

半導体の歴史

— その4 20世紀前半 半導体の夜明け —



株式会社ルネサステクノロジ
 生産本部技術開発統括部
 MCU デバイス開発部 主管技師
 おくやま こうすけ
 奥山 幸祐

量子力学の半導体物理への応用

1926年にハイゼンベルク、シュレデンガー、ディラックらにより量子力学が完成するが、同時期、ニールス・ボーアが量子力学の研究をハイゼンベルク、パウリらと共に続けている時、研究仲間イタリア人のエンリコ・フェルミ、スイス人のフェリックス・ブロッホの2人がいた。

.....



フェルミ (Enrico.Fermi)

.....

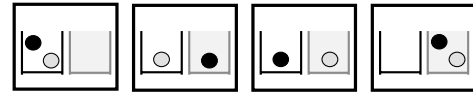
フェルミは実験家と理論家との2つの顔を持ち、双方において世界最高レベルの業績を残した、史上稀に見る物理学者である。量子力学が完成した同年の1926年、フェルミが「フェルミ統計」に関する理論を発表する。同時期にディラックも同様の結論を導き出していたため、フェルミ統計は「フェルミ=ディラック統計」と呼ばれる。電子や陽子、中性子など、フェルミ統計に従う素粒子を総称してフェルミ粒子と呼ぶ。フェルミ統計は、金属の自由電子や半導体の電子、正孔などの統計的な存在確率を与えるものである。統計学を歴史的に見ると、気体分子に対するマックスウエル=ボルツマン統計、フォトン(光子)に対するボーズ統計、そして金属、半導体に対するフェルミ=ディラック統計と展開している。フェルミ=ディラック統計は電子の振る舞いにパウリの排他原理を導入した統計力学である。すなわち、量子は全て固有の量子数としてスピンをもっており、光子はスピンの1、原子核を結びつけている強い力を介在している π 中間子が0、原子核の中に入っている陽子や中性子と原子核を周回している電子などは1/2のスピンを持つ。このように、スピンには整数(1、0)の場合と1/2の奇数倍の場合

.....

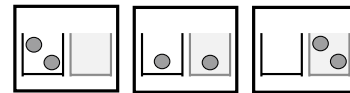
フェルミは実験家と理論家との2つの顔を持ち、双方において世界最高レベルの業績を残した、史上稀に見る物理学者である。量子力学が完成した同年の1926年、フェルミが「フェルミ統計」に関する理論を発表する。同時期にディラックも同様の結論を導き出していたため、フェルミ統計は「フェルミ=ディラック統計」と呼ばれる。電子や陽子、中性子など、フェルミ統計に従う素粒子を総称してフェルミ粒子と呼ぶ。フェルミ統計は、金属の自由電子や半導体の電子、正孔などの統計的な存在確率を与えるものである。統計学を歴史的に見ると、気体分子に対するマックスウエル=ボルツマン統計、フォトン(光子)に対するボーズ統計、そして金属、半導体に対するフェルミ=ディラック統計と展開している。フェルミ=ディラック統計は電子の振る舞いにパウリの排他原理を導入した統計力学である。すなわち、量子は全て固有の量子数としてスピンをもっており、光子はスピンの1、原子核を結びつけている強い力を介在している π 中間子が0、原子核の中に入っている陽子や中性子と原子核を周回している電子などは1/2のスピンを持つ。このように、スピンには整数(1、0)の場合と1/2の奇数倍の場合

表1 フェルミ粒子とボーズ粒子

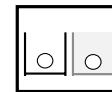
分類	種類
フェルミ粒子	電子、陽子、中性子、クォーク(6種類) ニュートリノ(3種類)、ミュー粒子、 タウ粒子、その他素粒子数10種類
ボーズ粒子	光子、グルオン Wボゾン(2種類)、Zボゾン、



(a) 古典物理の粒子の場合



(b) ボーズ粒子の場合



(c) フェルミ粒子の場合

図1 2つの箱に2つの粒子が存在できる場合分け

.....

の2種類があって、これによって量子の性質が異なってくる。スピンの整数のものをボーズ粒子、1/2の奇数倍の場合をフェルミ粒子と言ひ、ボゾンとフェルミオンとも呼ぶ(表1)。ボゾンとフェルミオンの性質は光子と電子の性質に端的に表されている。光は重ね合わせることによって、一カ所にいくつでも押し込むことができるが、電子はパウリの排他律で説明したように同じ状態にはひとつの電子しか存在することができない。この結果、光は波の性質が強く、電子は粒子の性質が強くでると共に、ボーズ粒子はボーズ統計に、フェルミ粒子はフェルミ統計に従うことになる。例えとして、ふたつの箱とふたつの粒子があり、箱に粒子を入れる場合の数を考えてみる。古典的には次の4つの場合の数が考えられる(図1(a))。粒子が左右に分かれて存在する確率は、4つの場合の数のうち2つということで1/2となる。ボーズ統計の場合、ボゾンは重ね合わせることができるので、片方の箱に2つ入ることが許されるが、右

に入っている粒子と左に入っている粒子の区別をすることができないため、場合の数は3つになる (図1 (b))。粒子が左右に分かれて存在する場合の数は1つしかないので、粒子が左右に分かれて存在する確率は1/3になる。フェルミ統計ではスピンの+1/2と-1/2の場合 (スピンが上向きと下向き) は、スピンという状態が違ってくるので、ひとつの箱に一緒に入ることができるが、スピンも同じ状態になっていた場合、箱に入れる量子の数はそれぞれ1個であり、場合の数は1個しかありえない (図1 (c))。粒子が左右に分かれて存在する確率は1となり、全てが1個ずつしかあり得ない。ボーズ統計でのエネルギーEである1粒子の量子状態にある統計的な確率は $f(E) = 1 / (e^{(E - \mu) / kT} + 1)$ で表され、ここで μ は1粒子当たりの平均自由エネルギーであり、光子のように粒子の数に制限が無い場合は $\mu = 0$ で、 $f(E) = 1 / (e^{E/kT} + 1)$ となり、半導体のはなし3に記載したプランクの輻射式と一致する。一方、フェルミ=ディラック統計での確率は $f(E) = 1 / (e^{(E - \mu) / kT} + 1)$ で表される。ここで E_f は電子が絶対零度で存在することができる最大のエネルギー (フェルミエネルギー) である。

1928年にはブロッホがエネルギーバンドと金属伝導の理論を発表する。結晶内の電子の波動関数を、結晶の周期性を考慮に入れてこの原子波動関数からつくり、電子のエネルギーが連続帯をなすことを示す。完全に規則的な周期性をもつ金属では電気抵抗が表れず伝導度が無限大になるが、実際には格子原子の熱振動や不純物原子の存在によって周期性が乱されるので、温度が高くなるほど電気抵抗が大きくなることを理論的に実証したのである。2つの原子が近づいて結合すると電子の波が干渉を起こし2つのエネルギーレベルに分裂する。さらに原子が集合して固体になるとエネルギーレベルは幅を持ちバンドとなる (図2には、金属ではないが、シリコン原子同士を近づけた時のエネルギー準位の変化を示す。)。ブロッホ以前は原子状態の理論であったが、この理論にて始めて原子と原子が結合した固体の議論に入り込むことになる。

ブロッホが結晶学的な考え方から出発し、量子力学を始めて導入して電子のエネルギーが連続帯をなすことを示して金属の電気伝導論を発表したのに対して、1930年にドイツのバイエルスは結晶が周期的ポテンシャルをもち、その中の電子について自由電子近似が成立するという条件のもとで、周期ポテンシャルを摂動としてシュレデンガーの波



ブロッホ (Felix Bloch)

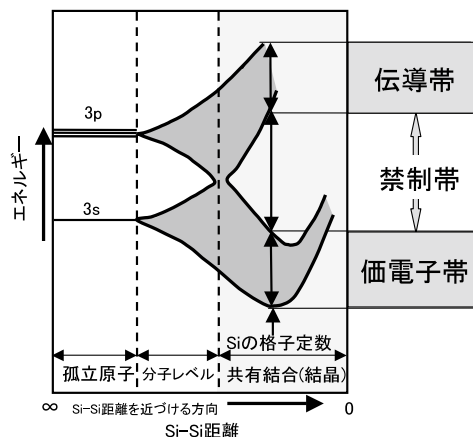


図2 シリコン原子同士を近づけた時のシリコン原子の3s、3pエネルギー準位の変化

動方程式を解いて結晶体内の自由電子のエネルギーを求めている。その解として、自由電子のエネルギーのほかに、周期的ポテンシャルのために生じた付加項が加わったエネルギー状態を導き出し、電子エネルギーの低い波とエネルギーの高い波が生じて、ここで電子エネルギーの不連続 (禁制帯、エネルギーギャップ) が起こる事を示した。また、同年にバイエルスとは独立にフランスのブリリアンも同じ現象からバンド理論をくみ上げた。すなわち、結晶体内の電子のエネルギーは、1つのゾーンの中では連続となり、ゾーンとゾーンの境界では不連続になるとする理論を発表した。このバンドはもともと原子最外殻にある電子 (価電子) のエネルギー準位で構成されているためバンドの中には電子が存在することができる。1つのバンドと次のバンドとの間には電子が存在しえないエネルギー領域 (禁制帯) があるとする考え方である。そしてパウリの排他律の原理によって電子はエネルギーの低いバンドから順に埋めてゆく。

このように1926年~1930年頃までの数年間に、固体物性に対する量子力学の適用が急速に進み、1928年ブロッホによって規則的な格子配列をもった金属の電気伝導の理論が確立され、1930年バイエルス、ブリリアンらによって固体のエネルギーバンド構造の理論も発表され、絶縁物についても伝導帯に電子が存在しない物質として説明されていた。しかしその中間の電気伝導性を示し、温度と共に電気



ウイルソン (A.H.Wilson)

伝導度が増大する Cu_2O などのような、いわゆる半導体物質に関しては説明が残された。

この半導体物性について今日的な理論の先駆的役割を果たしたのがイギリスのハロルド・A. ウィルソンであった。彼は1931年にブロッホらのバンド理論を半導体に持ち込み(図2)、さらに半導体のキャリアに、フェルミ=ディラックの分布則を初めて適用して、量子力学に基礎をおいた最初の半導体理論を提唱し、金属・半導体・絶縁体の相違を説明し、あわせて、半導体中のキャリア濃度、電流さらにその温度変化などの理論的説明を確立した。さらに、ウィルソンは半導体を真性半導体と欠陥や不純物を含む外来半導体に分け、前者は絶対温度 ($T = 0^\circ\text{K}$) の状態では下の価電子帯 (valence band) は完全に満たされており、上の伝導帯 (conduction band) は完全に空であるが、 $T \neq 0^\circ\text{K}$ の状態では熱エネルギーで励起された電子が伝導帯に移り、この電子とそれによって価電子帯に生じた正孔とによって電気伝導が現れるとし、その数が温度とともに増加するため電気伝導度が高くなることを理論的に求めている。また、外来半導体においては、不純物によって伝導帯のすぐ下に電気的にネガティブな単位 (ドナー単位)、または価電子帯のすぐ上に電気的にポジティブな単位 (アクセプタ単位) が存在し、 $T = 0^\circ\text{K}$ ではこれらの不純物単位は伝導電子も正孔もつくりませんが、 $T \neq 0^\circ\text{K}$ では伝導帯に電子を、価電子帯に正孔をつくり、これが電気伝導にあずかり、これらの電子・正孔の数が温度とともに増加するため、半導体特性に温度依存性が現れるとしている。

以上のウィルソンの理論を図示して説明すると以下のようになる(図3)。電子が絶対零度で存在することの出来る最大のエネルギーが前記フェルミ統計のフェルミエ

ギー準位 (E_f) であり、フェルミレベルともいう。フェルミレベルがバンド内にあり、そのバンドに入りうる電子の数に余裕が残されている場合、電子は自由に動く事ができ、金属となる(図3 (a))

一方、フェルミレベルが禁制帯内にあるときには禁制帯には電子が存在できないためにフェルミレベル以下のバンドは電子で満たされ、フェルミレベルよりも上のバンドは空となる(図3 (b) (c))。このような状態では金属とは違って電子は自由に動けず、半導体、または絶縁体となる。フェルミレベルよりも低いエネルギーをもつバンドは原子の価電子で構成されているので価電子帯といいフェルミレベルよりも高いエネルギーにあるバンドは電気伝導に寄与するので伝導帯という。価電子帯と伝導帯の間の禁制帯幅をエネルギーギャップまたはバンドギャップという。価電子帯の電子が光エネルギーまたは熱エネルギーでエネルギーギャップを越えて伝導帯に励起されることで伝導帯に入った電子は自由に動くことができ、電気伝導に寄与する。半導体は絶対零度では伝導電子が存在せず電気伝導はないが常温では熱励起によって伝導電子が存在し電気伝導性を示す(図3 (b))。光エネルギーや熱エネルギーで電子が励起されても伝導帯に届かないだけ十分に価電子帯の上のエネルギーギャップが大きい場合、絶縁体となる(図3 (c))。

一方、不純物を含む外来半導体の場合(図3 (d), (e)) に示すようにドナー単位、アクセプタ単位がエネルギーギャップの中に形成されているため、ドナー単位からの伝導帯、またはアクセプタ単位から価電子帯までのエネルギー差が実効的なエネルギーギャップとなり、あたかもギャップが小さくなったようになり、光や熱エネルギーにて励起し易くなるために電気伝導度が大きくなる。電気伝導度は

それぞれの準位のエネルギーレベルと量に支配的になる。言い換えると、不純物量を調整することができれば電気伝導度を制御することが可能になることを示している。1930年当時は交流の整流器に用いる半導体は天然の結晶を用いていた。天然の結晶は種々の原子からなる不純物を多量に含み、結晶中で局部的に分布している。したがって、天然の半導体がいろいろ異なった特性を示しても驚くことではない。事実、ある地方で産出する天然の半導体は主にn型を示し、他の産地ではp型と言うことがある。半導体の性質を意のままに制御したいという願望は、上に述べた事柄から明らかのように、結晶中の不純物成分に十分に注意を払うことである。当時整流器に使われていた大面積の亜酸化銅 (Cu_2O : バンドギャッ

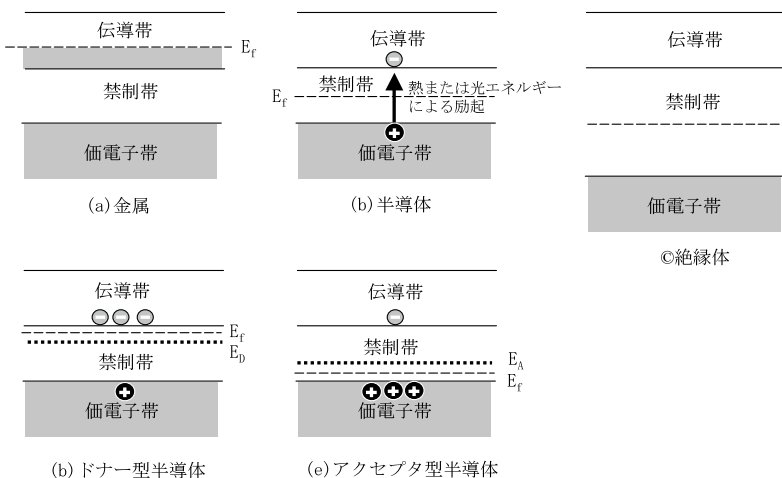


図3 金属、真性半導体、絶縁体、不純物半導体 (ドナー型、アクセプタ型) のエネルギーバンド

プは約2.1eV)の半導体は1920年に使われ始めた。これに使用された銅版は当時の電気工業用の銅を使った。このため、銅の不純物量が生産会社で、あるいは製造時期で異なっていた。したがって、整流器の品質を保証するためには、その製造工程で用心深い検査が必要であった。現代の半導体工業では、ドナーやアクセプタになる不純物を実効的に10億分の1 (10^{-9} 、あるいはテンナイン)、あるいはそれ以上に制御している。

III フェルミ、プロッホ、ウイソンのその後

1929年に世界恐慌が起り、1930年代に入ってくると、ドイツ、イタリアにはヒトラー、ムッソリーニが率いるファシズムが幅を利かせて来るようになる。

フェルミはフェルミ統計を発表した1926年、20代半ばにしてローマ大学の理論物理学教授に就任する。ここで、ニュートリノの存在を導入したベータ崩壊の理論を完成させる。また、自然に存在する元素に中性子を照射することによって、40種類以上の人工放射性同位元素を生成する。さらに、熱中性子を発見し、その性質を明らかにした。これらの成果によって、1938年にノーベル物理学賞を受賞するが、妻のラウラ・カポーネはユダヤ人であったため、ムッソリーニのファシスト政権下では迫害を受ける。1938年のノーベル賞授賞式出席のためイタリアを出国した機会を利用し、ストックホルムで賞を受け取った後に、そのままアメリカに亡命し、1939年、コロンビア大学の物理学教授となった。アメリカでは核分裂反応の研究に従事し、1942年、世界最初の原子炉「シカゴ・パイル1号」を完成させ、原子核分裂の連鎖反応の制御に史上初めて成功する。この原子炉は原子爆弾の材料となるプロトニウムを生産するために用いられ、アメリカ合衆国の原子爆弾開発プロジェクトであるマンハッタン計画でも中心的な役割を演じる。しかし、その後の水素爆弾の開発には倫理的な観点から反対をしている。第2次世界大戦後は宇宙線の研究を行なう。1954年、癌により死去するが、死の床においても、点滴のしずくが落ちる間隔を測定し、流速を算出していたという。エンリコ・フェルミにちなみ、原子番号100の元素はフェルミニウム (Fermium) と命名されている。また、原子物理学では 10^{-15} メートルを1フェルミと呼ぶ。

一方、プロッホは1933年にユダヤ系ということで、ナチスから逃れるためにドイツを離れ、スタンフォード大学で働くため、1934年に移住。1939年にはアメリカ合衆国に帰化し、第2次世界大戦中、ロス・アラモス国立研究所で原子力エネルギーの研究を行なう。その後辞任し、ハーバード大学でレーダーのプロジェクトに加わっている。戦後、核誘導と核磁気共鳴の研究に専念する。これらはMRIの基礎原理である。1952年にエドワード・マイルズ・パーセルとともにノーベル賞を受賞、「核磁気の精密な測定における

新しい方法の開発とそれについての発見」という受賞理由である。1954年-1955年に欧州原子核研究機構 (CREN) の初代長官として働いている。1961年にはスタンフォード大学で物理学の Max Stein Professor となる。

フェルミ、プロッホ両者とも、それまでの量子力学を完成させてきた天才達に引けを取らない優秀な科学者であり、フェルミ統計を発表したのがフェルミが25才、固体物理理論を発表したのがプロッホ23才の若さである。これらの理論は今でも半導体物理の骨格を形成している。両者とも、その後、更に異なる研究で成果をだし、その結果でノーベル賞を受賞している。フェルミはユダヤ人の妻をもち、プロッホは彼自身がユダヤ人であったために2人ともヨーロッパでのユダヤ人迫害から逃れ、アメリカに移住し、第2次世界大戦終了時まで原子爆弾の開発に従事することになる。

半導体物理学を完成させたウイソンは第2次世界大戦終了時までレーダーの鉱石検波器に使う半導体材料のバンド構造計算を行なう。大戦後は、企業の重役として成功を収めているため、ウイソンに関する資料は数少ないが、上記2者と同様に優秀な科学者であったことは業績から窺われる。

IV 現在の金融危機と1929年の世界恐慌

1) 金融危機から世界経済危機への移行

半導体の話を一休みし、横道にそれ、半導体物理が確立してゆく1930年代の世界情勢と今日とを経済面から比較してみたい。この稿を執筆している2008年12月初旬は世界的な経済危機の真っ只中である。この危機はアメリカのサブプライムローン問題を発端としており、少なくとも1年以上は続くと見られている。サブプライムローンとはアメリカに於ける2003年頃からの住宅ブームにのり金融機関が、過去に破産したり、担保を差し押さえられたりなどした比較的信用力の低い人に貸し出す住宅ローンであり、優遇金利を「プライム」ということに対して、その補助的なローンということから「サブ」が付けられている。通常のローンと比べて審査基準はゆるいが、金利は高く、住宅ローンを借りる人の15%がこれを利用していたと見られている。最初の数年は金利を低く設定した商品が多く、たとえば30年ローンの場合、当初2年間は低い金利が固定されているが、3年目以降は10%以上の金利を支払う場合が少なくない。一方、こうしたサブプライムローン債権は、小口証券化によりさまざまな金融商品に組み込まれ、国際的に販売される。サブプライムローン債権のような不良債権を小口証券化し金融商品にする手法を編み出したのは、1970年台半ばにマイケル・ミルケンという人物である。彼はこの手法を持ってウォール街に彗星のごとく登場し、「クズ」を意味するジャンク債を大量に集めてパッケージ商品を企画す

る。ジャンク債は文字通り、倒産して紙切れになるかもしれない借金（社債）で、1年で100%の利回りが見つかる様な高利回りでも単独のジャンク債では怖くて誰も買う人はいないが、たくさん集めてリスクを分散すれば利回りの魅力が勝ることを彼は発見したのである。これは生命保険の論理と同じであり、全体の死亡統計が分かって計算した商品である限り、トータルで生命保険会社は損をしないということである。銀行は信用度の低い融資先への債券をまとめて小口証券化して、投資家へ販売するようになる。リスクは証券を買った投資家が負うので、銀行は融資先が経営悪化しても、不良債権を抱えずにすむようになり、比較的安全度の低い融資先へもどんどん融資するようになった。しかも米国の格付け会社がこの証券に高い格付けを設定したことで、世界中の金融機関が買うようになり、さらに需要は膨れあがり積極的な融資が行われる。融資が簡単にしかも大量に行われれば、不動産市場や金融市場に大量の資金が流れ込み、不動産価格は大きく上昇することで、サブプライムローンが蔓延し、サブプライムローン債権を小口証券化した金融商品は世界中にばらまかれることになる。住宅価格が住宅ブームで上昇している内は良かったが、2007年夏頃から主にサブプライムローン返済の延滞率が上昇しはじめ、とうとう住宅バブルがはじけ、不良債権化する傾向が強くなる。これまで表面化しなかったのは購入した住宅の価格の値上がりが続く、借り手は住宅の価格上昇分を担保にして普通の住宅ローンである「プライムローン」に借り換えることができていたからである。ここに来て価格の伸びが止まってこの手法が使えなくなり不良債権化し、これがアメリカの株価暴落も引き起こす。2007年に入り、これらに投資していたアメリカ・ヨーロッパの金融機関やヘッジファンドが相次いで損失を被り、世界的な信用不安が拡大したことで、リスクの高い株式を売って、より安全な国債などを買う動きが加速し、世界同時株安を引き起こす。その後の株安は続き、世界の投資金は石油へと向かい、2008年（昨年）には石油価格の大幅な高騰を引き起こし、世界経済を更に冷やすことになる。この打撃を最初に受けたのが自動車産業である。石油価格の高騰により、自動車の購買が極端に減少する。当初はガソリンを大量消費する大形車の需要減少であったが、株安や燃料高騰を繰り返している内に、消費者マインドが更に冷え込み小型車も含む需要減へとつながる。最初に音をあげたのがアメリカのビッグ3（GM、クライスラー、フォード）である。アメリカ政府や議会に対して救済を求めたのである。議会公聴会ではビッグ3の経営幹部が議会までの道のりを社用の自家用機で移動して来たことをなじられる。救済を申し出る前に、贅沢な自家用機や経営幹部への高額な報酬を救済に回せと言うことである。この救済がなされるか否かは今年から新大統領となるオバマ氏が率いる新政権の判断に任せら

ることになる。2008年後半に入ると日本の自動車企業の業績にも大きな影響を与えてくる。昨年になって世界一の座を得たトヨタも2兆円の予算利益が4000億円（12月中旬）へと大幅に減少し、その他の企業も同じかそれ以上の影響を受け始める。この結果、各自動車企業の膨大な下請け部品会社などの関連企業も大きな打撃を受けるようになった。2008年12月10日、電気産業のトップメーカーであるソニーが8000人を超える正規社員を含む大幅な人員削減を発表し、自動車産業から電気などの他の産業へ広がりを見せている。アメリカの金融危機を発端として世界的な経済危機に入ってきたと言うのが現在の状況である。エコノミスト達の予測では2009年度一杯、この不況は続くであろうとの事である。

この経済危機を引き起こしているもう1つの原因はヘッジファンドに代表される投資信託による巨額の投資金の運用である。目先の絶対的な利益を目指し、1国の国家予算をも上回る巨額の投資金額が一瞬の内に、次から次へと新たな投資先に移動されてゆく。これによって、株価や国債、金、石油と言った物件の価格が実体経済を反映することなしに乱高下するようになっていく。この乱高下が逆に実体経済に影響を与え、振り回されてしまう現象が現在の経済不安を招いているとも考えられる。地球環境対策と同じように世界各国の共通課題として国際レベルで力を合わせて解決して行かなければならない課題と言える。

今回の経済危機を上回り、世界恐慌と呼ばれた経済危機が1929年に発生し、1930年代の政治・経済状況に大きな影響を及ぼしている。ディラックらによって量子力学が1926年に完成した3年後のことであり、ブロッホ、ウイリソンらが半導体物理学を体系立てていた時期である。以下に1929年当時を遡ってみる。

1920年代のアメリカは1918年までの第1次世界大戦への輸出によって発展した重工業の投資、帰還兵による消費の拡張、モータリゼーションのスタートによる自動車工業の躍進、ヨーロッパの疲弊に伴う対外競争力の相対的上昇、同地域への輸出の増加などによって経済的好況を謳歌していた。しかしながら、1920年代前半に既に農作物を中心に余剰が生まれており、ヨーロッパに輸出として振り向けたため問題は発生しなかったが、農業の機械化による過剰生産とヨーロッパの復興、相次ぐ異常気象から農業恐慌が発生する。また、第1次世界大戦の荒廃から回復していない各国の購買力も追いつかず、社会主義化によるソ連の世界市場からの離脱などによりアメリカ国内の他の生産も過剰になることで、農業不況に加えて鉄道や石炭産業部門も不振になっていた。それにもかかわらず投機熱があおられ、アメリカの株式市場は1924年中頃から投機を中心とした資金の流入によって長期上昇トレンドに入っている。株式で儲けを得た話を聞いて好景気によってだぶついた資金が市場に

流入、さらに投機熱は高まり、ダウ平均株価は5年間で5倍に高騰し、1929年9月3日にはダウ平均株価は最高価格を記録する。市場はこの時から調整局面を迎え、その後、乱高下を繰り返す。1929年10月24日、自動車メーカーGMの株価が下落したのをきっかけに株価は大暴落する。この後4日間下落が続き、5日目に再度暴落することで株価は9月の半分程度になる。これは当時の米国連邦年間予算の10倍に相当し、アメリカが第1次世界大戦に費やした総戦費をも遥かに上回った額である。投資家はパニックに陥り、株の損失を埋めるため様々な地域・分野から資金を引き上げ始めていった。この投資縮小の誘引によって、強烈な景気後退に見舞われることになる。この米国の株価暴落がきっかけとなり、連鎖的に世界恐慌を引き起こすことになる。1929年のウォール街の暴落は米国経済に大きな打撃を与えた。当時は株式市場の役割が小さかったために被害の多くはアメリカ国内にとどまっていたが、その後、アメリカ連邦準備制度理事会（FRB）の金融政策の誤りが重なり、銀行倒産の連続による金融システムの停止に陥る。1931年5月11日のオーストリアの大銀行クレジットアンシュタルトの破綻をきっかけとして世界に大恐慌が広まってゆく。この破綻を契機として、7月にドイツの銀行が倒産し、その影響はドイツ、東欧諸国と世界へと及ぶ。当時は金本位制であったため、経済危機はそのまま金流出につながった。数千万ポンドを失ったイングランド銀行は1931年9月金本位制を停止し、各国に壊滅的打撃を与えた。その対策として英国はブロック経済を始める。英国は世界各地に植民地をもっていたため、経済圏を植民地内に限定するブロック経済を推し進める事で世界経済混乱の影響を少なくする政策を取ったのである。植民地を持つイギリス、フランス、アメリカがこの政策を進める事で、植民地を持たないドイツ、イタリア、日本が苦しい立場となり全体主義の台頭を招き、結果として第2次世界大戦を引き起こすことになる。

日本は1929年2月に金本位制に復帰したばかりで、莫大な量の金を流出してしまい、大きな打撃をこうむる。関東大震災、昭和金融恐慌によって弱体化していた日本経済は世界恐慌発生とほぼ同時に行った金解禁と生糸などの輸出の落ち込みにより危機的状況に陥る。株の暴落により都市部では多くの会社が倒産し失業者があふれ、農作物は売れ行きが落ち価格が低下、冷害・凶作のために疲弊した農村では娘を売る身売りや欠食児童が急増して社会問題化している。これを打開したのが高橋是清であり、当時の犬養毅首相に請われ4度目の蔵相に就任し、12月に金輸出再禁止・日銀引き受けによる政府支出（軍事予算）の増額などの政策を推し進めたことや、満州を経済圏として持つことで、世界恐慌により混乱する日本経済をデフレから世界最速で脱出させている。しかしながらブロック経済政策をとる欧米諸国との貿易摩擦が起こる。各国のブロック経済政策は

第1次世界大戦後、世界恐慌までほぼ10年間続いていた国際協調路線を一気に崩壊したのである。日本では財閥が産業界を支配し、利権を求めて政治や軍に対する影響力を強めた。その後も目白押しの大規模プロジェクトなどで経済的成長が図られたが、資源配分転換と国際協調を背景にした軍縮への軍部の抵抗を止められず、日本は中国大陸への進出を推し進めてゆく。軍部の発言力は強まり、満州事変を引き起こして政府の不拡大方針を無視し、さらに五・一五事件で政党政治の幕引きをしたことで全体主義が台頭し、良識ある政治が崩壊してゆく。ワシントン、ロンドン両海軍軍縮条約の破棄、二・二六事件、日独伊防共協定の締結、そして日中戦争、第2次世界大戦への道をたどる事になる。

この動きはドイツ、イタリアでも同じ方向をたどる。ドイツでは第一次世界大戦の敗戦で各国から巨額の賠償金を請求され、ハイパーインフレーションやフランスのルール占領などにより極度に弱体化が進んでいた。そこに降って湧いたような世界恐慌が深刻な打撃を与え、大量の失業者が街に溢れ国内経済は破綻状態となる。その中で台頭してきたのが、共産主義とナチズムである。失望した人々の期待を受けて国家社会主義ドイツ労働者党（ナチス）が大躍進を遂げ、1933年にヒトラー内閣が成立する。ドイツ共産党を弾圧し全権委任法を成立させ、翌年、ヒンデンブルク大統領の死去と共にヒトラーは総統に就任、第三帝国を成立する。ヒトラーは軍拡とアウトバーン建設などの公共事業の拡大を実施しながら、民間の重工業化を推し進める。これらの政策により失業者は劇的に減少し、経済的な回復は達成された。その後、ヴェルサイユ、ロカルノ両条約を破棄しライラントに軍隊を進駐させ、次第に第二次世界大戦へと突入してゆく。イタリアでは第一次世界大戦直後から経済混乱に陥りファシスト党の一党独裁が始まっていた。世界恐慌後も更にその傾向を強め、エチオピアを侵略し、歩調をドイツに合わせてゆく。

アメリカではニューディール政策を掲げて当選した民主党のフランクリン・ルーズヴェルト大統領は公約通りテネシー川流域開発公社を設立すると共に、更に農業調整法や全国産業復興法を制定し、更にラテンアメリカとの外交方針を以前の棍棒外交から善隣外交へ転換した。しかしながら、ニューディール政策は1930年代後半の景気回復を前に規模が縮小されるなどしたため、1930年代後半には再び危機的な状況となった。アメリカ経済の本格的な回復はその後の第二次世界大戦参戦による莫大な軍需景気を待つこととなる。

今回の金融危機と1929年以降の世界恐慌は、投資対象の違いはあるが似た現象である。大きな違いがあるとすれば、金融危機が発生した後の各国の対応にあると考えられる。1929年からの恐慌では植民地をもつ主要国がブロック経済

という保護主義的な政策に走り、世界大戦を招いているが、今回の金融危機では世界各国が強調し合い、対応策を進めていることにあると思われる。80年間の人類の経験がフィードバックされているとも考えられるが、一方、各国間での経済活動の相互依存が細部まで入り込み、1930年代のような一国主義が成り立たない所までグローバル化が進んでいることが協調路線を取らざるを得ない状況を作り出していると考えられる。今後望まれるのは協調路線の上に立った、世界レベルで新たな資本主義が確立されて行くことである。資本主義の良い所は自由経済であり、だれにでもチャンスが与えられていることであるが、自由経済の結果、持つ者と持たざる者の格差が大きくなりすぎると、誰にでも与えられるチャンスが減少してゆき、真の活性化が遮られる。例えば投資ファンドは活性化のためには必要悪と考えられるが、富の一極集中を避け、健全な競争が保障されながら安定な経済成長を維持してゆくためには、ある程度世界経済の中でコントロールされた投資が実現されなければならない。この仕組みをどのように実現してゆくかが今後の政治経済の課題となると考えられる。勿論、コントロールするとは言っても本質的な自由を奪うものであってはならない。真の自由を発揮するための社会経済システムである。また、この経済システムの中には人類の大きな課題である温暖化などの環境対策、人口増加対策を含まなければ人類の明日はないとも考えられる。世界の富をこの2大課題の対策に向けなければならない時期に入ってきたのである。これらの課題を克服した社会システムを実現するための新たな研究開発や産業構築の実現に向け、1930年代のルーズベルト大統領のニューディール政策と同じように、投資を向けることで世界経済の活性化を引き起こす政策が待たれているのである。人類に限らず、生物は危機的状況に出会うことで進化してきているのは周知の事実である。これは個々の遺伝子を守ろうとする本能が有る限り今後も変わらないことであり、危機的状況を抜けた時点で真の進歩があるものである。具体的には技術分野に限れば、脱地下資源エネルギー技術（自然エネルギー、燃料電池など）、バイオ技術（医学、食料、生物機能科学）、ロボット技術（知能、センサー、動力、機械工学を含むロボット工学）、低消費環境技術（自動車、居住、電化製品など）、宇宙技術（宇宙資源利用に向けた諸技術）などの種々の研究開発、実用化を効率的に組み立て融合化し新技術を生み出し、2大課題対策を実現することで、次世代の繁栄の礎を築いてゆくことである。これらを世界規模で進め、日本はその中で日本人の特色を生かしてゆくことが望ましい。

■ 鉱石検波器（半導体デバイス）の再登場

この項はフレデリック サイツ、ノーマン アイシュプ ラッハ著、堂山昌男、北田正弘訳の『シリコンの物語』な

どを参考にし1920～1940年半ばまでの半導体の進歩について触れてみる。

半導体デバイスを育てた大きなきっかけは第2次世界大戦またはそれに向けたレーダー技術開発競争であることは前稿（半導体のはなし2）にも述べた。世界恐慌によって国際協調が崩れ、ドイツ、イタリア、日本に不利なブロック経済政策に対して、この3国内に湧き出た軍部を中心とする全体主義が世界規模の大戦へと向かわせる。この戦争には多くの新兵器が登場してくる。戦車、戦闘機、戦艦などの進歩の他に、第2次大戦では、原子爆弾の様な大量殺戮兵器や、遠くの射程距離を狙えるロケット技術、対戦相手の挙動を出来る限り早く捕まえ、事前準備により有利に戦いを持って行くためのレーダー技術などが新たに登場してくる。量子力学の発展などにより戦争自体が次第に科学戦争化してきたのである。半導体は、このレーダー技術開発の中で育てられてゆく。レーダー技術の原理は遠くの金属の物体に目がけて電波を発信し、対象物の金属が電波を受ける事で2次的に電波を発生し、その電波を元の発信場所を受信することで、その金属の物体がどの地点（方角、距離）にあるかを見つけ出す技術である。飛行機や戦艦などが金属の塊で構成されるようになり、レーダーが効果的になったのである。ちなみに、第2次世界大戦でイギリス空軍がドイツの都市を無差別爆撃するときに、ドイツ軍のレーダー網をかくぐるためのカモフラージュのために無数のアルミ箔を散布することでレーダーの効能を皆無にした事例がある。レーダーからの電波を受けてアルミ箔から発生した2次電波が、爆撃機から発生した2次電波を隠すことでレーダーの受信による爆撃機の位置同定を不可能にしたのである。また、レーダーの機能を向上させるためには使用する電波の波長を短くすること（高周波数）で図られる。波長が小さければ小さいほど正確な場所が同定できるのである。短波長が進む過程において、電波の受信方法として、それまで無線通信やラジオ放送などで主力になっていた真空管の性能では対応しきれず、ウイスキー（細い金属針）と半導体結晶の接合から構成される鉱石検波器が研究されてゆく。電波の波長がセンチメートルレベルのマイクロ波になると殆どが鉱石検波器の対応になる。この過程でシリコン結晶が育てられてゆくのである。この鉱石検波器は真空管の出現で忘れ去られたものであったが、レーダーの出現で蘇ったのである。

レーダーを始めて作ったのは1904年にドイツのヒュルスマヤーであり、海難事故を防ぐ事を目的にしたものであった。このレーダーは海軍や民間の船会社などに重要性が理解されず、そのまま20年間お蔵入りとなってしまふ。世間から認識して貰うには余にも早すぎたのである。このお蔵入りになったレーダーが再び世に出てくるのが1922年であり、無線通信の実用化に活躍したマルコーニがラジオ技術

者協会の演説で、ヒュルスメヤーの業績を引用することなくレーダーの可能性を話す。これをきっかけとして先進国の多くの科学者が研究に乗り出す。この当時受信機に用いられたのは真空管であり、電磁波の波長は10mの領域であった。当初は電離層の研究に利用されることが多かったが、1930年代に入ると、本格的に軍事目的に開発されるようになる。

レーダー分野の開拓期に最も活躍したのはドイツのホルマンである。1932年から1933年に国際極地科学探検隊にドイツの主要メンバーとして参加し、大気圏のイオン化層とその関連効果を研究する過程でレーダーの実用化が高いことを知る。この研究の中で、それまでで最も短いマイクロ秒パルス発生装置を開発し、イオン層から良好な電磁波の反射得ることに成功する

とともに、電子オシロスコープ上に周囲の地形の様子を表すことにも成功する。ヒットラーがこのホルマンの仕事に政治・軍事的に注目したが、ホルマンはナチスに好意を持ってず、ナチスからの政治的影響を避けるために、極地探検隊から帰った後、政府の援助を受けずに研究を続ける。ホルマンは1936年にマイクロ波研究から離れる前に高周波技術に関する本『Physik und Technik der Ultrakurzen Wellen (超短波の物理と技術)』を書く。この本は、当初はそれほど高く評価はされなかったが、第2次世界大戦間近になると重要な著書となる。この本では電磁波の発信装置に多空洞型マグネトロンの詳細を記述するとともに、受信装置には真空管よりも鉱石検波器が優れていることを述べている。「現在の技術を用いて超高周波で働く最も簡単な整流器と波長表示機は鉱石検波器である」と述べ、彼が実験した比較的簡単な点接触型検出器の使い方について、その有用性と限界を力説している。特に、青銅あるいは鉄のウイスカー（ひげ結晶）とパーライト（ FeS_2 ）結晶の組み合わせについて述べ、接触容量を減らすために非常に細いウイスカーをダイオードに使ったことと、ウイスカーを用いれば結晶の非常に敏感な領域を探することができる利点を協調している。この金属からなる細い針と半導体結晶とからなる低容量の点接触整流器、鉱石検波器の考え方が、後にタングステン針とシリコン結晶とを組み合わせた鉱石検波器を引き出す事になり、シリコンが再登場するきっかけとなるのである。

最初にホルマンの影響を受けたのはドイツのロットガルトである。1938年、彼はウイスカーと半導体結晶の組み

合わせを数多く検討し、「タングステンとシリコンの組み合わせが短波長で使える整流器の製造に非常に有効である」との結論を下す。ロットガルトの研究は50~1.4cmの波長領域で行なわれている。しかしながら、この結果はドイツ軍のレーダー研究には生かされなかった。ドイツ軍には若くて頭の良い科学者や技術者があまり居なかったためであり、ヒットラーが全ての者は通常の軍隊で仕えなければならぬと強く主張し、優秀な若者の研究の機会が奪われた影響と考えられる。全体主義とは従来思考の武器の大量生産などを可能にするものの、個々の個性の芽を摘み取るために、未来志向の社会形態にはならず、必ずと言って良いほど滅亡の道を辿ることを歴史は示している。その一例と言えるかも知れない。

ホルマンの文献を見て心を躍らせたのはイギリスのロビンソンであった。1930年代後半になるとイギリスではドイツの大軍備、特に爆撃機の急速な開発への恐怖を持つようになる。これに対抗するために戦闘機にレーダーを搭載し、爆撃機をいち早く見つけ撃墜する手法として戦闘機にレーダーを備える技術開発に注力する方針を1937年に決定する。この技術開発のため、電信研究所が設立され、創設計画の委員長であるティザートは国内の隅々から先端科学に携わる研究者を集める。戦闘機に搭載するために分解能と小型化が求められ、波長がセンチメートル領域のパルス放射を基本にする装置に開発を目標とした。イギリスは秘密裏に電磁波の発信器として小型で強力な多空洞型マグネトロンの開発に、フランスから亡命した技術陣（高い技術力を持っていた）の協力の元で成功する。これは世界一短い波長の電磁波出力が可能であった。残された技術開発は小型で高性能な受信機である。この時代、イギリスでも受信機の検討対象は真空管であった。しかしながら、ホルマンの著書にあるように真空管では高容量の受信端子のため、高周波（短い波長）には限界があったのである。発信機の性能を最大限に生かすためには、更に高性能な受信機が求められたのである。1939年に民間企業で働いていた電気技術者ロビンソンはティザートによって集められ、この秘密の研究に携わる。自己容量の大きい真空管に限界を感じていたロビンソンは1940年に、ホルマンの論文に出会う（一説にはホルマンと一緒に研究していたトーマの論文）。この論文でロビンソンは高周波の受信機には鉱石検波器以外にないと確信を得る。その後、前記のロットガルトと同様に同僚のスキナーと力を合わせ、ウイスカーと半導体結晶の組み合わせを数多く検討し、タングステンとシリコンの組み合わせを見つけ出す。結晶ダイオードを使う必要があるとロビンソンが決めた後、点接触シリコン整流器の実用分野開発の役割をになったスキナーは1940年7月16日、シリコンとタングステンの線を溶接に成功し、シリコンとタングステンの線の点接触が振動するのを抑制するた



ホルマン
(Hans E. Hollmann)

めに粘性液体で満たしたガラスの中に封入することで実用化の目処をつける。このガラスに封入された結晶は、その後BTH (British Thomson-Houston) 社が商業用に作成したカプセルに取り替えられるまで、レーダー装置の試験飛行に使われる。

1941年に別の研究所に移ったロビンソンの研究を引き継いだスキナーは「シリコン以外の物質以外では成功しなかった」と述べている。また、このシリコン (Si) とタングステン (W) の整流器 (ダイオード) はベル研究所のオールによって、マイクロ波の研究と関連して独立に発見されており、ロットガルトらの発見も合わせるとマイクロ波領域で良好な整流特性を示すシリコン-タングステンダイオードの技術は多くの技術者に研究され、成功している。これは先に述べたウイルソンらの半導体物理で明らかになったシリコンとタングステンのエネルギーバンド組み合わせの都合が良かったことや、タングステンが硬く、針先でシリコン上に存在する自然酸化膜を破り、電気的に良い接触を取るためと考えられる。タングstenはn型シリコンよりもp型シリコンとの組み合わせで良い整流性が得られ、ゲルマニウム (Ge) に対しては逆であることがシリコンダイオードの戦時研究で見つかっている。n型ゲルマニウムがタングstenと電気的に平衡になると、電子がタングstenに流れ込み、良好な整流には両者の間に大きな障壁を作らねばならない。接触前のタングstenの電子に占有されたエネルギー準位の頂上がゲルマニウムのバンドギャップ (0.7eV) の底の近くにあることが必要である。同様に接触前のタングstenのエネルギー準位の頂上がシリコンのバンドギャップの上部近くになければならない。このエネルギーバンドの関係からシリコンとゲルマニウムはタングstenに対して逆の伝導型で良好な接触が可能となったのである。これによってタングstenの仕事関数差に近い鉄 (Fe) が無線電話の時代にシリコンと組み合わせられて用いられた。

■ 舞台はヨーロッパからアメリカへ

アメリカでのレーダー開発は1940年にフランスがドイツに降伏した後には始まる。アメリカ政府の政策でマサチューセッツ工科大学 (MIT) にラジェーション研究所 (電波研究所、ラド・ラボ) を設立し、この研究所を中心にマグネトロンからレーダーシステムまでの開発を進めてゆく。研究所長はデュブリッジである。進め方は非常にオープンな進め方でペンシルバニア大学、パーデュ大学、デュボン社、ベル研究所、ゼネラルエレクトリック研究所などの20以上の大学と多数の企業から数百人の科学者や技師が参加した。これらの研究者の自由な研究をラジェーション研究所が中心になって取り纏めてゆく進め方である。ヨーロッパのように軍の研究所が統率してゆく進め方ではなかった。自由

な発想を重視した進め方と言える。この中でベル研究所のみが必ずしもオープンな進め方ではなかったが、これについては、後で記載することにする。このアメリカでのレーダーの開発に同盟国のイギリスが全面的に協力する。既に完成していたシリコン-タングステンダイオードの技術を公開したのである。このため、アメリカでの開発主眼点はこのダイオードの性能向上と大量生産の安定化に置かれる。そのポイントはシリコン結晶に含有される不純物の制御であり、如何に純度の高いシリコン結晶を得るかである。この結晶の改良に最も活躍したのはペンシルバニア大学とデュボン社のグループである。ペンシルバニア大学のサイツがデュボン社の顧問となり指導してゆく。このグループは1941年にシリコンの特性を左右する不純物の量がシリコンの原子の10万分の1程度であれば良好な特性を示すことを見出し、1942年に四塩化シリコンと亜鉛の気相反応により、そう高価でなく、粉末や粒の形の高純度シリコンを生産できるようになる。シリコンの中の炭素 (C) の量はダイオードの電気的特性には大きな影響はもたなかった。この方法はデュボン研究所の化学者オルソンが提案し、実験が進められた。ペンシルバニア大学の研究グループはデュボンで作られた最初のシリコンを受け取り、種々の添加物を加えた実験を行い、検討用のダイオードを作り、不純物としてはボロン (B) を加えたシリコンの伝導度増大が非常に良いことを発見した。同じ時期にベル研究所でも同様な発見をしている。イギリスのトムソン・ヒューストン社のライドは1941年にデュボン社製シリコンが優れており、輸入許可を申請する。イギリスのシリコンでは商業生産できないほど歩留まりが低かったのである。

この時点でデュボン社が商業生産レベルの良質なシリコンを実現したことは大きな事であった。同時期にベル電話研究所のモートンが10センチメートル領域まで使える3極真空管を開発したのである。この領域での2極真空管、3極真空管の開発も要求されていたのである。これは従来技術で確実に立ち上げるためには重要なことである。もし、デュボン社の開発が遅れていたのなら、レーダー受信機の開発が再び真空管に向けられ、半導体の開発への推進力が大幅に減少していたとも考えられる。

一方、ベル電話研究所では、ラジェーション研究所と足並みを揃えながらも、それ以前から独自の進め方をしてきた。1930年代にボーエンとキングが協力して進めていた無線通信の点接触型整流器での実験結果から、比較的早い時期にシリコンを研究対象として選んでいる。先に述べたドイツのホールマンの研究と並行して殆ど同時に独立して進められていたのである。さらにドイツのロットガルトがタングstenのウィスカーとシリコン結晶の組み合わせが最適であることを発見した時と同時期にベル電話研究所のスタッフであるサウスワースとオールらも100種類位の元素と

化合物を網羅し、入手可能な組み合わせの中からロットカルトと同一の結果を得て、タングステンとシリコンの組み合わせを選択している。

1939年、オールはシリコンの高純度化を研究所の金属研究者であるスカッフとスーラーに頼む。彼らは1941年に溶けたシリコンを使って、部分的に高純度化する方法を採用した。結晶を熔融し、再び冷やすと、部分的に固まる過程で不純物は固まるところには入りにくく、溶解している部分に残る性質を持つ。これを偏析(セグリゲーション)と呼ぶ。これは「帯溶融精製」技術として、戦後になってからファンによって確立される量産技術と同じ原理である。試料の融解と凝固を順々に生じさせ、部分晶出を繰り返すことで不純物は液相に凝縮し、結晶は高純度になる方法である。この偏析によって、シリコンはp型にもn型にもなり得ることが明瞭になった。シリコン、ゲルマニウムの中の不純物がⅢ族のものはアクセプタ(p型)、V族のものはドナー(n型)になることが確かめられたのである。

また、オールは1つの結晶中にp型の試料の一部にn型が存在するものを手にいれる。nとp型の境い目に存在する急峻なpn接合を発見する。また、ここに光を当てると、nとpの2つの領域間に電圧が発生する、いわゆる光電効果を合わせて発見する。

さらに、1943年、ベル電話研究所のソオイエレルが、結晶の純度が上がった後の、次の課題として不純物を添加する実験をおこなっている。純度の高いシリコン結晶に0.001%のボロン(B)を意識的にドーピングした時に点接触型整流器の感度が大幅に向上し、さらに従来のものより大電力に耐えられること見つけている。この不純物ドーピングの効果は先に述べたペンシルバニア大学のグループがボロンのドーピングでシリコン結晶の伝導度が向上した結果と同等のものであるが、それを実用の整流器の特性として確認したものである。

ベル電話研究所の研究部長であるマービン・J・ケリーはオールの発見は将来重要な価値を生み出す可能性があると考え、この知識をベル電話研究所の最高機密にすべきと判断する。ベル電話研究所は1941年以降、トランジスターの発明を公表する1948年まで半導体関連の情報開示に対して閉鎖的な施策をとる。一方ではオールの発見から益々半導体の将来性を感じ取ったケリーは1945年までにショックレー、ブラッテンらのグループに物理学者バーディーンも加え、ショックレーを中心とした充実した研究体制を整えてゆく。

トランジスターの父 マービン・J・ケリー

この項は谷村光太郎著『半導体産業の系譜』を参考にする。谷村先生のこの著書は最も良く、当時の様子を伝えていると確信している。是非、一読されることをお勧めしたい。

ベル電話研究所でマービン・J・ケリーは1928年から務めていた真空管課長から昇格し、1936年から研究部長を務める。彼は半導体デバイスの可能性を信じていた。と言うより、真空管の限界を感じ始めていたと言っても良いかも知れない。真空管は白熱電球と同じように電流を流すためにフィラメントを熱しなければならない。フィラメントには白熱電球と同じように寿命があり、ある一定の使用期間で切れてしまう。このための保守が大変であり、熱する事による消費電流量も、数多くの真空管を使うとばかにならない。さらに、真空管そのものが大きい事である。当時のAT & Tは数百万本の真空管を使用していたのである。その後、電話回線の使用が更に一般化し、使用量が増大してくることを考えると、保守や消費電力、保管場所の大きさから、真空管の限界が益々問題化して来るのである。これらの事情から真空管に変わる新しい概念の増幅器への要求が電話事業から高まっていた。1920年代後半から急激に進んでいる量子力学を基にした固体物理学において素性が明らかに成りつつある半導体がこの問題の突破口になるのではないかと、彼の鋭い嗅覚からくる洞察力が固体素子である半導体へと向かわせていた。彼はこの重要性を説き、出来る限りの予算とスタッフを半導体の研究に向ける。1929年からの大恐慌で新規採用は凍結されていたが、1936年に凍結解除になると、固体物理と化学に興味をもつショックレーを1936年に、その後、ウッドリッジ、ピアソン、ニックスらを雇い、それまで研究に従事していたベッカー、ブラッテン、ボゾロスらと共に研究させた。

1938年にケリーは物理研究部を再編し、ショックレーを中心に3人による固体物理の基礎研究グループを作る。ケリーはこのグループに最大限の自由を与え、電話事業に役立つ新素材やその処理方法の発見と促進をグループの目的とした。半導体を用いた真空管の代替技術の発見を望んだのである。ケリーは入社早々のショックレーにベル電話研究所の目的がアメリカの将来の通信システム開発にあるこ



ケリー (Mervin J.Kelly)



ショックレー (William B.Shockley)

とを説明し、「電話ネットワークの充実を図るためには、回路を切り替えるスイッチと信号の減衰を防ぐ増幅装置の高度化が不可欠だ。今あるのは真空管だが、この真空管の機能の限界は見えている。真空管をはるかに超える能力を持つ増幅装置を考え出して欲しい。真空管とまったく異なった概念のものを作って貰いたい」とショックレーに明確にやるべきことを伝えている。ケリーとのこの対話が、ショックレー自身の人生を決定し、この仕事を自分の使命と考えるようになったと後に語っている。ショックレーはこの要望に応えようと、4年間、数々の実験をし、失敗を続ける。戦争の影響で、1942年にショックレーがベル研究所を退所して海軍主宰の「対潜水艦作戦研究班」にゆくと、ケリーの研究チームは回転休業になる。

終戦となる1945年にケリーは取締役副所長に昇格すると大幅な組織改革に手を付ける。第二次世界大戦終結直前の7月である。ベル研究所の戦後をにらんだ組織改革であり、物理関係の基礎研究グループは①物理電子研究グループ、②電子力学研究グループ、③固体物理研究グループの3つに編成される。③はショックレーと化学屋のスタンリー・モルガンがリーダーとなる。ケリーはショックレーに管理能力のあるモルガンを組み合わせることでショックレーの能力を引き出そうとした。ケリーはグループ③の発足に先立って、1945年に「量子力学の進展により、固体を構成する原子、電子の配置やその振る舞いが判明してきた。これらの原子、電子を制御する方法を発見すれば、有益な応用分野の技術を開く可能性がある。固体量子力学の理論と、それに対応、応用する実験を統合し、総合的に取り組めば、大きな成果が出るだろう」といっている。

ケリーは戦争中のラジエーション研究所やロス・アラモス研究所が分野の異なる多くの科学者を擁して、短期間に大きな成果を出したことに注目し、一流の理論家の存在が有益なことを痛感していた。ショックレー自身も、固体物理に精通した理論家の必要性を感じており、友人を通じて知った物理学者バーディーンの意向を確かめると共に、ケリーにバーディーンを勧誘を頼む。ケリーはバーディーンに高額な年俸を提示し、バーディーンは固体物理研究グループに終戦の年の10月に加わる。このグループには、プリンストン大学時代に知り合ったブラッテンがおり、2人はウマが合い、生涯の友人となった。ケリーはバーディーンに、



バーディーン
(John Bardeen)



ブラッテン
(Walter H. Brattain)

将来の電話網の夢と、この夢の実現には真空管では限界があることを言い、「真空管に代わる全く新しい別の概念の増幅器を考えるにしても、物理の本質を深く理解することが必要で、その知識なくしては物質の改良はできない。量子物理学によって、物質の電子的、原子的な性質を正確に理解する努力をして欲しい」とバーディーンに役割分担を明確に告げている。ケリーはショックレー、バーディーンを始めとするメンバーに常に明確な、しかもやる気がでる指示を告げている。

ケリー自身がベル電話研究所、ならびに将来の社会にとって最も必要とされる技術が固体素子、半導体であることを察知し、それを実現するために必要な人材を確保し、適材適所の体制を組み、スタッフに対して明確な指針を掲げ、理解させ、十分な費用をかけることを実行したのである。1936年から1945年の間に大きな組織改革は3度行い、1945年に最も充実した組織改革を実現している。ようやく体制が固まったのである、あとは実が熟すのを待つのみである。このようにしてトランジスターの誕生のお膳立てをしたことにより、ケリーはトランジスターの実際の発明者ではないが「トランジスターの父」と呼ばれている。

次回

第6回 半導体の歴史

—その5 20世紀 トランジスターの誕生—