

半導体の歴史

— その9 20世紀後半 集積回路への発展(4) —



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

日本における IC (集積回路) の発展

前稿に記載したように、1959年にテキサスインスツルメント社のジャック・キルビーがICをIRE (Institute of Radio Engineering, IEEE の前身) で発表し、1961年にロバート・ノイスが率いるフェアチャイルド半導体社からSiプレーナー技術によるICが世界で始めて販売されることで半導体の応用はトランジスタからICへと進化してゆく。同一Siチップの上に複数のトランジスタや抵抗、容量などの素子が形成され、その上に絶縁膜を介して設けられた配線で結線されることで所望の電子回路が得られる。1947年の点接触トランジスタの発明、1951年のPN接合型トランジスタの発明に続くこれらの発明と製品化がその後のSiデバイス隆盛期の幕開けとなる。その後の発展はSiチップ上のトランジスタ、配線などの素子をスケールリング (縮小) し、ひとつのチップ上に集積できる素子数を増加させる事でIC → LSI (大集積回路) → ULSI (超高集積回路) へと大集積化の道を辿ってゆく。その為の微細化技術の進歩をSi結晶ウェーハ上で際限なく具現してきた60年間の結果が今日の集積回路を格段に高性能化し、その結果として新たな電子機器を生み出し、今日の電子社会を実現している。その原点がトランジスタとICの発明に集約される。60年前のバイポーラトランジスタのベース幅が50 μm (マイクロメートル) であったが、今日開発されている先端デバイスMOSFETのゲート寸法が28nm (ナノメートル) であり、約2000分の1に縮小されている。素子はSiチップ上に二次元に配置されるため素子サイズは4百万分の1に縮小され、数ミリ角のSiチップ上に数百万から一千万個オーダーの素子の集積回路が形成されるに到っている。また、重要なことは素子をスケールリングすることで一個の素子を駆動する消費電力も小さくなり、信号伝達速度も速くなることである。これらのスケールリングメリットの詳細は後の稿で記載

するが、これらの効果によって今日では60年前では考えられないほどの大集積化、高性能化を低消費電力の元で達成されている。このスケールリングの出発点となる原点がこれらの発明にあり、パソコンや携帯電話などによるインターネット通信などや電子機器を中心としたソフト社会に世界の生活様式を変えるきっかけとなる極めて重要な発明となる。

キルビーの発表に多くの日本における半導体研究者が衝撃を受けるとともに触発され、自分達でもICを作ろうとする。以下に日本におけるIC開発の一端を大内淳義、西澤潤一共編『日本の半導体』、志村幸雄著『にっぽん半導体』の両書を参考にしながら振り返ってみる。

日本で最初にICの試作に取り組んだのは、電気試験所の垂井康夫と伝田精一である。垂井が提案し、伝田が試作を行なっている。Siが良いことは判っていたが製法の情報を持たず、トランジスタとしての加工実績があるゲルマニウム (Ge) 基板を用いて試作に当たっている。Geのチップ3個を1センチ角の樹脂に組み込んだマルチチップ構造のICである。2個のチップにはトランジスタとコンデンサが一個ずつ、残りのチップには4個の抵抗が集積され、チップ間はハンダ付けにより結線されている。1960年12月に完成し、これが国産初のICとなる。次いで東京大学とNECのグループがGe基板上に2個のバイポーラトランジスタと1個の抵抗を集積したNORゲート回路のICを1960年末から1月17日前にかけて、ほぼ電気試験所と同時期に完成させている。トランジスタ間にスリット (溝) を超音波加工で設けることで絶縁化を図っている。これに次いで三菱電機が1961年の2月下旬に『モレクトロン』の名称で発表している。Si基板を用いているが、トランジスタ自体はゲルマニウムのチップ上に作成し、Siチップに組み入れたものである。これらのICは米国での発表や製品化に触発されて作成したものであるが、商品として使うと直ぐに不良品になってしまうような代物であり、ノイスらの技術に到達し実用にたえるまでに更に2~3年の歳月を要する。最初に完全なSiプレーナー技術でICを実現したのがNECの長船廣衛らのチームである。以下にICの時代に入り、一躍世界の半導体をリードすることになる日本電気 (NEC) の半導体事業の発展を辿る。

NECの半導体の基礎を築いたのは長船である。長船が半導体に最初にふれたのは1917年、小学生の時であり、前述



長船廣衛

したソニーの創立者井深大と同じようにラジオ少年で、方鉛鉱の粒に金属針を立てて手作りのラジオを作り楽しんでいる。大学2年の1940年（昭和15年）に量子力学を元にした固体物理（結晶中の電子状態の理論）に出会っている。翌年末に繰り上げ卒業生の一期生として日本電気に入社し、ブラウン管用の蛍光体の改良研究に従事し、硫化亜鉛やケイ酸亜鉛などの蛍光体精

製の経験を得て、終戦後の1948年にベル研のトランジスター発明を知り、Si ダイオードやGe ダイオードなどの調査を始めている。トランジスターを含む文献をむさぼり読み、翌年の9月に開かれた NEC 本社での技師長を中心とする『トランジスターとダイオード』に関する方針会議を開く。Ge の材料が手に入らないため、Si でマイクロ波ダイオードを作ることで腕を磨き、Ge が手に入り次第トランジスター作成に取り掛かることを提案し、自ら担当することになる。3ヶ月後のクリスマスにはSi のインゴット作成に成功し1950年6月にはマイクロ波ダイオード試作に成功している。この間の試作実験に当っては当時の日本の研究者が漏れなくそうであった様に研究費はなく、全て自製か廃品となった機械を修理して研究を進めている。また、同年8月に NEC の小林正次がベル研試作の点接触型トランジスターを持ち帰ったものを測定し、初めてトランジスター特性を確認している。1951年に漸くGe の結晶が手に入るが、それまで進めていたダイオードの注文が入り込み、さらにはダイオードの湿度劣化問題が起きたことでトランジスター研究には中々手を出せない状態になる。1952年にベル研の『トランジスター・テクノロジー』を入手でき、文部省から「接触トランジスターの試作研究」の名目で補助金も得られることで漸くトランジスター研究に再着手している。この頃から設備の1部も輸入できるようになる。1956年まで点接触型トランジスターを検討し、その後PN接合型トランジスターの検討に移行している。この頃、日立製作所などの競合会社がRCA、ジェネラル・エレクトリック社（GE）、フィリップス社などと技術提携を以し量産体制を進めている情報が入るにつれ、危機感を覚え1957年に米国半導体メカや学会の視察に出かけている。これらの視察の中で多くの技術的知見を得ると共にベル研のブラッティンやフェアチャイルド半導体社のノイスらと交友を持つ。1958年までにGe のPN接合型トランジスターの種々の技術改良に目処をつけ、量産化を図る。これらの量産はSi トランジスターに切り替わってゆくことで1963年頃が最盛期となる。Si トラン

ジスターの開発では1957年の一度目の出張で酸化膜をマスクに使った選択拡散法の情報を手に入れ翌年の秋にこの手法の開発に着手している。1958年末にGEと技術契約が結ばれ、その年の末から1959年にかけて2ヶ月間、第1回技術チームとして鈴木政男（生産設備の自動化を担当）、川路昭と3人で米国のシュラキュースに出張する。長船には2度目の出張でGEの他モトローラなど数社を回り、各社がメサ型トランジスターの開発に熱中しているのを見て、翌年の2月、3月にはそれぞれGeメサ型トランジスター、Siメサ型トランジスターの第一号を完成させている。GeとSiのどちらに将来性があるかを見るために二股をかけての開発であり、1960年半ばでSiでの作りやすさを納得し、Siに切り替えている。この年はフェアチャイルド半導体社のノイスが来日し長船を訪ねている。ノイスの目的はNECの技術契約や特許状況の状態を調べ、NECに対してプレーナー特許を売り込む事であった。その翌年秋に再び訪ねてきて「日本の通産省ぐらい話の判らない官僚はいない。自分は日本への工場進出はあきらめたから、NECがプレーナー特許を使い、フェアチャイルド半導体社が持つ特許の権利を日本でメンテナンスしてくれないか」と申し出る。長船はノイスを当時の常務小林宏治に会わせ、前向きに検討することにし、約1年後特許料4.5%で専用実施権をとり、その代わり日本各社や輸入品に対してもフェアチャイルド半導体社の権利を守ることになった。そして、長船は1962年までにSiプレーナー型トランジスターの技術やエピタキシャル成長技術をものにしている。後にNECは国内他社にプレーナー特許を5%の特許料で使用契約することを持ち掛け不評を買う事になる。日立製作所はこの特許の対抗策として後述するLTPプロセスを完成させることになる。

この様な状況の中で長船がICの開発に乗りだしたのは1960年のことである。この時点ではメサ型トランジスターができていなかったため、成長型トランジスター（前稿）とバルク抵抗を使ったモノリシックのDCTLであった。前記の東京大学とのIC共同試作はこれらの過程での1960年末から1961年初めにかけてである。東京大学教授の柳井久義らとの共同試作はCR発振器やTTLなどであったが、コレクタ抵抗や蓄積時間 τ_s が大きく高速ロジックに使えるものではなかった。1962年には長船らのチームはNEC独自にAND、NOR、フリップフロップ、インバータなどの本格的なバイポーラのモノリシックIC約10品種の開発を成功させている。社内的にはICの重要性が理解されずIC開発への理解が少ないため、開発課の黒沢敏夫を中心とした数人が拡散トランジスターの試作設備を流用して試作し、彼らは残業と徹夜を重ねて完成させている。この時に開発したNORゲートのチップ写真が米国の専門誌『エレクトロニクス』の1962年7月27日号の表紙に大きく掲げられている。また、折角試作に成功しながら適用製品がなく、需要の掘

り起こしを手がけ、苦勞しながら社内の電子交換機への適用を果たしている。この交換機は日本におけるIC採用の第1号機となる。NECは長船や黒沢らのこれらの努力により、IC開発への技術力蓄積が1962年までに完了していたが、ICの本格開発に社内の機運が高まるまでに3~4年を要している。1963年になると米国では従来のRTLに加えて、DTL、TTL、ECLなどの論理ICが開発されるようになり、NECでも早速DTL、TTLへの試作に取り掛かり1964年初めには製品化の目処をつけている。

IC開発への機運を高めたのは黒船と同じように米国からの脅威であった。1964年になると、IBMがコンピュータ360にICを使うと発表し、IC時代の到来を広く世界にアピールする契機となる。更に米国では半導体各社が宇宙開発などの軍用の需要に支えられ、フェアチャイルド半導体社(FC)、ウェスティングハウス(WH)、TI、モトローラなどの各社は需要を見越し、IC量産体制を築き出していた。この年にTIは通産省に対して100%自己出資の半導体会社を設立したいと申請してきた。通産省はTI進出を認めることは日本国内のIC産業が育成される前に息の根を止められるとの危機感からTIの申請を認めることを4年後の1968年まで先延ばしにする。この様な状況の中で長船や黒沢らはICの本格的な事業に踏み出すためにはどんな問題があるかを連日の様に討議し、大規模な人的リソースと投資が必要であるとの結論に到り、上司への働きかけを行なって行く。1964年のこの年にDTLのシリーズを「ウエスコ」に展示し、漸くコンピュータへの実用化の目処をつけるが、長船は健康を害し半年入院することになる。入院期間中、見舞いに来た同僚や上司にICの事業化を訴えるが効果が上がる事は無かったが、半年後に退院し、1965年5月に常木誠太郎を課長とした固体回路課を発足させている。これらの状況に到り、NECでは漸く1965年7月に当時のNEC社長である小林宏治が「IC事業はエレクトロニクス事業の根幹となり、当社にとっても重大な意義を持つようになる」としてIC政策会議を発足させている。1966年(昭和41年)11月に小林宏治は社内を集積回路事業部を発足し、「これからICの時代になると、半導体を知っている者とそれを使う回路屋がペアになるんだ」との考えから、長船と大内淳義の2人はこの事業部に集められる。トランジスターの時代と異なりICになると1つのSiチップ上に回路を構成するようになるため、回路の設計者は回路特性を精度よく作るためには半導体の開発者が開発するチップ内の素子(トランジスター、抵抗、容量など)の電気的特性を正確に把握する必要があり、両者にはそれまで以上の緊密な関係プレーが要求されてくる。

長船は大内より2歳年上、前述のごとく入社以来半導体屋であり、大内は半導体を使う立場の回路屋である。長船がNECの半導体技術の基盤を築き、大内が世界一の半導体

会社へ成長させてゆくことになる。大内は1942年にNECに入社し伝送通信事業部の設計部門にいたが、1954年に米国製のトランジスターが秋葉原に入荷したらしいと聞いた時からトランジスターを使った回路を組む事に興味を持ち始め、実際に秋葉原で、1個3000円で数個のトランジスターを購入し、幾つかの回路を作り始めている。その後、防衛庁関連のソナー開発など

を担当させられながらもトランジスター回路への興味は忘れられず、正式な業務とは関係なく、続けてゆく。その過程で負性インピーダンス変換器を作り、これで学位論文まで取得している。長船がNECで最初に作成した接合型トランジスターも大内が最初に実験しており、トランジスター応用技術のスペシャリストとも言える。根っからの回路屋なのである。集積回路事業部の中で長船は半導体事業本部長代理、大内が集積回路設計本部長となる。半導体開発の実質的な技術的リーダーは長船である。大内は翌年には事業部次長、二年後には事業部長となり陣頭指揮をとり、この後にはNECの副社長、会長を歴任し、応用分野出身でありながらNECを半導体事業で世界トップメーカーに導く。

1966年の集積回路事業部の発足が急激にIC事業を拡大させてゆく。1961年に50個の生産から始めたICの生産量は1962年から1964年までは1万個オーダー、1965年に3万個であったものが事業部発足の1966年には33万個、1967年には290万個、翌年には1000万個を超過し、1970年には3998万個へと大幅な伸びとなっている。売上高も1965年には5500万円程度のもので1970年には112億円を超過するまで成長している。NECはトランジスターの開発ではマイクロ波用Siダイオードへの拘りから他社に出遅れたが、1965年までの長船らの地道な努力と1966年の集積回路事業部による事業化体制の構築によりICから世界をリードしてゆく半導体企業へと変貌してゆく。

NECにおけるトランジスターからICへの進歩過程で忘れてならないのは半導体製造設備の自動化、高性能化技術の発展である。この発展が伴ったからこそ可能になったIC事業と考えられる。この生産設備の開発を先等に立っ



大内淳義



鈴木政男

を進めたのが先に述べた長船の GE との技術提携で第 1 回技術チームとして出張に同行した鈴木政男である。鈴木は 1943 年に NEC に入社し、1957 年当時は電話交換機のリードリレー製造装置開発に従事していた。この年の夏に、この装置のタングステンと銀の接合金の溶接に WE からのレポートにある衝撃溶接法を再現すべく毎日寝る暇も無く熱中し、漸く成功し喜び勇んで上長に報告した時に、上長から「玉川の半導体開発部に転勤」を告げられたのが、半導体製造設備が鈴木のリワークになるきっかけとなる。鈴木は 1957 年に玉川の半導体開発部に転勤してからも機械屋として 30 余年間をトランジスター、IC、LSI の量産技術の発展に尽くし、NEC の半導体事業を支える。

鈴木が川崎市にある玉川工場に向うと製造ラインには白衣を着た女性がずらりと並び、手にピンセットを持って小さなゲルマニウムの小片（ペレット）を動かしている風景である。鈴木の得意とする機械らしきものはどこにも見当たらない。前の職場とのギャップに呆然としている鈴木に背後から「このトランジスターの製造工程を機械化してもらうために君に来て欲しかったんだよ」とニコニコしながら声をかけたのが電子管工業部長の大澤寿一である。最初に手がけたのが合金型 Ge トランジスターの選別工程の自動化である。このトランジスターの性能を決めるベース幅がペレット厚さに依存するため、この厚さが電流増幅率の目安となる。この仕分けを自動化することが鈴木最初の仕事となる。機械好きで、且つ諸々の現象好きの鈴木は専用自動機を立ち上げる過程で装置圧力による結晶欠陥の問題などを微妙な問題を片付けながら装置を完成させた。この装置は日本、米国に 1 台 120 万円で 600 台も売れている。

1958 年の暮れに、先に述べた GE 社出張を言い渡され長船らと GE のシラキューズ工場に行く。この出張で GE のみならずベル研などにも行き、米国での半導体製造工程を前工程から後工程まで視察し、機械化が格段に進んでいる様子を目の当たりにする。日本での鈴木らの手法はインジウム球をピンセットでつまんで Ge ペレットに両側からアロイ治具に 1 個ずつ挿入し、合金化していたが、GE ではインジウムのテープを両側よりプレスし、その円型パンチの先端に付着したインジウム円盤をそのままペレットに圧着し、アロイ炉にクレイドルごとを送り込む。そして切断、分離し、測定選別器で電流増幅率の階層別に分ける完全自動装置である。鈴木は GE のこの自動ラインの図面、仕様書、選別規格、仕様治工具などを徹底的に調べ報告書とともに日本に送付している。この装置で作成した PNP トランジスターが NEC の主力製品として活躍する。ベル研ではホトリソグラフィの実用化の前ではあるが Si プレーナー方式での酸化膜のホトエッチング工程の情報などを得ている。鈴木にとっては拡散型 Si トランジスターに始めて出会った経験であった。これらが後の Si プレーナー IC 製造設備を構

築してゆく段階でのベースになる。

1960 年代から始まった Si プレーナー型 IC の製造において、鈴木の一貫した指標はパターン製法の基本となるホトリソグラフィと、外部へのオーミックコンタクトを形成するボンディング手法の工業化への努力となる。ホトリソグラフィでは感光するための光を当てる装置が無いために、自分の給料をはたいてニコンの高性能カメラを買ってきて手作りしては失敗する経験を得ながら、1960 年に米国デビットマン社のホトリピータ第 1 号機を購入する。輸入する時に入関手続きで 35% の関税をかけられそうになり、3 時間に渡る交渉の末に半導体製造以外には使用しないとの限定で関税を免れたりしている。この時の解像力は実用パターンで 5 μm 程度であり 1966 年当時になると 1.5 μm 程度まで進化している事が判り、あわてて注文している。この解像力の急速な進歩はその後年々続いて行き、微細化による IC の高集積化を牽引してゆく。1948 年に点接触型トランジスターのベース幅が 50 μm の針間隔で決められていたが、PN 接合型トランジスターでは拡散層間の距離をパターンニングの精度限界とその後の熱処理での拡散層の広がりによって決められるために解像力の進化に伴いデバイスのスケールリングが可能になる。12 年後の 1960 年には 5 μm 、更に 18 年後の 1966 年には 1.5 μm まで実用パターンサイズが縮小できるようになったのである。

一方、ボンディング技術では 1964 年までは自動化に適したボンディング手法が検討され、連続的に金線が使用できる NTC ボンディングが選ばれてくる。その上で鈴木らは金線を繰り出してその先端部でボール状の金をシリコン表面のアルミニウム電極に圧着するキャピラリの改良に苦勞する。キャピラリはガラス製で、金線表面の汚れ、粗さがキャピタル内面に付着して金線が切れ、詰まるのである。このため、相当な頻度で交換せざるを得なく、輸入では間に合わず、壊れた温度計の水銀を抜き、トーチで伸ばして所用の毛細管になったところで切断して使用していた。キャピラリの消耗が週当たり 700~800 本近くになり、工場中の壊れた温度計を集めても間に合わなくなる。1965 年に日本電気真空硝子（株）にキャピラリ製作現場を作って供給を始める一方、住友金属鉱山に伸線方式と、焼鈍、洗浄方式の改善を行って貫い完全対策することで、キャピラリ製作現場は 1 年も経たず閉鎖する。

1966 年に日本電信電話公社電気通信研究所（通研）の電子交換機 DEX-2 用の IC 開発研究にワーキンググループとして参加し信頼性の高い IC を求められる。強制劣化試験で 100°C、100%湿度の煮沸を行い、封止テストや高温低温の温度サイクル試験、過酷な環境試験など、通研が次々に出してくる試験には鈴木らを「過剰品質だ」と憤慨させる。しかしながら、その後米国メーカーが東南アジアで組み立て、低価格で輸入してくる電卓用 IC が事故を起こすようにな

る。実際には米国メーカーが東南アジアで組み立てた物の不良はナトリウムイオンなどを封じ込めてしまい、トランジスター動作の不安定性を招いたものが多かったが、通研指導で行なわれた日本製品の品質化は世界に認められてゆく。

鈴木らはこの品質化の一端としてボンディング部分の劣化耐性を向上させるためにボンディングワイヤーを金線からアルミニウム線への変更、その過程での超音波ボンディングプロセスやパッケージ構造の最適化を行なっている。金線ではICを200℃で18～96時間高温放置すると接続部に紫色の金・アルミニウムの金属化合物（パープルブレイグ）が形成され、この部分が硬く、脆く、壊れやすいため、断線の大きな原因となったのである。通研の要求には応えられないものではなかったため、アルミニウム線とアルミニウム電極との接合にするために、超音波ボンディングの採用を決定し、新しいパッケージの試作、超音波ボンディングの仕様検討を行い悪戦苦闘の中から最適仕様を見出している。

鈴木は1979年に九州日本電気の専務取締役役に異動し、その後社長、会長を歴任してゆく。この中でLSIの量産技術育成の先頭に立ち、数々の改良の指揮を取り、品質の向上に努める。その中でも1981年に熊本大学から入社してきた江口恵子を「ゴミ子」と名づけてクリーン化技術に専念させ、

クリーン技術の構築に力を注いでいるのはユニークである。「ゴミ子」は電子顕微鏡で化粧品がIC酸化膜を破る事を示し、時間とともに浮遊塵が大きく変わるデータを示し、水と歩留りの関係を明確に説明するなどで実績をつくり、精密後学会の学会にて「微細加工における洗浄度の挙動の一例」として発表している。MOS型ICは次稿にて説明するが、「ゴミ子のレポート」はMOSトランジスターのゲート酸化膜の耐圧がシリコン表面の洗浄度に左右されることを示す。これらにより、LSIを量産するクリーンルームの無塵化が単なる「ゴミ」対策ではなく、汚染制御技術として昇華されてゆく。

（文中、敬称を略させていただきます）

参考文献

1. 工業調査会発行 大内淳義、西澤潤一 共編『日本の半導体』
2. ダイヤモンド社発行 志村幸雄 著『にっぽん半導体』

次回

第11回 半導体の歴史 —その10 20世紀後半 集積回路への発展(5)—