

歴史絵巻

半導体

世界を激変させた IC革命の始まり

20世紀エレクトロニクスの歩み(13)

相良 岩男

KOA 顧問

半導体シリーズの6回目。前回まではトランジスタ誕生への経緯をたどったが、今回からはいよいよ集積回路(IC)が登場する。1950年ころ、ミサイルに搭載する電子機器やコンピュータの開発が行き詰まり、小型化のためのブレイクスルーが求められていた。そこへJ.キルビーとR.ノイスが登場しICを発明する。ノイスなど有能な技術者が集まり、米フェアチャイルド社が設立された。ところが、1960年代中ごろから経営がうまくいかなくなり、多くの技術者が去って行く。そしてノイスなどが米インテル社を設立する。(本誌

トランジスタの登場によってエレクトロニクスは大きく飛躍したが、トランジスタからIC(集積回路)へと進歩するに伴い、その発展はいつそう劇的なものとなった。ICの実用化を可能にしたのは半導体の製造技術や製造設備といった周辺技術でも技術革新があり、これにサポートされたからだ。

黒光りする小粒のダイス——つま

りICの登場が、20世紀後半のエレクトロニクス産業を急速に発展させたと言っても過言ではないだろう。

炭素(C)と同じ結晶構造をもつSi(シリコン)を材料とするICは、機械(メカニカル)技術による産業革命以上の大革命を起こし、エレクトロニクス産業を基幹産業へと押し上げ、人々の生活を劇変させていったのである。

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)、4回目は1997年8月18日号(no.696)、5回目は1997年9月8日号(no.698)に掲載した。

第3世代

ICがエレクトロニクスを花形産業に

ICの出現によって、いったい産業界に何が起こったのだろうか。18世紀ころ、英国から始まった産業革命は技術からみると機械革命だった。紡績機や、その動力源としての蒸気エンジン、そして工場間の連絡用として電信機や電話機、蒸気機関車が

次々に登場している。

機械技術の進展のなかから、ゼンマイ時計、カメラ、オルゴール、リレー計算機などが誕生した。そして機械技術の究極の製品ともいえる自動車が登場する。

18世紀が機械革命とすれば、20世

紀はエレクトロニクス革命の時代だったといえよう。20世紀前半は真空管、20世紀後半はICを中心に技術革新が進んだ。特にICの普及によって、200年以上にわたって築き上げてきた機械文明が根本からくつがえされつつある。ICによって引き起こされた変革を大きく三つのステップに分けて考えてみよう。

一つ目のステップは、機械技術からエレクトロニクス技術へのシフトである。機械技術の粋を集めたといわれる時計はIC時計に置き換わった。カメラは電子スチル・カメラやカメラ一体型VTRへ、リレー計算機やリレー電話交換機は、電卓、コンピュータ、電子交換機へ、自動車もすでに制御系は電子制御が主流になり、21世紀に向けて電気自動車EV (electric vehicle) が注目を集めている。

二つ目のステップは、アナログ技術からデジタル技術へのシフトである。真空管やトランジスタの時代の回路技術はアナログだったが、ICの出現によってデジタル技術へと大きく変革した。

家電の分野では、アナログ・レコードからCD (コンパクト・ディスク) へ、VTRからDVD (デジタル・ビデオ・ディスク) へ、通信分野では基幹通信のみならず携帯電話もアナログからデジタルへ、ここに来て放送もアナログからデジタルへと移行しつつある。デジタル化の勢いは凄まじい限りである。

最後のステップは、アナログからデジタルへという流れのなかで起こる記憶技術の変革だ。具体的には、磁気テープや銀塩フィルムから、半導体メモリによる固体記憶へという

流れである。半導体に置き換えることで、従来機器に比べて、データの再現性が向上し、小型・軽量化する。

次のステップは…。頭脳への挑戦だろう。人間並みの音声認識、人間並みのパターン認識、人間並みの理解力と判断能力をもつICが21世紀にはお目見えするのではないだろうか。

ICの登場によって、さまざまな電子機器が実現され、製品化されてきた。これに伴ってエレクトロニクス産業は花形産業にのし上がった。半導体技術でみると、まず米国からスタートし、やがて日本が米国と肩を並べるまでに育っていく。ここにきて韓国や台湾の生産量も急激に伸びてきている。先進工業国・地域だけでなく、新興工業国・地域もIC技術を欲している。「産業のコメ」とも呼ばれるIC技術を自分でもちたいという熱意は強い。食糧を自給自足できるように農業を保護したいとするのと同じ感覚で、IC産業を自前でもちたいのである。

ICの必要性は意外なところから

それではIC誕生の経緯に話を戻そう。英国の王立レーダ研究所にいたG.ダマーは1952年、米国のワシントンD.C.で開催されたECC (Electronic Components Conference) の会議でレーダ部品の信頼性向上に関する講演をした。

その講演で、「半導体技術を用いれば、配線用ワイヤを用いない固体ブロックによる信頼性の高い電子装置ができるだろう」とICの概念を発表している。このころ、電子装置の故障原因は「1に接点、2に接点、3に接点」といわれるくらいに配線用

ワイヤの接点が大きな問題となっていた。ところが、この講演の意味をちゃんと理解できた人は少なかったようだ。

さて、講演のあった1952年当時、先端的な技術に最も関心をもっていたと思われる米軍は、代表的な戦略爆撃機B-29に1000本近い真空管を使っていたという。すでにトランジスタの生産が始まっていたにもかかわらずである。

その理由は不明だが、米軍は、固体ブロックどころか、トランジスタにもあまり興味を示さなかったようだ。もしかしたらその必要性がなかったのかもしれないし、先端技術の信頼性に懐疑的だったのかもしれない。真空管は発熱が大きく、故障がきわめて多かったのに、なぜ興味を示さなかったのだろう。

その1952年末ころから、ようやく軍用機器のトランジスタ化が検討され始めた。

その5年後のこと。戦慄すべき大事件が米国を襲った。技術的にも軍事的にも絶対に世界に負けないと自負していた米国が、旧ソ連に強烈なパンチを浴びせかけられたのだ。

大事件とは1957年10月、旧ソ連の技術の粋を集結した人工衛星スプートニクが地球を回ったのである。この人工衛星を軍事的に利用すれば、米国が宇宙からの攻撃にさらされると猛烈な危機感を募らせたことはいうまでもない。B-29戦略爆撃機など足元にも及ばない脅威である。

危機感が次の飛躍を生む

国家存亡の危機に、米国は全力で、非常事態を乗り切ろうと猛烈に走り

始めることになる。これが、米国のエレクトロニクス産業を飛躍させるきっかけとなったのである。

そのころの米国はロケット開発で旧ソ連に遅れていた。差し迫った危機を回避するため、米国が決定したことは二つある。一つは、旧ソ連と比較してペイロードの小さい手持ちのロケットを改造し、人工衛星を打ち上げること（下掲の「再び危機が米国を襲う」参照）。もう一つは、ロケット開発の劣勢を回復するための宇宙開発プロジェクトとして1958年にNASA（米航空宇宙局）を発足させたこと。そして旧ソ連との技術格差はエレクトロニクス技術でカバーすることとした（本誌1996年5月20日号、no.662、p.171参照）

このころの米国はすでに、コンピュータ技術で世界のトップにあった。これを今後開発するロケットの制御機器に採用することにした。このためにはコンピュータを電子機能ブロックに分け、その軽量化、小型

化、高信頼性を計らねばならない。

まず軍はエレクトロニクス・メーカーと組み共同開発プロジェクトを推進することにした。陸軍は1958年に米RCA（Radio Corporation of America）社と組み、「厚膜によるマイクロモジュール2D（two dimensional）計画」を企画した。海軍は米GE（General Electric）社と組み「薄膜2D計画」を、空軍は米ウエスチングハウス社と組み「モレクトロニクス（Molecular Electronics Function Blocks）計画」を推進する。

2D計画は二つとも、すべての電子部品をともかく小型化し、これによって電子機能ブロックを可能な限り小さくしていこうという発想だった。特に新しいアイデアを盛り込んでいたわけではない。

これに対しモレクトロニクス計画には斬新なアイデアが含まれていた。すなわち電子回路の考え方を根本から見直し、電子機能ブロックその物を固体物理現象で実現していこ

うという発想だった。

たとえば交流電圧を直流電圧に変換する場合に、交流電圧をいったん発熱体で熱に変換したあと、この熱を絶縁体を通して取り出し、熱-電気変換素子で直流電圧に変換して取り出そうというのである。固体の分子領域や領域間の物理現象を利用しようという考えもあった。電子機能ブロックごとに集積化しようというモレクトロニクスの発想は当時一つの流行語となっている。

ただし2D計画もモレクトロニクス計画も、いずれも半導体であるSiやGe（ゲルマニウム）の上に直接電子回路を組み込もうという発想はなかった。しかもいずれの計画も実用化には至っていない。

とはいえ、この危機をきっかけに米国は、新しい電子部品開発を強力に推し進めることになったのである。ここからやがてICが誕生し、エレクトロニクス産業飛躍への土台が築かれていく。

再び危機が米国を襲う

総力を挙げて開発した米国の人工衛星エクスプローラ1号は1958年に地球を回り、1年遅れで旧ソ連と肩を並べるまでに技術が向上した。

ところが1962年10月23日、再び米国に危機が訪れた。キューバが革命を起こしたのである。しかも旧ソ連のミサイル基地が突然建設されそうになった。世界戦争の危機に見舞われたが、旧ソ連のフルシチョフ首相の譲歩でひとまず危

機は回避された。これをきっかけに米国はミサイル用電子機器の小型化を一段と進めている。

一方、トランジスタを用いた産業用コンピュータ分野でも行き詰まり状態となりつつあった。1956年、すでに米IBM社のコンピュータ「モデル608」はトランジスタを3000本以上使用し、1960年になると米CDC（Control Data Corp.）のコンピュータは、なんと2万5000本以

上も使用していたのである。

こんなにたくさんのトランジスタを使っていたのではどうしようもない。「なんとかしなければこれ以上のコンピュータの発展は望めない」と技術者たちは真剣に考え始めた。

官も民も非常に小型の電子部品を欲したのだが、なかなかこの壁を打ち破る良いアイデアは思い浮かばなかった。

IC誕生への舞台が整う そこへキルビーとノイスが登場

電子機器を取り巻く米国の状況は煮詰まってきた。この壁を破るために、電子部品の小型化が強く望まれていたのである。にもかかわらず良いアイデアは生まれてこない。

技術者が躍起になって電子部品の小型化に頭を悩ませていたところ、米TI (Texas Instruments) 社に1人の男が入社してきた。彼の名はジャック(J)・キルビー。ミサイルともコンピュータともまったく無縁の技術者だった。入社直後のことである。たいた仕事もなかったため、遊び心で、発振器ICを1人で作り上げたのだ。

この驚くべきアイデアは、世紀の大発明の一つとなり、その後のエレクトロニクス産業界に衝撃を与えることになる。発明までの経緯を振り返ってみよう。

アドコックとキルビーの出会い

1952年4月、ベル電話研究所は、トランジスタの特許を一般に公開することにした。これに伴って、同研究所はトランジスタの製造技術に関する 세미나を有料で開催している。このセミナーにTI社や米レイセオン社に混じって、米セントラ・ラボ社という小さな会社も参加していた。

セントラ・ラボ社はトランジスタを用いて、何か機器を開発し事業化したいと模索し始めていたのである。同社は米国のミルウォーキーにあり、ラジオ部品を作る米グローブ・ユニオン社の傘下にあった。この会社からJ.キルビーが選ばれ、セ

ミナに出席している。新しいことに興味をもつ彼はたちまちトランジスタの魅力に引き込まれ、すっかり惚れ込んでしまう。

その後、セントラ・ラボ社はトランジスタの特徴を利用してトランジスタ補聴器の開発を進めることにした。J.キルビーは、セミナーから帰ると早速、補聴器用Geトランジスタの生産ラインを社内に設置している。やがて、トランジスタを使った補聴器は完成したが、会社はこの補聴器に使う数量以上にトランジスタを生産しようとはしなかった。会社のこの経営方針に対し、彼は次第に不満をもつようになっていった。

一方、石油掘削機器を作っていたTI社からは、のちに会長となったM.シェパードがこのセミナーに出席していた。その後、TI社もセントラ・ラボ社と同様にGeトランジスタの生産ラインを社内に設置している。同社の社長P.ハガティは優れた経営者で、トランジスタの将来性に非常に注目していた。トランジスタ事業を発展させるべく、早くも1953年には他社に先駆けて半導体研究所を設立している。ここにベル電話研究所で接合トランジスタを開発したG.テールが招へいされた。

G.テールの指導のもと、なんと1953年5月にはSiトランジスタやこれを用いたポータブル・ラジオの試作品を世界に先駆けて発表している。東通工(東京通信工業、現ソニー)の試作は1954年6月なので、TI社のほうが約1年早かったことにな

る(本誌1996年4月8日号、no.659、p.185参照)。ところが、TI社はトランジスタ・ラジオを製品化しなかった。たぶん周辺部品の調達が困難だったのだろう。

G.テールは応用機器を開発するために、米テキサス大学のW.アドコックをTI社にスカウトした。W.アドコックは、トランジスタを使って電子機器の小型化を提案した。まず、この方面の技術に秀でた技術者を捜すことにした。

ちょうどそのころ、セントラ・ラボ社に嫌気がさしていたJ.キルビーは米IBM社などいくつかの会社と転職について話し合っていたのだ。このことを知ったW.アドコックは1958年5月、セントラ・ラボ社でトランジスタを使った補聴器を作り、小型化技術の実績をもつJ.キルビーをTI社に引っ張った。

ベル電話研究所のセミナーでいっしょだったM.シェパードとJ.キルビーは再会することとなったのである。まさに運命的な出会いだった。M.ケリーの示唆に感銘したW.ショックレーがトランジスタを発明したのと同様に、W.アドコックの良き助言によってJ.キルビーはICを発明することになる。

人生では良きアドバイザーに恵まれるかどうかはきわめて重要なことがあるのだ。

TI社に入社したキルビーの夏休み

J.キルビーはセントラ・ラボ社で補聴器の開発を担当していた。補聴器は小型にしなくては意味がない。彼は最初、トランジスタをはじめ抵抗器やコンデンサなどの電子部品を

セラミック基板に1個ずつハンダゴテで付けていた。大変苦勞したと、彼はのちに語っている。

この経験のなかから彼は「装置を小型化していくと接続間隔があまりにも接近しすぎるうえに、あまりにも接続箇所が多くなりすぎる。もはや人間の手には負えない」と考えるようになったという。この経験がIC発明の素晴らしいヒントとなったのだろう。

一方、TI社のW.アドコックは、「回路が複雑化するにつれて、従来の方法で電子機器を製造しては、組み立てコストが高くなり、信頼性にも問題が生じるだろう。このようなことをやっていてはまもなく限界に達するのではないか」と考えていた。壁を打ち破る新しい方法がないものだろうかを模索していた。

そこへ、J.キルビーが入社してきたわけだ。入社してまもなくの1958年7月上旬にTI社は全社をあげて2週間の夏休みに入った。彼は新規採用者なので、夏休みがない。

たった1人で出社した彼は、だれもない会社で自由な時間をもつことができた。普通の人なら、ここぞとばかりにコーヒーを飲んだり新聞を読んだりしてだらけてしまうものだが、彼は違う。半導体基板に電子回路を直接構成する方法について発想を思い巡らしていたのである。

移相発振器ICの試作に成功

そのころ、すでにGe基板やSi基板の上に抵抗器やコンデンサを形成する技術は、半導体技術者によって提案されていた。だが、こういった素子とトランジスタとを組み合わせ

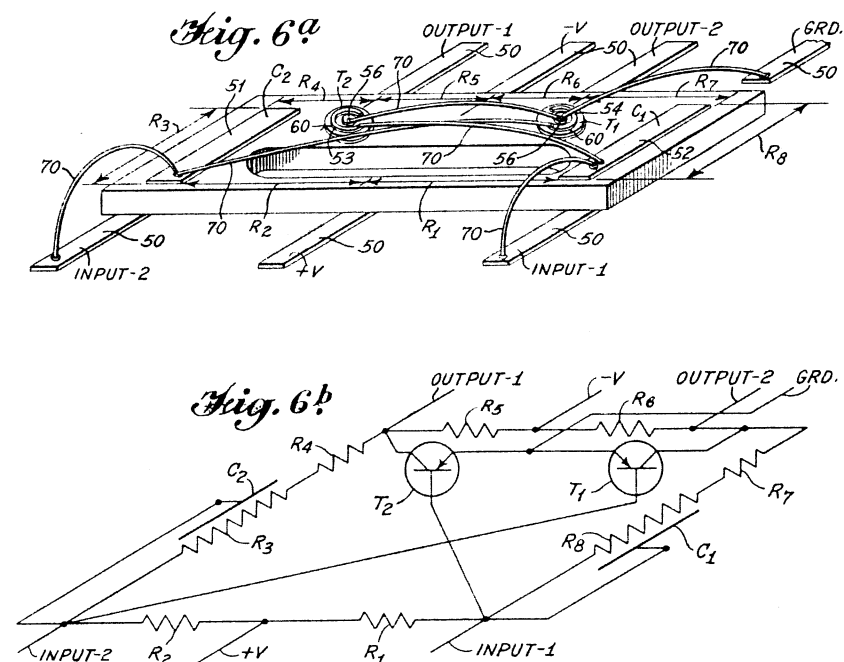


図1 J.キルビーが考案したIC 1959年2月6日に米国出願された特許“Miniaturized Electronic Circuits”(U.S.P.3,138,743)の図より。図の回路はマルチバイブレータ。1964年6月23日に成立している。日本への出願は1960年2月6日。日本特許の名称は「半導体装置」(特公昭61-55256)。

一つの電子回路に集積化しようとはだれ1人として考えていなかったようだ。いまから振り返ってみると、不思議に思われる。

夏休みに1人で出社したJ.キルビーは、実験テーマとして移相発振回路ICを取り上げたのである。移相とは位相を少しずつ進ませるか遅らせるかということである。この回路をIC化しようと考えた。

なぜ移相発振回路を選んだのだろうか。その理由は簡単だ。自分の考えたICがもし実現できた場合に、発振回路ならばひと目で動作を確認できるからだ。

早速、長さ3mm、幅4mmのGe結晶チップの上に1個のトランジスタと、3個の抵抗器、1個のコンデンサによる発振回路を構成した。それぞ

れの素子の間は金(Au)線で配線を行なっている。わずか5素子のICだった(図1)。この実験に成功したのが1958年9月17日。ICによるこの発振回路が動作するのを見た他の技術者は、間違いなく成功したことを確認したのである。

これは、新しい概念に基づく実験テーマを選ぶときは、その結果がだれにでも簡単に納得できるようにすることがきわめて大事だということを教えてくれる。企業のなかでは、成果が上司に理解してもらえるようにすることも大切なことだ。実はトランジスタが発明されたとき、同じような発振回路を作って増幅作用を確認し、ようやく他の技術者がトランジスタ動作していることを納得するといったこともあった。

さて、J.キルビーが作ったICは、現在のICとは素子の分離や配線などの点で異なる構造ではあったが、このとき世界で初めてのICが誕生したのである。この移相発振回路ICをTI社は、「IC」とは呼ばず、固体回路(solid circuit)と呼んでいた。この名前はG.ダーマーが考えたらしい。

早速、同年11月、米空軍に対し、この固体回路を実演して見せたところ大きな反響を呼び、ミニットマン・ミサイル用誘導コンピュータへの採用が決まったという。陸軍や海軍の反応はなかったようだ。

1959年1月には、複数のトランジスタを配線で接続したフリップフロップ回路がGe結晶チップの上に完成した。同年3月、この成果はIEEE

(電気電子技術者協会)の展示会で初めて一般に公開された。空軍にはきわめて好評だったが、新聞社や機器メーカーの技術者の反応は冷ややかだった。

IC開発に情熱を燃やしたノイス

J.キルビーは、能動素子と受動素子からなる電子回路を一つの半導体基板に構成するという画期的な技術を考案したわけだ。つまりICを発想し、これを実現した点で実に素晴らしい仕事をしたといえよう。

とはいえ、製造技術では多くの問題点を含んでいた。素子間の信号の干渉が大きく、動作が不安定なため、歩留まりがひどく、量産向きではなかった。

この問題を解決したのがR.ノイスだ。1959年1月、TI社のJ.キルビーとはまったく無関係に、米フェアチャイルド(Fairchild Semiconductor)社のR.ノイスはJ.ホーリニーが考案した画期的なプレーナ技術^{注1)}と米ウエスタン・エレクトリック社のエビタキシャル技術^{注2)}を基本にして、ICを作ろうと密かに構想を練っていたのである。

彼の考えたICのアイデアは、①Si基板の上に抵抗器を形成する、②pn接合に逆バイアスを印加して素子を分離する、③自ら考案したAl(アルミニウム)配線技術で素子間を配線して電子回路を構成する、といった三つの技術を基本にICを作ろうと考えていた(図2)。実に驚くべき発想だった。

なぜR.ノイスがこのような発想に至ったのだろうか。そのきっかけは意外なところにある。実は、プレーナ型トランジスタの特許を申請するために弁理士と相談していたとき、弁理士が「この技術は何かほかに応用できないのか」と言った。このひと言からヒントを得たと伝えられている。成功する人は、このようなところが凡人と違うのだろう。

1959年3月、TI社のJ.キルビーの発表を聞いたR.ノイスはただちに自分の構想を社内で発表し、IC開発に向けて全社の力を結集したのであ

図2 R.ノイスが考案したIC プレーナ技術を使ったICである。米国では1959年7月30日に出願されている。特許番号はU.S.P.2,981,877(“Semiconductor Device-and-Lead Structure”)。1961年4月25日に成立した。図は表面、構造、回路である。日本に出願された特許は「複合半導体装置」(特公昭41-9936)。

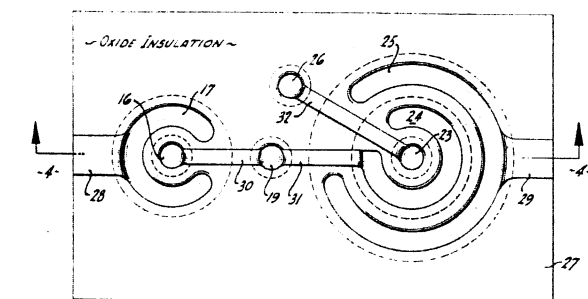


FIG-3

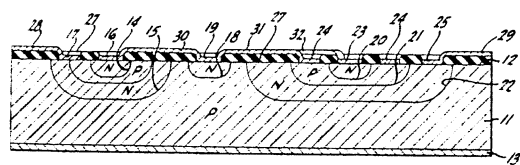


FIG-4

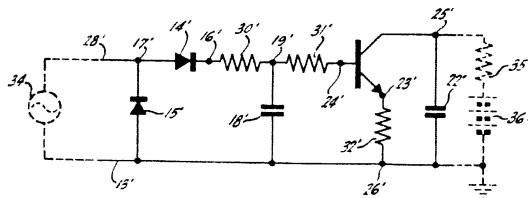


FIG-5

注1) プレーナ技術は、「平坦化技術」という意味。Siのバイポーラ・トランジスタを作る際に、ベースとエミッタ領域はそれぞれ拡散で形成する。このとき、pn接合の表面が外気に触れることのないように、常に必要な絶縁酸化膜(SiO₂)を残して製造する技術である。Siトランジスタの表面は、メサ型と異なり、ほとんど平坦となる。

る。R.ノイスが考案した技術を用いたICは、J.キルビーの技術に基づいて試作したICに比べて、素子間の干渉がなく、特性が安定し、歩留まりも良く量産性に向いていたため、いつしかR.ノイスの技術が主流となっていた。

ICを開発する環境が整う

初期には、2mm角くらいのGeレットと直径0.1mmくらいのIn（インジウム）ボールをジグに入れて、合金型接合トランジスタを1個1個作っていた。非常に能率の良くない手作りだったが、これが最善の方法だったのである。

やがてプレーナ技術が導入され、大量生産に適するバッチ処理^{注2)}が可能になった。この製造技術を開発したのはフェアチャイルド社である。1961年のことだ。プレーナ技術はトランジスタの製造技術に画期的な革新をもたらしただけでなく、信頼性も驚異的に向上したのである。

その1年ほど前の1960年、ウエスタン・エレクトリック社は、エピタキシャル技術を開発し、これを用いてコレクタ抵抗が小さいトランジスタを試作していた。これも素子の性能を飛躍的に向上させた。

ちょうどそのころ、半導体材料はGeの時代からSiの時代へと変わろうとしていた。ICの誕生に向けて技術

的な環境は、整ってきていた。あとは、指揮者の登場を待つのみだ。

そしてJ.キルビーやR.ノイスがそれぞれ、演奏開始の指揮棒を静かに振り始めたのである。このうち、ベートーベンの交響曲第5番「運命」のごとく、ICの開発は劇的な航海に出ていくことになる（p.196の「日本でもIC開発が始まった」参照）。

別々に開発されたプレーナ技術とエピタキシャル技術がICの基本製造技術として受け継がれていく。ICは当初、固体回路と呼ばれていたが、1963年ころからintegrated circuit（IC：集積回路）^{注4)}と呼ばれるようになっていく。

集積回路とは、文字通り「トランジスタや抵抗器などの素子を集積する製造技術」と「これらの素子を用いて電子回路を構成する応用技術」とが複合化されたもので、次世代の能動体を表す表現としては非常に適切な言葉だといえるだろう。

なお、J.キルビーが試作した最初のICは、ワシントンD.C.のスミソニアン博物館に展示されている。

後年、J.キルビーはTI社を退社し、現在はコンサルタントをしているという。彼は多くの賞を受賞した。たとえば1993年11月には、京都賞（稲盛財団）が贈られている。この記念講演のなかで「社会には科学技術が不可欠であるにもかかわらず、若い人の科学技術離れが進んでいる」と危機感を訴え、若者が再び科学技術に興味をもってくれるよう熱望していた。

注3) ウエーハを複数枚まとめて同時に拡散などの処理をすること。これに対し1枚ずつ処理することを枚葉処理という。

回路設計者ノーマンを引き抜く

一方のR.ノイスも実に素晴らしいひらめきの持ち主だった。彼はICが成功するかどうかの鍵は、製造技術のみではなく回路技術にもあると直感している。製造技術に一応の目安が着くや否や、ただちに優れた回路設計者をスカウトすることにした。

しかも採用した回路設計者にIC回路の標準化を考えさせようとしたのである。

当時、たとえ同じ機能の回路でも、その回路は、技術者ごとに異なっており、設計者の個性に依存していた。このまま、さまざまな種類の回路がどんどんIC化されると、結果としてICの普及を遅らせることになるのではないかと懸念したのである。この考えは正しかった。

最初のIC化の目標は、コンピュータ向けの需要が期待されるデジタル回路とした。初期のICは多くの素子を集積化することが困難であり、かつ素子の特性にも多くの制限があった。

R.ノイスが引き抜いた技術者のなかに、米スペリー社のR.ノーマンがいた。彼はデジタル回路の基本となる回路をNOR（インバータ）回

注4) ICはデバイスとも呼ばれている。デバイスとは機能的動作を行なう部品である。機能体を構成する基本単位が素子ということになる。素子にはダイオード、トランジスタ、コンデンサ、抵抗器、コイルなどが含まれている。ICはSiチップ上に形成した素子の数によって、SSIC（small scale IC）、MSI（medium scale IC）、LSI（large scale IC）、VLSI（very large scale IC）、ULSI（ultra large scale IC）と呼ばれる。一般に、 $10^3 \sim 10^6$ くらいの素子を集積しているICをULSIと呼ぶ。ときにはゲートの数で表現することもある。たとえばCMOS ICで作った2入力NANDゲートは、4素子に相当する。

路と決めて、RTL (resister transistor logic) 回路を考案している。これはresisterとtransistorとの組み合わせによるlogic (論理) 回路である。彼が考えたRTL回路は、製造しやすく、しかも使いやすい回路構成だった。

この回路の提案がICの製品化を容易にしたのである。彼もIC発展の立役者の1人だった。フェアチャイル

ド社は、これを「マイクロロジック」と名付けて1960年2月に発表した。1961年から販売し始めている。これが標準論理ICの原型である。

とはいえ、このICは、当初は人気がなく、フェアチャイルド社の売り上げの中心は相変わらずプレーナ型トランジスタだった。

その1961年には、米TRW社がTTL (transistor transistor logic) 回路を

発表している。TTL回路によるNOR回路は、基本的にトランジスタのみで構成されており、RTL回路と比較して、より作りやすく、より動作が安定していた。

その後、TI社がTTL回路を使った標準論理ICをシリーズ化し、「74シリーズ」と命名して発売した。同社は、ICの本格的生産を始めたが、1963年ころまで生産の95%までが軍

日本でもIC開発が始まった

米国におけるIC開発の動きに日本の技術者は、このままではますます半導体技術の格差が広がるとの危機感を強めていた。

このような状況で日本電気(NEC)は1960年、ICの研究を独自にスタートさせている。同じ年に三菱電機はウエスチングハウスのモレクトロニクスを、日立製作所と東芝など数社はそれぞれRCA社のマイクロモジュールを実用化すべく検討し始めている。

当時、すでにTI社は固体回路(IC)の試作を始めていた。とはいえ、だれもがまだ固体回路が本命になるかどうか半信半疑だった。なにしろ固体回路は、素子間分離が良くなく、配線が複雑なため、とても実用化できるとは考えられない。

IC実現への本命は、モレクトロニクスなのか、マイクロモジュールなのか、固体回路なのか、日本の技術者は混乱のなかにあった。

1961年1月、電気試験所^{注A)}の垂

井康夫と伝田精一は、米国からの不確かな情報を基に固体回路の開発に挑戦し、わずか半年で日本初の固体回路によるマルチバイブレータICの試作に成功し、世間をアツと言わせた。トランジスタ2個、コンデンサ2個、抵抗器4個が縦横4.9mm×4.9mm、厚さ1mmのGe基板の上に集積化されていた。重さはわずか0.5gである。

同年2月には三菱電機がモレクトロニクスの試作品を発表しているが、世の中の流れは次第に固体回路に固まりつつあった。

日本にもプレーナ技術が伝わる

米国ではバイポーラICの生産が1960年ころから始まっているが、主力はプレーナ型トランジスタだった。1962年、フェアチャイルド社のR.ノイスは、プレーナ技術を売り込むため来日している。彼は精力的に日本の半導体メーカを回り、静かななかにも自信にあふれた口調でプレーナ型トランジスタ

の素晴らしさを説明したという。

日本ではようやくメサ型トランジスタの実用期を迎えていたところだったので、日本の半導体メーカはプレーナ技術に非常に魅力を感じた。このなかで日本電気が4.5%という高率で特許の専用実施権を得ている。こうして日本でもプレーナ技術が使えるようになった。

しかし日本では1個1個作っていたGeトランジスタから、バッチ生産ができるSiトランジスタへの切り替えが遅れたことが響き、1970年になってもバイポーラICの生産がまともに立ち上がらない。生産がうまくいかないにもかかわらず、安価に販売したため、米国は、日本の半導体メーカが日本国内でダンピングしていると非難していた。1980年代後半の半導体摩擦とは次元の違う話だ。

注A) 電気試験所は1948年8月に通信省電気通信研究所(現在はNTTに所属)と商工省電気試験所(現在の通産省電子技術総合研究所)とに分離している。

用だった。

あれほど小型化を望んでいたユーザがたくさんいたにもかかわらず、ICの採用には走らず、成り行きを見守っていたのかもしれない。ICの価格がまだ高かったこともあったようだ。

1965年ころになると、一部のコンピュータ・メーカーが興味を示し始めた。そして需要はRTL回路からTTL回路へと移っていった。

デジタル回路のIC化に遅れること5年、アナログ回路のIC化に挑戦したのがフェアチャイルド社に入社したB.ワイドラーだ。1965年に、有名なオペアンプ（演算増幅器）「 μ A702」と「 μ A706」、そして名作と言われた「 μ A741」を開発した(図3)。彼はその後、米ナショナル・セミコンダクタ (National Semiconductor) 社に転じている。

R.ノイスが率いるフェアチャイルド社は新しい製造技術を開発するかたわら、次々に新しいICを生み出し、1960年ころから世界の半導体産業の中心的存在となっていた。多くの技術者が同社に憧れ、次々と優秀な人材が集まってきた。その結果、若さにあふれるフェアチャイルド社はますます活気のある会社となり、驚くべき早さで技術開発が進められていったのである。

R.ノイスは、単にトランジスタやICのみならず、応用製品の開発にも力を注いでいる。その一例として、IC化されたディジボル（ディジタル電圧計）や、トランジスタ測定器「モデル500」、ICテスト「モデル8000」などを開発し、米国は言うに及ばず、日本の半導体メーカーも数多

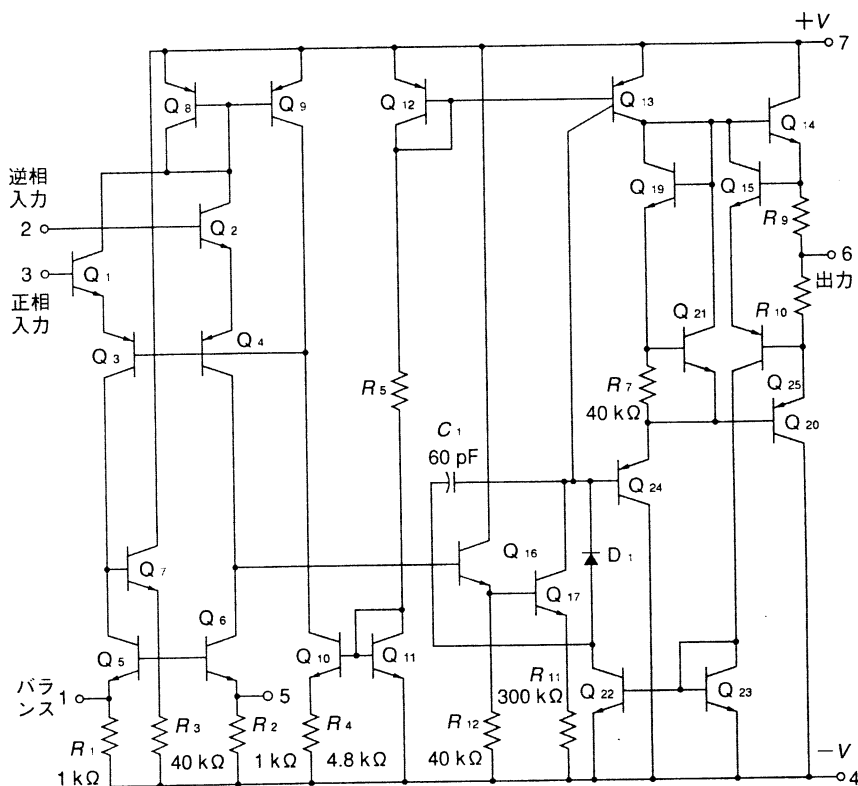


図3 オペアンプ（演算増幅器）の名作 μ A741 トランジスタの生産で世界のトップ・メーカーに躍進したフェアチャイルド社のB.ワイドラー氏が設計した。アナログ回路を勉強するときに、必ず出てくる基本回路である。出典は『アナログ集積回路 (Analog Integrated Circuit Design)』(Alan B.Grebene著、中沢修治、佐々木元、村瀬清隆共訳、近代科学社、1978年) より。

く購入した。

そのフェアチャイルド社も1965年ころまでが絶頂期だった。その後、急速に衰退していく。なお、半導体発展の一時代を築いた旧フェアチャイルド社のパロアルト工場は「ICを発明した場所」としてカリフォルニア州の歴史保存建物に指定されている。R.ノイスの業績を評価してのことである。

ノイスとムーアが会社を去る

1965年ころから米国でICの生産が本格的に立ち上がり、フェアチャイルド社は、他の半導体メーカーがうら

やむくらい押しも押されもしない巨大な半導体メーカーへと成長した。ところが急激に成長した反動だろうか、管理が行き届かなくなってしまう。同社の多くの有能な技術者が次第に経営に対する失望感をもつようになり、退社する技術者が始まってきた。そこへ人事に関する内紛が次々と発生したのである。

そのころ市場では、TI社や米モトローラ (Motorola) 社との競合が激しくなり、半導体価格がどんどん低下している。1967年7月、フェアチャイルド社は、損失を出し、社内がいっそう動揺し始めた。かつての勢い

が業績低下とともに技術的にも営業的にも雪崩のごとく崩れ始め、次々と優秀な技術者が去っていった。最後まで残っていたRノイスとGムーアも1968年6月に退社してしまったのである。

その後、モトローラ社の副社長だったレスター・ホーガンが突然、1968年8月9日にフェアチャイルド社の社長に就任している。彼はベル電話研究所でマイクロ波技術の開発に携わり、世界的な業績を上げたのち、モトローラ社に招へいされていた。そして赤字部門だったモトローラ社の半導体事業を黒字に転じさせたことで有名になっていた。

フェアチャイルド社に移るとき、彼は8人のモトローラ社の幹部を引き連れてきた。フェアチャイルド社の人たちは青天の霹靂^{へきれき}と大変に驚いた。これが有名なホーガン事件として、その後、人々の語り草となっている。だがホーガンが社長になっても技術者の流出は止まらなかった。そしてフェアチャイルド社の時代は終わりを告げるのである。

その後、同社はフランスの石油掘削会社であるシュルンベルジェ社に買収され、さらに1987年9月にはナショナル・セミコンダクタ社の傘下に入った。ナショナル・セミコンダクタ社の会長は、かつてフェアチャイルド社の製造部門の責任者だったチャーリー・スポークである。

一方、RノイスはGムーアとともに1968年7月18日、米インテル社を創立している。この会社がのちに、半導体メモリやマイクロプロセサで世界の半導体産業を主導することになるのである。

ICの発明者は キルビーかノイスか

TI社のJ.キルビーは、一つの電子回路を半導体基板上に拡散技術を用いて構成するという特許「半導体装置」を1959年2月6日に米国特許庁に出願している（p.193の図1）。続いてフェアチャイルド社のRノイスは、「複合半導体装置」というプレーナ構造を基本とした特許を1959年7月30日に米国特許庁に出願している（p.194の図2）。特許はいずれも成立している。

その後、米国では、ICの真の発明者はだれかということで「キルビー特許」と「ノイス特許」の訴訟合戦が繰り返された。

結局、司法による最終判定はRノイスをICの発明者とした。だが一般のとらえ方は違う。J.キルビーとRノイスの2人をともにICの発明者として認めるようになっていった。ねらいは同じだが、IC実現の考え方が違っていただけだろう。

J.キルビーの特許には、二つの特徴がある。一つは、半導体基板の表面に能動素子や受動素子を形成して集積し、一つの機能の回路を実現するというもので、従来の電子回路の組み立てとはまったく異なる斬新な思想を考え出した点である。

もう一つは、GeまたはSiの基板に何回か不純物拡散を行ない、同じ製造工程でトランジスタやダイオードのみならず、pn接合を逆バイアスにしてコンデンサを形成したり、蒸着によって抵抗器を作るといった製造技術である。

彼自身で実験を行なって確認した

点に非常に価値がある。ただし、素子間で信号が干渉しやすいという欠点があった。

Rノイスの特許は、バイポーラICの製造工程について、特に回路そのものを小さく作り込むための具体的方法を提案している。ここで強調したいのは、J.ホーリニーのプレーナ製造技術やエピタキシャル技術がノイス特許のなかで重要な役割を果たしたという点だ。

さて、Rノイスの特許は少なくとも三つの特徴をもっている。一つは、Si基板上にpn接合のプレーナ型トランジスタが一つ以上あること。二つ目は、これら複数のトランジスタやダイオードなどの素子が互いにpn接合で分離されており、素子間配線は絶縁物によって覆われた膜の上に開けた穴を通して金属で各素子と接続されていること。つまり絶縁物上で平面的に回路の配線を形成するわけだ。三つ目は、これらの素子が同時に形成されるということである。

ノイス特許が公開されたころ、すべてのICはバイポーラ・トランジスタで回路を構成していた。したがって製造には「ノイス特許」が必須だったのである^{注5)}。

注5) 1965年ころからMOSトランジスタの開発が進み、現在ではほとんどのICがMOS ICである。MOS ICにおける素子間分離はpn接合を用いて逆バイアスによって分離するという構造ではなく、ドレインとソースがそれぞれ独立にpn接合を持っており、自動的に分離するという構造へと大きく変わってきた。このため基本的には、MOS ICはノイス特許に抵触しなくなっている。

(a)キルビー特許

昭61年11月27日
 特許公報(B1) 昭61-55256
 特許出願公告
 昭61年(1986)11月27日
 発明の数 1 (全1頁)
 特許出願公告
 昭61年(1986)11月27日
 発明の数 1 (全1頁)

発明の名称	半導体装置				
審判	昭58-95001	特許	昭46-103280	審判長	金平 駿
		出願	昭35(1960)2月6日	審判官	中村和雄
		特許	昭39-4589の分列	審判官	田嶋 孝
優先権主張	◎1959年〇月6日◎米国(U.S.◎)791602				
発明者	ジャック セントクレ ア キルビイ				
	77223番				
出願人	テキサス インストル メント インコーポ レテッド				
	6000番				
代理人	弁護士 中村 稔 外3名				

図面の簡単な説明

第1図は本発明による一体化回路を説明する図で、第2図は同じ関係で配置せられた第1図の一体化回路の配線図を示す図である。

発明の詳細な説明

本発明は、主要な表面と裏面とを有する単一の半導体薄片に、本質的に平面状に配置された複数の回路素子と、その薄片の外側に接続が必要とされる回路素子とに対する電気的に接続された複数の引出線とを有する電子回路用の半導体装置に関するものである。

本発明の目的及び効果は、次のとおりである。即ち、回路素子と半導体薄片の一面との不特性結合面に、電極の接続により容易に

る。本発明の原理に依れば、全電子回路の成分は、最初に詳細に説明される構成の依り特効に付けられる様に本体に組立てられる。回路の成分が半導体物質の本体の中に組合せられ、且つその形を形成してある事は注意されるべき事である。

本発明に依れば、電子回路の能動及受動成分は、は回路素子と半導体薄片の一面及びその近辺に形成される。

その結果、得られる回路は本質的に平面状に形成されることになる。処理工程中に半導体材料の損傷を行ない、放散により希望の各種回路素子を製造不能に製造することが可能である。

本発明の効果が製造競争上満足なものであると見做つた場合には、エッチングと拡散の様な限定な

(b)ノイスト特許

99(5) H 0

特 許 公 報

特許出願公告
昭41-9936
公告 昭41.5.27
(全4頁)

冷半導体装置

発 明 者 39-73895

出 産 地 33,716

時 限 35-31267の分岐

優先権主張 1955.7.9(アメリカ)530367

発 明 者 コート、ノース、ノース

アメリカ合衆国カリフォルニア州
ロス、アール、ランド、レイ
11645

出 産 地 フラタサイレン、カタ、ニシ
イシズルメット、コーンバ
ー

アメリカ合衆国ニューヨーク州
ロンドン、ロンドン、ロ
ン、ロンドン、ロンドン、ロ
ン、ロンドン、ロンドン

代 理 者 ス、ロンドン、ロンドン

代 理 人 米国士 杉村信造 外1名

図面の簡単な説明

第1図は従来の冷半導体装置の側面図、第2図は本発明冷半導体装置の拡大平面図、第3図は第2図のX-X線上的断面図、第4図は第2図および第3図に示す冷半導体装置の背面断面図を示す。

発明の詳細な説明

本発明は冷半導体装置として特種な半導体装置に使用するものである。本発明の目的は、各半導体装置の間に接し、その間に各半導体装置と接する。

の圧力及び温度を用いる冷半導体装置を拓務する点がある。

この場合、半導体を設けるも細線の表面積は僅つて小さく、かつ一般に使用される材料は半導体装置よりも更に便宜に使用できない材料からなつて、従つて隙間に対して極めて数倍を要する。更に、半導体の隙間は接着面を設けるが、中間に空間に於いて、半導体の膨張縮小に対して極めて弱いために装置全体としての信頼性が極めて低くなる。この場合、半導体の膨張及びその近傍に他の物質等とは半導体と接着を密着して装置上にも考えらるが、このようにすると、半導体上に更に接着の能力が乏しく、半導体の膨張に反し、かつ半導体の膨張の断面に露出するPN接合部の膨張等を等価性法は更に考へる。

米国JREの1953年3月8日の887頁に於いて示すこの半導体装置は感応光増幅器を用いて、その上にアルミニウムを真空蒸着して特定の半導体装置と半導体を用いた方法が発表されているが、この構造では感応光増幅器に使用した、食用した材料と同一手段を要する外感光増幅器の信頼性に劣る、また装置に与える影響もあつた欠点がある。

本発明はかかる欠点を完全に除去し、信頼性の高い回路構成として冷半導体装置を拓務するものである。即ち、ほぼ平坦な表面を有する半導体装置のこの結晶内部には、表面よりも延長するPN線路を設け、その表面には、被覆層及び絶縁層と接する、半導体装置を被覆層及び

図4 日本で出願されたIC特許 キルビー特許は特公昭61-55258より(a)。ノイス特許は特公昭41-9936より(b)。

キルビー特許が日本に上陸

キルビー特許は1960年2月6日に、ノイス特許は1960年7月16日に日本にも出願されている(図4)。ICを事業化するには、この二つの特許にウエスタン・エレクトリック社の半導体特許を加えた三つが必要である。

キルビー特許にはICの基本構造についての記述があり、これが日本で大問題となった。この特許は、異議申し立てを経たのち公告され、1980年6月26日まで権利が有効となった。

ところがTI社は、この特許を1964年1月に分割出願し、さらに1971年12月には再分割して出願している。再分割で提出されたキルビー特許は7年間も特許庁との間でもめたが、ようやく1986年11月27日に公告となった。

特許に関する大正10年法に従い、分割された特許の有効期限は、公告後15年となっているため、なんと2001年11月まで有効となってしまうのである^{注6)}。

米国企業はこのような特許の延命策をしばしば行っている。

テキサス魂に翻弄された日本

TI社は日本におけるIC事業を有利に展開するため、1964年1月、日本に100%子会社の設立を申請している。そのころ同社は世界の半導体市場の60%のシェアを占める大企業への1つになっていた。日本の半導体

注6) その後、法改正によって特許の有効期限は公告後15年または出願後20年のどちらか短いほうということになり、さらに現在では出願後20年に一本化された。

市場が一気に乗っ取られるのではないかと、世間ははやし立てた。TI社は、米IBM社向けのICを生産するだけとっていたが、日本は信じなかった。

当時の日本のIC技術は非常に立ち遅れていたため、通産省と日本メーカがこぞって、TI社の子会社設立に反対したことはいうまでもない。これに対しTI社は、進出を拒否された場合はキルビー特許の実施許諾をしないと強行に迫っている。このときまだ、キルビー特許は日本で成立していなかった。

当時、日本は岩戸景気に沸き、半導体産業は民生用ラジオ受信機やテレビ受像機向けトランジスタの需要に支えられていたが、今後は産業用コンピュータ向けを中心とするIC需

要に移行すると予測されていた。こういう時代に備えて準備を始めようとしていた矢先のことだった。

もしTI社に特許の使用が拒否されると、日本の半導体産業は出鼻をくじかれてしまうという危機感を募らせた。テキサス魂に日本は翻弄され放しだった。だが日本も黙ってはいなかったのである。

日本におけるIC特許紛争が決着へ

TI社のキルビー特許は1965年6月に公告された。日本の半導体メーカーは一斉に異議申し立てを行なっている。特に日本電気は、この特許はフェアチャイルド社のプレーナ特許に抵触しているとして無効を主張した。

やがて通産省は「TI社の100%出資会社の設立は認めない。50%対50%の合弁なら許す。さらに当初3年間の生産は日本と協議する」という条件のもとにキルビー特許のライセンスを許可してはどうかともちかけた。もちろん、TI社は真っ向から反対した。その後、3年間の特許論争を繰り広げた。その間にICを取り巻く環境は激変している。

ICは当初、産業用コンピュータ向けが中心になると思われていたが、新しく登場した製品「電卓」に大量に採用されたのである。大市場が誕生したことで開発競争が一段と激しさを増しつつあった。ICが産業のキー・デバイスであるという意識がますます強くなると同時に、ここで日本が負けてはならないという意識も強くなってきた。

そして通産省とTI社の対立はますます深刻化し、しかもモトローラ社

も日本進出を計画し始めるなど、半導体を巡る日米摩擦へと発展しようとしていた。一方で、この難題を打開するため、通産省は内密に合弁相手を探し始めていたのである。

深刻な状態がしばらく続いたが、突然、TI社が東通工（東京通信工業、現ソニー）と合弁会社を設立するという発表があった。紆余曲折の末、妥協案として1968年4月、TI社と東通工との合弁会社設立が認められ、その見返りとしてTI社は日本でのキルビー特許の実施を許諾した。

3年後には、契約に従ってこの合弁会社から東通工が手を引き、TI社の100%子会社が誕生したのだ。こうして通産省もTI社もメンツが保たれたのである。ソニー側は盛田昭夫、TI社側はハガチーがこの和解策の実現に貢献したという。キルビー特許は、結局、1967年12月に日本電気などに3.5%という使用料で実施許諾された。

再分割されたキルビー特許も、多くの日本の半導体メーカーがクロスラ

イセンス契約を行なっている。

一方、ノイス特許は1975年7月16日に失効となっている。

ICの登場はトランジスタの誕生に次ぐ世紀の大発明となり、エレクトロニクスに大きな飛躍をもたらしたわけだが、トランジスタの発明にはノーベル賞が与えられたが、残念なことにICの発明にはノーベル賞が与えられていない。コンピュータの開発者への評価と同様に、不思議な気がする。産業へのインパクトの大きさよりも、科学的な内容のほうが重視されているのだろう。

ICの歴史を振り返ってみると、プレーナ技術、Al配線、pn接合分離など多くの基本的な技術がそれぞれ単独に開発されてきた。それぞれの技術を集めてICというかたちにまとめたのがJ.キルビーとR.ノイスだったといえよう。技術的に人間的に複雑な問題が絡み合っていたものの、いったんICが実現されその評価が固まると、ICは堰を切ったように急速に発展し始めたのである。

MOS ICの開発

可能性は大きかったが、克服すべき問題が山積

J.キルビーとR.ノイスによって発明されたICはバイポーラ・トランジスタを基本素子としている。バイポーラ・トランジスタは、高速論理回路に適するなどの利点がある。一方、集積密度を高めることができない、製造工程が複雑で消費電力が大きいという欠点がある。このようなことからユニポーラのMOS ICが注目されるようになった。

MOS ICの基本素子は、ユニポー

ラ・トランジスタ——つまり電界効果トランジスタFET (field effect transistor) である。FETがどのようにして、ICの素子として注目されていったのか。

FETには接合型やMOS型などがある。このなかでMOS型FET（以下MOS FET）によるICが1970年代から開発の中心となっていった。MOSとはmetal oxide semiconductor（金属酸化物半導体）の略である。

1952年、W.ショックレーは、バイポーラ・トランジスタに続いてバルクを用いた接合型FETを考案している。だがこちらの方は主流にはならなかったため、研究は中断されてしまう。

1960年ころからバイポーラ・トランジスタを使ったICが続々と実用化されていった。ところが、高集積密度化、低消費電力化に向けた開発が進むにつれ、バイポーラICはこういった要求に応えられないのではないかと技術者たちは疑問をもち始めている。

このようなときに、ベル電話研究所のD.カーングとM.アタラが1960年、IRE主催の学会で、ICの高集積密度化と低消費電力化を満足させることができるMOS FETを発表し、特許申請している。

このFETの基本的なアイデアはW.ショックレーの考えに基づいたものだったが、うまく実現できたのは、きれいな半導体表面がなんとか得られたことに加えて、良質の酸化膜を半導体表面に利用したからである。W.ショックレーが半導体内部を利用してトランジスタ動作をさせようとしていたのとは違うアプローチだった。

半導体表面を利用することができるようになったのは、バイポーラICの開発のなかで半導体の表面が学問的に研究され、表面の謎が徐々に解明されつつあったからだ。

1959年、フェアチャイルド社は、J.ホーリニーが発明したバイポーラ・トランジスタ用プレーナ技術をMOS FETに導入することにより、非常に良質なSi酸化膜で表面を覆っ

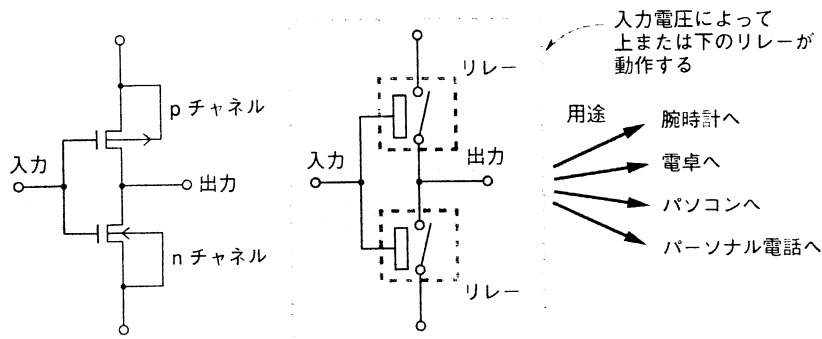


図5 CMOS回路の登場 F.ウオンラス、C.サーの2人（いずれもフェアチャイルド社）が考案した。1963年に開かれた半導体の国際会議ISSCC（International Solid-State Circuits Conference）で発表している。当時は“nannowatt logic”呼んでいた。

たMOS FETを製品化した。

半導体の「表面」問題は、常に技術者の頭を悩ませたが、その悩みが新しいヒントを生み出すチャンスを与えている。つまり一見して混沌とした表面問題は、宝の山でもあることを多くの学者が示したのである。

さて、プレーナ技術を導入したMOS FETは、1962年、まずTI社によって発表された。とはいえ、日本も米国も多くの技術者はMOS FETの導入に消極的だった。その理由は、表面が不安定で劣化しやすく、しかも摩擦で起こる静電気によってゲートが破壊されやすいと考えていたからである。

このなかでMOS FETに情熱を傾けた人が日本にいた。日立製作所の大野稔である。

大野は1人で孤軍奮闘した結果をまとめ、1963年4月に京都で開かれた電気通信学会で「酸化皮膜をもつシリコン表面の加電冷却効果」という題目で発表している。

彼はさらに、MOS FETの特性を向上させるため「サブストレート（基板）の結晶面を<100>とする」

という特許を申請している。日本では評価されなかったが、米RCA社が注目したという。

やがてMOS FETは単体のトランジスタとして製品化された。だがこれを積極的に採用しようというメーカは少なかった。当時主流だったバイポーラ・トランジスタと組み合わせるには不便だったからである。せいぜい、入力インピーダンスが高いことを利用して、入力回路に使われた程度だった。

MOS IC、いよいよ実用化へ

ただし、開発レベルではMOS FETの実用化にメドがつくや否や、MOS ICへと発展させるべく、日本や米国で検討が始まった。バイポーラICと比較して、消費電力が桁違いに小さくなるという魅力があったからだ。ただし、周波数特性が良くなく、信頼性にも不安があった。そこへ、信頼性の問題を裏付けるような事件が米国で起こった。

フェアチャイルド社で突然、生産中のMOS FETの歩留まりが低下するという問題が発生している。MOS

FETにはSiとSiO₂との境界面で構成している部分があり、どうもここで問題が起こるらしいというのだ。

MOS FETは、ICに使えないのではないかという疑惑がまたもや浮上してきたのである。

フェアチャイルド社はB.ディーン、G.ムーア、E.ショーの3人でグループを組み、問題の解決に当たった。この結果、不安定の要因は酸化物に含まれるNa（ナトリウム）であるということが判明した。作業員の汗や指などからNaが混入するのではないかというねらいをつけ、徹底的に人間に対する管理を行なうようにした。

しかし、これだけでは解決できなかった。プレーナ構造の場合、ゲート電極用に蒸着したAlを通じて酸化膜にNaが入るらしい。さらに追求した結果、Alを蒸着するフィラメントにNaが含まれていることがわかった。そこでNa分の少ないW（タングステン）を材料として、電子ビームでスパッタすることにした。

このように徹底的にNa除去対策が講じられた。加えて酸化膜中でのNaの動作を封じ込める方法が検討されている。この対策としてP（リン）を添加したり、酸化膜を厚くしたりすることなどが考えだされた。やがてMOS FETの不安定原因は、次第に解明され、ICを安定に生産できるようになったのである。

MOS ICは、初めは作りやすいということで負の2電源を使うpチャネルMOSトランジスタによる回路構成が主流だったが、その後、正の1電源によるnチャネルMOSトランジスタへと変わった。とはいえ、

MOS ICの応用はイマイチ進まなかったのである。バイポーラICの74シリーズのように、ユーザが使いやすい標準品がなかったことが大きい。当時はまだ「カスタム（その用途専用に設計すること）」という考えはあまりなかった。

MOS FETにとって魔の2年が過ぎ去った1963年ころ、米GM（ジェネラル・マイクロエレクトロニクス）社やTI社が、ようやくMOS ICの標準品を製品化した。ICの規模は、SSI（small scale IC）あるいはMSI（medium scale IC）程度である。

CMOSがISSCCで登場

1963年、半導体の国際学会ISSCC（International Solid-State Circuits Conference）でフェアチャイルド社のF.ウォンラスとC.サーの2人が、pチャネルのMOS FETとnチャネルのMOS FETを組み合わせたCMOS（complementary MOS：相補型金属酸化膜半導体）の論理を発表し、同社はこれを“nannowatt logic”と呼んだ（図5）。

CMOSは、低消費電力でかつノイズ・マージンが大きいなど、それまでのICにはない優れた特徴がある。その後のIC市場でCMOSが主流になるのだが、発表当時はそれほど華々しいデビューではなかった。

問題点として、ICのチップ面積が大きくなり、製造工程が複雑になることが指摘された。つまりICが高価になるということだ。現在とは状況が違っている。そのころの設計ルールは3μm～5μmであり、ICの設計では可能な限り素子数を減らすことと、素子面積をできるだけ小さくす

ることが望まれていた。たとえば、インバータでみると、バイポーラICならばトランジスタ1個と抵抗器で構成できるのに、CMOS ICではMOS FET2個と素子間の分離領域が必要となるのである。

加えてCMOSは、動作速度が遅いため、高速にしようと思うと充放電電流が流れるため、消費電流が大きくなってしまう。さらにラッチアップ（熱暴走）を起こしやすいといったことなどから電気的特性にも不安があった。

だが低電圧動作可能で（最低1Vから動作）、かつ低消費電力（10nWくらいから動作）^{注7）}という魅力は欠点を遥かにしのぐ魅力だった。なにしろ単3電池1本で時計を数年間動作させ続けられるという潜在力をもっているのである。

CMOSの基本構成は、プレーナ技術でpチャネルとnチャネルのMOS FETを組み合わせるというものだ。これでNOT、NOR、NANDなどの論理回路を構成できる。

早速、1967年のISSCCでRCA社のA.ラップは、CMOS ICによる標準論理ICの4000シリーズを発表した。当初は“Complementary Effect Circuitry”とも呼ばれていた。その後、TI社の74シリーズと類似したシリーズ構成を発表している。

このころから日本では沖電気工業や東芝がCMOSの標準論理ICを発表し、生産を始めている。1970年代になると標準論理ICからカスタムICへ、という動きが活発になってきた。CMOSのカスタムICは、カメラの露

注7）当時のバイポーラICは、1mW～10mW程度である。

光回路や、デジタル腕時計、電卓に次々と採用され始めた。その後、CMOS技術は、マイクロプロセッサやメモリに使われ、大きく成長していくのである。

いまやICのほとんどがCMOS構造となっているといってもよいだろう。なんとといっても高集積密度化、低消費電力化に向くため、当面はCMOS以外の構造は考えられず、今後CMOS ICはさらに発展するだろう。

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』, ダイアモンド社, 1981年.
- 25) 馬場玄武, 『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』, ダイアモンド社, 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』, 昭見堂, 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, xxx.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。