「自動平衡記録計の発明」

横河電機
松本栄寿

自動平衡計器の原点はどこにあったのだろうか。その基本、負帰還方式が使われたのはまず蒸気機関に取り付けられた回転数制御のガバナーであり、蓄音機の取り付けられたレコードの回転数を一定に保つガバナーである。やがてはアーク灯の制御に応用されるようになった。アーク灯はガス灯に代わって都市に普及していった電気の照明であるが、放電するに従ってカーボン電極が損耗して行くために、それを補って電極の間隔を一定に保ってやらないと明かりが継続しない。フーコー・シーメンス・ブラッシュ・トムソンなどと大勢の発明家が競い、19世紀半ばから20世紀始めまでにアメリカの特許庁だけで1,000件もの特許が提出された[1)]。

アーク灯の自動制御

アーク灯は白熱電球が発明されるまで、市街地でつかわれた唯一の電気照明である。ただアーク灯は明るいと言うより眩しすぎるし、高圧の電気を必要とするため家庭の照明には不向きであった。

図1はアーク灯用のエルフー・トムソンの発明したレギュレータである。彼はカーボンアーク放電部にシャント回路を設けた。メイン回路とシャント回路はそれぞれソレノイド電磁石をもっていて、それが反対方向に動く、ギャップが大きくなってアークをバイパスする電流が増えると、シャントの電磁石がドライブされ上側の電極を下げる。二つ目の電磁石は、メイン回路と直列になっていて、ドライブされるとスプリングの力を押して下部の電極を引っ張るように動く。シャント回路の利点は、制御がアーク抵抗の急変に影響されないこと、機構は基本的に電流値に影響されないことと特許に記載されている[2)]。

トムソンはGE社の前身であるトムソン・ヒューストン社の創設者で、電力工業の発展時に活躍した人物である。アーク灯照明システム用の発電機、レギュレータなどを考案して成功を収めた。のちに交流時代には実用的な誘導式積算電力計も発明している。晩年にはパロマ天文台の反射鏡の製作にもかかわった技術界の重鎮である（図1）。

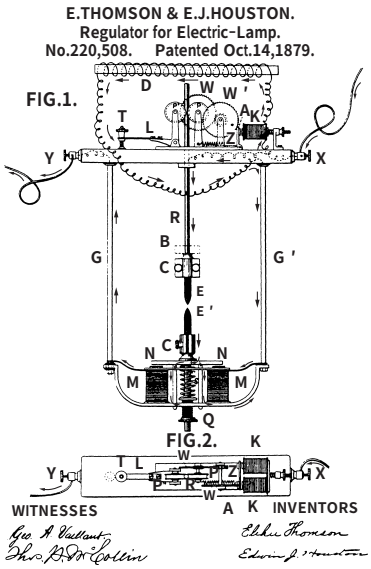

図1 米国特許220, 508、“Improvement in Regulators for Electric Lamps”構造図（1879）

自動平衡計器

ブリッジ回路や電位差計回路を自動的にバラン

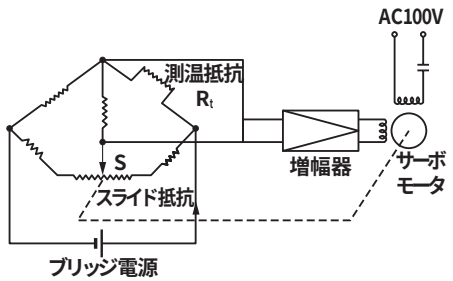

図2 自動平衡計器の原理（測温抵抗体入力）

スさせる方式が自動平衡計器である。測温抵抗Rt入力の自動平衡計器を例にとると、ブリッジ回路の出力を増幅器に加えて、ブリッジの偏差を増幅器で増幅してサーボモータを駆動する。モータはブリッジの抵抗のブラシを左右に動かし抵抗値を変えてやる。ブリッジ回路の出力、すなわち増幅器の入力信号がゼロになるようになるとブリッジが平衡したことになる。その時、温度の値がブラシの位置に変換されたことになる。ブラシの先にペンを取り付けると自動平衡式記録計レコーダとなる。現代の実験室で使われる計器はほとんど自動平衡記録計である(**図2**)。

ケンブリッジ科学機器社

1898年に英国ケンブリッジ科学機器社(Cambridge Scientific Instrument Company)から、自動平衡記録計カレンダーレコーダ(Callendar Recorder)が発売された。同社は1881年に、ホリス・ダーウイン(1851-1928)とアルバート・デュー・スミス(1848-1903)が設立した。ホリスは進化論を唱えたチャールス・ダーウイン(1845-1912)の子息である。科学者と技術者が協力しあって、ケンブリッジ大学の研究に必要な機器を作る目的で創った企業である。現在では電子顕微鏡など先端技術機器を作るメーカーである。

19世紀の英国には、精密機器のメーカーが集中していた。1870年創立のエリオット兄弟社は、海底電信用の機器、抵抗ボックス、ガルバノメータなどで成功を収め、大西洋横断海底ケーブルではグラスゴー大学のケルビン卿(1824-1907)の指導でサイフォンレコーダを製作していた。

1890年代は鉄鋼プロセスが隆盛を迎えた時代で、炉の高い温度の測定が必要となった。平炉の発明者であるウイリアム・シーメンス(1823-1883)は、白金測温抵抗体を使うことを提唱したが、安定なものが得られず、それを改良したのはロングボーン・カレンダー(1863-1930)であった。彼には測温抵抗体とともに自動平衡記録計が必要になった。

カレンダーレコーダの動き

真空管も、トランジスタも、ICも、小型電気モータもないころ、どのようにして自動平衡回路を作ったのだろうか。図1を前面から見ると構成の見事さと、豊富に使われている真鍮の輝きは見る者を魅了させる。当時の技術者の知恵の結晶をみる思いがする。細かにその構造と動きを見よう(**図3**)。

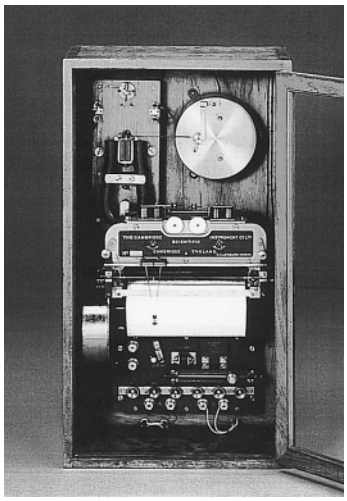

図3
カレンダーレコーダ
英国、ケンブリッジ科学機器社製
(1900年頃)
410mm×210mm×740mm
横河電機技術館準備室蔵

この記録計は測温抵抗体入力の温度記録計である。測温抵抗体は白金線の温度に対する抵抗変化を利用する温度センサで、ホイートストンブリッジ回路の一辺に接続して使用する。白金線は0.05mm φで約100 Ωである。左上に大型の馬蹄形磁石を持った可動コイルガルバノメータがあり、コイルはブリッジの中点に接続されている。動作を順を追って説明しよう(**図4**)[3]。

(1) ブリッジの偏差に応じてガルバノメータのコイルが左右に動くと、その動きは長いレバーで拡大される。レバーの先には2本のフォーク状の接点があって、どちらかのフォークが間に挟まれた共通接点に触れる。2本のフォークからは、絶縁したエナメル線がレバーに沿って2組の電磁石までつながっていて対応する電磁石リレーを駆動する。

(2) 電磁石の鉄片は、常時は時計モータに直結されたアルミ製ドラムにブレーキをかけている。ブリッジ偏差に応じて、ドライブされるとブレーキを緩める。緩められるとドラムが回転をはじめ、左右の回転は差動歯車を介して、中央の駆動軸に伝えられる。

(3) 駆動軸の細い繰り糸が左右のプーリーを介して動き、ペンをとりつけたブラシを左右に動

かす。ブラシの接点は、ブリッジの一辺の白金スライド抵抗に接触してブリッジをバランスするように動く。このようにしてペンとインクでチャートに記録する。

(4)　サーボモータに相当する駆動機構、チャートモータ、共通接点部など、すべて時計４組のゼンマイで動く。全面の写真と動作原理図が１対１に対応していて、形そのものから動作を理解することができる。

(5)　現代の自動平衡計器では、まずブリッジの偏差を検出するガルバノメータが真空管増幅器になり、ついで増幅器はトランジスタやICに置き代わって、電気のサーボモータを駆動する。モータは位相に応じて左右に動く。ここで分かるように、自動平衡の原理は19世紀末以来、まったく変わっていない。

(6)　全体はまことに巧妙な機構であり、材料には当時の最高品材料を使ったと思われる。その構造は現代でも学ぶべき点が数多く見受けられる。

例えばプーリーはアルミニウムでできている。この当時は、アルミはまだ電気分解で安価にできる時代ではなかったと思われる。素早く左右に回り出すことが必要な部分であるから、慣性の小さい金属として、高価なアルミニウム円盤を使ったものと思われる。

ガルバノメータにつけられた長い接点と接触する共通接点は、円盤状をしていて、時計機構で回転している。この円盤の左右には鍔（つば）があり、さらに円盤の回転中心は偏心している。これはフォーク状の接点が接触する際に、いつも同じ点にあたらないように工夫したものと思われる。

これは、現代でも電車の架線に使われている。いま駅のホームに立って電車のパンタグラフと架線を眺めると、架線が斜めにジグザグに走っていることにも気づく。架線とパンタグラフがいつも同一点で接触するのを避けるためである。つまり接触部がスムーズに動作して、癒着したり、一部が摩耗したりすることのないように工夫した。

ブリッジ、ガルバノメータ、時計巻きモータ、スライド、ブラッシュから構成された機構のペンの動きはフルスピードで約30秒、平衡するまで約１分かかるが、温度記録計としては十分な応答性である。ガルバノメータはブリッジの偏差を検出する検出器としては十分な感度を持つが、振動に弱い欠点がある。また動きがおそく平衡時間が長いなど、研究室内や温度計測以外には使いにくかったと思われる。記録紙は一周一日分をドラムにまいて使い、インクも一日分だけペン先に蓄えた。

電子管式自動平衡記録計

L. カレンダーの自動平衡計器には、ガルバノメータを高感度の検出素子として、また長いレバーを増幅素子として使った。繊細なガルバノメータではあるが、外部の動力も、電源も必要としない簡素な原理である。

ついで、1910年代には、アメリカのリーズ・ノースラップ（L＆N）社によってマイクロマックスと呼ばれる自動平衡計器が開発された。この計器もガルバノメータの変位の動きをレバーで拡大するが、ペン記録やスライド駆動力はモータで補う方式で全体がより堅牢な構造である。

このようなガルバノメータに頼らなくなるのは、真空管増幅器が出現してからである。しかしペンやスライドを駆動するには、磁気ソレノイドを使った。1940年代には、真空管と電気のサーボモータ駆動する方式がL＆N社やブラウン社で開発さ

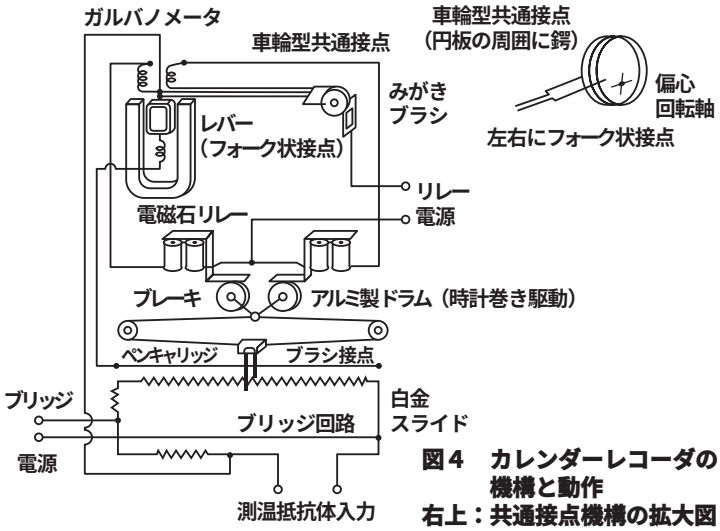

図４　カレンダーレコーダの機構と動作
右上：共通接点機構の拡大図

れる[4]。

日本でも1950年代に真空管増幅器を使用して自動平衡記録計を作る試みが大倉電気、横河電機などで始められた。自動平衡記録計を開発するには、モータに加えられる位相で回転方向が変わるサーボモータや、平衡スライド、安定な増幅器など、コンポーネントは市場で入手できなかった。計測器メーカが自社で開発する必要があった。20世紀初頭に電気指示計を国産化した時の状況と同じである。何れの企業もコンポーネントに苦労し、逆にそこが付加価値をつける原点となった。

その一つは1951年の横河電機のER電子管自動平衡記録計である。入力は熱電対を意識して直流10mVを選んだ。当時は直流を安定に増幅する増幅器はなかったから、交流に変換して増幅し交流サーボモータに加える。それには、ガルバノメータ型直流・交流変換器や機械式チョッパが使われた。増幅器の真空管はラジオ受信機に使われたST管である。写真で分かるように大形である。この自動平衡ループがはじめて組み上げられたとき、ゆっくりと平衡に達する様子を見ていた技術責任者は「ああメータと同じだ」と述懐したと伝えられている。増幅器のゲインを変えてやると、その動きが電気計器ようにオーバー・ダンピング動作になったり、アンダー・ダンピング動作になったからである(**図5**)。

当時はプロセスオートメーションの立ち上がり時期にあたり、電子管式自動平衡記録計と、空気式調節計を組み合わせて使うワンループ調節計として爆発的に売れた。この時の真空管増幅器はミニアチュア管、ついでトランジスタ、ICとつぎつぎに新しい素子を採用して行くた。同時に多入力の切替スイッチなどメカ部品も半導体化され、信頼性も向上していった[5]。

さらに、測定するレンジをロータリースイッチで自由に選べる、マルチ電圧レンジの記録計も生産された。エレクトロニクス回路の開発実験者、特に直流増幅器の開発には長時間の連続実験データが必要であり、その記録や解析には便利であった。最初は工業プロセス用向けのパネル取り付け構造であったが、ラボ専用として実験机用のレコーダも開発された。この種のレコーダシリーズは横河電機でも100万台以上を達成したと見られる。

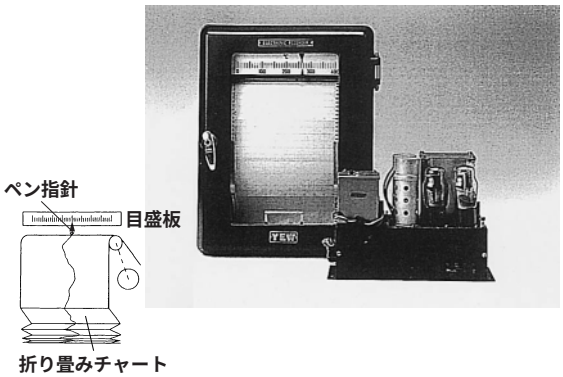

図5　ER電子管式自動平衡記録計・増幅器・チャート
日本でも1950年代に電子管式自動平衡計器が開発され、広く使われた。
320mm×310mm×400mm

このようにカレンダーレコーダのガルバノメータは真空管増幅器になり、ペンやスライドを動かす吸引型電磁石は、左右に回転する電気サーボモータに置き換わった。真空管の増幅器はトランジスタ、ICが採用されていく。つまりカレンダーレコーダの原理は100年間にわたって実際に使われたが、使われる機構部品はつぎつぎに新しい電気部品に置き換わってきた。この計器でいつも時代の先端電子部品を使いこなしてきたと言えよう。

1980年代からのディジタル技術が導入されると、自動平衡記録計にもそれまでなかった機能・特性をもつようになる。アナログ記録方式では、測定レンジの値や、熱電対の種別などのはすべてハードウエアのプリント板をそのつど選んだ。それがディジタル技術ではソフトウエアに置き換えることが出来るようになり、さらにメモリーを内蔵するようなって、従来にない機能が加えられた。詳しくは後にのべよう。

<参　考　文　献>

1）Otto Mayer : “ Feedback Mechanisms ”, Smithsonian Institution Press,（1971）
2）米国特許220, 508 : “ Improvement in Regulators for Electric Lamps ”, Elihu Thomson,（1879）
3）P H Sydenham : “ Measuring Instruments : tools of knowlegde and control ”, Peter Peregrinus LTD., 341／347,（1979）
4）松本栄寿：「ガルバノメータの発展と自動平衡記録計の出現」横河技報、36−3、37／42（1992）
5）松本栄寿：「歴史の選んだ計測器」計測と制御、41−1、53／57、（2002）