

一橋大学 21 世紀 COE プログラム
「知識・企業・イノベーションのダイナミクス」
大河内賞ケース研究プロジェクト

株式会社日立製作所
LSI オンチップ配線直接形成システムの開発

青島矢一

2007 年 9 月

CASE#07-06

本ケースは、一橋大学 21 世紀 COE プログラム「知識・企業・イノベーションのダイナミクス」から経費の支給を受けて進められている、「大河内賞ケース研究プロジェクト」の研究成果のひとつである。このプロジェクトは、大河内賞を受賞した業績について事例分析を行うもので、(財)大河内記念会と受賞企業のご協力をえながら、技術革新の概要やその開発過程、事業化の経緯や成果などを分析している。事例研究を積み重ねて、日本の主要なイノベーションのケース・データを蓄積するとともに、ケース横断的な比較分析を行い、日本企業のイノベーション活動の特徴や課題を探り出すことを目指している(詳細は <http://www.iir.hit-u.ac.jp/research/21COE.html> を参照のこと)。本プロジェクトを進めるに際して、(財)大河内記念会より多大なご支援・ご協力をいただいております、心よりお礼を申し上げます。

一橋大学
文部科学省 21 世紀 COE プログラム
「知識・企業・イノベーションのダイナミクス」
大河内記念賞ケース研究プロジェクト

株式会社日立製作所
LSI オンチップ配線直接形成システムの開発

2007 年 9 月

一橋大学イノベーション研究センター准教授 青島矢一

本ケースは、一橋大学 21 世紀 COE プログラム「知識・企業・イノベーションのダイナミクス」の研究プロジェクトのひとつである「大河内賞ケース研究プロジェクト」の一環として作成したものである。

本ケース作成にあたっては、講演、2 度にわたるインタビュー、資料の整理、ケースの推敲にいたるまで、以下の方々に大変お世話になった。この場を借りて深く感謝の意を表したい。

Hitachi Global Storage Technologies, Demand-Supply Project Office Vice President 伊藤文和氏

株式会社日立製作所 生産技術研究所プロセスソリューション研究部 主任研究員 参事 本郷幹雄氏

株式会社日立製作所 情報・通信グループ セキュリティ・トレーサビリティ事業部 品質保証部 部長 高橋貴彦氏

1. はじめに:大型計算機市場での競争と LSI オンチップ配線形成システムの役割

1.1 開発期間短縮の必要性

1980 年代前半,大型計算機市場では,日立製作所(以下,日立)や富士通といった日本の IBM 互換機メーカーが先行する IBM を追いかける形での熾烈な競争が展開されていた。競争に打ち勝つには,少しでも性能の良い製品を他社よりも早く開発することが重要となる。しかし,製品開発のスピードをあげる上で,製品の中核をなす LSI モジュールの開発がボトルネックとなっていた。当時,日立では,新しい大型計算機の開発に3年から4年の期間を要していた。その中で,最も時間のかかる工程が,LSIの開発工程であり,プロトタイプ製作から開発が完了するまでにほぼ1年の期間が必要であった。論理設計の変更の度に行われる新たな LSI の試作品製造に多大な時間がかかることが主たる要因であった。

日立では神奈川工場¹において大型計算機全体の開発と生産が行われていた。その神奈川工場に中核のLSIモジュールを提供するのが青梅のデバイス開発センタ²であった。

LSI モジュールの開発では,まず,神奈川工場側においてコンピュータに必要とされる論理情報とその論理情報を実現する LSI 上の配線情報が作成される。そして,コンピュータ上でのシミュレーションを完了した後に,デバイス開発センタに渡される。デバイス開発センタでは,この情報に基づき,物理的な配線データを作成し,実際の LSI を試作し,検証を行う。

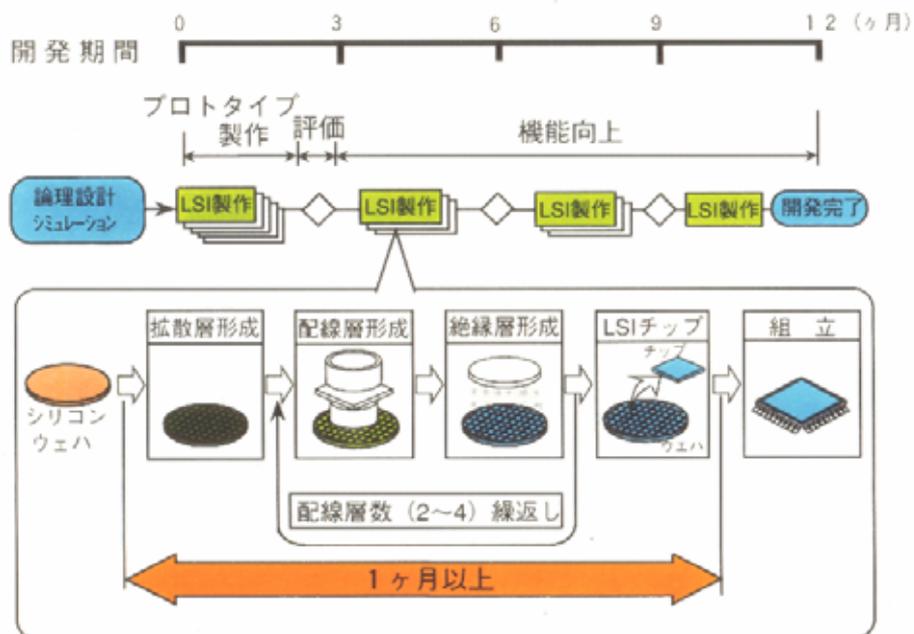
コンピュータ上でのシミュレーションは完璧ではないため,実際に試作品を作成することによって様々な機能上の問題が見つかり,論理設計の変更が行われることになる。また,競合企業の動向によって機能向上が求められる場合にも,論理設計の変更が必要になることもある。このような論理変更が生じる度に,開発プロジェクトは,新たな LSI をゼロから製作しなければならない。それにはコストも期間もかかるが,機能を向上させるためには試作を繰り返すことが不可欠であった。大型コンピュータシステムに搭載されるカスタム LSI は,数 10 から 100 種類程度ある多品種少量生産品であり,当時の開発プロセスでは,意図する機能を実現するには,1 品種あたり 2 回から 4 回程度,試作品を製作する必要があった(図表 1「従来の LSI 開発プロセス」参照)。

しかし,新たな LSI の製作は,多層配線構造を形成するために,500 工程にも及ぶ多様な工程を必要とする。1つの試作品を製作するには 2 週間から 1 ヶ月の時間がかかってしまう。開発コストも跳ね上がる。つまり,そこには,機能向上と開発スピードもしくは開発コストの間には根本的なトレードオフが存在している。このトレードオフを克服する手段の開発が,IBM との熾烈な競争を打ち勝つ上では鍵となっていた。

¹ 現エンタプライズサーバ事業部

² 現マイクロデバイス事業部

図表 1:従来のLSI 開発プロセス



出所: 第 39 回大河内賞受賞業績報告書より

1.2 悪いところだけ直すという発想

このようなトレードオフを克服するには、LSI の作り直しの効率を劇的に改善する技術が必要であった。それが、日立の生産技術研究所のメンバーを中心としたチームが開発した「LSI オンチップ配線直接形成システム(以下、オンチップ配線システム)」である。基本的な発想は単純である。「全て作り直すから時間もコストもかかる。だったら、悪いところだけ直せばいいのではないか。」

オンチップ配線システムでは、LSI の作り直しをやめて、一度製作した LSI 上で、変更した論理回路に対応するように、従来の配線を直接切断し、新たな配線を形成する。微小なシリコンチップの上に重層的に形成された微細な配線パターンに対して、直接外部から変更を加えるということは極めて困難な作業である。それを、集束イオンビームとレーザーCVD という技術を組み合わせることで可能にしたのが、日立製作所が 1989 年に導入した、オンチップ配線形成システムである。

この新しい技術によって、従来であれば 1 ヶ月の期間を要していた LSI の製作の代わりに、新たな機能をもつ LSI をたった一日で手にいれることができるようになった。4 回行われていた試作が減った結果、12 ヶ月かかっていた LSI の開発期間(製作開始から 1 号機の完成まで)は 8 ヶ月へと短縮された。

2. LSI オンチップ配線直接形成システムの仕組み

オンチップ配線システムとは、その名が示すとおり、実際のチップ上で、配線を切断し、新たな配線を接続するシステムである。そこには、「切断」と「接続」という 2 つのプロセスがある。それぞれ

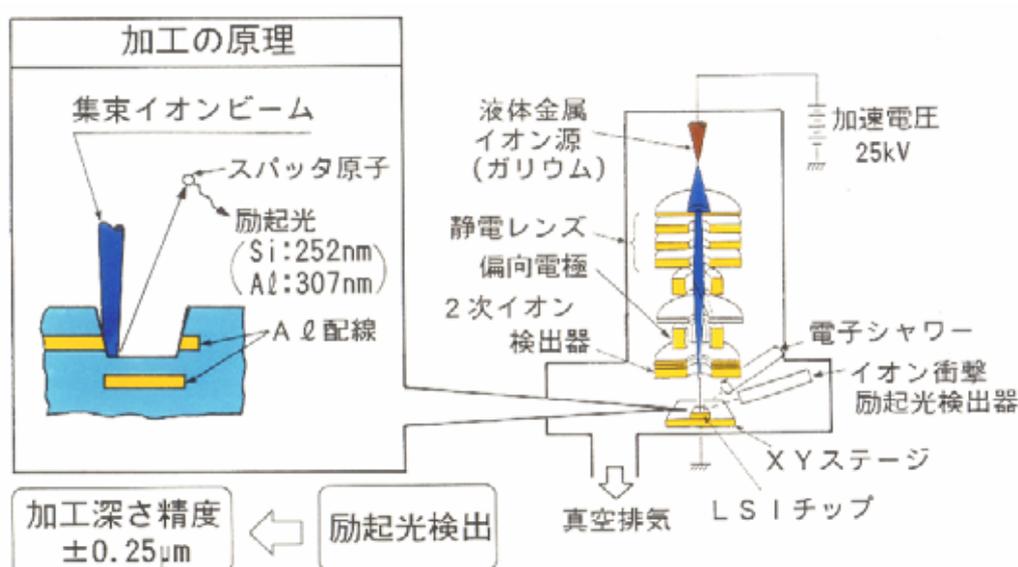
の機能に対応してこのシステムは大きく2つの装置から構成されている。前者の切断を担当するのが集束イオンビーム装置³であり、接続を行うのがレーザーCVD装置⁴である。

2.1 集束イオンビームを用いた配線の切断

コンピュータに使用されるLSIは多層配線されている。当時、大型計算機用のLSIは4層配線であった。アルミの配線は絶縁物の中に埋め込まれている。したがって、配線を切断するといっても、通常の電線をニッパーで切るというのとはわけが違う。

チップに埋め込まれた配線を切断するには、複雑に交錯した配線の隙間から「穴」を掘り、標的となる配線まで到達して切断する。しかも、下部にある別の配線を切断しないように、1 μm の幅しかない標的となる配線のみを切断するような極めて微妙なコントロールが必要となる。こうした高い精度の加工を行うために日立の研究者が採用したのが集束イオンビーム装置であった(図表2「集束イオンビーム装置」参照)。

図表2: 集束イオンビーム装置



出所: 第39回大河内賞受賞業績報告書より

³ 集束イオンビームは英語ではFocused Ion Beamといわれ一般にはFIBと略される。以下の既述では、基本的に集束イオンビームという日本語表記を用いるが、場合によってはFIBと略して表記することもある。

⁴ CVDはChemical Vapor Depositionの略で日本語では化学気相成長法という。以下では慣例に従ってCVDと表記する。

集束イオンビーム装置では、細く絞ったイオンビームを半導体チップに照射させることによって、表面を削り取りながら穴を掘っていく。イオンには液体金属ガリウムから作られるガリウムイオンが用いられ、それが、25kV の電圧で加速されることによってビームとなる。このイオンビームが静電レンズによって絞られて半導体の標的となる箇所照射される。そうすると標的の箇所の原子がたたき出され(これをスパッタリングと呼ぶ)表面から削り取られていく。

当時、配線を切断する手段としては、イオンビームの他にレーザーを照射するという方法も考えられた。しかしレーザービームの場合には、熱によって配線部分を蒸発させるという仕組みであるため、切断部分がクレーターのように大きく広がってしまう。それゆえ、1 μ m の配線を正確に切断するというような高精度な加工をするには不向きであると考えられた。オンチップ配線形成のような微細な加工を行う場合には熱の発生しないFIBが適切であると開発メンバーは考えた。

FIBのもう1つの利点は、イオンビームを照射することで励起される光を観察することによって、どの程度まで削りとられたのかを判断することが可能になる点である。具体的には、LSIのシリコンであれば励起光の波長は252nmであり、配線を形成しているアルミニウムの場合の光は307nmである。ビームによって削り取られてできる穴は、ちょうど、標的となるアルミ配線を切断した時点でうまくとどめなければならない。深く掘りすぎると下層の配線に影響を与えてしまう。これら波長の違う光の強度を検出して到達している深さを把握することによって微妙な掘削の制御が可能となる。日立の開発した装置では ± 0.25 ミクロンの精度で深さを制御できるようになっている。

2.2 レーザーCVDによる配線接続

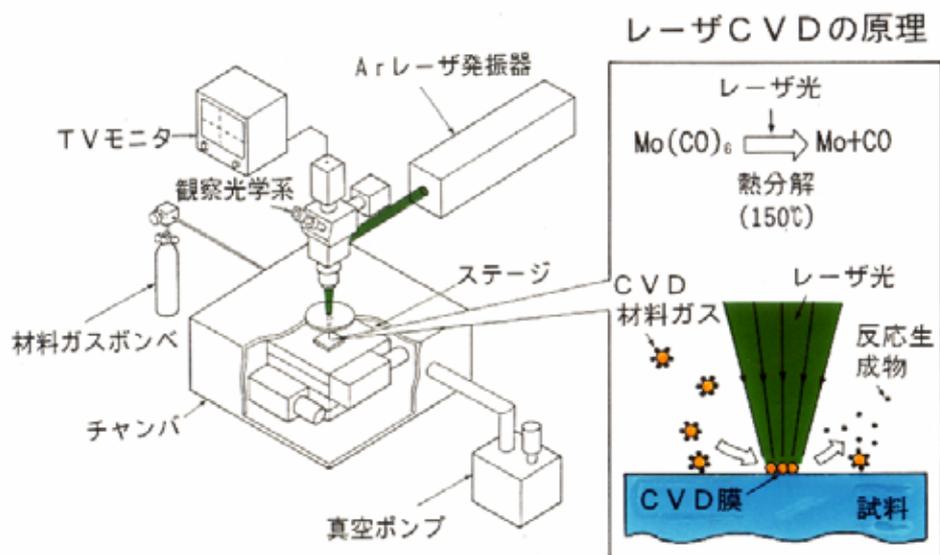
不要な配線が切断された後に、新たに必要となる配線の接続が行われる。そこで利用された技術がレーザーCVDである。

CVD(化学気相成長法)とは、一般に、形成しようとする薄膜材料を構成する元素を含む化合物のガスを基板上に供給して、基板表面における化学反応によってそのガスを分解して、必要とする薄膜を形成する技術である。このガスの分解に必要とされるエネルギーとしてレーザー光を使用するものをレーザーCVDと呼ぶ⁵。

オンチップ配線形成システムでは、モリブデンという金属に6つのカルボニル基((CO)₆)が結合したヘキサカルボニルモリブデン(MO(CO)₆)というガスが使用される。このガスが存在する真空中で、配線を形成したい基板の部分にレーザー光を照射すると、ガスが分解されてモリブデンが析出する。このモリブデンが新たな配線となる(図表3「レーザーCVD装置」参照)

⁵ レーザーCVDには、熱化学反応を利用するものと、光化学反応を利用するものがある。前者は、照射したレーザーによって基板を直接加熱し、その熱によって反応ガスの解離を進める。後者は、レーザーの光エネルギーを直接励起源として利用する方法である。オンチップ配線形成システムでは、MO(CO)₆はレーザーによって生じた300~500度の熱によって分解されるため、前者のタイプである。

図表 3: レーザーCVD 装置



出所: 第 39 回大河内賞受賞業績報告書より

微細な配線を形成するための技術としては、レーザーCVD 以外に、液体を直接塗布する技術も存在していた。ピペットを使って液状の金属化合物で線を描き、液だまりをレーザーで焼き固めるという技術であった。こちらの方が、簡単な技術であり、大掛かりな装置を必要とせず、コスト的にも有利であった。しかし、ピペットで描けるのは $10\ \mu\text{m}$ 単位の線であって、 $1\ \mu\text{m}$ レベルの配線をしなければならないシステムには不適切であった。それゆえ、開発チームはレーザーCVD を選択した。

レーザーCVD 装置は図表 4 に見られるような極めて大掛かりなものであった。大きなチャンバの中には基板を載せるステージがあり、真空状態にされた内部には反応ガスが注入される。上部からレーザーが照射され、配線を描くときには、ステージが前後左右に移動するようになっている。

2.2.1 開発上の課題

レーザーCVD の原理は明らかであったが、それを実際の配線形成に適用しようとすると様々な課題に直面することになった。代表的な問題の1つは接続抵抗の問題であった。穴を開けて不適切なアルミ配線を切断した後に、モリブデンで別のアルミ配線に接合して穴を埋めるわけだが、アルミ配線とモリブデンの接合部分の抵抗が高くなってしまふ。接合部分にアルミとモリブデンの合金が形成されてしまい、この合金の抵抗が高いことが原因であった。目標としては1箇所あたり1にとどめたいが、そのままでは実現することができない。

そこで開発チームが考え出したのがバリアメタルという方法であった。バリアメタルとは、アルミとモリブデンの間に挟み込んで、高抵抗の合金の形成を妨げる別の金属である。バリアメタルとしてはクロムが選ばれた。高抵抗の合金形成を妨げるという性質とともに、レーザーに対する反射率が低いこと、さらに、保護膜であるシリコン (SiO_2) に対する密着性の高さが、クロムを選定した理由であった。開発チームは、様々な膜厚のクロムを試して、目標である 1 を達成するのに最低限必

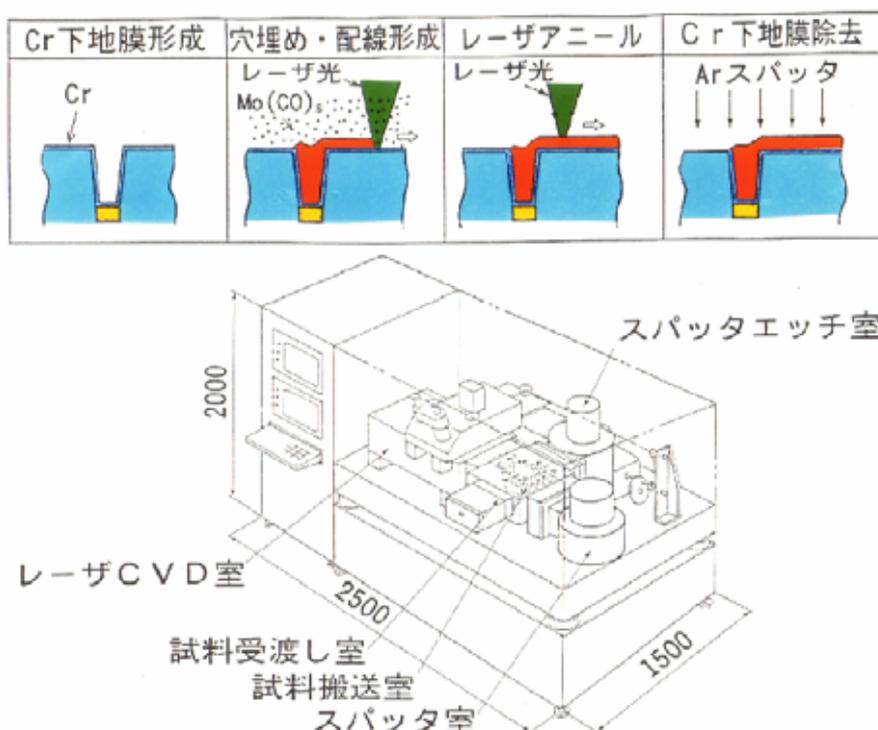
要なクロムの厚さを特定した。その結果、ほぼ 20nm (0.02 μm) の厚さのクロムを敷くことによって、接続抵抗が 1 を下回ることがわかった。

レーザーCVD による配線形成でもう1つ問題となったのが、モリブデンで描いた新しい配線そのものの抵抗が高いということであった。1mm の配線あたり 20 くらいの抵抗に抑えたいというのが目標であった。さらに、1 分間に 1mm のスピードで配線形成を行いたいという希望もあった。しかし、レーザー出力を一定とすると、配線の形成速度が大きくなると、配線抵抗も大きくなってしまふ。このトレードオフの問題を解決しなければならなかった。

こうした問題に対して開発チームは、形成されたモリブデンの配線をレーザーで再加熱することによって抵抗を低減する方法を選択した。レーザーアニールという方法である。さらに開発チームは、様々な試験を行い、1mm あたり 20 という目標を達成しつつ、配線や基板にダメージを与えないように、照射するレーザーの最適な出力を特定していった。

これらの問題が実験室レベルで解決された後は、一連の作業プロセスを具現化した実際の装置を構築する必要がある。例えば、バリアメタルとしてのクロムは基板上の膜として形成されるが、配線の接合部分以外にクロムが残っていると回路がショートしてしまう。それゆえ、配線形成プロセスの中では、この余分なクロムをスパッタリングによって除去する工程が必要となる(図表 4「配線形成のプロセス」参照)。クロム膜形成に始まり、モリブデンにより穴埋めと配線形成、配線に対するレーザーアニール、さらにスパッタ加工によるクロム膜の除去に至る一連のプロセスを含む装置は、高さ 2m、幅 1.5m、長さ 2.5m の巨大なものとなった。

図表 4: 配線形成プロセス



出所: 1990 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集より

3. 開発の流れ

以下で述べるように、超大型コンピュータである M-880 の開発を念頭に、オンチップ配線形成システムの開発プロジェクトに公式に 5 億円の予算がついたのは 1987 年 4 月であった。しかし、要素技術の開発は、それ以前に、既に生産技術研究所において進められていた。特に、このシステムを構成する鍵技術である FIB とレーザーCVD に関しては、必ずしも特定の用途を想定せず、1983-4 年あたりから、生産技術研究所内で研究が行われていた。

3.1 要素技術の開発

3.1.1 レーザーCVD 技術の要素開発

レーザーCVDの研究が細々と始められたのは 1983-84 年ごろであった。当時、生産技術研究所の研究予算の 3 割は本社から、7 割は工場からきていた。それゆえ、生産技術研究所の主な役割は、工場から様々な課題を得てそれを解決することであった。通常、工場からは具体的な開発課題が提示され、それに対しては短期的な成果を求められる場合が多い。しかし、当時、日立の半導体の主力工場であった武蔵工場の生産技術部の部長は、生産技術研究所第 3 部⁶所属の若い研究者であった本郷幹雄⁷に、「特にフォローはしないから、一人くらいは先のことをやりなさい」というように、比較的自由な研究を許していた。

与えられた自由な時間を本郷はレーザーCVD による膜形成の技術開発へ費やした。当時、レーザーによる加工というと、穴を開けたり切断したりというように、対象物を破壊する用途に使用されることが多かった。それに対して本郷は、レーザーを使って「何もないところにモノをつけることに使えないか」という発想をもった。当時を振り返って本郷は以下のように述べている。

レーザーで穴を開けたり切ったりとかは当時から使われていました。これらは全て物質を除去することによる加工なんです。(それに対して)無いところに必要なモノをつけることはできないかという発想です。ちょうど我々がスタートする何年前に、アメリカの方で南カリフォルニア大学かな、世界で初めてレーザーCVDを使って膜を作ったという論文が出されて、ああこれだ、と思ったのが最初のきっかけです⁸。

当初本郷は、レーザーCVD をフォトマスクのピンホール欠陥の修正に利用することを考えていた。その後、LSI の加工に適用するというイメージをもつようになったが、それが大型コンピュータ向けの LSI に利用されるのか、それとも汎用の LSI に使われるのかははっきりしていなかった。

1984 年 10 月、本郷は、小さいチャンバの実験装置をつくって実際に実験を始めた。基礎的な技術を確立することが目的であった。その結果、レーザーCVD で膜を形成できることは確認できた

⁶ 当時、生産技術研究所第 3 部は、半導体電子装置のプロセス技術と、半導体を含めた検査や修正技術の開発を行っていた。

⁷ 現在、株式会社日立製作所生産技術研究所プロセスソリューション研究部主任研究員参事。

⁸ 一橋大学イノベーション研究センターイノベーションフォーラムにおける本郷氏の発言より。2006 年 9 月 27 日。一橋大学イノベーション研究センターにて。

が、とても LSI の配線に使えるようなものではなかった。その後、装置を改造しながら実験を進め、配線に使いそうな金属膜ができることがわかってきた。しかし、同時に、前述した接続抵抗や配線抵抗の問題など様々な問題が噴出した。これらの問題に対しては、その後、オンチップ配線形成システムの具体的な開発が始まるとともに、大掛かりな実験装置をつくり、デバイス開発センタとの共同で解決にあたることになった。

3.2.1 集束イオンビーム (FIB) の開発

一方のFIBについては、生産技術研究所第3部の研究員であった山口博司⁹が1980年頃から研究に着手していた。山口は、FIBが世の中に出始めたころ、技術的な興味から、簡単な実験装置を作って、FIBの応用可能性を探っていた。応用領域として当初想定していたのはフォトマスクの黒点欠陥修正とLSIの配線切断であった。

レーザーは光の波長までしか絞ることができない。したがって、ぎりぎりまで絞ったとしても 0.3 μm くらいで物理的な限界に近づいてしまう。波長の短い光を追求するにしても限界がある。光の波長以下の微細な加工をしようと思うとレーザーでは不可能である。イオンビームであれば、0.05 μm くらいまで絞ることができる。LSI の微細化が今後ますます進むと想定される中、レーザーの次にくるのはイオンビームしかない。こんな議論が山口のいた研究室では交わされていた。

山口はFIBによるLSI加工の研究の成果を特許として1983年に申請している。これは、FIBを使ってLSIの配線を切断することに関する特許である。

山口は初期段階の技術的な成果をデバイス開発センタに持ち込んで、その実用化の可能性を探っていた。しかし、この段階ではまだ、大型コンピュータ用のLSIの配線を修正するために使うといったような特定の用途は念頭になかった。当時の様子をデバイス開発センタの技師であった高橋貴彦¹⁰は次のように述べている。

一番最初に、まだそのころというのは、加工した写真をみせてもらったら、…きれいなのではなく、くさびのようにこれはとても使えないんじゃないのというのをもらってこられたんです。…当初はこの技術がLSIの開発や生産にどのように活用できるのか、正直言って具体的にイメージが浮かびませんでした。…正直言って私自身後ろ向きだったのですが、ずいぶん熱心にアクセスしてもらって、その結果サンプルを戸塚にある生産技術研究所に持ち込んで加工して頂いたのがスタートでした。その後、青梅と戸塚の間を月に2回も3回も往復しながら、というのをやり始めたんです。…だから大型コンピュータの開発に活用するなんてとても想像がつかなくて。LSIって、…どうしてもプロセスが安定するのに時間がかかるんです。そのためお客さんに納めたあとで故障して、不良品として戻ってくることもあります。そこでどこが悪いのかというのは実際に解析するんですけども、そういうところに使いそうだなという感覚は持っていたんです、それをもっと積極的に、こういうメイン

⁹ 現在は、日立製作所を定年退職。

¹⁰ 現在株式会社日立製作所セキュリティ事業部品品質保証部部长。

フレームの修正技術までというところ、それができるかなという自信はまったくなかった¹¹。

その後、山口は FIB の基礎研究を続け、FIB の応用プロセスと装置開発の研究は、生産技術研究所で山口の部下であった嶋瀬朗が中央研究所に場所を移して進めることになった。当時中央研究所では FIB 装置に関する研究を既に行っていたため、実習という名目で、嶋瀬が送り込まれたわけである。その後にスタートするオンチップ配線システムにおける FIB 装置開発には、中央研究所から戻ってきた嶋瀬が参加することになった。

3.2 大型計算機用 LSI の配線形成システムへの応用

このようにそれぞれ技術的な興味から開発がスタートした2つの技術が、大型コンピュータ向けの配線形成システムへと応用されることになったきっかけは、1985年9月24日に当時副社長であった浅野弘¹²が提出したメモであった。そのメモには、「プリント基板で配線が切れているところになくジャンパー線のように、LSIでもジャンパー線を飛ばせたらうれしい」というような内容が書かれていた(図表5「浅野メモ」参照)。このメモが半導体関係の経営幹部に廻されて、生産技術研究所に降りてきた。

図表5:浅野メモ

(デセ)CPU 用カスタム LSI での Jumper 線加工の特研について

(1) L9 の経験で CPU 用カスタム LSI の QTAT は非常に大変な仕事であると共にこれを切り詰めると(コ事)/(情)の世界では絶対的に有利な Position を占めうる事がはっきりした。

(2) (子半)にとっても事情はまったく同じである。(効果は(デセ)/(コ事)以上かもしれない)

(3) Jumper 線 1 本を Chip 表面で張り、寿命が数ヶ月であれば十分であると思います。

(4) (デセ)/(子半)の Joint Work となるが、設備メーカーとして東京エレクトロニクス(おう)が良いか?(計)が良いか? はよく Merit/Demerit を考えて、やって下さい。勿論、(生研)(中研)の Joint も不可欠でしょう。

出来るだけ、早く特研をスタートしてもらいたい、
対象は 1.3 μm, Version up は 0.8 μm と考えては如何?

(60.9.24)

筆者注: QTAT = Quick Turn Around Time, L9 = M-880 の一世代前のモデルのコード名, デセ = デバイス開発センタ, コ事 = コンピュータ事業部, 情 = 情報事業本部, 子半 = 電子事業本部半導体事業部, 生研 = 生産技術研究所, 中研 = 中央研究所

¹¹ 一橋大学イノベーション研究センターイノベーションフォーラムにおける高橋氏の発言より。2006年9月27日。一橋大学イノベーション研究センターにて。

¹² 故人

当時日立は、大型計算機市場で、IBM へのキャッチアップに躍起になっていた。大型コンピュータは日立にとって大きな収益源であり、3年サイクルで開発される新製品の導入タイミングが事業戦略上非常に大きな意味をもっていた。1世代前の機種(L9)のLSI開発で非常に苦労したという経験もあった。それゆえ、次世代のM-880の開発では何とかLSI開発の効率を高めたいという経営幹部の意向があった。

経営からの要請を受けて、生産技術研究所第3部に、当時第3部の第2研究室室長であった大原貞雄をリーダーとする開発チームが組織され、FIBとレーザーCVD技術を核としたシステムの開発が進められることになった¹³。また、オンチップ配線システムの開発全体のとりまとめは、コンピュータ事業部デバイス開発センタ第1設計部長であった安斎昭夫が担当した。このように、生産技術研究所の大原とデバイス開発センタの安斎の二人が互いに協力し合いながら司令塔となってオンチップ配線システムの開発は進んだ。

大原のもとでFIB装置の開発を進めたチームのリーダーは主任研究員であった伊藤文和¹⁴がつとめた。中央研究所から戻ってきた嶋瀬は、伊藤のもとで具体的な装置開発を進めた。一方、レーザーCVD装置の開発では、基礎研究から担当していた本郷をリーダーとするチームが編成された。

安斎のもとで、QTAT(Quick Turn Around Time)システムの取り纏めおよび汎用コンピュータ事業部と生産技術研究所のインターフェースを担当したのは前出の高橋であった。また具体的な開発が進む段階ではコンピュータの開発・製造を担当する神奈川工場の協力も不可欠であった。神奈川工場では、副技師長であった村田慎吾が、コンピュータとLSIとの間のインターフェースに関する責任者となった。以下の図表6には開発組織と主なメンバーが記されている。

図表6: オンチップ配線システム開発組織とメンバー



¹³ 大原はその後まもなく第3部の部長となった。

¹⁴ 現在Hitachi Global Storage Technologies, Demand-Supply Project Office, Vice President.

LSIは多層配線であるから、穴を開けて配線を切断して、その後穴を埋めて新たな配線を形成すればよいというアイデア自体は自然と出てきた。しかしそのアイデアが実現できるのかが不確定であった。FIBで本当に精度の高い切断が実現できるのか。FIBであけた細かい穴をレーザーCVDで本当に埋めることができるのか。切断と配線を含む全体のシステムとしてうまく機能させることができるのか。これらの問題に関してはかなりの不確実性が伴っていた。

3.2.1 FIBにおける他社との共同

FIBに関しては山口を中心に既に基礎的な研究は行われていたものの、1985年段階では、とういLSIの試作に使えるようなレベルではなかった。FIBは新しい技術であり、その用途は限定的であった。当時のFIBは主に半導体製造用のクロムマスクの修正に利用されていた。クロムマスクは、ガラス基板の上に0.1 μm オーダの薄いクロムの膜で配線パターンが描かれたものである。そのパターンの欠陥を修正するためにFIBが使用されていた。この場合には、極めて薄いクロム膜を除去するだけだから、技術的にはそれほど難しくはない。しかし、オンチップ配線形成システムでは、基板上に深く穴を掘り、しかも、極めて高い精度で掘削の深さを制御しなければならない。このような作業にFIBを適用しようというのは常識的には考えにくいことであった。しかし、オンチップ配線形成システムを実現するにはFIBのもつ高精細な加工能力が必須であった。しかも、M-880の開発スケジュールに間に合うように開発を進めなければならない。

そこでFIB加工装置開発のリーダーであった伊藤は、世界中のFIB技術、FIB装置を全て調べて、最良の技術を探索することにした。当時、FIB装置を開発していたメーカーは日本の日本電子とセイコーインスツルメンツ、そして米国の2社であった。しかし、フォトマスク修正用のFIB装置をそのまま転用してもLSIの加工はできない。FIBでLSI加工を試みていたメーカーはあったものの、精度的に満足のいくレベルではなかった。日立が開発したプロセス技術をもとにして、LSI加工用にFIB装置を開発・生産してもらわなければならなかった。そこで伊藤はこれらFIB装置メーカーと実験を繰り返して、装置の実現可能性を検討した。実験結果をもとにして、最終的に伊藤は、米国のM社と共同開発する道を選択した。M社が最も優れた技術をもっていると判断したからである。当時の様子を伊藤は次のように語っている。

FIBをメインフレーム用LSIの修正技術に使うということについては私も自信はなかったです。物理的興味でやった基礎的な実験結果しかない段階で、そういう話が出て、これは大変だということになりましてね。それで、当時実験をして頂けるアメリカのメーカーとか、日本メーカーとか、自社内の技術部門をあたって試しに実験を始めたんです。…その中で、その時点で最良の技術をもつメーカーと共同開発したのがよかったと思っています¹⁵。

FIB技術に関しては、日立内部でも、中央研究所と那珂工場が協力する形で既に開発が行われていた。そこで、伊藤は、社内での協力も模索した。具体的には、当時電子ビーム装置を製造し

¹⁵ 一橋大学イノベーション研究センターイノベーションフォーラムにおける伊藤氏の発言より。2006年9月27日。一橋大学イノベーション研究センターにて。

ていた那珂工場の幹部にかけあってFIB装置の製造をお願いした。しかし、残念ながら協力を得ることはできなかった。那珂工場は既に様々な製品を手がけており、まだ技術が完成されておらず台数が多く出るのが不明な時点での特注装置には興味を示さなかったということかもしれない。

3.2.2 レーザーCVDの自社開発

一方、レーザーCVDは日立が単独で開発し、グループ企業で生産を行った。既に述べたように、本郷は、1984年10月からバラックの実験装置を用いて基礎的な研究を進めていた。続いて、浅野メモが降りてきた後、さらに進んだ技術検討を行うために装置を改造して、1986年春には新たな実験をスタートした。また、この実験と並行して本郷は、7000万円かけて、さらに大きな実験装置を製作した。この大規模な装置を使った実験は1986年12月に始められ、レーザーCVD技術を実際のLSI製作に適用したときに起きる問題の解決にあたった。接続抵抗や配線抵抗など基礎研究段階で明らかになった様々な技術的問題を解決しながら、具体的な装置のイメージを固めていった時期である。

浅野メモ以降は、生産技術研究所単独ではなく、LSIの開発を担当するデバイス開発センタとのやりとりが頻繁になった。まず行われたのが、図面上でのシミュレーションであった。M-880の一世代前のコンピュータのLSIの図面がデバイス開発センタにあったため、その図面上で、配線切断や配線接続をすることで実際に意図する論理変更が可能であるかどうかの確認が行われた。こうしたシミュレーションを通じて装置の実現可能性が明らかになるにつれて、デバイス開発センタ側でも、本気で開発に取り組もうとする姿勢が生まれてきた。本郷は、そのときの様子を次のように述べている。

…そのときに、高橋さんにずいぶんお世話になったんですけど、2週間くらい泊まり込みで向こうに出張しまして、何品種くらいだったかな、たぶん10品種とか20品種くらい、論理をひっくり返すのと追加するのを、レイアウト図面上で配線のどこを切ってどこをつなげばいいか、他の配線に触らずにそれらが可能かどうか、をひとつひとつ手作業でチェックしました。その結果、全部が全部可能ではないんだけど、7-8割、…実現できるねという確証を得て…、たぶんそれができてから高橋さん本気になったと思うんです。浅野メモをきっかけとしてそういうことをやって、装置さえできればLSIチップ上での論理変更が実現できるねということで、たぶんデセ(デバイス開発センタ)の方も本気になったと思います¹⁶。(括弧内、筆者追加)

3.2.3 公式の予算申請

FIBも含めた全体のシステムのイメージが明確になったのが1986年ごろであった。その時期になると、主要な技術的課題はほぼ解決され、装置の仕様の概略も決まった。開発チームは、オンチップ配線システムの実現可能性に自信をもった。そこで、生産技術研究所のチームは、1987年4

¹⁶ 筆者による本郷氏へのインタビューより。2007年7月13日。株式会社日立製作所生産技術研究所にて。

月、デバイス開発センタを通じて公式に5億円の予算申請を行い、承認された¹⁷。

公式に予算がついた後、プロジェクトは具体的な装置の開発・生産を進めた。レーザーCVD装置は日立のグループ会社の工場で製造されることになった。本郷をはじめとするメンバーは、交代交代でグループ会社の工場を訪れて、組み立てから、調整、試運転のすべてに立ち会った。

FIB装置に関しては、日本で加工技術の開発、アメリカで装置の開発が並行して進められた。目標レベルの加工を可能にするために、日立が開発した加工技術をM社に移転して、装置に反映してもらうという作業が行われた。これらの開発は順調に進み、1987年12月にはFIB装置が導入され、遅れること半年の1988年6月にはレーザーCVD装置が導入された。

装置が実際に導入された後、生産技術研究所のメンバーは、デバイス開発センタに常駐するようになり、様々な加工条件だしを行ったり、自動化のためのソフトウェアのバグ出しを行ったりした。

3.3 一丸となった開発体制：特研による部門横断的なプロジェクト

オンチップ配線システムを完成させるにはLSI開発を担当するデバイス開発センタだけでなく、コンピュータの開発・製造を行う神奈川工場の人たちの協力が不可欠であった。オンチップ配線システムの加工技術が確立されても、具体的に配線のどの部分を切断して、その部分をつなげるのかという情報は神奈川工場から入手しなければならない。そうした情報をデータとして電送してもらい、装置に落とし込まない限り、オンチップ配線システムは作動しない。このようなデータ作りは、神奈川工場のエンジニアにしてみれば、余分な仕事なのであるが、非常に前向きに協力してくれたという。

…もともと、論理変更が生じた場合には、神奈川工場の論理設計者の指示に基づいて、同工場内のレイアウト設計部門が、どのようにLSI配線の結線を変更するのかを決定しておりました。従ってオンチップ配線修正システムを実用化するには、どの位置で配線を切ったり繋げたりするかというデータを神奈川工場で作ってもらう必要が生じたのです。…しかし、これは通常の業務とは異なったイレギュラーな作業ですので、正直言って大変面倒な業務をやることになると感じたでしょうね。(でも)このプロジェクトに加わったメンバーは非常に前向きに、じゃあ、こんな仕掛けもいるかな、と行って、…我々がお願いした以上のことまで積極的に取り組んでくれました。例えば、配線層数は通常アルミ4層ですが、これに5層目を新たに定義するというので、修正データが扱い易くなるとか、そういう特別な仕組みを一緒に考え構築してくれました¹⁸。

オンチップ配線システムの開発に、生産技術研究所とデバイス開発センタ、神奈川工場が一丸となって取り組みことができた背景には、大型計算機が当時の日立にとって、経営上の最重要

¹⁷ 内部的なアナウンスは1986年末には行われていた。

¹⁸ 一橋大学イノベーション研究センターイノベーションフォーラムにおける高橋氏の発言より。2006年9月27日。一橋大学イノベーション研究センターにて。

製品であったことがある。経営幹部がこの技術開発を支援しており、5億円という当時としては大きな開発資金も投入された。生産技術研究所所長とデバイス開発センタ長が、毎月1回、1時間以上の時間をかけて、直接に研究開発のフォローアップを行うという力への入れようであった。通常の開発テーマであれば、6ヶ月に1回の連絡会議で5分程度の報告が行われるに過ぎない。

大型計算機の重要性を反映して、M-880の開発に合わせて、日立では3つの「特研」が走っていた。「特研」とは日立独自の仕組みで、特定の開発目標をもった部門横断的な開発プロジェクトである。1つの製品を作るときには1つの特研が組まれるのが通常であったが、この大型計算機については、方式特研、実装特研、LSI特研、という3つの特研が並行して活動していた。方式特研とは、コンピュータの論理回路を開発するもので中央研究所が主体となっていた。実装特研は、LSIを装置に実装する技術開発を担当しており、神奈川工場が中心になっていた。

LSI特研は、デバイス開発センタが中心となったLSI開発の特研であり、1986年5月にスタートした。それは内部的にはJ10-LSI特研と呼ばれた。J10とは、M-880につけられた開発コードネームである。オンチップ配線システム開発はこのLSI特研の中で進められた。さらに、そしてこれら3つの特研をコンピュータ事業部の事業部長レベルが統括しており、その求心力が非常に強かった。

このような状況で、デバイス開発も、装置開発も、コンピュータ開発も、みな、IBMより少しでも早く、優れた大型コンピュータを世に出すという共通の目標を共有していた。そのことが、お互いの協力関係をいっそう強くしていた。

4. 実績と用途展開

4.1 実績と効果

1988年に導入されたオンチップ配線システムは、まず当初のターゲットであった、M-880という超大型計算機の開発で活用され、その後、2世代に渡る後継機種の開発に貢献した。さらに、スーパーコンピュータ用のLSIや、様々な機器向けのASIC開発にも使われ、このシステムが利用されたLSIは、全体で70品種、大型計算機やスーパーコンピュータへの適用チップ数は410にのぼる。

オンチップ配線システムを活用することにより、超大型コンピュータ開発の開発期間は、ほぼ4ヶ月短縮され、またASIC開発でも2ヶ月から6ヶ月の期間短縮を実現した。

4.2 他の用途への展開

オンチップ配線システムは、現在でも、一部のLSI開発で利用されているものの、当初の目的での利用は減っている。その1つの理由はLSIがさらに微細化、多層化されたことにある。オンチップ配線システムが開発された当時のLSIは4層アルミ配線であったが、その後、6層配線となり、現在では10層を超えるレベルにまで多層化が進んでいる。このように、微細な配線が極めて複雑にかつ重層的に作りこまれるようになると、配線を切断するための穴を開けるスペースさえ確保するこ

とが難しくなる。いくら配線を加工する技術があったとしても、切断すべき配線まで到達する経路を確保できなければ、それを LSI の修正に利用することはできない。

また LSI の微細化の進展によって、レーザーCVD による配線形成自体も難しくなった。オンチップ配線システムが開発された当時の配線幅は $5\mu\text{m}$ であった。 $2\mu\text{m}$ 幅くらいまでであれば、レーザーによる配線形成が技術的には可能である。しかし、現在では $1\mu\text{m}$ はおろか、 $0.1\mu\text{m}$ 以下のレベルで微細化が進行している。こうなると、光の回折限界の問題から、レーザーを使った配線形成はできない。

こうした状況の中、オンチップ配線システムで確立された技術は、近年、別の用途へと展開されている。

4.2.1 集束イオンビーム装置の展開

FIB 装置は、現在、主として LSI の不良の特定に利用されている。LSI の多層化、微細化が進むにつれて、チップ上での不良原因を特定することはますます困難になっている。LSI の論理的問題を修正するために、配線を切断したり、接続したりすることは困難であるが、このような不良特定のための切断、接続であれば FIB 装置は十分に活用できる。

例えば、配線を切断することによって LSI 上の1つ1つのトランジスタの特性を検査する。この動作を繰り返すことによって、どのトランジスタが問題となっているのかを特定することができる。

また、多層化されている LSI では、ある層における不純物の濃度が問題となったり、配線が半断線状態になったりすることによって、機能不全が生じることがある。こうした場合には、穴を開けて、FIB によって励起される光を解析することによって問題を特定することもできる。また、FIB 装置は、配線の切断だけでなく、その後の開発によって配線の接続にも利用できるようになったため、配線を切断したり接続したりしながら、LSI の検査を行うことができる。

さらに、FIB 装置では、断線のために細い穴をあけるだけでなく、LSI 内部の問題箇所を観察するための広い穴を加工することもできる(これを断面セグメント加工と言う)。この広い穴によってむき出しになった問題箇所を SEM によって観察して検査するわけである。

現在日立では、こうした検査用の FIB 装置を那珂工場¹⁹で開発・製造している。オンチップ配線システムでは FIB 装置の製造を米国企業に依存していたため、那珂工場で現在生産されている FIB 装置は、別途、日立独自で開発されたものである。したがって、技術的には、オンチップ配線システムの FIB 装置の延長とはいえない。しかし、人材面では、オンチップ配線システム用の FIB 装置開発に携わった東淳三が、自ら希望して那珂工場に異動し、現在の FIB 装置開発に携わっている。

4.2.2 レーザーCVD 装置の展開

オンチップ配線システム用に開発されたレーザーCVD 装置は、デバイス開発センターで稼働を初めてから 1 年後には、外部に販売することが許可された。そこで、本郷たちのチームは、グループ内の製造子会社の営業担当と一緒に、様々な半導体メーカーでプレゼンを行った。

¹⁹ 現日立ハイテクノロジーズ

しかし、その頃既に半導体メーカーはFIB装置を保有しており、配線形成に時間がかかることや配線抵抗が大きくなるという問題はあったものの、FIB装置でも配線形成を行うことができた。こうした状況で3億円もするレーザーCVDに投資しようとする企業はなかった。その後、1/3程度にまでコストダウンをしたものの、こうした状況は変わりなかった。結局、半導体の製造を行っていた武蔵工場²⁰に1台導入されたのみであった。

既述のように、LSIの微細化が進むにつれて、レーザーCVDで配線を形成することには物理的な限界が生じるようになった。そこで、開発チームが目を向けたのが液晶パネルであった。液晶モニタに代表されるFPD(フラットパネルディスプレイ)が大型化、高精細化するにつれて、欠陥なく製造することはますます難しくなっている。現在のハイビジョンテレビの画素数は200万を越えており、全ての画素を欠陥なく製造することは不可能に近い。その一方で、大型化が進むことによって、画素欠陥に対する顧客の許容度はますます低下している。それゆえ、FPDの製造ラインでは、画素の修正工程が不可欠となっている。この工程で、オンチップ配線システムの技術が活かされている。FPDはLSIほど微細ではなく多層化されているわけでもない。それゆえ、LSIへの適用が難しい技術でも十分に活かされる。例えば配線がショートしている部分では、レーザー加工による修正が行われており、断線している部分ではレーザーCVDの他、オンチップ配線システムでは採用されなかった、液体材料を塗布する技術も活用されている。LSIの試作向けに開発された技術が現在ではFPDの量産工程で応用されているわけである。

本郷のチームが液晶パネル向けの基礎検討を始めたのは1992年のことである。当時、TFT液晶パネルの配線幅はちょうど5 μ m程度であり、オンチップ配線システム向けに開発したレーザーCVDの能力に合致していると思われた。しかしながら、レーザーCVDによる、配線修正システムには、1つ、大きな問題があった。レーザーCVDでは、真空中で反応ガスを入れるための真空チャンバが必要となる。液晶パネルの大型化とともに、この真空チャンバも大型化する。こうした大型装置で、真空引きを行い、ガスを充填するという作業を繰り返すのは、時間的に到底許容できるものではない。そこで、開発チームは、レーザーCVDを諦めて、オンチップ配線用には棄却された液体を塗布する方式をあらためて採用して技術開発を行った²¹。

一般に日立では、自社開発の生産設備は外販しないケースが多く、この液晶パネル製造向けの装置も外販されていない。事業部や工場サイドからすれば、自分たちが資金を提供して開発した技術が他社に流れてしまうことは避けたい。会社全体としても、装置の販売から得られる利益よりも、製品の市場における競争へのマイナスの影響の方が大きいと判断される。少なくとも、外部でも同じような装置が販売されるようになるまでは、社内の技術は内部に囲われる。

5. 成功要因

生産技術研究所、デバイス開発センタ、神奈川工場のメンバーによるオンチップ配線形成シス

²⁰ 現ルネサステクノロジ

²¹ ただし、真空状態を局部化することによって大型化避けたレーザーCVD装置による液晶パネルの修正装置を販売している企業もある。

テムの開発が成功し、日立の大型コンピュータの開発期間短縮に一定の貢献をすることができたのはなぜか。この問いに対する答えは、これまでの記述の中にちりばめられており、それを安易な因果的説明としてまとめることには慎重になるべきである。そこで、以下では、開発チームのメンバーが当時を振り返って、どのように、マネジメント上の成功要因をまとめたのかを紹介することにとどめたい。以下の4つの要因がそれらの要因である²²。

(1) ピークルとなる製品の存在

大型計算機という会社にとって最重要製品がピークルとなっていた。この製品に対し、本開発を含めて多くの開発プロジェクトを推進し、人材と資金を集中して投入する経営方針を会社が持っていた。

(2) 開発に対するトップ方針

本社幹部が、技術的ハードルは高かろうとも本来目指すべき技術に挑戦するよう方向を示した。また大規模な開発投資の提案にも前向きな判断を下した。

(3) 実行部隊の挑戦

研究部門が、先進技術の基礎的な研究開発を、具体的な必要性が持ち上がる前から着手していた。この技術蓄積をもとに事業部門と研究部門が、世の中で誰も着手していなかった課題に高い目標をもって果敢に挑戦し、大規模な開発投資についても積極的に本社に提案した。

(4) 強固な開発体制

神奈川工場、デバイス開発センタ、生産技術研究所が、必要な人材を豊富に投入した。また「特研」という複数事業部にまたがるプロジェクト体制によって、大型計算機の開発とそれを支える本技術開発のベクトルを一致させ、開発時間の遅れを回避するマネジメントをきちんと行った。

²² これら4つの要因は、一橋大学COE大河内記念賞ケース研究プロジェクト第21回講演会資料より抜粋。

IIR ケース・スタディ 一覧表 / 2004-2007

NO.	著者	タイトル	発行年月
CASE#04-01	坂本雅明	「東芝のニッケル水素二次電池開発」	2003年2月
CASE#04-02	高梨千賀子	「富士電機リテイルシステムズ(1): 自動販売機 自動販売機業界での成功要因」	2004年3月
CASE#04-03	高梨千賀子	「富士電機リテイルシステムズ(2): 自動販売機 新たなる課題への挑戦」	2004年3月
CASE#04-04	高梨千賀子	「富士電機リテイルシステムズ(3): 自動販売機 飲料自販機ビジネスの実態」	2004年3月
CASE#04-05	伊東幸子 青島矢一	「ハウス食品: 玉葱催涙因子合成酵素の発見と研究成果の事業化」	2004年3月
CASE#04-06	青島矢一	「オリンパス光学工業: デジタルカメラの事業化プロセスと業績V字回復への改革」	2004年3月
CASE#04-07	堀川裕司	「東レ・ダウコーニング・シリコン: 半導体パッケージング用フィルム状シリコン接着剤の開発」	2004年3月
CASE#04-08	田路則子	「日本開閉器工業: モノづくりから市場創造へ「インテリジェントスイッチ」」	2004年3月
CASE#04-09	高永才	「京セラ: 温度補償水晶発振器市場における競争優位」	2004年3月
CASE#04-10	坂本雅明	「二次電池業界: 有望市場をめぐる三洋、松下、東芝、ソニーの争い」	2004年3月
CASE#04-11	三木朋乃	「前田建設工業: バルコニー手摺一体型ソーラー利用集合住宅換気空調システムの商品化」	2004年3月
CASE#04-12	尹諒重 武石彰	「東洋製罐: タルク缶の開発」	2004年3月
CASE#04-13	藤原雅俊 武石彰	「花王: 酵素入りコンパクト洗剤「アタック」の開発」	2004年10月
CASE#04-14	軽部大 井森美穂	「オリンパス: 超音波内視鏡の構想・開発・事業化」	2004年10月
CASE#04-15	軽部大 小林敦	「三菱電機: ポキポキモータ 新型鉄心構造と高速高密度巻線による高性能モーター製造法の開発」	2004年11月

CASE#05-01	青島矢一 宮本圭介	「テルモ(1): 組織風土の改革プロセス」	2005年2月
CASE#05-02	青島矢一 宮本圭介	「テルモ(2): カテーテル事業の躍進と今後の課題」	2005年2月
CASE#05-03	青島矢一 河西壮夫	「東レ(1): 東レ炭素繊維複合材料“トレカ”の技術開発」	2005年2月
CASE#05-04	青島矢一 河西壮夫	「東レ(2): 東レ炭素繊維複合材料“トレカ”の事業戦略」	2005年2月
CASE#05-05	兒玉公一郎	「ヤマハ(1): 電子音源に関する技術蓄積」	2005年2月
CASE#05-06	兒玉公一郎	「ヤマハ(2): 携帯電話着信メロディ・ビジネスの技術開発、ビジネスモデル構築」	2005年2月
CASE#05-07	坂本雅明	「二次電池業界(改訂): 技術変革期における新規企業と既存企業の攻防」	2005年2月
CASE#05-08	高永才	「京セラ(改訂): 温度補償水晶発振器市場における競争優位」	2005年2月
CASE#05-10	坂本雅明	「東北パイオニア: 有機ELの開発と事業化」	2005年3月
CASE#05-11	名藤大樹	「ハイビジョンプラズマディスプレイの実用化 プラズマディスプレイ開発協議会の活動を中心に」	2005年7月
CASE#05-12	武石彰 金山維史 水野達哉	「セイコーエプソン: 自動巻きクォーツ・ウォッチの開発」	2005年7月
CASE#05-13	北澤謙 井上匡史 青島矢一	「トレセンティテクノロジーズによる新半導体生産システムの開発 300mm ウェハ対応新半導体生産システムの開発と実用化」	2005年10月
CASE#06-01	武石彰 高永才 古川健一 神津英明	「松下電子工業・電子総合研究所: 移動体通信端末用 GaAs パワーモジュールの開発」	2006年3月
CASE#06-02	平野創 軽部大	「川崎製鉄・川鉄マシナリー・山九: 革新的な大型高炉改修技術による超短期改修の実現 大ブロックリング工法の開発」	2006年8月

CASE#07-01	武石彰 宮原諄二 三木朋乃	「富士写真フイルム： デジタル式 X 線画像診断システムの開発」	2007 年 7 月
CASE#07-02	青島矢一 鈴木修	「ソニー： フェリカ(A):事業の立ち上げと技術課題の克服」	2007 年 7 月
CASE#07-03	青島矢一 鈴木修	「ソニー： フェリカ(B):事業モデルの開発」	2007 年 7 月
CASE#07-04	武石彰 伊藤誠悟	「東芝： 自動車エンジン制御用マイコンの開発」	2007 年 8 月
CASE#07-05	青島矢一 朱晋偉 吳淑儀	「無錫小天鵝株式会社： 中国家電企業の成長と落とし穴」	2007 年 8 月
CASE#07-06	青島矢一	「株式会社日立製作所： LSI オンチップ配線直接形成システムの開発」	2007 年 9 月