であり、デジタルは不連続(離散)量である。この両者の性質はまったく異なっている。



このためアナログ回路とデジタル回路は1950年代までそれぞれ別々の機器に応用され、発展してきた。この間を結びつける役目を果たすアナログ・デジタル(A-D)変換器やデジタル・アナログ(D-A)変換器はあまり必要もなく、かつ技術的な実現方法も確立されていなかった。

この動きに変化ができたのは、1952年のことである。米国のアンドリュー・ケイが機構部品である電磁リレーを多数組み合わせ、マトリクス・スイッチ・ネットワークを作り、標準電池の電圧と比較して、デジタル的に表示するデジタル電圧計を発表した。

これが初期のA-D変換器である。変換方式は逐次比較型だった。ここに $R-2R$ ラダー抵抗網(抵抗値 R と $2R$ の抵抗をはしご型に組み合わせたもの)が用いられていた(図16)。

同じ年、日本では、桑野電機が同様な方法で、トランジスタと電磁リレーによるデジタル電圧計を作っている。この特性は放電表示管(キクシ管)による5桁表示で、測定範囲は $\pm 0.1\text{ mV} \sim \pm 1999.9\text{ V}$ 、変換時間は5秒、外形寸法は $480 \times 300 \times 464\text{ mm}^3$ と小型テレビなみの大きさだった。

その大きな目的は精度の高い測定器開発だった。ようやくこのころから主としてA-D変換技術が注目され始めてきたといえよう。機構部品では変換速度があまりにも遅いため、電子化の動きが始まっている。1955年には、米ウェストン・インストUMENT社のR. W. ギルバートがデ

ュアル・スロープ型A-D変換器の基本回路を、1964年になるとS. K. アンアンがデュアル・スロープ型の実用回路の基本特許を出願している。A-D変換器を基にD-A変換器も作れるようになっていった。

やがて測定器のみならず、A-D変換器とD-A変換器との組み合わせによる応用が始まった。

そのスタートをきったのが米AT & T社のT1型PCM(pulse code modulation)電話多重搬送装置で、このなかに分解能8ビットの変換器が用いられていた。1962年のことである。PCMの基本原理は、1932年にR. H. リーブスによって発明されていたが、30年振りによみがえったのである。だがA-D/D-A変換器の価格が高くまだ一般的ではなかった。

その後、測定器にも大きな変化があった。あの小型テレビほどあったデジタル電圧計がなんと弁当箱ほどの大きさになったのだ。

この小型デジタル電圧計を開発したのはフェアチャイルド・セミコンダクタ社である。米国の代表的な半導体メーカーだった同社は、S. K. アンアンのデュアル・スロープ型回路を応用して1968年に製品化し、好評を博した。ただし、まだIC化されてはいない。

やがてアナログ信号とデジタル信号の間の変換回路のIC化が始まった。スタートをきったのは、ここでもフェアチャイルド社で、初めてIC化したD-A変換器「 $\mu\text{A}722$ 」が1979年に低コストで売り出されている。ただし、応用は測定器などに限られていた。

木星の鮮明な写真に驚嘆

A-D/D-A変換器の実力を証拠立てる驚嘆すべき出来事が1979年に起こったのである。

同年3月4日、NASA(米航空宇宙局)は、人工衛星を打ち上げ、地球からなんと6億3000万kmの距離、電波ですら90分もかかる巨大な渦巻に荒れ狂う木星の鮮明な写真を地球に送ってきたのだ。さらに人々を驚かせたのは、木星の表面に、えくぼのように写っていた小さな衛星イオとエウロパの写真だった。

ここではアナログ画像信号をデジタル・データに変換して人工衛星から地球へと送信した。この理由はデジタル・データが雑音にめっぽう強く長距離通信に適していたからだ。米TRW社の製造した装置に内蔵されていたA-D変換器は、並列型(フラッシュ型)で分解能は8ビットだった。

このころからA-D/D-A変換器は、二つの方向へと進み始めている。一つが音声や音響(オーディオ)の分野で高分解能を目標としていた。1982年ころにPCMによるCD(コンパクト・ディスク)用に、16ビットの積分型A-D/D-A変換器が続々と開発されている。その後、1975年ころからオーバーサンプリング方式^{注4)}が登場してきた。

注4) A-D/D-A変換器のサンプリング周波数は入力周波数の2倍以上に選ぶ(標本化定理より)。通常は数倍に選ぶ。これを64倍、128倍など非常に高速にサンプリングし、 $\Delta\Sigma$ 変調方式と組み合わせることで、A-D変換器の回路構成を1ビットにできるというのがオーバーサンプリング方式である。回路規模が小さくなるという利点がある。

オーバーサンプリング方式で、NTT(日本電信電話)の内村国治、小林勉、岩田穆らは、1986年、画期的な変換方式MASH (Multi-stage Noise Shaping) を考案した。この特許は1993年、全国発明表彰の特許庁長官賞を受賞している。

オーバーサンプリング方式のA-D/D-A変換器にはデジタル・フィルタが用いられており、これによってデジタル信号処理回路で実現でき、オーディオ技術は飛躍的に発展したのである。ちなみに、DSP(digital signal processor)を初めて発売したのはインテル社で、1979年に2920という製品を出した。

電話の音声もアナログからデジタルへと変わってきている。電話のデジタル化に必要なコーデック

(符号化/復号化器：アナログ音声信号をデジタル信号へ、デジタル信号をアナログ音声信号へ変換する回路)用変換器は、1977年に開発されている。ここには折れ線による量子化が採用され、データを圧縮できた。日本や米国向けには μ -lawが、欧州向けにはA-lawがある。

電話やオーディオ以外に、もう一つの大きな用途が映像分野である。映像の分野で高精細化・高速化を目標にデジタル化が進められている。ここでは、並列型を改良した分解能8ビット～10ビットの2ステップ型(並列型を2段直列接続して構成した変換器)が1988年に開発されている。

マルチメディア時代では音声や映像のアナログ信号をデジタル化する

ことが基本である。さらに、このデジタル情報をデジタル圧縮する技術が次々に提案されてきた。

画像の符号化として、1992年には静止画向けにJPEG (Joint Photographic Experts Group)が、1993年には動画像用にMPEG1 (Moving Picture Experts Group Phase 1) が国際標準として勧告された。MPEG1はビデオCDなどに应用されている。その後、MPEG2が勧告され、デジタル衛星放送やDVD (デジタル・ビデオ・ディスク)などに採用されている。

現在は、インターネットなどを想定したMPEG4の標準化作業が行なわれている。

これらはISO (国際標準化機構) とIEC (国際電気標準会議) の合同作

それぞれのメディア時代

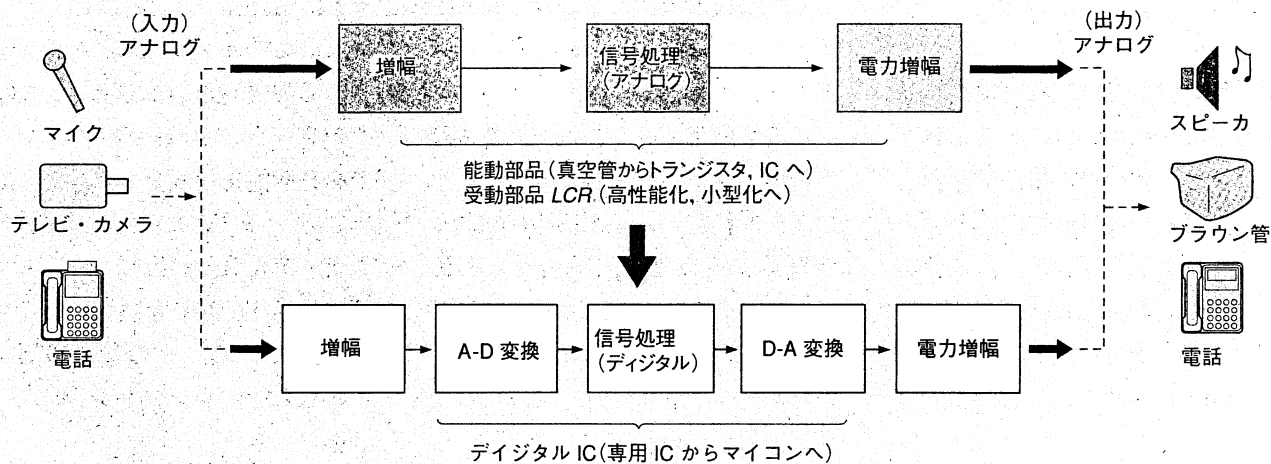


図17 劇的に変化する電子回路 この変化を支えたのが半導体技術の進歩である。電子回路は、当初はアナログ回路、そしてデジタルになった。いまではマイコンを使ってソフトウェアで実現するという動きが出てきている。

業部会で標準化されている。

画像が飛び交うようになる 21 世紀には、ますます A-D/D-A 変換器が重要な部品になるだろう (図 17)。

デジタル化で深刻になった雑音

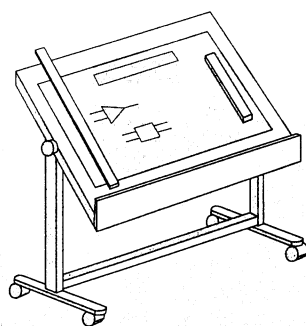
パソコンなどの電子機器にはデジタル回路やスイッチング電源などが内蔵されている。デジタル・データの変化点やスイッチング時にパルス性の雑音が不要な電波 (不要輻射) として放出され、ラジオ受信機やテレビ受像機など電気製品の回路に飛び込む。この雑音が社会問題になっている。EMI (electro-magnetic interference: 電磁波妨害) と呼ぶ。

一方、電子機器の動作速度はますます高速になってきており、IC は低電圧動作になってきている。このため、IC、つまり電子機器の雑音マージンが小さくなり、不要輻射による誤動作が発生しやすくなってきた。

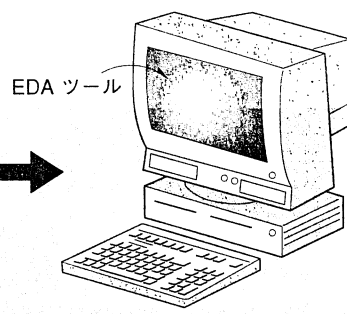
このような電磁波環境のなかで、電子機器は高いイミュニティ (免除) 力をもつ必要が生じてきた。この能力をチェックする規格を EMC (electro magnetic compatibility: 電磁環境適合性) と呼ぶ。

デジタル回路に用いられるパルスは、基本周波数のほかに幅広い周波数成分を含んでいる。これはデジタル・パルスをフーリエ変換すればわかる。パルスが鋭いほど、広い周波数帯域に分布することになる。

これからの電子機器は設計段階から、この EMC を考慮しなければならない。EU (欧州連合) は、1996 年 1 月 1 日から機械安全指令を発効した。1997 年 1 月 1 日には低電圧指令も発効する。これらの指令に適合し



ドラフタから



パソコンへ

EDA: electronic design automation

図 18 回路設計ツールはドラフタからパソコンへ

ている場合には、CE (Comformite Europeenne) マークを張り付けることになっている。これらの電子機器に使われる雑音除去フィルタが近年、注目されるようになってきた。

このほか電子回路で最近問題になっているのが「発熱」である。特に高集積密度化・高速化した IC の発熱は簡単に解決することができない。冷却用ファンのみならず、温度を検出してクロックを自動的に遅らしたり、ペルチェ効果を利用するなどさまざまな工夫が考えられているものの、これでは本質的な解決策にはならない。

ここにはかつてバイポーラ IC が CMOS IC に変わったようなドラチックな変化が期待されている。今後、新しい電子装置を開発するにあたって、その基本となる能動素子にも革新的な変革が望まれている。どんなアイデアが出るのだろうか。

21 世紀に向けての電子回路

ラジオ受信機からテレビ受像機へ、さらに電話へと電子機器が家庭に普及するなかで、技術者が知恵を絞り工夫を凝らし、新しい部品や電子回

路を創出した。

ラジオ受信機では、放送はアナログからスタートしたが、混信や雑音の問題から、高い S/N (信号対雑音比) とハイファイ音を求めて AM から FM へと進み、ここにきてデジタルによる PCM 放送の時代を迎えている。

テレビ受像機では、白黒からカラーへ、そして高精細画像へ、放送電波の周波数は VHF 帯から UHF 帯へ、放送衛星の登場によって SHF 帯の時代となっている。電波だけでなくケーブル・テレビもある。最近では、「電話線でインターネット放送」といった試みもある。同時に、放送はアナログからデジタルといううずのなかにある。ディスプレイにも新しい動きがでてきた。そしてラジオやテレビの発達とともに数多くの電子回路が考えだされてきたし、さらに今後の発展に伴って数多くの新しい電子回路が考えだされていくことだろう。

電話は、一つの電話線を多数で共用する多重化中継装置や自動交換機の開発段階で、素晴らしい電子回路の提案が相次いだ。通信で実用化さ

れた電子回路が、半導体技術の進展とともに、ラジオ受信機やテレビ受信機へと応用範囲を広げていったともいえるだろう。

電話もアナログからデジタルへ、さらに有線電話から携帯電話へと大きく発展するなかで、多くの部品や電子回路が誕生してきたのである。

このなかで電子回路は、高周波化、小型化、低消費電力化に向けて開発が進められてきた。1980年代から、ラジオ放送、テレビ放送、電話は、アナログからデジタルへと大きく変わってきた。この変革を支えるのが、もちろん半導体技術の驚異的発展である。いまやCADを用いて、複雑な電子回路をASIC (application specific integrated circuit: 特定用途向けIC)で簡単に設計できるようになった(図18)。同時に、低コストで入手できるようになった。

デジタルICの登場によって電子回路の設計概念に大変革が起こってきたといえるだろう。従来なら、いかに電子部品の数を少なくして、目的とする性能を出すか、ここが技術者の腕の見せどころだった。しかし、いまや必ずしもこの思想に固執する必要はない。少くとも素子数(従来の電子部品)を増やしても、性能を追求し、開発スピードを早くするほうが大切なのだ。

デジタル信号処理にすれば、アナログと比較して、調整がいらないうえに、情報を圧縮したり加工したりすることも容易である。これを、ここではハードウェアによる電子回路と呼ぼう。

だが最近では、従来のASICは開発費用が高い、開発期間が長い、

そのうえにいったん作ったら変更が困難という声が上がってきている。

これに対し、高性能マイコンを使ってソフトウェアによって電子回路を構成しようという動きが出てきた。もちろん、演算速度の点から多くの問題もあり、すべて実用化できるわけではない。今後、マイコンの速度がより高速になれば、この動きはいっそう活発になろう。

ではこれが究極だろうか。どうもそうではない。21世紀にはまだまだ画期的な変化があるはずだ。

参考文献

- 1) Atherton, W. A., *From Compass to Computer*, San Francisco press, Inc., 1984.
- 2) Moore, A., *Smithsonian Visual Timeline of Inventions*, Dorling Kindersley Publishing, Inc., 1993.
- 3) MacLaurin, W. R., *Invention and Innovation in Radio Industry*, The Macmillan Co., 1949.
- 4) 近角聰信, 木越邦彦, 田沼静一, 『最新元素知識』, 東京書籍, 1985年5月.
- 5) 山崎俊雄, 木本忠昭, 『電気の技術史』, オーム社, 1992年12月.
- 6) 直川一也, 『電気の歴史』, 東京電機大学, 1994年3月.
- 7) 城阪俊吉, 『科学技術史』, 日刊工業新聞社, 1990年7月.
- 8) 小松左京, 堺屋太一, 立花隆, 『20世紀全記録』, 講談社, 1987年9月.
- 9) 田中達也, 『ヴィンテージラジオ物語』, 誠文堂新光社, 1993年6月.
- 10) 日経エレクトロニクス編, 『エレクトロニクス50年と21世紀への展望』, 日経マグローヒル社, 1980年11月.
- 11) KOA 編, 『KOA 50年史』, KOA, 1991年3月.
- 12) 村田製作所編, 『不思議な石ころの半世紀——村田製作所50年史』, ダイヤモンド社, 1995年9月.
- 13) Juran, J. M., 「第2次世界大戦と品質運動(1)」, 『Engineers』, no.522, 1992年4月.
- 14) Juran, J. M., 「第2次世界大戦と品質運動(2)」, 同上, no.525, 1992年5月.
- 15) 加納誠三, 「蓄電池小史(1)」, 同上, no.558, 1995年4月.
- 16) 加納誠三, 「蓄電池小史(2)」, 同上, no.559, 1995年5月.
- 17) エトウイン・エッチ・アームストロング, 『無線と実験』, 誠文堂, 1924年5月.
- 18) 小山慶太, 『ファディーが生まれたイギリス』, 日本評論社, 1993年12月.
- 19) NEC 編, 『70年史』, NEC, 1972年7月.
- 20) 日本放送協会編, 『50年史』, 日本放送協会, 1981年3月.
- 21) 東京芝浦電気編, 『東芝100年史』, 東京芝浦電気, 1977年3月.
- 22) 日立製作所編, 『日立製作所(1), (2), (3), (4)』, 日立製作所, 1980年12月.
- 23) 日本ビクター, 『日本ビクターの60年史』, 日本ビクター, 1987年9月.
- 24) 松下電器産業, 『松下電器50年の略史』, 松下電器産業, 1968年5月.
- 25) 高柳健次郎, 『テレビ事始め』, 有斐閣, 1986年1月.
- 26) 日本放送協会編, 『NHK ラジオ技術教科書』, 日本放送協会, 1993年10月.
- 27) 沖電気工業編, 『100年のあゆみ』, 沖電気工業, 1981年11月.
- 28) 日本電信電話編, 『NTT データブック'91』, 日本電信電話, 1991年3月.
- 29) ソニー, 『ソニー創立40周年記念誌』, ソニー, 1986年5月.
- 30) 西村昭義, 『電池の本』, CQ出版, 1993年6月.
- 31) 小泉袈裟勝, 『単位の辞典』, ラティス, 1991年7月.

本誌注) この内容に関して、ご意見のある方や「実はこうだった」ということをご存じの方は本誌までご連絡ください。 ●