

講座

歴史絵巻

半導体

産業のコメICの材料Siは 縄文時代から使われていた

20世紀エレクトロニクスの歩み(8)

相良 岩男
KOA 顧問

今回から半導体の歴史に入る。現在、IC（集積回路）は、エレクトロニクス産業のみならず、さまざまな工業製品に使われている。むしろICを使わない工業製品のほうが珍しいのではないだろうか。ICが「産業のコメ」と呼ばれるゆえんはここにある。この材料はSi（シリコン）が主である。実は昔からSiは、人類とは縁が深かった元素なのだ。半導体のシリーズでは、半導体物性を追求する時代、トランジスタの時代、ICの時代の3世代に分けて、時代を見ていくことにする。（本誌）

歴代にわたり物理学者がコツコツと解明してきた自然現象を基に、ド・フォレストは「真空管」という能動素子を発明した。

やがて、真空管を用いてラジオ放送や、テレビ放送、電話などのメディアが実用化していった。これらの新しいメディアは世界中の人々の生活に潤いを与えながら、急速に普及している。20世紀前半のことだ。

こういった文明の利器は、人々の幸福のみに使われたわけではなかった。世界の人々を恐怖のどん底に落とし入れた第一次、第二次世界大戦のなかで、ラジオ放送や電話が大活躍するのである。

そればかりではない。切羽詰まった戦争という状況のなかから驚くべき技術が次々に開発されていった。その一つがレーダであり、もう一つは爆弾用近接信管、そして弾道計算

機である。

第二次世界大戦は“physicist's war（物理学者の戦争）”とも呼ばれていたくらいに、物理学者は引張りだこだった。原子爆弾を開発したのも彼らだ。

皮肉なことに、これら軍用に開発された技術は戦後間もなく開花し、20世紀後半のエレクトロニクスを発展させる原動力になっていったのである。

つまり、レーダ向けに開発された半導体をベースにトランジスタやIC（集積回路）の開発へ、弾道計算機はコンピュータの開発へとつながっている。

これらの技術は人々の生活環境を激変させ、豊かなエレクトロニクス文化を構築することになる。半導体は驚くべき進化を人類にもたらし生活環境は著しく快適になった。

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。

半導体の進化を3世代に分ける

半面、半導体は、2度にわたる石油ショックのみならず第三次世界大戦を連想するような世界を巻き込んだ経済戦争や、深刻な公害問題を引き起こすという怖さも兼ね備えているのだ。真空管に代わる増幅器、つまりトランジスタやICは、固体による能動素子と呼ばれている。では、この素晴らしい能動素子はどのように開発されたのか三つの世代に分けて考えてみよう（図1）。

第1世代：トランジスタやICは半導体という材料を使っている。1839年に、どうも「導体」とは異なる

「半導体」という物質が存在するらしいと物理学者が指摘した。ところが半導体は導体と比較して誠に奇妙な特性を示すのである。この物質はいったい何なのだろうか、多くの物理学者がこの謎解きに挑戦した。

その半導体のバールはなんと108年も堅く閉ざされたままだった。この期間に実に多くの謎解きドラマが展開された。それは「自然」との戦いでもあり、物理学者は「自然」に翻弄され放しだったともいえる。そのなかで、理論解明に先立ち応用開発が先行した。それはレーダの検波器だったのである。

第2世代：20世紀がやって来た。20世紀の幕が開けると、早々に、量子論をきっかけに驚くべき物理理論が続々と発表された。ここでも物理学者が大活躍している。やがてこの不思議な半導体の性質がおぼろげに姿を現してきた。

この理論を基に、難解で攻略不可能と思われていた半導体の扉を見事に開いたのはW.ショックレー、J.バーディーン、W.ブラッテンだった。ここから真空管に代わる夢の固体増幅器——トランジスタが1947年に誕生する。固体増幅器開発のきっかけは電話交換機に使っていた電磁リレ

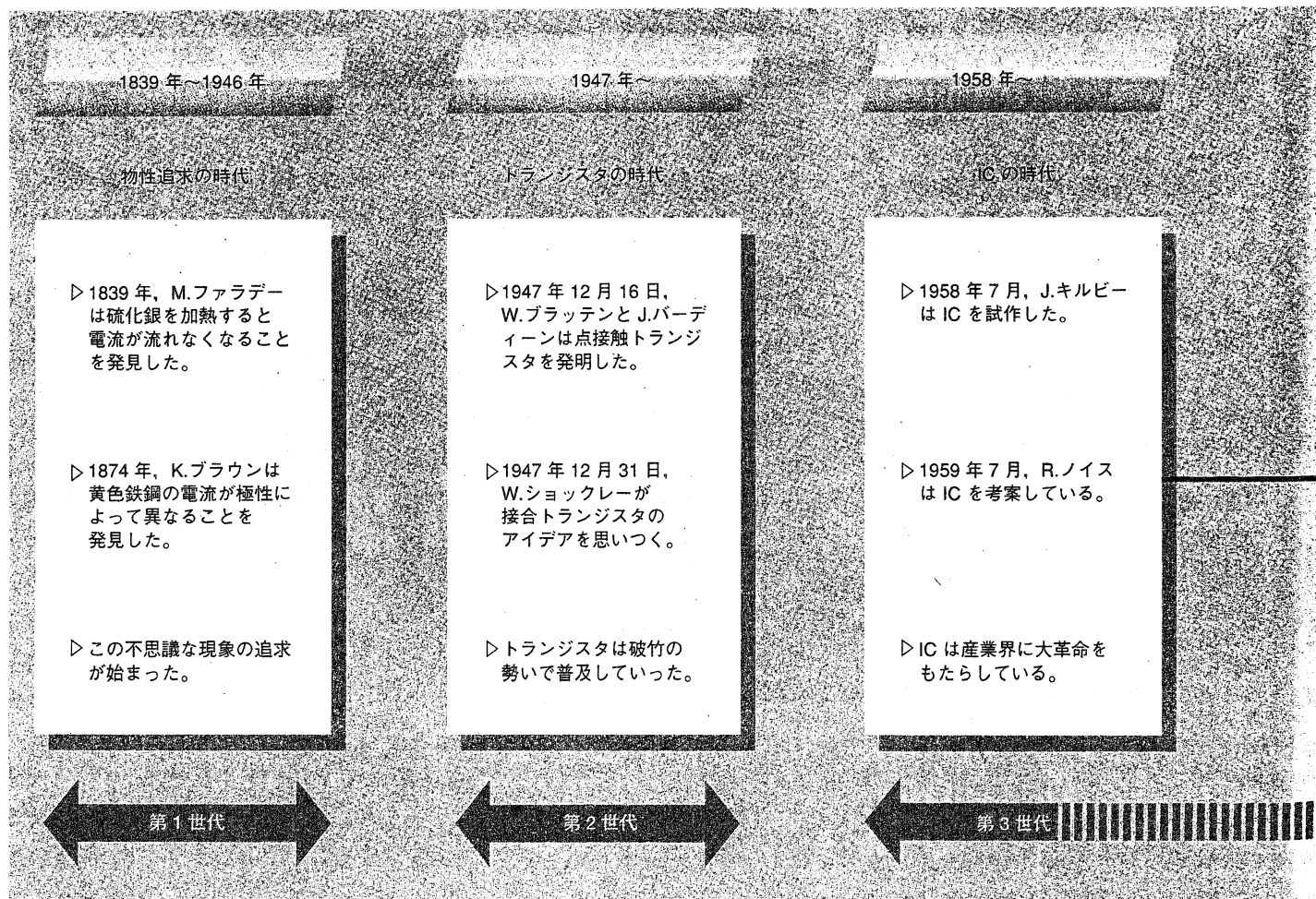


図1 半導体の歴史を3世代に分けた 1839年に半導体という物質が発見され、やがて1947年にはトランジスタが、1958年にはIC

ーの動作に対するクレームや電話交換機の将来発展への期待からだったのである。

特に、W.ショックレーは半導体の研究に実に10年近く没頭しており、他の研究者からそっぽを向けられたり、皮肉を込めて「頑張り屋」と呼ばれたりもしていた。やがて、このトランジスタは、ラジオ受信機やテレビ受像機のみならず、開発のきっかけとなった電話交換機に革命を巻き起こしたのである。

ちょうどこのころコンピュータが誕生している。だが、10年もしないうちに新たな要求が出てきた。さら

なる高性能化、さらなる小型化を、というものだった。現状に満足しないというのは人間の常なる欲望なのかもしれない。これを実現するには何か新しいブレークスルーが必要だった。

第3世代：補聴器の小型化について研究していたJ.キルビーは1958年7月に米TI (Texas Instruments) 社に転職した。ちょうど、この職場は夏休みだったが、彼は新規採用者だったため、夏休みが取れなかった。だれもいない研究室で小型化の第一歩として発振器ICを考案している。同じころ、米フェアチャイルド (Fairchild Semiconductor) 社のR.ノイスは新しい半導体製造技術を開発し、これを用いてトランジスタを複合化したもの——つまりICを考えていた。

ICが実現されるや否や、瞬く間に世界へ羽ばたき、続々と新しい電子機器が開発されている。

特にICが劇的に変化をもたらしたのは、まずメカニカル (機械) の電子化だった。電磁リレーを用いた機械式電話交換機は電子式に、ゼンマイを用いた機械式時計やバネを用いた機械式秤も電子式に…。電子化の波は、さらにタクシ・メータや、カ

メラ、機械式計算機にも波及した。機械で築き上げた世界産業界の地図はすっかり入れ替わってしまう。

だが、ICの応用はこれだけにとどまらない。従来、想像できなかった高性能コンピュータによる驚異的な自動化や合理化、さらにパソコンを端末とする世界情報ネットワーク——つまりインターネットやマルチメディアを生みだしていった。

技術進歩の歪み——環境問題

こういった華々しい進展のなかから、深刻な経済摩擦が発生している。そればかりではない。大量生産→大量消費→大量廃棄という構図のなかから出てきた使い捨て文化による膨大なゴミと、製造に伴う産業廃棄物の発生が大きな社会問題となってきている。

21世紀がまもなくやって来る。未来にむけて、ICはさらに進化し人間の頭脳に近づき、より快適で楽しい夢を実現できる可能性を追求することになる。だが一方で、かけがえない地球を守らねばならないという瀬戸際に立たされているのだ。この矛盾に満ちた難問を乗り越えるためには、さらなる斬新なブレークスルーが必要なのである。

LSIの時代

▷ IC はやがて頭脳に近づくという夢に向かって開発が進められていくだろう。

▷ 世界的半導体摩擦は大きな問題となる。

(集積回路) が登場した。

第1世代 トランジスタ発明への長い道のり

20世紀最大の発明は、おそらく半導体と、コンピュータ、原子力の三つということになるのではないだろうか。このなかで半導体はエレクトロニクス産業を大きく発展させる原動力となっていた。

半導体のなかで、特に重要な材料がSi (シリコン) だったということだろう。Siは、人類と古代から深くかかわり合ってきた。

7万5000年も昔、旧石器時代の人類は狩猟や漁労で食を得て、洞窟で

生活をする獲得経済の時代だった。槍先に用いる尖頭器や肉を削る削器などに素朴な石器が用いられていた。

やがて紀元前70世紀の新石器時代になると、文明は進み、磨製石器の時代になった。紀元前24世紀ころ、西洋ではメソポタミア文明やエジプト文明が栄え、この遺跡から、砂地で焚火をしたときにできたらしいガラスが発見されている。

エジプトでは、透明なガラスが発見され姿見として使用されたり、「めのう」とか、「水晶」と呼ばれ、宝玉として貴ばれていた。

日本では縄文文化を迎えていた。この時代の特徴的な石器のなかに「石匙^{いしき}」というものがある。これは鋭利な刃をもつ手斧(ナイフ)であり、動物の毛皮をはいたり、肉を切ったりする重要な道具だった。さらに火打ち石としても用いられた。素材にはおもに黒曜石が用いられている。

黒曜石はガラスのようにツヤの多い黒色の火成岩であり、その主成分が石英(SiO_2)の石である。いずれも主成分はすべて石英のなかに含まれるSiだった。

やがて紀元前1世紀ころ、早くもこのガラスは、ローマからシルクロードを経て日本に持ち込まれているらしい。

13世紀近くになると、この美しいガラスは芸術品(美術工芸)として注目されるようになってきた。ガラスを溶融し加工する技術が急速に発達したためである。やがて世界市場に向けて輸出が始まった。

美しく微妙な色合いを出す技術が極秘中の極秘だった。イタリアのベネチアから1.5km離れたムラーノ島では、この技術が発展していた。現在でも有名なベネチアン・グラスの生産地である。

ここでは17世紀になるまで約400年もの間、製造ノウハウを守ったの

である。技術が漏洩し模造されるのを恐れ、職人を完全な監視下に置いていたようだ。もし脱走すれば処刑されたという。

やがて、この技術は20世紀初頭にフランスで流行したアール・ヌーボー(新しい芸術)という様式のガラス工芸品へと引き継がれていく。20世紀半ばになるとSiは、トランジスタやIC、さらには光ファイバの原料として利用され、エレクトロニクス産業を支える重要な電子部品を作り出す材料となった。

だが、ここにたどり着くまでの道程は長く、かつ乗り越えなければならぬ困難が山ほどあった。物理学者が難解なパズルをもくもくと解き、ようやく実現できたのである。

こうして誕生した最先端技術の半導体工場では、ベネチアン・グラスのときと同様に技術の漏洩に神経をとがらすことになった。歴史は繰り返すのである。

このように昔からSiは、人類にとって魅力的な物質だったのだ。

石英は元素なのだろうか

地球には質量比率(%)で酸素49.5%、Si25.8%、Al18%、その他16.8%の元素が存在している。これは地球表面付近の大気圏、水圏、地下16kmまでの岩石圏の範囲についてクラークが研究したもので、「クラーク数」と呼ばれている。

これらの物質は、金属や、ケイ酸塩、硫化物、水溶液、ガスといった形態で存在している。

豊富に存在するSiと酸素とは堅牢に結び付き、石英または2酸化ケイ素(SiO_2)、さらに金属酸化物と結

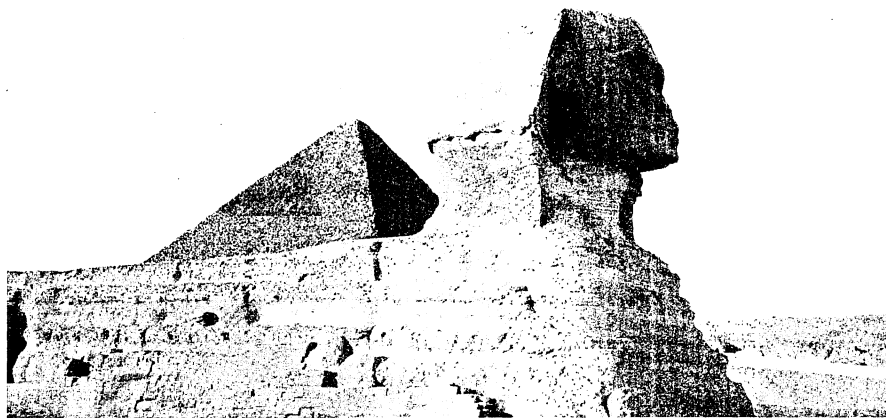


図2 ピラミッドからICまで Si(シリコン)という元素は昔から人類に貢献してきた。紀元前3000年、Siを含んだ小さな黒曜石による斧が、ピラミッド用の巨大な石材の採石の一部に使われたという。20世紀のいま、Siを材料とする小さなICチップ(半導体技術者はICを「石」と呼ぶこともある)がさまざまな工業製品の中に入って活躍している。

合したケイ酸塩として存在し、単体では存在していない。

石英は太陽光線によってキラリと輝く海岸の砂のなかや、花崗岩、流紋岩、変成岩などにも含まれている。美しい透明な六角柱状の結晶体の状態で、天然に多量に存在している。この純粋な結晶が水晶である。

石英は頑固に他の物質と結合し、1620℃くらいの高温でしか融けないため、元素ではないかと思われた時代もあったという。石英の英は華^{はな}、つまり石の花という意味である。

1787年、フランスのAラヴォアジエは、石英は単体の元素ではなく、まだ発見されていない未発見元素の酸化物であることを初めて指摘し、追跡が始まった。これが半導体の謎

解きの第一歩だったといえよう。

しかし、なかなか謎は明らかにならなかった。36年も経過した1823年、ようやくスウェーデンのJ.ベルツェリウスが石英からSi（融点1420℃）を単体元素として初めて分離したのである（下掲の「周期律から存在が予測されたGe」参照）。Siという名称は、ギリシャ語のSilexから取った。石英を含んだ鉱物による火打ち石をギリシャ語でSilexと呼んでいたからである（図2）。

絶縁体と導体の区別が明らかに

物質には、絹やガラスのように摩擦で電気を作りだし、電気を保持できる物質と、金属や湿ったもののように電気を作りださないが、電気を

流すことのできる物質があるらしいことを、1729年に英国のS.グレイが発見している。

その後、J.デサグリアスがこれらを「絶縁体（nonelectrics）」と「導体（electrics）」と呼んだ。実際には導体でも摩擦電気が発生するが、すぐに逃げてしまうということをC.デュフェが発見した。とはいえ、まだ半導体は登場してこない。

さらに、電気は移動できる一種の流体であり、電気には2種類（+と-）あること、摩擦電気によって+と-に分離し、その間に力が生じることがわかってきた。これを静電気と呼ぶようになった。これらの発見はまだ電池という電源がなかったため、すべて摩擦電気を発生させ

周期律から存在が予測されたGe

1850年くらいになると、元素の種類は58種近く明らかとなってきた。これら元素の間には何か相関関係があるのだろうか。この疑問に対し1862年、フランスのA.ド・シャंकフルトアと英国のJ.ニューランズは、これら元素のうち、よく似た性質の元素が原子番号の8番ごとに繰り返されていることを見だし整理した。これを「オクターブの法則」と呼んだ。だが、不完全だったため、物理学者には受け入れられなかったという。

その主な原因はまだ未知の元素があることを考慮しないで、知られている元素のみで整理しようとしたことだったようだ。

1869年になると、ロシアのD.メンデレーフはすでに知られていた63の元素のほかに未知の元素があるかもしれないことを予測して整理し、周期律があることを発見した。これを表にしたのが周期律表で、これをロシアの物理学会誌に発表した。

このなかで、彼はekaSiとekaAlという未知の元素があることを予測したのである。このekaSiは、物質がSiの性質ときわめて近い性質をもつ元素（eka-silicon）が存在するはずだということである。ekaとは古代のインド語で「類似」という意味がある。

さて、予測された未知の物質は

1886年にドイツのヨアヒム谷の銀山から、ドイツのC.ウインクラーによって発見された。彼はドイツを表すゲルマンというラテン語から、この物質をGe（ゲルマニウム）と命名した。なおekaAlとはGa（ガリウム）のことである。

だが、大量に存在するSiと比較して、Geは地球上にわずか11万トンくらいしかないという。SiとGeはいずれも半導体の基本的な材料だが、それぞれ発見までには奇異な運命をたどっている。

ちなみに、現在使われている周期律表はドイツのJ.マイヤーによって1871年に改良されたものである。

るという困難な実験から生まれている。

ボルタの電池が発展の糸口に

このころ、電気の実験を行なうには摩擦電気による瞬間的な起電機以外に方法はなく、その性質を研究するのは困難だった。

ここに登場したのがボルタの電池である。まず銅 (Cu) と亜鉛 (Zn) の電極を、希硫酸を含んだ厚紙ではさむ。次に厚紙を何段か積み重ねた。すなわち直列接続した電池が1800年にイタリアのA.ボルタによって発明された。当初、エレクトロ・モートルと呼ばれていた。

これは、ガルヴァーニの提唱した、蛙の足を使った動物電気発生からヒントを得たといわれている。なんとまあほえましい。この電池を用いて、A.カーライルは水の電気分解実験をナポレオンの前で行ない、勲章を受けている。

電池の発明により、摩擦電気による瞬間的な実験に基づく静電気の時代から、連続して実験できる動電気の時代へと大きく変わった。これによって、ようやくエレクトロニクス発展の第一歩が確立されたのである。安定した電圧を得ることによって、いよいよ物質とは何かという挑戦が始まるのだ。

物質の電気特性によりやがて手がかり

1826年になるとドイツのG.オームは種々の失敗を繰り返し、そのなかの電池を用いた実験から、電圧が一定の場合、電流は物質のもつ抵抗の増加に反比例して減少するという有名な「オームの法則」を発見した。

このとき、物質の長さや断面積を変えながら、抵抗値の異なる抵抗器を作っている。

ここで重要なのは、オームの法則は、物質の両端から取り出す電極の極性に依存しないということだ。G.オームは、これを1827年に「電気回路の数学的研究」という本にまとめて出版している。ただし、反響はなかったという。

いまから考えると信じられないことだが、人々は電気に関心を示さなかったのである。

その後、G.オームは、抵抗値の温度係数を求めている。その結果、当時、知り得ていたすべての物質の温度係数はそれぞれ物質ごとに異なるものの、すべての物質は温度上昇とともに抵抗値が増加することがわかった。

だが、なぜ増加するのかについては、1900年のドイツのP.ドルーデや、さらに1928年の米国のF.ブロッホが解明するまで、よくわからなかったのである。

抵抗値が増加する理由は、すべての物質は加熱することによって格子振動が次第に激しくなり、この格子振動によって物質の中に存在する自由電子の動きが妨害され始めてくるからである。

さらにP.ドルーデは導体、つまり金属のなかに存在する自由電子が電界によって加速されることを示す電気伝導式を導き出している。

オームの法則に従う物質の物理的意味 (physical mean) が明らかになった。ここから、すべての物質はこの法則に従うものであるというのが常識となっていったのである。

奇妙な現象の発見が相次ぐ

物質の性質はオームの法則の登場ですべて解決するものと思われていた。その後、この法則に従わない奇妙な新しい物理現象が相次いで発見されている。

まずオームの法則が発見されてから9年後の1835年、ムンクは、ある種の異なる物質を接触させると、電流の大きさが極性によって異なることを発見している。この現象は当時の常識では説明できなかったが、これ以上の追求はしなかった。

2年後の1837年には、フランスのJ.ペルチェがある種の異なる二つの導体を接触し電流を流すと、一端で熱の吸収が起こり、他の一端で熱の発生が起こることを発見した。これがペルチェ効果の発見だったのである。

続いて英国のM.ファラデーは、硫化銀 (Ag_2S) を加熱すると電気が急激に流れ出し、冷却すると電流が流れなくなるという不思議な現象を1839年に発見している (図3)。M.ファラデーによって発見された奇妙な物質は、多くの物理学者に驚きを与えた。なにしろ、G.オーム以来、すべての物質の電流は、温度上昇とともに流れなくなると信じられていたからだ。M.ファラデーが発見した現象は、G.オームとは逆に、抵抗値が温度上昇とともに減少することを意味するのである。

やがて導体でもない、絶縁体でもないこの奇妙な現象を示す物質を「半導体 (semi-conductor)」と呼ぶようになった。semi (半分) は、導体と絶縁体の中間ということである。だが、なぜそのような特性を示

すのか、その現象に対する理論的説明はまったく不明だった。

ブラウンがオームをくつがえす

硫化銀が奇妙な負性温度特性をもつというM.ファラデーの発見から、なんらこの現象についての理論的進展はなかった。

そして34年後、奇妙な物理現象が二つほど発見されたのである。

その一つは、英国のW.スミスによって1873年によって見いだされた現象である。これは、電池につないだSe（セレン）に光を照射すると、Seの抵抗値が減少し、光電流が流れ始めるという現象である。これを内部光電効果と呼んだ。導体ではこのような現象はまったく観測されていなかった。

ここでわかったことは、光によって励起された光電流は半導体と絶縁体のみでしか観測されないことと、一定の波長（ λ ）より長い単色光では光電流が流れず、かつ λ 近傍で光電流が急減することなどだった。ちょうどこのころJ.マックスウェルが電磁気論をまとめている。

もう一つは、ドイツのK.ブラウンによって1874年に発見された現象である。まず方鉛鉱（PbS）や黄色鉄鉱（FeS₂）などの硫化物や、マンガン鉱（MnO₂）などの酸化物の表面に電極としてSeを溶解して着ける。次に一方の電極として硫化物の表面にCu（銅）やPt（白金）などの金属針を、他方の電極としてHg（水銀）などを当てて約2Vのブンゼン電池を用いて電流を測定すると、極性によって電流の流れ方が異なることを見いだした（図4）。

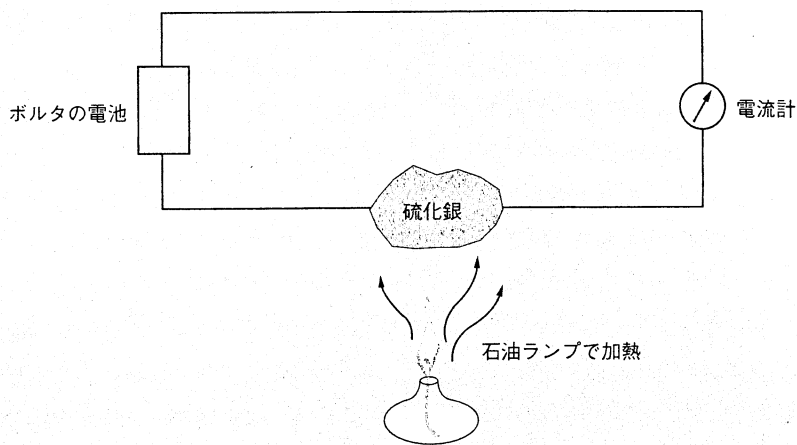


図3 半導体の発見 英国のM. ファラデーは1839年に奇妙な物質を発見した。硫化銀（Ag₂S）である。これを加熱すると電流が増加するのである。当時、すべての物質は加熱すると、電流が減少する方向へいくと考えられていた。

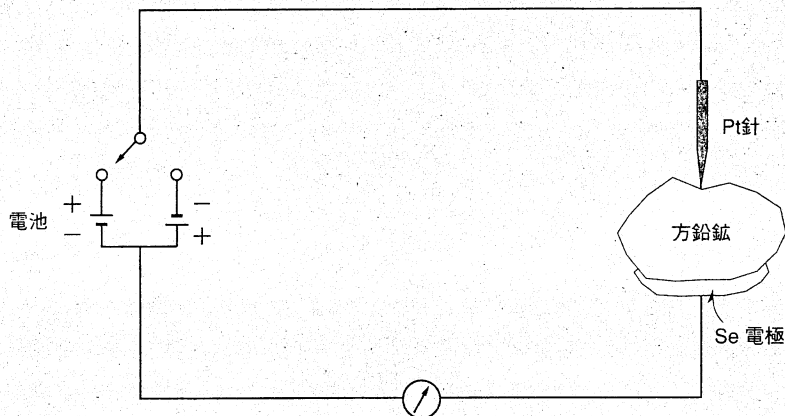


図4 非オーム特性の発見 ドイツのK. ブラウンは1874年に新しい現象を発見した。方鉛鉱は電池の極性によって、電流が流れたり、流れなくなったりする。当時、すべての導電性物質は極性に関係なく、電流値は一定であると考えられていた。

K.ブラウンが発見したオームの法則に従わない物質の発見は、ムンクよりも具体的であり、これを「非オーム特性」と呼んだ。この現象は、半導体と導体との接触によって生じるのだった。

このときに、水道の蛇口に似た弁作用（整流作用）と同じであることにも気がついたが、応用がなかった。やがて、この現象は点接触鉱石検波

器の開発へとつながっていくのである。

暗中模索の真っ直中へ

この非オーム特性は、半導体の大きな特徴の一つだったのである。不思議な特性を示す半導体とはいったい何なのか、と多くの物理学者が頭を痛めた。

このようななかで非オーム特性

は、接触によるジュール熱や物質固有のものとの考えもあり、接触面との関係はあまりはっきりしていなかった。

1878年、Kブラウンは半導体と導体の非オーム特性の原因はジュール熱や物質固有のものではなく、界面現象としてとらえている。なぜならジュール熱では方向性がないはずだからである。

なお、Kブラウンは、その後、ブラウン管を発明している。

さて、1876年には英国のW.アダムスとR.デイが、Seの両端にPt電極を着け、そこから導線を引き出して光を照射すると、電池もないのに電流が流れることに気づいている。

これは光起電力効果と呼ばれている。つまり太陽電池の発見だったの

である。正確には「電池」という表現は適切ではない。単に太陽光を電気に変換するのみで、電気を蓄える能力をもっているわけではないからである。このような言葉になったのは、1950年ころの米国の新聞記者が、Siによる光起電力をSi太陽電池と表現して新聞に掲載され、この言葉が広く用いられるようになってしまったからである。

そして応用が始まった。1883年になると、C.フリッツがSeを用いて初めて接触型の整流器を作った。

このように半導体に関する現象が次々に発見されたが、半導体の理論に関してはなんの手がかりもつかめず、理論的裏付けは遅々として進まなかった。まさに暗中模索の状態だったのである。

った物理現象を説明できなかったのである。

この難問を解いたのがM.プランクである。論文は1900年12月14日、ドイツ物理学会で「量子論」として発表された。だが5年間近くも物理学者の同意は得られなかったという。その後、この理論は物理学に理論革命の嵐を巻き起こすことになるのである。そしてエレクトロニクスを飛躍的に発展させる理論的な支えになった。

1905年になるとドイツ（のちに米国に帰化）のA.アインシュタインが光の量子仮説を発表している。この理論は、量子論を基に「光は ν なる振動数を持ち、 $h\nu$ なるエネルギーの塊である」と提唱したのだ。続いて同じ年、「光の速度は不変である。かつ $E=mc^2$ （ E :エネルギー、 m :質量、 c :光速）という関係が成り立つ」という特殊相対性理論を発表した。

だが、この理論が物理学者に受け入れられるようになるまでにはなんと20年近くの歳月が必要だった。エネルギーにしろ光にしろ、それまで多くの人たちが「連続量である」と信じてきたことを根本から否定することになるのである。この理論によれば、ミクロに見ると不連続だが、マクロには古典物理学が成り立つというわけだ。

この量子論、相対性理論は、やがてエレクトロニクス、原子力、宇宙まで含めて、あらゆる応用を飛躍的に発展させる理論的支えとなった。もちろん、半導体もこの理論に支えられ、半導体理論へと展開することになる。

20世紀の開幕 量子論と相対性理論が登場

硫化銀を使って抵抗値の温度係数が負になることをM.ファラデーが発見してから61年がたち、またKブラウンが方鉛鉱を使って非オーム特性を発見してから26年がたち、新しい世代への期待を込めて20世紀の幕が開けた。自然界の謎にほんろうされ放しの19世紀だったが、20世紀の開幕と同時に物理理論の発表が相次いだ。

まず1900年、ドイツのM.プランクが「エネルギーは連続でなく $h\nu$ というエネルギーの最小単位、つまり量子を持ち、その整数倍のエネルギーのみが不連続に存在する」という大胆な仮説を提唱した。

ここで、 h はプランク定数で、(エネルギー) $\times$ (時間)を表している。 ν は光の振動数である。

これは、長い期間にわたって物理学者の間で論争を続けてきた比熱の問題から考え出されたもので、のち半導体理論でも重要な役割を演じることとなる。

物を熱すると1000℃では赤く、1500℃では黄色く、3000℃では白くなるのはなぜだろうか。

この謎に対してW.ウィーンは1893年に「ウィーンの変位則」を、L.レーリーとJ.ジーンズは1899年に「レーリー・ジーンズの式」を発表していた。ただし、いずれもこうい

応用開発が理論解明よりも先行する

G.マルコーニが火花式無線電信で大西洋横断通信に成功したのは1901年だった。この無線電信の最大の問題点は検波器の性能であり、多くの物理学者がこの開発にチャレンジしている。

このなかで米国のJ.ダンウッドは1904年、早くも半導体を利用し、つまり方鉛鉱(PbS)上に金属針(ひげ状)電極を立てた無線電信用検波器のアイデア特許を申請したり、2枚のカーボランダム(SiC)を真鍮電極ではさんで一方の電極とし、他方の電極にはカーボランダムに金綿線を立てた鉱石検波器を開発したりした。ここから半導体の応用が始まったといえるだろう。

こうして新しく開発された検波器は、良好な非オーム特性を示したが、なぜそのような特性を示すのか——その理論は依然としてまったく謎に包まれたままだった。

K.ブラウンは実験で1905年におもしろいことを言いだした。PbSのどこに針を立てても動作するというのではなく、ある特定の局所部分のみしか検波器に適さないということに気づいた。

このためPbSの表面上で最高感度、つまり最も音が大きくなる針の位置を検索しなければならない。この方法はなんと25年後の1925年から日本で始まったラジオ放送を受信するための鉱石ラジオ受信機でも採用されている。

謎への挑戦

1907年になると米国のG.ピアースが、なぜ方鉛鉱(PbS)では非オー

ム特性を示すのか、その謎に挑戦している。早速、2種類の半導体としてPbSとSiを取り上げ、この表面にCuやFeの針を立てて非オーム特性の比較データを取った。そのころから非オーム特性を「整流特性」と呼ぶようになっていく。

その結果、PbSは特性が不安定だが、微小電圧で立ち上がる。一方のSiは特性は安定だが、高い電圧で立ち上がるという違いがあることを発見した。さらにこの非オーム特性が熱を原因とするものでないことを、冷たい空気を吹き付けて実験することによって否定した。

だが、これに対してまったく逆に非オーム特性は、電流集中による温度上昇によって生じるのだ、と主張する論文が米国のR.ゴッダードから1909年に発表されたりもした。

そのころの理論的な解釈は混乱していた。

ちょうど同じころに、別の動きがある。1904年にJ.フレミングが2極真空管による検波器を、1906年にド・フォレストが3極真空管による増幅器を発明している。真空管の性能向上のために研究が活発化しており、この研究中に米国のI.ラングミュアは真空中の陽極電流は、陽極電圧、つまり印加電圧の $3/2$ 乗に比例することを発見した。

これに対して1914年、ドイツのW.ショットキーは「金属に負の電圧を印加し、金属表面に強い電界を与えると、金属から電子が放出される。外部に飛び出すこの電子のエネルギー(仕事関数)は鏡像力によるショットキー効果が関係している」と発表した。

鏡像力によるショットキー効果とは、金属の表面にショットキー・バリアという壁があり、金属内部の電子が外に出られないため、外に出るにはこの力に相当する力を外部に加えなければならない、ということである。

中性の金属から電子を放出させるには、電子がショットキー・バリアを乗り越えられるように金属に電圧を加えて大きな熱エネルギーを電子に与えなければならない。ここで初めてショットキー・バリアを電子が乗り越えて外部に飛び出すというのである。

一見して、これは非オーム特性と何の関係もないように思われたが、これは非オーム特性、つまり半導体の謎を解く重要な鍵になっていくのである。

だがこのころ、世界は混乱へと巻き込まれていった。この年、つまり1914年7月28日、第一次世界大戦が勃発したのである。これによって、半導体の理論追求よりも、応用のほうが先に進むことになった。戦争は常に先端技術を欲するものだ。

この戦争では、高感度無線電信機を多量に必要とした。このなかで高性能検波器が要求され、スウェーデンのC.ベネディックスがGeの表面にCuまたはPtの金属針を立てた鉱石検波器を作り、無線電信機に導入した。

新しい理論の発表が相次ぐ

やがて1919年1月18日に第一次世界大戦は終わり、講和会議が開かれた。ようやく落ち着きを取り戻した物理学者たちは、物性に関する発表

を矢継ぎ早に行なった。このときの発表が半導体理論の解明にきわめて重要な役割を演じることになるのである。そのうちの6件を中心に紹介しよう。

一つは、1923年、米国のA.コンプトンによる「炭素に一定波長のX線を当てると、散乱してくる波長のなかに元のX線よりも長い波長のX線が存在する」という論文だった。

すなわち、光は一定のエネルギーをもつ光子であり、この光子を炭素に当てると、炭素内にある電子と、エネルギーの授受だけではなく運動量の授受も行なわれ、光子は電子にエネルギーを一部取られ、そのためX線の波長が長くなるのであると説明した。これが有名な「コンプトン効果」である。

二つ目が同じ年、フランスのL.ド・ブロイによる「電子を含む粒子はすべて粒子性と波動性をもつ」という提唱だった。彼は、すべての粒子に運動に反比例する波長が存在し、その粒子の運動エネルギー E と運動量 p との間にもアインシュタインの関係 $E=h\nu$ 、 $p=h/\lambda$ が成り立つと言いだした。

粒子の波動性は、光などの電磁波と区別して物質波と呼んでいる。さらに1924年になると米国のW.パウリが「原子の中に存在する電子は、それぞれの電子状態に対して1個しか存在しない」というパウリの排他律を発表した。

三つ目がオーストリアのE.シュレジンガーによる波動方程式である。彼は弦や膜の固有振動を研究していたが、1926年ころ振動方程式をもとに、ド・ブロイの考え方を導入

して電子の運動を表す波動方程式を導きだした。これが「波動力学」の基本となった。

四つ目は1926年。イタリアのE.フェルミと英国のP.ディラックによるフェルミ・ディラックの分布関数である。一つのエネルギー状態には1個の粒子のみしか占有できないという考え方をもとにして粒子のエネルギー分布を示したものである。

五つ目が1927年、ドイツのW.ハイゼンベルグによる「電子の速度と位置とを同時に正確に決定することは不可能で、座標 x と運動量 p との誤差は $\Delta x \cdot \Delta p \geq h/4\pi$ になる」という不確定性原理だった。

六つ目が1928年、Z.ファウラーによる「金属から電子が表面の仕事関数よりも小さいエネルギーで飛び出すのは量子力学のトンネル効果によるものである」という提唱である。同じ年、米国のG.ガモフもこのトンネル効果によって α 粒子が核から飛び出すという理論を発表している。

同じ1928年、米国のF.ブロッホは波動関数を周期性の結晶に応用した金属の電気伝導理論を発表し、このなかで完全に周期性（規則性）のある金属、つまり単結晶では電気抵抗はゼロとなるが、実際は格子の熱による原子振動や不純物原子によって周期性が乱され、電気抵抗が生じ、かつ温度上昇に伴って抵抗値が増加することを理論的に証明した。

だが、物質が結晶を作るとき、ある結晶は導体となり、ある結晶は絶縁体となるのはなぜか、半導体では温度上昇によって抵抗値が減少するのはなぜか、といったことには答えられなかった。

フラッシュ・メモリの理論を確立

1928年のことである。Z.ファウラーとL.ノードハイムは強い電界を物質に加えると、導体内に存在する電子は、表面に存在する仕事関数という壁（バリア）を飛び越えなくても、トンネル効果によって飛び出すことが可能であると発表した（前述の六つ目の論文）。

これは60年後に登場するフラッシュ・メモリの理論的裏付けになるのである。

そのころ、社会は第一次世界大戦の終戦以後続いていた好況の波が一転し、1929年10月24日、ニューヨーク市場の株価は暴落し、世界は深刻な大不況を迎えたのである。このなかでも物理学者は黙々と研究を続けていた。

1930年、ドイツのR.バイエルスは、周期ポテンシャルのある結晶についてシュレジンガーの波動方程式を解くことで、「結晶中に存在する電子エネルギーは、自由電子のエネルギーのほかに、ブラッグの反射条件を満たす波数のところで不連続となる」ことを示した。

さらに同じ年、フランスのL.ブリリアンが、ブラッグの反射条件を満たす逆格子空間をゾーンとし、一つのゾーンではエネルギーの連続なバンド（帯）となり、バンドとバンドとの境界では不連続になるという有名なエネルギー・バンド理論を発表している。

この理論によれば、バンドとバンドの間では電子は存在せず、パウリの排他律によって電子はエネルギーの低い方から高い方へ埋められていく。そして最大のバンドが電子で満

たされたときに絶縁体か半導体になり、満たされないときに導体（金属）になるというのだ。

ようやく半導体とは何か、という輪郭が理解できるようになってきたのである。

このほかにも多くの理論発表があったが、いずれもその後の半導体理論の発展に大きな役割を果たすことになるのである。

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.
- 13) 城阪俊吉,『科学技術史』,日刊工業新聞社,1990年7月.
- 14) ソニー,『ソニー創立40周年記念誌』,ソニー,1986年5月.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 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.
- 18) 小松左京,堺屋太一,立花隆,『20世紀全記録』,講談社,1987年9月.
- 19) 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.
- 20) 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.
- 21) 電子通信学会編,『LSIハンドブック』,電子通信学会,1984年.
- 22) 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.
- 23) 菅野卓雄,『集積回路ハンドブック』,朝倉書店,1981年.
- 24) 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.
- 25) 中川靖造,『日本の半導体開発』,ダイヤモンド社,1981年.
- 26) 馬場玄式,『最新デバイス事典』,ラジオ技術社,1976年.
- 27) 菊池誠,『若きエンジニアへの手紙』,ダイヤモンド社,1990年.
- 28) 垂井康夫,『ICの話』,日本出版協会,1982年.
- 29) 菊池誠,『トランジスタ』,六月社,1959年.
- 30) 柳井久義,永田稜,『集積回路(1),(2)』,コロナ社,1979年.
- 31) 星合正治,島村道彦,『電子とその作用』,オーム社,1956年.
- 32) 徳山巍,橋本哲一,『MOS LSI製造技術』,日経マグローヒル社,1985年.
- 33) 吉田梅次郎,『半導体物性工学』,昭晃堂,1963年.
- 34) 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.
- 35) 瀬見洋,『日米半導体戦争』,日刊工業新聞社,1979年.
- 36) 菊池誠,『半導体の話』,日本出版協会,1967年.
- 37) 天野伸一,『インテル急成長の秘密』,につかん書店,1993年.
- 38) 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.
- 39) 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.
- 40) Sze, S.M., *Physics of Semiconductor Devices*, John Wiley & Sons, Inc., 1950.
- 41) Shockley, William, *Electrons and Holes in Semiconductors*, D. Van Nostrand Co., Inc., 1950.
- 42) Hodges, David A. and Jackson, Horace C., *Analysis and Design of Digital Integrated Circuits*, McGraw-Hill Book Co., 1988.
- 43) Shea, Richard F., *Transistor Circuit Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., 1957.
- 44) Bardeen, J. and Brattain, W.H., "The Transistor: A Semiconductor Triode," *Physical Review*, no.74, vol.230, June 1948.
- 45) Shockley, W., Pearson, G.L. and Sparks, M., "Current Flow across n-p Junctions," *Physical Review*, no.76, vol.180, July 1949.
- 46) Shockley, W., "Electrons and Holes in Semiconductors," *Bell System Technical Journal*, vol.28, no.435, 1949.
- 47) Kromer, H., *Archiv der Elektrischen Uebertragung*, no.8, vol.223, 1954.
- 48) Shockley, W., "Unipolar Field-Effect Transistor," *IRE Issue*, 1952.
- 49) Shockley, W., "The Theory of PN Junction Transistors," *Bell System Technical Journal*, no.28, vol.70, 1949.
- 50) Kahng, D. and Atalla, M.M., "MOS Transistor," IRE Solid-State Device Research Conference, 1960.
- 51) Spenke, Eberhard, *Electronic Semiconductors*, McGraw-Hill, Inc., 1958.
- 52) 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。