

講座

歴史絵巻

電子回路

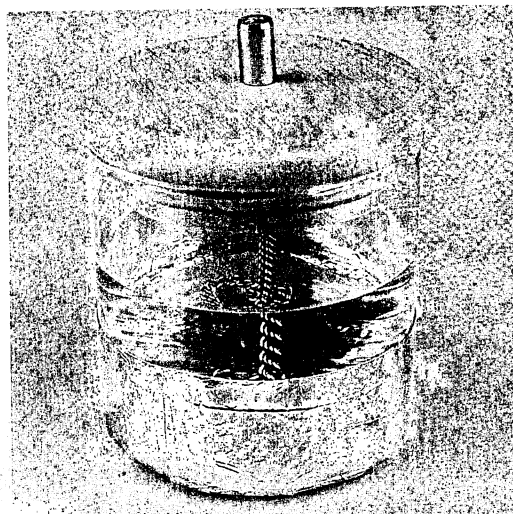
受動部品  
コンデンサ  
コイル

# 受動部品の発明から 「電子回路」へと発展する 20世紀エレクトロニクスの歩み(6)

相良 岩男

KOA 顧問

電子回路の1回目である。今回は、電池から始まって、受動部品、つまりコンデンサ、抵抗器、コイルの誕生するまでをたどる。電気を蓄える、電圧を下げる、電気を誘導する——エレクトロニクス技術者ならごく当たり前の概念だが、こういった概念を思いつくだけで発想の転換が必要だった。受動部品がそろい、真空管(能動部品)が登場したことによって、それらを組み合わせて所望の機能を得る「電子回路」という概念が生まれてくる。その後、真空管は、トランジスタへと発展する。(本誌)

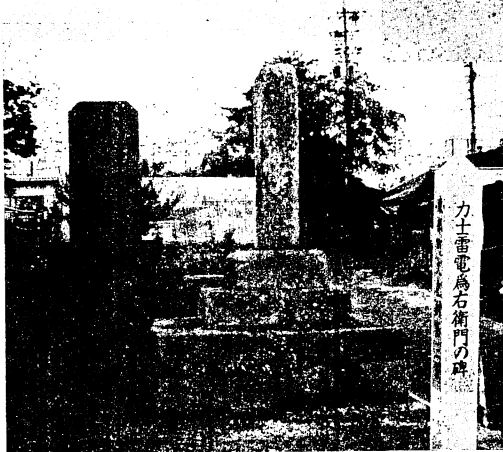


上は、著者(相良氏)が作ったライデン瓶の模型。左は雷電為右衛門の碑(長野県東部町にある)。

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科卒業。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、ゲーム機、信号機などに向けたICの開発に従事。1990年ED事業部・電子応用技術部技師長で退職し、KOA 常務取締役役に就任。1996年6月に現職。

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)に掲載した。



20 世紀後半、ラジオ、テレビ、電話、パソコンなどのエレクトロニクス機器が次から次へと開発されていた。本格的な電子機器開発の始まりといえるラジオやテレビが誕生する以前、装置は機械を組み合わせた機械方式で構成されており、現在のような電子部品による電子方式はおろか、「電子回路」というものがまったく存在していなかった。

どのようにして電子回路が誕生したのだろうか。当然、電子回路の基本となる電子部品がそれ以前に開発されていなければならない。実は、電子部品は、電子回路を構成するという目的で開発されたのではない。

19 世紀、一つひとつの物理現象を解明しているうちに、電荷を蓄えることのできるコンデンサ、物質に流れる電圧と電流の関係から出てきた抵抗体、電流と磁石の相互作用からわかったコイルといった電子部品の基本となる概念が固まった。1800 年～1830 年ころのことである。

その当時、これらがなにかに応用できるなどとは思ってもよらなかった。やがて、コンデンサに電荷を蓄え、これを多数直列に並べて、人に触れさせてビリッとさせ飛び上がらせる興行師とか、電気ショックを利用した治療機に使われたのである。

電気とは「得体の知れぬ不思議なもの、まったく役に立たないもの」と一般の人は考えていたようだ。1876 年～1895 年、電話機や火花放電無線が発明されたころから、これらの機器の性能を高めるために、電気を蓄えるコンデンサ、電流を制限する抵抗器、起電力を発生させるコイルが使われ始めた。これらを総称して受動部品 (パッシブ・パーツ) と呼んでいる。受動部品とは受け身の部品ということである。

これをきっかけに、受動部品が次第に注目され、高性能化に向けて、急ピッチで改良が加えられていった。

やがて電源用スイッチやコイルを使った電磁リレーなどが登場するよ

うになる。これをその後、機構部品 (メカニカル・パーツ) と呼んでいる。1906 年になると真空管という能動部品 (アクティブ・パーツ) が発明され、エレクトロニクスをとりまく環境は激変している。能動部品とは積極的に他に働きかける、つまり増幅する能力をもつ部品のことである。

真空管による増幅特性を最大限に引き出すため、コンデンサ、抵抗器、コイルが必要となり、これを用いた高周波増幅、低周波増幅、電力増幅といった電子回路 (サーキット) が続々と誕生した。

だが、このような電子回路を使ってみると、不満足な点が多く出てきた。もっと高い周波数まで増幅したい、もっと電力をとりたい、もっと音質を改善したいといった要求が続出し、これがより高性能な受動部品や能動部品の開発を刺激した。このようにして 20 世紀後半のエレクトロニクスは発展していったのである。

ラジオ、テレビ、電話、パソコン

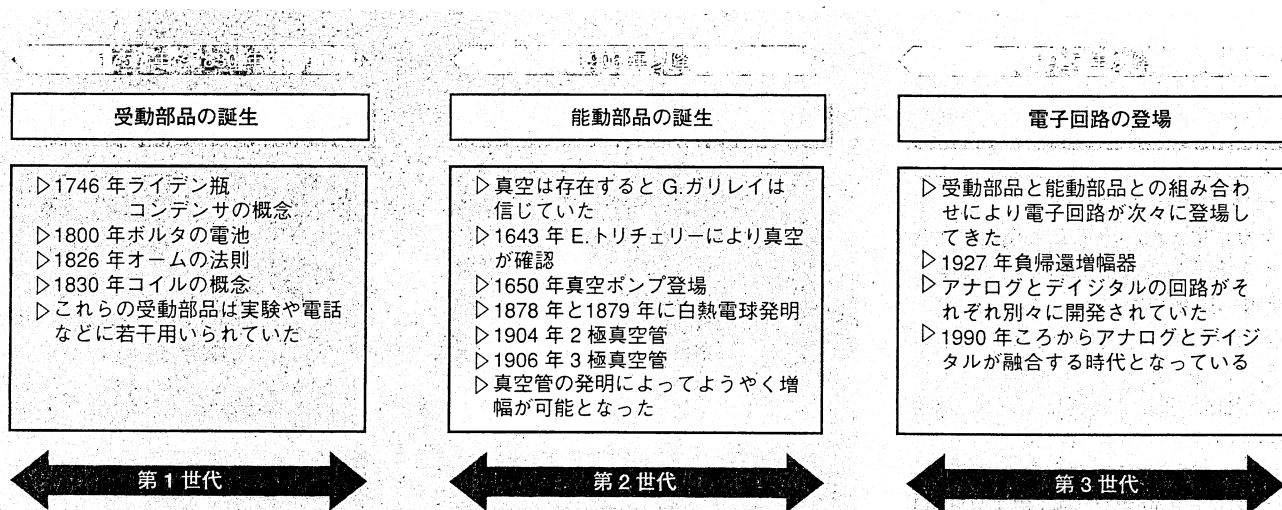


図 1 受動部品の誕生から電子回路へと発展するまでを 3 世代に分けた 受動部品であるコンデンサ  $C$  と、抵抗器  $R$ 、コイル  $L$  は別々に発明されているが、当初は何に応用できるかわからなかった。やがて能動部品である真空管が発明され、これによって受動部品と能動部品との組み合わせによる電子回路が誕生したのである。

などの電子機器を支えるのが電子回路であり、この電子回路を支える縁の下<sup>ソラ</sup>の力持ちが受動部品、能動部品、機構部品である。このような部品をまとめて電子部品という。

ここでは三つの世代に分けて、受動部品、能動部品、電子回路の発展の足跡をたどってみよう(図1)。

**第1世代:**琥珀<sup>こはく</sup>などを摩擦することによって得られる電気の性質がおぼろげにわかり始めた時期である。

この得体の知れない電気の正体を突き止めようと、当時、先端技術に携わっていた大学の教授を中心とした科学者たちはさまざまな工夫を凝らしている。まず、電気を蓄えようというねらいから、1746年、ライデン瓶によるコンデンサが登場してきた。これを静電気の時代という。

やがて蛙が電気を発電するのではないかということをヒントに、1800年にはボルタの電池が発明され、動電気の時代へとようになっていく。ここから1826年にはオームの法則に伴って抵抗体の概念が、1830年には電気と磁気との関係からコイルの概念が、ようやく明らかになってきた。実に多くの科学者が電気の謎に挑戦し、そのなかから受動部品の輪郭が固まってきたのである。

一方、電気製品の応用開発も始まり、1831年にモールス電信機、1906年にラジオ受信機の発明、1925年にはニブコー円盤テレビの開発に成功した。こうして、次第にコンデンサ、抵抗器、コイルという受動部品が注目されるようになっていった。ただし、この時代はまだ能動部品は存在しておらず、すべて機械方式によって構成されていたため、本格的

な採用ではなかった。

その後、真空管やトランジスタなどの能動部品の登場によって、受動部品は急速に発展した。電子装置の進歩を側面から支えたのである。さらに電子装置の進化に伴って、電子部品の特性も形状も大きく姿を変え、今日に至っている。

**第2世代:**エレクトロニクス上に初めて本格的な能動部品「真空管」が登場した時期である。

真空管の発明により、エレクトロニクスは一気に開花したといつてよいだろう。ここから電子方式のラジオ受信機やテレビ受像機が登場してきたのである。

どのようにして真空管が誕生したのだろうか。無線電信では、より遠くの信号が受信できるコヒーラ検波器に代わる新しい高感度検波機の出現が、待ち望まれていた。このような状況下で1904年、ついに画期的な2極真空管による検波器が発明されたのだ。だが人間の欲望は、きりがない。この2極真空管の特性をさらに改良するなかで、想像しなかった現象が発見されたのだ。これが1906年に発見された増幅能力をもつ能動部品、3極真空管だった。

**第3世代:**能動部品と受動部品との組み合わせによって電子回路が続々と誕生した時代である。

電子回路には大別して二つある。一つがアナログを中心とした電子回路であり、もう一つがデジタルを中心とした電子回路である。アナログを中心とした電子回路では、低周波・高周波用の増幅器、発振回路などが、主として無線機やラジオ受信機の開発中に誕生したのである。

この増幅器をベースに、再生方式やスーパーヘテロダイナ方式といった一つのシステムともいうべき方向へと発展している。

さらにアナログによる電子回路開発に大きく貢献したのが、電話の多重装置だった。このなかの一つが負帰還増幅器であり、もう一つがフィルタ(濾波器)である。

一方、デジタルによる電子回路は1919年、マルチバイブレータが開発され、やがてフリップフロップ回路へと発展していった。1930年、放射能を測定するガイガ検測器に使用されていたが、デジタル回路の活躍の場はあまりなかった。

やがて1939年に勃発した第二次世界大戦中、実に多くの軍事用電子機器が誕生している。たとえばアナログ回路による軍用無線機、レーダ、爆弾用信管近接装置が開発され、ここにコンデンサ、抵抗器、コイルなどの受動部品、真空管などの能動部品が採用され、使用量が急増した。

さらに弾道爆弾誘導計算用としてデジタル回路がよみがえり、この大戦の末期にコンピュータが作られている。戦後の1946年には、究極のデジタル方式として注目されていた電話用PCM(pulse code modulation)方式がついに実用化した。

このなかでいくつかの問題点が出てきている。たとえば以下二つの問題が大きい。

その一つが、1台の電子機器に用いられる電子部品の数が多くなったため、組み立てが困難になり始めたこと。これを解決するために新しい実装技術としてプリント基板が登場し、初めはリード部品によるスルー

ホール実装技術 (THT) だったが、その後、チップ部品をマウントする表面実装技術 (SMT) へと発展した。

もう一つの問題点は、電子機器や電子部品の信頼性である。

1950 年代にはアナログ回路とデジタル回路とを結びつける A-D/D-A 変換方式が注目され始めている。とはいえ 1960 年ころ、アナログ応用機器とデジタル応用機器は、まだ別々に発達していた。

アナログ回路を応用した機器では、ラジオ受信機、テレビ受像機、VTR、アナログ携帯電話などが出てきており、デジタルの応用では電卓、パソコン、テレビ・ゲーム機、電子腕時計などが登場している。

1950 年代になると、能動部品である真空管はトランジスタや IC へと代わり、著しく電子回路が発展していった。このなかで、A-D/D-A

変換方式が実用化時期を迎え、アナログ回路とデジタル回路とが一体化した機器開発が音声/オーディオ分野から始まった。CD(コンパクト・ディスク)が登場し、テレビ受像機の音声チャンネルのデジタル化が始まり、映像分野ではデジタル・テレビが出てきた。さらにデジタル携帯電話も実用化した。

アナログ回路はより高周波化へ、デジタル回路はより高速クロック化へ。そして電子部品は、高集積化、小型化、低消費電力化に対応してき

た。電子回路が複雑化するにつれて、その核となる IC 設計のみならず、電子機器を設計する環境が激変している。システムのみならず、電子回路、プリント配線基板のパターン、筐体設計、さらにシミュレーションも含めて、ほとんどがハンド・クラフトから CAD (computer aided design) へと変わっていったのである。

そして 21 世紀に向けて、電子回路は  $S/N$  (信号対雑音比) の向上と高速化という永遠の目標に向け、さらに前進していくことだろう。

## 第1世代

### 混沌のなかから受動部品の輪郭が明確に

電気の不思議な性質を解明しようと、多くの科学者がチャレンジした。研究情報が混沌とするなかから次第に電気の性質が解明され、そのなか

からコンデンサや、抵抗体、コイルの輪郭が明確になっていった。だが初期のころは、あくまでも学問的な追求のみであり、応用など思いもよ

## 琥珀がエレクトロニクスのルーツ

神秘的な透き通る黄色の美しさをもつ「琥珀」は、現在でも装飾品に用いられている。ギリシャでは紀元前から愛用されていた。実は、エレクトロニクスの源流はなんと琥珀にさかのぼることになるのである。

琥珀とは、太古に繁茂した樹木から樹脂が化石化したもので、絶縁物で静電気が生じやすいことを現代人は、すでに知っている。だが紀元前、なにも知らないギリシャ人は、この琥珀をこすると不思議な力が働き、ゴミや髪の毛など

軽い物を吸い付けてしまうことを経験的に知っていた。

この不思議な力とは、いったいなんなんだろうか。ギリシャの哲学者タレスは、紀元前 600 年ころ、この謎の解明に初めて挑戦した人だといわれている。哲学者たちの結論は、琥珀に特殊な物質が含まれているため、琥珀固有の性質だと考えていた。古代ギリシャでは太陽のことをエレクトルと呼んでいたが、美しく黄色に輝く琥珀も、これにちなんで「エレクトロン」と呼んでいた。ここから不思議な力をいつしかエレクトロンと

いうようになっていった。すべての物事は太陽に帰着するのだ。

### 「エレキ」が「電気」に

日本語で「エレクトロン」とか、「電気」と呼ぶようになったのは、いつごろのことだったのだろうか。

1720 年、8 代将軍の徳川吉宗の時代に、摩擦起電器が初めて欧州から紹介された。これを「エレキテル」、あるいは「エレキ」と呼んでいた。ギリシャ語が日本語的になったものらしい。

らなかったのだ。

やがてラジオやテレビの発達に伴ってコンデンサ、抵抗器、コイルとしての役割が明確になった。ここではこれらの受動部品誕生の背景と、その後の発展について触れてみよう。

## 不思議な性質をもつ電気と磁気

1600年くらいまで多くの人々は、電気と磁気は同じ種類のものであると信じていたようだ。

電気は、絶縁体上に電荷として存在し、磁石と同様な動作をする。これに対し磁石はなんらかの理由で、いったんこすった電荷が永久に保存されているものと考えられていた。

だが1600年、英国エリザベス女王の侍医だった W. ギルバートは、まず初めに、P. ペレグリネスの唱えた「宇宙全体に磁気がある」のではなく、「地球そのものに磁気があ

る。その理由は、船に乗って北極に近づくほど伏角が大きくなるからだ」と主張した。琥珀のみならずガラス、水晶、硫黄でも摩擦電気が発生することを実験で確かめている(下掲の「琥珀がエレクトロニクスのルーツ」参照)。

W. ギルバートは、Fe(鉄)は磁石によって磁化され磁気を保持し、高温にすると磁気は失われるが、琥珀は磁化されないことなどから電気引力と磁気引力とはまったく別のものであることを明らかにした。この考え方は従来の定説を根底からくつがえすもので、これを主張するのは勇氣と決断が必要だった。だが実験による証拠は不動のものとなり、彼の説は人々に信頼された。

当時、天動説を否定し、「それでも地球は動く」と地動説を唱え、1633年に宗教裁判を受けた G. ガリレイ

とは対照的に、W. ギルバートを取り巻く社会環境は良好だったといえる。

実験を重要視していた W. ギルバートは、「知識とは、良書の読書に加え、通俗的な思考よりも確実な実験から得られるものである」と語っている。これは現代にも通じる素晴らしい教訓だ。

このようなことがあってから半世紀近くもたった1663年のことである。ドイツの O. ゲーリックは、ガラス球に硫黄を付けた球形を作って、これに軸を立て、手で回転させると、手との摩擦によって高圧の電気が発生することを見だし、この原理を使って摩擦発電機を発明している。

彼はこれを用いて火花放電を初めて観察したのである。なぜ硫黄を用いたかという、この物質には「電気素」が多くあるからだとい

その後、1745年、欧州ではライデン瓶が発明され、これが長崎を経由して入ってきている。ライデン瓶の「デン」と、エレキの「キ」が結びつき、いつしか「電気」と呼ばれるようになったらしい。

## 慈愛の石が磁石に

一方、特別な石が、摩擦しなくても鉄を吸い付けるという不思議な現象が中国では古くから知られていた。この石について、紀元前260年ころの前漢の時代の書物のなかに、母親が赤ん坊を引き寄せると似ていることから、慈愛をもった石、つまり「慈石」と書か

れている。

ギリシャでは、鉱石の産地だった古い地名マグネシアをとってマグネットと呼ぶようになったという。たぶん、日本語の「磁石」は、慈石から由来したのだろう。

やがてこの磁石が常に一定の方向、つまり南北を指すことに気がついたのは6世紀ころだという。11世紀になると、中国では磁石片を水に浮かべて方位を示す水羅針盤が発明された。これがシルクロードを通して長安からローマへと運ばれたと伝えられる。

水に浮かべる代わりに、支柱の上を回転させ、周りに度数目盛り

を刻んだ本格的な羅針盤を発明したのはフランスの P. ペレグリネスやイタリアのシオイヤたちで、1310年ころのことだった。やがて、これは航海用の羅針盤として用いられ、14世紀、スペインやポルトガルは大航海時代を迎えている。ここから世界的な貿易が発達し、産業革命へとつながっていく。羅針盤は、現在のGPS(Global Positioning System)に相当する重要な装置だったといえるだろう。このころの3大発明とは、羅針盤と、活字印刷、火薬だった。

羅針盤を支える磁気についてはまったく不明で謎に包まれていた。

たからである。この電気素は電気の性質をもつ不可秤量なものとの考えていた。O. ゲーリックは、この実験から電気にも斥力があることを発見している。

電気の解明は遅々として進まなかった。さらに半世紀も過ぎたころから摩擦発電機は次々に改良され、硫黄球はI. ニュートンによってガラス球へ、さらにブラシと円板へと代わり、より強力な火花放電が可能となった。そのころのエレクトロニクの進歩は、いまから考えると信じられないくらいゆっくりだった。

このようななかで1729年、英国のS. グレーは琥珀、硫黄、ガラスなどのように摩擦によって電気を発生し保持できる物質と、Fe(鉄)などのように、電気を発生させないが、電気を流すことのできる物質があると発表している。電気はほかに移動できるということ、つまり流れるという概念を初めて言い出したのである。

これに対し、J. デサグリは前者を絶縁体、後者を導体、かつここで生

じる電気を静電気と名付けている。まだ電圧という言葉がなかったため、電気の性能は、張力(tension)や放電(intensity)の激しさで表していた。

#### ガラス電気と樹脂電気がある

やがて電気は物質の移動を伴わず重さを持たない不可秤量との考えが定着するようになってきた。

だが1733年、フランスのC. デュフェは、W. ギルバートが言っていた「物質には帯電できるものと帯電できないものがある」といった説や、S. グレーが主張した「電気を発生させない物質がある」というのは誤りで、「Feのような金属は摩擦電気を発生させたのち電気が流れてしまうのである」と分析した。

しかもC. デュフェは、ガラスを摩擦することによって生じる「ガラス電気」と、琥珀を摩擦することで生じる「樹脂電気」との2種があり、異種(ガラス電気と樹脂電気)は吸引、同種は反発があると発表した。彼は検電器の発明者でもある。

C. デュフェから17年が経過した1750年、米国のB. フランクリンは静電起電器やライデン瓶を用いてC. デュフェの2種の電気について検討を加えている。

やがて、ガラスと琥珀の摩擦電気はお互いを重ねると消えることを見いだした。ここからB. フランクリンは、電気は1種類のみで流体として存在し、ガラス摩擦電気は流体が過剰であり、琥珀摩擦電気は流体が不足している状態であるとした。ここで過剰なものを陽電気、不足しているものを陰電気と呼び、流体は陽から陰に流れると結論づけている。だが流体とは何かについては、依然として不明だった。

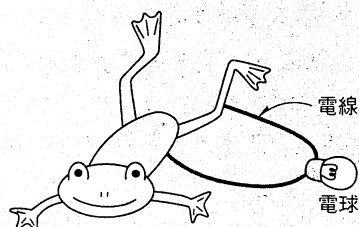
ようやく電気の核心に近づいてきたが、それほど電気は得体の知れないものだったのだ。

#### 雷は電気か、フランクリンが実験

1749年、英国科学アカデミーは「雷と電気の類似性」について論文を募集している。雷が果たして電気なのかと、多くの人たちは関心をもっていたからだ。これに答えるように1752年、米国のB. フランクリンは、舐に湿った舐糸をつないで電気をライデン瓶に導き、これを蓄え、雷現象は電気の火花放電と同一であることを証明したのである。しかも雷には、陽電気と陰電気があることを確認している。

翌年、彼は、落雷から建物を守る避雷針(フランクリン棒ともいう)を考案している。1753年、英国のJ. キントンは、帯電体のそばに置いた金属は、近いほうに反対の電気が、遠いほうに同じ電気が生じる静電誘

(a)1793年ごろ



(b)1859年ごろ

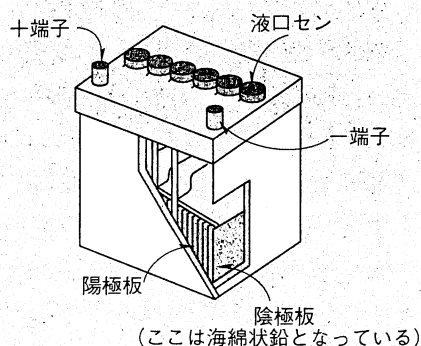


図2 蛙の足は電池か 1793年、L. ガルヴァーニは、筋肉の収縮で動物電気が発生すると考えた(a)。これをヒントにA. ボルタが電池を発明している。鉛(Pb)電池はG. ブランテが発明した。この性能を高められたのは、島津源蔵によって発明されたPb粉があったからである。

導を発見している。

これはC.デュフェの説を裏付けることになった。1786年になると、ガラスに封入された目盛りの付いた感度の高い金箔検電器が英国のA.ベネットによって開発され、電圧の概念のない当時、電気の大きさを知らうで役立ったという。

このころ、日本ではどうだったのだろうか。1773年にオランダから幕府に、摩擦発電機とライデン瓶が献上されていた。だがほとんどの人はあまり気にとめなかったようだ。

摩擦発電機は円筒状のガラスと錫泊棒を用いて作られており、これを初め「エレキテリセイリティ」と呼んでいたのが、いつしか「エレキテル」と呼ぶようになったという。これを見て、発明家の平賀源内が1776年に自作している。

### 電気・磁気の性質がようやく明確に

電気は、具体的応用が見いだせず、単に見せ物的な使い方しかできないと思われていた。電気は人々から軽視されていたのである。だが研究成果は着々と上がってきていた。

1785年になるとフランスのC.クーロンが電気力を測定し、さらに電荷と磁荷という概念を提案している。とはいえ相変わらず電気の核心にはほど遠かった。

ついに1820年、デンマークのC.エルステッドが電気と磁気の間隔を明らかにし、さらにフランスのA.アンペールが電流を定義した。

1864年になると英国のG.J.ストーニーが、最小不可分の電氣量が存在するという概念を発表し、これを「エレクトロン」と呼んだ。日本では

これを電気の子、つまり「電子」と呼んでいる。

このG.J.ストーニーの概念が確認されたのは、なんと33年後の1897年である。英国のJ.J.トムソンが陰極線の研究中、負の電荷をもった粒子「コーパスル微粒子」を発見した。これは原子よりもはるかに小さいのである。いったいこの正体

不明の微粒子は何なのか。

その後、この微粒子こそ、G.ストーニーの提唱していた電子であることが判明したのである。19世紀は、300年以上にわたって議論してきた電気と磁気の関係、電気の本質を追究する時代だった。そして20世紀には、いよいよ電気の応用の時代を迎えるのである。

### 電池

#### 蛙の足は発電機？、動物電気だ

イタリアのL.ガルヴァーニは、1789年蛙の切り離した足が電気によってけいれんすることを見つけた。やがて彼は蛙の足の神経と筋肉を金属で結ぶと、そこに神経流体によって電気が発生すると発表している。この電気発生について「そんな馬鹿な」と現代の人たちは思うだろう。ここに開発の秘められた物語があるのだ。

彼はなんと10年にわたって研究を進め、蛙の足には静電気とは異なり、流れる流体、つまり動電気があると言いだし、これを「動物電気」と呼んだ。彼の発表によって、摩擦や雷以外の方法でも電気が発生する可能性のあることを、このとき科学者は初めて気づいたのだ。

さっそく、イタリアのA.ボルタはこれに注目し、蛙の足から電気を取り出せないかと考えた。しかし、L.ガルヴァーニの言う通りにはいかなかった。そのときフツと蛙の足は有機物によって構成されている。しからずんば、この蛙の足をほかの物質で置き換えようと考えている。実に素晴らしい発想の転換だった。

彼は1750年、異なった金属を接触させ、これを2本の銅線でつないで舌にはさむと酸味を感じるというズルツァーが発表していた論文を思い出した。彼はこの論文を考察した結果、酸味を感じる原因は、接触する金属から電気が発生するためであると結論づけた。この考えによれば、L.ガルヴァーニの唱える動物電気はそれを取り出す異種金属に原因があり、蛙の足自身は発電能力はないとなる。こうしてL.ガルヴァーニの説を否定してしまった(図2)。

### 電圧の概念が生まれる

1793年に彼は、異種金属の接触によって電気を流すことのできる分離の力が異種金属間に働くと説明した。これがのちにいう「接触電圧」だったのである。それまでの静電気では電気の強さは火花放電の長さなどを目安としていた。電圧や電荷についてははっきりしていなかった。ここで初めて、電気の強さを示す「電圧」の概念が登場したのである。

では、L.ガルヴァーニの実験は無意味だったのだろうか。そうでは



ない。A. ボルタに電池発明のヒントを与えた偉大な科学者だった。

1800 年になると A. ボルタは蛙の湿った有機物の代わりに、初めは食塩水を、やがて希硫酸液のなかに Cu(銅)と Zn(亜鉛)の電極を入れた構造を考案し、これを「無機電池」と呼んだ。しかもこの無機電池を直列に何段も接続すると、手のショックが次第に強く、つまり電圧が高くなっていくことを発見している。

これは 1 回しか使えないライデン瓶による電源とは異なり、何回も使える新しい実験電源の発見だったのである。これを「動電気」という。だが、その応用は、相変わらず見せ物か物理屋の玩具でしかなかった。

この発明から 7 年後に電池を応用しようとする試みがようやく始まった。英国の S. デーヴィは A. ボルタの電池をなんと 2000 個もつないで 2.5 cm の距離を連続で火花放電させたのである。ライデン瓶ではたった 1 発の火花しか出せなかったが、これは連続して火花が飛ぶ。ライデン瓶と比較して格段の前進であり、この火花放電は「アーク放電」と呼ばれるようになった。

このアーク放電は非常に明るく、照明になることに人々は気づいた。「電気は捨てた物ではない」と人々は認識をあらためたのである。そしてボルタの電池の登場によって、静電気から動電気の時代へと変わっていったのだ。

9 年後には S. セグメントが化学反応による気泡電信機を発明しているが、ここにも電池が使われた。37 年後にはモールス電信機にも、ボルタの電池が用いられている。

電池の発明によってエレクトロニクスが始動し始めたのである。欠点は、短時間で電極が腐食してしまうことだった。1802 年になると、A. ボルタは電気の蓄電(コンデンサ)ではなく、化学分解によって充電できる蓄電器を考案している。

1836 年になると英国の J. ダニエルがガラス容器に素焼きを入れ、内側に硫酸亜鉛液と Zn を、外側に硫酸銅液と Cu を入れた電池を発明している。Zn が負で Cu が正、起電圧は 1.1 V だった。電圧が安定していたため、この電池はその後の電話機に広く用いられるようになっていった。これをダニエル電池という。

日本で電池を最初に作った人は佐久間象山である。彼はオランダの本を参考に、電信機用ダニエル電池を 1850 年に作っている。

#### 現在の電池の基礎が確立へ

1859 年になるとフランスの G. ブランテが  $\text{PbO}_2$ (二酸化鉛)と Pb(鉛)の板の間に電解液として希硫酸を入れた本格的に充電できる Pb 蓄電池を発明している(右掲の「島津によって開発された亜酸化鉛粉」参照)。超電圧は 1.75 V (公称電圧 2.0 V) である。これは電解液に酸を利用してはいるが、アルカリを用いるものもその後登場してきた。

やがて正極は水酸化ニッケルで負極に Cd(カドミウム)粉末を用い、電解液に苛性カリを用いたタイプをスウェーデンのユングナーが 1899 年に発明し、Ni-Cd 蓄電池の元になっている。公称電圧は 1.2 V である。さらに正極に Ni、負極に水素を、電解液として強アルカリを使った公

称電圧 1.2 V の Ni 水素電池へと発展していった。

1868 年になると、フランスのルクランシェが正極に炭素棒と  $\text{MnO}_2$ (二酸化マンガン)、負極に Zn、電解液に塩化アンモニウムを用い、さらに分極を防ぐ減極剤として  $\text{MnO}_2$  を用いた乾電池を発明している。超電圧は 1.5 V である。日本でも屋井先蔵が 1885 に乾電池を作っており、1894 年から始まった日清戦争で電信機用電源として使われていた。

その後、電解液にアルカリを使用したアルカリ電池が登場してきた。電池の性能を改善したのが減極剤の登場だが、A. ボルタは残念ながらこれに気がつかなかった。

電圧の単位をボルト「V (Volta の頭文字)」というのは、彼の功績をたたえるためである。1908 年の IEC(国際電気標準会議)で決定した。その後、水素・酸素燃料電池が登場しているが、電力と同時に水がとれるということで宇宙船に採用されている。

さらに 1991 年、ソニーによって製品化されたのが Li(リチウム)イオン電池である。これは容量が Ni-Cd 電池の 3 倍、容量が同じなら重量が半分以上になり、かつ環境にやさしい。正極材にはコバルト酸リチウムを用いたものと、マンガ酸リチウムを用いたものがある。

ただし、この電池は蓄電容量が大きいため、安全面で考慮する必要がある。この電池は CMOS RAM のメモリ保持電源や携帯電話用として利用されている。

電池では、使いきりタイプの Mn 電池やアルカリ電池を 1 次電池、充



電できるタイプの Ni-Cd 電池や Ni 水素電池, Li イオン電池を 2 次電池と呼んでいる。現在, 1 次電池ではアルカリ電池が, 2 次電池では Li イオン 2 次電池が注目されている。

今日, 電池はノート・パソコン, 電子スチル・カメラ, 携帯電話などの携帯機器にとっての必需品であるばかりでなく, キー・デバイスとして今後のエレクトロニクスにおいて, ますます重要さを増してくるだろう。

## コンデンサ 電気を蓄えられるのだろうか

1737 年になると, デンマークの J. テサグレスは, ガラスと真鍮<sup>しんちゅう</sup>とを接触させたのち, 摩擦によってガラスを帯電させると, 真鍮にも電気が発生し, しかもこの電気が逃げないということを発見した。

真鍮は導体だが, この導体の電気はガラスという絶縁物で分離されて

おり, このため電気が蓄えられるということをこの実験は初めて明らかにしたのだった。しかし理由はよくわからなかった。コンデンサという蓄電現象がこのとき初めて発見されたのである。

電気は蓄えられないのではないかという従来の科学者の予測はくつが

## 島津によって開発された亜酸化鉛粉

日本人気質として, 未知の技術そのものを考案することはあまり得意でないようだ。これには異論のある人もいるだろう。

それはさておき, 未知の技術に対する素晴らしいヒントがすでに考えだされているものの, このヒントを実現する方法がきわめて困難だという場合, 日本人はこの解決に強い執念を燃やし, ついに世界的な解決方法を編み出した技術者が何人もいる。

K. F. ブラウンの観測用ブラウン管を改良し, 「イ」字を映すブラウン管を考え出した高柳健次郎, G. M. マルコーニのアンテナを改良して指向性を鋭くした八木アンテナを考案した八木秀次などが思い浮かぶ。そのなかの 1 人, G. ブラウnte の考案した Pb (鉛) 蓄電池において, 性能を高めるために重要な働きをする Pb 粉製造方法を考え出した島津源蔵にスポットを当ててみよう。

彼の父は, 理化学機器の製造・修理をする島津製作所を創立していた。彼は父の手伝いをしていたが, 父が 1894 年に亡くなったため, 仕事を引き継いでいる。もともと彼の名前は梅治郎だったが, このとき父と同じ源蔵と改名した。

やがて彼は, 日本で初めて Pb 蓄電器を 1904 年に試作している。この電池の構造は, 正極に  $PbO_2$ , 負極に Pb, 電解液として希硫酸を用い, 主として海軍に納入していた。

さて, この電池の充電能力を高めるには, 負極の Pb の表面積を可能な限り大きくしなければならなかったことがわかっていった。試作した電池はこの点が解決できず, 見劣りがあったのだ。

これを解決するため, ドイツでは Pb を粉にして表面積を増大させるべく研究中であるとの情報を得た。だがドイツといえど, Pb は粘りがあるため, おいそれとは

解決できずにいたのである。

彼はあえてこれに挑戦したのである。試行錯誤のうえ, 回転機に空気を送って酸素と結合させ亜酸化鉛を作る反応性 Pb 粉製造法をついに発明したのだ。

これによって Pb 電池の充電能力は飛躍的に向上した。この発明は電池史上でもまれにみる世界的大発明となった。

やがてこの特許は, 米国, 英国, フランスにも出願され, 日本の技術レベルを高めることとなったのである。

この電池によって, 1920 年から始まったラジオ受信機用 (初期のラジオ受信機はすべて電池式だった) や, 自動車用に需要が拡大していった。なお, 島津製作所は電池の注文が多くなってきたため, 1917 年に日本電池株式会社を設立し, 島津源蔵の頭文字をとって, GS バッテリーという商品名で売り出している。

えされた。常識は必ずしも真理ではないということだ。

では、能率よく電気が蓄えられないものだろうか。多くの科学者が挑戦している。なんと8年後の1745年、ドイツのE. グライストは、導体の帯電状態が失われるのは電気が空気に吸収されるためであると考え、絶縁物によって、より安定に帯電状態を保持しようと考えた。J. テサグレスの絶縁物に注目したのだ。だが具体的な方法は浮かばなかった。

彼はある日、ガラス瓶のなかに水とクギを入れ、クギの一端は金属棒を介してガラス瓶の外に出し、ガラス瓶の首の部分には持ちやすいように鉄片の把手を取りつけた実験道具を作ってみた。

電気を蓄えるということを意識したわけではなかったが、金属棒に火花放電を接触させてみた。しばらくして片手で鉄片の把手を持ち、他の片手が金属棒に触れたところ、ものすごい衝撃が彼の身体に走った。なんと電気が、鉄片の把手とガラスという絶縁体をはさんで水という導体

の間にたまっていたのである。

持ちやすいようにと考えた把手が思わぬことを見いだす発端となった。これは偶然というチャンスに恵まれてラッキーだったという考えもあるが、そうではない。偶然も努力のたまものだったのだろう。鉄片の把手はやがて錫箔となっていった。

### コンデンサの原型「ライデン瓶」

これとはまったく無関係にその翌年の1746年、オランダのP. ミュッセンブルークは、水に電気を吸収させこれを絶縁物で包んでしまおうということで、同じような実験道具を考えだしている。彼はオランダ・ライデン市にあるライデン大学の教授でもあったことから、この実験道具は「ライデン瓶」と呼ばれるようになっていった(図3)。ライデン瓶の考案によって、ようやく電気が蓄えられるようになったのである。

当時、電気はガラスや琥珀といったそれぞれの物質ごとに異なるものと考えられていた。このライデン瓶と静電気とを組み合わせた実験で、

電気とは物質に固有のものではなく共通であることがわかってきた。こうして物質と電気とを分離して考えるようになった。

しかし、摩擦発電機やライデン瓶は見せ物としてしか、その利用価値はなかったのである。見せ物とは、見物人にライデン瓶に手を触れさせ、ショックで飛び上がらせるという危険きわまりないものだったという。

日本でも、摩擦発電機とライデン瓶は、医療用や見せ物として使われていたが、相撲史に名をとどろかせた雷電<sup>らいでんためもん</sup>為右衛門は、雷のような火花を散らすライデン瓶から名前を付けたといわれている(p.184の「雷電為右衛門は電気を知っていた」参照)。

1773年、英国のH. キャベンディッシュはコンデンサに蓄えられる電気量が面積に比例し、厚さに反比例することと、空気よりも大きい誘電率をもつ物質があることを発見している。誘電率という概念が、ここから登場するのである。

1782年、イタリアのA. ボルタは、二つの金属板の間に絶縁物をはさみ、上の金属板には絶縁物による取っ手をつけ、下の金属板は接地した。上の金属板に静電気を加えたのち、上の金属板のみを引き離すと、下の金属板から誘導された電気が上の金属板に生じる。この電気をライデン瓶に移すということを繰り返した。

この結果、電圧が繰り返し回数に比例して上っていく。この電圧は、金属板の面積や絶縁物の厚さにも依存することを見つけている。これは一種の検電器でもあった。これを彼は「コンデンサ・トレ(蓄電盆)」と呼んだ。検電器として使うときは、

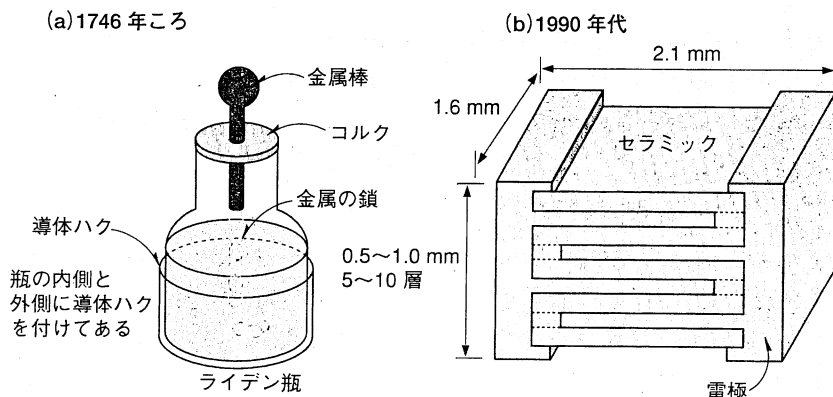


図3 コンデンサはライデン瓶がルーツ 初めて作られたコンデンサは、ガラス瓶に水を入れていた(a)。これを地名をとってライデン瓶と呼んだ。(b)は現在使われている積層セラミック・コンデンサ。

ガラス容器の内部に2枚の箔が入っている。電荷  $Q = \text{容量 } C \times \text{電圧 } V$  の関係から、この装置で、上の金属板を引き離すと、電荷は一定で、容量が減少するので、電圧が上昇し検電器の箔が開きやすくなるのである。

その後、電気を蓄積する現象がコンデンサと呼ばれるようになった。やがて金属板間にニスを塗ったコンデンサが誕生したのである。

### コンデンサの開発が始まる

電気を蓄える能力はどのように表したらよいのだろうか。そのきっかけを作ったのがフランスのC. クーロンである。彼は1785年、電気の力を自分で開発したねじり秤で測定し、金属に吊るした鉄球に同種の電気を与えたときに生じる反発力から、斥力が距離の2乗に反比例するという「クーロンの法則」を発見した。

これは1666年に英国のS. ニュートンが二つの物質の間に生じる万有引力を発見したのと同じく、重要な意味をもっていた。しかもこれは磁石の間にも生じることもわかったのだ。そのうえ、そのころ、電気は1種類の流体しかないというB. フランクリンの説は間違いで、+と-の電気があること、電気の量によって反発力と吸引力の大きさが変わることが明らかになった。

電気量、つまり電荷の単位をクーロンと呼ぶようになったのは、1881年、第1回IEC(国際電気標準会議)においてであり、彼の功績を称えるためにつけられたのだ。1833年になると英国のM. ファラデーが、電気分解において電気量と析出量との間に比例関係があることを発見した。

これを「ファラデーの法則」という。彼は電荷のことを伝導力と呼んでいた。

ここから電圧を1V高めるために必要とする電気量が1クーロンとなる導体の電気容量を1ファラッドと呼ぶようになった。1881年の国際電気標準会議で採択されている。ようやく電気容量、つまりコンデンサに対する単位が決まったのだ。

そのころ世の中では有線によるモース信号用の電信装置が、やがて電話用の手動交換機が実用化し始めていた。このような装置に、コンデンサは、リレーなどの電気切断時における電気火花を防ぐために用いられ始めている。さらに照明など強電関係に大容量コンデンサの出現が望まれるようになってきていた。コンデンサがラジオ受信機など弱電関係に、本格的に注目されるようになったのはずっとあとのことである。

### 続々と登場してきたコンデンサ

このころのコンデンサの用途は主として電力用だったのである。1890年には、ケイ酸マグネシウム粉末を焼結したセラミック誘電体によるセラミック・コンデンサが、1891年にはペーパー・コンデンサが、1894年には電解質を介して金属表面に誘電体酸化物を形成した対向平板電極による電解コンデンサが登場している。

電界コンデンサの基本原理は、すでに英国のC. ホイトストンによって1855年に考案されていた。巻いた陽極を円筒ケースに入れたコンデンサにしたのは米GE (General Electric) 社である。1908年のことだった。

この電解コンデンサの容量は大きく、主として電力用誘電発電機の起動用として威力を発揮したのだった。100年後の1956年、この技術の延長線上として、米国のD. マックリーンが、Ta (タンタル) 固体電解コンデンサを発明している。

さらに交流発電機用として、大容量でかつ高圧のコンデンサが必要になってきた。この要求に対して、1894年には紙に油を含浸させるオイル・コンデンサが登場している。これはラジオ受信機の電源用として広く使われるようになっていった。このころからコンデンサの理論解析が進み、理論面から、小型で大容量のコンデンサを作るには高誘電率の材料を探さなければならないことがわかってきたのだ。

1902年になると、W. シュミットによって高誘電率をもつ金紅石(天然ルチル: チタン酸化物  $\text{TiO}_2$ ) が発見され、これを用いた酸化チタン磁器コンデンサを独ジーメンス社が1933年に発売している。これは酸化チタンを含有したセラミック材を成形のうえ焼成し電極をつけたものである。セラミック・コンデンサの始まりである。

この情報はいち早く日本にも伝わり、1934年には電気試験所が研究を開始した。このなかで小川若三郎と森田静太は「チタニウム磁器製造法」を発明している。この特許はドイツのもつ特許と争ったが、見事に勝つことができた。森田静太は1939年、河端製作所に入り、日本で初めての酸化チタン磁器コンデンサが製品化されている。

そのころ、日本のエレクトロニク

スは軍事一色だった。1931年に満州事変が、1937年には日華事変が勃発するなど日本を取り巻く国際環境はきわめて不安定だったからである。さらに1939年9月1日には欧州で、ドイツがポーランドに侵入するなど戦争の火蓋が切られ、やがて第二次世界大戦へとエスカレートしていった。

この状況下で日本では、国家の存

亡をかけて、無線機やレーダなどの開発が進められることになった。ここで高周波回路に使える酸化チタン磁器コンデンサが重要となってきた。

やがて日本電気や、日本無線機、川西機械(現富士通テン)も製造を始めている。1943年には佐藤航空無線器材製作所(現太陽誘電)が、1945年には村田製作所(設立は1944年)が酸化チタン磁器コンデンサを生産

している。

このなかで1942年に米国のE. ウェイナとA. サロモンが、1944年に日本の小川建男と和久茂がほぼ同時に強誘電性のチタン酸バリウム(チタバリ)を発見した。小川らは当初、容量の温度変化を小さくしようという目的で研究していたが、あるとき、誘電率温度変化特性曲線にコブが生じることに気づき、これがきっかけ

## 雷電為右衛門は電気を知っていた

台風5号が今夜関東に最接近するという1996年7月10日午後6時、雷電為右衛門の史跡を守る長野県東部町教育委員会で教育長の長岡克衛氏から無双力士「雷電為右衛門」の話を聞く機会を得た。

なぜ雷電為右衛門というしこ名で呼ばれるようになったのか、ぜひ知りたかったからである。日本一強いといわれる雷電は、1767年

に長野県東部町滋野(旧信濃国小県郡大石村)に生まれた(図A)。聞くところによると、力持ちで親孝行な少年、太郎吉(のちの雷電)は、夏のある日、突然、雷鳴とともに降り始めた夕立のなか、外で風呂に入っていた母親を風呂桶ごと抱えて家に避難させたというから、すごい力持ちだった。

実は雷電が生まれる21年前の1746年、日本から遠く離れたオランダのライデン市にあるライデン大学では、電気を蓄えることのできる画期的な実験道具を世界で初めてP. ミュッセンブルークが考案し、ライデン瓶と呼ぶようになった。このライデン瓶に摩擦発電機から電気を送り込むと、雷に似た強い火花放電が得られるのだ。ライデン瓶はやがて、オランダから長崎へと運ばれ、摩擦発電機と一緒に幕府に献上され、日本人に知れるようになった。

1773年、彼が6歳になったときのことである。そのころ江戸では

ライデン瓶は雷の発生する機械だと話題になっていたという。

果たして太郎吉はライデン瓶を知っていたのだろうか。

太郎吉は1784年、浦風という人物に才能を見込まれ、17歳で江戸相撲に入門した。実は、その後、太郎吉は長崎を訪れているらしい。おそらく彼は、ライデン瓶を知る機会があったのではなかろうか。松江侯から拝領した彼の化粧まわしには、雷の絵が描いてある。

雷電というしこ名とライデン瓶との関係は明確な答えが得られなかったが、ロマンに満ちた楽しい話を聞くことができた。

ちなみに雷電の勝率は96.2%で、16年(27場所)の間、大関の地位を保持し、惜しまれつつ1811年に引退した。現在は、東部町滋野に生家が復元されている。

なお、東部町牧家に日本最初の電池開発や電信技術開発に情熱を燃やした佐久間象山の書いた碑が建立されている。



図A 雷電為右衛門と雷の化粧まわし

になって、さらに優れた強誘電性を発見したのだった。

内容は異なるが、エサキ・ダイオードの順方向特性のコブの発見と似ている。技術者は常に実験やデータに細心の注意をもってあたり、そこから差異に気づく能力をもたねばならないのだ。このことに気づけば幸運の神が微笑みかけるだろう。

やがてここから酸化チタン磁器よりも性能の良いチタン酸バリウム磁気コンデンサ(チタン・コンデンサ)が誕生した。まもなく1945年に第二次世界大戦は終わり、1947年ころから日本にラジオ・ブームがやってきている。これに対応するため、村田製作所はチタン・コンデンサの量産を開始した。このようにしてセラミック・コンデンサは電子機器の重要な電子部品となったのである。

1956年になると、高周波回路向けに旧西ドイツのバイエル社がポリカーボネート・フィルム・コンデンサを開発し、セラミック・コンデンサとともにラジオ受信機やテレビ受像機などに用いられている。

ラジオ受信機やテレビ受像機用のコンデンサは初めのころ、ラグ板へ直接ハンダ付けしたり、プリント配線基板のスルーホールに接続するためにリード付きだったりが、1970年ころから表面実装技術(SMT: surface mount technology)の登場によって形状は大きく変わり、チップ型へとなっていった。

チップ型積層セラミック・コンデンサが携帯ラジオ受信機に用いられたのは1975年からである。ラジオ・ブームが一段落し、カラー・テレビのブームが訪れ、コンデンサの需要

が急増したのは1967年ころからだった。

さて、コンデンサは、ラジオ受信機やテレビ受像機に使う高周波や低周波の増幅器のバイパス用やカップリング用として使われてきたが、このほかにラジオ受信機やテレビ受像機と同調回路用バリコン(バリアル・コンデンサ)や電源リップル用高圧・大容量コンデンサとしても必要だった。バリコンの需要拡大に対応して、1948年にアルプス電気が設立され生産を開始した。

1955年になると、携帯型ラジオ用の超小型ポリバリ(ポリスチロール・バリコン)をソニーとミツミ電機が共同開発し、部品の小型化の糸口を作っている。このようにしてバリコン市場では、日本が世界市場を独占するまでになった。やがて技術は進み、バリキャップ(可変容量ダイオード)が登場し、同調回路が激変した。

ラジオ受信機は初めのころ、増幅器に真空管を使っていた。高圧を必要とする。ここには、直流電源を整流したのち、平滑回路を通すタイプが中心で、オイル・コンデンサやAl電解コンデンサが用いられた。

やがてトランジスタやICの登場によって低圧となり、直流電源はAC-DC(交流-直流)コンバータやDC-DC(直流-直流)コンバータか

ら得るようになった。増幅器では主としてセラミック・コンデンサやフィルム・コンデンサが、AC-DCコンバータやDC-DCコンバータではAl電解コンデンサが使われている。だが従来のAl電解コンデンサは直列抵抗が大きいので、発熱がしばしば問題となっていた。

この問題解決のために、1977年、三洋電機の円羽信一は、電解液の代わりに画期的な有機半導体を用いたAl電解コンデンサ「OSコン」を発明している。有機半導体は導電率が高い。しかも直列抵抗が小さく、高周波におけるインピーダンスが低く、長寿命という特徴がある。

このほか、新しいコンデンサとして電気2重層を利用した大容量ファラッド・コンデンサも開発され、テレビ受像機のチャンネル記憶やその他の回路のコンデンサ・バッテリーとして用いられるようになった。まるで電池のように使えるのである。最近では、電気自動車への応用が期待されているという。

1990年ころから電子回路はアナログからデジタルへと大きく姿を変えつつある。このなかでコンデンサは雑音防止用としてますます重要視されていくことだろう。さらに優れた新しいタイプのコンデンサの出現が望まれている。

## 抵抗器

### 淋しい晩年を過ごしたオーム

19世紀前半の欧州では、実験によって結果を出すことは最もレベルの低い方法で、すべて頭のなかで論理的に考える思弁哲学による方法が

まかり通っていた。このような状況下で、G. オームはあえて実験に挑戦している。彼の勇気ある行動は立派だった。

実は、G. オームに先立ち、英国の H. デーヴィは、ボルタの電池を基に、物質の伝導度について研究していた。このなかで伝導度測定を電気分解の量で行っていたため、測定ときに生じる内部抵抗に気づかず、物質の伝導度とは何かということに對し、結論を導き出すことができなかった。電流計といったものは存在していない時代のことである。

これに對し G. オームは、一定電圧となる、T. ゼーベックが発見した熱起電圧を利用し、伝導度ではなく、導線と回路全体に対する抵抗に

注目したのである。

ここで用いた熱起電圧として  $0^{\circ}\text{C}$  にしたビスマス (Bi) と  $100^{\circ}\text{C}$  にした Cu を用いており、高感度のガルバノ・メータによって電流を測定していた。このとき外部の導体の抵抗のほかに、内部抵抗のことも考慮していた。これが成功のポイントとなったのである。

水が高い所から低い所へ流れるのと同様に、電流も高い所から低い所へと流れる。この差が電圧だということは、現在ではだれもが知っている。しかし、そのころは、まだ電圧の概念がなく、ガラス電気と樹脂電気の間で一定の力が働くと考えていた時代だった。

こういう状況で熱起電圧は一定の力を出す基準となることを G. オームは知っていた。この G. オームの力、ボルタの分離の力、M. ファラデーの伝導力は、やがて統一され、ようやく電圧という概念へと育っていくのである。

さて彼は、この実験装置を用いて電気の流れを、フランスの J. フーリエの考えた熱の流れにたとえ、電線の太さや長さを変えて実験を行なったのである。何回も実験に失敗したが、やがて力 (電圧) と抵抗の関係をつかみ、その後、電流  $X = \text{電圧 } V / \text{抵抗 } R$  というオームの法則を導き出した。当時は、電流を  $X$  と表記していたが、やがて現在の  $I$  となるのである。1826 年のことだった。

導体には、多くの種類があり、それぞれさまざまな抵抗値をもつことがはっきりしてきた。だが、世紀の大発見となったオームの法則に對し、思想哲学をもつ科学者の反応はきわ

めて冷たかった。15 年以上もオームの法則は無視されたのだ。

1841 年、彼が 54 歳のとき英国王立協会 (ロイヤル・ソサイエティ) から表彰され、ようやく報いられた。この賞はコプリ賞といい、現在のノーベル賞に相当するものだった。

現在、抵抗値の単位はオーム ( $\Omega$ ) であるが、彼の功績をたたえるためである。これは 1908 年の国際電気標準会議で決定している。

### 抵抗器の発明へ

その後、1874 年にドイツの K. ブラウンがオームの法則に従わない物質を発見し物理学者を驚かせた (半導体である)。次第に、物質における抵抗の性質が解明されていった。このなかで実験がますます重要視され、実験道具の一つに抵抗器という部品が必要になってきたのである。

1884 年、ウェストンは Cu、マンガン、Ni 合金を用いて高精度なマンガニン抵抗器を作っている。

その後、米国の L. ブラッドリが電池の電極用にカーボンとゴムを混合して成形したものを 1885 年に開発している。一見して抵抗器とは関係ないが、やがて誕生するソリッド抵抗器の走りだった。抵抗値を下げるにはカーボンを多くすればよいということが、その後、明らかになっている。

1888 年になるとイザベリン社が Cu と Ni の合金線を用いた精密な巻線抵抗器を開発、さらに 1898 年、H. レオナルドが磁器棒上に抵抗線を巻いてその上にホウロウを焼き付けた電力用ホウロウ抵抗器を商品化している。このころ欧州と米国では

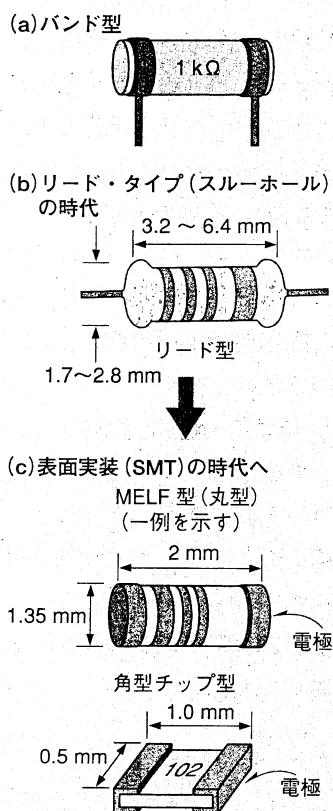


図 4 抵抗器の形状は大きく変化 バンド型からリード・タイプ (スルーホール) に、そして表面実装技術 (SMT: surface mount technology) の時代になった。SMT 部品では、当初、角型が丸型か、で議論が沸騰した。ついに角型が勝ち抜いた。

モールス電信機が広く普及し始めており、電源用抵抗器が注目されてきた。その後、1906年には真空管が登場し、電子回路が次々に考案され、抵抗器の必要性がますます高まった。

1919年にドイツのK. クリュエガは石英の上にNiとCr(クロム)などの合金をスパッタで蒸着したのち、細く削って(カッティングして)抵抗値を調整する金属皮膜抵抗器の特許を出願した。ようやく精度の高い低コストの抵抗器が得られるようになったのだ。

さらに5年後にはドイツのS. ロウエがガラス棒にNiを付け、真空中で加熱することで金属合金を蒸着する薄膜抵抗器を開発している。この間に米国のM. フントは、1922年、作ることが困難だったカーボンにフィラとしてシリカを混合した高抵抗カーボン・グレーズ抵抗器を考案している。

#### ラジオが抵抗器の開発を促進

米国で1920年から始まったラジオ放送は、4年後にはなんと500局以上が開局し、ラジオ受信機は爆発的に売れている。

初期のラジオ受信機の増幅器は真空管と真空管との間をトランスによって結合していた。抵抗器はあまり使われなかったが、やがて、より軽量で小型で音質の良い抵抗器とコンデンサによる増幅器へ、さらに電源も電池式から交流電源を整流して直流に変換する方式へと変わっていった。ラジオ受信機の生産急増に伴って、抵抗器の需要も急増し始めている。

1925年、米国のH. ヘンダが炭素

コンポジション皮膜抵抗器を開発している。さらに同じ年、米国のL. ブランドリがラジオ用としてグラフアイトやアスベストの粉末などを混合して熱処理を行なったソリッド抵抗器を、1938年になると米アーレン・ブラッドリ社が炭素粉末と他の素材との混合によるソリッド抵抗器を作るようになった。

日本がこの抵抗器の存在を知ったのはシリコン・オイルと同様に、日本軍によって撃墜されたB-29爆撃機からだった。早速、日本で検討が始まったが、抵抗値が不ぞろいになり、実用化できなかった。ソリッド抵抗器は断線がなく高圧に適した丈夫であり、真空管回路には最適だった。しかし抵抗値精度を出すためのトリミングができないという欠点をもっていた。日本で生産できるようになったのは1960年ころからである。

その後、ソリッド抵抗器市場に1942年から米エアコ・スぺア社(1980年にKOAが買収しコー・スぺア・エレクトロニクス社となる)も参入し、大量生産が行なわれている。

これに対抗して欧州では、真空中で炭化水素を送り、熱分解して炭素皮膜を析出する炭素皮膜抵抗器をドイツのC. ハートマンが1925年に開発し、米国と抵抗器市場を争った。これはソリッド抵抗器とは異なり、精度を高めるためのトリミングが施せるのである。

1931年には米コーニング社のJ. リットンが絶縁体の表面に塩化錫を吹き付けて皮膜を形成する酸化金属皮膜抵抗器の基本技術を開発した。その後、同社のJ. モッケルやJ. デービスが、この基本技術を改良し、

より耐熱性と耐電力性の優れた酸化金属皮膜抵抗器を1947年から実用化していった。

1949年、米国のV. アレンがNi-Cr系合金による精密高抵抗を開発している。この技術は30年後、スパッタによる薄膜チップ抵抗器へと発展していった。

日本では1932年、古河電気が炭素塗抵抗器を、1940年には興亜(現在のKOA)が、1958年には東洋電具製作所(現在のローム)が、いずれも炭素皮膜抵抗器の生産を始めている。

1975年ころになると米国の主力製品だったソリッド抵抗器は日本の炭素皮膜抵抗器に性能と価格で差をつけられ、やがて衰退していった。これと歩調を合わせるように、米国の抵抗器メーカは一部を除いて撤退し、日本から輸入するようになった。

#### 抵抗器の新しい動き

電子装置が複雑になるにつれて、多くの部品を必要とするようになってきたため、部品の取り付けが問題となり始めていた。1951年になると、米国ではプリント配線基板が導入され、初めは手で取り付けていたが、1954年ころからプリント配線基板への電子部品の自動挿入が始まった(図4)。当然、抵抗器もこれに対応してアキシアル型、さらにラジアル型のテーピングを行なうようになっていった。

1958年、抵抗器に新しい技術が登場してきた。米国のJ. アンドレアがハウケイ酸鉛ガラスとパラジウム銀(Pd-Ag)グレーズによる厚膜抵抗器を開発したのである。こののち、工程の安全性や再現性などから酸化



ルテニウム系に代わっていった。これは従来の抵抗器製造と異なり、セラミック基板上に抵抗ペーストをスクリーン印刷し、高温で焼き付ける方法で製造するので小型化に適している。このためリードレスのチップ抵抗器として、その後の代表的な抵抗器となっていった。1958年のことで、1年後には電子部品に革命をもたらすICが誕生している。

当初は注目されなかったが、ICの実用化とともに、チップ部品による実装技術、つまりSMT (surface mount technology: 表面実装技術)の実現が叫ばれるようになってきた。SMTは実装技術の革命といっても過言ではないだろう。SMTにチップ抵抗器は最適だった。

実は、SMTの始まった1974年ころ、抵抗器業界では角丸戦争という技術対立があった。抵抗器の外型を丸型にするか、角型にするかで業界は競争していたのである。

やがて1980年ころから角型チップの自動搭載機が登場し、チップ抵抗器は角型となっていった。丸型をMELF (metal electrodes face bonding) というが、いまでも需要が若干ある。

1990年代に入ってから日本のバブル崩壊に伴い、ラジオ受信機やテレビ受像機の海外生産シフトが加速した。コスト競争に勝つためである。これに伴い、いまや東南アジア諸国での抵抗器生産がたけなわである。さらに回路自体のIC化やデジタル化の潮流のなかで、抵抗器の必要性は徐々に減っている。抵抗器は21世紀に向けて新しい展開を模索しなければならないだろう。

## コイル ようやく謎が解け、磁気を発見

1820年はエレクトロニクスにとって実に輝かしい成果が次々に発表された年だった。つまり、電気と磁気との間に相関があるのかないのか、と長年議論していた問題への明確な回答が得られたのである。

G. ガリレイが「磁気が存在する」、W. ギルバートが「地球に磁気がある」と言いだして以来、200年以上にわたって議論されてきた。しかしなんら解決をみなかったのである。

1820年の7月、デンマークのH. エルステッドはボルタ電池の両端にFe(鉄)やPt(白金)線を接続すると、この電線に沿って磁気が生じるかもしれないと予想し、実験したが、確認できず失敗した。

やがてPt線の上と下に磁針をおいたところ、針の方向が電線の下で逆になることから、磁気の強さは電線の材質によらないこと、磁気は絶縁物を通して働くことなど両者の相関関係が初めて確認されたのだ。これは科学者の間にきわめて大きな反響を呼び起こした。だが磁気そのものの性質は不明だった。

これによって初めて電気から磁気への作用が明らかになったのである。この逆の作用は、M. ファラデーによって発表されるまで、さらに10年近くの歳月が必要だった。

当時、郵便などの通信手段が不備だったためだろう。H. エルステッドの論文はなんと2カ月くらいたって、フランスのパリにいたJ. ビオとF. バザールの手元によりやく届いた。早速、2人は、電流の強さと方

向、磁界の強さと方向について研究を重ね、9月中にはビオ・サバールの法則が発表されている。この法則は電流の強さと針金の形状との間に生じる磁界の強さと方向を示すもので電流によって生じる磁界が距離 $r$ の2乗に反比例するというものだった。こうして電気と磁気との相関が明らかとなり、謎が解け始めたのである。

その後、同じ1820年、フランスのD. アゴラはFeの棒に導線を巻きつけて電流を流すとFeが磁化すること、Feは一度磁化すると永久に磁化していることを発見し、ドイツのJ. ボッケントルフは導線を多く巻くと巻数に比例して磁気作用が強くなることを見いだしている。

さらに同年、フランスのA. アンペールはH. エルステッドの情報をもとに、電流の流れている2本の導線間に働く力によって相互作用が生じることを見だし、電気力学の法則を確立した。このとき陽極から陰極の方向を電流方向と定めると、その方向は磁石の振れによって決定する。つまり電流は、磁気の振れに対して右手の親指方向になるという「右ねじの法則」を編み出している。

### アンペールとファラデーが糸口を

A. アンペールは、流体が物質のなかをある速度で流れるが、それを電流という言葉で定義している。初めて電流の概念が登場したのだ。この電流をIntensityと呼び、頭文字をとってIで表すようになった。

その後、彼は2本の電線に同方向の電流を流すと、電線間に引力が、逆方向では斥力が働くことを見いだした。つまり電流同士で力が働くというわけだ。彼は磁気というもの分子内部に環状の電流が流れることによって生じる一種の電気力であると考えた。電気も磁気もすべて電気力学で説明しようとしたのである。

その結果、彼は磁気そのものが単独で存在することを認めなかった。彼の考えていた電気力学による分子電流の考え方は、100年後、電子の軌道運動による磁気モーメントへとつながっていくのである。

1821年、ドイツのT.ゼーベックはFe粉を使って電流の周辺に磁気の同心円模様ができることを見いだしている。ここで初めて磁力線が明らかとなる。これに端を発し、電気力学は消滅し、M.ファラデーの電磁誘導理論による電磁気学へと発展していく。1820年に発見されたビオ・サバールの法則は、2流体説では説明できず、1流体(現在の電子)説へと変わっていた。

#### 天才のアイデアに続く改良が必要

現在、電流は、A.アンペールの定義とは異なり、電子が陰極から陽極に流れることによって生じることがわかっているが、当時はまったく不明であり、仕方がなかった。A.アンペールは、新しくガルバノ・メータを考案している。これを用い、導体に電流を流したときに生じる磁界を磁針の振れで検出し、電流の大きさを測定したのである。

さらに導線をらせん状に巻いて地磁気の研究をしている。これをソレ

ノイドと呼んだ。

以上のことが1820年7月から12月にかけてのわずか6カ月間に発表されたのだった。まさに堰を切ったようにコイルに関する基礎技術が、この年に築かれたのだった。

1824年、フランスのD.アラゴは磁針の真上で金属板をゆっくり回転させると磁針が回り始めることを見いだした。これを「アラゴの円盤」という。1831年には英国のM.ファラデーが磁石または電流の流れている針金のいずれかを固定すると、他方が回転するというモータの原理を発見している。

やがて彼は1831年、電磁誘導の法則を、さらに1837年、電気の力が媒体を伝わることと、電気力は媒体のなかを有時間で伝わると発表した。ここで力線という概念が登場している。これは磁気についてもいえる。すでにドイツのJ.ガウスが1829年、電気力線や磁気力線が1点からわき出しており、これをベクトルで表現する「ガウスの法則」を考えだしていた。

このように一時期に集中して理論や技術開発が急速に発展するという現象は、量子力学や、真空管、トランジスタ、ICなどが発明されたときにも起こっている。

1人の天才的な科学者のあとに、これをベースにした飛躍的な発展があるものだ。価値ある情報をいち早くキャッチし、そこから埋もれた宝を探し出すことが、科学者の役割だろう。単なる情報屋になるのではなく、科学者は自らチャレンジすべきだということを示唆しているのではないだろうか。だが、その成果はす

ぐには人に認められないものだ。A.アンペールもG.オームと同様にその1人だった。

電流の単位に使うアンペア「A」は、A.アンペールの功績をたたえたもので、1908年のIEC(国際電気標準会議)で採択されている。

#### 自己誘導を発見したJ.ヘンリ

英国のW.スタージョンはA.アンペールの地磁気用ソレノイドについて実験中、鉄芯に導線を巻き電流を流したところ、強い磁力が発生した。まったくの偶然だったという。このようにして電磁石が発明されたのである。1823年のことだった。

1831年になると、英国のM.ファラデーはH.エルステッドとは逆に、電流によって電気の誘導が起こるはずだと考えたのだ。つまり磁気から電気への作用があるのではないかと考えた。

試行錯誤ののち、Feの環の2カ所に導線を別々にコイル状に巻き、その一つに電池から電流を流し、ほかの一つに検流計をつけてみた。コイルに電流を流した瞬間のみ検流計が振れ、電流を止めた瞬間には検流計が逆に振れるのである。さらに一定電流を流しながらコイルを動かしたり、磁石を動かしても電流が流れるのである。こうやって電磁誘導の法則が発見されたのだった。

さらに1832年、「電磁誘導は磁気線と導線との相対的動きで起こる」、「誘導される電流の大きさは伝導度に比例する」と発表した。ようやく磁気と電流との関係が明確になってきた。

実は、米国のJ.ヘンリは電磁誘導

の実験を M. ファラデーよりもなんと 1 年も早く発見していた。だが都合で発表が遅れてしまったのだった。この実験結果を 1832 年に発表しているが、このなかに自己誘導、つまり電磁石が電流を切断したときに、反対方向の電流が生じることを見つけている。1830 年のことだった。彼はこの結果を「インダクティブ・アクション」と呼んだ(図 5)。ここからコイルをインダクタというようになった。このことから相互誘導および自己誘導の単位を 1893 年の国際電気標準会議でヘンリ「H」と呼ぶことに

なった。  
1834 年ドイツの H. レンツは M. ファラデーの電磁誘導による誘導起電力について、レンツの法則を発表している。

#### 電磁リレーで増幅器を実現

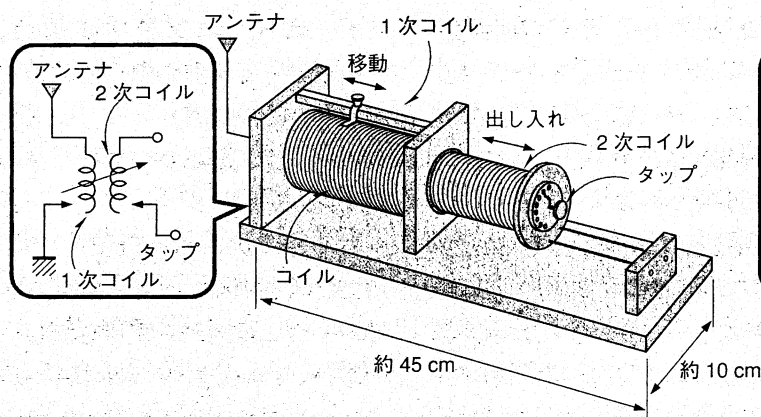
その後、1835 年、J. ヘンリは通信の実験中にコイルに鉄片がまとわりつくという失敗からヒントを得て、継電器、つまり電磁リレーを発明している。これはリレー増幅器ともいう。1 次側の励磁コイル電流と 2 次側の接点から得られる電流とを比較

すると 100 倍近くになるのである。

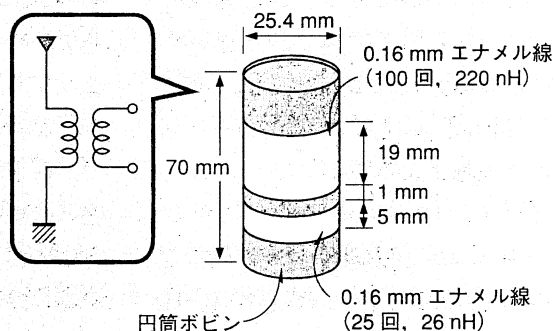
増幅手段のなかった当時、この電磁リレーは直流しか増幅できなかったが、新しく開発されつつあった電信機を発展させる基幹部品となっていた。その後、コイルの一つである電磁リレーは電話の自動交換機などに広く普及した。

さらに 1842 年、J. ヘンリはコンデンサの電荷をコイルを通して放電すると、電気振動が発生することを見いだした。これは無線技術においてきわめて重要な発見で、やがてここから O. ロッジによって 1898 年、

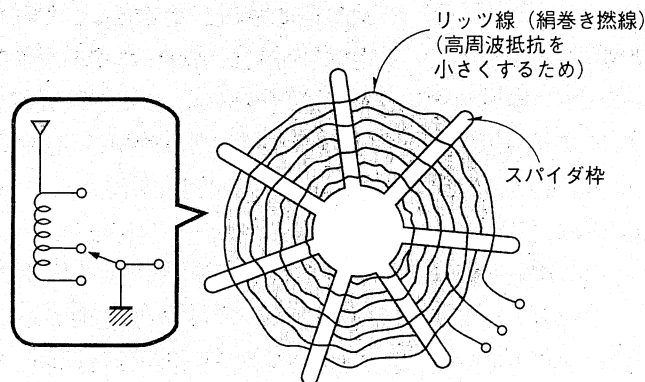
(a) 火花通信時代 (ルーズ・カップル・コイル)



(c) 真空管ラジオ時代 (ソレノイド・コイル)



(b) 鉱石ラジオ時代 (ハニカム・コイル)



(d) トランジスタ時代 (フェライト・コア・コイル)

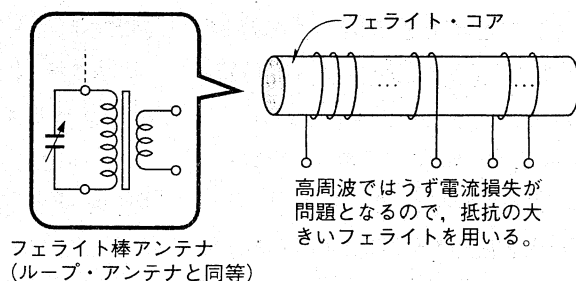


図 5 劇的に変化してきたコイル 火花放電の時代に始まり、鉱石ラジオの時代へ、そして真空管の時代にはエナメル線を巻いた。(c) は中波ラジオ用のソレノイド(単層巻き)・コイル。トランジスタの時代にはフェライト・コアを使っている(d)。同じく中波ラジオ用。

同調という回路が誕生している。J. ヘンリはコイルの父といえる人である。彼は、磁場の方向、導線に流れる誘導電流の方向、導線の運動方向との関係について発電機の右手の法則と電動機に対する左手の法則を1885年に考案している。

さて、コイルの起電力を決定する自己インダクタンスは形状や透磁率によって決まる。このため、高透磁率をもつ材料の開発が始まった。だが、開発はなかなか進まなかった。

J. ヘンリが自己透導を発見してから86年後の1917年、米国のG. エルメンとH. アーノルドが高透磁率をもつNiとFeの合金によるパーマロイ(熱処理法)を発見し電話交換機の電磁リレーに用いられている。

同年、本多光太郎は高い磁気材料KS網を発明し、その名を世界にとどろかせた。

さらに1928年、フランスのH. フォレスティアがフェライトを、1930年には日本の加藤与五郎と武井武がフェライト酸化物であるオキサイドを発明している。これは高周波回路に適するということで注目された。1936年に設立された東京電気化学工業(現在のTDK)によって生産がスタートしている。

やがてコイルは電力を扱う電磁リレーと、ラジオ受信機などの高い周波数を扱う高周波コイルへ2極分化し、応用されるようになっていった。

#### 高周波コイルへの挑戦が始まった

世界最初のラジオ放送は、米国において1920年から始まった。これを受信するラジオ受信機には、同調回路用高周波コイルや、検波後の真

空管と真空管とをトランス結合で結ぶオーディオ・トランス・コイルなど、コイルが随所で用いられていた。

すでにこのときE. H. アームストロングは、コイルをさらに巧みに組み合わせた再生式ラジオ受信機を発明した。ラジオ受信機の感度を高めるため、コイル形状の研究がここから始まっている。

高周波コイルとしてはインピーダンスを考慮したタップ付き円筒ボビン・コイル、スパイダー・コイル(蜘蛛の巣)、ハニカム・コイル(蜂の巣)など昆虫の巣を思わすユニークな高周波コイルが次々に登場してきた。

やがてラジオ受信機はE. H. アームストロングの考案したスーパーヘテロダイン受信機の登場により、中間周波トランスが注目され始めている。この中間周波トランスは、同調回路を電磁的に結合させたもので、 $Q$ (クオリティ・ファクタ)を高く取るためハニカム・コイルが用いられていた。そのほかコイルは、高周波チョーク・コイル、低周波トランス、スピーカの出力トランス、電源などに広く用いられるようになっていった。

まもなく携帯型ラジオが登場する。高周波コイルの超小型化が始まった。さらにテレビの発展に伴い、1955年ころからより高い周波数に対応するコイルが多量に要求されるようになった。

1985年ころから始まったSMTの流れに伴ってコイルの形状も大きく変わり、現在はチップ・コイルが生産されるようになってきた。この小型化により携帯電話などが実用化できたのである。

#### ついに神髄をきわめた電磁方程式

J. マクスウェルは、もやもやしていた電磁気学の体系を築き上げた偉大な学者である。彼は1856年、25歳という若さで英アバーデン大学の教授となった。新進気鋭の彼は、早くもW. トムソンのアドバイスによってM. ファラデーの論文を読み始めている。M. ファラデーは当時すでに有名な学者であり、かつ彼との年齢差は40歳もあった。

このなかで彼はM. ファラデーの提唱した「電気力が力線に沿って伝わる」ということに変大興味を示した。まず1856年に一つ目の論文として電気力や磁気力の強さを、圧縮することのできない流体に準じて力線密度で表すという論文を発表している。ここで重要なことは、理解しにくい現象を、理解しやすいように身近な自然現象で類推(アナログ)する必要があるということだ。

W. トムソンも電気力について研究していたが、彼は弾性による力を、電気力のアナログに使っている。良いアナログであるか否かが成功への一つの鍵を握っている。

さて、J. マクスウェルの考え方によると、電気力は力線密度 $E$ のところに置かれた電荷が受ける力であり、磁気力は磁力線密度 $H$ のところに置かれた磁荷が受ける力となる。そして導体においては、電流は $E$ と導電率との積であることと、誘電体(絶縁物)においては静電誘導の大きさは誘電率と $E$ との積であり、磁気誘導の大きさは透磁率と $H$ との積であるということになる。

このなかで導体における電流について、G. オームは物質のもつ抵抗に

よって流れ方が異なるといっていたが、J. マクスウェルは力線密度と導電率で説明している。

次に J. マクスウェルは、電気や磁気に対する J. ガウスの法則や、静電気に対する C. クーロンの法則、定常電流に対する A. アンペールの右手の法則、電流変化に対する M. ファラデーの電磁誘導の法則を含めて統一的に表現しようとした。

電気力と磁気力の間にはどのような関係があるのだろうか。これに対し電流の回りに生じる磁力線を小さな磁力管という概念に置き換え、この磁力管の回転によって磁気力が発生するという大胆な発想をまとめ、これを二つ目の論文として 1861 年に発表している。

彼は M. ファラデーの電磁誘導をこの磁力管の回転によって表現しようとしたのだ。そしてついに J. マクスウェルは 1864 年、三つ目の論文として、これらをすべて包含した有名な四つの電磁方程式を発表したのである。

第 1 方程式は、電荷によって電界が生じ、電界のなかの力線は正から負へ向かうことを表現した（ガウスの法則）。第 2 方程式は伝導電流や変位電流によって磁界が形成されることを示す。変位電流は電界や磁界のわずかな変動によって生じる（アンペールの法則）。第 3 方程式は磁界の変化で電界が誘導され、空間にサークル状の電流が流れることを表す（ファラデーの法則）。第 4 方程式は磁力線は閉鎖性をもつことを示す。つまり N 極や P 極は単独では存在しないこと。

これを数式で示したのである。こ

こから電磁波、つまり電波の存在が予測された。この電磁方程式はその後、わかりやすいように書き換えられている。こうして、電気と磁気の関係がはっきりしたのである。

だが電磁波はファラデー効果（1845 年、偏光光線が磁場の強さに比例して回転し、その方向は電流と同じである）により、伝わっていく方向に垂直な面で伝わる横波であることがわかっていった。この横波とい

う波動が伝わっていくためには、その空間に弾性的な媒体を必要とするのである。これを「エーテル」と呼んだ。

しかし真空中には、このような媒体は存在せず、J. マクスウェルの理論は困難に遭遇していた。

この問題が完全に解決したのは、1900 年の M. プランクの量子論や 1905 年の A. アインシュタインの相対性理論まで待たねばならなかった。

## プリント配線基板 ラジオ受信機組み立ての悩みから生まれる

1920 年、米国でラジオ放送が始まった。それ以前は、情報は新聞のみによって伝えられていた。リアルタイムで送られてくるラジオ放送に庶民は熱狂し、競ってラジオ受信機を購入したようだ。開局後わずか 10 年後の 1930 年 1 月には、総計 1150 万台に達したと米国の商務省が推定している。まさに驚異的な発展を示したのである。

当然、この旺盛な需要を貪欲な事業家が見逃すはずがない。

瞬く間に多くのラジオ製造メーカーが乱立している。それぞれのメーカーは市場占有率を高めるため、高性能化と量産化に目を向け始めていた。

価格はどうかだったのだろうか。1920 年～1930 年にかけて、ラジオ受信機 1 台当たりの平均価格は 110 米ドル～124 米ドル程度で推移しており、そこには今日見られるような激烈な価格競争はまだ存在していなかった。そのころ、米国の労働者の給与は月平均 120 米ドル（1 ドル 110 円として約 1 万 3200 円）だっ

たからラジオ受信機は高価な買物だったといえる。

当時、量産化の走りとして米フォード社の自動車が思い浮かぶ。1908 年、自動車の平均価格は 2129 米ドルと高く、庶民には高根の花だったが、ヘンリー・フォードはこの年の 10 月 1 日、なんと 850 米ドルの「フォード T 型」という廉価な大衆車を発表している。生産を合理化することで低価格化を実現したもので、1913 年 4 月には「フォード・システム」として確立している。ここでは組み立てにさまざまな新しい工夫がなされていた。こうして庶民に自動車が爆発的に売れ始めている。

1920 年から需要が増え始めたラジオ受信機は、自動車に次ぐ量産品として、自動車の生産工程を見習い始めたものと思われる。1930 年ころラジオ受信機はどのように組み立てられていたのだろうか。

そのかなめとなる真空管は、ピンの付いたベークライト台上にガラス管を載せた構造でこれをソケットに

差し込んで使っていた。コイルやトランスなどの電子部品や電子部品同士の相互配線は、このソケットの上にある端子板に手でハンダ付けしていたのである。しかも配線用線材が太かったため、しばしばネジで止めたりもしていた。

なんとしても能率がよくない、もっと良い配線方法はないものだろうか。このとき二つの方法が考えだされている。まず1925年、米国のC. デューカスは絶縁基板上（たとえばベークライト板）にCuメッキやAuメッキによって導体パターンを形成する方法を考案し、特許を申請した。

つまり現在のプリント配線基板の原形である。このように早い時期に考えだされていたとは驚きだ。部品数が少なかったこともあり、せっかく素晴らしいアイデアだったが、ついに実用化されなかったという。早すぎた発明だった。

もう一つが、ベークライト板に真鍮ちゅうでできた導体をネジ止めする方法であり、1927年ころには採用になったという。すでにこのとき、線にエンパイヤ・チューブ（被覆管）を被せる方法が使われている。

やがてラジオ受信機は複雑化し、部品点数が増えてきた。

なんとか合理化できないかということで自動車の組み立て（アセンブル）ラインに似たベルトコンベア・ラインが登場している。ここでは一部にベークライト板を、一部に端子板を用いて部品を取り付けていた。部品のハンダ付けは別々の人によって行なわれ、量産性とともにより誤配線や部品の取り付けミスを防ごうとしたのである。やがてラジオ受信機のほ

かに1953年から白黒テレビ受像機、1958年からカラー・テレビ受像機のアセンブルが加わった。だが、このアセンブル方法は真空管からトランジスタに代わるまで続いている。

実は、日本でも、1937年宮田喜之助がプリント配線基板の製造法に関する特許を取得していたが、具体的な応用まで展開できずにいた。

1955年ころからトランジスタの導入が始まり、これに歩調を合わせて次第にプリント基板の導入、自動搭載機の導入、自動生産ラインの採用と急速に発展していた。だが組み立ての中心は相変わらずベルトコンベア・ラインであり、若い女性が並んで作業に従事していたのである。

その後、急速に自動化技術が進んで、しばしば停止（チョコ停）するということが激減したためアセンブル工場の一部ではほとんど無人となり、照明も必要なく、暗く広々とした工場が次々に組み立てられた。だが急激な円高がこの状態を急変させてしまったのだ。

1990年ころから低コスト化をねらって東南アジアへと組み立てが生産シフトし、日本の組み立てラインは大きな打撃を受けてしまった。しかしそのころから製品の多様化が叫ばれ、日本では少量多品種の時代を迎え、ベルトコンベア・ラインから1人で組み立てるUラインへと移りつつある。こういったことから、日本のエレクトロニクス産業は大きな転換期にあるといえよう。

## 50年代に開発されたプリント基板

今日、あらゆる電子機器に大量に使われているプリント基板は意外な

ところに利用されていた。いったいなんだったのだろうか。

実は、第二次世界大戦はエレクトロニクスの戦いでもあったが、特にレーダ、弾道計算機、爆弾用近接信管の3テーマが最高の機密事項だった。この内容が明らかになったのは戦争の終わった1945年のことである。そこには今日のエレクトロニクス発展の基盤技術がすべて秘められていたといえるかもしれない。

レーダにはトランジスタへとつながる鉱石検波器が、弾道計算機にはコンピュータへとつながっていく電子回路があった。

さて、爆弾用近接信管とは、爆弾が対象物に近づくと自動的にさく裂する超小型の電子回路のことである。トランジスタの存在しない時代、弾頭に乗せる超小型の電子回路を組み立てることは至難の業だった。

これに対し米国は戦時中すでに、直径7.6cm×長さ15.2cmの容器の中に真空管による送受信回路とコントロール回路を内蔵するという組み立て方法を確認していたのだ。この組み立て技術（アセンブル）は現在の厚膜ハイブリッド・モジュールやプリント基板の原形ともいえるかたちをしていたのである。

この信管はNBS（National Bureau of Standard）とグローブ・ユニオン・セントラルラボが共同で設計していた。電子回路にはステアタイト板を使用し、この上に厚膜によるAg導体と炭素抵抗をスクリーン印刷で焼き付けし、そのほかの電子部品は個別に取り付けてあった。これに関する論文を、ブルネツライとリレーが1946年4月の*Electronics*誌

に発表している。これを「パッケ  
ジ電子回路(PEC)」と呼んだ。

雑誌への発表によって、エレクト

ロニクス業界は21年後、再び埋も  
れていたプリント基板に注目し始め  
たのだ。これがプリント基板の本格

的なスタートではないかといわれて  
いる。

1947年になると英ジョン・サー  
グロブ社がベークライト板にくぼ  
みと穴を開け、これをベルトコンベ  
アに乗せて移動させながら導体や抵  
抗体を吹き付け、その他の部品を自  
動的に装着する機械を開発し、ラジ  
オ受信機の生産に使っていたという。  
その後、この技術は二つの方向へと  
分かれて発達していくことになる。

一つがハイブリッド回路であり、  
一つがプリント基板だったのである。

1949年、陸軍信号研究所はエッ  
チングしたプリント基板をハンダに  
浸して接続する技術を開発した。  
1950年にはプリント基板の製造の  
可能性について、米パワーズ・ケム  
コ社がプリント配線板研究所を開設  
し、1951年には、米オトサーキッ  
ツ社が設立され本格的にプリント基  
板の生産が開始されている。

1952年にガラス・エポキシ基板に  
Cu箔をラミネートする技術、1953  
年にスルーホール技術とソルダ・マ  
スク技術、1960年になると多層基  
板が次々に提案され、わずか10年  
の間にプリント基板の技術は驚異的  
に発達し、量産技術が確立されてい  
った。これはちょうど米国における  
コンピュータの立ち上がり時期に一  
致している。

## 実装技術は劇的な変化

プリント基板の有用性が認識され  
始めるにつれ、さらに新しい組み立  
て技術が開発された。その一つが米  
ウエスタン・エレクトリック社によ  
るワイヤラッピングする技術であり、  
もう一つが米ユナイテッド・マニユ

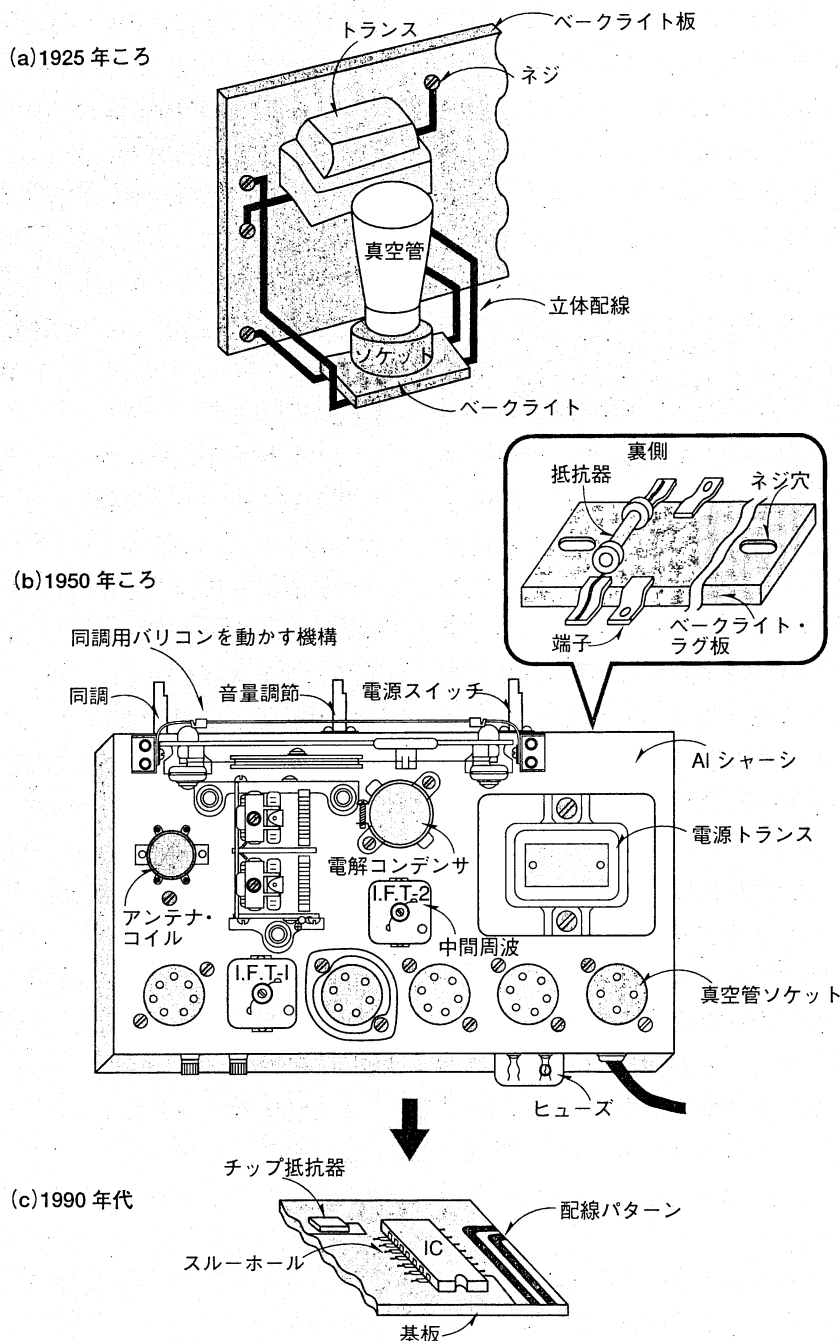


図6 アセンブル技術の移り変わり 1925年ころは立体配線だった。これにエンパイ  
ヤ・チューブを被せ、立体配線をピンにハンダ付けし、真空管は宙ぶらりんになっていた  
(a)。(b)では部品をあらかじめハンダ付けしておき、これをシャーシにネジ止めて固定  
していた。そして表面実装の時代が来た(c)。



ファクチャリング社によるプリント基板に部品を自動的に挿入する技術である。

前者は1953年に開発され、ハンダなしに行なえる配線技術はコンピュータや電話交換機の組み立てに役立っている。後者は1954年に開発され、アキシャル・リード部品による自動搭載機を開発し、組み立て時間が大幅に削減できたのである。

そのころのコンピュータはトランジスタを使っており、高性能化を目標にますます電子部品点数が急増していた。このため、より電子部品を小型化し、プリント基板の配線幅と配線間隔のパターン・ピッチをより狭めて実装密度を高めようということになった。このような目標のはっきりした技術開発は、日本が得意とするところだ。

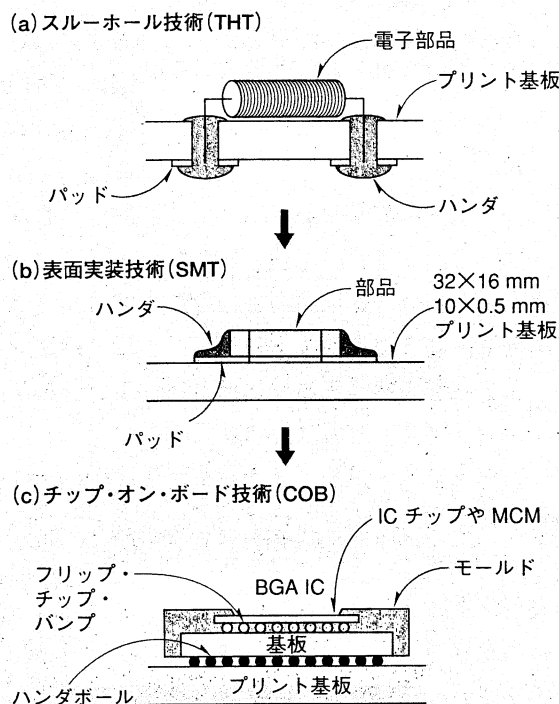
日本では1955年、ソニーのトランジスタ・ラジオに端を発してトランジスタ・ラジオ・ブームが始まり、さらに1960年ころからトランジスタ・テレビや、電卓、さらにトランジスタ・コンピュータが生産されるに従い、プリント基板の需要は急速に伸びた。

このなかで日本では、より小型の電子部品開発、パターン・ピッチの狭いプリント基板開発で、ついに世界をリードしたのである。

まず電子部品について述べてみよう。従来の電子部品はリード付きだったが、小型化のなかでリードが邪魔ということになった。つまりリードレス電子部品が注目され始めた。これに対する解決策の一つが MELF 型という丸型であり、一つがチップという角型だった。

#### 図7 実装技術の流れ

1960年ころはスルーホール技術(THT)を使っていた(a)。1975年ころ表面実装技術(SMT)が実用化してきた(b)。1998年ころから、チップ・オン・ボード技術(COB)が広まろう(c)。



両者について業界あげての激しい戦いが繰り広げられたのだ。角型、丸型とも一長一短があった。角型は自動搭載する場合、テーピングという包装形態を必要とするが、丸型はバラバラでよく、さらにコストが安いという特徴があった。しかし丸型は供給メーカが少なく、さらにマウントする基板の必要面積が広いという欠点をもっていた。

小型化の潮流のなかで、この戦争の勝敗は、自動搭載機には角型が適したことから、角型に決着している。1974年ころからこの角型による電子部品を使った表面実装技術 SMT (surface mount technology)へとプリント基板は変わり、この技術が世界を支配するようになった(図6)。

次は、プリント基板のパターン・ピッチである。配線幅(line)と配線間隔(space)のいずれも500  $\mu\text{m}$  くら

いから始まって、ついに100  $\mu\text{m}$  以下が目標となってきた。薄膜多層基板では10層以上となっている。

ここにきてプリント基板に搭載するIC用パッケージも大きく変わろうとしている。

既存のPGA(pin grid array)から、QFP(quad flat package)やSOP(small outline package)が登場し、より小型化、多ピン化、高速化という潮流のなかで、表面実装型 SMA(surface mount array)型のBGA(ball grid array)やCSP(chip size package)が登場してこうとしている(図7)。

最近では、チップをそのままプリント基板に実装して、チップと基板とをボンディングするベア・チップ実装や、チップをひっくり返してそのままプリント基板と接続するフリップチップ実装といった究極の実装

技術が開発されつつある。

電子部品を一体化したMCM (multi-chip module) も検討されている。これらの技術の一部はすでに大型コンピュータだけでなく、携帯電話やノート・パソコンといった情報家電機器にも使われ始めた。

このような高密度実装と高速化によって、問題となり始めたのが放熱と雑音対策である。

電子機器は21世紀に向けて、よ

り小型・軽量化と低コスト化が求められていく。このために新しい実装技術がさらに開発されていくだろう。

#### 部品の自動搭載機が登場

電子部品の自動搭載機（自動マウント機）は初めのころ、米ユニバーサル社製アキシアル型向けが1970年代に輸入され、多くのメーカーが使っていた。これは一度、電子部品を並べ、シーケンスしながら基板に実

装する方式だった。

1974年になると松下電器産業はユニバーサル社の方式を改良し、電子部品を直接基板に挿入する方式を開発している。紙テープにチップ部品を収納して自動マウント機に供給するテープ・アンド・リール方式は1975年ころ村田製作所が提案し、松下電器産業が自動マウント機に採用した(図8)。

テープ・アンド・リールによるワン・バイ・ワン方式は機種変更にも小回りが利くため普及したが、使用後のテープ材の無駄から、1986年に日東工業はバルク・カセット方式を提案している。このカセット設計も村田製作所によって進められ、現在は標準化され、普及しつつある。

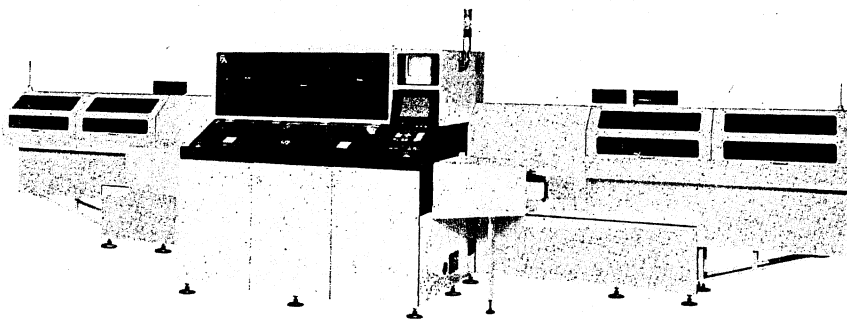
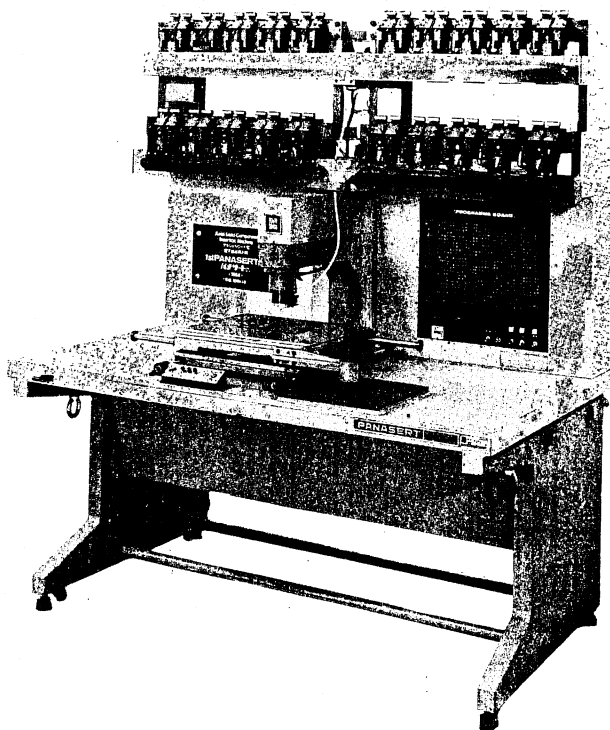
1977年になるとTDKがラジアル型の個別対応を、1979年には松下電器産業がラジアル型のテーピング用を、1980年には角型チップつまり表面実装部品SMD (surface mount device) 対応の自動搭載機を発表している。

これはラジオ受信機、テレビ受像機、VTR、電卓などの量産品で威力を発揮した。この技術によって日本は1950年～1990年にかけて世界のAV (オーディオ・ビジュアル) 機器の生産を一手に引き受けられたといっても過言ではない。

そして、これらの自動搭載機が世界へと輸出されていった。

しかし1990年代、世界のエレクトロニクスは大きく姿を変えつつある。円高による海外生産シフトと同時に、AV機器の多様化が進み、これに伴い日本の組み立て技術は新しい局面を迎えつつあるといえるだろう。

図8 部品の自動搭載機 上は初期の自動搭載機である。挿入部品に対応する。下は現在の自動搭載機。表面実装部品に対応する。いずれも松下電器産業の製品。



## アSEMBルで重要な品質問題

電話機やラジオ受信機の生産が開始された1920年、ウェスタン・エレクトリック社は大量生産していた電話機の製造現場に統計的品質管理 SQC (statistical quality control) を導入していたのだ。

1931年には、ベル研の W. シューワードは『製品の経済的品質管理』という本を出版している。エレクトロニクスが自動車に次ぐ製造業として重要視され始めたため、こういった本が出版されたのだろう。同時に製品のバラつきを防ぎ顧客に満足感を与えようと考えたからに違いない。

やがて米国品質管理協会が設立されている。実はそのころ、品質に関する考え方は現在とまったく異なっており、品質の向上は技術開発によって図ろうという気運が強く、アSEMBルにおける品質を管理するという思想はまったくなかったのである。このため、使用状態での故障モードの把握と、不良品の発生状況に関するデータとそれを防止する対策は重要視されていなかった。

当時、品質、つまり信頼性の向上よりも、生まれたばかりのインダストリアル・エンジニアリング（生産工学）を中心に生産性の向上に力を入れていた。SQC と生産工学の二つの流れのなかで SQC が注目されるようになった。

特に信頼性が大きく叫ばれ始めたのは、第二次世界大戦でレーダなど軍用機器の故障が戦場で多発したためだといわれている。このため、特に故障が多い真空管不良を検討する VTDC という研究グループが設立されると同時に電子機器製造ライン

にも品質管理が導入され、成果を上げたのだ。これをきっかけに抜き取り検査方法として MIL-STD (米国軍用規格) 105 が設定されている。

戦後の1952年になると、国防省に所属し、電子機器の信頼性を諮問する AGREE が設立されている。こういった機関が1955年から1960年にかけて米国における産業用・軍事用の信頼性工学の基礎を確立していった。

1947年には米 GE (General Electric) 社の L. マイルズが VE (バリュウ・エンジニアリング) を提案した。彼は「最低のコストで必要な機能を確実に達成し価値が高い製品を顧客に提供しよう」と叫んだ。その後、この VE は大陸間弾道ミサイルやジェット機に適用された。さらにアポロ・ロケット開発へと結びついていく。巨大なシステムであるアポロ計画では信頼性がさらに検討され、FMEA (failure mode and effect analysis) や FTA (fault free analysis) といった手法が用いられた。

米国のこの手法を見習い、日本でも民生用電子機器生産に伴う品質を向上させる動きが1950年ころから始まっている。やがて米国以上に盛んになり、「日本製品は安かろう悪かろう」から、「日本製は信頼性が高い」と世界から認められるようになっていったのだ (p.198 の「町で見つけた信頼性の証明」参照)。

次第にラジオ受信機やテレビ受像機といった民生用電子機器の生産が、米国から日本や、韓国、台湾へとシフトするなかで、米国の信頼性管理はいつしかおろそかになり、衰退していったのである。

## 日本の生産性・信頼性を変えた3人

このなかで信頼性と生産性について、日本をリードしてきた3人の人物について述べてみよう。

まず1人が品質に関する W. デミングだ。彼は米国の統計学者で品質管理を提唱した人である。品質管理手法を指導するために来日した。やがて日本の品質は驚異的な水準に達したのである。彼の功績をたたえ、日本の品質管理に貢献した人や企業に「デミング賞」が与えられている。この賞は1951年に日本科学技術連盟によって制定された。

次の1人は、日本の生産技術に革命をもたらしたトヨタ自動車の大野耐一である。彼は「必要なものを必要なときに必要なだけ作る」、「ムダの排除」、「徹底した合理化」という考えから、「カンバン方式」や、「ジャスト・イン・タイム」、「シングル段取り」という言葉を次々と作り、自動車産業のみならず、電子産業にも大きな影響を及ぼした。この思想は生産性向上のみならず、信頼性の向上にも結びつき、品質が飛躍的に改善されたのである。

もう1人は品質工学を提案した田口玄一ではないだろうか。競争力のある新製品を作るには先行性、汎用性、再現性が重要である。このためには製品設計にしろ、生産工程にしろ、機能の良さを改善しなければならない。この基本機能を直接評価する方法として信号因子 S (signal) と誤差因子 N (noise) による S/N を導入し、数学的手法で、工程の改善を図ろうとしたのは彼である。

この方式は当初、ベル研究所のトランジスタの性能改善で認められ、

逆に日本でも注目されるようになった。品質管理の概念はことごとく米国で生まれてきたなかで、田口の方法は逆に世界に認められたのだ。

このようななかで、品質管理 QC (quality control) が合い言葉となり、総合的品質管理 TQC (total quality control)、やがて TQM (TQ management) という概念が誕生した。不良率は ppm (parts per million: 1/100 万) 以下にしようという AQL (合格品質水準) 管理から 1 個の不良も許さないという ZD (ゼロ・ディフェクト) の思想へと変わった。

米国で主として軍用に開発された品質問題が、1960 年代から 1970 年代に日本で開花し、品質の良い製品を安価に世界の顧客に提供したのである。この結果、米国の製造業は壊滅的な打撃を受け、日米摩擦の一つ

の原因となったといえる。

だが、米国は 1980 年代から品質管理に再び目を向け始めた。1987 年には日本の「デミング賞」にあたる「マルコム・ボルドリッジ賞」を制定し、優れた品質改善をした企業を表彰するようにした。内容は日本と若干異なっており、品質管理と同時に顧客満足 CS (customer satisfaction) をも含めて選んでいる。最近では日本以上の水準にあるという。

1995 年から始まった平成不況によって、日本のエレクトロニクス・メーカは海外生産シフトを盛んに進めている。こうなると日本もかつての米国の二の舞になるのではないだろうかと懸念されている。いずれにせよ、世界のエレクトロニクス産業の技術開発拠点と生産拠点の地図は、現状とは異なり大きく塗り替えられ

るのではないだろうか。

もう一つ、忘れてならない問題がある。電子機器を取り巻く公害・環境問題だ。Pb フリー (Pb ハンダの使用禁止)、廃棄した化学薬品・材料・使用済み電子機器の処理、資源のリサイクル問題など対処しなければならない問題が山積みだ。これを解決するのもエレクトロニクス産業の重要な仕事である。

#### 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

## 町で見つけた信頼性の証明

安かろう悪かろう——1945 年以降、世界から軽蔑されていた日本製電子機器の信頼性は、米国の QC 手法、さらに改善提案制度や全員参加の QC サークルなどの導入により、1960 年代ころから飛躍的に向上している。この成果の一端をかいま見るような出来事を経験した。

まず初めが電子式掛け時計についてである。同一メーカが製造した日本製のアナログ表示の電子式掛け時計が家に 2 台ある。1975 年、両方とも別々の知人から偶然に同じ製品をもらった。梱包をと

くと同時に 1 階と 2 階の柱に掛けてスタートさせた。

この電子式掛け時計は、水晶振動子の発振周波数 32.768 MHz を 15 段の CMOS IC で分周したのち、1 秒の出力として取り出し、ステッピング・モータで針を駆動するような構造となっている。電源は単 2 の Mn 電池 2 本である。

さて約 3 年、ほとんど 30 秒以内の正確さで動いていたが、ある日の朝 1 階の掛け時計が突然動作を停止した。ここまではなんのことはない。電池が消耗しただけである。驚いたことに、その 2 日後、

2 階の掛け時計も動作を停止したのだ。わずか 2 日の差だった。

ここでふと考えを巡らしてみた。この 2 台の掛け時計は Mn 電池と CMOS IC という二つの電子部品で構成されている。この現象が起こる原因は、たぶん 2 台の時計に内蔵されていた 4 本の Mn 電池エネルギーがほぼ完全なまでに同じであり、かつ 2 個の CMOS IC の消費電力もほぼ同じでなければならぬはずだ。つまり電池と IC がほぼ同じ品質だったということになる。実に素晴らしい管理の基に作られていたのだと感心した。

- 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』, 日経マグロウヒル社, 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)」, 『Engineers』, no.525, 1992年5月.
  - 15) 加納誠三, 「蓄電池小史(1)」, 『Engineers』, no.558, 1995年4月.
  - 16) 加納誠三, 「蓄電池小史(2)」, 『Engineers』, 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, 『ファラデ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.
- このほか, 『日本経済新聞』, 『日経産業新聞』, 『朝日新聞』, 『日刊工業新聞』, 『電波新聞』, および『日経エレクトロニクス』, 『日経マイクロデバイス』(以上日経BP社), 『電子技術』, 『表面実装技術』(以上日刊工業新聞社), 『ラジオ技術』(アイエー出版)を参考にした。

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」といったことをご存じの方は本誌までご連絡ください。●

### 信頼性が苦しめることに

しばしば風向明媚な南アルプスと北アルプスの麓にある長野県伊那市からバスに乗る。そこでの出来事だ。この伊那市の中心街に東京や大阪に行く長距離バスのターミナルがあり, 1976年に改修されたときに, 待合室に同じメーカーの14型カラー・テレビ受像機が6台設置された。

この6台のテレビ受像機は朝6時から夜9時ころまで毎日それぞれ別々のチャンネルの映像を再生し, バス待つ人に無言で映像のみをサービスしていた。年ごとに次第に映像は精彩を欠き始めていたが, ずっと正常に動作していた。

20年近くたった1995年の春のことである。1台のテレビ受像機がついにダウンしてしまった。続いて1週間後に1台, さらに1週間後に1台と計3台が映らなくなったのだ。この結果, とうとう6台のテレビ受像機はすべて取り外され, そこには新しいテレビ受像機が2台設置された。

直接調査したわけではないが, どうもブラウン管が原因のようだ。20年近く使われたテレビ受像機がほぼ同じ時期に動作を停止したということは, このテレビ受像機の品質がいかに均一だったか, ということを実証したことになる。

日本の機器メーカーのみならず,

電子部品メーカーや材料メーカーも含めて品質管理が徹底的に行なわれた成果だというべきだろう。

ここで思うのだが, 最近の電子機器を買う人は, ブランドや生産国を気にせず, 価格ばかりを気にする。つまりどの製品を買っても信頼性を心配することがなくなったからだろう。

日本の技術が信頼性を高め, 信頼性が高いのは当たり前だという考えを消費者がもってしまった。だから, 消費者は価格を基準にするのである。信頼性を高めたことによって, メーカーは自分を苦しめることになってしまったようで, まことに皮肉である。