

一橋大学GCOEプログラム  
「日本企業のイノベーション—実証経営学の教育研究拠点」  
大河内賞ケース研究プロジェクト

世界の半導体微細計測を支える測長用SEM(走査電子顕微鏡):  
“日立”を 体現する独自性 と普遍性

中馬宏之

2012 年 10 月

CASE#12-11

---

本ケースは、主に科学研究費・基盤 S プロジェクト『イノベーション・プロセスに関する産学官連携研究』(代表者:中馬宏之、2008年度～2012年度)の成果に基づいている。また、一橋大学グローバル COE プログラム「日本企業のイノベーション—実証経営学の教育研究拠点」からも一部支援を得た。したがって、後者が支援する「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もある。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。なお、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。

(プロジェクト活動の詳細については <http://hitotsubashiir.blogspot.jp/2012/08/gcoe.html> を参照のこと)

※本ケースの著作権は、筆者もしくは一橋大学イノベーション研究センターに帰属しています。本ケースに含まれる情報を、個人利用の範囲を超えて転載、もしくはコピーを行う場合には、一橋大学イノベーション研究センターによる事前の承諾が必要となりますので、以下までご連絡ください。

【連絡先】 一橋大学イノベーション研究センター研究支援室

Tel:042-580-8423 e-mail:chosa@iir.hit-u.ac.jp



世界の半導体微細計測を支える測長用 SEM（走査電子顕微鏡）：  
“日立”を体現する独自性と普遍性<sup>1</sup>

一橋大学イノベーション研究センター  
中馬宏之

## 1. はじめに

新しいビジネス領域に活路を求めるシャープ・ソニー・パナソニック、経営破綻からの再建を図る DRAM メーカー・エルピーダ、マイコン（MCU）世界首位をバネにして抜本的な経営再建を模索するルネサスエレクトロニクスに代表されるように、戦後の日本経済の成長・発展を支えてきた電機・電子産業が苦境に立たされている。

このように苦悶する日本の電機・電子産業の中で、測長用 SEM（下記参照）において、ほぼ四半世紀にわたって世界トップシェアを維持し、直近でも 80% を超える驚異的な競争力を誇っている企業がある。それが、本論で取り上げる日立ハイテクノロジーズ（2001 年に日立製作所・計測器グループと日製産業を統合し設立）である。そして、同社は、その日本経済への貢献が讃えられ、日立製作所・日立ハイテクフィールドディングと共に 2007 年度の大河内記念生産賞を獲得した。

本論の目的は、上記の偉業を達成した日立グループの高い競争力の源泉を、長期間にわたる聞き取り調査や各種公開データ（含む特許・論文）解析、1960 年代にまで遡った歴史分析に基づいて探ることである。そして、これらの検討結果に基づき、日本企業、特に“究極の自前技術”を多数保有する日立タイプの企業が、テクノロジーの急速な複雑化ならびにマーケットの多様化・グローバル化の波の中で、どのようにして本来の強みを発揮・維持しながらさらなる発展経路を模索可能であるかについても学んでみたい。

電子顕微鏡というとなかなか近づきにくい雰囲気がある。ただし、その基本構造は、光線の代わりに目に見えない電子線、光学レンズの代わりに磁界（磁力）や電界（電圧）の屈折作用を利用した電子レンズ、人間の目の代わりに見えない電子線を捉える検出器が使われていることを知れば、なじみの光学顕微鏡とほぼ同じものと気づく。もちろん、検出器は、飛び込んできた電子を（可視）光に変えてくれるシンチレータと呼ばれる蛍光物質を使って最終的に人間の目に見えるようにしてくれる。

光の代わりとなる電子線を生み出す特殊な装置が電子銃である。銃と呼ばれるのは、タングステンなどの固体内に存在する電子を電子線として固体外に発射する（引き出す）装置だからである。引き出す際に高熱のエネルギーを用いるものを熱電子銃、熱エネルギーと高電界（高電圧）を共に用いるものを電界効果（Field Effect : FE）電子銃と呼ぶ。後者は、前者に対して抜群の性能を誇る。FE 電子銃には、さらに、Cold-FE（CFE）と Thermal-FE（TFE）又は Schottky-Effect（SE）の二つの基本方式がある。そして、次節で紹介する初代の日立製 CD-SEM に使われた電子銃こそ、高い輝度（明るさ）と狭い

<sup>1</sup> 本論作成は、日立ハイテクノロジーズと日立中央研究所で活躍してこられた 25 名を超える方々への聞き取り調査（2010 年 2 月～2012 年 7 月）に基づいている。長時間ほぼ延べ二回にわたり御協力頂いた皆様にこの場をお借りして心から御礼申し上げたい。また、全ての調査に際して御協力頂いた佐々木寛氏（日立ハイテクノロジーズ研究開発本部企画部）と本調査実現にも御尽力頂いた杉本有俊氏（同事業戦略本部長）に重ねて心から御礼申し上げたい。本研究は、科学研究費・基盤 S プロジェクト『イノベーション・プロセスに関する産学官連携研究』（代表者：中馬宏之、2008 年度～2012 年度）の成果に基づいている。

エネルギー幅（波長のばらつき）という理想的な要件を備えた日立の誇る CFE であった。

測長用走査電子顕微鏡は、CD-SEM と呼ばれる。CD は英語では Critical Dimension、日本語では微細寸法測定を意味する。他方、SEM は走査型電子顕微鏡のことである。SEM では、電子銃から発射された電子線（入射電子）を試料に走査し、その際に試料表面から飛び出してくる電子（二次電子）を検出器に誘導し試料を観察する方式の電子顕微鏡である。したがって、CD-SEM とは、半導体用ウェーハの寸法測定に特化した SEM を意味する。寸法測定＝測長であるから、CD-SEM を測長用 SEM とも呼ぶ。

以下では、次の第 2 節で全盛期にあった 1980 年代半ばの日立が総力を上げて生み出した CD-SEM 第一号機（S-6000）の開発過程とその時代背景をたどる。この S-6000 は、CFE 型電子銃がその強みと併せ持つ弱みのために、1990 年代を過ぎて新たに登場してきた TFE 型の CD-SEM に太刀打ちできなくなっていく。第 3 節では、日立が、この難局を独自の SE 型 CD-SEM で克服していくプロセスをたどる。

ただし、この難局を克服したのも束の間、90 年代半ばを過ぎると第二、第三の難局が波状的に日立陣営に立ちはだかった。第 4 節では、これらの難局が、日立内で時代が熟すのを長年にわたって待ち受けていた基幹技術の表舞台への登場によって打開されていく過程をたどる。この節の特徴は、世界を代表する同業他社との熾烈なつばぜり合いの状況を、聞き取り調査と特許・論文を含めた多くの公開資料を用いて示すことである。

第 5 節では、上記の難局を乗り越えた後、2000 年代にはほぼ一本調子で日立の市場シェアが上昇していった過程をたどる。特に、その際に重要な役割を果たした日立製 CD-SEM の大きな強みである測定再現精度（再現性）<sup>2</sup>の生成要因を探る。そして、最後に、第 6 節で分析のインプリケーションが示される。

## 2. 日立の総力が生み出した第一号機：S-6000

日立製 CD-SEM 第一号機は、S-6000 の型番で知られる。この節では、まず、S-6000 が、日立内に蓄積されてきた様々な基幹技術を朝露の一滴のような形で凝集して生み出された過程について触れたい。S-6000 の製品開発は 1983 年に開始された。S-6000 が想定したユーザーは、SEM 操作に関しては素人同然の半導体検査工程のオペレータであった。そのため、それまでプロのノウハウに頼っていた数多くの作業が自動化された。当時の組込ソフト開発をリードした技術者によれば、その際、当時最先端の日立製 SEM の 10 倍を超える複雑性に対峙する必要があった。また、大きなシリコン・ウェーハを扱うために、試料用のステージ、搬送系、固定具（チャッキング）等の装置についても新規設計された。

このように従来型 SEM に比べて大規模で複雑なハード・ソフト構造をもつ S-6000 であったが、驚くことに約 1 年半で試作が完成した。なぜこのような猛スピードでの開発に成功できたのだろうか？ その理由を探っていくと、S-6000 というイノベーションが具現化されて行く中で、時代が熟すのを長年にわたって秘かに待ち受けていた数多くの基幹技術とそれらを受け継いできた数多くの人々が浮かび上がってくる。しかも、驚くことに、それらのほとんどが当時最盛期にあった日立社内に既に蓄積されてきていた。

<sup>2</sup> 同一試料の載せ替え等の変更によっても同じ測定値が得られる精度。

## A. 的確な製品基本スペック（仕様）の決定

従来の製品系列とは大きく異なる S-6000 のような製品では、数多くの潜在ユーザー獲得のために、基本スペックを的確に決定することが最も重要である。ただし、スペック決めの難しさは、製品が斬新で複雑であればあるほど増大する。スペック決めの幅と深さが、部門や企業の境界を越えて拡大するためである。そして、どのような製品であっても、新奇性や複雑性がある閾値を超えて増大して行くと、遅かれ早かれ自分達が生み出した製品の良否を自分達で評価できなくなる。

ただし、S-6000 の場合、この負の連鎖に陥る懸念は、当時全盛期にあった日立の中央研究所、機械研究所、生産技術研究所、コンピュータ事業部、半導体事業部、計測器事業部、日製産業などの総力を結集することによって杞憂となった。実際、中央研究所、デバイス開発センター、半導体事業部の精鋭からなる正式な検討会が 1979 年に開始されている。そして、検討開始後の 1 年目には、半導体研究開発で世界の最先端を走っていた中央研究所主導の 1 メガ DRAM プロジェクトとの同期化も図られた。

製品スペックの決定過程では、当時一世を風靡していた CFE 型 SEM の S-800 を半導体用に改造した S-806 が重要な役割を果たした。結集した研究開発者は、この S-806 を用いて、試料への帯電防止条件、試料損傷を最小限に留めるための加速電圧や照射線量、焦点合わせやコントラストの自動化の程度、半導体に適した分解能や再現性、安定性・信頼性・高速性を保証するステージ構造、使い勝手の良い GUI(Graphical User Interface)、目標とすべきスループット（生産性）、等々の主要スペックを決定していった。

## B. 圧倒的な競争力の源泉：CFE 電子銃の技術蓄積

基本スペックを的確に決定できれば、もの造り力とマーケティング力がさらに活きる。CD-SEM の場合、前者は、電子銃、電子レンズ、ステージ、二次電子検出器などの要素技術、それらを統合するハード・ソフトの設計力、現場のもの造り力として現れる。これらはいずれも重要であるが、S-6000 の圧倒的な優位性は、CFE 電子銃がもたらした。

日立が CFE 技術に関して圧倒的な優位性を獲得することになった転機は、是が非でもこの技術を自家薬籠中のものとするという日立の研究開発（R&D）トップ層が行った 1960 年代末期の経営決断にさかのぼる。そのことは、この分野の先駆者であったシカゴ大学 Crewe 教授の懐深く飛び込む決断でもあった。ただし、この経営決断は、極めて大きなリスクを孕むものであった。実際、Crewe 教授の回想論文（Crewe(2009), 15 頁）によれば、当時多くの専門家は CFE 型 SEM 実用化に懐疑的であり、「利用可能な最善の真空度よりも 5 桁高い超高真空を安定的に達成する必要があるのでとても無理だ」と唱えた。

日立の R&D トップ層は、上記の決断に合わせ、1970 年に Crewe 教授を計測器事業部の拠点である那珂工場に招聘した。また、招聘直前には、CFE 技術獲得のために不可欠な超高真空技術の獲得に本格的に乗り出した。そこで白羽の矢が当たったのは、計測器メーカーとして世界で名を馳せていた米国 Perkin-Elmer だった。当時国内では、CFE 型 SEM に適した超高真空技術が利用可能でなかったからである。他方、Perkin-Elmer は、宇宙開発で培った先進的な超高真空技術を保有していた。しかも、日立には、この種の超高真空技術が米国では既に汎用段階にあったことが幸いした。

日立と Perkin-Elmer の結び付きは、1972 年に商用 CFE 型 SEM (HFS-2) として実

を結ぶ。HFS-2 の米国内独占販売権を得ていた Perkin-Elmer は、この装置を業界誌 Micron で共同開発の成果として高らかにたたえている (Perkin-Elmer (1973))。この論文によれば、HFS-2 の電子銃を収納する部分で  $5 \times 10^{-8}$  トール (約  $7 \times 10^{-6}$  パスカル) の超高真空が実現されていた。さらに、この装置が、当時最先端の日立製透過型電子顕微鏡 (HU-12A) の 2 倍以上と驚くほど高価であったと記されている。

さらに、イノベーションの発現という視点から特に興味深いのは、超高真空を達成するために不可欠な各種部材のガス抜き処理 (真空脱ガス処理) を極めて難しくしていた当時の産業構造的な要因である。いかなるイノベーション実現にも、アイデアを生み出す人々と彼らに豊富な学習機会を与える“共鳴場”が不可欠であるが、局所的なヒトと場の相乗効果が幅広く拡散していくためには時代の流れとの同期が必須である。

そのような視点から当時の国内状況を眺めると、日立にとって四方八方に高い壁がそびえ立つ状態であった。例えば、どの国内鉄鋼会社も、真空溶解技術<sup>3</sup>を用いて不純物やガスの混入を極力避けたステンレスを量産できなかった。米国では一般的であった鏡筒と排気管を連結して超高真空を引くための無酸素銅<sup>4</sup>を用いた継ぎ手の技術も普及していなかった。オイル混入などを避けクリーンな真空を実現するためのイオンポンプやターボ分子ポンプの調達も難しかった。<sup>5</sup> このように、日立が不退転の決意で挑んだ CFE 型 SEM の商用化は、産業構造的にも大きなハンディキャップを背負った時代での試みだった。

その後、1980 年代を迎えると国内にも超高真空技術の時代が訪れた。具体的には、日本のセイコー精機が 1983 年、そして大阪真空機器製作所が 1985 年に完全非接触型磁気軸受を持つターボ分子ポンプの製造・販売を開始した。<sup>6</sup> そして、1983 年はまさに S-6000 の製品開発プロジェクトが開始された年でもあった。事実、S-6000 の真空排気系には、機械研究所の研究開発者のアドバイス等が勘案され、セイコー精機の製品が使用された。なんという巡り合わせの良さだったのであろうか。

### C. S-6000 登場を背後で支えた基幹技術：SEM 製品系列による一目瞭然化

S-6000 を生み出した日立の潜在力は、同社製 SEM の製品系列史をたどることでより鮮明に実感できる (図 1)。この図は、日立最初の商用熱電子型 SEM (HSM-2) から直近の SU3500 を示している。図の縦軸は分解能、横軸は発売開始年次である。数値はすべて公開データに基づく。◇の系列が熱電子型 SEM、△が CFE 型 SEM、○が CD-SEM である。図 1 によれば、同じ CD-SEM でも、S-6100 までは CFE 型であったが、S-8800 以降は独自の SE 型に変わった。さらに、この図から、S-6000 を生み出した CFE 電子銃の潜在力が、CFE 型 SEM である S-800 や S-900 の生まれた 1980 年代前半に飽和状態に達していた様子を推測できる。

事実、1970 年代の CFE 電子銃は、長時間の安定稼働が難しかった。その弱点を補強するため、HFS-1 では、鏡体内のタレット型カートリッジ (旋回式部品交換台) に 4 個 CFE チップ (先を尖らせた金属結晶) を装着していた。HFS-2 で装着チップが 2 個に減ったが、

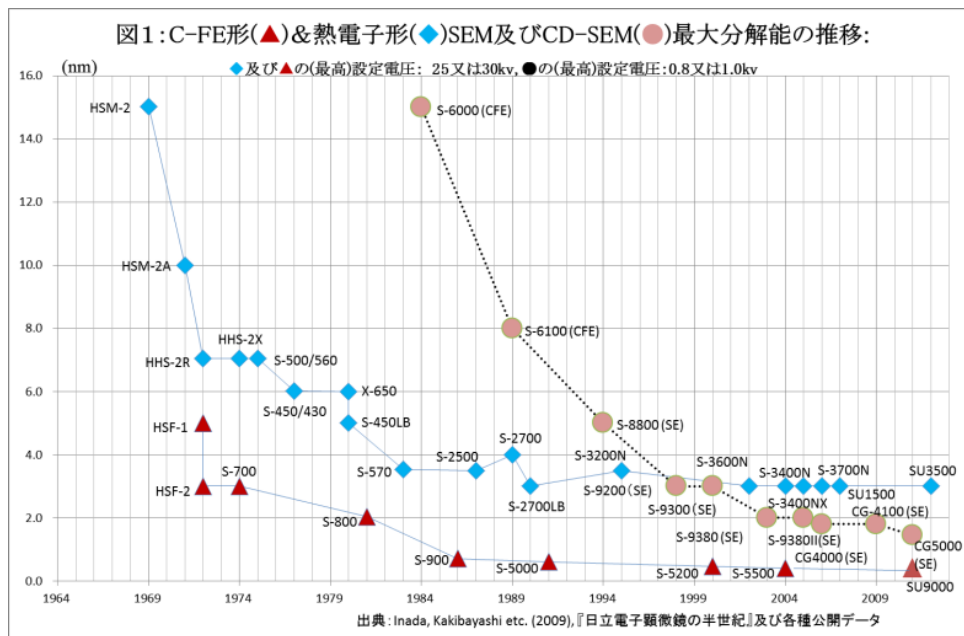
<sup>3</sup> 真空溶解炉を用いて大気中の不純物混入を防ぎ高純度化をはかるための精錬技術。

<sup>4</sup> 含有酸素量が 0.001% から 0.005% とごく微量に抑えられている純銅。

<sup>5</sup> S-6000 の設計主査への聞き取りに基づき、澤田 (2004)、上田 (2009) を参照。

<sup>6</sup> オイルフリーの磁気浮上力によって回転軸を外側の固定子と非接触にした超真空対応型の軸受装置。1976 年に世界ではじめてドイツ・ライボルトが導入 (澤田 (2004))。

依然として安定しなかった。ところが、1980年代初めになると、CFE電子銃の陽極にセラミック・ヒータを組み込み直接加熱するという日立独自の“インナーベーク法”が考案・特許化された。その結果、S-800では、CFE電子銃の動作安定性が飛躍的に改善し装着チップが1個ですむようになった。<sup>7</sup> S-800の時代になってやっと半導体工場用にCD-SEMを導入する確固たる基礎条件が確立したのである。



高度な自動化を達成したS-6000の誕生は、図1の製品系列内での相互依存関係をたどることにより、複雑な組込ソフトウェア構築のための学習過程としても眺めることができる。ソフト開発を主導したエンジニアによれば、図中のX650ではじめてマイクロプロセッサ(MPU)がSEMに載りはじめ、各種動作をソフトウェアで組めるようになった。また、このX650や図中のS450/430は熱電子型だったのでCFE型とは電子銃の制御方式が異なっていたが、その他の排気系、電子レンズ系(以下電子銃筒と呼ぶ)、ステージ系などの制御ソフトはS-800用に活用された。さらに、S-800では電子銃用の高压制御系が完全自動化されたが、それもそのままS-6000で活用された。

S-6000用の組込ソフト開発でさらに興味深いのは、S-800の10倍を超すコードで書かれたプログラムを動かす装置を大型コンピュータ無しで開発できる時代になっていた点である。事実、S-6000では、使い勝手に直結するGUI用に当時パソコンベンチャーとして有名だった日本のソードのPC、真空排気系、電子銃筒系、ステージ系には各々にMotorolaのMC6809が使用された。その結果、S-6000では、各種の作業を4つのMPUで並列的に処理する先進的な分散処理システムが動作していた。このように、S-6000の登場には、組込ソフトウェア分野でも時代が大きな身方をしてくれた。

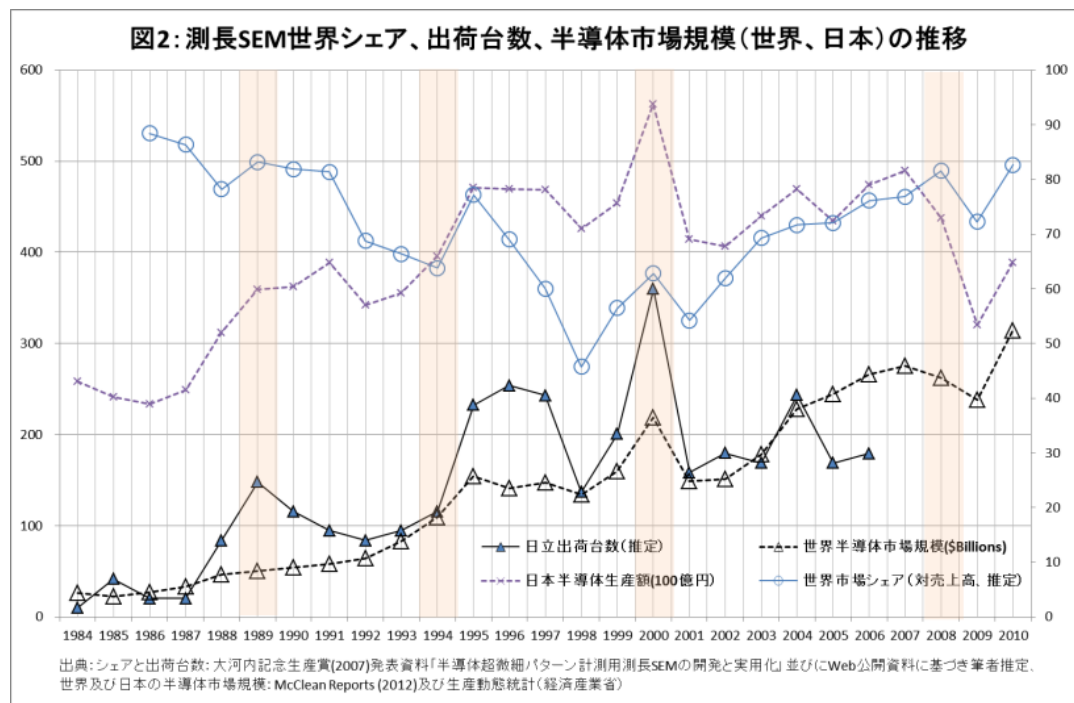
S-6000では、シリコン・ウェーハを載せる大きな試料ステージも新たに開発された。その際には、既に半導体露光装置や電子線描画装置などが製造されていたため、前者からステージの高速化ノウハウ、後者から真空中でのステージの精密制御ノウハウが活用され

<sup>7</sup> 市ノ川他(2000)及び開発設計主査への聞き取り参照。

た。また、機械研究所の磁性流体軸受(磁性を用いた非接触型軸受け)の専門家や中央研究所のステージ設計の専門家のアドバイスも活かされた。さらに、品質保証部門の協力を得て、半導体生産ラインでの長期安定稼働をめざしたステージ周りの徹底的な寿命検査も行われた。まさに、日立の技術の総力が動員された様子が垣間見える逸話の数々である。

S-6000の試作第一号機は1984年にデバイス開発センター(コンピュータ事業部)に、量産第一号機も改良に次ぐ改良を経て1985年に武蔵工場(半導体事業部)に納入された。なお、歩留まり向上用の強力な“武器”が競合他社に流れることは、両事業部にとって大きな心配事だった。そのため、本格的な外販の開始が1年ほど遅れた。ただし、そのような状況もどうか打開され、沖電気、ソニー、富士通、日本TI、米国TI、現代電子(現SK-ハイニックス)、サムスン、等々と順調に販売されていった。

S-6000の順調な滑り出しは、図2によってハッキリと確認できる。この図の下方▲印で始まるグラフは、1984年～2006年の年間出荷量を示している。データは、大河内生産記念賞受賞時に公開された累積出荷量から各年次の差分をとって推定した。2007年以降の数値は非公開である。出荷量は、縦軸が台数、横軸が年次を示す。○印の実線は、世界のCD-SEM市場での日立のシェアである。△印の点線は、世界の半導体市場規模(単位10億ドル)、真ん中x印の薄い点線が日本の市場規模(単位100億円)を示す。図2が示すように、S-6000はシリーズ化され、出荷量が1989年に至るまで急速に伸びた。そして、1989年には、セミインレンズ型<sup>8</sup>の電子鏡筒を搭載した最新鋭機S-6100が登場し、分解能が15nmから一気に8nmに上がり、スループットも約2倍になった。競合他社は、この時点で登場したS-6100の圧倒的な分解能向上に固唾をのんだ。



<sup>8</sup> 対物レンズの形状を工夫して磁場レンズの中心が本体の下側に形成されるようにして、大きな試料も磁場内に置けるようにした電子レンズ。試料を磁場内におけると、開口数(レンズの最外周部から試料表面を見込む角度)を大きくできるので分解能が増す。



### 3. TFE 型 CD-SEM の登場：日立製 CD-SEM の 1 回目の難局

ところが、S-6100 が登場した翌年の 1990 以降、特に 1992 年から市場シェアが急速に低下していった。CD-SEM 市場に何が起こったのだろうか？

#### A. S-6000 の盛衰：TFE 型電子銃の破壊的インパクト

市場シェアの低下には、CFE 型 CD-SEM に代わって TFE 型 CD-SEM が席卷しはじめたことが大きく影響した。CFE 型電子銃は、TFE 型電子銃に比べて輝度がかかなり高くエネルギー幅も狭いが同時に弱みも抱えていた。電子が放出される際に陰極表面が残留ガスなどで少しずつ荒れてくるため、定期的に装置を止めて陰極の瞬間的な加熱（フラッシングと呼ぶ）が必要だった。さらに、フラッシング後には、光軸（入射電子の通り道）がずれるので光軸調整が不可欠であった。しかも、光軸調整の完全自動化は、技術的にもコスト的にもかなり難しかった。

このような CFE 型 CD-SEM のフラッシング制約は、80 年代後半に常態化してきた 24 時間 365 日稼働を前提とする半導体工場にとって大きなコスト増となってきた。特に、90 年代初頭から登場しはじめた 200mm 工場では“完全自動化”<sup>9</sup>が基本となり、工場投資額も急増した。また、微細化の進展によって、80 年代に第 1 位だった人・装置関連のキラー欠陥（致命的欠陥）が激減し、半導体デバイスを製造する上での造り方そのものに起因するキラー欠陥（プロセス起因欠陥）が群を抜いて 1 位になった。そのため、熟練工の目視に頼っていた部分をできるだけ自動化する必要性が増した。さらに 1990 年代半ば以降、TSMC に代表されるスループット重視の製造専門会社（ファンダリ）が飛躍的に伸び始めた。そのため、検査工程の自動化要請が以前にも増して高まった。

自動化・スループット重視という流れの中で脚光を浴びはじめたのが、フラッシング制約がなく長時間使用可能な TFE 型電子銃であった。しかも、TFE 型電子銃は、1990 年頃に実用レベルに達したという。TFE 型電子銃は、米国 Oregon 大学 Swanson 教授の発明として知られている。Swanson 教授は、1980 年代後半の急速な微細化の進展を実感し、自らが 1971 年に創設した米国 FEI の CEO として 1987 年から専念することになる。また、TFE 型電子銃の中核技術の多くが数々の学術発表によってかなり公知になっていたことが、TFE 型 CD-SEM の新規参入をさらに推進した。

TFE 型電子銃は、CFE 型 CD-SEM に破壊的なインパクトを与えた。事実、日立の CFE 型電子銃の CD-SEM 市場での優位性は、TFE 型電子銃の実用化と共にほぼなくなってしまった。その結果、市場が“戦国時代”の様相を呈しはじめた。実際、TFE 型 CD-SEM に限って当時の新聞記事等を拾ってみると、1985～1995 年にかけて下記のような参入が相次いだ。日立側の関係者にとっては、居ても立ってもいられない状況だったと思われる。

- ・米国 Nanometrics：Model 100（1986/12/16 日経産業新聞）
- ・ホロン（KLA への相手先ブランド）：ESPA-11（1986/11/15 日経産業新聞）
- ・日本電子：JEPAS1200Z（1986/11/25 日経産業新聞）
- ・明石製作所・東芝：MEA-4000（1988/09/02 日刊工業新聞）

<sup>9</sup> 自動搬送用ボックスを利用して工程間・工程内の双方を自動化したレベル。

- ・ホロン： $\alpha$ -1（1990/07/06 日経産業新聞）
- ・イスラエル OPAL：OPAL7830（1992、Web データ）  
（1986 年設立、電子鏡筒の雄の独 ICT と長年緊密なコラボ、95 年に同社吸収）
- ・日本電子：JWS-7700/7600（1992/04/21 日刊工業新聞）
- ・イスラエル OPAL：OPAL7830i（1995/08/10 日刊工業新聞）
- ・米国 KLA-Metrologix：KLA-8100（1995/12/06 日経産業新聞）  
（Metrologix の設立は 1990 年、商標は Metrostep。1994 年に KLA が買収）
- ・トプコン・東芝：ABT-2060（1995/12/06 日経産業新聞）

## B. 起死回生の独自 SE 型 CD-SEM：日立 S-8800 の登場

このような逆境の中、日立内では起死回生のための秘策が準備されていた。その一つは、中央研究所での CFE に代わる新しい電子源の実用化研究であった。特に、TFE に類する独自の SE 電子銃の実用化研究が、90 年代に入って本格化した。そして、計測器事業部との緊密なコラボの末、独自の構造（曲率半径等）や製造方法などを確立し 1995 年から内製が開始された。

日立の SE 型 CD-SEM 導入が遅れた主要因は、CFE に比べて SE の輝度が一桁減少し、エネルギー幅も 2 倍ほど拡大するためだった。そのため、S-6100 に搭載されたセミインレンズ型の電子鏡筒を踏襲するだけでは、同機の分解能 8nm すら達成できなかった。したがって、SE 型 CD-SEM 導入には、この負の効果を大きく上回る斬新な技術導入が不可欠であった。この切迫した状況下で、再度、日立内から起死回生の独自 SE 型 CD-SEM が 1994 年に生み出された。それが、セミインレンズ型の電子鏡筒にリターディング機能と電子ビーム分離機能 EXB（イークロスビーと読む）を装備した S-8800 だった。

リターディングとは、電子銃から対物レンズ（試料に最も近いレンズ）までは電子線に高い電圧をかけておき、試料の直前で電圧を低下させて電子線を減速させる技術である。より高い電圧がかかった電子線は、電子線のエネルギーが増える分だけエネルギー幅（波長のばらつき）の影響が小さくなるため、色収差（波長の違いによって発生する焦点のズレ）がおさえられて分解能が上がる。リターディング効果の発生は、1960 年代末から専門家達の間ではよく知られていたという。ただし、実際にどのようにして対物レンズと試料との位置関係などを勘案しながらリターディングを行えば良いかがなかなか分からなかった。ところが、1990 年代前半に、対物レンズの磁界が作るレンズ中心とリターディングの電界が作る静電レンズのレンズ中心を一致させれば、色収差が大きく減って分解能が増すことが分かってきた。<sup>10</sup>

ただし、素人目にも勘コツだけに頼って磁界レンズと静電レンズの中心を精確に一致させるのは“神業”に近いと分かる。この点に関する興味深い事実であるが、日立でのリターディング導入には有限要素法や有限差分法と呼ばれる方法に基づいた日立独自の電子レンズ設計用シミュレーター EMLENS が活用された。また、当時、市販シミュレーターとして MBES (Munro's Electron Beam Software) が名声を得ていたが、次節で触れる

<sup>10</sup> 戸所・江角（日本特許：3774953、1995 年出願）参照。また、本件を含む SEM の技術的理解に際しては、同分野の専門家である津野勝重氏（一橋大学イノベーション研究センター研究員）に御指導いただいた。

当時の KLA 製 CD-SEM に関しても、この MBES の Munro 氏自身が共同開発者として名を連ねている (US 特許 5578821 参照)。CD-SEM の設計複雑性が急増するなか、絡み合った相互依存性に採りを入れるシミュレーション実験の威力がこの時期に急増した様子がうかがえる。

先の EXB (一般的には Wien Filter と呼ぶ) とは、リターディングを行うための必須技術である。試料直前で入射電子を減速すると、試料表面から出てくる二次電子が対物レンズの中心部分に吸い込まれてしまう。入射電子を減速する仕組み自体が、反対向きの二次電子を加速する仕組みとなるためである。そのため、対物レンズと試料の間に ET 検出器<sup>11</sup>を置く従来方式では、二次電子が捕捉できない。捕捉のためには、ET 検出器を対物レンズ上部に置く方式 (スルーザレンズ方式) を導入する必要がある。ところが、ET 検出器には高電圧をかけて二次電子を集める仕組みがあるため、上部に置くと補正機構の導入無しには入射電子に影響を与え光軸自体が揺らぐ。この揺らぎを電界 (E) と磁界 (B) の直交性を利用し補正する技術が日立発の EXB 機構である (佐藤 (1995) 参照)。

Beck 他(1995)は、Wien Filter に関する重要な貢献として 1980 年代半ばから 1990 年にかけて公開された日立や日本電子発の数々の日本特許や学術論文に言及している。そして、世界に先駆けて日立内で EXB の実用化研究がかなり進んでいたと指摘している。さらに、次節で触れる OPAL/AMAT 製 CD-SEM 設計に多大な貢献をしたドイツ Tubingen 大学の Plies 教授 (Plies (2011)) によれば、日立中央研究所では既に 1980 年代前半に EXB に関する研究が行われていた。事実、当事者によれば、S-8800 への EXB 導入のアイデアは、過去に断念された中央研究所での開発成果にヒントを得たという。

#### 4. 検査工程のシステム化とプロセス複雑化：2回目と3回目の難局

S-8800 の登場と共に 94 年から 95 年にかけて出荷台数が急増した (図 2)。市場シェアも 94 年から 95 年にかけて急回復した。ただし、市場シェアの増大は 95 年から 96 年にかけて早くも低下、1998 年には 50%未滿にまで低下した。何が起きたのだろうか？

上記の問いに答えるためには、90 年代半ば以降の同業他社との競争状況を精査する必要がある。1995 年以降の有力な同業他社は、シリコンバレー生まれの計測器企業で 80 年代後半に急成長した米国 KLA (1997 年 Tencor と合併、KLA-Tencor に改称) と 1986 年に創設のイスラエル半導体製造装置ベンチャー OPAL ならびに OPAL を 1996 年に買収した半導体製造装置の米国巨大企業 Applied Materials (AMAT) の 2 陣営にほぼ限られていた。したがって、以下ではこの 2 社に焦点を当てて二つの難局発生の背景と、それらを跳ね返し世界シェア 80%超にまで回復していった日立奮闘の軌跡をたどってみたい。

##### A. 装置内自動化と装置間自動化：KLA 製 CD-SEM とのつばぜり合い

日立の前にまず立ち上がったのは KLA であった。この KLA と日立のつばぜり合いの様子を知るためには、両社の装置を特徴付ける電子鏡筒の比較が有効である。ただし、1995 年頃の KLA 製 CD-SEM の特徴に関する技術資料は、なかなか見つからなかった。そのため、次善の策として US 特許を探してみた。その結果、この時期の KLA 製 CD-SEM

<sup>11</sup> シンチレータと光電子増倍管で構成される検出器。E は Everhart、T は Thornley の略。

の電子鏡筒の特徴を類推可能な US 特許(US5578821、1995 年出願、前述)が見つかった。この特許によれば、当時の KLA 製 CD-SEM の基本的な特徴が、a) セミインレンズ (“シユノーケルレンズ” という用語を使用)、b) リターディング、c) EXB (“Wien Filter” を使用) の三つであることがわかる。つまり、門外漢の筆者には電子鏡筒設計の先進性や堅牢性について判断できないが、当時の KLA の装置は、少なくとも一瞥したところでは、先に紹介した日立製 S-8800 の基本特徴のすべてを備えていた。

また、90 年代後半における日立・KLA・AMAT 間の競争状況を知るため、各社の装置スペックを表 1 にまとめた。どの数値も Web 上の公開資料に基づく。表 1 でもっとも驚く点は、KLA 製 CD-SEM が、他の 2 社をスループットで 2 倍弱も凌駕していた点である。そして、このスループットの差こそが、日立が直面した第 2 の難局に深く関係していた。

それにしても、技術的には勝るとも劣らない筈の日立と新規参入直後の KLA とで、なぜスループットでこれほどまでの差が付いたのだろうか？一つの理由はこうである。KLA 製 CD-SEM では、測長の結果が SEM 画像ではなく座標マップ上に数値化され、それが次工程の(自動)欠陥分類・検査を行う欠陥レビュー SEM と呼ばれる装置群に受け渡される。他方、日立製 CD-SEM では、この座標マップ上の数値情報のみならず測長箇所の鮮明な画像も共に次工程に受け渡される。しかも、画像はいつでも参照できる。したがって、その他の条件が一定であれば、当然スループットは低下する。<sup>12</sup>

表 1 : 1990 年代後半における日立・KLA・OPAN/AMAT のスペック比較

製品名	販売開始年	分解能 (nm)	再現性 (nm)	最大スループット(8インチ処理枚数/毎時)	(ブースティングによる)高アスペクト比の深孔対応(有無)
<b>日立</b>					
S-8820	1994	5.0	5.0	20	無
S-8840	1997	5.0	3.0	30	有(特殊)
S-9200	1998	3.0	3.0	45	有
S-9260	2001	3.0	2.0	66	有
<b>KLA</b>					
KLA-8100	1995	5.0	5.0(推定)	40	無
KLA-8100E	1996	4.0	4.0	40	無
KLA-8100XP	1998	4.0	3.0	48	有(推定)
KLA-8250	2000	<=4.0	2.0	50-55	有
<b>OPAL/AMAT</b>					
7830i	1994	5.0	5.0	25	無
7830Si	1997	3.0	3.0	25	有(推定)
VeraSEM	1998	3.0	3.0	55	有
VeraSEM-3D	2000	2.8	1.0	50	有
注: 7830Siの高アスペクト比(推定)にはカタログ値の高アスペクト比(10)を利用して推定; 8100XPIについてはこの機種から”超高アスペクト比”に対応との発表のみから推定; S-8840は、Oseその他(1999)によれば、アスペクト比=4で深孔底検出できない状態であった。また、S-9260ではアスペクト比=20の解像可。					
スループット: ウェーハ1枚当たり測長5点としたときの1時間当たり処理数					
出典: Web上の各種公表資料より作成					

となると、勝負は、ユーザー側が測長結果を数値情報だけではなく画像情報でも残しておく必要性を当時どれほど強く感じたかに依存していた筈である。聞き取りによれば、微細化が進めば進むほど SEM 画像に戻って検討する必要性が増してきている。微細化の急速な進展により光を駆使する KLA が得意とする外観検査装置(下記参照)では、“見え

<sup>12</sup> 画像参照機能を保有しているのは日立製の CD-SEM のみということであった。

にくい欠陥”や“見えない欠陥”が増えてきたからである。<sup>13</sup> ただし、90年代半ば頃では現在ほど問題が深刻化していなかったため、スループット重視のユーザーが多かった。実際、94年版のNTRS<sup>14</sup>報告書では1箇所だけ“見えない欠陥”に触れているだけだが、97年版ではそれが7箇所に増え解決のためのRoadmap(道程表)も示されようになった。

当時のKLAの強みは、CD-SEMを使用する測長工程の前工程である外観検査工程や異物検査工程等にも深く関係していた。外観検査工程や異物検査工程では、光を使ってウェーハ全体を高速にスキャンし問題が起りそうな箇所を明示した座標マップを次の測長工程用に提供する。例えば、この座標マップ作成は、1984年に発売されたKLA-2020という外観装置から利用可能となった。ただし、1990年初頭までは装置精度がかなり不十分で、多くを手作業に頼らざるを得なかった。ところが、1992年にKLA-2110が登場すると手作業が大幅に減り、次世代機KLA-2130が登場する1994年になると手作業がほぼ不要になった(Guldi(2004)参照)。KLAが米国ベンチャー企業Metrologixを買収してCD-SEMに参入した1995年は、まさに同社にとってこのような絶妙な時期でもあった。

世界中で爆発的に売れはじめたKLA-2110やKLA-2130が作成した座標マップのデータ形式(KLARF)はKLA特殊的で非公開だったため、このマップ座標を自在にCD-SEMに受け渡せるのはKLAだけだった。言い換えれば、KLAは、CD-SEM装置内だけではなく、外観検査装置や異物検査装置→CD-SEM→欠陥レビューSEMといった装置間にまたがるシステム化された自動化によってもスループットを大幅に高めることができた。<sup>15</sup>

ただし、長期間にわたって蓄積されてきた装置レシピ(製造される半導体デバイスに最適化された装置パラメーターのセット)との互換性やCD-SEM自体の持つ長期の再現性も、ユーザーにとっては極めて重要である。実際、ガリバー的な巨大市場シェアを誇ってきた日立にとって、前者はかなり有利に作用した。また、後者を支える類い希な日立のもの造りの力は、微細化が進展すればするほど優位性保持の大きな源泉となった(詳細は後述)。日立のシェアが、この時期でもスペック上の違いほどは低下しなかった理由である。

また、表1が示すように、1998年にはブースティング機能(後述)を備えた高分解能の日立S-9200、そして2001年には高分解能と格段に高いスループットとを誇るS-9260が導入された(背景は後述)。さらに、上記のKLAフォーマットも1990年代末頃から数多くライセンスされようになった。その結果、KLAは、それまでの世界第二位の座をAMATに2002年に奪われ、急速にシェアを落として行った。そして、2005年にCD-SEM市場から撤退した。このようなKLAの動きとは対照的に、図2が示すように、日立のシェアは、これらの新鋭機の登場と共に以前の上昇傾向を取り戻していった。

## B. 米国・ドイツ・イスラエル連合チームとのつばぜり合い：AMAT/ICT/OPAL

現在も続く日立とAMATとのつばぜり合いについては、やや詳しい解説が必要となる。というのは、AMATが1996年に買収したOPALは、電子鏡筒の研究開発をドイツの産学

<sup>13</sup> STRJ 報告 ([http://semicon.jeita.or.jp/STRJ/STRJ/2007/7D\\_YE\\_Kuwabara.pdf](http://semicon.jeita.or.jp/STRJ/STRJ/2007/7D_YE_Kuwabara.pdf)) 参照。

<sup>14</sup> National Technology Roadmap for Semiconductors : 半導体産業の将来像を描く米国のプロジェクト。

<sup>15</sup> ウェーハ検査装置は、大きくは1)パターン付き異物・外観検査装置、2)測長SEM、3)欠陥レビューSEMの三つに分かれ各々の(推定)市場規模の比率は2007年でほぼ4:1:1。1)はKLAが約70%、2)は日立ハイテクノロジーズが約75%、3)はAMATが約50%の世界市場シェアを占めた(和田木他(2008)参照)。

官共同体の申し子である ICT (Integrated Circuit Testing) に依存していたためである。この連携は AMAT による買収後にさらに強化され、日立と米国・ドイツ・イスラエル連合チームとの戦いの様相を帯びはじめた。実際、AMAT の CD-SEM 部隊 (特にインテグレーション部隊) は現状もイスラエルにあり、電子鏡筒の研究・開発・製造の拠点は旧 ICT があったドイツ・ミュンヘン近郊にある。また、同社 CD-SEM 用ステージは、米国 Anorad<sup>16</sup> (少なくとも 7830i 以来利用、1998 年に米国 Rockwell Automation 傘下) が担う。

AMAT は、買収直後の 1997 年に強力なブースティング (後述) 付き 7830Si を発売し、日立にとって極めて手強い相手となった。手強さの源泉は、同社内で電子鏡筒の研究・開発・製造を担当する ICT の生い立ちに遡る。ICT は、1960 年代から 1970 年代にかけて透過型電子顕微鏡で世界に名を馳せた Siemens 出身者達がスピナウトして 1984 年に生まれた企業である。<sup>17</sup> この点は、OPAL/ICT/AMAT 関連の US 特許に基づき作成した表 2 によって確認できる。この表では、1980~2011 年の間に OPAL/ICT/AMAT の名前で SEM 関連の US 特許を公開・登録した人々の中から上位 30 名を取り出し、彼らが発明者となっている特許の特許権者の移り変わりから所属を推定している。<sup>18</sup> この表によれば、30 名中の 8 名が Siemens 出身者、21 名が ICT 出身者 (Siemens 出身者を含む) である。

1 FROSIE, JUERGEN	Siemens→ICT→Advantest→AMAT	16 BECK, STEFFEN	ICT→不明
2 ADAMEC, PAVEL	ICT→AMAT/Israel	17 BENEZ, ANDREAS	ICT→不明
3 PEARCE-PERCY, HENRY	KLA→AMAT	18 HERRMANN, KARL	ICT→不明
4 FEUERBAUM, HANS-PETER	Siemens→ICT→Advantest→AMAT	19 SCHONECKER, GEROLD	ICT→Advantest→AMAT
5 PETROV, IGOR	AMAT/Israel	20 KINTAKA, AKIRA	Advantest
6 WINKLER, DIETER	Siemens→ICT→Advantest→AMAT	21 PLIES, ERICH	Siemens→Univ Tubingen
7 ALMOGY, GILAD	ICT→AMAT/Israel	22 DEVORE, WILLIAM	AT&T→AMAT
8 SHEMESH, DROR	ICT→AMAT/Israel	23 MIRRO, EUGENE	AMAT
9 BANZHOF, HELMUT	ICT→AMAT/Israel	24 SCHMITT, REINHOLD	Siemens→ICT→Advantest→AMAT
10 LANIO, STEFAN	ICT→Advantest→AMAT	25 LEVIN, JACOB	ICT→AMAT
11 BARTOV, AVISHAI	AMAT/Israel→Zeiss?	26 ZHOU, FANG	ICT→AMAT
12 BRUNNER, MATTHIAS	Siemens→ICT→Advantest→AMAT	27 ELGAR, YACOV	ICT→AMAT
13 FEUERBAUM, HANS	Siemens→ICT→Advantest→AMAT	28 VISHNIPOLSKY, JIMMY	ICT→AMAT
14 LISCHKE, BURKHARD	Siemens→不明	29 ELGAR, YACOV	ICT→AMAT
15 BULLER, BENYAMIN	AMAT/Israel	30 ZORAN, OREN	AMAT

ICT は、設立以来 EU 内の国家プロジェクト EUREKA(1985~)や JESSI(1989~96) 等で、欧州半導体産業の復活をめざした低加速 SEM 用電子鏡筒開発の中心的な役割を担った (Frosien (1994)、Frosien and Lanio (1995))。そして、これらのプロジェクトの成果として ICT が生み出した電子鏡筒は、1990 年半ばを過ぎる頃には、セミインレンズ、リターディング、ブースティング (下記)、環状 (レンズ組込型) 検出器 (下記) という低加速 SEM 用の究極技術を兼ね備えるまでに洗練された。1996 年の AMAT による OPAL 買収は、これらの EU プロジェクトの成果が出揃った絶妙なタイミングで行われた。

ブースティング機能付き CD-SEM では、電子銃から放たれた一次電子を加速した後に、対物レンズの直前でもう一段加速し、その後にリターディング (減速) される。この二段構えの加速によって入射電子のエネルギーに対するエネルギー幅の割合がさらに狭まって色収差が低減し分解能が増大する。ただし、その分だけ設計や制御・製造の難度が格段に増大したという。

<sup>16</sup> Anorad Israel の設立は、Rockwell Automation 傘下入りと同時期の 1998 年。

<sup>17</sup> 電子顕微鏡の始祖 Ernst Ruska が関与した Elmiskop のブランド名で世界的に有名。

<sup>18</sup> 分析対象となった SEM 関連特許は 2 万 4928 件、その中から特許ファミリーを勘案して 1 万 6165 件を抽出。AMAT (又は日立) 関連特許はそのうちの 247 件 (同 1160 件) で、発明者は 375 名 (同 1419 名)。

ブースティング機能は、90年代後半になると最先端 MPU や SOC (System-on-Chip) の半導体メーカーに不可欠となった。その理由は、莫大な数のトランジスタの有効利用に必要な配線層数が急速に増えたからである。2012年の McClean Report によれば、95年で6層、99年で7層となり、2001年の8層からは2006年の12層まで毎年1層ずつ上昇、その後は2011年まで12層に高止まりした。これほどの多層配線構造になると、配線層同士を繋ぐ縦方向に開けられた深孔の縦横比（アスペクト比）が6:1、7:1、10:1、20:1、・・・と急速に高まる。その結果、深孔の底や壁が CD-SEM で見えなくなってきた。二次電子の捕捉力を高めるブースティング機能は、この難点を克服するためにも不可欠だった。

ICT 流の環状検出器は、日立流の EXB に匹敵する二次電子捕捉用の強力な機構である。この検出器のアイデアは、1980年代半ばの Darmstadt 工科大学の Harold Rose 教授とその当時の学生 Joachim Zach 氏（現ドイツ CEOS）のアイデアに基づくものだという（以上は Beck 他(1995)参照）。ちなみに、Rose 教授は世界的な電子光学の権威であり、Zach 博士は、Haider 博士と共に原理提示から半世紀をかけて90年代末に遂に商用化に成功した電子顕微鏡用球面・色収差補正装置の立役者として世界的に有名である。ドイツ内の産学官共同体の申し子である ICT の片鱗がうかがえる。

前述のように、AMAT 製の 7830Si へのブースティング機能導入は1997年だった。他方、KLA での導入は1998年（前半）の KLA-8100XP、日立での導入は1998年（後半）の S-9200 であった。このような状況を反映し、AMAT と KLA の市場シェアは、共に97年から98年にかけて増大した。つまり、日立の第3の難局は、ブースティング導入の遅れに大いに関係していた。遅れの理由は十分に分からないが、1998年頃には未だ日立が DRAM 中心のプロセス技術で世界の最先端を走っていた事実が影響した可能性がある。DRAM の配線層は今でも高々2層であり、深孔底の問題は MPU ほど深刻ではなかったからである。<sup>19</sup>

上記の日立のブースティング導入の遅れは、必ずしも AMAT に技術的に遅れていたことを意味しない。たしかに、ブースティング技術の嚆矢は、Plies 教授（上記 Rose 教授の愛弟子）の US 特許 (US5146090、米国1991年、ドイツ1990年出願) である。ただし、日立でも1992年に戸所・大高の特許(日本特許：2919170)が出願されているし、1995年には EXB を改善して検出精度を上げる工夫や対物レンズ内で二次電子を加速する仕組みを持つ戸所・江角の包括的なブースティング特許(日本特許：3774953)が出願されている。しかも、この頃になると、日立独自の電子レンズ設計用シミュレーターが開発されブースティング電圧の最適値の探索などに有効活用された (Ose 他(1999))。その結果、高スループットを誇る S-9260 導入は2年ほど遅れたが、ブースティング機能付きの S-9200 が市場投入された翌年の1999年以降に早くも市場シェアが反転した。追う立場に陥った際の日立の反撃の鋭さが垣間見える。

## 5. 2000年代の急速な市場シェア上昇：その根本要因を探る

図2が示すように、日立の市場シェアは2000年以降になると60%台に回復、そこから2010年の80%超に至るまでほぼ一本調子で上昇していった。ただし、この着実な市場

<sup>19</sup> 当時の日立 DRAM 関係者への聞き取りに基づく (Chuma and Hashimoto (2010)参照)。



シェアの回復過程でも、日立、AMAT、KLA 間の熾烈なつばぜり合いが続いていた。この間の競争を規定した要因は、大きくは、スループットと再現性である。その様子は、表3である程度まで確認できる。この表は、各社の発表資料や Web 上での公開資料に基づいて作成したため、特に AMAT と KLA に関しては不明な項目が多くなっている。

表3：300mm 対応 CD-SEM の分解能、再現性、スループット

販売開始年	機種(300mm)	最大分解能	測定再現精度(再現性)	スループット(枚/時間)@20点
1997	日立S-8C40	5.0	3.0	8(推定)
1998	AMAT-VeraSEM	3.0	3.0	14(推定)
	KLA-8300	<=4.0(推定)	不明	13(推定)
2000	日立S-9300	3.0	3.0	9(推定)
	KLA-8400	<=4.0(推定)	不明	不明
(推定)	KLA-8450	<=4.0(推定)	2.0(推定)	13 - 14(推定)
	AMAT-VeraSEM3D(傾斜機能)	2.8	1.0	13(推定)
2002	日立S-9360	3.0	2.0	13(推定)
	AMAT-NanoSEM3D(傾斜機能)	2.8	0.6	13(推定)
2003	日立S-9380(傾斜機能)	2.0	1.0	14(推定)
	KLA-eCD1(傾斜機能)	不明	0.5	14(推定)
2004	AMAT-VeritySEM(傾斜機能)	1.8	0.5	不明
2005	日立S-9380II(傾斜機能)	2.0	0.6	33
(推定)	KLA-eCD2(傾斜機能)	不明	不明	不明
2006	日立CG4000	1.8	0.3	36
2009	日立CG4100	1.8	0.3	42
2011	日立CG5000	1.5	0.3	50
	AMAT-VeritySEM4i	1.5	0.3	≥50

スループットの推定値：測長5点と推定される数値を20点に換算(=1/4)。VeritySEM4iのみカタログ値="数千箇所"/時間を1/20をかけて枚数に換算(四捨五入)。

出典：Web上での発表値やその他公開資料

#### A. スループット：重要性が格段に増した画像処理技術

1990年代に比べて2000年代以降のスループット競争は、質的にかなり異なってきた。もちろん、分解能が2000年のS-9300から2011年のCG5000まで2倍も拡大していることから類推できるように、電子鏡筒の改善も盛んに行われた。例えば、S-9260以降の機種では、CG4000に代表されるように、新プロセス・新配線材料の導入により問題化した試料への帯電防止のため、帯電現象に応じた高度な自動補正機能が導入された(Nasu 他(2002)及び川田他(2007))。ただし、この時期のスループットや再現性の向上には、高度に自動化された最先端の画像処理技術が大きく貢献した。

表中のスループットは2000年頃に比べ2011年で5倍以上、測定再現精度は同期間で一桁以上改善している。大幅な改善を支えたのが、画像処理のさらなる自動化・高速化、測定アルゴリズムの改善・新導入・高速化等である。CD-SEMが測定するデバイス表面は、段差のある立体構造をしている。ただし、SEM画像は真上から撮影された平面画像である。そのため、SEM画像に基づいてデバイスの立体構造上の問題箇所を明示するためには、高度な画像処理技術や回路設計情報・理論モデル等に基づくシミュレーションが不可欠である。表3が示す大幅なスループット向上は、これらの先進的な画像処理技術が導入された結果だったという。また、VeraSEM3DやS-9360から分解能を超える再現性が保証されはじめているが(表3)、ここにも画像処理技術の急速な進歩が大きく貢献した。



この時期のスループット向上は、以前にも増して競争力向上に大きく貢献した。微細化の急速な進展と共に、CD-SEM で測定が必要な箇所が指数関数的に増えたことによる (ITRS<sup>20</sup> (2009; Metrology, pp. 4-6))。例えば、最先端の微細化技術を使ったデバイスでは、開発段階に限られるが、歩留まり低下に繋がりやすい危険箇所を探し出すために、測定箇所が 32nm の微細化技術で数千~1 万点に及ぶ (川田他 (2007))。この多点計測傾向には、量産段階でも起きており、特に 2000 年以降に加速した 300mm 化の影響も大きい。その結果、一度に読み込む画素数を増やしながらかスキャンと画像処理を同時に高速実行する技術の希少性が急増した。

表 3 を参照する限り、日立は、画像処理技術競争において 2000 年初頭の 2~3 年間は遅れがちだった。ただし、表 1 の S-9260 や表 2 の S-9380II では、大きなスループット上昇が達成された。これら挽回は、画像処理アルゴリズムの改良・改善や日立研究所の画像処理関係の専門家の協力を得て独自開発された高速な SEM 画像特化型の処理ボード搭載 (マルチ CPU 対応) によるものだという。そして、CG4000 から CG4100、CG5000 になるとさらにスループットが急増し、最近では 2000 年初頭の遅れがほぼ解消されている。豊富な自前技術のなせる技だと思われる。

加えて、計測点数の急速な増加により、各種のデバイス・パターンに応じた装置レシピ作りの自動化が不可避となった。日立は、この部分でも、設計情報に基づいて最適な装置レシピを従来の 1/5 の時間で自動作成する DesignGauge と呼ばれるアプリの共同開発に成功し、同業他社に数年先駆けて 2006 年に市場投入した (池上他(2011))。このアプリは、その後の動きから判断すると、日立の市場シェアの維持・向上にかなり貢献した。

## B. 安定性・信頼性：ハイレベルなもの造り現場

表 1 や表 3 に示されるスループット競争の状況を振り返ると、正直なところ、先行する同業他社 (特に AMAT) に対する日立の後追い傾向が目立っている。もちろん、これらの表は、追う立場に陥った後の“王者”の驚異的な挽回力も伝えている。ただし、興味深いのは、後追い状況下でも市場シェアが上昇している事実である (図 2 参照)。なぜ劣勢にあった時期にも市場シェアが上昇したのであろうか? 日立にこのような 2~3 年の“タメ”をもたらす源泉とはなんだろうか?

たしかに、ガリバー的な巨大市場シェアを誇る王者の便益、特に過去に蓄積された装置レシピの後方互換性を最大限確保することのシェア維持効果は大きい。ただし、それだけでは、1998 年の市場シェア 50%未満から抜け出せなかった筈である。この種の消去法にしたがいながら日立の強さの源泉を探していくと、市場のクロックスピードが格段に速い半導体産業において 2~3 年の得難い“タメ”を与えてくれる強力な要因にたどり着く。それは、表 3 の指標にはなかなか現れにくい日立製 CD-SEM が誇る再現性の高さである。

ITRS (2009; Metrology, pp. 3-4) が強調しているように、CD-SEM の測定誤差発生には、同一装置内での試料載せ替え等の時間的な誤差、同一ラインでの同一装置群間の誤差、複数生産ラインでの異なる試料に起因する誤差の三つの要因が複雑に絡み合う。表 3 の再

<sup>20</sup> International Technology Roadmap for Semiconductors。1998 年にインテル主導で発足し、プロセス・設計・実装技術等に関する各国の R&D 活動を世界規模で同期させる試み。その前身が脚注 16 の NTRS。

現性とは、1番目のより限定的な精度をさしている。ところが、装置は何年にもわたり様々な用途に使用されるので、ユーザーは表1や表3の数値には現れない装置のより長期の安定性・信頼性に重きを置く。

実際、日立製 CD-SEM ユーザーには、長期的に安定している再現性への信頼が極めて高い。この点に関して、逸話ではあるが、国内半導体メーカーT社出身の研究開発者の1990年代末における印象談が興味深い。彼によれば、当時T社では国内某社製 CD-SEM を使いはじめた。当初、この装置と日立製ではほとんど遜色無かった。ところが、しばらくすると、日立製の再現性の高さに比べ某社製の再現性は気の毒なほどであったという。<sup>21</sup>

長期的に安定した再現性という点で、日立に優位性をもたらしていると考えられる大きな要因が二つある。一つは、同社が S-6000 の開発当初から拘ってきた CD-SEM の計測値校正用の倍率校正用標準原器（マイクロスケール）の開発・製造である。特に、2007年以降の日立製 CD-SEM からは、経産省傘下の産業総合研究所を中核とした産学官共同開発によって生み出された 100nm ピッチ（半導体の 50nm プロセスに相当）の標準原器を装置内に備えての経時変化管理が行われている。<sup>22</sup> ブレのない高精度な座標系を装置内に保持していることのメリットは、微細化が進めば進むほど高まって行くと考えられる。

長期的にも安定した再現性を確保できているより大きな要因は、日立のもの造りシステムの卓越性である。筆者は、これまで幸運にもトヨタ（もの造りのほぼ全職場）やニコン・キャノン（露光装置製造関連のほぼ全職場）等の日本を代表する生産現場に長期間の深い調査を実施させていただいてきた。日立の電子顕微鏡分野でのもの造り現場は、これらの会社に勝るとも劣らない驚くほどのレベルに達していた。以下で、その一端を紹介してみたい。

機械加工職場では、要所・要所に高分解能を誇る Carl Zeiss 製の三次元測定器（Coordinate Measuring Machine(CMM)と呼ぶ三次元構造の形状を測定する装置）が多数置かれていた。例えば、ステージ組立職場では、この測定器を使ってミクロン単位での真円度・真直度・平行度・ピッチング（左右の揺れ）・ヨーイング（上下の揺れ）の確認がおこなわれていた。また、この段階で不具合が見つかり、オフラインで再加工を実施し、深刻な場合には前工程に再加工の依頼がされる。Zeiss 製の高性能 CMM がインライン装置として多数、しかも四六時中活用されている職場はなかなか目にできない。<sup>23</sup> 総合組立職場の主任によると、この段階で CMM を使ってミクロン単位での調整を行うと、自組立職場内で実施されるより高精度なソフトウェア補正の時に機差（装置によるバラツキ）が格段に抑えられるという。再現性の確かさを規定する重要な要因だと考えられる。

さらに、機械加工職場の技能工達（すべて正社員）の約 20%が世界技能五輪のメダリストや元日本代表であり、管理職を含む機械加工職場の実に 60%弱が機械加工の国家技能検定 1 級保有者であった。しかも、電子鏡筒用部品の精密加工・組立・調整を行う精密機械加工室には、上記のメダリスト達さえなかなか配属してもらえない状況であった。現在

<sup>21</sup> Engelen 他(1999)は、S-8C40 の再現性に関する ASML 内で実験結果(図 3)を示しているが、8 時間経過しても安定性が極めて高い様子を伝えている。

<sup>22</sup> <http://www.nedo.go.jp/content/100090145.pdf> 参照。

<sup>23</sup> CMM のインライン装置化は既に 1990 年代初頭に実施されていたという。同じ試みは、航空機用エンジン組立で 10 年以上前から実施例あり（『生産財マーケティング』誌、2012 年 7 月号、A42-43）。

でも、2年に1回の世界技能五輪に向けて、2年間の職場を離れての特別な英才教育が毎年1～2名に対して行われている。しかも、彼ら全員が、日立製作所と共に1910年に設立された日立の企業内学校である日立工業専修学校（通称：日工専）の出身者である。ちなみに、日工専には現在でも毎年約80名が入学しており、日立グループのもの造りの要となっている。機械加工職場にも、毎年3～4名が配属されるという。

日工専出身者は、機械加工だけではなく、総合組立や電子銃組立の職場でも多数活躍していた。総合組立職場で驚いたのは、日立が1990年代や2000年代の初めに撤退した半導体露光装置や電子線描画装置の組立・調整経験を持つ人々が数多くこの職場に異動してきていた点である。これらの装置が製造されていた時代には、組立職場が電子顕微鏡と半導体製造装置に分かれていたが、その際の育成パターンは、適性に応じて電子顕微鏡→半導体露光装置→電子線描画装置の順序で異動する形だった。事実、この順序で組立・調整が難しくなっていたという。ちなみに、総組・部組職場で聞き取りした4名の主任・組長のうち2名が露光装置職場から異動してきていた。

総合組立職場の最大の強みは、その問題発見・解決能力である。複雑で高精度なCD-SEMの場合、不具合が発生した際に、まずその要因が電気系統か機構系統かソフトウェア（組込+アプリ）かといった腑分けを迅速に行い、不具合の発生原因に素早く探りを入れることが重要となる。そして、不具合の幅と深さに応じて関連部門のプロを巻き込んでいく即興演奏的な問題解決能力が威力を発揮する。この点に関して、一人の組長が話してくれた次のような逸話は、組立職場の問題発見・解決能力の高さを例示している。

ある機種透過型電子顕微鏡の試作時に、総合組立後の調整段階に入ってもなかなか目標の真空到達度が満たせない問題が起きた。それで、リーク・ディテクター（漏れ探知機）で、リークが起きそうな箇所に片端から探りを入れていった。ところが、同一機種で5台製造したが、問題が起きたのは一台だけで、問題発生パターンに全く規則性が見られなかった。そのため、原因がなかなか分からなかった。そして10日間ほど技術管理部門や設計部門の担当者と話し合いながら試行錯誤を繰り返した後に、電子鏡筒に付けられている内部観察用のガラス窓の密着方式に設計上の弱点のあるらしいことを突き止めた。未知の問題の原因をこれほど迅速にしかも設計上の問題にまで遡って突き止めるもの造り現場の問題発見・解決能力は、これまでも数多くの日本メーカーの高い競争力を生み出す源泉の一つであったし、今後もその重要性が極めて高い。

## 6. むすびに代えて

本論では、CD-SEM市場において4半世紀にわたり世界トップシェアを維持してきた日立グループの奮闘ぶりをたどってきた。そして、様々な難局に直面した際に繰り出されてきた鋭い挽回策のほぼすべてが、日立の懐深くに長年蓄積されてきた独自性の高い技術とそれらを体化した人々によるものであることを再確認した。最後のこの節では、テクノロジーの急速な複雑化ならびにマーケットの多様化・グローバル化の波の中で、上記の“究極の自前技術”を多数保有する日立タイプの企業が、長期にわたってその強みを発揮・維持してきたより本質的な理由について学んでみたい。

理由の一つとして考えられるのは、CD-SEMという製品アーキテクチャ（設計思想）自体が、様々な外的環境の変化に対してかなり高い適応性や頑健性を持っているという点で

ある。実際、CD-SEMは、特定のアーキテクチャを保持しながら、微細化の進展によって発生した様々な要請に対して4半世紀わたってかなり上手に対応してきた。製品アーキテクチャの適応性や頑健性の高さを可能にしてきた重要な要因の一つが、製品を構成する基幹部品間の相互独立性（製品モジュール性）の高さであった。文中で触れたS-6000登場の背景からすると、このような特徴を持つCD-SEMの製品アーキテクチャ自体を当時の日立が生み出したとも言える。<sup>24</sup>

CD-SEMの製品アーキテクチャの適応性や頑健性の高さは、文中で触れた日立製CD-SEMの進化経路をまとめた表4によってもある程度確認ができる。この表は、文中の叙述やWeb上の製品紹介記事等に基づいて、CD-SEMの基幹モジュールの進化方向とそれらの連続性についてまとめたものである。表中の●と◆は各々当該技術の開始と終了、右向きの実線の矢印（→）は当該技術がほぼ同一の概念設計に基づいて改善・改良を経ながら連続的に進化してきた様子を示している。点線の矢印は、AMAT/OPALの該当項目である。表中で唯一中断されたのはCFEであるが、SEに変更後もそれまでの電子鏡筒系やステージ系、真空排気系、組込ソフトウェア系の基本モジュールはそのままほぼ連続的に有効活用された。<sup>25</sup>

もちろん、CD-SEMは、レゴ・ブロックとはほど遠い。事実、総組立終了後に、2週間を超える総合調整（摺り合わせ）が必要である。しかも、文中で触れたように、電子鏡筒やステージの組立、それらを構成する部品の機械加工等にも多大な技能・技術が注がれる。ただし、そのような摺り合わせが必要な度合いは、サブナノメートル（1000万分の1mm）級の再現性を保証する装置ではあるが、半年を遙かに超える総合調整が不可欠な最先端の半導体露光装置に比べると格段に小さい。また、2週間程度の総合調整期間は、精密機械（機能美を誇る東芝機械製の門型工作機械等）では珍しくない。

表4: CD-SEM製品アーキテクチャの安定性

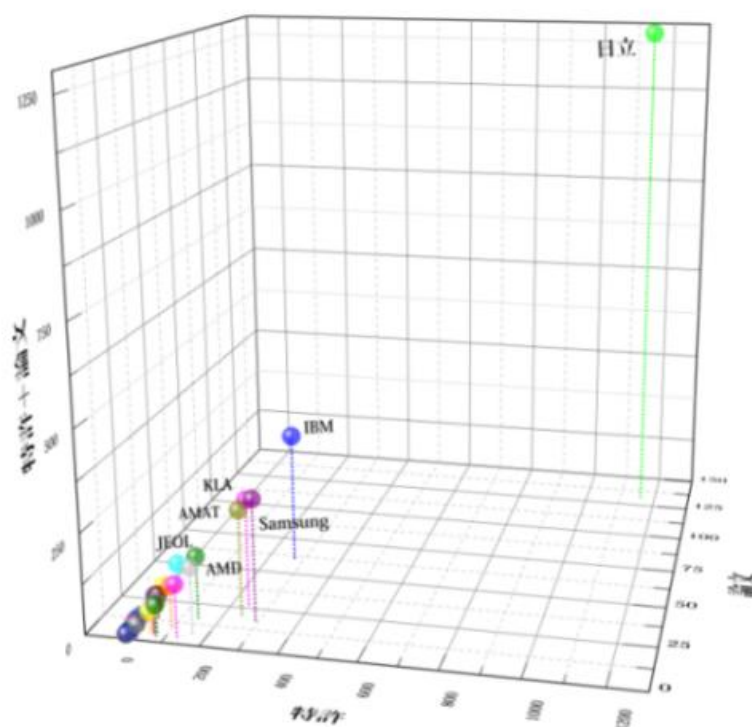
年次	1985-1988	1989-1993	1994-1996	1997-1998	1999-2000	2001-2002	2003-2005	2006-2010	2011-
型番	S-6000	S-6100	S-8800/8820	S-8840/8C40	S-9200/9300	S-9260/9360	S-9380/9380II	CG4000/4100	CG5000
電子銃(源)	CFE	●	◆						
	SE								→
電子鏡筒系	セミンレンズ		●						→
	リターディング			●					→
	ブースティング				●				→
	EXB with ET検出器			●					→
	環状検出器(AMAT/OPAL)			●					→
ステージ系	XYステージ(傾斜機能無し)	●							→
	ステッピングモーター	●							→
	リニアモーター(AMAT/OPAL)			●					→
真空排気系	(極)超高真空	●							→
組込ソフトウェア	基本設計思想	●							→
画像処理系	画像処理完全自動化				●				→
	レシピ作成自動化		●						→

<sup>24</sup> 製品アーキテクチャ上の頑健性は、理化学機器としてのSEMにも観察される。例えば、ドイツ Carl Zeiss の SE 型 SEM “Gemini” は現在でも専門家の間で世界的な名声を誇っているが、その製品アーキテクチャは、1993年にICTからライセンスを受けた当時から現在までほぼ同じである。しかも、Geminiは、ICT製電子鏡筒の特徴であるセミンレンズ、リターディング、ブースティング、環状検出器の基幹要素技術で支えられている（Zeiss (1995)及び各種 Gemini 関連パンフレット参照）。

<sup>25</sup> 半導体露光装置では、1980年以来現在まで大きくは4回の光源変更が行われたが、それは本体のみならずレジストを含めた周辺材料・装置に大きなインパクトを与えた(Chuma (2006))。

製品アーキテクチャの適応性や頑健性が高いと、アイロニカルではあるが製品の進化方向が構造的に束縛（Canalise）される傾向が強いので、累積（積み重ね）型技術の希少性が相対的に高くなる。その結果、既存有力プレーヤーの競争力が維持・強化されやすい。しかも、このような便益は、累積型技術の蓄積量が多ければ多いほど大きくなる。このような束縛状態の中で累積型技術をより多く保有していれば、ある範囲内の環境変化である限り、事後的に転用可能なより多くの技術オプション（Co-option）を用意しておけるからである。その結果、製品戦略上の事後柔軟性（競合他社の出方を観察した後の挽回策導入の素早さ）が高まる。文中で紹介した数々の日立の鋭い挽回力も、頑健な製品アーキテクチャの下での豊富な累積型技術がもたらしてくれる高い事後柔軟性の賜物と類推される。<sup>26</sup>

図3：競合他社間のSEM関連技術蓄積量：1980-2011



事実、同業他社に比べた日立の技術蓄積量は圧倒的である。この点は、図3によってある程度まで確認できる。この図は、1980～2011年にわたって各社が生み出したSEM関連のUS登録及び公開特許数（X軸）、学術論文数（Y軸）、特許数+論文数（Z軸）を示している。<sup>27</sup> この図から、日立が、少なくとも量的には、同業他社とは次元の異なる規模の豊富な“自前技術”を誇っている様子を確認できる。

さらに、CD-SEMは、自前技術蓄積のために必要な投資規模の点でも既存有力企業にとって好都合な特性を持っている。というのは、露光装置やエッチング装置の世界市場規模は50～70億ドル（2007年までの最大値）であるが、CD-SEMではその規模が6億ドル弱（同）に留まるからである。サイエンス型産業ではR&D投資の対年間売上高比率が

<sup>26</sup> この段落での説明は、Wagner (2005) 等にヒントを得た。

<sup>27</sup> 使用特許・論文データについては、脚注18参照。

10%を超える場合も希でないが、それが 30~50 億円（含む人件費）に留まるようであれば、個別有力企業グループ内で負担可能と考えられる。言い換えれば、このレベルの R&D 投資競争が続く限り、R&D 競争の次元が個別企業レベルに留まるので、豊富な自前技術をもつ日立の優位性はなかなか揺らぎにくい。もちろん、優位性保持には、このレベルでの継続的な技術蓄積が欠かせない。

ただし、半導体産業のように、ムーアの法則（微細化のレベルが 2~3 年で 2 倍になるという経験則）によって微細化が急速に進む産業では、たとえ R&D 投資額が個別企業レベルで負担可能であっても、競争の次元が、遅かれ早かれ個別企業レベルから研究、開発、設計、製造、装置、材料の各メーカー間の緊密な連鎖型垂直分業を特徴とするエコシステム・レベルに移行する（中馬(2011)、Schuster (1998)）。プロセス技術の新奇性や複雑性が猛烈な速度で拡大し、考慮しなければならない複雑な相互依存性が局所から大域にまで及ぶからである。

こうなると、既存有力企業でも、“自前主義”に拘っているかぎり、自分達が生み出した製品の的確な評価を自分達でできなくなり、製品戦略上の“事前柔軟性”（競合他社に先んじて潜在需要を的確に掴んだ新製品導入の素早さ）を失う。さらに、相互依存性の大域化は、新しい製品アーキテクチャに基づく製品の登場も誘発する。既存の製品アーキテクチャに構造的に束縛された形では、より大域での最適化が難しくなるためである。その結果、製品進化方向の束縛が不連続的に解き放たれて既存の製品アーキテクチャが急に競争力を失い、新しい製品アーキテクチャに代替されてしまう可能性も出てくる。

実際、3D の SEM 画像を提供可能な鏡筒や電子線の傾斜機能付き CD-SEM（例えば、表 3 の NanoSEM3D や S-9360 等）、同じく 2D・3D の測長・測定ができる Scatterometry（光波散乱計測装置、Optical critical-dimension (OCD) metrology と呼ばれる）、既存 CD-SEM の分解能を一桁以上高める威力を持つ球面・色収差補正装置（Frosien and Lanio (1995)）の試みも現れてきている。特に、2008 年以降においては、KLA 製や Nanometrics 製の OCD との競争が顕著になってきている（Global Net Corp (2012)、656-663 頁）。

このようなアーキテクチャ間競争に備えるためにも、“究極の自前技術”のさらなる蓄積と共に、大域にまたがる垂直的な知識(Vertical Knowledge)を緊密な連鎖型のコラボレーションによって相互に獲得しあう仕組みへの参加が不可欠となる。部分と全体の関係の移り変わりをワンランク上の抽象度で追尾しながら、自らの立ち位置を迅速に認知・改訂していくためである。この点に関して、日立は、90 年代の早い時期からインテル等の有力半導体メーカー各社のロードマップに同期した共同開発を相対で行ってきている。また、より長期的な視点に基づいた垂直的知識の獲得のために、2005 年に IMEC（ベルギーにある世界中の有力半導体・装置・材料メーカーが集う半導体 R&D コンソーシアム）、そして、2008 年に New York Nanotechnology Center（NY 州にある IBM を核とした世界最大規模の R&D コンソーシアム:IMEC とほぼ同じ構成ながら、その数倍の規模を誇る）との緊密な共同研究開発を開始している。

さらに、半導体産業では、上記の相互依存性の急速な大域化に備えるために、前述のように日・米・欧・韓・台にまたがる ITRS が 1998 年にインテル主導で発足し、プロセス・設計・実装技術等に関する各国の R&D 活動を世界規模で同期させる試みが実行されてきている。日立は、この ITRS 中の Metrology（計測）作業グループで設立当初から活

躍してきた有力メンバーを中心として積極的に情報発信と垂直的知識の獲得を図っている。

豊富な“究極の自前技術”を保有しながらも“究極の自前主義”に陥ることなく世界との緊密な結び付きをさらに深めようとする同社の姿勢こそ、現代の多くの日本企業に強く求められているものだと思われる。

#### 参考文献

- ・ Beck, Stephen, Erich Plies, and B. Schiebel (1995), "Low-voltage Probe Forming Columns for Electrons," *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, vol. 363, Issue. 1/2, pp. 31-42
- ・ Chuma, Hiroyuki (2006), "Increasing Complexity and Limits of Organization in the Microlithography Industry: Implications for Science-based Industries", *Research Policy*, Vol. 35 Iss. 3 pp. 394-411
- ・ Chuma, Hiroyuki and Norikazu Hashimoto (2010), "Moore's Law, Increasing Complexity and the Limits of Organization: The Modern Significance of Japanese Chipmakers' Commodity DRAM Business," in Itami・Kusunoki・Numagami・Takeishi 編 *Dynamics of Knowledge, Corporate Systems, and Innovation*, 9章、pp. 209-245
- ・ 中馬宏之 (2011)、「半導体産業における国際競争力低下要因を探る：ネットワーク分析の視点から」*経済研究*、第 62 卷 3 号、225-240
- ・ Crewe, Albert Victor (2009), "The Work of Albert Victor Crewe on the Scanning Transmission Electron Microscope and Related Topics," in *Advances in Imaging and Electron Physics*, ed. By Peter W. Hawkes, Chapter 1, pp. 1-61
- ・ Engelen, Andre and Ingrid Minnaert-Janssen (1999), "Multiple CD-SEM matching for 0.18- $\mu$ m lines/spaces at different exposure conditions," *Proceedings of SPIE Vol. 3677 (XIII)*, pp. 280-290 (<http://www-qas.asml.com/doclib/productand services/94097.pdf>)
- ・ Frosien, Jürgen (1994), "Advanced Low Voltage Optics for Electron Beam Technology," mimeo
- ・ Frosien, Jürgen and Stefan Lanio (1995), *JESSI Project E104 Electron Beam Metrology System: Subproject W5 "Ultrahigh Resolution Model" ; Final Report*
- ・ Global Net Corp (2012)、『世界半導体製造装置・試験/検査装置市場年鑑 2011』
- ・ Guldi, Richard L. (2004), "In-Line Defect Reduction From a Historical Perspective and Its Implications for Future Integrated Circuit Manufacturing," *IEEE Transaction on Semiconductor Manufacturing*, Vol. 17, No. 4, pp. 629-640
- ・ 日立製作所計測器事業部 (1997)、『日立電子顕微鏡の半世紀』
- ・ Inada, Hiromi, Hiroshi Kakibayashi, Shigeto Isakozawa, Takahito Hashimoto, Toshie Yaguchi, and Kuniyasu Nakamura (2009), "Hitachi's Development of Cold-Field Emission Scanning Transmission Electron Microscopes," in *Advances in Imaging and Electron Physics*, ed. By Peter W. Hawkes, Chapter 4, pp. 123-86
- ・ 市ノ川竹男、佐藤貢、中川清一、小池紘民 (2000)「走査電子顕微鏡 (SEM)」、『電子顕微鏡』、第 35 巻第 1 号、22-27

- ・ 池上透、山口敦子、田中麻紀、高見尚、北條穰、杉本有俊 (2011)、「半導体用微小寸法計測システムの発展と今後の展望」、日立評論、第 93 巻第 2 号、33-37
- ・ ITRS (2009), *International Technology Roadmap for Semiconductors: Metrology*, <http://www.itrs.net/Links/2009ITRS/Home2009.htm>
- ・ 川田勲、日比野大輔、長谷川昇雄、高見尚 (2007)「次世代デバイスの歩留まり向上に寄与する CD-SEM CG4000 と設計データ応用システム DesignGauge」、日立評論、第 89 巻第 4 号、26-31
- ・ Lineback, Rob, Bill McClean, Brian Matas, and Trevor Yancey (2012), *The McClean Report*, IC Insights Inc.
- ・ Nasu, Osamu, Katsuhiko Sasada, Mitsuji Ikeda and Makoto Ezumi (2002), "New CD-SEM System for 100-nm Node Process," *Hitachi Review*, 125-129
- ・ Ose, Yoichi, Makoto Ezumi, and Hideo Todokoro (1999), "Improved CD-SEM Optics with Retarding and Boosting Electric Fields," *Proceedings of SPIE Vol. 3677 (II)*, pp. 930-939
- ・ Perkin-Elmer (1973), "A high resolution, field emission scanning electron Microscope: the Hitachi-Perkin Elmer HFS-2," *Micron*, No. 4, pp. 365-367
- ・ Plies, Erich, K. Marianowski, and T. Ohmweiler (2011), "The Wien Filter: History, Fundamentals and Modern Applications," *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, vol. 645, Issue. 1, pp. 7-11
- ・ 佐藤貢 (1995)「低加速電圧走査電子顕微鏡法における鏡体理論：低加速電圧における高分解能化技術」、電子顕微鏡、第 30 巻第 2 号、164-169
- ・ 澤田雅 (2004)「ターボ分子ポンプの歴史と展望」、真空、第 47 巻第 3 号、99-103 頁
- ・ Schuster, Peter (1998), "How does Complexity Arise in Evolution: Nature's Recipe for Mastering Scarcity, Abundance, and Unpredictability," in *Complexity*, Volume 2, Issue 1, pp. 22-30
- ・ 上田新次郎 (2009)「ステンレス系真空容器技術の現状」、精密工学会誌、第 57 巻第 9 号、1536-1540
- ・ 和田木哲哉・横山貴子 (2008)、『徹底解析：半導体製造装置産業』（工業調査会）
- ・ Wagner, Andreas (2005), *Robustness and Evolvability in Living System*, Princeton University Press, Princeton and Oxford
- ・ Zeiss (1995), "New Scanning Electron Microscope Opens up New Horizon in Materials Science and Biology - DSM 982 GEMINI," *Zeiss Information With Jena Review*, Vol. 4, No. 5, pp. 14-16



## IIR ケース・スタディ 一覧表／2004-2012

(MOT プログラムケース、大河内賞ケースのみ抜粋)

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・シリコーン: 半導体パッケージング用フィルム状シリコーン接着剤の開発」	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	「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
CASE#07-07	坂本雅明	「NEC： 大容量 DRAM 用 HSG-Si キャパシタの開発と実用化」	2007 年 9 月
CASE#08-01	小阪玄次郎 武石彰	「TDK： 積層セラミックコンデンサの開発」	2008 年 1 月
CASE#08-02	福島英史	「東京電力・日本ガイシ： 電力貯蔵用ナトリウム—硫黄電池の開発と事業化」	2008 年 3 月
CASE#08-03	青島矢一 北村真琴	「セイコーエプソン： 高精細インクジェット・プリンタの開発」	2008 年 5 月
CASE#08-04	高梨千賀子 武石彰 神津英明	「NEC： 砒化ガリウム電界効果トランジスタの開発」	2008 年 9 月
CASE#08-05	小阪玄次郎 武石彰	「伊勢電子工業： 蛍光表示管の開発・事業化」	2008 年 9 月
CASE#09-02	青島矢一 大倉健	「荏原製作所： 内部循環型流動層技術の開発」	2009 年 6 月

CASE#09-03	藤原雅俊 積田淳史	「木村鋳造所： IT を基軸とした革新的フルモールド鋳造システムの開発」	2009 年 7 月
CASE#10-01	工藤悟志 清水洋	「東芝： 0.6 $\mu$ m 帯可視光半導体レーザーの開発」	2010 年 1 月
CASE#10-02	山口裕之	「東レ： 非感光ポリイミド法に基づくカラーフィルターの事業化と事業転換」	2010 年 3 月
CASE#10-03	三木朋乃 積田淳史 青島矢一	「NHK 放送技術研究所・NHK エンジニアリングサービス・日本ビクター株式会社： 話速変換技術を搭載したラジオ・テレビの開発」	2010 年 4 月
CASE#10-04	青島矢一 高永才 久保田達也	「日本電気： 最先端 LSI 量産を可能にした ArF レジスト材料の開発」	2010 年 5 月
CASE#10-05	青島矢一 大久保いづみ	「新日本製鐵： コークス炉炭化室診断・補修技術」	2010 年 7 月
CASE#10-06	久保田達也 青島矢一	「横河電機： 高速共焦点顕微鏡の開発と事業化プロセス」	2010 年 7 月
CASE#10-07	工藤秀雄 延岡健太郎	「パナソニック： IH 調理器の開発」	2010 年 7 月
CASE#10-08	今井裕介 岩崎慶 幸務正 鈴木裕一郎 山田将知	「株式会社高井製作所の組織改革」	2010 年 7 月
CASE#10-09	工藤悟志 清水洋	「ソニー： MOCVD 法による化合物半導体デバイスの開発と量産化」	2010 年 8 月
CASE#10-10	積田淳史 藤原雅俊	「中田製作所： 高機能造管成形機の開発と実用化」	2010 年 9 月
CASE#11-01	伊藤誠悟	「株式会社デンソー： 自動車用発電機： III 型オルタネータの開発・事業化」	2011 年 4 月
CASE#11-03	小室匡史 江藤学	「三菱電機株式会社： 人工網膜チップの開発と事業化」	2011 年 9 月

CASE#11-04	伊藤誠悟	「株式会社デンソー： 電子制御式ガソリン噴射装置(EFI)の開発・事業化」	2011年9月
CASE#12-01	奥村祐一郎 江藤学	「セイコーエプソン株式会社：3LCDプロジェクタ開発と事業化」	2012年1月
CASE#12-04	崔 裕真	「島精機製作所：ニット製品の最先端生産方式開発の技術経営史 手袋編機用半自動装置(1960年)からMACH2シリーズまで(2010年)」	2012年7月
CASE#12-05	高 永才 三木朋乃	「JX 日鉱日石エネルギー株式会社： サルファーフリー燃料の開発と事業化」	2012年7月
CASE#12-10	伊藤誠悟	「株式会社デンソー・トヨタ紡織株式会社： 成形体オイルフィルタの開発・事業化」	2012年10月
CASE#12-11	中馬宏之	「世界の半導体微細計測を支える測長用SEM(走査電子顕微鏡)： “日立”を体現する独自性と普遍性」	2012年10月