

研 究 生 活 を 顧 み て

The Review of My Research Life

沢 井 善 三 郎*

Zenzaburo SAWAI

本稿は、昭和10年4月航研研究所に入所して以来、第2工学部、ついで生産技術研究所に勤務し、本年3月定年退官するまでの37年間に及ぶ研究生活を顧みたものである。個々の研究については、ほとんどすでに発表してあるので、ここでは論文や研究報告に書かれなかった比較的興味のある経験談や感想を主として述べることにした。

I. は じ め に

昭和10年3月東大工学部電気工学科を卒業し、星合正治教授のお世話で航空研究所(現在の宇宙航空研究所)に研究嘱託として入所後、計37年にわたり東京大学に勤務し、本年3月定年退官することとなった。その間、第二工学部勤務となったり、大学院研究科兼任となったりして、講義、実験、演習等教育面にも従事したが、全体としては研究を主とする生活を送ってきたといえる。

研究を進めていくときの心構えや態度は、個々の研究者によってそれぞれ異っている。論文の作成発表を直接の目的として研究が行なわれることも多いようであるが、自分の研究をふり返ってみると、その例はあまりなく、工学の範囲内ではあるが、「何が本当か?」、「本当はいかにあるべきか?」ということが研究題目選定の動機となり、この考察の中で生まれた何かの着想ないしは考案を実現しようとしたものが多かった。

成果のえられたものについてはそのつど発表もしたが、発表もできずにうづもれてしまったものもあり、もう少し発表に努力すべきであったかもしれない。しかしそれでも最近論文や研究発表の類を整理してみたところ、合計60件以上にもなることがわかった。これは長い研究期間であったから当然かもしれないが、考えてみるとこれだけの成果がえられたのは先輩諸先生のご指導と研究を手伝ってくれた後輩の方々、職員、学部学生、大学院学生などの一方ならぬお骨折りがあったからであり、ここに心から感謝をささげる次第である。

個々の研究について解説することはとても紙面が許さないのので、ここでは研究生活において遭遇した種々の経験や感想など論文や研究発表には現われないことがらを主として、思い出すままに述べることにしよう。

II. 航研における電気屋の立場

昭和10年頃の航研は、航空機体、発動機、材料強弱、冶金、化学、計測等の研究分野があり、前年度より電気

関係が新設されたところであった。当時の電気関係者としては昭和9年電気工学科卒業の井上均氏が航空無線関係の研究をしていた。井上氏は広い技術的常識の持主であったが、同時にきわめて實際家であり、職員の組んだ実験用のセットなどをガタガタとゆすぶって、ハンダ付けでもとれると「ダメダツ」といってやり直しさせるという調子であった。後年私の研究が実際的な方向をとったこと、またかなり変った人にあってもさして驚かなくなったのには、井上氏の影響が大きかったと思っている。

ところで当時の航研では、電気屋といえば航空無線の井上氏とその配下、それに変電所の番人一人だけであった。私が研究嘱託としてはいったときは、電気部の建物はなく、井上氏は屋上の木造小屋で、ラジオビーコンの研究をし、私は表門のそばの変電所の建物の一部で、航空照明用としての高輝度ネオン管の研究や霧の測定記録の研究などを行っていた。これらの研究は自分で真空装置を動かし、ガラス細工をし、また光電管回路をつくるという経験はしたが、あまり実を結ばないうちに中止して次の抵抗溶接の研究に移ることになった。

しかし変電所に住んでいる間に種々の経験をした。一つは化学関係の研究室で、3,000Vのスイッチを入れるとすぐ遮断器がとんで困るから見てくれとの話である。行ってみると高圧碍子に塩のようなものがべったり付着している。これはどうしても掃除が必要だということで、断路器(ディスコン)まで切ったが、誰も手を出さない。仕方がないので、第一種主任技術者の資格のある私がまさききにさわってみせたところ、安心して皆で掃除をし、無事になおったということがあった。

また抵抗溶接用に3,000V電源配線をするため、ケーブルの接続を依頼したときのことであるが、当日が日曜日で変電所の要員が欠席であり、やむをえず私が変電所側のスイッチを切ることになった。スイッチはたくさんあるので、確かこれだと思っても一まつの不安がある。「切りました」と連絡し、一応確かめたいと思って現場へ行ってみると、はやくも電工が鋸でケーブルを切

* 東京大学生産技術研究所 第3部、現日本大学

っている。一瞬ひやとしたが、無事だったのでほっと胸をなでおろした次第である。

このように、スイッチを切るというようなオームの法則以前の簡単な現象でも、目に見えない電気を扱うのはこわいものである。なおこれ以外にも、電気のことといえば何によらず頼まれた次第で、卒業後間もない時期のこれらの経験は、その後科学技術などについて深く考察する場合に大いに役立っていると思う。

III. 抵抗溶接の話

抵抗溶接電流の放電管制御を手がけたのは、昭和9年から10年にかけての学部学生時代の卒業研究からである¹⁾。数年前からぼつぼつ現われてきたサイラトロンを溶接電流の制御に利用したもので、回路を考え、実験セットを組立て、うすい金属板や細い金属線の点溶接を行なえるようにしたのである。

昭和12年にいたり、航空機の製作に軽合金の抵抗溶接が適しているとのことで、星合先生などの発意で航研でこれに関する研究を行なうこととなり、とりあえず私が実験装置の整備にあたることになった。

点溶接機は最初 50 kVA (尖頭容量) くらいを予定していたが、大阪電気(株)の話もあり、350 kVA という大容量のものに変更することにした。軽合金用としては数万 A、数サイクル (50 Hz で) という正確な電流制御を必要とするが、これに対してはアメリカのウェスティングハウス社で開発し、本邦では三菱電機(株)で試作中のイグナイトロンを使用することとし、星合先生のご努力によりわが国での試作第2号のものを購入使用することになった。これに付属すべき制御装置は前の卒論のときの経験を生かし、自作することとした。点溶接は尖頭負荷であるから、電源としては温度上昇よりもむしろインピーダンスを重視し、150 kVA の単相変圧器を設備した。

卒業後2年程度の時に本邦では初めてのこれだけの設備をすることはなかなか重荷であったが、翌年完成し、3 mm 厚程度までの軽合金板の点溶接が可能となったのである。

さて溶接実験ができるようになり、大電流を精密に制御することが可能となると、次はどうすれば良い溶接ができるか、またそのためにはどんな問題があるかなどが主題となってくる。冶金の先生に相談すると、溶接部の顕微鏡写真を見て、結晶はこのように成長するらしいなどというが、どうすれば良い溶接になるかという点については一向に話してくれない。まあいろいろ条件で実験してみようということになる。

その頃井口常雄先生の紹介で実験室に現われたのが木原博氏(前東大工学部長)である。木原先生はまことに精力的で、各種の溶接条件と溶接部の機械的性質との関

係につき数多くの試験片により組織的研究を行なわれた。私も一緒になってアムスラー試験機とおつきあいをしたものである。

この頃から私には一つの悩みが現われてきた。木原先生の方は新しい装置で溶接の研究結果を次々と発表される。私も共著者として名前は出ているが、実験装置を仕上げたということ以外、電気工学的な論文はさっぱりできないということである。つまり昭和17年助教授に就任したものの、これでは学位論文など容易にできそうもないということである。しかしその間実験は継続され、次第に溶接強度の大きいものができるようになってきたし、またこの種の溶接は航空機メーカーに大々的に採用されるようになっていた。

点溶接電流は大電流である上に、数サイクルの短時間しか流さないで、電流値の測定は案外面倒である。ある時、電流波形を調べたところ、制御装置の定数の関係で電流が漸増漸減形になっており、測定に不便であるところから、定数を変更して数サイクルの正しい正弦波形に整形してみた。ところがこのようにして溶接すると、溶接欠陥が多く、溶接強度も出しにくいことがわかり、電流波形がかなり大きな意味をもつことがわかってきた。

抵抗溶接の場合、電流による加熱と機械的加圧とが定期的に適切に行なわれることが望ましく、接触抵抗や電流波形が微妙に影響しあうものであるが、現象は複雑で解析は非常に難しい。このような状態において現象解明の大きな曙光となったのは熱伝導を取扱った特殊な文献²⁾を見付け勉強ができたことである。

当時電気回路の解析や設計に、微分方程式にかかわって次第に演算子法が採用されるようになっていた。溶接を研究してはいても、私も電気畑のものとしてそれに注意を払っていた。しかしふだんはなかなか勉強ができず、身につかないものであるが、私の場合は戦時中かつての胸の病気が再発し、安静療養を必要とすることとなり、そのためかえって落付いて本を読むことができた。これが論文をまとめるきっかけとなり、ついに学位をとり、教授になれたわけであるから、人間何が幸であるかわからないものである。論文の内容は生研報告³⁾に発表してあるのでご参照願いたい。

その後放電管の位相制御を利用した溶接電流波形制御装置は各方面に採用されるようになったが、第二工学部から生研へかけて研究室で組立てたスロープ・コントロールタイマ⁴⁾を電気メーカーや車両メーカーに供給し、好評を得たものである。

また溶接を研究したことにより、工学、技術の各方面の方々と顔見知りになり、溶接学会の副会長までつとめたことは、電気工学出身のものとしてはまったく予想もしなかったことである。

IV. 共振型疲労試験機の話

溶接部の試験としては静的な強度試験のほかには衝撃試験や疲労試験、さらに腐蝕試験等が必要である。疲労試験機には種々のものがあるが、普通荷重の繰返し周波数は数 10 Hz 以下であり、一般に疲労試験には非常に長時間を要するものである。これに対して共振を利用することにより、周波数を上げ、しかも小さい力で大きい振幅を得る方法があるが、過去のもは駆動周波数の選択が試験片側と直接関係していなかったため、実験してみると常時振幅が安定しない欠点があった。この不安定は共振に近づくほど激しく、またネジの締め方や試験片の温度上昇でも大きく振幅が変化してしまう。

航研時代にこのような経験をして、共振型疲労試験機の開発はほぼあきらめていたのであるが、戦後になってアメリカの Raytheon 社の Rayflex という非常に興味深い疲労試験機が紹介され、日本にも輸入された。これは音波発生器と同様な原理で、音さのかわりに試験片をおき、この振動をフィードバックして電磁石を駆動する方式である。これならば試験片の状態が変わって固有振動数が変化しても、駆動周波数も同時に変化して追付いていくので、きわめて安定した振動を行なわせることができる。私のところでは以上の原理はそのまま採用してもらい、駆動部が真空管増幅器であったのを改良してサイラトロン・インバータにおきかえ、それにとまって電子式移相器を利用した自動振幅安定装置を考案した⁵⁾。

これは昭和 26 年度生研の中間試験研究費(現在の選定研究費)の対象となり、試作を完了したが、ついでメーカーの手に移り、国内の約 20 箇所(丸棒、搾岩機のロッド、鉄筋、自動車や貨車の板バネ、トロリーワイヤ、アルミ線等の疲労試験に実用された⁶⁾。周波数は 100~300 Hz であり、もし 250 Hz で使えば、10⁷ 回の繰返しが約 11 時間で済む。また上記の金属製品の場合、試験片としては単に長さを適当に切ったものでよく、チャックなど不要で、きわめて純粋な試験ができる特徴をもっている。

V. 高速多色輪転機の話

昭和 29 年アメリカのコットレル多色輪転機が沼津の図書印刷 KK に輸入された。建設にあたって各部の組立を担当する技術者が次々と来日したが、全体についてわかっている人がなく、また以後の保守についても心配であるとのことで相談を受けた。この輪転機は幅 2 m の紙を 300~400 m/min の速度で多色印刷を行なうもので、印刷機本体、駆動部、乾燥機、付属のボイラー、潤滑装置等それぞれ別個のメーカーで製作され、これらがきわめて巧みに有機的に組合わされたものである。

駆動部には寸動、始動、停止、増速、減速等のための制御装置があり、また印刷機本体には紙の張力制御、印刷ずれを防ぐレジスタ・コントロール、紙の左右のずれを防ぐウェブ・ガイド・コントロール、紙の残りが少なくなったとき次の巻紙へ自動的に糊づけするオートペースタ等さまざまな制御装置がある。速度がはやく、従って印刷した直後のインクを乾かすための乾燥温度が非常に高くなっているため、巻紙の糊付けの際減速することは好ましくなく、フルスピードのまま糊付けするのが特徴である。このようなことが可能になったのは、長い間糊の研究をしたおかげであると聞いて感心したものであるが、またあつという間に糊付けを完了するオートペースタのメカニズムとシーケンス制御のたくみさには全く驚き入った次第である。オートペースタばかりでなく、この輪転機にはあらゆるところにシーケンス制御が取り入れてあり、大いに興味を覚えるとともにその重要さを痛感したものである。

当時は機械の動作を理解することを第一目的としたが、輪転機の組立後、その調整に助力したほか、現場の技術者の教育を行なうことにより、以後の保守を可能とすることもできた。

VI. 客車暖房のカスケード制御の話

昭和 36 年国鉄の外廓団体である社団法人車両電気協会に対し、国鉄から「冷暖房の自動開閉の研究」の委託があり、これに対して同協会に研究委員会が組織され、私とその委員長を頼まれた。

鉄道や自動車のような動くものとの付合いは子供の時から夢でもあり、また温度の自動制御などはあまり難しい問題ではないように考えていたが、実際に検討してみると意外に困難が多いものである。研究の目的は乗客へのサービス向上以外に、乗務員の労務の緩和ということにかなりの重点がある。しかし従来乗務員のやっていたことをそのまま自動化すればよいかというと、それではきわめて不満足である。

暖房の場合でいえば、車室の温度を検出して、高すぎればヒータを切り、低すぎればヒータを入れるということになるが、たとえば車室の温度が高すぎる時には、すでにヒータ付近の温度が非常に高くなっているため、ここでヒータを切っても車室の温度はさらに上昇し、ある最高点になってから下降してくる。その後車室の温度が下りすぎたとき再びヒータを入れるわけであるが、その時にはヒータ付近の温度は非常に下っているため、車室の温度はなお下降しヒータ付近の温度が上ってから徐々に車室の温度が上昇することになる。このように車室は熱容量が大きいので、この上昇下降を数回繰返している間に列車は終点に到着してしまうことになり、適温の時はほとんどないというまづいことになる。

市販の微分動作を含んだ調節計を用いると、制御特性は改善されるわけであるが、一車分の自動化予算 20 万円以下では無理であり、また普通の調節計は車両用には適当でない。それに当時の常盤線が相手で、途中で電気暖房から蒸気暖房に切換えるところまで自動化してくれとのことである。

いろいろ考えた結果、室温とヒータ付近の温度とを別個に感温抵抗で検出し、これを一つのブリッジ回路に組むという私の考案による新しい形式のカスケード制御装置を提案し、これを開発することになった⁷⁾。これによると、ヒータ付近の温度は一応オンオフ制御によって設定温度付近に保つように制御され、室温の低い時にはこの設定温度を高く、また室温の高い時にはこの設定温度を低くするように自動的に動作するので、ヒータのオンオフの頻度は高くなり、はるかに快適な制御ができるのである。いろいろな実験を行ない、使用部品の検討を行なった後、試作し、定置ならびに走行の現車試験を行ない、さらに 4 両の客車で実用した結果も好成绩とのことであった。

冷暖房の制御といっても、本来は湿度をも含めた空気調和でなければならないし、環境の変動も大きく、乗客の服装その他による個人差もあるので、完全な制御は困難であるが、ともかく現実の客車に対して十分満足できる自動装置を完成できたことは喜ばしいことであった。ただしその後国鉄の経済状態などのため、実用化が妨げられているのはまことに残念である。

VII. プロセス・オートメーションの話

戦後プロセス・オートメーションは急速に発展してきた。すなわち各種の計測器の発達により、カンによる操業から計測操業となり、さらに工業調節計の進歩により、自動制御が行なわれるようになった。しかしこの段階の自動制御は主として連続プロセスの温度、圧力、流量、成分等を制御量とするものが多く、省力化の要素は比較的小さかったようである。石油化学工業でも、最初の連続プロセスの部分は自動制御されるようになったが、もともと人の少ないところであり、あとのバッチプロセスの部分に大勢の人が働いているのが通常の風景であった。

私が直接現場のプロセス・オートメーションに関係したのは昭和 30 年頃からで、まず毛織物の染色整理工場が最初である。毛織物は一反単位の仕事で、バッチプロセスの集合といってもよく、多くの人手がかかっていた。木綿と違って、織ったばかりの毛織物は、大きさにいえば、ぞうきんのようなぼそぼそしたものであり、製品にするまでには、入荷、検査、毛焼き、煮ジュウ、洗ジュウ、縮ジュウ、染色、脱水、乾燥、起毛、剪毛、蒸ジュウ（釜むし）、電気プレス、上り検査、包装、入庫、

出荷等の多くのプロセスがある。

この中で実際に手がけたおもな自動化は染色の遠隔集中制御と釜蒸し機のシーケンス制御である。ずいぶんいろいろな経験をしたが、いずれも一応の成功を見せ、釜蒸し機の制御などは、あまり大きなことでもないが、数ヶ月でもとがとれるというように効果的であった。

昭和 37 年に至り、名古屋精糖が新東京工場建設に際して、理想的なオートメーション工場にしたいとのことと生研に相談があり、森政弘、山口楠雄両助教授とともに、その研究開発を受託することを決心したのについては、自動制御についての従来の研究が裏付けとなっていることはもちろんであるが、上記の毛織物工場での現場的経験が大きなよりどころとなっていることはいなめない事実である。

精製糖工程の総合制御システムについては文献⁸⁾⁹⁾を参照していただきたい。この中で化学工場のバッチプロセスに大幅にシーケンス制御を採用したことは大いに省力化に役立ち、特にオートフィルタや結晶缶の場合、省力化以外にも装置の効率化、安定化、製品の均一化等、種々の点で効果を示した。その他、結晶缶への ITV の採用、連続プロセスとバッチプロセスが混在する場合のフィードフォワード制御を含めた総合制御、さらに当時としては非常に新しい計算機制御の採用等もあり、これら一連の研究開発により、計測自動制御学会の技術論文賞を受けたことはまことに光栄であった。

これらの研究を通じて、最初電動機制御などから出発したシーケンス制御が、各種機械、プロセスの制御に重要であることを感じ、機会あるごとに述べていたところオーム社の関根氏がこれを大きくとりあげられ、多数の方々の協力をえて、私の監修になる「シーケンス自動制御便覧」¹⁰⁾が刊行され、現在すでに 7 年半をすぎて未だに本屋の棚に姿を見させていることは、まことに喜ばしい次第である。しかし技術は日進月歩であるから、新しい方々によって近く改訂されることが望ましいと考えている。

VIII. 研究所における研究

研究室における研究は抵抗溶接、疲労試験機、カスケード制御以外にもいろいろあるが、学会誌や生研報告、生産研究等に発表したものが多く、ここであまり説明するつもりはない。

主なものとしては、フィードフォワードを加味した巻取張力の制御についてかなり長期にわたって研究したこと¹¹⁾、八幡製鉄の委託で電磁誘導といの設計上の基礎的検討と、試作研究をしたこと¹²⁾、パルスモータの応用として計量速度の改善を目的としたパルス式計量装置の試作研究とその状態推移法による解析を行なったこと¹³⁾などがある。また生研の千葉実験所にある試験溶鋸の送風

量制御につき実際的な研究を行なったり、増幅発電機、二相サーボモータ、磁気増幅器等制御要素としての電気機器に関する研究につき長年にわたり後輩諸兄と論じあってきたりして今日に至っている。

IX. あとがき

以上私の長い間の研究生活上の経験につきいろいろ述べてきた。人間の一生の間にはずいぶんさまざまなことに遭遇するものであり、研究以外のことでもお話したいことが限りなくあるような気がする。同窓の後輩諸君と会って一杯やった時など、思い浮かべるままに話すると、「先生どうしてそれをもっと早く話してくれなかったのですか」といわれることもある。しかしやはり一段高い教壇の上で話にくいこともあり、原稿に書きにくいこともある。科学技術の真ずいを語りあうもよいし、宗教、哲学、芸術、さては人間関係のこと、病気のこと、もしも人のためになるならば何でも話したい気持ちであるのが現状である。

皆さんどうぞお元気で、今後もよろしくおつきあい下さるようお願い致します。(1972年4月11日受理)

文 献

- 1) 星合・沢井：“三極放電管制御抵抗熔接法”，電気学会雑誌，昭10.6
- 2) H. Jeffreys: Operational Methods in Mathematical Physics (1931)
- 3) 沢井：“抵抗溶接の溶接機構と溶接条件の選定”，生産報告，1巻7号，昭26.3
- 4) 沢井：“点溶接用スロープ・コントロールタイマー”，生研リーフレット，No. 25, 1954
- 5) 沢井・鴨井：“共振型曲げ疲労試験機”，生産研究，4巻7号，昭27.7
- 6) 沢井・鴨井：“疲労試験をスピードアップする共振型曲げ疲労試験機”，生研リーフレット，No. 35, 1955
- 7) 沢井・横田・川瀬：“客車暖房のカスケード制御装置”，生産研究，15巻9号，昭38.9
- 8) 沢井・森・山口：“精製糖工程の総合制御システム”，計測と制御，6巻2号，昭42.2
- 9) 生産報告，19巻5号，昭44.10
- 10) 沢井監修：“シーケンス自動制御便覧”，オーム社，昭39.12
- 11) 沢井・稲葉：“巻取り張力の自動制御”，生産研究，12巻4号，昭35.4等
- 12) 沢井・川瀬：“電磁誘導といの設計に関する基礎的考察”電気学会雑誌，87巻947号，昭42.8
- 13) 沢井・原島・稲葉：“パルス式自動平衡形計重機の研究”，計測自動制御学会論文集，7巻6号，昭46.12

