

講座

歴史絵巻

半導体

固体増幅器に挑戦、 ショックレーが西海岸へ

20世紀エレクトロニクスの歩み(11)

相良 岩男

KOA 顧問

半導体シリーズの4回目。トランジスタを発明したW.ショックレーはベル電話研究所を辞め、新会社を設立するために米国西海岸に旅立つ。彼が設立した会社には新進気鋭の技術者が集まった。R.ノイスやG.ムーアもいた。ショックレーは有能な技術者ではあったが、経営者としては失敗を重ねる。ついに会社は分裂し、技術者たちが次々と去り、それぞれ新会社を設立する。こうして「シリコンバレー」が形成されていく。日本で最初にトランジスタに飛びついたのはソニーだった。(本誌)

20世紀のエレクトロニクス発展史を振り返ると大きく二つの時代に分けて考えることができる。1900年～1950年は真空管の時代であり、開発

の中心となった場所は米国の東海岸である。若き頭脳がこの地に集まり新しい技術を育てた。

次が1950年以降である。半導体の

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。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月から現職。

ラジオの歴史は1996年4月8日号(no.659)に、テレビは1996年4月22日号(no.660)と1996年5月20日号(no.662)に、電話は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)、2回目は1997年7月14日号(no.694)、3回目は1997年7月28日号(no.695)に掲載した。

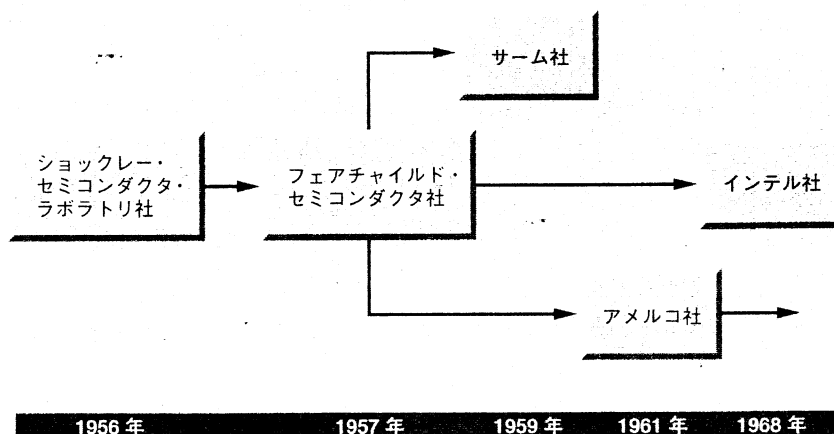


図1 シリコンバレーでは半導体メーカーが続々と誕生していった W.ショックレーは、ベル電話研究所を辞め、カリフォルニアに行く。そして会社を設立した。ショックレーは経営者としては成功せず、会社が分裂する。ただしそこには優秀な人材が集まっていた。出ていった技術者が新会社を設立し、さらに分裂し…。これが繰り返されて、半導体ベンチャー育成の地「シリコンバレー」が形成されていくのである。

時代であり、東海岸で生まれたトランジスタが米国西海岸で花開く。西海岸は農場や果樹園だったが、その後、若い頭脳は半導体の魅力に引かれるように西海岸へ新天地を求めたのである。ベンチャー企業が育つ環境ができ、シリコンバレーが形成されていく。

ショックレーが新会社を設立

W.ショックレーは、将来有望とみたトランジスタ・ビジネスを自ら事業化することを計画した。

1954年、ベル電話研究所を退職し、しばらく米レイセオン社の相談役をしたのち、自分の生まれ故郷であるカリフォルニア州のマウンテンビュー

ーに移り、米ベックマン・インストルメント社のバックアップによって、1956年4月にショックレー・セミコンダクタ・ラボラトリ社を創立している(図1)。

この会社には、才能のある新進気鋭の技術者18人が集まった。ほとんどが20歳代と若かった。このなかには、のちのち半導体産業を育てるE.クライナー、J.ホーリニー、ゴードン(G)・ムーア、ロバート(R)・ノイスがいた。

まずW.ショックレーは、温度特性の良くないGeトランジスタに代えて、Siトランジスタを開発することにした。半導体をp型やn型にする技術に、合金法ではなく2重拡散法を採用した。ただし当時、Siに関する技術はまだ確立されておらず、開発は思うようにいかない。

そこでW.ショックレーは開発の方向を大きく転換し、Siトランジス

タをあきらめて、まずSiのpnpnサイリスタを開発して量産化しようと計画した。電子交換機にはSiトランジスタよりもpnpnサイリスタのほうが適していると考えたからだ。

だがまもなく学者肌のW.ショックレーと若き技術者たちとの間で、開発方針や経営方針で摩擦が起り始めた。特にトランジスタからサイリスタへの転換が大きな溝を作ったようだ。W.ショックレーはあくまでも電子交換機用の固体リレーを夢みていたのである。

だが電話交換機を製造していた米ウエスタン・エレクトリック社は、彼の開発目標とした電子交換機向けには、サイリスタではなく、高性能トランジスタを採用することに決めたのである^{註1)}。開発の方向が異なってしまったのだ。加えて、W.ショックレーは生産にあまり関心を示さず、研究に没頭したため、会社の経

注1) マービン(M)・ケリーやW.ショックレーが夢見たSiトランジスタを使う全固体電話交換機(NO1 ESS)は1965年に実現されている。期待通りの性能が得られたようだ。

ラジオ受信機は、RCA社からソニーへ

東京通信工業(略して東通工、現ソニー)はトランジスタの開発を始めて1年5カ月後の1955年1月、ついにトランジスタ・ラジオ(TR-52)を製品化した。ここで使ったトランジスタはGeである。製品化したのは世界で2番目である。

そのころのラジオ受信機産業はどのような状況だったのだろうか。

世界的に最も有名だったのは米RCA社である。同社は、米国政府のあと押しで、ラジオ受信機の特許対策のために1920年に設立され

た。その後、真空管を開発し、これを使ったラジオ受信機を製造して、押しも押されもしない世界のラジオ受信機メーカへと成長していった。このころの同社は、市場でも技術でも世界のエレクトロニクス業界をリードしていたといえよう。

一方、東通工は1946年、真空管電圧計を作るために、技術者が集まって設立した小さな小さな会社だった。この小さな会社が独自にGeトランジスタを開発し、トラン

ジスタ・ラジオ受信機を製品化してラジオ受信機市場に参入してきたのである。

やがてRCA社をはじめとする米国のラジオ・メーカは、東通工など日本のラジオ・メーカに生産を委託し始め、日本製のラジオ受信機が世界を席卷する。

のちにRCA社は買収され、その名をブランドに残すのみとなったが、東通工は世界に羽ばたくことになる。時代とともに、企業の栄枯盛衰をみると感慨深いものがある。

営は破綻寸前だった。

ちなみに、Siトランジスタは、ラジオ受信機に採用され始めたころから大きく花を咲かせることになる(左掲の「ラジオ受信機は、RCA社からソニーへ」参照)。

フェアチャイルド社の誕生

ショックレー・セミコンダクタ・ラボラトリ社が設立されて2年も経たない1957年、会社の方針に不満をもったR.ノイス、G.ムーア、J.ホーリニー、E.クライナーなど8人が同社を退社し、フェアチャイルド・セミコンダクタ (Fairchild Semiconductor) 社を創立した。米フェアチャイルド・カメラ&インスツルメント社 (オーナーはシャーマン・フェアチャイルド) が出資している。

G.ムーアとR.ノイスは最後まで、W.ショックレーと一緒に仕事をしようとしていたという。だが、その努力もむなしい結果となった。のちのちW.ショックレーは、この8人を「裏切りの8人 (traitorous eight)」と呼んでいる。

裏切りの8人が飛び出したあと、W.ショックレーは、社名を「ショックレー・トランジスタ・ラボラトリ社」と変更し再起をねらったが、ついに1957年末に挫折し、米クレバイト社に買収され、やがてITT社に転売されるのである。その後、W.ショックレーは米スタンフォード大学の教授となっている。

一方、新しく誕生したフェアチャイルド社の最初の仕事は、指導者を選ぶことだった。新会社は技術者のみの集団で、ビジネスや生産に関しまったくの素人ばかりである。結

局、紆余曲折はあったが、社長には米ヒューズ・セミコンダクタ社の技術部長がスカウトされた。これに対し開発目標のほうは、すんなりとSiトランジスタに決まった。

そのころの米国は、1950年に朝鮮戦争が勃発したことなどから、旧ソ

連と、きわめて険悪な状態だった。朝鮮戦争は3年後の1953年7月に停戦となったものの、1956年にはハンガリーで反ソ動乱が起こるなど続々と紛争が勃発した。冷戦はますます緊張感が高まり、米国も旧ソ連も軍備拡張へと走り始める。

Siトランジスタの開発 困難をきわめた実用化への道

1955年ころ、米国におけるトランジスタ開発の大きな目標は高周波化と大電力化だった。

高周波化に対してはSiよりもキャリヤの移動度が高いGeが適している、しかも高純度化、単結晶化が容易だ、ということでメーカは競ってGeトランジスタの開発を進めている。だがGeトランジスタは周囲温度や動作温度が上がると、熱暴走を起こし動作を停止するため、大電力化には適さない。

このため、米軍は無線機用に温度特性の良いSiトランジスタの開発をメーカに強く要望している。

しかし、トランジスタに使えるような高純度の単結晶Siを作ることは至難の業だった。なぜなら、Geの融点は+937℃なのに対し、Siの融点は+1420℃と高く、これがネックとなっていたからだ。当時、米国はレーダ検波器用Siトランジスタを開発中だったが、それに使うSi単結晶の純度は99.5%程度だった。この程度の高純度化技術は保有していた。

Si単結晶へのチャレンジ

Geを高純度化する方法には、W.ブファンの1953年に開発したゾーン

精製 (リファイニング) 法という物理精製法があった。この方法でテン・ナイン (99.9999999%) に高純度化したのち、ゾーン・レベリング法によって特定の不純物を含む単結晶を得ていた。Geでは高純度の単結晶が得られていたわけだ。

Siはどうするか。Siは融点が高いため化学的に活性で、グラファイトと化合してしまう。ゾーン精製法もゾーン・レベリング法もこのままでは使えない。

まず最初に考え出されたのがW.ブファンのゾーン精製法を改良した方法である。グラファイトを使わないようにしたフローティング・ゾーン (FZ: 溶融帯精製) 法がそれで、ともかく高純度の多結晶Siが得られるようになった。これは「物理精製法」ということになる。

やがて、米デュポン社の選鉱精錬研究所はSiCl₄からZn (亜鉛) 還元法によって高純度の多結晶Siを得る新しい方法を1948年に開発した。だが石英が混在してしまい、高純度といえるほどの多結晶Siは得られていない。

米ベネシー社、米TI (Texas Instruments) 社など多くのメーカも挑戦

している。このなかで独Siemens社がSiHCl₄の還元法によって多結晶Siの高純度化に成功したのだ。日本では信越化学（現在の信越半導体）がこの方法を実用化している。現在、高純度の多結晶Siはほとんどこの「化学精製法」で生産されている。

次に、単結晶化には、高純度化技術と同じくW.ブファンの考えを応

用したフローティング・ゾーン法（FZ法）をH.セウラが開発した。先端に単結晶の種を付けて結晶を引き上げる方法である。

こうして1955年ころには単結晶Siがようやく入手できるようになった。その後、FZ法は主として電力用半導体に用いられ、トランジスタやICにはCZ（チョクラスキー）法

が使われている。これは1917年にポーランドのチョクラスキーが開発した方法である。

Siの拡散法によりやがて光明が…

次に拡散法について紹介しよう。ときは1952年、ベル電話研究所のK.フラーは太陽電池^{※2)}を開発しようとしていた。不純物をガス化してSi中

半導体技術の発展にかかわったロケット技術とは

ロケットは、通信衛星や放送衛星を打ち上げるための重要な基幹技術である。ロケット技術によって半導体技術も大きく発展した。たとえば、衛星の内部は先端ICの塊であり、外側はSi太陽電池で覆われている。

ロケット技術は戦争中にドイツによって開発された。ドイツ軍がフランス海岸に構築した要塞に連合軍が挑んだのは1944年6月6日のことである。「ノルマンディー上陸作戦」、あるいは「史上最大の作戦」と呼ばれ、連合軍がドイツ軍に勝利する第一歩となった。

この作戦から6日後の6月12日、敗戦が濃くなってきたドイツ軍は、突然、新兵器である飛行爆弾V1号をフランスのカレーからロンドンに向けて10発発射している。

ロケット弾がロンドンを襲う

10発のうち4発がロンドンに達した。V1号のVはドイツ語で「Vergeltungsmaffe（報復）」の頭文字である。この驚くべき新兵器

はジェット推進の飛行爆弾で、高度1万mを速度1000km/時で飛行し、爆弾を20kgも運ぶ能力をもっていた。

ドイツ軍は、約3カ月間になんと8564発もロンドンに向けて発射した。ロンドン市民は恐慌状態に陥っている。

英国も手をこまねいていたわけではない。V1号を撃墜するためのレーダー開発に全力を注いだ。ついに9月6日、英国はV1号を探知できるレーダーを完成させ、その情報に基づいて飛行機でV1号を撃ち落とせるようになったと発表した。

ところが2日後の9月8日、レーダー網をくぐり抜け、ロケットV2号がロンドンに再び撃ち込まれた。

V2号は、ドイツ陸軍ロケット研究所のフォン・ブラウンによって開発された長距離ロケットである。ジェット推進のV1号とまったく異なり、ロケットによる推進だった。全長14m、直径1.6m、重量13トン、速度マッハ4、航続距離3000km、搭載爆弾1トンと、V1号の性能を

はるかにしのぐ威力をもっている。

超音速で飛ぶロケットV2号を飛行機で撃ち落とすことは不可能だった。V2号は英国に向けて約7カ月間に1359発も発射されている。きわめて優れた新兵器だったが、戦局を転換させることはできなかった。

結局、ドイツ軍は1945年5月7日に無条件降伏し、欧州における第二次世界大戦は終わりを告げたのである。

米国と旧ソ連に2分されたロケット

戦後、ドイツは米国と旧ソ連によって占領された。米国は、ノルトハウゼン・ロケット地下工場からV2号の部品100機分と、フォン・ブラウンなどの技術者をテキサスに連れてきた。旧ソ連はベネミュンデ・ロケット工場からV2号の資料と技術者を旧ソ連に移住させている。

その後、米国と旧ソ連は冷戦状態に入り、軍備拡張が進んだ。ロケット開発もしのぎを削ることに

に拡散させ、表面に薄いpn接合を作ろうと発想している。このアイデアは、実験中にn型Siを高温で処理したところ、偶然、表面が一面にわたってp型に変わること疑問をもったことから出てきている。不純物ガスを用いても同様な結果が得られるのではないかと思ったようだ。

これが合金接合法から拡散接合法

なる。

当時、ロケットの大きな開発目標は究極兵器である大陸間弾道弾ICBM (Intercontinental Ballistic Missile) だった。1952年に米国はまずレッドストーン、1953年には旧ソ連がICBMのT2という弾道ミサイルをそれぞれ開発した。4年後の1957年には米国もICBMのジュピタを完成させている。

だが旧ソ連と比較して米国のロケットは推力が不足しペイロードが小さいなど、開発は遅れ気味だった。そこで米国はトランジスタを核とするエレクトロニクスによって小型・軽量化し、弱点を克服するのである。つまりロケット開発の遅れが原動力となり、そこでエレクトロニクス技術が開発されていったのだ。

やがて人工衛星の開発競争となるが、まさか通信衛星や放送衛星が登場するとは、当時の開発者たちは想像していなかっただろう。21世紀には、衛星を使って世界中のどこからでも(携帯)電話できるようになる。このための衛星が1997年6月に打ち上がった。

へと発展していくきっかけとなった。やがてこの拡散接合法がトランジスタやICの開発に採用され、素晴らしい成果をもたらしていく。

実験には多くの予期せぬヒントが隠されているものだ。このヒントに気づくかどうかでその人の能力が決まるのだ。

その後、太陽電池はKフラー、D.チャピン、L.ピアソンの3人が共同で開発に成功している。

1954年にH.クレマーがドリフト・トランジスタのアイデアを発表してから拡散の研究が一段と活発化する。1956年、A.リーはGeに不純物を拡散して作るメサ型^{注3)}のトランジスタを開発している。しかし、拡散法によるSiトランジスタの実用化は1958年まで待たねばならなかった。

Geトランジスタに問題が発生

理想的だと思われていたGeのメサ型トランジスタを機器に使うと、意外に信頼性が良くないのだ。当時、トランジスタの動作原理は固体中のキャリアのみを利用していると考えていたため、信頼性については何の心配もしていなかった。

信頼性の問題とは、トランジスタの利得が低下することだった。原因を調べると、Geの合金型接合トランジスタに用いるGe結晶の表面にわずかに露出していたpn接合面に湿気やゴミなどが付着し、これが悪さをしていたのである。

酸化膜で被覆し不活性化して保護

注2) 太陽電池は正確には太陽光を電気に変換する素子だが、これをベル電話研究所が発表したとき、新聞記者が誤解して「太陽電池」と記事に書いたため、このように呼ばれるようになった。

すればよいとだれしもが考えたが、そうは問屋が卸さない。まだ良質な酸化膜を作る具体的な方法が開発されていなかったからである。

1954年、C.フロッシュとL.デリックは、Siを材料とし、拡散によってメサ型トランジスタを試作しようとしていた。当初、彼らは、Siは化学的に活性なため、高温酸素雰囲気中で処理すると酸素が拡散物質と化合してしまうと考え、そうならないように窒素や水素の雰囲気中で拡散を行っていた。

実験中、偶然に水素雰囲気中で処理したところ、素晴らしい酸化膜が形成できることを発見している。こうして、Si酸化膜(SiO₂膜)の形成に成功した。残念なことにこれ以上の発展はなかった。とはいえ、この情報は多くの技術者の知るところとなったのである。

軍需で潤ったフェアチャイルド社

設立3日目のできたてほやほやの新会社——フェアチャイルド社で、今後の経営方針について打ち合わせをしていた1957年10月4日、突然、旧ソ連が人類初の人工衛星「スプートニク1号」(直径58cm、重量83.6kg)を打ち上げたという驚くべきニュースが飛び込んできた。

人工衛星は、96分12秒で地球を1周する軌道を回り、米国を常に宇宙から監視できるらしいというのである。軍事面で絶対的優位にあると考えていた米国は、旧ソ連の技術力に大きな衝撃を受けた。急きょ米国の軍関係者は、推力の大きいロケット

注3) メサとはスペイン語で「台地」という意味。

技術の開発とミサイル用電子機器の小型化に力を注ぐことにした (pp. 162-163の「半導体技術の発展にかかわったロケット技術とは」参照)。

このなかで小型化の矛先が、フェアチャイルド社に向けられた。同社の周辺が急にあわただしくなった。ともかく軍用電子機器向けに、Siを材料としたメサ構造のnpnトランジスタを作ることになり、緊急に開発を進めることになった。

GeではなくSiを選んだのは、Siのほうが温度特性が良かったため、宇宙用に向いていると判断したからだ。だがSiに関する製造技術はまだ未解決の状態だった。

なぜメサ構造を選んだのだろうか。当時、トランジスタの最大の開発目標は高周波化だった。遮断周波数1GHz達成への挑戦が始まったころである。ここで問題となったのが、いかにベース幅を薄くするかだった。これを合金法で実現するのは困難であり、成長接合法では作りにくい。どうするのか。

そこへ画期的なアイデアが登場した。ベースとエミッタを作るのに2回の拡散工程を導入する方法、すなわち「2重拡散法」である。これによって合金法では実現できなかった薄いベース層を形成でき、高周波特性が一段と良くなった。欠点は、表面が露出することである。

メサ技術はもともとGeで開発されていたものだが、フェアチャイルド社はSiに適用したのである。なお、メサ構造は1956年にベル電話研究所のJ.モルやC.リーが開発した構造である。

2重拡散法によってSiのメサ型ト

ランジスタを製品化したのがG.ムーアである。そのころの電極はAg(銀)を蒸着して使っていたが、これをAl(アルミニウム)に代えたのがR.ノイスだ。こうしてSiのメサ型トランジスタの生産を軌道に乗せることができた。

開発に忙しい1958年暮れ、突然、フェアチャイルド社の社長が開発した最新のトランジスタの設計書と部下を引き連れて会社を飛び出し、別の会社を設立するという大事件が起こった。そして後任に、技術者だったR.ノイスに白羽の矢が立ち、彼が社長に就任したのである。

同社が製品化したメサ型トランジスタが米国で初めて使われたのは1958年1月に打ち上げた人工衛星「エクスプローラ1号」である。

さらにこのトランジスタは米IBM社製の軍用コンピュータに採用され、磁気コア・メモリの大電力駆動用として使われた。このほかミニットマン・ミサイル(1分間で発射できる大陸間弾道弾)などにも採用されている。ミサイル「タイタン」には1機当たり3000個のトランジスタが使われたという。軍用のため、価格はあまり問題にされなかったことが大きい。

バイポーラ・トランジスタ実用化へ 日本がたどった道

点接触トランジスタが発明された1947年12月、日本は戦後3回目の冬を迎えようとしていた。まだ戦後の混乱が続いていたが、廃虚から立ち上がり、復興に向けて突き進んでいた。

この年は、東條英樹の極東軍事裁

当時、軍用トランジスタには信頼性が強く求められていたが、Siのメサ型トランジスタはこの要求に十分こたえることができた。

軍需に支えられ、フェアチャイルド社は大きく飛躍していった。そのなかでJ.ホーリニーがプレーナ構造によるトランジスタを考え出した。「プレーナ型トランジスタ」と呼ぶ。画期的な技術として業界の注目を集めている。信頼性の高さに民間企業も注目し始め、GeトランジスタからSiトランジスタへと主役が交代し始めたのである。

一躍花形企業になったフェアチャイルド社には、優秀な人材が多数集まり、彼らの開発努力によってSiトランジスタはますます急成長する。

集まった人材のなかには、米AMD (Advanced Micro Devices) 社の会長となるジェリー・サンダースや、米ナショナル・セミコンダクタ (National Semiconductor) 社の会長となるチャーリー・スポークなど、のちのち有名となる人材がいた。フェアチャイルド社は研究者にとって理想的な環境を提供していた。自由に発想しながら新製品の創出に没頭することができたからだ。そして同社は半導体産業の頂点にいた。

判、水泳界の英雄となった古橋広之進の活躍、パチンコの出現、「異国の丘」が歌われ始めた年として知られている。だが食料事情や住宅事情がひどく、人々は生きることに精一杯で、多くの人は先端技術などに関

心をもつ余裕などなかったと言ってもよい。

困難な環境だったにもかかわらず、先端技術に興味をもつ一部の若者たちがいた。彼らは突如話題に上り始めた「点接触トランジスタ開発成功」という輪郭のはっきりしない情報に情熱を駆り立てられたのである。

この情報は不思議な魅力を秘めていたが、やがて日本のエレクトロニクス産業を発展させる原動力になろうとはだれも想像しなかったに違いない。

1950年代、日本でも半導体開発へ

このころの日本が、半導体にまったく無関心だったかというところでもなかった。

日本ではレーダ用半導体検波器や、交流-直流変換用の半導体整流器、テレビ用半導体撮像素子の研究が細々と進められていた。半導体整流器にはSe（セレン）や亜酸化銅が用いられていたが、その動作メカニズムはまったく解明されておらず、特性の善しあしは製造職人の腕一つにかかっていた。

たとえば、Se整流器の構造は、金属板の上にSeを塗布したのち熱処理して結晶化し、この上にCd（カドミニウム）電極を付けたものだった。Seは整流作用のほかに、内部光電変換効果があるため、これを利用したカメラ用露出計や撮像素子の商品化も考えられていた。

当時、最もアカデミックな研究を進めていた半導体撮像素子の開発グループはGHQ（連合国最高司令官総司令部）の命により、しばらくの

間、開発を中止させられている。

このころの半導体理論は、ダビッド理論が唯一の考え方である。この理論から、日本の技術者は、Se整流器の特性改善にはSeの純度をある程度高め、何か特別な物質を添加して塗布すれば、特性が改善されるだろうというくらいしか考えていなかった。

半導体材料はテン・ナイン以上に高純度化し、ここに特定の不純物を入れて単結晶化しなければ実用化できないという現実は、まったく認識していなかったのである。ただし信越化学が戦争末期の1945年ころ、レーダ用検波器に使う半導体材料として、純度95%のSiを開発していたことは注目に値する。

極秘の情報が日本に伝わる

さて、話をトランジスタに戻そう。米国から届いたばかりのテレックスによって「ベル電話研究所が半導体を用いた点接触トランジスタを発明したらしい」という情報を、GHQ民間通信局のF.ボーキングホーンから渡辺寧教授が極秘に聞いたのは1948年7月のことだった。渡辺は、東北大学と電気試験所の要職を兼務していた。

半導体についての情報がほとんどなかった日本の技術者たちは、驚くとともに戸惑っている。きわめて情報が少ないため半信半疑だった(p.167の「悲しいかな情報源は文献と手紙のみ」参照)。

実は、この年の8月、GHQの命によって、エレクトロニクス技術に関する日本の唯一の頭脳集団だった電気試験所は、電気通信研究所（現

NTT：日本電信電話）と電気試験所（現通産省）に分割させられた。開発の能率が良くないというのがおもな理由である。

電気通信研究所は通信省管轄の電話網を回復するための実用化研究をし、電気試験所は商工省管轄による基礎研究をするという分担が決められた。この範ちゅうに従えば、点接触トランジスタの研究は、電気試験所の担当となるが、電気通信研究所も応用開発ということで研究している。

1948年10月になると、正体不明の「トランジスタ」というものについて、暗中模索のなかで、電気通信研究所と、学会、企業の研究者による検討会が始まった。

ここには、静電トランジスタの発明など数々の業績に輝く西沢潤一（前東北大学総長、現在は岩手県立大学学長）をはじめ、その後の日本の半導体産業をリードする人たちが出席していたという。

同じようなことは米国でもあった。ベル電話研究所が1951年に企業人を対象としたセミナーを開催したときも、のちにICを発明することになるJ.キルビーやTI社のM.シェパードなど、その後の米国半導体産業のキー・パーソンとなる人たちが出席していた。

若き熱血漢が青春の頭脳を傾注

電気試験所では、早速、トランジスタを追試しようとした。なんとGeという半導体材料が日本にない。もし手に入れようと思ったら、東京・秋葉原のジャンク屋（本誌1996年4月8日号、no.659、p.184参照）で

米軍放出のレーダ用ダイオードを買う以外に方法はなかった。

電気試験所が初めて試作した素子は惨めな結果に終わったらしい。どのようにしてGeを入手したかは不明である。米国でトランジスタ開発に成功した材料はGeなので、どうしてもGeを入手したかったようだ。Siは融点が高く取り扱いが困難なため、Geが使われたらしいという情報が伝わってきていたこともあった。実は、Siなら日本にもあったのだが…。

1950年になると、米国への技術調査の際にようやく手に入れた点接触トランジスタを参考に本格的な開発が始まっている。この時代、Geは戦略物資に指定されており、日本で入手することは至難の業だった。

電気通信研究所の岩瀬新午は、米国からやっと輸入したGeを高純度化、単結晶化することに挑戦し、なんとか実現した。これを用いて1951年10月に日本で初めてGeの点接触トランジスタを完成させ、11月の物理学会で発表した。

当時、この学会に限らず、どの学会でもそうだったが、発表に対する質問は熱血漢たちによっておおいにエキサイトし、まるで互いに批判し合っているかのように見えたという。活気に溢れており、新たな飛躍の前夜にふさわしい状況だったといえよう。

日本の半導体を技術的に主導してきた3機関——つまり東北大学、電気通信研究所、電気試験所は、あまり仲が良くなかったように見えた。互いにしのぎを削っていたためだろう。だが、このような競争心が若き

頭脳集団の情熱を駆り立て、日本の半導体技術発展の基礎を築いたと言っても過言ではない。

これはラジオが放送を開始しようとしていた1910年ごろの技術開発の状況と酷似している。

技術を急速に進歩させるためには、いかに共通のテーマ作りが大事かということだ。そのテーマに向かって競争しながら開発を進めたとき、すごい力が生まれるのだ。この重要なテーマ探しは、単なる調査からでてくるものではなく、だれにでも探せるものではない。その後のVTR開発でも同じようなことが起きている。ビデオ・ディスクなど他の選択肢もあったが、日本メカはいずれもVTRに注力した。

何としてもGeを入手したい

トランジスタの開発には、どうも半導体材料が鍵を握っているようだ——ということで1952年、日本学術振興会のなかに半導体材料委員会が設立され物性についての検討を始めている。やがてもっと現実的に検討を進めるため、名称を「ゲルマニウム委員会」と改名している。

日本ではいったいどこにGeが存在するのだろうか。早速、調査が始まった。その結果、石炭を乾留して石炭ガスを作るとき、灰のなかにわずかな酸化ゲルマニウムが存在することが判明したのである。

一方、米国は、Geの資源調査を世界規模で進めていた。まったく調査の規模が違う。やがて、アフリカのコンゴでGe鉱が発見され、日本にも輸入され、Geを入手できるようになった。

初めてトランジスタを見た日

1953年3月になると電気通信研究所は、Geの高純度化と単結晶化に成功したあと、合金型接合トランジスタの開発にも挑戦し、試作に成功している。特性は、大変に不安定だったという。とはいえ、ようやく米国のレベルに追いついたのだ。

この成果は早速、同年6月、東京・日本橋のデパート三越で開催された第5回「伸びゆく電波展」(エレクトロニクスショーの前身)に展示された。ここでは合金型接合トランジスタや点接触トランジスタの試作品を使ったラジオ受信機や補聴器が日本で初めて一般の人の前に姿を現した。

日本のエレクトロニクス産業発展のうえで記念すべき画期的な展示会だったといえよう。あまりの人だかりに、ほとんどの人はトランジスタを見ることさえできなかったという。まるでパンダが中国から来たときのようなようだった。なんとか見たとしても、この小さな塊がどのような働きをするかを理解することはできなかった。この展示会が一つのきっかけとなって日本の半導体開発に一段と弾みがついたのである。

続いて1954年7月になると、電気試験所の菊池誠(のちにソニー)も苦心の末、Geの単結晶化とそれを使った合金型接合トランジスタの試作に成功している。トランジスタ試作成功のニュースは電気試験所のみならずメカにも流れた。

いち早く反応したのは川西機械製作所(のちに神戸工業)の有住徹弥たちで、直ちに研究を開始し点接触トランジスタを試作したという。こ

こにはノーベル賞を受賞した江崎玲於奈（のちにソニー、米IBM社、現在は筑波大学学長）がいた。

有住の試作成功に対して、会社は

冷静だったようだ。その後、同社は神戸工業（1964年に富士通が吸収合併）と社名変更し、ようやくトランジスタ開発に本格参入する方針を固

め、合金型接合トランジスタの開発にも挑戦することとなった。

やがて、このトランジスタを使ったラジオ受信機が、1954年1月に完

悲しいかな情報源は文献と手紙のみ

第二次世界大戦が終わって3年目の1948年になっても、占領軍は先端技術に関する雑誌や文献を日本人が海外から購入することを禁じていた。日本の再軍備を恐れていたからだと言われている。

このころ、日本各地の米軍司令所に隣接して民間情報教育局(CIE)による図書館が設立されていた。ちぐはぐなことに、ここには先端の技術雑誌が並んでいた。しかも日本人も自由に閲覧できるのである。知識欲おう盛な若者が見逃すはずがない。彼らにとって、ここが第一の情報源だった。

研究者たちが連日ここへ早朝から出かけて行ったが、目的の雑誌はすでに貸出中となっている場合が多かった。東京では初め、日比谷公園の近くにこの図書館があったが、その後は芝大門の近くに移転している。

特に人気があったのが、W.ショックレーの歴史に残る論文が掲載されていた*Physical Review*誌の83号(1951年)や*BSTJ* (*Bell System Technical Journal*) 誌の28号(1947年7月)である。このほか*RCA Review*誌も人気があった。

こういった雑誌には、Geの単結晶化、pn接合の形成、合金型接合

トランジスタの開発、トランジスタの逆耐圧特性などに関する実験報告など魅力的な論文が続々と掲載されていた。

もう一つの情報源は、米国に直接調査に行くことだ。1955年ころになると、各社は競って米国の半導体メーカーと技術提携し始めている。ただし、戦後の日本では米国に調査に行くことはきわめて困難で、よほどの理由がない限り許可が下りなかった。このため、ごくわずかな渡米者からの貴重な情報が頼りだった。

いまでこそ海外旅行に行くことは日常茶飯事だが、当時は大変なことだ。しかも見たことも聞いたこともない事柄に対し、根ほり葉ほり見学先の工場技術者からノウハウを聞いたり、微に入り細に入り設備の動きや動作条件を聞き出すだけではなく、装置をスケッチするなど情報収集をしなければならなかったのである。

何しろそのころの米国人はおおらかだった。日本人がいくら調べても、米国に追いつけるはずがないと思っていたようだ。

渡米した技術者は、夜になると、ホテルにこもり深夜までレポート書きに追われていたという。この

レポートは1週間遅れで毎日のように日本に届けられた。

とはいっても、読む方は読む方で、まったく新しい情報なので、解釈を巡って多くの議論が巻き起こったことは言うまでもない。

米国ではすでに高純度ガスや高純度の化学薬品、さらに純水や実験室の構造など日本の想像をはるかに越えた発想に基づく周辺技術が開発されていた。イオン交換樹脂やクリーン・ルームなどに関しては、まったく知らないことだらけだった。

さらに悲惨だったのは複写機など便利なコピー・マシンがなかったことだ。ようやく米国から入手した貴重な資料や文献は、研究者自身で暑い暗室の中にこもり、まず35mmの白黒フィルムで撮ったあと、これを印画紙に引き延ばしていた。これをリコピー（リコーの商品名）して輪講に備える。そういえば、リコピーの酢酸やアンモニヤの匂いが懐かしい。

やがて、この輪講にW.ショックレーの名著*Electron and Hole in Semiconductor*が加わることになる。このような文献や書籍はきわめて高価だったため、海賊版が幅を利かせていた時代のことである。

成したが、発売までには至らない。トランジスタ・ラジオの開発は東通工よりも早かったわけだ。

このころ、神戸工業から発表される学会レポートはトランジスタをまだ知らない他メーカの技術者に引張りだこだった。

このほか日本無線の星野宏も1952年に点接触トランジスタを開発している。日本でもトランジスタが語れるようになってきた。

実用化の先べんを築いた東通工

1952年3月、東通工（現在のソニー、1958年に社名変更）の社長だった井深大は、テープ・レコーダの市場調査のため、米国に出張している。井深は米国に着くと、知人から米AT&T社がトランジスタの特許を2万5000米ドル（1953年の為替レートは1米ドル当たり360円なので約900万円）で公開することになったという話を聞いた。

トランジスタは有望だと直感した井深は、帰国後、米国の知人を通してAT&T社との接触を図った。小さな会社ながらテープ・レコーダの開発で優れた開発能力をもつと評価された東通工にAT&T社が興味を示したのである。

井深はトランジスタ特許を使いたかったが、外貨割り当ての権限をもつ通産省が難色を示した。

東通工の動きに日本の大手メーカは驚いている。あの巨大企業AT&T社が、小さな東通工を交渉相手に選んだからだ。ビジネスとは会社組織の大きさではなく、技術開発力が大切だということを日本メーカは学んだのではないだろうか。

トランジスタ特許のライセンスのほうは、すったもんだしてなかなか進展しなかったが、1953年10月に盛田昭夫が渡米し、AT&T社の製造部門であるWE（ウエスタン・エレクトリック）社と「通産省が認可したら」という条件の下に仮契約したのである。

これにつむじを曲げた通産省は、すぐには外貨割り当てを許可せず、1954年2月ようやく許可した。こうして東通工はAT&T社と正式契約を結ぶことができた。これが日本における半導体（トランジスタやIC）実用化の記念すべき日になったといえよう。

東通工は、トランジスタを用いた機器として、まだ世界で実用化（試作品はすでにあった）していないトランジスタ・ラジオに開発的の絞った。ここから苦難の道が始まり、やがて栄光をつかむのである。

独自に開発した情熱と執念

1954年になると、すでに米国ではGeの合金型接合トランジスタを生産している。しかし歩留まりがひどく、悩んでいた。

このような状況下で、東通工はAT&T社とトランジスタに関する特許実施権についてのみ契約している。ライセンスには製造方法に関する技術内容が含まれていなかったため、東通工は製造技術をすべて自前で確立しなければならない。

これに対し他のメーカは、「知名度・技術力ともに不十分な東通工が最先端技術であるトランジスタを開発できるはずがない。無謀な計画だ」と高をくくっていた。

東通工の技術者は情熱を燃やし、これに挑戦したのだ。なんと契約2カ月後には独自で合金型接合トランジスタの試作に成功している。しかし、井深の目標とするトランジスタ・ラジオを実用化するには、この合金型接合トランジスタではダメだと判断した。大量生産できず、かつ高周波特性が良くないためである。そこで、生産性が高く、高周波特性の良い成長型の接合（ゲロン）トランジスタを開発することに決めた。

当時、成長型接合トランジスタは、製造が難しく量産化には向かないと言われていた。このため先に合金型接合トランジスタが開発されたという経緯がある。

東通工はこの難問に挑戦する。成長型接合トランジスタは、p型のGe溶解液に単結晶の種を付けながら引き上げていく過程で、n型、次にp型の不純物を投入しながら製造する。より高周波特性を高めるためにはp型（コレクタ）とp型（エミッタ）に挟まれたn型（ベース）領域の幅を50 μ m以下にしなければならない。

しかも、ベースの50 μ mのところから外部にリード線を引き出さなければならない。

このような困難なことができるのか。東通工の技術者は見事に克服し、成長型接合トランジスタをどうにか試作したのである。

早速、この成長型接合トランジスタを用いてトランジスタ・ラジオを組み立て、1955年7月、東京の展示会で公開し、市販し始めた。

その反応はどうだったのだろうか。当時、花形だった真空管によるポータブル・ラジオと比較して雑音

が大きかった。だが、きわめて形状が小さく、電池の消耗を気にする必要がない、という特徴が認められ、まず入院患者が購入した。ベッドの上で手軽に聞けると大好評だったようだ。そして次第に若者にも受け入れられていく。

これに対し、真空管によるポータブル・ラジオは音量もあり、雑音も小さく音質も良かったが、なにしろ値段の高い電池が瞬く間に消耗してしまうという弱点があった。

当初、このトランジスタ・ラジオは、他のメーカから冷ややかな目で見られていたが、まもなく人々に受け入れられて、世界中に急速に普及する兆しがでてきた。

ところが、東通工はまたもや大きな問題を抱え込んでしまう。成長型接合トランジスタの歩留まりがあまりにもひどいのだ。

東通工の成功に驚いた他のメーカ

当時、東通工や神戸工業のみがトランジスタを開発していたのだろうか。

他メーカは様子見だった。なにしろ真空管が全盛の時代のことであり、わずか1MHzくらいでしか動作しない、しかもひ弱なトランジスタに各社の上層部はあまり積極的になれなかったのだろう。

しかし若手技術者は違った。トランジスタの面白そうな物理現象に夢中になったのである。会社の上層部との板ばさみになりながら、調査を始めている。会社として若者の提案を無下にできなくなってきた。とはいえ、戦後でもあり、各社の経営基盤がきわめて不安定なため、先行きの

はっきりしないテーマへの投資には慎重にならざるを得なかった。

東通工にはトランジスタ・ラジオという大きな開発目標があったが、他のメーカははっきりした目標がなく、いずれ何かに役立つだろうといった程度の気持ちで細々と開発がスタートすることになる。

1952年には、日立製作所と東芝が早々と、合金型接合トランジスタについてRCA社と技術契約をしている。さらにAT&T社との特許実施権契約を結んでいたNEC（日本電気）は1954年から事業化に取り組んだ。しかし、いずれの会社も生産量はごくわずかだった。

やがて、1956年から1957年にかけて東通工のトランジスタ・ラジオがブームとなるや否や様相は一変した。各社は一斉に半導体投資に踏み切り、次々に工場を新設し大量生産に入ったのだ。

猛烈な危機感が企業発展の原動力

低周波のみしか動作しないと思われていた合金型接合トランジスタにも新しい動きがでてきた。

一つは、米フィルコ社によって開発されたマイクロアロイ・トランジスタである。電解研磨でベース層を薄くした。

もう一つはドイツのH.クレーマによって提案されたドリフト・トランジスタである。ベース層の不純物濃度を傾斜させて加速電界をもたせた。このドリフト技術をいち早くRCA社が採用し、合金型接合ドリフト・トランジスタとして実用化した。

1957年には、RCA社がなんと30

MHzまで動作する合金型接合ドリフト・トランジスタの生産を開始している。RCA社と技術契約した日本のメーカは、早速、合金型接合ドリフト・トランジスタの生産を国内で始め、一気に東通工の牙城を切り崩そうとした。

一方、東通工は歩留まりの良くない成長型接合トランジスタしか製造できなかった。同社は、他のメーカと同様に米国から技術導入するか、自社開発に固執するかの瀬戸際に立たされることになる。このままではせっかく築いたトランジスタ・ラジオ市場を他社に奪われてしまう。猛烈な危機感があったという。

どこの企業でもこのような危機感に必ず遭遇するものだ。このとき、どうしようもないと悲観するか、どうしても乗り切るぞと積極的になるかで、企業の運命は左右されるのである。東通工には自社で開発しようという空気があったのだろう。やがて、若さと猛烈なエネルギーが開発に注ぎ込まれていった。

歩留まりの良くない成長型接合トランジスタをどのように改善したらよいのだろうか。初めに戻って、基本からの見直しが始まった。

このころ、p型Ge溶液液に加えるn型不純物にはSb（アンチモン）を用いていたが、P（リン）に代えてみたのである。当時、Pは、拡散係数が小さく拡散効果は期待できないといわれていたが、無駄を承知でやってみた。

Pは、Geに対する偏析係数が大きいためにドーブする量の制御が難しいので、Sn（スズ）とPの合金にして実験したという。この結果、驚くべ

きことに、飛躍的に高周波特性が改善されたのである。1957年のことだった。

すぐに生産に入ったが、またもや難関が目の前に立ちふさがった。P濃度が濃すぎるために、Au（金）のリード線を出すときpn接合が破壊されてしまうのだ。

まさに「一難去ってまた一難」ということわざの通りになってしまった。実は、この一難が転じて福となるのである。

切羽詰まった環境からノーベル賞

pn接合の破壊が起こらないようにするためには、いったいどのくらいまでがドーブ量の限界なのかを実験によって確かめることとなった。実験には江崎玲於奈も加わっている。

この実験の過程で、研究のアシスタントをしていた鈴木隆が順方向の特性を測定中に負性抵抗現象^{注4)}を偶然に発見している。その後、黒瀬百合子も加わり江崎が理論解析を行ない、1957年の物理学会に3人の連名でこの現象を「トンネル効果」と名付けて発表している。

学会での反応はなかったが、論文を見たW.ショックレーは自分のpn接合理論をより完全なかたちにするうえで非常に重要な発見だと激賞した。このダイオードは「エサキ・ダ

注4) 負性抵抗現象には、電圧型と電流型がある。エサキ・ダイオードは、電圧の増加に伴って電流が減る電圧型である。エサキ・ダイオードでは、順方向において、電子が粒子から波動となって空乏帯から充満帯に移り、さらに粒子となって禁止帯を通り抜ける。このようなトンネル効果により、負性抵抗現象が起こる。

イオード」と呼ばれ、日本の半導体技術力の高さを世界に誇示する結果となった。江崎玲於奈はのちにノーベル賞を受賞している。1932年にH.ウィルソンが提唱したトンネル効果が25年ぶりに実証されたわけだ。

さて、成長型接合トランジスタにおけるドーブ量の限界についての解析も順調に進み、SnP合金に代えてIn（インジウム）P合金にしたことがこの問題の解決となった。Inはp型だが、ここではPのn型のみが働くのだ。

こうして東通工のトランジスタ・ラジオは再び世界へと羽ばたくのである。

GeからSiへの劇的なシフト

トランジスタ・ラジオが爆発的な人気を博し他社がこれに追従しようとしていたとき、東通工はすでに次の開発目標を小型のトランジスタ・テレビに定めていた。

ブラウン管の周辺は温度が非常に高く、かつ駆動するためには高周波で高出力のトランジスタが必要となると判断した。トランジスタ材料としては、SiのほうがGeに比べて熱に強い^{注5)}ため、この目的に適することは明らかである。

しかし、Siを高純度化し単結晶化する技術は極端に難しく、これを用いたSiのメサ型トランジスタは、米国においてすら軍用に開発を進めている段階である。東通工の技術者は再度この難問に挑戦する。1958年のことだった。この年の1月、東通工は社名をソニーと変更し、さらなる世界への飛躍を目指している。

ソニーは、Si材料を米デュポン社

から輸入し、自社でFZ法によって単結晶を引き上げ、またしてもSiのメサ型トランジスタの独自開発に成功したのだ。早速、これを用いた8型のトランジスタ・テレビを、1960年に売り出した。

しかし、トランジスタの特性がまだ十分でなかった。そこで、新しい技術について調査したところ、米国ではすでにエピタキシャル成長のSiトランジスタが開発されているとの情報を得た。またまたソニーは独自技術によってエピタキシャルのSiトランジスタを開発している。

完成したトランジスタは5型のトランジスタ・テレビに組み込まれ、マイクロテレビ「TV5-303型」と命名されて1962年から売り出されたのである。

トランジスタが開発されて以来、トランジスタはひ弱で実用化はおぼつかない、しょせん物理屋の遊び道具だと言われていた。だがこの定説をものの見事にくつがえし、トランジスタを不動の地位に築きあげたのはソニーだった。ソニーは日本の半導体、いや世界の半導体応用開発のパイオニアとなり、世界的大企業へと発展していくのである。

真空管の技術は消え去らない

では真空管は滅びたのか——。いまでは一部のオーディオ・マニアしか興味を持っている人はいない。

だが、真空管は20世紀前半のエレクトロニクス技術を先導した素晴らしい発明品だった。当時だれもが、真空管はどんどん発展していくだろうと思っていたことだろう。

技術は、あるとき突然ドラスティ

ックに変わる。真空管から半導体への転換はまさにその典型例だ。

だからといって、真空管の開発が無駄になったわけではない。真空技術は、半導体の製造工程で不可欠な技術となっている。そうすると、真空技術があったからこそ、半導体技術が発展していったと考えるべきかもしれない。

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,永田稷,『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," 同上, 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) Spence, 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。