

日本の半導体技術とコンピュータ

垂井 康夫
武田計測先端知財団

コンピュータ産業に影響を与えた日本の半導体産業技術を概観する。なかでも1976～79年度にわたって行われた通産省の超LSIプロジェクトの一環として、同プロジェクト技術研究組合の超LSI共同研究所で開発された超LSI製造装置などの成果は1980年代における日本半導体産業の躍進に大きく貢献した。なお超LSIプロジェクトの10年前に行われた通産省大型プロジェクト「超高性能計算機の研究」は超LSIプロジェクトの適切な準備段階でもあった。日本のLSI産業を発展させたのは電卓であった。マイクロプロセッサの発明は電卓用万能LSIという構想による日本のビジコン社によるフェアチャイルド社への注文から生まれた。これらの歴史を概観することにより、今後の日本のプロジェクト開発などに役立つことがあれば幸いである。

概況

日本の半導体産業の歴史における超LSIプロジェクトの影響はきわめて大きかった。超LSIプロジェクトの共同研究所は1976～79年度の4年間にわたって活動し、その間1980年代以降のリソグラフィの主力となった光ステッパ、そのマスクの描画および直接描画に用いる電子ビーム描画装置などの技術を開発した¹⁾。

これらの技術は直接および間接に日本の半導体産業の発展に寄与し、1980年代における日本の半導体産業の黄金期をもたらした。しかし、この日本の急進は米国をはじめとする世界各国に共同研究の効果に対しての認識を与え、各国で共同研究が開始された。米国における主な例は図-1に示すVHSIとこれに続いたSEMATECHなどである²⁾。これら半導体プロジェクトは欧州およびアジアでも行われた。これに加えて米国からは日本で消費する半導体デバイスの20%を外国製とするという不条理なルールを押しつけられた³⁾。一方国内の半導体デバイスに関するプロジェクトは約15年間の間行われなかった。これらの事象の結果として日本の半導体デバイス産業は低

下の一途をたどり、その将来を危ぶまれている。

ことここに至ってようやく、図-1に示す多数の半導体デバイスに関するプロジェクトが行われることとなってきた。

超高性能電算機プロジェクト

このプロジェクトは超LSIプロジェクトに先がけること10年前に行われ、その基礎を築いた。

軍需がない日本では、ICの応用はまず民需から始まった。その一例は後に述べる早川電機（現シャープ）が発表したIC電卓であった。しかし、軍需を中心とする米国のIC産業とその技術の進展はきわめて急速で、ICの集積度は年率倍の速度で増大し⁴⁾、LSIの時代が予見されるようになってきた。このことはデジタル回路の大規模集積によってコンピュータが大きく進歩することを意味し、そこでICが果たす役割の大きいことが明白となってきた。

このような見地から1966～71年度にわたって計画されたのが通産省の大型プロジェクト「超高性能電子計算機」であった。

電気試験所での研究

「超高性能電子計算機」プロジェクトの電気試験所での研究責任者は電子計算機部長・野田克彦・西野博二であり、筆者はLSIの部分を担当し、次世代のデバイスの重点としてMOSトランジスタに重点を置いた。このプロジェクト以前の研究でMOSトランジスタは高い可能性を持っていることが明らかになっていたが、絶縁膜内の電荷の問題などで実用化が遅れていた。筆者はその分布の理論と実証などを行い、日本で最初のCMOSの設計と試作などを1966年までに終わらせていた⁵⁾。このプロジェクトではその成果をDSA MOSトランジスタ⁶⁾、不揮発性メモリなどに発展させた⁷⁾。

さらに、製作技術としては将来のICの高速化と高集

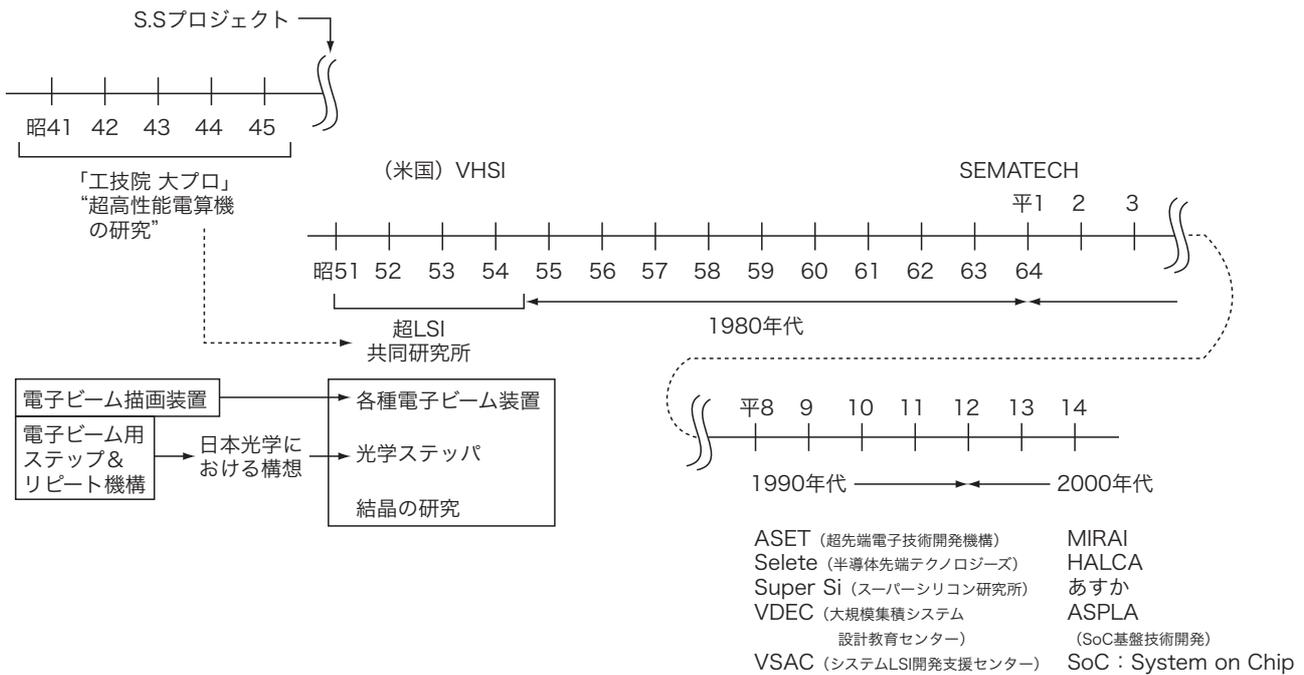


図-1 半導体プロジェクトの流れ

積化に備え、光の限界を超えた微細化と選択的な配線の必要性から筆者は伝田精一、馬場玄式などとともに1967年、世界で初めてのベクタスキャン電子ビーム描画装置を開発した⁸⁾。この装置は解像度 $0.7 \mu\text{m}$ 、位置精度 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ で、当時これを用いて $1 \mu\text{m}$ のチャンネル長を持つMOSトランジスタを直接描画で試作することができた。この描画は1個ずつ、ステップ&リピート方式で次に進められる。その位置を正確に定めるためにレーザによる位置測定法を導入し、この方法が後の光ステッパ開発の基本方式となった¹⁾。この電子ビーム描画装置の技術はその後10年を経て始まった超LSIプロジェクトで脚光を浴びることとなる。

メーカーへの研究委託

最初の仕事は目標の設定と、基本とするデバイスの決定であった。目標としては論理およびメモリの両者についてLSIレベルの開発をしようというものであったが、筆者の印象に残っている2つの重要決定は、その1つがメモリにnチャンネルMOSトランジスタを採用したこと、他の1つは論理回路の性能を単位ゲート当たり遅延1ns、消費電力1mWと決めた点であった。

この目標は当時の技術レベルを超えたものであった。さらにこのプロジェクトでは最近ほとんど行われないコンペティション方式をとった。すなわち上記の目標仕様を示して複数社に発注し、毎年試作品を提出してもらい、電気試験所の筆者らの研究室で測定評価を行って、1年ごとに社数を絞っていったのである。

この厳しさによって、企業の活力が最大限発揮されたものと考えられる。最近のプロジェクトではこれに対応するような厳しさが足りないような気がする。

とにかく、各社の努力の結果、最後に残ったのは、メモリについては、日本電気に委託し製作されたnチャンネルMOSトランジスタを使った144ビットSRAMで、アクセス時間40nsという高速性能のものであった。このMOSトランジスタに関する先見性は、我が国のMOS-ICの立ち上げに非常に大きな貢献をしたと評価されている。

一方、論理回路に関しても1ns、1mWを目指して各種の努力が進められたが、結局日立製作所に委託し、製作されたハイブリッドLSIがほぼ目標の性能を満足し、「超高性能電子計算機」の試作機に採用された。このLSIは最大10個のECL・ICチップを、2層配線を施したアルミナセラミック基板にフェースダウンボンディングにより実装したものである。

日本電気に委託開発されたnチャンネルMOSメモリはその後電電公社電気通信研究所が富士通、日立、日本電気3社の協力で開発したデータ通信用大型計算機DIPSの最初のモデルに採用された^{3), 12)}。

超LSIプロジェクト

通産省の超LSIプロジェクトによる共同研究所は1976年に設立され、1980年に解散したが、その準備は前年ころから始まっていた。なぜ超LSIがプロジェクトとして浮上してきたかという、1つにはLSIの将来の形とし



ての見通しもあったが、もっと直接的な動機があったと思われる。その1つはCDCとIBMとの独占禁止法訴訟の過程で、CDCがIBMに証拠として公開させた文書の中にフューチャシステムと称する次世代コンピュータの計画があり、これに高集積のメモリを使う記述があったというのである⁹⁾。

その他いろいろな噂もあったが、いずれにせよICはその発明以来、その集積度が大きくなるに伴って、エレクトロニクス装置の概念を次々と書き換えてきた。その集積度がチップ当たり100万個くらいになるとコンピュータの大きさ、性能、価格が大幅に変わって、使われ方、普及度も飛躍的に変わることが予測されるようになってきた。

このようなことから、これを実現するための微細加工技術などを関係企業が協力して研究することが、この方面の関係を集めた日本電子工業振興協会の委員会(委員長:田中昭二)によって提案されたのである。

このような提案が基礎となって、超LSI技術研究組合が結成されることになった。構成会社は、汎用コンピュータを生産している富士通、日立製作所、三菱電機、日本電気、東芝の5つの会社であり、これらが通産省の補助金を得て、超LSI技術を研究開発しようというものである。

この研究組合には、日頃はライバル関係にある会社からの研究者を1カ所に集めて実質的な共同研究をするという前例のない共同研究所を作ろうという計画があった。このような新しい構想であることから、通産省の電気電子機器課の下に、共同研究所でのテーマと、この5社を富士通・日立・三菱と日電・東芝の2つのグループに分けたグループ研究所の研究のテーマ、その相互関係などを検討する小委員会を同年10月に設置することになり、筆者がその委員長を命ぜられた。

実際に集まってみると、意見はまとまりそうにない。最大の問題はノウハウで、先進企業は共同で研究することによって、ノウハウが流出することを恐れるからである。このような場合は、高価な輸入装置などを購入して、時々集まって皆で評価したらどうかという案も出る。これなどは果たして研究開発といえるかどうか疑問である。もちろん、真面目に力を合わせた共同研究を考える企業もあったが、とにかく最初は、研究的性格でないものに金を使うような案が多く、しかも議論はなかなかまとまらなかった。

超LSI共同研究所のテーマの選定

しかし筆者は、各社からの人が実際にフルタイムで集まるということ自体、貴重な絶好の機会であるし、そのやり方の面で新しい面を見出せるのではないかと。またこ

れら特徴ある各社の人々のベクトルをうまく重ね合わせたら、従来はばらばらでできなかった何か新しいことがきっとできるのではないかと考えた。そこで昔考えた基礎的・共通的という言葉思い出した。昔は学問の定義としてこの言葉を考えたが、この言葉自身も広い応用性を持っていると考えた。そこで共同研究所でのテーマの選択に、この基礎的・共通的という言葉を取り入れることにした。すなわち、将来の超LSI技術発展の根源となるように、基礎的でしかも各社に共通して役立つものを選びたいというのである。この言葉が4年間を通しての標語となった。

このテーマの選び方が各社の協力を可能にする面を持っていたと考えている。すなわち、基礎的であることから、それまでのノウハウを持ち込まねばならない必要が少なくなる、また共通的であることから各社が関心を持って研究に期待してもらえたとし、協力してもらえたと考えている。

ここで強調しておきたいのは、現在でこそ複数の会社が集まって共同研究を行うことが当たり前になっているが、この超LSI共同研究所以前にはそのような例はなかった。基礎的・共通的という標語のもとに共同研究を完成させたが、その間は創造の努力の連続であったということである。さらにこのプロジェクトの4年間という短い期間も記録的である。4年間で成果をまとめるという厳しい時間的な制限と、超LSIの生産に役立つねばならないという目的と、基本的といっても学問的というより超LSIの生産に対する基礎という点から、基本的な微細加工に関する製造装置の開発を第一の主要なテーマとして選んだ。超LSIにおいては、トランジスタなどすべてを小さくすることが第一に必要なからだった。

第2のテーマとしてはシリコン結晶を取り上げた。その理由は、トランジスタを小さくするとともに、シリコン結晶の小さい欠陥が問題となるし、より多くのトランジスタを集積するには、シリコンチップの面積も大きくしなければならない。この2つの実現には、より良質の結晶が必要になるからである。結晶に関するいま1つの問題は、ウェハのそりである。そりが大きいと、パターンを描画あるいは転写するときにピンボケになる。その他の分野、すなわち、プロセス技術、試験技術、デバイス技術などについては、それらのうち基礎的・共通的分野のみを選ぶことにした。

良い人材の確保と編成

上記の委員会において大筋のテーマが決まったが、次の大きい問題は人材の確保であった。いかなる組織も、そこに集まる人によって成功、不成功は決まるので各社



にいろいろとお願いした。室長候補についてはあらかじめお目にかかる機会を作った。これについては通産省電気電子機器課がいろいろと手配してくれた。5つの会社から1名ずつ室長をお願いしたが、室長以下の人選は各社からの室長が自分の会社から良い人を連れてくるように努力してくれた。良い人材は良い仕事をし、会社へ復帰するとき、良い人材を出してくれた会社には良いフィードバックがあったと考えている。

次の問題は、5社からの室長をどのテーマに割り当てて、研究所の組織を作るかである。当時、電子ビーム描画が最重要と思われていたので、すべての会社がこれを扱う微細加工技術の研究室を希望した。しかし、それでは決められないので、微細加工技術の研究室の室長については、それまでに電子ビーム装置製作に実績のあった3社に絞ることとし、結晶技術の室長は比較的基礎的分野であるので電子技術総合研究所からの出向者とし、プロセス技術の研究室と試験評価とデバイス技術の研究室の室長は会社からの出向の方をお願いすることにした。このようにして、各社の希望と与えられたテーマとの調和をとりつつ各社の経験を生かし、その後の協力を十分に得られる体制ができたと考えている。同時に微細加工技術の3つの研究室ではそれぞれ異なる形式の電子ビーム描画装置を試作することにした。結果として、共通の部分ではできるだけ協力しながら、独自の部分では企業の力をフルに発揮した競争が行われた。この点も成功の1つの要因だっただと思っている。

研究員の配置

研究テーマおよびその共同研究所とグループ研究所による分担については、すでに前年の委員会で図-2に示すように決まっていたが、いよいよこれを具体化しなければならなかった。研究テーマへの研究員の配置において配慮したのは、各社からの出向者をどの程度混在させるかについてであった。すなわち共同研究の実を上げること、研究のやりやすさのバランスである。

すなわち、図-3に示すように研究が討論と小規模の実験で進められるようなテーマ、たとえば結晶の研究などでは各社から同じくらいの人数を集めることによって衆知を集め、各社の研究のベクトルを合わせることができると考えた。

一方、大きい装置、たとえば電子ビーム描画装置の建設などでは、出向元での製造技術を十分に活かすには、各社からの少数ずつの集まりでは難しいと考え、1社からの出向者を中心にしてそれに数社からの出向者を加える方法をとった。さらに、このような微細加工装置開発を担当する研究室を3つ併設して、それぞれ独特な装

(白色部分超LSI共同研担当)

微細加工技術
結晶技術
設計技術
プロセス技術
試験評価技術
デバイス技術

↑ 基礎的、共通的部分

図-2 研究テーマの担当

置を設計開発することにし、これらの3つの研究室間の討論と情報交換をできる限り行うような体制をとった。

超LSI共同研究所の成果

成果は多岐にわたり、誌面の関係で全貌を示すことはできないので、ごく主要なもののみについて述べることにする。

1980年代の日本の発展に寄与した点からみればリソグラフィ装置、特に光学ステッパの開発が大きかったと思われる。光学ステッパは図-1および先にも述べたように10年前の超高性能電算機の研究で電子ビーム描画にレーザ位置決めによるステップ&リピート機構を用いたのが基礎になっている。

リソグラフィ装置は電子ビーム描画装置で、第1研究室では電界放出電流を使った細いビーム径を用いた描画装置を開発し、その技術はその後の日立製作所の製品に活かされている。第2研究室はマスクで形を決める成形ビームを用いる方式を担当、この装置はその後JEOL（日本電子）の標準製品となった。第3研究室が試作した一方向を機械的に移動するラスタスキャン方式はその後東芝機械で製作され、広く市販された。

第4研究室で進めたシリコン結晶の大口径化におけるそり、変形、および微小欠陥の研究はシリコン製造メーカー5社との緊密な連携の下に行われた。これもあつてかシリコンウェーハについては現在も日本がシェア世界一である。第5研究室で行われた予備室を設けて真空度をあげるマルチチェンバー方式のドライエッチング方式は、その後の枚葉処理の基礎となっている。第6研究室で開発された電子ビーム描画に関するソフトウェアは、光露光も含めてその後この方向の指針となっている。

しかし、これら技術的成果を別として、超LSI共同研の最大の成果はそれまでなかった競合企業間での共同研究が可能であることを内外に示した点にあると思ってい

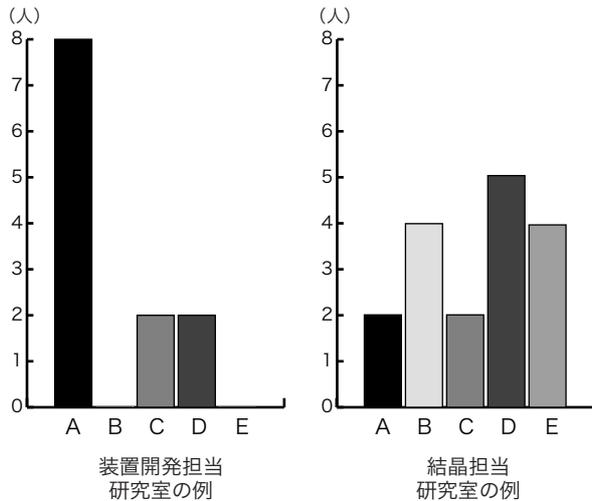


図-3 各社からの出向者の研究室配置例

る。これを境に世界中で共同研究が続出し、現在では普通のこととなっている。

④ シャープによる電卓開発³⁾

日本のLSI産業は電卓（電子式卓上計算機）の開発競争の中で進歩した。その進歩に貢献した会社の1つがシャープである。

シャープ（当時早川電機工業）においてコンピュータの応用製品から電卓へとその研究開発を導いたリーダーは浅田篤であった。浅田ら4人はコンピュータ技術を1960年から大阪大学工学部の尾崎弘に師事して勉強した。当初は大型コンピュータの開発を目指したが、大手企業でのコンピュータ開発の厳しい状況などから、早川電機らしい商品を生み出そうと絞って行った結果が電卓であった。当時電動計算機は輸入で30～50万円位であった。電子化の狙いは、現在考えられる小形化・低価格化ではなく、高速化と音がしないということにあったという。

シャープは1964年オールトランジスタ電卓「CS-10A」を発売、翌年にはシリコントランジスタを採用した「CS-20A」を発売した。CS-20Aは14桁、37万9,000円、重量16kg、消費電力35Wであった。

続いてIC化への時代に入り、もう1人のリーダーである佐々木正の活躍が始まる。佐々木は筆者が在職した電気試験所田無分室をしばしば訪れていた。当時筆者らはMOSトランジスタの研究を行っており、問題点であった不安定性も、原因を突き止めてその防止に自信があったので、佐々木に電卓にはMOSだと説いた。これもあってか佐々木はMOS LSIの大量発注による電卓の大量生産を考え、日電、日立、三菱にLSI生産を依頼したが、い

ずれも生産には戻込みされた。そこで佐々木は米国で引き受け手を探すこととして西海岸のフェアチャイルド社を振り出しに11社を廻ったが、いずれもその発注量の多さと、値段の安さに戻込みした。最後に予定にはなかったアメリカン・ロックウェルを訪問した。ここでも同じように戻込みして断られ、悄然として空港に向かい、搭乗を待っているときにドラマが起こった。なんと空港アナウンスで呼び出され、ロックウェルに戻ってみると社長が直々にMOS LSIを引き受けるといってくれたのである。

正式契約の後、1968年シャープで設計した回路図を持って若い技術者がロックウェルに派遣された。ここで今度は技術的なドラマが起こった。厳重な秘密保持の体制のうちで進められたLSIには何と1969年に人間が初めて月面に立ったアポロ計画に使われた回路が応用されていたのである。これは4相ロジックという回路で回路全体を単純化し、使う素子を激減させるものでCMOSが開発される以前には大変すぐれた回路方式であった。

ロックウェルがつくったLSIは200万個で、シャープがロックウェルに払った代金が108億円、1台の電卓にチップが5個だから合計で27,000円、それが99,800円の電卓となって市場を独占し、LSI電卓の競争が一層激しくなった。

④ ビジコンとマイクロプロセッサ¹⁰⁾

現在広く使われているマイクロプロセッサの開発に日本の会社と研究者が関与していた点は特筆すべきであろう。

その会社はビジコンで、電卓の開発を進めていたが、大型コンピュータではすでに使われていたストアード・プログラム方式を電卓に導入し、メモリに電卓用のプログラムを記憶させておいて、それで同じ電卓を何通りにも使いわける方法を考案した。この方式をMOS LSIとして実現するために、ちょうどそのころMOS DRAMの開発に成功していたインテルとLSI設計製造契約を結んだ。そこで設計した論理回路を持たせて1969年6月に3人の技術者をインテルへ派遣した。

この3人の技術者の1人が嶋正利であった。一方インテル側でこの3人に対応した係はM.E. Hoff Jr.であった。ビジコン側が持参したLSIの種類は8種類以上と多かった。これは10進法に基づくコンピュータ・アーキテクチャであったからである。インテルは当時創業して間がなかったため、それだけの多数の新しいLSIを設計する技術者に恵まれていなかった。そこで担当のHoffはビジコン案の簡単化を検討し、3カ月後に新しいアイディア



に達した。それはビジコンの提案のように16桁とか8桁という桁が多い計算をマクロな命令で処理するのではなく、簡単なマイクロな命令の組合せを反復してやらせようという4ビットのマイクロプロセッサの発想であった。

一方電卓というアプリケーションに密接に関係する部分に関してはビジコンのアイデアも多く取り入れられた。たとえばソフトウェアで入出力機器を制御することなどであった。

かくして両社の協力の結果4個のLSIのアーキテクチャが設計された。すなわち4001, 4002, 4003, そしてCPUを搭載した4004である。続いて、論理設計と製造のためのマスク設計に入るが、この部分は1970年にインテルに移ってきたFederico Fagginと嶋正利の相補的な協力によって実現され製作された。CPU「4004」が航空便で羽田に着いたのは1971年3月であった。技術者をインテルに送ってから2年以内というのは、画期的な技術の開発という点からみて短く、両社の相補的な知識の融合の巧みさと努力が感じられる。4004の成功は日米の協力によって新しい分野を切り開いた歴史的な例と思われる¹¹⁾。

半導体製造装置産業

トランジスタが米国で発明されたこともあって、半導体製造装置産業も米国追従でスタートした。輸入装置をモデルに自社に合った改良形を作るといようなことも行われていた。前述した超LSI共同研究所では新しいデバイスである超LSIを開発していくには製造装置から作るほかないということで、微細加工の製造装置の開発に重点を置いた。

それらにはその後実用化された主なものだけでも電子ビーム描画装置、紫外線光学ステッパ、ドライエッチング装置、マスク検査装置などがある。このうち前の2者はその後シェア世界一となったものである。

超LSI共同研究所発足の数年前、筆者はLSIテストの開発にも関与した。当時のタケダ理研社長・武田郁夫のLSI発展の見通しからLSIテストを作りたいという希望に対して通産省の1968年度重要技術開発費補助金が交付され、その開発装置の構成および仕様を決める委員会が日本電子工業振興協会に設置された。この委員会の委員長に筆者が、幹事に林豊が依頼された。2人で相談して、LSI化とともに機能試験が重要になると考え、ダイナミック・ファンクション・テストに関する基本的な方式についての基本特許を出願し、これを元にタケダ理研が試作装置を開発した。

この装置の高い評価から、機械振興協会がさらに高速

化・大規模化したダイナミック試験装置の開発を新機普及促進事業として採用、同じ思想で高速、大規模の本格機を同じくタケダ理研が製作し、日立製作所が試用した。この装置はその後タケダ理研から発売され、その技術は現在アドバンテストに引き継がれている。2度の挑戦を行った武田郁夫のアントレプレナーシップが今日のアドバンテストの技術的な基礎を築いたといえよう。

まとめと提言

- (1) プロジェクト研究は、中立機関にとっても具体的なニーズや刺激を受ける点から重要である。準備さえできていれば十分独創力を発揮できるチャンスを与える。
- (2) 官民の共同研究においても、あくまでも民間の活力を活かす工夫がなされねばならない。少しでも官の非効率、無難な進め方が影響を与えることがあってはいけない。
- (3) 官民の共同研究で選ぶテーマには、民間で競争した方がよいテーマは避けるべきで、将来の日本半導体産業の中核となるようなもの、あるいは共同でやることによってデファクトスタンダードになる可能性があるものなどを選ぶべきであろう。
- (4) 重要なテーマを重点的に選択し、機動的な対応をする点からは、そのリーダーは私心のない人物によるシングルヘッドであることが望ましい。プロジェクトは短期に終結するのが原則で効果が大きいと思われる。

参考文献

- 1) 垂井康夫：超LSIへの挑戦、工業調査会(2000)。
- 2) 土屋大洋：セマテックの分析—米国における共同研究コンソシアムの成立と評価—、法学政治学論究第28号(1996年春季号)。
- 3) 半導体産業新聞編：日本半導体50年史、工業調査会(2000)。
- 4) Moore, G.E.: 1975 Int. Elect. Dev. Meeting.
- 5) 林 豊他：MOST-ICの設計と特性、電気試験所集報, 31-4, p.7(1967)。
- 6) Tarui, Y. et al.: Diffusion Self-Aligned MOST: A New Approach for High Speed Device, Proc. 1st CSSD, Tokyo, 1969, Suppl. Jpn. Soc. Appl. Phys., p.105.
- 7) Tarui, Y. et al.: Proposal of Electrically Reprogrammable Nonvolatile Semiconductor Memory, Proc. 3rd CSSD, Tokyo, 1971, Suppl. Jpn. Soc. Appl. Phys., p.151(1972)。
- 8) 垂井, 伝田他：信学論(C)51-C, 2, p.74(Feb. 1968)。
- 9) 志村幸雄：にっぽん半導体半世紀、ダイヤモンド社, p.115(1999)。
- 10) Faggin, F. et al.: 日本の電卓が生んだ世界初のマイクロプロセッサ, 日経エレクトロニクス, No.683, p.163(1997)。
- 11) 嶋 正利：マイクロプロセッサの発展と将来, 情報処理, Vol.34, No.2, pp.135-141(Feb. 1993)。
- 12) 関口良雅：大型電子計算機DIPSについて, 情報処理, Vol.13, No.3, pp.136-144(Mar. 1972)。

(平成14年11月26日受付)