

「アナログからデジタルへの系譜」

松本栄寿

私たちの身の回りがデジタルに囲まれるようになったのは、いつ頃からだったろうか。1970年代からのクォーツ時計の普及だろうか、コンパクト・ディスクCDが姿を現した1980年代からだろうか。電気計器ではどうだろうか。電気に接している私たちの最もなじみ深い計器は「テスター」であろう。テスターの世界でも、いまでは80%がデジタル計器で針のあるアナログ指示のテスターは少なくなっている。ここに至るまでの道程とキーポイントをもう一度ふりかえって見よう。

キーコンポーネントと理論の変遷

計器の重要なコンポーネントは何だったろうか。ウェストンの電気計器の頃は、永久磁石、スプリングなどが計器の性能をきめる重要なキーコンポーネントであった。真空管の時代になると、真空管のまわりは、抵抗、コンデンサ、インダクタンスに取り囲まれ、真空管も大型から超小型のサブミニアチュア管とかわった。ついでトランジスタの時代は、プリント板、コネクタ、ケーブル

が加わった。集積回路ICが使われ、デジタル技術が入り込むと、リニアIC、A/Dコンバータ、LED、液晶、デジタルIC、基準電圧と重要部品は一挙に変化した。

さらにその回路に使われた理論は、かつてのオームの法則、キルヒホッフの法則、フレミングの右手・左手の法則などの基本的なものから、ループに適用されるフルビッツの安定判別法、ボード線図、ナイキストの理論、デジタルとともに、ブール代数、サンプリング理論とまるで別世界の理論が次々と登場し、それらが回路の中に組み込まれてきた。

デジタルへの歴史

指針型計器からデジタルまでの発明を、テスターを例にとって細かに追ってみよう。ウェストンが1886年に精密直流電流計(第8回)を発明して、アナログ指針型計器で1/1000あるいは1/500の精度で直流の電流・電圧をはかることができたようになった。

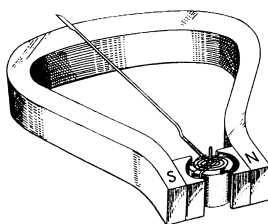


図1
ウェストンの計器からデジタル計器へ
重要部品の変遷：永久磁石から、真空管、
トランジスタ、IC、プロセッサへ

ついで1892年にウエストンはマンガン抵抗を発明した。マンガンとはニッケル系の合金であるが、その抵抗値がきわめて安定で、温度の影響も受けにくいことが特徴である。マンガン線を使って正確な抵抗や電圧分圧器ができる。やがて、ロータリースイッチを回すと、電圧、抵抗をレンジを自由に切り替えて測定できる多レンジの計器が完成した。英語ではマルチメータと呼ばれ、日本語ではテスターというが、その原点は英国の郵政省の要請で電話保守のためにつくられたといわれている。それまで保守する現場に電圧計、電流計、抵抗計などをもっていく必要があったのが、このテスター1台ですむようになった。作られたのは1940年代で商品名はAVOメーター(アンペア・ボルト・オームの頭文字)であった。

やがて無線電信・ラジオに使われた真空管が、バルボル(真空管電圧計)に採用されるようになった。測定信号はまず真空管で増幅されてから指針型計器を動かすので、バルボルでは高インピーダンスでの電圧測定を可能にした。発明者は1922年のモーリンである(第11回)。しかし、真空管の非直線特性もそのまま残ってしまうから、精度はウエストンの直流計器にかなわなかった。増幅素子の特性が影響しないように、直線性のよい電圧計は、負帰還の応用をまたねばならなかった。その一つはヒューレットのバルボル(1939)である(第12回)。ブラックの負帰還回路はしだいに電子回路に広く使われるようになるが、ボード線図が発明され、ナイキストの安定条件が理論の裏付けとなった(1923)。

負帰還回路はアメリカの大陸横断電話の通話品質を上げようとの目的から生まれた(第12回)。一方、長距離電話の伝送にアナログ信号をコード化して伝送してやる方法が提案された。イギリスのリープスによる、パルス符号変調(PCM)通信方式である。実用化は主としてベル研究所で行われ、第二次世界大戦後(1948)に完成した。ここにはアナログ・デジタル変換A/Dコンバータが必要になった。

A/Dコンバータとは文字どおり、アナログの電圧をデジタルに変換する回路である。たとえば、10ビットに変換する回路では 2^N , $N=10$ のビット数に変換すること、変換したデジタルデ

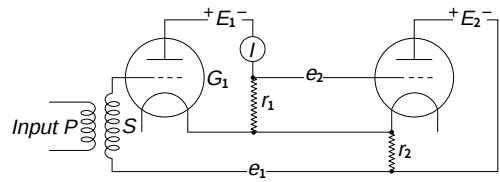


図2 フリップフロップの原形：発明者エックルス・ジョルダン(1919)

ータとしては、10桁のパルス列(0000000000から1111111111まで)が並ぶことになる。その際の分解能は $1/1024$ 、約0.1%となる。いったんデジタル化された10桁の情報を取り扱うのは論理回路である。19世紀のイギリスの数学者ジョージ・ブール(George Boole)によって研究されたブール代数の理論は、MITのシャノン(C. E. Shannon)によって論理設計の基礎が固められる。論理和、論理積などが電気回路で置き換えられようになる。回路への置き換えはリレー、真空管、トランジスタとダイオード、ICの段階をたどってきた。

アナログ信号のデジタル化と2つの重要な要素

デジタルはアナログの世界と異なり、デジタル論理回路の中には「記憶」という機能が必要になる。なぜなら、デジタル回路の基本的な情報は、電圧、電流、インピーダンス、周波数などという空間的な広がりほかに、時間的な広がりをもっているからである。ある時刻における情報を、つぎの時間に引きついでいくには、「記憶」したデータが要ることになる。デジタルの世界でもっとも広く使われている「記憶要素」は、フリップフロップ回路である。1個のフリップフロップは、1ビットタイム前の情報を現在に、あるいは現在の情報を1ビットあとに伝達する役目を担っている。

いったいアナログ信号はデジタル信号に間違いなく変換できるのだろうか。無限に細かな分解能をもつA/Dコンバータを考えれば理論上は可能であるが、無限量は非現実的なので、現実的には変換に誤差ははいることになる。変換はサンプリング(標本化)、数値の桁揃え(量子化)、2進数

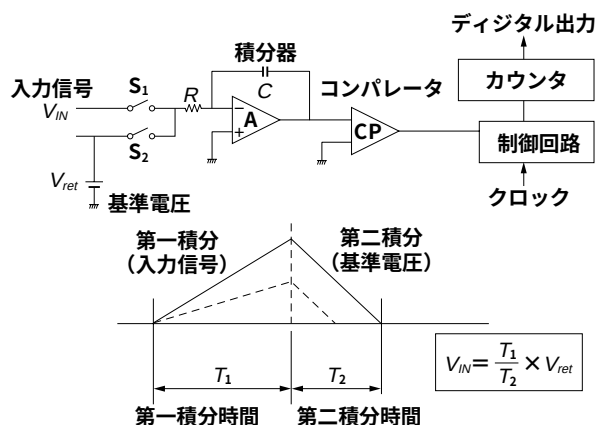


図3 二重積分A-Dコンバータ：発明者ギルバート(1957)

化の処理によって行われる。誤差は標本化と量子化の処理で発生するが、生ずる誤差を人間の識別能力で分からない程度に抑えて使うことになる。

このA/Dコンバータは測定する対象によって異なる。応用分野毎に分類すると、計測用(高精度低速計測ms)、デジタル・オーディオ用(us)、ビデオ・高速計測器用(波形観測・通信用ns)などによって「一口に言えば、ビット数を多くして高精度をねらうもの、精度よりもスピード変換速度をねらうもの」に分類される。

このようなA/Dコンバータは20世紀の電気の世界の大発明であって、それまで別々に発達してきた、アナログとデジタルの2つの世界を結ぶ革命的な要素と言えよう。また、A/Dコンバータが計測とコンピュータを結ぶことを可能にしたわけである。

ここでデジタル計測の世界で必要になったユニークな2つの要素、記憶素子/フリップ・フロップとA/Dコンバータについて触れよう。

フリップ・フロップ(F/F)

フリップ・フロップの原点は意外に古い。エックルス(W. H. Eccles, 1875生)のトリガー・リレー回路がエレクトリション誌に紹介されたのは1919年である。パルス信号が加わると真空管が交互にオン・オフ状態になる2本の真空管回路である。なぜこんな奇妙な回路を考えたのだろうか。エックルスは無線通信のために幾つもの発振回路を実験している。3極真空管を2本たすき掛けに

使って、数ボルトのプレート電圧で、50MHzの発振回路の報告もある。そこで生まれたトリガー・リレー回路は、2本の真空管を抵抗結合の正帰還で結んだ回路である。エックルス・ジョルダン回路、のちにF/Fと呼ばれるようになる。

ほぼ同じ時期に発明されたマルチバイブレータ回路と似てはいるが全くちがう。マルチバイブレータも2本の真空管を使うが、コンデンサのAC結合をもつ連続発振回路である。フリップ・フロップはDC結合方式であって、2本の真空管はオン・オフの状態

を交互に繰り返す回路である。エックルスは1875年生まれ、ロンドン大学で学びマルコーニ社に参加した。またイギリス電気学会無線部部長、イギリスラジオ協会名誉会長をつとめた人物である。彼の活躍したのはフレミングの1904年の2極管の発明、ドフォレストの1906年の3極管の



図4 アナログテスタと目盛指針：レンジによって目盛がちがう

発明に続く時代であった。第一次世界大戦で無線が実用になることが証明されると、真空管回路の研究が一層進んだ時期でもある。

二重積分 A/D コンバータ

最も一般的な逐次比較 A/D コンバータにくらべて、二重積分方式 A/D コンバータは素晴らしい回路であった。ギルバート (Rosewell Gilbert、1909 生) の 1957 年の発明である。

この変換回路は積分回路と比較器を入力段にもち、入力信号を積分する時間と内部の基準電圧を逆に積分する時間とを比較してパルス幅に変換する方式である。このとき入力信号の積分時間を商用周波数の整数倍にすると、信号に重畳する周囲のノイズの影響を排除できる。電気計測にはピタリの特性であった。A/D コンバータ回路は、やがてフェアチャイルド社によって IC 化され爆発的に普及した。

エックルスは、当時の電気計器の名門ウエストン計器社の研究部長であった。ウエストン社では電気計器から露出計分野に進出していたが、露出計の信号を時間幅に変換する回路を追求していた。その中からデュアル・スロープ方式が生まれたようである。

アナログ・テスターとデジタル・テスターの差は

読者はアナログ指針型と、デジタル数字で表示するデジタル計器の差をどう考えるのだろうか。桁数の多い数字表示ができるデジタル計器の特徴は、測定精度が高いことだと思いがちだが、私はむしろ測定に要する時間の差に特徴があると考えている。単に直流の電圧を高精度で測定するには、精度の高い電位差計 (ポテンショメータ) と高感度のガルバノメータとを用意できれば、実験ベンチの上で 4 桁でも 5 桁でも高精度の測定ができる。しかし、それには少なくとも 10 分近い時間がかかってしまう。それがデジタル電圧計では瞬時である。

それにデジタル計器では自動レンジ切替が可能である。測定電圧の値に対応して自動的にレンジが選ばれ、4 桁フルの表示で電圧が読める。ところが、アナログ指針型テスターでは、まずロー

図 5
デジタルテ
スタ：誰でも
そつなく素早
く読める。
測定器にも誤
差のあること
を忘れてはい
けない。



タリースイッチで直流、交流、抵抗のレンジを選んで始める。その上読む目盛りは、レンジ毎に、また交流、直流、抵抗の種別でもそれぞれ異なっている。

言いかえれば、イージーハンドリングを追求したのが、デジタル計器であろう。「誰でもそつなく素早く読める」がデジタルなのだが、測定しようとする電圧が変化しているときは、数字が次々にかわり、人の目にはその変化がとても読みとれないことがある。アナログが有利な点は、全体のようなすが一目で分かることにある。

もう一つ重要なことを記そう。デジタル計器では数字で測定値が読めるから、その値は真に正しいと思ってしまいがちである。しかし、じつは A/D コンバータにも変換誤差があり、変換の基準となる内部の基準電圧も長い間には変化することがある。測定器である以上、スペックにも「・・・%」±1 ビットと書かれているように、表示された数字の値にも誤差が含まれていることを忘れてはならない。

参 考 文 献

- 1) W. H. Eccles, F. W. Jordan: "A Method of Using Two Triode Valves in Parallel for Generating Oscillations", The Electrician, p. 299, Sep. 19, (1919)
- 2) Rosewell W. Gilbert: "Dual Slope A-D Concept and Early History, Landmarks in Metrogy" -ISA, Proceedings, 17/20, (1983)