

謎の物質「半導体」の発見 理論より応用が先行する

20世紀エレクトロニクスの歩み(9)

相良 岩男

KOA 顧問

半導体シリーズの2回目である。奇妙な現象を示す「半導体」というものが存在することがわかり、物性に関する基礎理論も整ってきた。そして、半導体の理論解明への挑戦が始まる。理論解明は遅々として進まなかったものの、応用が先行する。まずレーダの検波器に半導体が使われた。第二次世界大戦後、米ベル電話研究所所長のM.ケリーは、電話を発展させるためには、交換機に使っている電磁リレーを固体増幅器に置き換えることが必須と考えた。その研究者としてW.ショックレーがスカウトされたのである。(本誌)

ようやく半導体物性に関する基礎理論が整ってきた。いよいよ、謎に包まれた半導体理論を解明するための挑戦が始まった。

ドイツのW.ショットキーは、1929年に「亜酸化銅に電極(金属)を接触することによって生じる整流作用は、亜酸化銅の内部ではなく、表面のバリアが関与している」と発表し、続いて1931年に「金属と半導体との接合の場合、逆方向電圧の増加で逆方向電流が増加する原因は鏡像力によるショットキー効果によるものである」と論文に載せている。

同じ1931年、ドイツのC.ワグナは「半導体に流れる電流はドリフト電流と拡散電流である」と発表した。

謎の一つ「温度特性」にチャレンジ

英国のH.ウィルソンは、量子論とフェルミ・ディラックの分布関数を

用いて、半導体に関する実に見事な理論を考え、1931年～1932年に2件の発表をした(図1)。

一つ目の論文は、導体、半導体、絶縁体の相違をエネルギー・バンド理論によって説明したものである。

このなかで、半導体には「真性半導体」と「仮性半導体」の2種類があることを説明し、そのうえでそれぞれの特徴を以下のように説明している。

導体、つまり金属は温度上昇に対して電子の数がほぼ一定である。

これに対し、半導体の一種である真性半導体は、絶対温度0Kで価電子帯が満たされ、かつ伝導帯がカラだと絶縁性を示す。温度が上昇すると価電子帯から伝導帯に電子が移動し、伝導性が高まっていく。つまり抵抗値が温度上昇とともに減少することを初めて明らかにした。

仮性半導体には、伝導帯のすぐ下

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、電子回路の歴史は1996年9月23日号(no.671)と1997年1月6日号(no.679)に掲載した。半導体の歴史の1回目は1997年6月2日号(no.690)に掲載した。

にドナー準位（エレクトロ・ネガティブと呼んだ）が、充満帯のすぐ上にアクセプタ準位（エレクトロ・ポジティブと呼んだ）が存在している。温度が上昇すると、伝導帯に電子が上がり、充満帯に正孔ができて電気が伝導するようになる。温度が上昇するとそれが増加すると発表した。

この発表は多くの物理学者に衝撃を与えた。M.ファラデーが発見した謎に包まれた問題——つまり硫化銀の抵抗値が温度によって変わるという問題は一応の解決をみたのである。M.ファラデーの発見から、なんと92年の歳月が経過していた。

もう一つの謎「整流性」に挑戦

続いてH.ウィルソンはK.ブラウンが発見した非オーム性の解明にも挑戦した。これがもう一つの論文である。

1932年、導体と半導体とを接触させたとき、エネルギーの高い方から低いほうに電子の移動が起こる。この移動は両方のフェルミ準位、つまりエネルギー分布が等しくなるところでとまり、バリア（壁）が形成される。このバリアが整流性の原因であるとH.ウィルソンは説明した。

すなわち、電子は粒子性ととも

に波動性をもつ物質波であるため、このバリアの幅が 10^{-7} cm以下のとき、電子は波となり、空間をトンネル効果によって簡単に通過できるという推論だった。

この推論によれば、金属とn型半導体の接触において、n型半導体に+電圧を印加して順方向にバイアスすると、バリアの幅が 10^{-7} cm以下のとき、トンネル効果によって電流が流れるということになる。 10^{-7} cmがトンネル効果が起こる最大の幅というわけだ。

もう少し説明しよう。電子はまず金属の中を「粒子」として移動し、次に 10^{-7} cmのバリアを「波」として通過し、続いてn型半導体の中を「粒子」としてなんの抵抗もなく移動していく。逆方向では幅が 10^{-7} cm以上となり、電流が流れない。この考え方は理論的に納得でき、素晴らしかった。

こうして謎に包まれた半導体という物質は理論的に解明され、K.ブラウンの非オーム性、つまり整流理論もすっきりと解決できたかにみえたのである。事実、その後の数年間、この理論は多くの人たちに認められている。ところが、まもなく一つの大きな問題点が指摘された。

なぜブレイク・ダウンが起こるのか

H.ウィルソンがトンネル効果による半導体理論を発表してから理論的発表は相次いだ。金属と半導体を接触してn型半導体に負の電圧を印加した場合、逆方向となりほとんど電流が流れない。ここまではよい。ところが、この負の電圧をある電圧以上にすると突然、逆方向の電流がドッと流れるのである。これを「ブレイク・ダウン電圧」という。

この原因について、2年後の1934年、英国のC.ツェナーは、高い電圧を絶縁物に印加すると、トンネル効果によって価電子帯の電子が伝導帯に移るという「ツェナー効果」を発表した。この考えは、金属と半導体の場合にも適用でき、ブレイク・ダウン電圧に関する一つの現象が解明されたのである。

タビドフがウィルソン理論を否定

1930年代、電源用整流器として亜酸化銅（ Cu_2O ）やセレン（Se）がすでに実用化されていた。1938年、旧ソ連のB.ダビドフはCu電極の上に Cu_2O を形成し、この上から金属電極を取り出す構造の整流器を作り、 Cu_2O の研究をしていた。彼は、この整流器がH.ウィルソンの理論と二つの点で異なることを指摘した。

一つは Cu_2O はp型であるにもかかわらず+電圧を印加したときに順方向となること。もう一つはバリアの幅が 10^{-7} cmではなく 10^{-3} cmくらいに厚くなっているということだ。つまり、この整流器はトンネル効果理論で期待される極性とまったく逆であり、かつバリアの幅が異なっている。これに基づいて、彼はH.ウィル

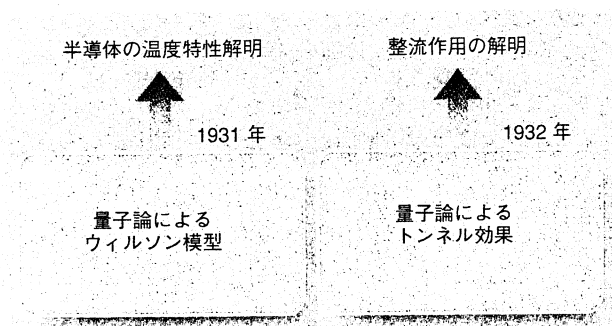
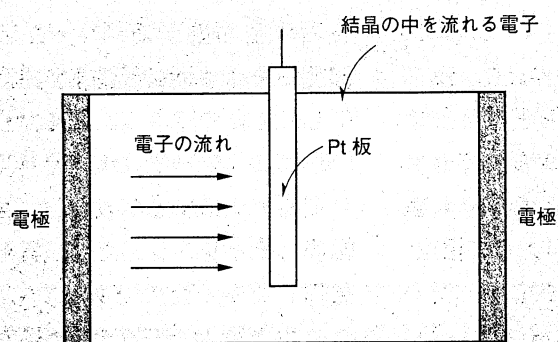


図1 H.ウィルソンによる半導体理論
H.ウィルソンは半導体の特性を量子論によって見事に解明した。その後、整流特性が逆方向であることをB.ダビドフが指摘した。ここには秘密が隠されていたのである。

(a) 考案した固体増幅器



(b) 3極真空管

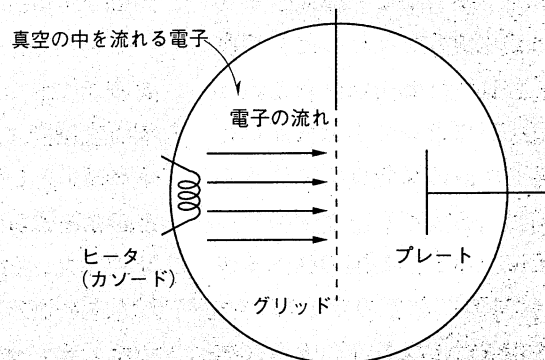


図2 R.ヒルシュとR.ポールが考案した固体増幅器 真空管は電子の流れ(電流)をグリッドで制御している。同様に、結晶中の電子の流れをPt板で制御できるのではないかと考えた。この仮説を基に固体増幅器が誕生した。

ソンの理論を否定したのである。

ようやく光明が見え始めた半導体理論はまたしても振り出しに戻ってしまった。実に6年間も、極性の違いという基本的な事柄について、だれも気づかなかったとは驚きだ。

そしてB.ダビドフはCu電極の近くにn型Cu₂Oができ、これがp型Cu₂Oと接触しており、p型Cu₂Oに+の順方向バイアスを印加すると、n型からp型へ電子が移動すると説明した。まさにpn接合理論の説明にほかならない。残念なことに当時、n型Cu₂Oが存在するということが疑問視されたため、この理論をさらに追求することはなかった。

ウィルソン理論に秘密が隠れている

H.ウィルソンの理論は、B.ダビドフによって否定されたが、ウィルソン理論は何か重大な意味をもっているかにみえた。この理論はある条件下では正しかった。実は1957年に日本の江崎玲於奈が、不純物濃度が極端に高いpn接合において発見した

エサキ・ダイオードの理論的裏付けとなったのである。

これに対しB.ダビドフは、電極として用いるCuとp型Cu₂Oとの間にn型Cu₂Oが存在していると考えた。これ以上の進展はなかったが、その後、W.ショックレーのpn接合理論へと発展していくのである。

1939年ころ、英国のN.モットやドイツのW.ショットキーは、電源用整流器に用いるCu₂Oの整流性について拡散整流理論を発表していた。ところが、1942年にドイツのH.ベーテはレーダなどに用いるSiやGeの検波器に、これらの理論は適用できないと言いだした。

その理由として、H.ベーテは、Cu₂Oには不純物が多く含まれており、電子の平均自由距離がバリアの中よりも外のほうが短い、SiやGeはその逆となるのではないかと考えた。SiやGeでは電子を溜めることのできるn型半導体が存在し、印加電圧を上下することによって、整流性が説明できるのではないかとこの仮説を唱え

た。いずれの考えも基本的には正しく、きわめて核心に近いところまで近づいてはいたが、まだ理論的にはすっきりしなかった。

固体増幅器の提案相次ぐ

1920年代にはすでにラジオ放送が登場し、真空管増幅器が広く用いられるようになっていた。当時、驚くべきことに、早くも真空管とは異なる固体増幅器へのチャレンジが始まっているのである。ただし真空管技術者が発想したのではなく、物理学者が取り上げたのだ。

スタートを切ったのは1926年のことである。米国のJ.リリーフェルドはガラス板上に二つのPt(白金)電極を置き、その上に半導体である硫化銅(Cu₂S)の薄膜を作り、その中央部にAl(アルミニウム)の電極を置く素子を考えた。Alの電圧をCu₂Sに対して+とすると、Cu₂Sの抵抗値が変化し、Cu₂Sの両端に電圧を加えると大きな電流変化が期待できるはずだというのである。

実に、これは固体増幅器の一つであるショットキー型の電界効果トランジスタ (FET: field effect transistor) の最初の提案だったのだ。現在の MOS FET (metal oxide semiconductor FET) においても動作原理は同じであり、その発想は実に素晴らしい。

1935年になると、英国のO.ヘイルはTe (テルル) などの半導体の両端に電極を付け、半導体の表面に非接触の制御用電極を置いた素子を考案している。これも MOS FET の一種である。ただし、これは物理的な非接触であって、結晶学的な絶縁体による非接触ではない。

1938年にドイツのW.ショットキーは、半導体と金属が接触すると、半導体から金属に電子が移動し、ショットキー・バリヤ(空乏層)が生じるという概念を発表している。この考えは米国のC.ミードが1966年に発表したショットキー・バリヤを利用した GaAs FET へと発展していく。GaAs は Si と比較して電子移動度が5倍程度大きいので、GaAs による高周波用 MES (metal semiconductor) FET が開発され、800MHz~1.9GHz帯などの携帯電話に用いられている。

さて1938年に話を戻そう。ドイツのR.ヒルシュとR.ポールは共同で実験を行なった(図2)。

まず、KBr (臭化カリウム) の結晶に Pt 電極を取り付け、ここに Ca (カルシウム) 針を立てて、+ の電圧を加えてみると、整流性を示すことが観測された。

次に Ca 針とは別にもう1本 Pt 針を結晶内に埋め込み、ここに電圧を加えてみた。すると、埋め込んだ Pt

針のわずかな電流変化に対し、Ca 針と Pt 電極間の電流が大きく変化するのである。

この発想は、JA フレミングの2極真空管に一つのグリッドを挿入して電流を制御するというド・フォレストの3極真空管の類推からでてきたものだった。つまり真空を固体に置き換えて、Pt 針 (グリッドに相当) で電子の流れを制御しようとしたわけだ。

これに対し W. ショックレーたちは、半導体の接合現象における注入という概念から固体増幅器を発想している。今日のトランジスタとは、原理的には異なるものだった。

1939年、英国のN.モットは、Cu と Cu₂O の間には、B.ダビドフがい

う n 型半導体は存在せず、絶縁体バリアが存在するとした。ここから本格的な金属-絶縁物-半導体によるトランジスタ MIS FET (metal insulated semiconductor FET) の発想が誕生してきたのである。このバリアを「モット・バリア」という。

このように多くの人たちが固体増幅器にチャレンジしたが、実際には動作しなかったのである。しかし、ここで出てきた概念は MOS FET へと引き継がれていく。その後もドイツのH.ベーテやW.ブラッテンが整流理論を提案したり、米国のS.ペンツァーや、J.バーディーン、W.ショックレーが半導体表面に関する解析結果を発表したりするなど、理論的考察は着実に進展していった。

理論よりも応用が先行する まずレーダ用整流器に使われた

世界の人々を恐怖へと巻き込んだ悲惨な第二次世界大戦は、欧州から火の手が吹き上がった。そもそもこの発端となったのは1939年9月1日0時45分、宣戦布告なしに、ナチス・ドイツの独裁者ヒットラー率いる軍隊がポーランドへ電撃的に急襲したことだった。

この行動に対し英国とフランスは、ポーランドとの相互援助条約に基づき、ただちにドイツに対して宣戦布告を行なった。一方、独ソ不可侵条約を結んでいた旧ソ連は、ドイツを支援すべく、16日後にポーランドへの侵入を開始している。

欧州は急速に戦火の渦へと巻き込まれ、第一次世界大戦から21年後、再び大きな戦争が勃発した。これが

第二次世界大戦へと拡大する。

この大戦中に、エレクトロニクスに関して、特筆すべき三つの新しい技術的發展があった。一つ目がレーダ、二つ目が爆弾用近接信管、三つ目は弾道計算用のコンピュータだった(右掲の「爆弾用近接信管、小型化には半導体だ」参照)。

このなかで半導体に関連するのはレーダである。検波用として半導体素子が威力を発揮した。応用がみえたことによって、半導体材料の研究が加速することになる。

かくして日本も戦争へ参入

欧州の状況に対し、ポーランド開戦の4日後、日本は欧州戦争に介入しないとの声明を発表した。とはい

え、そのころの日本は戦争前夜を思わせる不穏な状況下にあった。

すでに1937年7月7日の中国・盧溝橋で起こった謎の発砲事件によって、日本は中国と全面戦争を展開していた。1939年6月14日になると、日本軍特務機関の謀略による英国・フランス租界封鎖という天津事件が

発生している。これに端を発し、1940年1月26日、日本と米国の友好の糸だった日米通商航海条約が決裂した。

続いて1940年8月1日には対日石油禁輸が断行された。これら一連の不慮な事態により、日本は、世界の経済から次第に孤立し、危機感を募ら

せていった。

日本は、このような状況を打破しようと矢継ぎ早に手を打ち始めたのである。まず1940年9月22日、ゴム・石油などの戦略物資確保のためフランス領インドシナへの侵略を開始した。次に欧州と東亜の新秩序建設に関する相互尊重と、外国からの

爆弾用近接信管,小型化には半導体だ

米国は、レーダ用Si（シリコン）の開発と同時に、高射砲の爆弾用近接信管に使う小型電子回路の開発にも取り組んでいた。この技術がIC（集積回路）誕生のきっかけとなるのである。

当時、電子機器の小型化には補聴器があったが、それ以上の小型化に取り組んだのが爆弾用近接信管だった。この研究は米国海軍兵器局で1930年ころから進められている。なにしろ真空管を弾頭に詰め込まなければならず、しかも衝撃にも耐えなければならない。米国の技術者は知恵を絞りに絞ってこれを解決したのである。つまりハイブリッド技術を開発したのだ。

高射砲用爆弾は初め、発射後、ある時間が経過すると爆発する時限方式だった。第二次世界大戦が始まるころになると、航空機の速度が上がり、高射砲の弾丸を航空機に直接命中させることが難しくなった。

そこで新たに開発されたのが近接信管方式である。つまり、航空機に弾丸が近づくと、自動的に炸

裂する信管を使う方式である。当時、米国の電子産業の30%が近接信管の生産に携わったという。抵抗器やコンデンサといった電子部品の小型化や、実装の小型化技術はここで育ったのである。

この近接信管が1943年1月5日に初めて使われ、米国巡洋艦ヘレナがガダルカナル島近くで日本の爆撃機を撃ち落としている。トランジスタを発明したW.ショックレーも1951年初期には、トランジスタを近接信管に応用することを考えたという。

爆撃機の潤滑油がICパッケージへ

Siの用途はレーダ用検波器だけではなかった。実は、爆撃用潤滑油の分野でシリコン樹脂として大活躍している。シリコン樹脂はその後の半導体開発に重要な役割を果たすことになるのだ。

シリコン樹脂は、米国で開発された。1940年、米GE社（General Electric Co.）のロコーは、メチル・クロロシラン（Siと塩化メチルの重合体で分子構造-Si-O-Si-O-）

を発明した。これが一般にシリコーン樹脂と呼ばれている。

シリコーン樹脂は日本をおおいに苦しめている。1945年3月10日午前0時10分、約300機のB-29長距離重爆撃機はシリコーン樹脂による潤滑油によって、中国の成都から日本の東京へ飛来することができた。B-29爆撃機から落とされた約1665トンの焼夷弾によって、東京は壊滅的被害を被ったのである。

日本がシリコーン樹脂の存在を初めて知ったのは1945年、日本本土に襲撃したB-29爆撃機を撃墜し、そのとき破損したエンジンからだった。

その後、1945年8月6日午前8時15分には、テニアン島から広島へ飛来したB-29爆撃機が原子爆弾を投下したが、このときもシリコーン樹脂が用いられている。

戦後の1953年、GE社と信越化学との特許契約により、日本で初めてシリコーン樹脂の生産が始まった。この樹脂はICのパッケージ、DRAMのα線防止材、電気絶縁材などの用途に用いられている。

攻撃に対する相互援助を柱とした3国軍事同盟を、1940年9月27日にドイツやイタリアとの間で締結している。

1941年1月21日になると日本は一方的にフランス領インドシナ、オランダ領のインドネシアやタイを含めて「大東亜共栄圏」構想を打ち出した。この無謀な計画に米国と英国は、激怒した。日に日に、日本と世界各国は険悪な状況になっていく。

そして1941年11月26日、米国は日本に対し領土・主権の不可侵、内政不干渉、通商機会の平等、国際紛争の平和的解決、つまりフランス領および中国からの撤兵、満州国の否認、3国軍事同盟の破棄という「対日最後通牒」を提示してきたのである。

この文章は米国のハル国務長官から日本の野村駐米大使に渡された。いわゆるハル・ノートである。日本はこれを無視した。

にっちもさっちもいかない状況に追い込まれた日本は、戦争不介入と宣言していたにもかかわらず、これを自ら破り、ドイツと同様に宣戦布告なしに1941年12月8日午前3時19分（日本時間）、現地時間の12月7日午前7時49分、ハワイ真珠湾の奇襲攻撃を敢行したのである。

田中飛行部隊指揮官は、この奇襲攻撃成功を「トラ！トラ！トラ！」の暗号で送った。世界各国を巻き込んだ第二次世界大戦が始まったのである。

レーダ開発に関していえば、この当時の米国と日本とは、歴然とした技術格差があった。この技術格差が戦況を左右するのである。その足跡をたどってみよう。

総力を挙げてレーダを開発した米国

第二次世界大戦は“Physicist's War”と呼ばれるくらいに物理学者が活躍した。その一つがレーダだ。

レーダ（RADAR：radio detection and ranging）は、多くの物理学者や電気技術者たちによって改良されながら生まれた技術である。RADARは反対から読んでもRADARと読める。つまり電波の反射を意味している。

まず1922年9月、米国のテイラーとヤングが電波実験中に、ポトマック川を横切る船によって電波が遮られることに気がついた。早速、彼らは、これを利用して船の通過を検知する装置を提案している。

次に1925年、英国では電離層観測のため、高周波電波をヘビサイト層と呼ばれる電離層に向けて発射し、電離層から反射してきた電波との時間差を計算して高さを測定しようという発想が出てきている。

1931年1月になると、米国の海軍研究所で、「電波による飛行機や船舶探知」を目標とした本格的なレーダ開発が始まった。

初めは、送信機と受信機を遠く離して設置し、連続波を発することで、この間を飛行機が横切ったときに生じる揺らぎ（ビート）を検出していた。この方式は、反射ではなく物体による散乱であって、現在のレーダとは異なる考え方である。

この開発のなかで、レーダを実現するための鍵を握っているのが検波器だ、ということになった。検波器の材料は半導体が適するらしい、ということで、半導体の開発が始まったのである。

早くも米国はレーダ用Siに注目

GeやSi半導体が、レーダなどの電子機器を発展させる鍵を握っているようだと、米国や欧州の物理学者たちが気づき始めたのは1930年代に入ってからだ。

そのころすでにレーダの波長は10cm～15cmに達しており、真空管による検波器では対応できず、GeやSiを材料とする検波器のみが頼りだった。この検波器は直径数mm、厚さ1mmくらいの小さなペレットの上にW（タングステン）針を立てて作る。このままでは感度が足りないため、感度が高まるように針をつついて調整した。これを当時は、「タッピングする」と呼んだ。この検波器は雑音に悩まされていた。

米国のRオールは、不安定なGeやSiに針をあてる、というようなことをせずに安定化する方法はないかと考えていた。

まず、材料はSiのほうがよいと決めた。そして1935年からSiの材料研究をベル電話研究所でスタートさせている。Si検波器の安定度と感度を高めるためには、Si結晶の純度が関係しているらしい、と気づいたのである。

この研究では、まずSiから不純物を取り除き、純度を高めることに専念した。

その後、1941年から世界は第二次世界大戦へと突入した。この年、米国のJ.スカッフは検波器の研究中に、Siをいったん溶かしてから徐々に一方の端から冷却していくと、再結晶するSi中に偏析係数の差によって不純物が偏るという現象を発見した。しかもp型やn型によるpn接合

らしきものができることに気づいている。

ちょうどそのころ、レーダに用いるSi検波器の性能向上が特に問題となっている。

1942年に、米デュポン社のサイトは、性能が良くない原因はGeやSiに含まれている不純物によるものであると指摘した。そしてSiの高純度化に挑戦し、純度99.9%のSi単結晶の精製に成功したのである。この高純度Si単結晶に特定の不純物を添加して、検波特性がどう変わるかについて研究し始めた。これが、p型やn型の半導体を作る手掛かりを作ったといえるだろう。素晴らしい着想だった。

戦争中の1943年、ベル電話研究所のソオイエレルは、高純度SiにB（ボロン、ホウ素）を0.001%添加すると、検波器の感度が飛躍的に向上すると同時に、大電力整流器にも使えることを発見した。だが、その理由は皆目わからなかったという。

本格的なレーダ開発のスタート

一方、レーダは、1934年に送信機と受信機をきわめて近接させて設置し、連続波をパルス化して反射させるという本格的な開発が始まった。

このときの送信周波数はVHF帯の60MHzで、出力100Wのパルスが用いられている。VHF帯のレーダは長波長レーダとも呼ばれた。この長波長レーダの技術開発にあたって技術的に解決しなければならない問題点があった。

まず送信パルスが受信機に回り込み、受信機が飽和状態になりやすいこと。さらに、反射してきた微弱な

電波に対する受信機の感度を最大にするにはどうすればよいのか、受信機がパルス信号を受信したとき受信機の出力に生じる振動（リングング）を押さえる方法はどうすればよいのか、短いパルスを検波し増幅するための高速応答と高利得はどのようにしたら実現できるのか、といった点だった。

受信機の回り込みとリングングについては、送信機からの遅れ信号が一定レベル以上にならないよう制限し、高速応答と高利得は高性能検波器とスーパーヘテロダイン方式を採用して解決したのである。表示にはブラウン管を使った。

1936年4月には本格的なレーダが完成している。長波長レーダの開発に米国では5年の歳月がかかった。フランスでもレーダ開発は熱心で、同年にはすでにフランスのル・アーブル港で、船の出入りの監視に長波長レーダが用いられている。英国でも5カ所に長波長のレーダ基地が建設された。英国は、ドイツに比べて航空機開発で劣っていたにもかかわらず、このレーダによってドイツ空軍機を苦しめている。

さて、その後、米国ではレーダ用の周波数が60MHzから200MHzへと高まり、さらにデュプレクサが開発され、送信と受信のアンテナが共用できるようになった。このレーダは1937年4月に初めてUSSリアリ駆逐艦に装備され、予想以上の性能を発揮している。

1941年、米国海軍はすでに戦艦19隻にこのレーダを設置していた。だが、長波長レーダは周波数に応じて裁断した薄いAl箔をまき散らすチャ

フ（chaff）妨害に弱く、かつ分解能が低かった。解決策はできるだけ周波数を高くすることである。

レーダの開発が半導体開発を促進

英国でのレーダ開発の推進力となった人が、物理学教授から国立物理学研究所へ、さらに王立レーダ研究所長へと移ったロバート・ワトソン・ワットである。

彼は、英バーミンガム大学と協力し、1940年2月、レーダ用高性能マグネトロンを開発し、10月には米国のベル電話研究所へ持ち込んでいる。

一方の米国では、1940年6月に国防力強化のため、国家防衛研究委員会のなかに「Radiation Laboratory」を極秘裏に設置し、少数の有能な技術者を動員していた。

目的はドイツ潜水艦への対戦ソナー機器の開発と、飛行機用レーダの研究である。レーダには性能向上のために高性能マグネトロンが用いられた。この任務にMIT（マサチューセッツ工科大学）が選ばれている。

やがて、送信周波数は3GHzのUHF帯となり、この帯域を用いたレーダはマイクロ波レーダと呼ばれるようになった。高周波化することで、妨害と分解能の問題が解決された。

早速、英国はすでに設置してあったレーダを新型に切り替えている。ただし、マイクロ波レーダは、周波数を高くしたため、大気による減衰が大きくなるという欠点があった。

米国と英国は、国内に進入する敵国の飛行機を探索するレーダのほか、航空機搭載用レーダの開発にも力を注いでいる。有効範囲は初めの

ころ半径40km程度だったが、やがて200km以上にも伸びた。

マイクロ波レーダ開発で最も重要な技術は3GHz帯で使える検波器の実現技術だった。

このころ、半導体理論は暗中模索の状態ではあったが、実験室で得ら

れる優れた半導体整流特性に技術者は注目していた。理論的裏付けなしに、レーダへの応用が先行するかたちとなったわけだ。ここでは当初、Ge半導体が使われていたが、その後、BをドーピングしたSi半導体がいられるようになった。

遅れを取った日本のレーダ開発 ドイツから技術導入をねらうも実現せず

トランジスタによって20世紀のエレクトロニクス産業が急成長したといっても過言ではない。トランジスタを発明したW.ショックレーは鋭い洞察力によって、この偉業を成し遂げた。彼が実験を進められたのは、純度の高い半導体材料が入手できたためである。

純度が高いといっても現在の水準とは比較にならない。とはいえ当時、なぜこのような半導体材料が米国にはあったのだろうか。

実は第二次世界大戦中の重要な電子兵器であるレーダ検波器用として極秘のうちに米国で高純度のSiを作る技術が開発されていたのである。

一方、日本でのレーダ開発は非常に遅れており、必至にもがく軍部の姿が浮かび上がってくる。ではそのとき、日本はどのような手段をとっていたのだろうか。その一端を振り返ってみよう。

戦雲立ちこめた1940年、日本の軍部は日独伊3国軍事同盟を締結している。目的は、戦力の強化ということもあったが、兵器に関する先端技術をドイツから導入するねらいも大きかった。

1941年4月には早々と日本の軍事

視察団がドイツを訪問している。このとき視察団が驚いたのはドイツ艦艇に備え付けられていた異様なアンテナだった。これはxと呼ばれる最新のレーダであることがわかり、ただちに日本へ持ち帰り、海軍と陸軍がそれぞれ研究を始めている。

やがて日本電気（NEC）と日本無線によって日本製のレーダがまがりなりにも1941年9月に開発された。飛行機の見張り用として1号機は千葉県勝浦に、2号機は戦艦「伊勢」に取り付けられている。このレーダは現在使用している図形位置表示装置方式と異なり、単に反射波のみを見るAスコープ方式のため、操作が面倒だった（図3）。

その後、ドイツがさらに改良を進めていたため、続けて優れた技術を導入しようとしていた矢先の1941年12月8日、日本は第二次世界大戦に参入したのである。

今後の戦争は技術戦争であり、勝敗の鍵はレーダであると軍部の一部の人は指摘していた。ドイツから持ち帰ったレーダ技術は、日本ではまだ開発中で、量産化の準備も整わない状況だったため、技術を担当する部門は慌てている。

すでにハワイにはレーダがあった

このころすでにハワイには高性能レーダが設置されていた。真相は明らかでないが、1945年12月7日午前7時ころ（現地時間）突然、飛行機の編隊と思われる映像がレーダの画面をかすめたという。この時刻に、米国以外の国から飛行機が飛んで来るはずがないと監視員は無視してしまった。この映像を誤動作または雑音だと思って見逃したらしい。

あとの調査によると、この映像は、雑音ではなく真珠湾奇襲攻撃に向かう日本海軍第一次攻撃隊の飛行機180機だったらしい。もし発見されていたならば、日本の緒戦における勝利はおぼつかなかったことだろう。

戦争の初期、日本は破竹の勢いだったが、次第に雲行きが怪しくなってくる。戦局を有利に展開するためになんとしてしても最新のレーダをドイツから導入したい。ここには悲運の話がある。

日本海軍は竣工したばかりの伊号第30潜水艦を1942年、ドイツに向けて出航させている。なぜ潜水艦かというと日独間の距離が離れすぎているため、飛行機ではあまりにも危険だと判断したのである。

この潜水艦がドイツの旧フランス領ロリアン軍港に到着したのは、8月6日だった。ここで最新のレーダを積み込んだ。

待望の最新レーダが厚い秘密のベールに囲まれながらようやく日本へと向かったが、寄港先のシンガポールで連絡ミスから機雷に接触し、あえなく海底の藻屑となってしまったのである。1942年10月13日のことだ

った。本体は消えてしまったが、レーダの設計図はなんとか引き上げた。日本にとって戦局が不利になり始めたところのことである。

勝敗を決したミッドウェー海戦

日本の敗戦のきっかけとなったミッドウェー海戦でレーダ技術の格差がはっきりした。

ミッドウェー海戦は、日本軍が太平洋上のミッドウェー島を攻略しようとしたときの、米国の機動艦隊と日本の連合艦隊との戦いである。ときは1942年6月5日午前3時（日本時間）、米国機動艦隊は日本連合艦隊の暗号を解読し、作戦の全貌を知ると同時に、レーダで動きをキャッチしていた。

一方の日本連合艦隊は米国機動艦隊と異なり、実戦用のレーダは実用化しておらず、飛行機による偵察のみを行っていた。敵機の発見に失敗したのみならず、不意の攻撃に日本は混乱し主力空母4隻を失うという決定的敗北を喫したのだ。

ミッドウェー海戦の敗北により、日本は太平洋における制空権と制海権を完全に米国に奪われ、敗戦への道をたどることになる。敗因は作戦の誤りということになっているが、真の原因は米国との間に生じたレーダ技術の格差だったといえよう。

レーダ入手に次々と悲劇が…

軍事上の劣勢を挽回するには、なんとしてもドイツの高性能レーダを至急入手しなければならない。このため第2便として伊号第8潜水艦が1943年ドイツに向け密かに日本を出航し、8月31日に旧フランス領ブレ

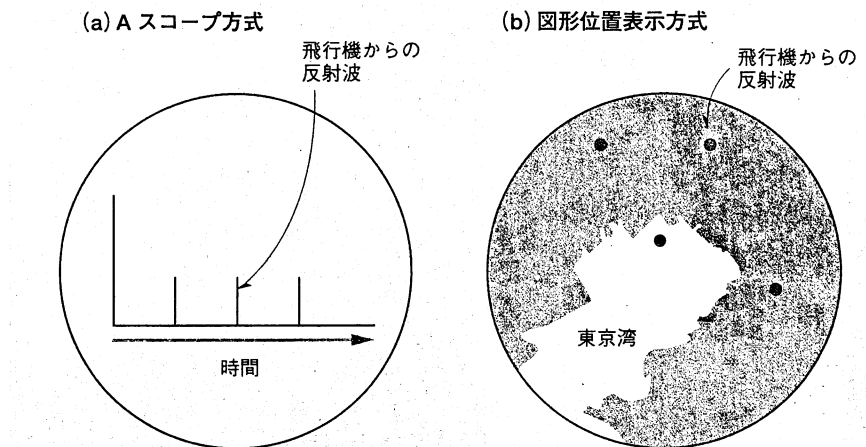


図3 レーダの画像 第二次世界大戦のころ、日米のレーダ技術には大きな格差があった。日本はレーダ技術の立ち遅れを補うため、同盟国のドイツから技術を入力したが、Aスコープ方式のレーダを開発するのがやっとだった(a)。これに対し米国はすでに一歩進んだ図形位置表示方式のレーダを開発済みだった(b)。

スト軍港に到着している。

この潜水艦には、ドイツが日本に対して要求した酸素魚雷（日本が発明した、痕跡のでない画期的な魚雷）と、雲母、生ゴム、スズ（Sn）が積まれていた。これと交換に、待望の高性能レーダを積んで12月21日に無事日本に帰着した。

ようやく手に入れたレーダだったが、技術革新が激しかったため、すでに旧式化していた。さらに先端技術を導入するため、第3便と第4便が出航したが、第3便は米海軍の魚雷で、第4便は英国空軍機の爆弾で撃沈されてしまう。

この間にドイツ・テレフンケン社のレーダ技師であるハインリッヒ・フォーデルが、イタリアの潜水艦と飛行機を乗り継いで1943年9月に来日している。彼は射撃用レーダ図面と電気部品一式を持って来たが、測定器を持参しなかったため、ついにレーダを組み立てられなかった。

1944年4月6日、突如、連合軍によ

るノルマンディー上陸が敢行され、ドイツ軍は苦境に追い込まれ始めた。こういった状況のなかで、第5便として伊号第52潜水艦がドイツに向けて1944年4月16日出航したが、その後の消息はつかめていない。非常に大きな犠牲を払いながら日本はついに本格的なレーダを実用化できなかったのである。

当然、半導体についても、きわめてわずかな情報しかもっていなかった。とはいえ、戦争終結間際、信越化学はレーダ用検波器向けに純度95%のSi単結晶を開発していたという。

戦前から研究は始めていた

日本でも、戦前の1936年、東北大学の松尾貞郎は、電波が航空機で反射されることを発見している。

1943年になると、陸軍は多摩研究所を、海軍は海軍技術研究所と島田実験所を建設している。レーダ研究は主として東京の恵比寿にあった海

軍技術研究所（現在、防衛庁技術研究所）の電波兵器部で進められていた。当時、この研究所は目黒御殿と呼ばれ日本の技術開発の最先端を走っていたのである。

日本軍部はミッドウェー海戦で大敗を喫したものの、軍部はまだレーダの重要性に気づかなかったといわれている。だが、研究所はこの重要性に気づき、企画担当部はより高性能のレーダ開発に向けてプロジェクト・チームを作り、マグネトロンの開発を進めている。

この結果、UHF帯のマグネトロンによる水上見張り用レーダ電波探索機などが完成している。そのころの日本軍はVHF帯のレーダしかもっていないかった。

さらに海軍技術研究所では、横須

賀の技術廠で航空用レーダの開発を進めている。ここにはテレビの研究で有名な高柳健次郎がいた。飛行機に載せる偵察用小型テレビ・カメラの研究を行なっている。

米国ではブラウン管を用いた図形位置表示方式が中心だったのに対し、日本は反射波のみを見るAスコープ方式しか開発できず、大きな技術格差があった。

そのうえ日本製レーダは、材料が粗悪で信頼性が低く、開発に当たった技術将校が試作品を戦場に持ち込んで直接動作させていたという切羽詰まった話もあるようだ。また、日本国内で撃墜したB-29爆撃機を調べてみると、連合軍がすでにSHF帯を実用化していたことがわかり、日本の技術者はがく然としたという。

は手動交換機で対応していたが、限界に達しつつあった。そしてストロージャ式自動交換機が発明され、この問題は一応解決できたかにみえた。

だがその重要な部品である電磁リレーは接点障害が多く、かつ速度が遅いという欠点があった。

当時、ベル電話研究所の研究部長だったM.ケリー博士は「自動交換機の障害を克服するには金属接点の電磁リレーを電子スイッチ(固体増幅器)に置き換える必要がある。電磁リレーを使っていたのでは、これ以上の電話の発展は望めない」という考えを、入社早々の若きW.ショックレーに話したという。当時、W.ショックレーは、ベル電話研究所内のデヴィッソン研究所で真空管の研究をしていた。

この言葉に強い感銘を受けたW.ショックレーは、電子スイッチの開発に執念を燃やし続けることになる。

M.ケリーの卓越した発想が1人の若き技術者の研究心を駆り立てたわけだ。彼は半導体発展の歴史のなかで最も偉大な指導者だったといえるだろう。W.ショックレーは1939年に早くも半導体の「表面準位について」の理論を発表している。だが戦争中のため、理論解明は一時中断し、半導体の応用が急がれた。

悲惨な戦争がようやく終わった

戦争が終わった1945年、W.ショックレーは、しばらく中断していた半導体の研究を再開するため、固体物性グループをW.ブラッテンとJ.バーディーンと3人で結成した。

第2世代 執念から生まれた固体増幅器「トランジスタ」

ここで話をトランジスタの開発に戻そう。英国のM.ファラデーが1839年に奇妙な半導体を発見して以来、半導体とは何かという謎に挑戦したが、なかなか謎は解けなかった。とはいえ、きわめて核心に近いところまでたどり着いてはいた。

第二次世界大戦後の1947年、劇的ともいえる理論展開が繰り広げられ、ここから夢の固体増幅器——トランジスタが誕生するのである。

ショックレーとケリーの劇的出会い

W.ショックレーは米カリフォルニア工科大学を卒業後、ボストンのチャールス川沿いにあるMIT（マサチューセッツ工科大学）で、「固体

中の電子挙動」についての研究で学位を取得した。

その後、ベル電話研究所のマービン（M）・ケリーにスカウトされ、1936年に入社した。彼が26歳のときである。

ベル電話研究所は、グラハム（G）・ベルが1867年に電話機を発明したのち、1878年に設立したベル電話会社の研究部門である。ベル電話研究所は、当初はBTL（Bell Telephone Laboratory）という名称だったが、1970年代にBell Laboratories（ベル研究所）に変更した。

さてG.ベルの発明した電話機は非常に便利のため、瞬く間に全米に広がり、通話量が増大し始めた。初め

W.ブラッテンは1929年に、J.パーデューンは1945年にベル電話研究所へ入社している。

研究を進めるうえでW.ショックレーを支えた言葉は、物理学者であるエンリコ・フェルミの「考える意欲」だったという。とはいえ、研究は困難をきわめ、なかなか半導体の本質に関する手掛かりをつかむことができず、失敗の連続だった。

参考文献

- 1) 平山秀雄,『わが回想録(一),(二)』,電波新聞社,1990年12月.
- 2) 沖電気工業編,『100年のあゆみ』,沖電気工業,1981年11月.
- 3) 日本電子機械工業会編,『電子工業20年史』,日本電子機械工業会,1968年9月.
- 4) 松下電器産業編,『社史松下電器激動の10年』,松下電器産業,1978年5月.
- 5) NEC編,『最近10年史,創立80周年記念』,NEC,1980年2月.
- 6) NEC編,『70年史』,NEC,1972年7月.
- 7) 日本放送協会編,『日本放送史(上),(下)』,日本放送協会,1965年12月.
- 8) 日本放送協会編,『放送50年史』,日本放送協会,1977年3月.
- 9) NHK放送技術研究所編,『研究史'80~'90』,NHK放送技術研究所,1991年9月.
- 10) 日本放送協会編,『50年史』,日本放送協会,1981年3月.
- 11) 東京芝浦電気編,『東芝100年史』,東京芝浦電気,1977年3月.
- 12) 日立製作所編,『日立製作所(1),(2),(3),(4)』,日立製作所,1980年12月.
- 12) 城阪俊吉,『科学技術史』,日刊工業新聞社,1990年7月.
- 13) ソニー,『ソニー創立40周年記念誌』,ソニー,1986年5月.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 日本放送協会編,『放送50年史,資料編』,日本放送協会,1977年3月.
- 17) 小松左京,堺屋太一,立花隆,『20世紀全記録』,講談社,1987年9月.
- 18) 日経エレクトロニクス編,『エレクトロニクス50年史と21世紀への展望』,日経マグローヒル社,1980年11月.
- 19) CMOS D.H.編集委員会編,『CMOSデバイスハンドブック』,日刊工業新聞社,1987年.
- 20) 電子通信学会編,『LSIハンドブック』,電子通信学会,1984年.
- 21) 半導体H.編集委員会編,『半導体ハンドブック』,オーム社,1977年.
- 22) 菅野卓雄,『集積回路ハンドブック』,朝倉書店,1981年.
- 23) 相田洋,『電子立国日本の自叙伝(上),(中),(下),(完結)』,日本出版協会,1991年.
- 24) 中川靖造,『日本の半導体開発』,ダイヤモンド社,1981年.
- 25) 馬場玄式,『最新デバイス事典』,ラジオ技術社,1976年.
- 26) 菊池誠,『若きエンジニアへの手紙』,ダイヤモンド社,1990年.
- 27) 垂井康夫,『ICの話』,日本出版協会,1982年.
- 28) 菊池誠,『トランジスタ』,六月社,1959年.
- 29) 柳井久義,永田穰,『集積回路(1),(2)』,コロナ社,1979年.
- 30) 星合正治,島村道彦,『電子とその作用』,オーム社,1956年.
- 31) 徳山巍,橋本哲一,『MOS LSI製造技術』,日経マグローヒル社,1985年.
- 32) 吉田梅次郎,『半導体物性工学』,昭晃堂,1963年.
- 33) ダニエル・I・オキモト, F.B.ワインスタイン共著,菅野卓雄,土屋政雄共訳,『日米半導体戦争』,中央公論社,1985年.
- 34) 瀬見洋,『日米半導体戦争』,日刊工業新聞社,1979年.
- 35) 菊池誠,『半導体の話』,日本出版協会,1967年.
- 36) 天野伸一,『インテル急成長の秘密』,につかん書店,1993年.
- 37) プレスジャーナル編,『日本半導体年鑑』,プレスジャーナル社,1987年.
- 38) 工業調査会編,『超LSI製造・試験装置ガイドブック』,工業調査会,1989年.
- 39) Sze, S.M., *Physics of Semiconductor Devices*, John Wiley & Sons, Inc., 1950.
- 40) Shockley, William, *Electrons and Holes in Semiconductors*, D. Van Nostrand Co., Inc., 1950.
- 41) Hodges, David A. and Jackson, Horace C., *Analysis and Design of Digital Integrated Circuits*, McGraw-Hill Book Co., 1988.
- 42) Shea, Richard F., *Transistor Circuit Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., 1957.
- 43) Bardeen, J. and Brattain, W.H., "The Transistor: A Semiconductor Triode," *Physical Review*, no.74, vol.230, June 1948.
- 44) Shockley, W., Pearson, G.L. and Sparks, M., "Current Flow across n-p Junctions," *Physical Review*, no.76, vol.180, July 1949.
- 45) Shockley, W., "Electrons and Holes in Semiconductors," *Bell System Technical Journal*, vol.28, no.435, 1949.
- 46) Kromer, H., *Archiv der Elektrischen Uebertragung*, no.8, vol.223, 1954.
- 47) Shockley, W., "Unipolar Field-Effect Transistor," *IRE Issue*, 1952.
- 48) Shockley, W., "The Theory of PN Junction Transistors," *Bell System Technical Journal*, no.28, vol.70, 1949.
- 49) Kahng, D. and Atalla, M.M., "MOS Transistor," *IRE Solid-State Device Research Conference*, 1960.
- 50) Spenke, Eberhard, *Electronic Semiconductors*, McGraw-Hill, Inc., 1958.
- 51) Abraham, C. and Harry, O., *Theory and Applications*, McGraw-Hill, Inc., 1955.
- 52) Hall, X., "Recrystallization Purification of Ge," *Physical review*, no.78, vol.70, 1950.

このほか、『朝日新聞』、『電波新聞』、『日本経済新聞』の各紙, および『電子技術』(日刊工業新聞社),『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),『ラジオ技術』(ラジオ技術社),『電子材料』(工業調査会),『電子情報通信学会誌』(電子情報通信学会)の各誌を参考にした。 ●