真空管時代のリーディングエッジ電子機器

貞重浩一[†]

真空管応用電子技術は、第2次世界大戦中に、その参加諸国の国運をわけた努力によって高度成長をとげ、1950年代にはその黄金時代に達した。

半導体に比較すると誠に使用し難い回路素子であるが、当時の技術者達は、現在の技術水準で評価しても高度完成品と考えられる電子機器を開発した。第2次大戦の第3の新兵器といわれる近接信管と無線方位測定器を例として、当時のリーディングエッジテクノロジーを紹介する。

キーワード：真空管、レーダ、近接信管、第2次世界大戦、ドップラ効果、方向探知器

1. 真空管技術の黄金時代

1883年にトーマス・エジソンによって発見されたエジソン効果にその出発点を持つ真空管とその応用によって、1920年以降に発達した電子技術…その当時は日本では弱電技術、諸外国ではラジオエンジニアリング…は、第2次世界大戦中とその後の10年間に、その頂点に達した。日本で用いられた表現の弱電技術は、主として電力関係技術…発電方式や高压送電技術…、あるいは、電動機の技術をまとめて強電技術と称していたので、無線や有線の通信技術や放送技術は弱電工学と呼ばれた。

エレクトロニクスという表現は、その技術の発祥地であるアメリカにおいても1940年代までは使用されなかった。レーダとその関連技術の開発で世界的に有名になった、マサチューセッツ工科大学（MIT）の第2次大戦中に設立された電子工学総合研究機構も、ラジエーションラボラトリーと称された。

現在我々は、回路設計作業中に、半導体を実に贅沢に使っている。トランジスタを10個以上も使って定電圧や定電流ソースを作ることなどは当然のことと考えられている。

しかし、真空管技術においては、1本の真空管が高価であり、電力消費量も大きく、その体積も無視することはできず、特に小形装置を設計する場合は、その発生する熱をいかに上手に、放散させるかが問題であった。そのため、電子機器の機能、複雑さなどは、使用されている真空管の数で、ほぼ正確に推定することができた。

1930年～40年代の設計者達は、いかにして最少の数の真空管で、最高の機能を発揮させるかに努力をそそいだ。

例をあげると、高級通信用全波受信機が、10～20本の真空管で構成されており、レーダ受信機が20本、レーダ用デ

ィスプレイが10～15本程度というわけである。

トランジスタはすべて3極構成…例えばFETであると、ソース・ドレイン・ゲート…であるが、真空管は、その機能を向上させるために、内部電極数を増加して、5極管、7極管まで実用化され、また2本以上の完全に独立した真空管動作を1本の管体におさめる複合形真空管も開発された。これらの努力は、すべて電子装置自体を最少の真空管数で構成させることが、その実用性を向上させる目的に直結されていたからである。

私は中学生時代…昭和15年頃…からラジオをいじり始め、特に短波受信にはとても夢中になった。そのため現在でも、特に受信困難な放送電波、例えば、北朝鮮のピョンヤンのヨーロッパ向放送やNHKの東南アジア向放送などを、受信しては楽しんでいる。

現在生産されている「最高性能」といわれる受信機と、1940年～1950年代に製造された受信機を比較してみると、いかに当時の真空管技術が高度の域に達していたかが明らかにわかる。すなわち、数字で表現できる性能、例えば感度や選択度、雑音電圧などでは、實際上1940年製も1998年製も同様であり、強い混信電波のすぐ隣にある弱い信号を受信する場合などは、むしろ1940年製の真空管方式の方が高忠実度である。唯一の相違点…これは重要な点…は、安定度と使用の容易さである。

真空管方式は、その性能を最高に保つために頻繁な再調整が必要であり、また、その最高性能を装置から引き出すには相当の技術知識とスキルが必要である。

というわけで、装置の大きさや安定度以外では、1940年～1950年代の真空管黄金時代の電子機器は、現在の技術水準で評価しても、高度の域に達していた部分も少なくない。以下二、三の例をとって、その当時のリーディングエッジテクノロジーを調査してみる。

[†]米国防総省 情報蒐集機関 技術コンサルタント

"Leading Edge Products of the By-gone Vacuum Tube Era" by Koichi Sadashige
(Technical and Management Consultants, Sadashige and Associates, NJ, USA)

2. 近 接 信 管

太平洋戦争の後期に日本軍の特攻機の90%を撃墜したと称される近接信管…電子信管あるいはVTフューズ（VT Fuse ; Variable Timing Fuse）とも呼ばれる…は、原子爆弾およびレーダと並んで第2次大戦の帰趨を決定した新兵器である。

私がRCA社のカムデン技術部に入社した1953年は、米国FCCがRCA方式のコンパティブルカラーテレビジョン放送の実施を認可した直後で、我々はカラー放送用スタジオ機器の開発に文字通り昼夜兼行の努力を注いでいた。

開発の過程で、部分品を無駄使いして…私にはそう見えた…作った試作品は、成功すれば、すぐその次のものを全く新しく作り始める。失敗したものはそのまま研究室のすみに放棄される。このような作業状況であるから、6ヵ月も経過すると研究室は足のふみ場もないほどの完成品・半成品ガラクタなどがたまってくる。そうなると週末を利用して大掃除が始まる。我々はいろいろな理屈を付けて上司の許可をもらってそのガラクタ（といっても立派な装置の場合が多い）を家に持って帰る。

そのような大掃除のある日、研究室の戸棚の奥に私は2個のボール箱を発見した。私が何が入っているのかを調べるつもりで開けようとする、附近にいた2～3の連中が「それは君には興味のないものだよ」といって戸棚の奥にまた押し込んでしまう。そうすると私は余計に好奇心が出て来て、どうしても箱の内容が知りたくなる。遂に友達の一人が「君が気を悪くすると思ったから見せたくなかったけれど」と称して箱を出して開けてくれた。中にあったのは鉛筆の太さで長さが2cm位の小形真空管で、何百とギッシリとつまっていた。これが近接信管の心臓部を構成していた超小形真空管6K4であった。

1945年春、いまだ太平洋戦争の終結が確実に見えていない頃には、この真空管はRCA、シルバニア、その他のメーカーで月産合計1,000万本のスケールで生産されていた。信管自体の生産量も月間200万個に達しており、日本がポツダム宣言を受諾しない場合には月産量を500万個に増加する計画であった。

2.1 近接信管の必要性

砲弾あるいは爆弾が目標に衝突しなくても、その近辺で爆発することが可能であれば、目標を破壊する。目標が高速で動いている場合、それに衝突しなければ、破壊力を持たない砲弾は、極めて効果力の少ない攻撃兵器である。

このため目標付近で自動的に爆発する魚形水雷は第2次世界大戦以前からある程度実用化されていた。魚形水雷の場合は、目標の艦船よりの磁気、その発生する音響、あるいは大きな物体が、水中を行動するため発生する水圧の変化等を探知して爆発させるわけである。

飛行機を目標とする自動爆発装置は、艦船等を目標とし

た場合とは問題が根本的に違って来る。目標は小形であり、かつ高速で行動する。探知方法も、音響は砲弾自身が高速で飛行するので自己発生の音が問題であり、また音速は空気中では330m/s程度で遅すぎる。エンジンおよび排気ガスよりの熱は、理論的には目標探知に使用できるはずであるが、当時の技術では感度が低く実用的とは考えられなかった。

第2次世界大戦当時、すでに対飛行機迎撃用として、高射砲に目標の将来位置を示すためのコンピュータは実用化されていた。コンピュータは純機械式であるが、入出力系統にはある程度電気装置…リレー、ボタンスイッチ等…が使用されていた。このような装置を使用しても、高射砲弾の命中率は、最適な条件の下でも3,000mの高度の目標で5,000対1、1,000m高度の目標に対してでも2,000対1という、全く実用効果のない状態であった。したがって、近接信管を使用する砲弾起爆装置の必要性は切実なものであった。

2.2 初期のコンセプト

対飛行機用近接信管の必要性を最も強く感じた国は、1939年に相互の国土が空襲され始めた英国とドイツであり、両国ともその可能性をその頃から研究し始めた。両国とも当時としては最も進歩したレーダ技術を持っていたので、レーダを応用することを考え始めた。両国ともレーダ応用近接信管のコンセプトは、今回の世界戦争中には実現不可能という結論に1940年～1941年頃に達したが、その技術的理由は両国で異なっていた。

英国があきらめた原因は、たとえ探知距離を10～20m程度としても、レーダ送受信機は真空管を最低10本～15本必要とし、とてもそのような大きな装置を高射砲弾の中に組込むことは不可能というのが理由である。

ドイツ側の記録では、装置の大きさにはあまりふれていないが、砲弾を発射する時のショック、約5,000～10,000Gに堪える真空管は実現不可能という結論で、比較的早期に開発を中止した。

拡大していくヨーロッパ戦争、および東洋における日本の戦争行動の活発化の背景のもとに、アメリカはいずれは戦争に参加することは不可避と考え始めた。ルーズベルト大統領は、アメリカの近代戦技術能力を短期間に急速に向上させることを目的として、NDRC（National Defense Research Committee）、国防技術開発機構という組織を、大統領直属のもとに1940年に設立した。有名なマサチューセッツ工科大学のラジエーション研究所、ハーバード大学のラジオ研究所、カリフォルニア工科大学のロケット推進研究所、ジョンズ・ホプキンス大学の応用物理研究所等はすべてNDRCの下に設立された。

英国における1939～40年の経験によると、来襲するドイツ機を1機撃墜するのに1万5,000から2万発の高射砲弾が消費されているという事実が報告されて、NDRCの最優

図1 ドップラ効果

日本海軍機上のフェアチャイルド製無線方向探知器
(出典：川西航空機株式会社，現，新明和産業)

図2 単3極管 発振/検波回路

先研究目標のひとつとして近接信管開発が選ばれた。

2.3 ジョンズ・ホプキンス大学での開発活動

レーダあるいはそれに相当した方式によって、砲弾の破片で飛行機に飛行不能になる程度の損害を与える距離を測定し、その時点で砲弾を爆発させるという方法が、近接信管に要求された機能である。英国での研究でも、標準のレーダ送受信機をこのような至近距離測定に使用することは不可能であり、何か全く新しい電波による簡単な距離測定法を開発することが必要であった。

開発を担当したのは、ジョンズ・ホプキンス大学の応用物理研究所で、その主要メンバーは、すべてアクティブなアマチュア無線オペレータであった。当時のラジオアマチ

ュア達は、自分で短波送受信機を設計し製作することにこっていた連中であるから、この問題を全く新しい実用的な立場からアタックした。

砲弾の破片による飛行機に対する破壊有効距離は最大約20mというデータはすでにあったので、問題はいかにして砲弾より発射される電波が、長さ10~20mのアルミニウムの物体から反射されたことを、砲弾内の受信機で確認することである。

簡単な3極真空管（あるいはトランジスタ）発振器は、その附近に大きな電波吸収体が近づくと、負荷が増加して、真空管のグリッド電流（トランジスタのベース電流）が減少する。これがいわゆるグリッド・ディップメータの原理

図3 近接信管回路図

である。この方法は実用性がなかった。ごく近距離…5m位…では、グリッド電流の変化は信頼度を持って検出可能であったが、20mでは変化量は各種の雑音レベル以下で信頼性がなかった。

その次に実験された方法はドップラ効果の応用である。

目標の飛行機と砲弾が高速で行き過ぎる場合、飛行機より反射される電波の周波数は、飛行機と砲弾の相対速度によって変化する。この変化した周波数と、発振器自体の周波数の差は、低周波の数100Hzであるので、その検出によって、砲弾が目標に最短位置に達したことが判明する。砲弾の速度は毎秒1,000m附近であり、当時の飛行機の速度を100m/s（360km/時）とすると、ドップラ効果による2つの周波数の差・ビート周波数は、図1に示したように200Hz前後である。飛行機の速度は砲弾速度よりはるかに遅いので、計算上は無視してもよい。これは実に独創的なかつ奇抜な構想であった。

実験の結果、発振器はそのまま反射波の検波器としても動作させることが可能であることがわかった。すなわち、唯一本の3極真空管が有効距離は短いとしても、レーダの送受信機としての機能を持ったわけである。このコンセプトを図2に示す。

しかし、実際に砲弾の弾頭の中に入れることが可能な小形装置を開発するには問題は山積していた。

まずは10,000Gというショックに堪える真空管の開発とその大量生産である。カソードを円筒状にして傍熱方式としてフィラメントを保護し、電極相互間にサポートを設け、また真空管が弾頭に装備された場合、その長手方向を砲弾の進行方向と一致させることで、新たに開発されたミニチュア真空管は20,000Gでも問題がないことがわかった。

次の問題は電源である。砲弾は製造されてから実際に使

図4 近接信管構造図

用されるまで、数ヵ月～2年間位の期間があると考えられた。当時の電池技術では、自己放電で2年間という寿命は実現困難であった。また事故防止という観点からも、電池は使用直前まで活性化させないことが要求された。この問題は、積層電池のガラスカプセルに入っている電解液が、砲弾発射の衝撃で破れたカプセルから電池層に注入されて電池を起動させるという方法で解決された。

近接信管は最初は5インチ（127mm）高射砲弾用として開発され、太平洋戦争後期にはより小形の3インチ（76mm）高射砲弾としても、開発が完了していた。

2.4 量産への移行

1940年後半から開始された開発作業は、日本海軍の真珠湾攻撃直後の1942年初頭には、試作品の信頼性が当初の目標の50%の附近まで達するほどに進捗した。1942年8月、アメリカ東部のチェサピック湾で行われた実験では、大形巡洋艦クリーブランド号より発射された近接信管装備

の高射砲弾で無線操縦された2機の目標機が、20発の発射で両機とも撃墜された。

近接信管は開発活動の出発点から高度の機密保持が要求されたが、太平洋戦争開始時期頃からは特に、より高度の注意が必要となった。

問題は近接信管の構造があまりにも簡単なことである。図3の回路図に示されているように、使用真空管は発振兼検波管1本、低周波増幅管2本、サイラトロン（電子スイッチ管）1本の計4本である。これでは、もしも日本あるいはドイツがその内容を知ったら、短期間に相当品を複製し製造する可能性があると考えられていた。そのため1943年から開始された量産作業は、まず部品製造を米国東部の各地に分散した。サブアセンブリはその目的が確認される可能性はまずないので、小規模な工場で行われた。サブアセンブリを集めて信管を完成する最終工程は、高度の秘密保持が可能な、大企業の工場の一部を隔離して行われた。

近接信管はもともと信頼性が100%ではない起爆装置の一部であるので、大量生産が順調に動き出しても90%以上の確率を達成することは不可能であった。このため、その使用は原則として、不発弾の回収が不可能な海上戦闘に限られていた。唯一の例外は1944年の年末に、ドイツ陸軍が最後の組織立った反攻をライン川西岸で行った時である。この時、連合軍は非常な危機におち入り、ドイツ空軍の地上攻撃に対抗するため近接信管を限られた範囲で使用した。

2.5 後日談

私がRCAに働いていた時の友達で、1970年からは私の先行機器開発部の一員となったロバート・デニソンは、沖縄戦争当時、アメリカ駆逐艦、ウィラード・キース号の電子兵器長であった。彼の話によると、沖縄戦に参加する前に、すべてのアメリカ艦艇は、フィリッピンのカビテ軍港に入り、高射砲弾を近接信管装備型に取り換えたとのこと。水兵の列が軍艦の前門から1人1個ずつ普通砲弾を肩にのせて出て行くとともに、後門からは近接信管砲弾をやはり1人1個ずつ搬入して来る光景は壮観だったそうである。

最高機密の近接信管の最大の最終組立工場のひとつは、なんと私が何度も徹夜をして放送用VTRの出荷を助けたRCAカムデン工場第8号ビルである。

元米国海軍中尉ロバート・デニソンは、デレイラインを使用したアパチャイコライザの発明者でもある。

3. 航空機用無線方向探知機

1930年代になって航空機の性能、ことにその航続距離が向上するに従って、信頼性の高い航法方式が必要になって来た。指向性のある送信アンテナを使用して比較的幅の狭い電波を発射し、航空機がこの電波に乗って航行する方式はある程度実用化されたが、実用距離が最大100km程度であり、長距離飛行には実用不可能であった。

その当時すでに長波電波…100～500kHz…が小電力の送信でも、比較的長距離、ことに海面上においては、驚くほどの伝達性能を持っていることが知られていた。これは、電波が海面上の恒温度空気層と海面で構成されるチャネル間で反射されつつ、比較的低い電界強度減衰率で伝播して行くからである。この現象を応用したのが無線方向探知機である。航空機は、機上に長波受信機と方向性のあるアンテナを装備し、目的地より発射される電波の方向に飛行すれば、自動的に目的地に達する。この方式はもちろん海洋航行の船舶にも使用されたが、その頃の小型の比較的低性能の航空機上で使用可能な装置の開発は、当時では大問題であった。

3.1 ドイツとアメリカ方式の違い

ドイツではテレフンケン社が開発を1932年頃から開始し、1935年には一応実用可能な性能を発揮するようになった。テレフンケン社の方式は、受信された信号をそのまま高周波3段増幅して検波する方式で、当時はTRF (Tuned Radio Frequency) 形と呼ばれた。現在のワイヤレス術語でいえば、ダイレクトコンバージョン方式である。装置は大形で重量もかさみ、航空機機上で使用するにはいろいろ問題があったが、その第一は、リモートコントロールが不可能である点であった。15kgもある装置を狭いコックピットの中に設備することは、まず不可能であった。

ほとんど同時に開発されたアメリカ製の装置は、電子系はドイツ式よりはるかに複雑であるが、高性能のスーパーヘテロダイン方式が使用された。当時ちょうど実用化されたRCA社発明の金属真空管、いわゆるメタルチューブを活用したが、電子系が複雑なため使用真空管の数は、テレフンケン社の7本に対して10本～13本であり、したがって装置全体の大きさと重量は、ドイツ製品よりむしろ大きかった。アメリカはその当時全世界のラジオ関係の生産量の70%以上を占めており、無線方向探知機も、数社が殆んど同時に製品を開発したが、すべての製品に共通な点は、リモートコントロールが可能である点であった。

したがって、狭いコックピット内には小型のコントロール装置だけを設備すればよいわけで、方向探知用受信機とその電源は、飛行機の内部の空間を適当に使用して設備すればよいわけである。

1930年代に、その当時としては最先端技術製品である方向探知機をリモートコントロールする技術は、その技術自身がまた最先端であった。周波数調整方式は、連動された可変容量のコンデンサを、特殊なフレキシブルケーブルで動作させる機械方式が使用された。数個の機械的カップリングを含む、フレキシブルケーブル方式は、原理的にバックラッシュが多い。バックラッシュがあると、実際の同調周波数とダイヤルの表示周波数の間に誤差が生ずる。

受信周波数範囲を切換える…いわゆるバンドスイッチングも、当時は連結された回転式多極スイッチによる機械的

方式であり、この連動スイッチをリモートコントロールすることも簡単ではなかった。当時のアメリカでは、現在我々が「メカトロニクス」と称する、電気と機械の組合せの部品や方式が他国より発達していたので、信頼性のあるリモートコントロール方式の設計が可能であった。

機械的なカップリングのバックラッシュは、スプリングを使ってカップリングが常に1方向に負荷されているようにして解決された。フレキシブルケーブルのよじれによる、バックラッシュは、2本のケーブルが反対方向によじれるように組合せることによって防止できる。しかし、フレキシブルケーブルの問題は、ケーブル自身改良によって、よじれを生じないようにして、実用化された機器には2本ケーブル方式は使用されなかった。

比較的大きな回転力を必要とする連動スイッチのリモートコントロールは、直流電動リレーとカムを組合せた回転機によって行われた。

3.2 日本海軍の方向探知機への注目

1930年代に日本海軍は、その水上艦艇の保有量が国際条約で制限されていたので、その不足量を長距離飛行可能な攻撃機でおぎなおうとした。いわゆる陸上攻撃機である。これらの航空機の航法用に最も有効な装置は無線方向探知機である。攻撃時には、敵国の放送電波、あるいは、あらかじめ目標点に送ってある味方艦…潜水艦などから発射される電波に向かって行けばよく、帰還するときはもちろん味方が電波を出してくれるわけである。

当時の日本の技術では開発困難であることを知った日本海軍は、ドイツ製とアメリカ製の数種類の装置を購入して試験した結果、アメリカのフェアチャイルド・エビエーション社製を標準装置とすることに決定した。現在でもフェアチャイルド・セミコンダクターの名で繁栄している系統会社の創始点ともいえるフェアチャイルドは、航空機以外、偵察用カメラ、航空機用電子機器、各種の計器などの総合メーカーであった。日本海軍はどのような名目を使ったのかは不明であるが、1935年頃から太平洋戦争開始の直前まで、当時1台600ドル…現在の価格に換算して約15,000ドルの装置を合計1,000台近くも購入したらしい。

日中戦争初期の有名な渡洋爆撃隊は、上海の外国系ラジオ放送局の電波を使って目的地に到着し、太平洋戦争でのハワイ空襲部隊は、ホノルルの放送局の電波に乗って真珠湾を発見した。

3.3 アメリカに発見されたゼロ戦のフェアチャイルド装置

日本海軍は方向探知機の実用性を高く評価して、太平洋戦争開始点頃には一部の戦闘機を含む、極めて大多数の飛行機に搭載していた。

太平洋戦争の初期に極めて有効な働きをした日本海軍の零式戦闘機の有利な性能およびその多数の弱点を、アメリカに理解させることになった「アクタンゼロ」の話は有名

である。

1942年6月、アラスカのダッチハーバーを攻撃した零式戦闘機の一機が、アリューシャン列島のアクタン島に不時着し、操縦士は死亡したが飛行機自体は損傷が極めて少なく、米本土において完全に復元されて、米軍に実に貴重なデータを与えた。

この飛行機を最初に回収するためにアクタン島に渡った海兵隊技術団を最も驚ろせたものは、飛行機に装備されていたフェアチャイルド製の無線方位測定機であった。当時の記録を読んでみると、彼らの驚ろきと、「日本という国は本当にあきれた国だ」という彼等のおどろきが目に見えるようである。

3.4 イアハートが使えこせなかった方位測定機

方向探知機については、今ひとつ興味深い、しかし悲しい逸話がある。

アメリカの有名な女流飛行家、アメリア・イアハートが1937年世界一周飛行を計画した時、彼女の乗機、ロッキード・エレクトラには、もちろん方向探知機が装備されていた。彼女は7月1日ニューギニアのブナ出発して、南太平洋の孤島、ホーランド島で燃料を補給して、ハワイ経由で、7月4日アメリカの独立記念日に出発点であるサンフランシスコに帰還する計画であった。

ブナからホーランド島までは何ひとつ目標のない4,734kmの海上飛行であるが、目的地には特に米国沿岸警備隊が、長波送信機を装備した警戒船、イタスカ号を停泊させて、イアハート機を無線誘導する準備をしていた。

イアハート機は、ホーランド島を発見することができず、その行方は現在でも不明である。アメリア・イアハートも彼女と同行した航法士、フレッド・ヌーナンとも無線装置の取り扱いに不慣れで、またモールスコードも読めなかったことは知られているが、その当時の最高無線技術製品が、彼女の世界一周飛行の最も重要な、また困難な航路において、その効果を発揮できなかったことは残念である。

一方日本海軍は、フェアチャイルド装置の国産化に努力し、住友通信工業株式会社（現在の日本電気の一部）が昭和17年頃には量産を開始した。海軍兵器名称“三式無線帰投方位測定機”は約3,500台製造された。米国において第2次大戦中に無線方位測定機を量産したのは、現在でも航空電子機器工業界の雄であるベンディックス社で、約10万台が製造された。

(2000年11月20日受付)

貞重 浩一 1927年、秋田県生まれ。1953年、カリフォルニア工科大学技術修士課程修了。1978年まで、ニュージャージー州カムデンRCA放送機器事業部勤務。1985年まで、松下電器米国支社勤務。同社の海外技術研究所設立。その後、技術経営コンサルタントとして、米国大企業数社を援助。現在米国国防総省情報募集機関技術コンサルタント。正会員。