

半導体の歴史

— その6 20世紀後半 集積回路への発展(1) —



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

トランジスタ誕生後の バーディン、ブラッティン、ショックレー

毎年正月2日3日に箱根駅伝が開催され、我が家でもこの駅伝をテレビ観戦するのが恒例となっている。この駅伝は関東学生陸上競技連盟が開催し、今年で85回の歴史を持つ。東京大手町から箱根の芦ノ湖までを片道5区間に分け、往路復路合わせて217.9kmの長い道のりを10人のランナーが各区間20km前後の距離で持ち合い、襷(たすき)をバトンタッチしてゆく。今年も予選会を勝ち抜いてきた学校とシード校とを合わせて23校の大学が参加し優勝杯を目指し熾烈な争いを繰り広げた。駅伝は日本発祥の競技であり、駅伝という言葉自体は、日本書紀にも記載されているほど古いものである。首都と地方の間の道路網に30里(約16km)毎に置かれた中継所のことを「駅」といい、ここに宿泊施設や人、馬を配置していた。駅に朝廷の使者が到着すると、次の駅まで乗り継ぎの馬を用意する仕組みが整っており、この制度を「駅制と伝馬制」あるいは「駅伝貢進」といった。この制度から、競技としての「駅伝」を考え、名づけ親となったのは当時大日本体育協会副会長の武田千代三郎である。1917年に始めて競技としての駅伝が開催されている。

科学の発展は駅伝に似ていると思っている。多くの人々のバトンタッチで発展しているからである。誰かが何かを発見した、または発明したと言っても、それはそれまでの過去の人々が積み重ねた知識が伝達されたからこそ可能になるものである。この知識の伝達こそが人類のみが持ち得た唯一の発展方法なのである。トランジスタ動作を発見し、このデバイスを発明したバーディン、ブラッティン、ショックレーの3人も科学の発展を担った駅伝ランナーの1人と言える。特に、バーディン、ショックレーの影響は大きく、バーディンは理論物理学者として、ショックレーは学者と言うよりは、彼自身の存在が多くの学者や技術者

達をトランジスタ開発やその後の集積回路への技術発展の渦に巻き込んでゆく台風の目の役割を担っている。ショックレー自身が意識して行なった訳ではないが。

1947年、1948年にバーディン、ブラッティンが点接触型トランジスタを、1949年、1951年にショックレーが接合型トランジスタをそれぞれ発明、発表することで、その後の電子産業の扉が開かれてゆく。



往年のバーディン

1945年から1950年までショックレーは研究会を開き、量子力学に精通したバーディンから半導体の中の電子や正孔の挙動、半導体表面の準位とその働き、トランジスタ動作原理などについて多くの講義を受け、多くの議論を交わしている。この研究会が点接触型や接合型トランジスタを生み出す原動力の1つになったと考えられる。ショックレーはpn接合型トランジスタを考案した1年後の1950年に、トランジスタの動作原理を中心に『Electrons and Holes in Semiconductors (半導体の中の電子と正孔)』と題した本を書いている。この本は第1部がトランジスタ電子工学、第2部が半導体の理論、第3部では第2部の理論の根拠となる量子力学の基礎、基本原理から電子や正孔の抽象化を試みており、1931年にウイリソンが著した半導体物理から1949年のpn接合型トランジスタ発明までの半導体技術を総括した半導体専門書となっている。この専門書がその後の日本をも含めた半導体開発者たちのバイブルとなる。ショックレー自身がこの時点までに理論的な考え方を完全にマスターしていたことが伺える。この本の巻頭言の中で、次のようなことを書いている。「本書はトランジスタの研究計画の進展に応じて、Bell研究所で行なわれた一連の講義にその端を発している。従ってJ. BardeenとW.H. Brattainによって行なわれたトランジスタの発明に負う所が大である。又内容とその話の展開のさせ方には講義中にさとした説明の便宜の方法を大いに採用した。…」前稿で述べたように、1947年のトランジスタ発見にショックレー自身が関わる事ができなかった悔しさが原動力となり1949年までの凄まじい努力によってpn接合トランジスタ

を發明した段階で、彼自身の気持ちの整理がついて執筆したとも考えられる。

この本を出版した1950年10月以降になると、理論的な考えは自分でいき、彼の考えを研究、実験させるためにのみグループのメンバーを使うようになる。ショックレーは接合型トランジスタの研究開発に全てを集中し、グループ員の仕事を接合型トランジスタの理論的検証のみに使った。このため、理論的物理学者であるバーディンの出番は無くなり、1945年からのバーディンとショックレーの協力関係は1950年には解消してしまう。「飛鳥尽きて良弓蔵せられ、狡兎死して走狗煮らる」と言うことわざがある。「飛んでいる鳥を射尽くしてしまうと、良い弓も蔵にしまわれてしまい、獲物ですばしい兎が死んでしまうと獵犬は用がなくなり煮て食べられる」ことであり、中国の春秋戦国時代に敵国が減びてしまうと、そのために力をつくした味方の謀臣も殺されてしまうということを示した例えとして、越王句踐が、呉王夫差を破ったあとのこと、句踐の謀臣である范蠡が自分は五子胥の二の舞になると悟り、越の国を去る時に言った言葉である。事が成ってしまうとそれまで役に立っていたものは不要になり、上に立つものにとっては目障りな存在になるということであり、色々な立場で活躍しても引き際をあやまるなという時に使われることわざである。バーディンとショックレーとの関係はこのことわざで表されるような関係になっていたのではないだろうか。

ショックレーの独裁的なやり方で、グループ内での居場所を失ったバーディンは研究所幹部に訴えるが、ケリーはショックレーの研究成果にかけ、自由にやらせようとしたため、状況は変わらなかった。ショックレーのやり方にうんざりしたバーディンは半導体の研究から離れ、大学卒業後頃から興味を持っていた金属の超伝導現象の研究を始める。ショックレーのこのやり方に対する不満はグループ内に広まり、バーディンはブラッティンとともに再び幹部に訴える。この様な状況に対して問題を感じた研究所はショックレーのグループを、モルガンの率いる固体物理グループとショックレーの率いるトランジスタ物理グループの2つに分け、バーディンとブラッティンを含むグループ員の大部分をモルガンのグループに入れる処置を取る。しかしながら、これまでのショックレーとの関係などでベル研究所での研究に嫌気をさしていたバーディンは研究所を辞め、イリノイ大学に移る事を決心する。イリノイ大学がバーディンの自由な研究を保証してくれたのである。ベル研究所は大幅な昇給と彼自身のグループをつくる条件を出したが、時すでに遅く、バーディンの決心を変えることは出来なかった。その頃、ラトガーズ大学のセリンが、超伝導転移温度が試料中の同位元素の含有量に敏感であることを発見し、これもバーディンの決心を早めたようである。バーディンはイリノイ大学へ移り、超伝導の研究をつづけ、超伝導の

BCS理論で1972年に2つ目のノーベル物理学賞を受賞する。この理論については「半導体のはなし4」でも述べたが、液体ヘリウム温度近くで超伝導を示す金属や化合物の超伝導機構を理論的に解明したものであり、上向きスピンをもつ電子と下向きスピンをもつ電子がペアを作って金属中を埋めつくし、ペアとしての運動では電気抵抗をゼロにするほどスムーズに動けるが、個別の電子は実効的に大きな質量をもつことを表したものである。ノーベル賞の賞金は投資に回し資産をつくる。晩年は静かな余生をおくり、1991年、享年82歳で死去している。異なる分野で2度のノーベル物理学賞を受賞したことは、よほど優れた理論物理学者であったことを示している。



ブラッティン

一方、実験物理学者であったブラッティンは定年までベル研究所で研究をつづけ、半導体研究の権威者としての役割を学会などで果し続けた。定年後は故郷ワシントンの母校ウイットマン大学で物理学を教えて余生を送り、1987年に享年85歳で生涯を終えている。バーディンとブラッティンの親交は生涯に渡って続いていたようである。

シリコンバレーの発祥

ショックレーは1955年までベル研究所に勤める。この年になっても、トランジスタ物理グループのリーダーに過ぎなかった。ベル研究所は彼の業績は認めても、自己中心的な性格やマネジメント能力の無さ、特に人事管理の無神経さを考えると昇進させることができなかったのである。彼は世の中で名声を得たのだが、ベル研究所からの報酬はかれの価値と功績を十分に評価したものではないと考え、外に飛び出してもっと良い報酬を得ようと願う。1956年2月にショックレーはアーノルド・ベックマンの協力を得てショックレー半導体会社を設立する。ベックマンはカリフォルニア工科大学で化学を教えていた事もある学者で、酸・アルカリを測定するPHメーターを考案し、これを製造する会社を創設し、従業員2000人の大会社にまで育て上げていた。ショックレーから相談を受けたベックマンは、半導体に前から興味を持っていたこともあり資金面の助力



往年のショックレー

を行なう。設立した場所はカリフォルニア州パロアルトであり、サンフランシスコから南にサンマテオを經由して33キロに位置する。後にシリコンバレーとして世界の半導体業界の中心地となるサンノゼは、更に30キロ程度南下した場所にあり、このサンノゼのシリコンバレー発祥のきっかけとなったのが、パロアルトのショックレー半導体会社である。ベックマンは創設に当たって設立する場所をベックマンの会社のあるロサンゼルス近郊を進めるが、ショックレーはパロアルトの近くにスタンフォード大学があり、優秀な人材を募集する上でも大学と密接な協力関係をつくるのが重要だと言って、ベックマンを納得させる。ショックレーがこの場所にこだわった真の理由は、パロアルトが幼少時を過ごした郷里のマウンテンビューの近くにあり、当時、パロアルトに母が住んでいたためである。結果的には、ショックレーがこの会社創設に当たって国内から集めた若者達が、ショックレーの会社から飛び立ち、サンノゼ周辺に数々の半導体会社を設立し世界をリードするに至り、サンノゼがシリコンバレーと言われるようになる。サンノゼの近くにショックレーの故郷があっただけの理由がサンノゼを世界のシリコンバレーにしたという事である。

会社を作るに当たり、ショックレーは、まずベル研究所のこれぞと思う人々に声をかけるが、ショックレーの気質を知り抜いているベル研究所の仲間は何れも参加しなかった。参加はして貰えなかったが、世界の趨勢を把握し、技術情報を交換するために彼らと十分に交流して行く。ベル研究所仲間から参加して貰えなかったショックレーは人材を集めるために全国を回り、優秀な人材を多数確保する。ショックレー自身、トランジスター発明の第一人者として知名が行き渡っており、ショックレーの気質を知らない外部からの人材募集はやり易かったのである。発足時に集まったメンバーは25人であった。この人材の中で、後にシリコンバレーで最も成功した人は、カリフォルニア出身のゴードン・ムーア (Gordon E. Moore) と中西部出身のロバート・ノイス (Robert N. Noyce) である。かれらは後に他の6人とショックレートランジスター会社を去り、フェアチャイルド半導体社を立ち上げ、シリコンバレーの基礎を築く。その後の1968年に、彼らは最も成功したインテルを創立することになる。ノイスはフェアチャイルド時代に集積回路の開発にも重要な役割を果たす。歴史的に見ると、ショックレーの会社設立は優秀な人材を西海岸の一箇所に集め、半導体の教育を施したことが、その後の半導体業界の流れを作ったと考えると大きな成功であったと考えられる。

この様にして発足したショックレー半導体会社ではあったが、事業的には失敗する。1958年までベックマンは100万ドル以上を注ぎ込むが、その時点でショックレーのアイデアである4層ダイオードを日産数百個生産できるだけであり、折角作った4層ダイオードも性能にばらつきがあり本

格的に購入してくれる所はなかった。この様な中で、彼が採用した優秀な人材は彼から半導体に対する十分な教育を受けるが、彼の性格が原因で一緒に働くことに難しさを感じる。4層ダイオードより簡単なデバイスを製造し、事業を立ち上げようと言うスタッフの意見にショックレーは全く耳を貸さず、旨くいかないのは従業員のせいとする。ショックレーはアイデアが全てであり、その後の製品化はどうにでもできると考えていた。実際に1つのアイデアを事業として立ち上げるには、アイデアを創出するよりも何倍ものエネルギーを必要とすることを理解できなかったようである。彼は彼自身が持つ欲望が大きいにも関わらず、あくまでも物理学者の1人であるに過ぎなかった。ショックレー自身、アイデア創出に精力を使うが、それを事業として成功させることには無頓着であった。また、物理関係のスタッフに対しては、彼自身が強い競争意識をもってしまいうことも多かった。アイデアが全てだったのである。この様な中でショックレーの元で事業を育成してゆくことに限界を感じた優秀なスタッフはショックレーから独立することを考える。結果として、ショックレーが最も信頼していた8人のスタッフが1957年8月にフェアチャイルド半導体社を設立し、独立してゆく。フェアチャイルド半導体社は1年後には100万ドルの売り上げを達成したことを知ったベックマンは100万ドル以上の投資をしても赤字続きのショックレー半導体会社に黙っていられなくなる。1958年にショックレートランジスター研究所と名を代え再起を期待したが、その後も成果が出ず、1959年、クレバイト社に、この研究所を売却することで、ショックレーも身を引く。

その後、ショックレーは、それまで講師を務めていたスタンフォード大学に教授として招かれる。大学はノーベル物理学賞受賞者として大学の看板になることを期待するが、ショックレーの興味は「半導体」から「人間の資質」に移っていた。人間の先天的要因の強さを信じ、IQテストに異常な信頼をおくようになる。先天的能力の人種による差異を熱心に研究し米国黒人のIQテストのデータから先天的能力の低さを指摘し、人種差別論者のレッテルを張られる。1979年に大学の定年を向え、続けて勤務を希望したが、大学に断られ退職、1989年に享年79歳で死去している。ショックレー自身は粘着質的な性格で、自分本位な考え方の持ち主であり、同僚や部下達との人間関係が旨くいかず、自分自身の社内での出世や事業運営には成功することは出来なかった。しかしながら、彼自身の半導体の第1人者としての自負と彼の粘り強いエネルギーは結果としてpn接合やトランジスターを中心とした理論の確立と発明に大きく貢献すると共に、前記の『Electrons and Holes in Semiconductors』の著書を纏め、これが日本の技術者らも含めた後進の道しるべとなる。一方、ショックレー半導体会社設立で優秀な若者を結集し、半導体知識を植えつける事でシリコ

ンパレーの礎を築くことになった。ショックレーの人間性の好悪は別として、半導体歴史の中で大きな役割を果たした功労者なのである。

半導体結晶技術の進歩

トランジスター、特にショックレーが発明したpn接合型トランジスターを工業的に具現化するためにはゲルマニウムやシリコンの高度に精製した単結晶が必要になってくる。この結晶技術の進歩がこのトランジスター技術を育ててゆくのである。当初、半導体材料としてゲルマニウムとシリコンは将来の実用化でどちらが有利なのか不明確でないまま研究が進められて



ファン
(William G. Pfann)

いたが、継続した研究の中でシリコンの優位性が明確になってくる。ゲルマニウムは研究と開発の最初期に選択された素性の知れた半導体であった。供給源としてはシリコンの方が自然に多く存在し、問題がないことは判っていたが、ゲルマニウムも第2次世界大戦中に良い資源が発見されて以来、その当時に必要な量は容易に手に入った。ゲルマニウムの融点は958℃で、シリコンの融点1412℃に比べてかなり低い。1952年にベル研究所のファン(William G. Pfann)により開発された帯溶融法で、かなり高度に精製した単結晶を作ることができるようになる。表面の酸化物は水に溶けるが、この親水性酸化物は疎水性ゲルの中に細かく包まれているので、実用的に無視する事ができた。この帯溶融法は、多結晶半導体が入ったポートを結晶が局部的に溶けるように設計された炉の高温帯を次々に通過し、融解と凝固を繰り返すことで精製が進む方法であり、不純物が液相

に残るような材料の場合、この方法で結晶の高純度化が可能となる。この方法で、当時としては十分な量の単結晶が得られたことから、当初のトランジスターはゲルマニウムで検討されていた。

一方、シリコンはゲルマニウムに比べて温度に対して敏感でなく、ヘテロダイン混合器として使われていたシリコン点接触ダイオードで示した広い温度範囲での良好な特性は無視できるものではなかった。さらに、ゲルマニウムの酸化物と違って、シリコン表面上に形成された酸化物層(SiO₂)は電気的絶縁膜と化学的防護膜として非常に良好な性質を持っている。しかしながら、1950年初めまでは高純度のシリコン単結晶が得られず、トランジスターとしては使えなかった。

テキサス州ダラスに本社をおくテキサスインストゥルメント(TI: Texas Instruments)社は1951年、その仕事の中心にトランジスターを用いた製品をつくることに決める。このTI社がシリコン単結晶を精製する方法を工業的に最も早く確立することになる。この方法を説明する前にTI社の成り立ちを紹介する。第2次世界大戦前のこの会社の仕事は地震工学を用いた石油の地理的探索であった。また、戦時中は潜水艦を探知する技術会社であった。要するに半導体産業とは全く関係のない小さな会社であったのである。最初、AT&Tはこの基盤の弱い小さな会社にトランジスターの特許の使用許可を与える事をためらうが、最終的には認める。まもなく、この決定が十分妥当であることが明らかになる。第2次世界大戦後にTIに加わったハガティ(Patrick E. Haggerty)は驚くほど有能で将来を見通せる技術経営者であり、彼の指導によってTI社は間もなく設計と製造の問題、新デバイスの使い方などで非常に創意工夫に富んだ機関のひとつとなる。今日ではTIは投資のみで競争し合うDRAMメモリ製品からも脱却し、通信分野の半導体デバイスに投資を集中し、常に独自技術で半導体業界の上位に位置するに至っている。戦後から今日まで、ハガ

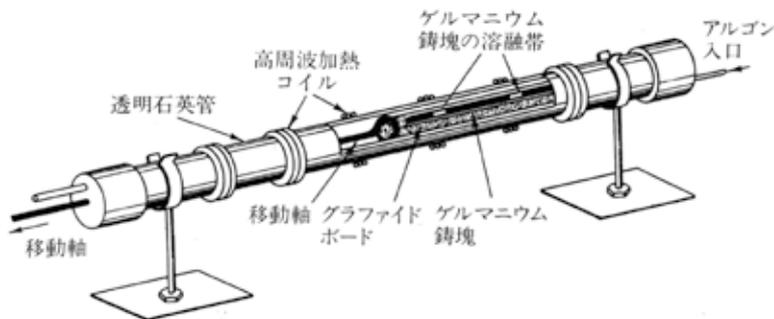


図1 ファンが発明した帯溶融法『エレクトロニクスと情報革命を担うシリコンの物語』¹⁾より



ティール
(Gordon K. Teal)

ティの思想が生きつづけていると考えられる。

このTI社は1950年代初めに半導体としてシリコンを使うべきだと決める。この時までシリコンは多結晶の形で使用されていた。多結晶ではトランジスタのベース領域を少数キャリアが通るとき、結晶粒界や格子欠陥がトラップとして働き、高い性能が望めないという欠点がある。この問題を克服するためにTI社は、

ベル研究所で研究仲間のリトル (J. B. Little) と結晶成長を研究していたティール (Gordon K. Teal) のシリコン単結晶を育成する研究開発計画に多額の支援を行なう。いくつかのテストをした後、TI社のチームは、第一次世界大戦の終わりにチョクラスキー (J. Czochralski) により開発された、いわゆるチョクラスキー法 (回転引き上げ法) を使う事に決める。この方法はティールとリトルがベル研究所時代に実験的に成功したものである。この方法は図2に示すように温度勾配のある回転棒を用い、その端に所望の結晶方位を持つ種結晶を付ける。この種結晶を結晶させる物質の融液、この場合は溶けたシリコンに接触させ、回転させながらゆっくりと引き上げる。るつぼの適切な選択などの装置上の問題点が解決されると、非常に有用な方法

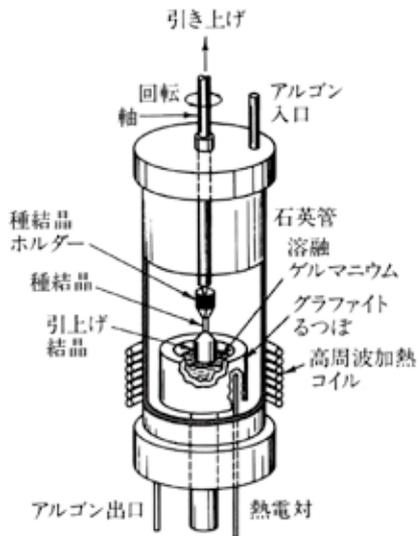


図2 ティールが開発したチョクラスキー法 (回転引き上げ法) 『エレクトロニクスと情報革命を担うシリコンの物語』¹⁾ より

であることが証明されたのである。この結果、高純度に精製されたシリコン単結晶の生産が可能となる。種結晶は帯溶融法で精製し、この種結晶を元にしてチョクラスキー法、いわゆる回転引き上げ法でそれなりの口径の結晶棒を引き上げるのである。この方法は現在幅広く使われており、現在主流になったシリコンでは2000年初頭からは量産技術としては300mm φが立ち上がり、技術的には450mm φが可能なまで育成されて来ている。1954年にTI社はシリコン・トランジスタを使い、電池を電源にした軽量の周波数変調 (FM) ラジオを IDEM 社とともに開発し、リージェンシー社から発売している。このラジオの価格を余にも低く設定したため、採算が取れず、TI社はラジオ用のトランジスタの生産を10万個ほどで中止している。

トランジスタの名を有名にした 日本のトランジスタラジオ

1946年に通信機器の開発・製造する目的で東京通信工業 (通称 東通工、現・ソニー) が発足する。創業者は井深大と盛田昭夫である。この会社がトランジスタを開発し、電池駆動の携帯ラジオ、トランジスタラジオを世に送り出すことでトランジスタの名は世界の隅々まで行き渡ることになる。発明者の1人のブラッティンは後年、アフリカの砂漠を旅行している時、らくだの背のトランジスタラジオから流れてくるメロディーを聞いて、自分たちが発明したトランジスタがここまで入り込んできたと感じにひたっている。また、1990年に来日したもう1人の発明者のバーディンはソニーを訪れ創業者の井深に多くの反対を押し切ってトランジスタラジオの商品化に立ち向かった勇氣ある挑戦と開拓精神に対して、心からの賛辞を送っている。

井深は1908年に愛知県に生まれ、12歳で神戸の元町駅周辺に引っ越し、果敢な少年時代を7年間、神戸で過ごす。比較的裕福な環境で育ち少年時代はアマチュア無線に没頭している。アマチュア無線マニアであり、ラジオ少年だったのである。国内でラジオ放送が始まったのは1925年からであるが、放送開始するに当



井深大

たり、1919年頃から公開実験を始めている。公開実験は少年たちの好奇心を刺激し、世に言う「ラジオ少年」を誕生させる。鉱石ラジオを自作して、誰よりも早く実験放送を聞くことに夢中になったのである。マニアたちは高価な部品を買ったり、自作して受信機を作るため、ラジオ少年には比較的裕福な家庭に育った少年や

学生が多かったようである。この様な環境で育った井深は無線機器とその部品に馴染むとともに無線マニアの友人を多く持つことができた。1925年に関西、関東の東西の無線マニアが集まり「日本素人無線連盟」を結成するが、この通信仲間の中心メンバーも1950年頃までには東通工に何人か入社している。無線傍受は国内にとどまらず、外国間と通信をやり合うようになり、国際感覚も鋭い人が多かった。手製の通信機器の性能を上げながら、常に国内外の新たな情報を傍受し競い合う。この様な通信マニア仲間が集まったのが東通工なのである。

一方、もう1人の創業者である盛田は愛知県の340年続く造り酒屋の跡取りとして生まれ、少年時代は父親から会社経営の帝王学を学び育つ。父親が外国の進んだ科学技術や舶来品に強い興味を持っていたことから、早くから外国製の車、洗濯機や冷蔵庫など、洋風の生活様式の中で育つ。クラシック音楽好きの母親の影響で小さい頃から高級電気蓄音機で音楽を聴く環境でもあったことも影響し、新聞や雑誌に掲載された自作の記事をみて、自分で電気蓄音機やラジオを作る、いわゆるラジオ少年だった。ラジオ少年たちが愛読していた専門雑誌「無線と実験」を読んで磁気録音機の存在を知り、自作しようと挑戦し失敗する経験もしている。後に東通工でトランジスター開発の総指揮を取る事になる岩間和夫は盛田の大阪大学理工学部時代の後輩で、盛田とは下宿先で兄弟同様に暮らしていた仲間である。東通工はこれらのメカ好きの「同好の士」が集まり、彼らが、その後、トランジスターラジオの開発に成功し、社名をソニーに変更してからも牽引してゆくことになる。新しい技術を発明するという事に主眼を置くことはないが、常に世界に目をむけ、新しい技術をいち早く取り込み、創意と工夫によって大衆向けのヒット商品を他社に先駆けて育て上げている。テープレコーダ、トランジスターラジオ、トリニトロンカラーTV、CCDカメラ一体型8ミリビデオ、ウォークマン、プレーステーションゲーム機…などなど、数え上げたら切りが無いほどの製品を世の中に送り出している。そして、その都度会社は大きく成長してきている。これらを可能にしている社風は、常に好奇心を持ち、世界に目を向け、手製の受信機を工夫しながら新たな挑戦を繰り返した「ラジオ少年」の気風から来ているものと考えられる。

井深は1952年にアメリカに視察に出かける。それまで開発したテープレコーダのアメリカでの需要と今後の動向を探ることで目的であったが、



岩間和夫

そこでベル研究所が発明したトランジスターを親会社のウェスタン・エレクトリック社(WE社)が2万5000ドル(約900万円)で公開する情報を知る。井深はベル研究所が1948年に点接触型トランジスターを発表した時からトランジスターに強く興味を持ち、1951年にショックレーが、pn接合型トランジスターが発表されると、昔使った鉱石検波器の不安定性の経験から点接触型では将来性はないが、このデバイスは工業的に物になると見込んでいた。井深は商社の日商に勤務している山田志道にWEとの交渉を委託し帰国する。山田は東通工の尖兵の役割として米国ソニーの礎石を築いてゆく人物である。山田はWE社に、当時小企業であった東通工を将来性のある企業として売り出し、それが認められ特許契約できる状態まで持ち込む。帰国した井深は盛田らに相談し、トランジスターの開発とそれをラジオに応用し電池駆動の携帯ラジオを開発することを説得してゆく。トランジスター開発で最も抵抗にあったのは日本の通産省である。当時、外貨持ち出しには通産省の許可が必要であり、大企業にはトランジスター開発を認めていたが、発足して7年程度の海千山千の小企業には「ちょっとやそつとのことで、トランジスターなんかできないよ。そんなものに貴重な外貨をつかうわけには行かない。」と否定的であった。井深は外貨の割り当てを貰うために駆け回るが、通産省に全く相手にされず、通産省の許可を受ける前に1953年8月に盛田がアメリカに渡りWE社とライセンス仮契約をおこなう。この時、WE社から得たトランジスターに関する資料は『Transistor Technology』と題した2冊の英文資料のみである。仮契約がすむと岩間は井深、盛田と相談し、半導体開発プロジェクトを結成し、プロジェクトメンバーに5人を選出する。岩田、塚本(理学)、天谷(化学)、茜部(機械)、安田(電気)の5人である。半導体物理の基礎知識(とは言っても当時では鉱石検波器程度の知識)を持ち合わせているのは理学部物理学科を卒業した岩田、塚本で、この2人が中心的メンバーとなり、他の3人はトランジスター製造で必要になってくる化学、機械、電気の専門家である。5人は『Transistor Technology』と前記ショックレーの『Electrons and Holes in Semiconductors』を輪講形式で勉強を開始して行く。この5人が製造装置も何もない状態から1年半後にはpn接合トランジスターを独自技術で作り上げ、トランジスターラジオを世界に先駆けて製品として完成させる。井深が通産省にライセンスの仮契約が取れたことを報告すると、通産省は「事前に許可も受けずに契約するとは何ごとか」とヘソを曲げてしまう。1954年1月になって通産省の担当課長が異動したこともあり、漸く2月に許可を得る。井深は1月に、後のソニーの社長になる岩間にWE社へ行って情報を集めて来るように指示を出す。直ちに、岩間はWE社の研究所に行くが、新たな資料提供はなく、写真撮影、説明の記録も許

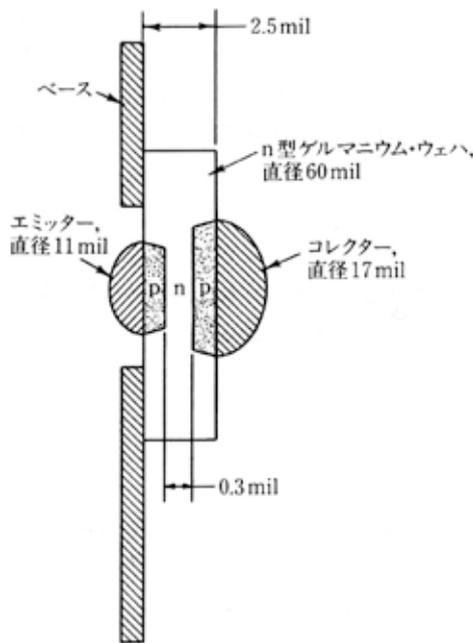


図3 合金型トランジスタ『エレクトロニクスと情報革命を担うシリコンの物語』¹⁾より

してもらえず、研究所を視察しながら聞いたこと見たことを頭に叩き込み、ホテルに戻り夜明けまでかけて詳細なレポートに仕上げ、翌日、東京の井深宛てにエアメールで送ることを毎日続ける。このレポートはのちに「岩間レポート」と呼ばれる256枚にも達し、東通工が半導体ビジネスを切り開くための貴重な文献となる。のちに日本の大企業が米国の半導体会社と技術移管契約を結び、研修期間を十分に与えられて技術を習得してくるようになるが、岩間の場合は単なる特許使用契約下では仕方の無い待遇であったとも考えられる。岩間はこの出張の間に見学勉強とレポート作成に力を尽くすと共に、国内チームから要請された製造装置の重要機材やラジオ試作用の部品集めにも奔走する。国内チームも頑張り、模索しながら接合トランジスタの試作を行い、岩間が3ヶ月の出張を終え、4月に帰国すると、試作品を持って出迎えている。同月にはバラックのラジオが鳴り、7月にラジオの試作機第一号モックアップ機を完成させている。この試作品について井深は「とても商品として使えるものではない」と回顧している。この試作品では高周波回路部分には点接触型トランジスタ、低周波用にはGe(ゲルマニウム)pnp接合トランジスタの混用で、受信感度は5mV/m程度の性能である。pnp接合型トランジスタの製法には合金型トランジスタ(図3)と成長型トランジスタの2つの方法があった。後年、メサ型トランジスタが出てきてそれに切り替わってゆくがこの時

点では前者の2つである。合金型トランジスタの製法は、例えばpnp型トランジスタを作る場合、n型Geの表面に第3族元素のインジウム(In)の小さな粒をのせ、200℃に熱するとGeの中にInが溶け込み、溶け込んだ所がp型になる。このやり方を使って薄いGe片の両側にInの粒を付けて熱すると、pnpの3層半導体ができる。この方法では中央に残るn型の層がベース幅となるが、このベース幅の縮小に限界があり、性能が上がらなかったのである。もう一方の成長型トランジスタはGeの結晶を作る時点で、まず5族のアンチモン(Sb)を少量混ぜてn型結晶を引き上げ、結晶がある程度育った所で、下のまだ溶けている部分に3族元素のガリウム(Ga)を入れp型結晶にする。そうして再び溶けている部分にSbを放り込むと、この部分はn型となり結果的に1本の成長したGeの結晶はnpnの3つの層となる。この方法はエミッタからベースへの不純物拡散の制御が可能になればベース幅の縮小もでき、結晶引き上げでnpnの接合ができるために、同時に多量の均一性の良いペレットを得ることができ(結晶直径32mmで約1600本のペレットができた)、ペレット上で1個1個作る合金型に比べて量産性に優れている。しかしながら、この時点ではWE社でも成長型の制御技術を確認しておらず、第1号の試作機には合金型のトランジスタを用いたことで性能が上がらず、高周波回路部分に適用できなかったのである。

そうこうしているうちに、悪い情報が入ってくる。前項で述べたアメリカのリージェンシーがTI社のトランジスタを4個使った本格的なスーパー・ヘテロダイン方式のラジオ「TR-1」を、クリスマス商戦に合わせてアメリカで発売すると発表したのである(\$49.95、これは2003年換算で\$334)。このニュースを耳にした井深は、ひどく落胆する。先陣争いにタッチの差で負けてしまい「世界初のトランジスタ」の座を逃してしまったのである。井深は「通産省が、もう少し早く外貨割り当て許可を出してくれていたらなあ」と気を落とす。しかしながら、リージェンシーが「TR-1」を発表したあと、トランジスタを供給していたTI社が、採算が合わず、先に述べたように出荷を中止する。そのため、リージェンシーは生産を続けられなくなる。このため、「世界初」には負けたが、トランジスタラジオを商業的に成り立たせ、世界に広めると言う点において東通工が最終的には勝利を収めたと考えられる。最初から、トランジスタだけではなく、携帯ラジオの最終製品まで一貫して計画した東通工に分があったのである。TI社がトランジスタを作ることを目的にしたので対し、東通工の目的は便利な携帯ラジオを大衆に提供する所にあったことが勝因と言える。

岩間チームはトランジスタの形成方法を合金型から成長型に切り替え、成長型を立ち上げることに挑戦する。WE



塚本哲男

社でもないものへ、新たな挑戦を始めたのである。チームの一員の塚本哲男は成長型トランジスタを実験し、その限界と原因を突き止める。この方法ではエミッタ中のアンチモン (Sb) が、結晶引き上げ中にベース側に向かって拡散し、ベース抵抗を上げていることを突き止める。塚本は、この対策にエミッタのドーピング元素を Sb からリン (P) に切り替えることを考え実行する。当時文献では P の拡散係数の値は Sb の値よりは小さいが、拡散効果は Sb とあまり変わらなく、やっても無駄だという反論がでていた。塚本は、とにかく実験をしてからデータで答えをだそうと考える。しかし、実際始めてみると、P は Ge に対する偏析係数が大きく、ドーブ量は微量となり、計量は困難でドーパントとしては好ましいものではないことが判る。塚本はそこで諦める事はせずに、如何にしてエミッタに P をドーピングするかを工夫してゆく。そして、エミッタ不純物として、スズリン合金 (SnP) を作って実験を行い、エミッタ側からの P の拡散のベース幅に及ぼす影響を見ることにする。その結果、すべての結晶でエミッタに Sb を用いた時より予想以上にベース幅が広く、とても高周波用には使えないものであった。しかし、このことは、P の拡散係数が、文献値に比べて1桁近く小さいことを実証したのである。つぎにドーピングプログラムを修正して、ベース幅制御を行なった所、遮断周波数が1桁以上向上し、ベース抵抗も大幅に低下する結果を得る。高周波用に理想的な結晶が得られたのである。

塚本はこの結果を岩間に知らせると、岩間は大変喜び、至急生産を開始することになる。しかし、このデバイスが組み立てラインに流れ、金線によるベースボンディング後に全数不良になることが判明し、ラインは完全に停止して大混乱となったのである。塚本は井深にも呼ばれ、周囲のものからは会社を潰すのかと言われる。塚本は、ここで再度不良原因を考え対応策を施す。原因はエミッタの高濃度 n 型の pn 接合にあった。組み立て前の結晶状態ではエミッタを高濃度 P にすればするほど特性が良かったため、生産前に多量の P をドーブしたのである。この接合特性の解明が急務となり、当時 pn 接合の研究をしていた江崎玲於奈が動員され、多量ドーブの限界を決める pn 接合の実験に加わる。この一連の実験過程で江崎の下で大学生の実習に来ていた鈴木隆が、偶然に常温で pn 接合の順方向に負性特性をしめすことを発見する。江崎は長く求めていたトンネル現象を見て、早速理論づけをして発表し、世界的なエサキダイオー

ドの発見となる。江崎は後年この研究成果でノーベル物理学賞を受賞する。

一方、塚本は不良原因がエミッタ接合の高濃度化によるトンネル現象によるものであることが判り、P のドーピング方法を SnP 合金からインジウムリン (InP) に変えることで対策を図っている。In は p 型であるが、原子量が大きく、偏析係数が小さく、計量するときは有利に働き、ドーブ後再結晶の際には、In の p 型は消滅し、n 型の P のみが有利に働く。これによって1955年2月に npn 接合型トランジスタの製法として成長型の方法を確立したことでトランジスタが完成し、生産を再開することができた。

トランジスタ5石 (トランジスタを5個) を使った TR-52 を市販しようと試作する。しかしこの国際連合ビルを連想させる TR-52 のキャビネット格子 (プラスチック) が夏季の気温上昇により、出荷寸前になって反り返るトラブルが発生したため発売中止となってしまった。その後8月に改めて TR-55 を開発し、その月に市販開始。これが日本初のトランジスタ携帯ラジオとなる。

井深はラジオが小型化し、ポータブル化すれば爆発的に商品化が可能になると見通し、トランジスタ技術は必ず進歩できると信じ、生まれたばかりの新技术であるトランジスタ技術に社運をかけ、成功したのである。会社が誕生して僅か7年目の小会社が大会社に先駆けて開発に成功し、しかも独自の製造手法を確立したのである。井深がトランジスタ技術の公開を耳にしてから3年、WE社と仮契約してから2年間、通産省の許可がおりて、正式契約してから1年半で最終形のラジオ製品を完成させている。技術提携をしている訳でもない事から、大した情報もない、且つ製造設備もない環境を考えると驚異的なスピードで仕上げたことになる。開発費に当時の金額で1億円以上を費やしている。井深は資金集めに奔走し、銀行には「テープレコーダが売れていますので」と言いトランジスタのことは何も言わず、社内では資金がないそぶりを見せず、辛抱強くトランジスタが完成するのを待ったのである。常識的な考え方の経営者から見れば無謀としか言いようの無い挑戦である。当時の東通工が大会社に打ち勝つ方法は、他社が未だやっていないが、やった場合必ず爆発的な需要が望めると言う感性と先見性を持ち、新技术に可換にチャレンジし、タイムリーに製品化することであった。事実、発売した1955年の翌年夏頃からヤング層を中心にトランジスタラジオは爆発的に売れ始める。東通工のこの年のトランジスタ生産高は月産30万個であったが、翌年の1957年には倍以上の80万個に達している。1959年には本場のWE社製よりも品質の良いものを作り出すほどになっている。東通工は1958年にトランジスタラジオの成功を機として世界の企業を目指して、社名をソニーと変更している。ソニーはトランジスタラジオの売り出し前は殆ど無名の

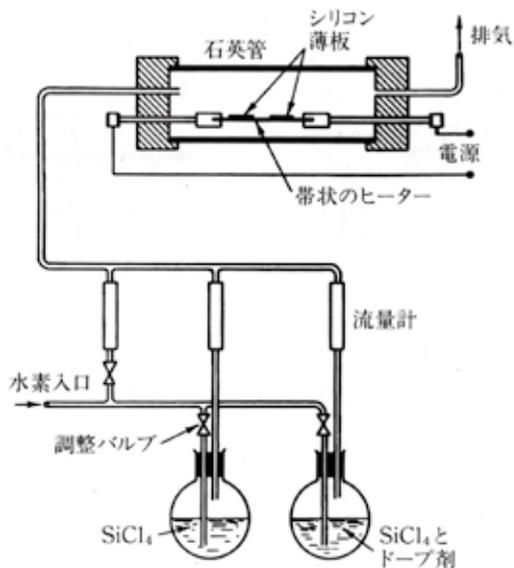


図4 当時のエピタキシャル成長装置『エレクトロニクスと情報革命を担うシリコンの物語』¹⁾より

会社であったが、これで一躍有名企業となる。その後も、数々の将来技術の挑戦と成功を繰り返し今日の大企業の位置を築いてゆく。新技術に挑戦し、他社が追従して来るまでの先行期間に莫大な利益を得て成長を繰り返して来ている。日本の企業の中では新技術に対し最も挑戦的な会社であり、学生たちの就職先としても最も人気の高い会社である。

日本の他の企業もトランジスターに興味を持っていた。日立製作所、東芝、日本電気である、井深が、WEが特許公開を知った年の1952年に、日立、東芝はRCAとトランジスターの技術契約を、1954年にWE社と特許実施契約を結んでいる。日本電気は1958年、RCAとトランジスターの特許実施契約を、同年ゼネラル・エレクトリック社（GE）と半導体製品の技術援助契約を行なっている。日立、東芝、日電がトランジスターの専用工場を建設したのは、同じ1958年である。三菱電機、沖電気、三洋電機が生産を開始したのは、その一年後の1959年であり、この年、日本は8650万個のトランジスターを生産し、世界最大の生産国となっている。

1957年になると井深は、次の目標を設定する。それはトランジスターテレビである。その為の新技術はシリコン（Si）・トランジスターである。テレビにはセット内にブラ

ウン管があり、周囲温度が高温になるので、温度依存性の大きいGeでは性能が出せないのである。温度依存性が比較的小さく、広い温度範囲で使用できるシリコン・トランジスターが必要となったのである。

ここで、塚本らは独自に気相化学反応を用いた気相エピタキシャル技術を開発する。この技術を1960年には完成させている。こエピタキシャル成長とは、単結晶シリコン基板の表面に、それと同じ結晶軸をもった単結晶膜を成長させるものである。これによって、シリコン基板は主として強度をもたらすための役割とし、トランジスター作用する活性領域は、エピタキシャル薄膜結晶が使える、シリコン・トランジスターの特性は飛躍的に向上する。それによって1962年4月にトランジスタマイクロテレビ「TV51303型」が発売される。塚田らはこの技術が完成した翌年の1959年2月にベル研究所を訪問したが、ここで自分達が開発したエピタキシャル薄膜結晶の欠陥レベルがベル研究所のものより1桁も少なく、ベル研究所のものより、はるかに優れていることが判る。この事実にはベル研究所の研究員にも驚かれる。この特性は、ベル研究所が次の目標とするレベルであったのである。

(敬称を省略させて戴きます)

参考文献

- 1) 堂田昌男・北田正弘 訳 フレデリック サイツ・ノーマン アインシュバラッハ 著『エレクトロニクスと情報革命を担うシリコンの物語』
- 2) 川村肇 訳 ウィリアム ショックレー 著『ショックレイ半導体物理学 (上) [Electrons and Holes in Semiconductors]』
- 3) 谷光太郎 著『半導体産業の奇跡』
- 4) 谷光太郎 著『半導体産業の系譜』
- 5) 鹿井信雄 著「ラジオ目的志向に絞って成功したソニーのトランジスター (1)」半導体シニア協会ニューズレター Encore48 (2006年6月)
- 6) 潮路忠彦『ソニー・スプリット』
- 7) 西澤潤一 大内 淳義 共編『日本の半導体開発 劇的發展を支えたパイオニア25人の証言』

次回

第8回 半導体の歴史
—その7 20世紀後半
集積回路への発展(2)—