

オランダ ASLM 社による露光装置モジュール戦略の優位性分析
－研究コンソーシアムなど R&D コラボレーションの活用－

The Analysis of Competitive Advantage at Modularity Strategy of Exposure Equipment by ASLM

田口 敏行

Toshiyuki TAGUCHI

要旨

日本企業の強みといわれる擦り合わせ型＝インテグラル型の製品や産業においても、モジュール化の進行が見られる。日本企業の戦略が 90 年代後半より競争力を失い、絶対的な強みとされた領域にもモジュール化の波が押し寄せつつある。モジュール化はサプライヤーからのアウトソーシング構造とそうしたビジネスモデルを広げている。本稿での分析課題は、なぜモジュール化がそれほど進み、どこに本質的な強みがあるのかを解明しようとするものである。モジュール化は起こらないであろうといわれてきた半導体露光装置（ステッパ/スキャナ）分野で検証していく。90 年代後半より、オランダ ASLM 社がモジュール化戦略を展開し、シェアトップの座をニコンやキャノンから奪った。そうした戦略の優位性は、製品アーキテクチャのモジュール化とサプライヤーからのアウトソーシングはもちろん、サプライヤーとの R&D コラボレーション、そして IMEC など国際的な共同研究コンソーシアムと連携した R&D 活動にある。ASLM 社のモジュール化戦略の構造と優位性分析を行い、日本企業の今後の戦略課題を考えていく。

1. はじめに

PC や DVD、携帯電話や液晶テレビなど、いわゆるエレクトロニクス産業といわれる産業では、90 年代から共通した現象が見られるようになった。それは技術力に勝る日本製品が、破壊的な価格による製品の登場により優位性を失い、シェアをどんどん落としていくといった現象である。破壊的な価格の製品といっても、昔のように性能や機能は著しく劣るわけではない。「そこそこ」の技術水準と性能が確保され、主にアジアの新興企業が得意とする戦略である。

エレクトロニクス産業分野は、日本企業による技術革新と新製品開発によって市場が開拓されてきた。80 年代は日本企業がそうした領域で強みを発揮してきた。しかし 90 年代以降、5 年と経たないうちに性能や機能でアジアの新興企

業に追いつかれ、破壊的な価格の製品投入によりあつという間にシェアを奪われていく状況が進行した。今でもそうした傾向は続いており、どちらかという歯止めがかかっていない感がある。擦り合わせのアーキテクチャである製品分野や産業では、モジュール化や価格破壊は起こらないと予想してきたし、その典型である自動車、半導体、工作機械などの領域は、日本の強みを維持できるエリアと考えられてきた。

ところが最近の新しい現象として、そのようなモジュール化は起こらないであろうと思われた分野でも、モジュール化の波にさらされているところである。さまざまな要因が考えられるが、製品アーキテクチャ論という観点からすると、①CPU やシステム LSI への機能の集約化、②制御や調整がファームウェアなどのソフトによる制御（＝制御機能のアルゴリズム化）、③製造装置の市場化、などの要因によりモジュール化が進むという構造が背景にある。

日本企業はこれまで、統合的な組織と擦り合わせにより、ハイエンドの製品アーキテクチャを確立し、市場で強みを発揮してきた。研究開発力を強みとしてきたと言い換えることもできる。アジア企業とは格段に高い研究開発費を投入し、性能と機能の高い製品を完成させて市場へ投入してきた。価格はもちろん高いものとなるが、急激に追いつられることはなく、少なくとも数年かけて開発費を回収し、さらに費用を上回る利益を獲得することもできた。ところがモジュール化の進行は日本企業にとっては、開発費を回収する以前に低価格品の参入に見舞われシェアを落としてしまうのである。むしろ研究開発費がかかる製品とアーキテクチャを手がけるほど、営業利益が低下していく構造が生み出されてきた。その根底に製品アーキテクチャのモジュール化と戦略がある。

モジュール化戦略は、今やあらゆる市場と産業に浸透してきているような状況がある。モジュール化のパワーは予想以上に大きく、日本の産業や市場に大きなインパクトを及ぼしている。日本企業は擦り合わせ型のビジネスモデルや戦略だけでは対抗できず、競争優位と競争力を取り戻すためにモジュール化戦略の強みをうまく活用する戦略パラダイムの転換が必要となってきた。本稿では、モジュール化が難しいとされている半導体露光装置分野をとりあげ、どんな企業のどんな戦略がモジュール化を持ち込んできたのか、その戦略構造はどのようなものなのか、戦略を成功に導いている規定的要因を解明しようとするものである。モジュール化戦略を成功させている企業はオランダの ASLM 社である。フィリップス社から分離独立し、露光装置メーカーとして 90 年代後半から市場のトップへと頭角を現した企業である。その強みを検証しながら、日本企業の今後の戦略課題を最終的に考えていく。

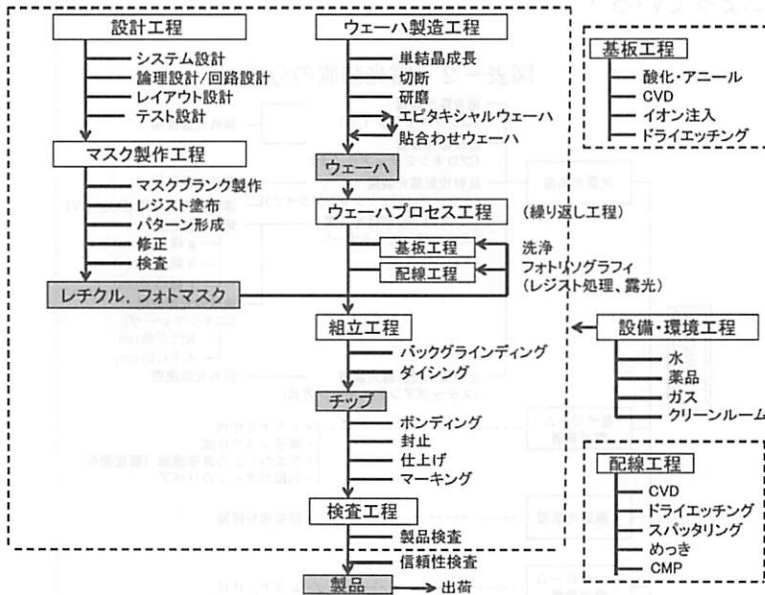
2. 半導体露光装置のアーキテクチャと特質

2-1) 露光装置とプロセスの位置づけと特質

はじめに、半導体関連装置全般の概要とそのなかでの露光装置の位置づけを整理しておく。半導体製造に関わる装置は非常に多岐にわたる。半導体の製造プロセス自体が多くのステップを踏み、ステップごとに装置が必要となる。設備投資額が大きい分野である。関連装置の市場規模は、1991年に91億ドルであったが、2006年では405億ドルと増大している。ただし、リーマンショック以後は縮小傾向にあり、2009年は159億ドルと下振れしている¹⁾。

そうした半導体市場であるが、半導体生産工程は多くの工程からなり非常に複雑である(図表-1)。それぞれの工程ごとに関連するそれぞれ専用の装置があるといつてよい。ただし、大きくプロセスは前工程と後工程に区分される。重要なのは前工程であり、そこではシリコンの単結晶をつくり、そこからウェハと呼ばれるシリコン基盤を切り出し、一方でウェハ上に作り込む回路を設計してそれを転写するマスクが形成されて、それが転写されていく。そうした前工程が製造の中心的存在である。半導体装置といえは前処理装置を指すといつてよい²⁾。この前工程で必要となる装置としては、真空蒸着装置、スパッタリング装置、CVD装置、エピタキシャル成長装置、めっき装置など数多いが、露光装置はこの前工程に位置付き、なかでも非常に重要な役割を果たす装置といえる。

図表-1 半導体生産工程のフローチャー

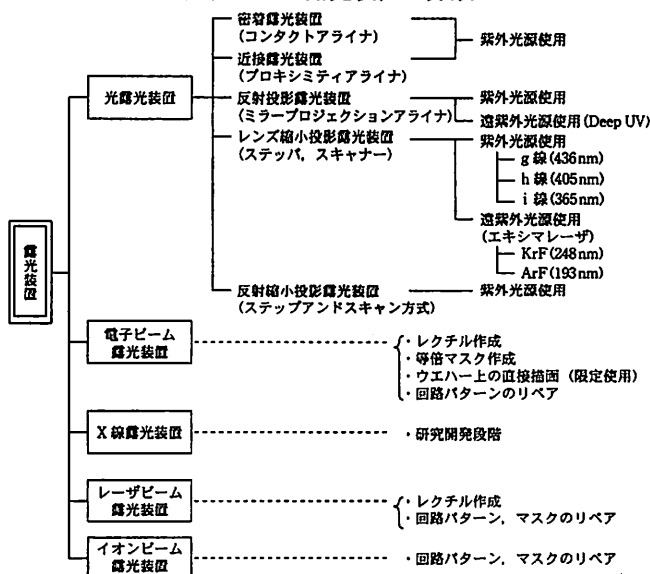


(出所) 肥塚 浩「半導体製造装置産業の現状分析」『立命館経営学』第49巻 第5号, 2011年, p. 105.

もう少し露光装置とプロセスを絞り込むと、ウエハープロセス工程に関わる。ウエハープロセス工程は基板工程と配線工程に分かれるが、全体を通してリソグラフィ（パターン形成を行うための写真製版工程）を中心に、洗浄、熱処理、膜形成などが反復して行われる。リソグラフィというプロセスは、フォトマスクによるフォトレジストへのパターン転写を重ねて、所望のパターン形成を行うもので、フォトレジストを塗布する工程に始まり、露光、現像、エッチング、フォトレジスト除去にいたる一連のプロセスである。露光はそうしたプロセスの一部であり、レチクルと呼ばれるマスク基板からの縮小投影転写によって行われており、この工程はすべてのプロセス技術の中心となる。半導体工場のなかで最も多額の投資を必要とする工程であり、そこに位置づく装置が露光装置ということになる³⁾。

図表-2は、露光装置の種類を示している。過去においては、等倍マスクを用いた密着露光装置などが使われたが、現在ではステッパが主流である。ステッパの時代になってからは、短波長化、レンズ性能の向上を経て、現在では露光のためのショットを一括ではなく、スキャニングによって行うスキャナと呼ばれる方式が登場している。スキャナはパターンの歪が少なく、露光径が小さくても1ショットで大面積露光が可能というメリットがあり、今後主流となる可能性が高い⁴⁾。現在ウエハープロセスを代表する装置としてはステッパであり、その導入台数でラインの能力、製造原価等が明らかになってしまってもいわれている。1980年代までは半導体工場は、拡散炉・酸化炉などのチューブ数でその規模、ウエハ処理能力を測っていたが、現在ではステッパの台数で決められるようになっている⁵⁾。

図表-2 露光装置の分類



(出所) 前田和夫著『はじめての半導体製造装置』技術評論社, 2011年 p.146.

主要装置別市場からみても、露光装置群は他の装置群に対して、最も大きな市場を形成している（図表－3）。半導体関連装置や投資先として、非常に大切な対象となっている。ステッパ/スキャナの市場規模は、1991年には8.85億ドルであったが、2006年には60.94億ドルと6.9倍に拡大している。さらに、半導体関連製造装置の主なメーカーランキングを見たものが図表－4である。通常、装置毎にメーカーは専門化する。ただ、なかには複数の種類の異なる装置を供給している企業もある。その代表格がAMAT社（アプライト・マテリアル）社である。1999年以降ほぼ毎年のようにトップの座を維持している。エッチング装置、CVD装置、スパッタリング装置、エピタキシャル成長装置、CMP装置、Cuメッキ製造装置でトップクラスの市場シェアを有している⁶⁾。そして、次にASLM社がランキングされている。2009年で見ると、関連装置産業全体に対して売上高は、AMATについて2位にある。ステッパ・スキャナ分野では、シェアの70%を占め、ニコンやキャノンに圧倒している。ASLM社のこうしたポジションは、すでに5～6年続いている。

図表－3 世界の主要半導体製造装置の市場別規模の推移

(単位：100万ドル)

	1991年	2006年	2009年	2010年
(マ) 電子ビーム描画	110	353	187	324
(前) ステッパ&スキャナ	885	6,094	2,765	4,713
(前) ドライエッチング	1,027	3,603	1,583	2,677
(前) 洗浄・乾燥	389	2,017	911	1,545
(前) プラズマCVD	400	2,093	848	1,424
(前) スパッタリング	498	1,873	685	1,156
(前) ウェーハ検査	127	2,569	1,063	1,808
(組) ダイボンダ	63	493	274	491
(組) ワイヤボンダ	173	722	348	638
(検) メモリテスト	460	1,653	193	338
(検) ミクストシグナルテスト	106	1,600	516	923

注) 2010年は予測。(マ)はマスク製作工程、(ウ)はウェーハ製造工程、(前)は前工程、(組)は組立工程、(検)は検査工程の略である。

(出所) 肥塚 浩, 前傾論文 p. 106.

図表－4 半導体関連装置市場別シェア

(2009年) (単位：100万ドル, %)

製品名	市場規模	1位	2位	3位
(マ) 電子ビーム描画	187	ニューフレア 84	日本電子 6	日立ハイテック 3
(前) ステッパ&スキャナ	2,765	ASML 70	ニコン 22	キャノン 7
(前) ドライエッチング	1,583	Lam 46	東京エレクトロン 27	AMAT 15
(前) 洗浄・乾燥	911	大日本スクリーン 57	東京エレクトロン 13	Lam 10
(前) プラズマCVD	848	AMAT 51	Novellus 34	ASMI 11
(前) スパッタリング	685	AMAT 66	アルパック 14	キャノンネルバ 14
(前) ウェーハ検査	1,063	KLA-Tencor 46	日立ハイテック 18	FEI 10
(組) ダイボンダ	274	ASM Pacific 31	BESI 20	日立ハイテック 17
(組) ワイヤボンダ	348	ASM Pacific 51	K&S 24	新川 11
(検) メモリテスト	193	アドバンテスト 40	Verigy 38	Teradyne 18
(検) ミクストシグナルテスト	516	Teradyne 49	アドバンテスト 16	Verigy 16

注) LamはLam Research, 東京エレクトロンは東京エレクトロン, 大日本スクリーンは大日本スクリーン製造, NovellusはNovellus Systems, ASMIはASM International, 日立ハイテックは日立ハイテックノロジーズ, ASM PacificはASM Pacific Technology, BESIはBE Semiconductor Industries, K&SはKulicic & Soffa Industries, ニューフレアはニューフレアテクノロジーズの略。製品名の()は表5と同じ略。

(出所) 肥塚 浩, 前傾論文 p. 110.

なお、露光装置だけにあてはまる傾向ではないが、半導体関連装置の主な市場はアジアにシフトしており、韓国、台湾、中国、シンガポールの4カ国が主な市場となってきている。こうした市場の特性は留意する必要がある。市場ニーズはアジアのデバイス企業から生み出されてくるということであり、量産とシェア獲得を目指そうとすると、アジアのデバイスメーカーの装置へのニーズや要求は最も重視される内容を持つ可能性がある。ASLM社は日本市場のシェアはゼロであり、北米が22,3%、欧州が2,6%、そしてアジアが75,1%である。非常に偏った構造を持つ。ASLM社がモジュール化戦略を展開し、ニコンやキャノンを凌駕して一気にシェアトップの座を奪ってきた背景には、市場成長力のあるアジアをターゲットに絞り、そうしたユーザーにうける装置を供給するという発想があったものと思われる。ASLM社は、いち早くアジアのデバイスメーカーのニーズを把握し、それに沿ったアーキテクチャ戦略を展開したと特徴つけることができよう。

それに対してニコンやキャノンなど装置メーカーは、日本のデバイスメーカーが求める微細化などの高性能化に対応しており、あまりアジアのニーズを視野に入れたアーキテクチャ戦略を採っていないように思われる。半導体の機能向上は、DRAMだけでなくロジック系も機能向上が急速に進められ、微細化技術はそちらでも必要になってきている。日本のデバイスメーカーがロジック系にシフトしつつあり、アジアよりも日本市場に特化する要因もないとはいえないかもしれないが、成長市場のアジアに対応しないわけにはいかないであろう。とすると、ASLM社の戦略から学ぶべき要素は多くあり、また、戦略のパラダイム転換が必要とされているといえる。

2-2) 露光装置の基本構造とアーキテクチャ

2-2)-1) 露光装置の開発史とアーキテクチャの変遷

ASLM社の戦略は、アジアをターゲットにしながらも、製品アーキテクチャのモジュール化というところにある。それが一体どのような内容であるが考察していくが、より理解を深めるためにも、露光装置自体の製品アーキテクチャの基本構造を確認し、そのうえでASLM社が行っているモジュール化の特質をつかんでいく。はじめに露光装置の開発史(前史)をまとめておく。

露光装置(=縮小投影露光装置)は、1978年に米国のGCA社により開発された。半導体の歴史は、トランジスタからIC、そしてLSIへと発展していくが、70年代はまさにLSIの時代であった。これまで半導体関連装置は、半導体メーカーが内製するのが通常であったが、この時期に徐々にデバイスメーカーと関連装置メーカーとの棲み分けができ始める。装置は専門の装置メーカーが提供するという構造ができてくる。装置市場への参入も出始める。GCA社はそう

した1社で、ステッパに必要とされる基本要素はGCA社が開発しており、78年に世界初のステッパ(4800DSW)を発売している。1980年代初頭は先行メーカーであるGCA社のステッパが全世界の90%のシェアを占めていた⁸⁾。

80年代初頭日本では、ニコンが国産初のステッパ(SR-1)を開発し、1980年にはNSR=1010Rの出荷を始めている。日本の半導体と装置の開発は、1975年から79年まで700億円億円が投入された「超LSI技術研究組合」による国家プロジェクトの影響が大きい。ニコンによる露光装置の開発もそのプロジェクトの影響を受けている⁹⁾。83年にはキャノンが参入し、日本だけでなく世界的な市場の拡大と参入があった。GCA、ニコン、キャノンのほか、日立、パーキンエルマー(米国:後にSVGL)、ティーアールエー(TRE:米国)、フィリップス(オランダ:後にASLMが分離)、ウルトラテック(米国)、オプティメトリックス(米国)など、十数社を数えた。

80年代半ばにニコンは、GCAを抜きシェアで世界1位となる。80年代後半になると、ニコンとキャノンで世界のシェアの90%を占めるに至る(ニコンが60%、キャノンが30%)。DRAMも米国市場へシェアを伸ばし、半導体と装置はともに日本メーカーが独占的に制覇していった。なぜ日本の装置が世界を制覇していったかであるが、機能と性能の高さといえ、製品アーキテクチャは非モジュール化であり、擦り合わせの典型であった。デバイスづくりは、①装置、②材料、③そして処理するレシピ、の3つが一体化するのであるが、デバイスメーカーごとに特性がある。材料も装置もオーダーメイドが典型であり、ウエハープロセスの仕様や手順、つまりレシピはブラックボックス化されていた。

日本企業の持つクローズでブラックボックス化されたビジネスモデルと擦り合わせ技術が優位性を発揮していたのである。擦り合わせ型ビジネスの典型といわれ、モジュール化することはない領域と思われてきた。ところが、1995年以降、DRAMを主体にしていた日本の半導体デバイスメーカーは、アジア・太平洋地域の国々企業による安い製造コスト戦略に対応できず、競争力を落としていく。生産額は右肩下がりとなり、システムLSIの製造に主軸を移していくこととなる。製造装置もニコンとキャノンのシェアは急激に低下し、ASLM社の参入とモジュール化戦略の進行が生み出されていくのである。

2-2)-2) 露光装置の基本構造と基本動作

こうした開発の歴史を背景にもつ露光装置であるが、より詳しく製品アーキテクチャに関わる基本構造と基本動作を確認しておく¹⁰⁾。

ステッパの動作手順から構造をみていこう。製造する半導体素子のデータが外部の集中制御コンピュータから送られセットされると、レチクルストッカーからレチクルを取り出して、レチクル・ステージにセットする。そしてウエハー

にレチクル・パターンを転写するために、コーター・アンド・デベロッパで、レジストを塗布したウエハーがステップに移送されてくる。ここからステップのメイン・シーケンスがスタートする。次に、ウエハーがステップのプリアライメント・ユニットに送り込まれると、ウエハーのオリエンテーション・フラットあるいはノッチを利用して、ウエハー・ステージに対する加工されるウエハーの位置あわせが行われ、ウエハー・ステージ上のウエハー・チェックに移送される¹¹⁾。

その後のアライメント・シーケンスとしては、パターンニングされていないウエハーとパターンニングされているウエハーとで異なる。

パターンニングされていないウエハーのシーケンスでは、最初のウエハーは、レーザ干渉計で計測されるウエハー・ステージによって、第1ショットの位置に移動され、フォーカス計測、駆動とウエハー・レベリング駆動が行われて露光が開始される。第1ショットの露光が終わるとステージが移動し、次のショットで再びフォーカス計測、駆動とウエハー・レベリング駆動が行われ露光される。ステップ・アンド・リピート動作で各ショットの露光が繰り返されて、ウエハー前面にレチクル・パターンがウエハーに転写される¹²⁾。

一方パターンニングされているウエハーの場合、プリアライメント動作が終了すると、ウエハーは搬入ロボットでウエハー・ステージのウエハー・チェックに移送され、あらかじめ決められたショットの位置に移動する。その後、フォーカス計測、駆動とウエハー・レベリング駆動が行われ、ウエハー上のアライメント・マークの位置をステージのレーザ干渉計で計測する。そして決められたショットへ移動して、ウエハー上のアライメント・マークの位置を再びレーザ干渉計で計測するというアライメント計測動作を繰り返す。

そのアライメント計測データを統計処理し、ウエハー上の各ショットの位置を推定する。次に統計処理した情報に基づいてウエハーは、その上に構成された回路パターンの配列がステージの移動方向に平行になるように、ウエハー・ステージ上の微動機構で回転駆動される。そしてウエハー全体の平均傾きがレベリング駆動され、ウエハー全面の平均的なフォーカス位置にフォーカス移動される。同時にウエハー・ステージによって、露光の第1ショットの位置に移動される。この状態では、フォーカスとウエハー・レベリング駆動された量が、統計的に処理された平均値となっている。そこで、再びフォーカスとウエハー・レベリングの精密計測が行われ、平均値からずれている量の駆動が行われた後に、露光が開始される。露光が終了するとウエハー・ステージは、第2ショットの位置へ移動し、再びフォーカスとウエハー・レベリングの精密計測、駆動が行われ、その後に露光が行われる。そして、こうした動作を繰り返していく。

2-2)-3) 基本構造と基本動作の発展プロセス(80年代～2000年代まで)

こうした基本動作と構造を持つ露光装置であるが、さらにそうした構造と動作に関わる主要技術をみていこう。80年代、90年代、2000年以降という区分でみていく。

まず80年代であるが、日本企業が参入しシェアを独占した時代である。ステップの技術的な開発ターゲットは、縮小倍率の向上や1回に露光できる画面サイズの拡大などが重視された。81年にニコンが発売した15mmのステップ(N SR1505G)は、82年にはもう米国に初出荷されている。翌年の83年はキャノンがFPA-1500FAを発表し、84年には6インチウエハー対応の等倍反射型投影露光装置(MPA-600FA)を発売している。86年には日米半導体協定が締結され日本には逆風となるものの、キャノンからは世界初8インチウエハー対応のステップ(FPA-1558)が開発されている。

80年代後半からは、半導体素子の微細化に拍車がかかり、高解像力を求めて投影光学系の高NA(開口数)化の競争が激化していく¹³⁾。超精密技術が求められ、装置は高精度化と高速化が図られたといえる。この時期は、日本企業がシェアを独占していた時代であり、微細化、高精度化、高速化といった技術は、擦り合わせ的に開発され、クローズでブラックボックス化されたビジネスモデルが優位性を発揮したといえる。

90年代に入ると、半導体に対する微細化は一層進み、サブミクロン領域に達していく。90年代前半も日本企業に優位となるようなスタイルの技術開発が展開されたといえよう。高NA化に伴う焦点深度の問題から、露光に使用する光源は、従来の超高圧水銀灯の特定波長である436nm(g線)から、365nm(i線)へと短波長に向かう。焦点深度を有効に使うためのウエハーティルト機能が搭載されるようになり(ウエハー・レベリングとも呼ばれる)、投影レンズの倍率を自動補正するための投影倍率補正機構なども開発されている。ただし、95年から半導体の生産額は右肩下がりとなり、98年には半導体製造大手5社がDRAMの不振で赤字に転落している。当然、装置の生産量などへの影響もあるが、技術開発は進められている。90年代後半には、ハーフ・ミクロンの時代に突入し、微細化と焦点深度への対応として、超解像と呼ばれる各種の手法、つまり変形照明法、位相シフト・マスクなどが開発されており、さらには、波長248nm(KrF)のエキシマ・レーザーをパルス露光の光源として使用する、露光倍率が1/4のエキシマ・レーザー・ステップも開発されている。

なお、90年代後半には、製造プロセスの複合化や統合化、あるいは装置におけるプロセスインテグレーションといった動きも見られる。開発費用や投資の金額の増大など、デバイスメーカーの求める高性能装置は、提供する側も利用する側も収益性という観点で使い難い状況が生まれてくる。こうした背景から、

プロセスインテグレーション手法やプロセス融合化が重視され、装置のアーキテクチャに変化がでてくる時期でもある¹⁴⁾。

この90年代後半は、ASLM社が頭角を現す時期である。露光装置プロセスに限らず、半導体製造プロセス全体に開発費用の負担増がのしかかり、それを装置の統合化や大括り化、そしてプロセスのインテグレーションで乗り切ろうとする機運が高まっていた背景は重要である。次節でモジュール化の生み出される余地がどこにあり、ASLM社がどのようにそこに参入したかは詳しく考察するが、開発投資額の増大を抑えるべく工夫しなければならなくなった製造プロセスと装置、そして装置のアーキテクチャの変化はこの時期、そうした背景から生まれてくるのである。

日本企業の装置は、インテグラル型の高額な装置を開発していった。業界はそうした路線には躊躇したが、アジアのデバイスメーカーは、投資額を惜しまなければ一気に装置を大括りのプロセスごと導入することができる。台湾など国の税制や開発投資支援策で、積極的となったという分析もある¹⁵⁾。同時に、新装置の導入に際しては、既存のプロセスや装置群をそのまま使いこなせる工夫が重視された。ここに大きくモジュール化が功を奏した余地が多分にあったといえる。

2000年以降になると、露光光の波長も193nm (ArF)に進み、開発のスピードはとどまることなく進められていく。こうしたところが半導体や露光装置の特質であり、モジュール化は確かに必要とされながらも、開発はやはり進められていくというダイナミックな構造がある。ステッパからスキャナへのシフトも始まりつつある。微細化の追求と技術開発は、高度化しているといえるかもしれない。レンズ開発、機構開発、制御システム開発の難易度は格段に高くなっているといえるであろう。光学的解像力の向上策として、液浸露光技術、短波長のF₂レーザ(157nm)光源を搭載した露光装置、EUV (Extreme Ultra-Violet) 露光装置の研究開発も行われている¹⁶⁾。

90年代以降、モジュール化は確実に必要とされ、そのためのアーキテクチャ戦略はなくてはならない視点でありスタンスとなった。ASLM社の参入と成功はそうした背景から生まれている。ただし、開発と競争は延々と続けられている。モジュール化はインターフェイスの標準化を必要とし、モジュール部分自体のイノベーションはサプライヤーにより進化していく。しかし、技術開発や技術の進歩は、インターフェイスの変更や製品全体の設計変更を促進する側面を持つ。モジュール化だけでは優位性を維持できない難しさがある。ASLM社はモジュール化も実現しながら、技術開発や研究開発でもコラボレーションといった戦略で優位性をつかんでいくことになる。そうした強みであるモジュール化とR&Dコラボレーションの内容を詳しく見ていく。

2-3) モジュール化と標準化の余地

詳しくモジュール化の余地から考察していこう。これまでステップの基本構造と技術的な発展を考察してきたが、照明系、光学系、そして精密駆動メカニズムとの融合体といえる装置で、露光装置プロセスは基本的に、標準化が難しいプロセスであった¹⁷⁾。露光プロセスは、用いるステップのシーケンス、用いる材料、そしてレシピなど組み合わせは多様性があり、個性が出る。デバイスメーカーによって差が出るのである。当然使用するステップは個体差があり、デバイスメーカーが仕様を出して装置メーカーがそれを聞きながら製造していくのが通常であった。デバイスメーカーと装置メーカーとの擦り合わせもあれば、装置メーカーは、ブラックボックス化した中でユーザーの仕様にあわせるよう独自の技術を駆使する。擦り合わせ型の製品アーキテクチャが典型となり、差別化も発揮される。ステップは、「装置ごとのスペックの標準化が困難ということで、半導体製造装置の特質の1つである“絶対評価が存在しない”ことを示す典型」といわれていた¹⁸⁾。

しかし前でも触れたが、微細化には対応しなくてはならず、高性能な装置開発が前提となる。開発期間の長期化、開発コストの増大といった状況を招く。デバイスメーカーにとっても、装置メーカーにとっても収益性が薄くなる。そこで、90年代後半からデバイスの製造プロセスの複合化・統合化、あるいは装置におけるプロセスインテグレーションが進められていく。これまでにない流れが1つ追加されたいっていいであろう。つまり、開発競争とコスト低減が同時に進んでいく状況が生まれていくのである。

ただし、プロセスインテグレーション手法とコスト低減が一気に業界全体に浸透したわけではない。プロセスインテグレーション手法は、SEMI（アメリカの装置・材料の業界団体）が提唱して進められたが、必ずしも装置業界に受け入れられて現実的なものとなったわけではなかった。とはいえ、デバイスメーカーにとっても装置メーカーにとっても、開発期間の短縮、開発コストの縮小が必要であったし、資金力を持たない中小装置メーカーにとっては一層求められるかだいとなる。そこで顕在化するのがモジュール化であり、なおかつ既存プロセスや装置の継続的活用である。装置における周辺部分の標準化とメーカー間の互換性を目指した装置のクラスタ化と言い換えることができる¹⁹⁾。

各メーカーごとにインターフェイスの標準化を行っておけば、どのような装置でも相互に接続でき、プロセスの複合化や統合化に対応できる。基幹ユニットの軸をプラットフォーム化し、インターフェイスを固定してオープンにする。そして周辺部分をモジュール化して、サプライヤーから調達しながら、完成品を組み立てていく。そんな製品アーキテクチャとビジネス・アーキテクチャが生

み出される構造が生まれる。そこに ASLM 社の参入の余地があったといえる。

ASLM 社がシェアを伸ばしていくのは、90 年代後半からであり、モジュール化戦略が功を奏していくのは、どこまでも性能を追求する戦略だけでなく、収益性を重視した製品のアーキテクチャの選択、ビジネス・モデルの選択が競争の優位性を決める上で、大切なポイントとなる新しい流れが生まれたからといえる²⁰⁾。

開発競争とコストという 2 つの流れが生まれたことは、デバイスメーカーのタイプにも変化を及ぼした。開発優先のメーカーとコストを優先するタイプのメーカー、そして両方を志向するメーカーというタイプである。①プロセス技術指向のメーカー、②プロセス技術・回路設計技術の双方を指向するメーカー、③回路設計技術指向のメーカー、といえる²¹⁾。

プロセス技術指向のデバイスメーカーは、最先端のプロセス技術や装置を求めため、資金は必要であるが性能の高い装置を求め。旧来型の戦略であり、80 年代までの業界の基本構造に沿っている。関わりあう装置メーカーとしては、日本型の企業を好む。こうした関係と市場は 90 年代後半以降、縮小しているとはなくなることはない。ただしニッチな市場へと変化している。日本企業はこのニッチな市場のみに固執してはならないといえる。一方、90 年代後半以降はコスト重視の市場や製品が必要とされてくる。そこで登場するのが、回路設計技術指向のデバイスメーカーである。米国や台湾のメーカーに多く、設計のみを自社で行い、製造は他社に委託するファブレスタイプである。請け負うのは、受託製造専門のファンドリー企業である。

回路設計技術に専念するデバイスメーカーやそうした企業から製造を請け負うファンドリーは、プロセス技術や装置の選択を差別化する必要は少ない。デバイスの生産が安定してできればよく、装置の統合化やプロセスインテグレーションを促進する力となる。つまり、モジュール化戦略を促進する要因となる。既存の装置を継続的に使い込む方がよい。プラットフォームを重視する ASLM 社のモジュール戦略が優位性を発揮する余地は、そうしたところにもあったのである²²⁾。

3. ASLM 社の製品アーキテクチャ構造とモジュール化戦略

3-1) ボディの共通化とプラットフォーム化

より具体的に、ASLM 社のモジュール化戦略の特質を検証しておく。改めて露光装置のモジュール化とはどんなことかを確認すると、部品間の相互依存性を減少させていくことであり、装置を構成する基幹ユニット間の独立性を高め

ることである。そうした製品アーキテクチャ戦略を展開することにほかならない²³⁾。

露光装置を基幹ユニットに分解すると、ウエハー・ステージ、レチクル・ステージ、照明系、搬送系、ボディなどが対象となる。モジュール化するということは、これらの基幹ユニットがなるべく相互干渉しないように、事前に設計上の明確な切り分けを行うことを意味する。そうした切り分けができれば、最終組立工程におけるユニット間の調整作業の大幅削減、稀少な匠的な擦り合わせ技術の節約が可能となる。また最終的な製品の性能は、各ユニットの性能がスペックを満たしていれば自動的に保証されることにつながり、基幹ユニットをサプライヤーにアウトソースする方法を拡張させる。モジュール化されたユニットのイノベーションは、仕様さえ守る限りサプライヤーによって推進される。

ASLM社の製品アーキテクチャの特性ということでは、ニコンやキャノンと比べて基幹ユニット間の独立性が非常に高い。例えば、装置のメンテナンスという点では、ウエハー・ステージをユーザーが簡単に引き出して洗浄できるアーキテクチャになっている。照明系部分も同様の構造である。露光装置では、アラインメントの起点となる光軸（投影レンズ内の縦方向の中心部分）は、露光精度を出す上での基本であり、ユーザーには触らせないのが原則である。そうしたことからすると、ASLM製のウエハー・ステージをユーザーが取り出して洗浄できるという構造は画期的なものといえる²⁴⁾。

さらに90年代のASLM社の製品群を見ていくと、光源の変化に対する基幹ユニットの変更を少なくしているアーキテクチャ構造がある。通常、微細化に伴い光源を変更する場合、関係する他の部品やユニットは新しく変更される。ところがASLM社のアーキテクチャは、光源の変更によっても他のユニットはそのまま使えるような構造となっている。光源の変化があってもできるだけ共通の基幹ユニットを長く使い、新製品での新機能付加を最低限に、つまり、せいぜい1つか2つにとどめる工夫がなされている。プラットフォーム戦略といえる。

例えば、PAS5500というボディは1991年に導入されたが、2000年までは光源がi線であろうとDUV(deep ultra violet)であろうとすべて同一であった。また、KrFステッパの発売時に投影レンズの縮小倍率を4対1に変更したが、KrFスキャナ導入時にも同じ比率が維持されている。ASLM社の製品では、このようにボディを軸としたプラットフォームが確保されるのである。共通ボディ戦略といえる。ところが、ニコンやキャノンでは、縮小倍率変更がステッパからスキャナへの移行時には、縮小倍率は変更され、ステージと投影レンズも同時に新たに変更される。基幹ユニットが変更されれば、周辺は全て変更されるアーキテクチャ構造と戦略を採るのが日本企業といえる。

ボディの切り替え数とレンズの種類との関係でも、そうした戦略性の違いを確認することができる。ニコン・キャノンは、ボディ切り替え数とレンズの種類とが同数である。つまり、基幹ユニットとして日本企業はレンズを重視する傾向があり、レンズをデバイスメーカーとまず擦り合わせる。レンズで差別化を図ろうとするといっているであろう。その際、レンズ交換がされるとボディも新しく開発されるのである。これは装置性能に関してレンズを重視する設計思想であり、常にレンズの性能の向上を図る戦略性が製品アーキテクチャに反映されている。ニコンやキャノンの営業は、まず、顧客にレンズデータを持っていくことから始まるといわれる。顧客に満足される低収差レンズを開発し、その後、そのレンズにあわせたボディを作り込んでいく。そのため、レンズの種類だけボディが存在する。

これに対して ASLM 製は、300mm時代を迎えるにあたっては、PAS5500 から新しいボディに切り替えたが、2001 年までの 10 年間は同じボディを使っていた。つまり、ボディの上にモジュール化されたレンズ、レチクル・ステージ、ウエハー・ステージなどを組み合わせるといって設計思想であり、アーキテクチャ戦略である。10 年間同一のボディで対応してきた。光源が変化してもボディは同一という装置構造とアーキテクチャが ASLM 社の特性であり、業界を驚かす製品アーキテクチャといわれている。ボディを基幹ユニットとしたアーキテクチャ戦略といえよう。KrF のボディからレンズを取り外して、ArF のレンズを搭載すれば ArF 露光装置として使用できるという新しい製品アーキテクチャを実現したのであり、ものつくりのコンセプトとしてニコン・キャノンと全く別物であったといえる²⁵⁾。そこに優位性を生み出す構造があったのである。

3-2) 基幹ユニットの大括り化と特殊なテストモジュールによる納期短縮

構造上のモジュール化とプラットフォームかと並んで、さらに ASLM 社のモジュール化戦略を成功させた要因といえるのは、スループットや稼働率といったとりわけアジア市場のニーズを取り込んだ工夫にあり、装置の納期短縮化を図った工夫といえる。

その工夫とは、まずはサプライヤーから納品されるユニットの数を減らしているところにある。ASLM 社の場合、多くのサプライヤーにモジュール部品を発注して納品させ、自社内ですばやく組み立てる。そして、できるだけ速くユーザーに完成品を納品しようとする。当然、ユーザーへの納品は短縮化しようとする。モジュール設計とモジュールの数など、うまくアーキテクチャを構造化しないとモジュール数の増加やサプライヤー数の増加を招き、生産リードタイムの長期化が起こる。ユーザーへの納期が長期化し優位性を失いかねない。

この点 ASLM 社は、納期の短縮化に向けた工夫を凝らしている。サプライヤ

一から納品されるモジュール化された部品やユニットが非常に大括りで納品され、数が少なくされている。キャノンの場合、自社内からの調達となるが、搬入される基幹ユニットは20~25くらいになる。一方ASLM社の場合、10~11と非常に少ない。これはアーキテクチャの設計と構造に関わる戦略といえるところはあるが、組立スピードの向上だけでなく、サプライヤーとの関係づくりと納期短縮ノウハウへの工夫が込められている。

さらに、モジュールである基幹ユニットの検査プロセスにも工夫がある。基幹ユニットはユニット毎事に検査される。サプライヤー側でもASLM社側からも双方で検査される。それに加えていくつかのユニットを組合せた形の検査（functionality test）が行われるのであるが、あらかじめ検査用として用意された特殊なテスト用モジュール装置にはめ込む形で検査される。基幹ユニット間の相互干渉度を検査するためのデータ取りが行われる。投影レンズユニットを除く全ての基幹ユニットがこのテストモジュールによってテストされ、パスしたものだけが総組立に送られる。この特殊なテストモジュールはASLM社によって内製されるが、サプライヤーにも置かれているのである。つまりサプライヤー側でも同じテスト装置で搬送直前に組み合わせ的な検査が行われている。特殊なテストモジュールを活用した生産リードタイムの高度な短縮ノウハウは、ASLM社の90年代の躍進と優位性を高めた要因であり、モジュール化戦略を支えるノウハウの1つといえる²⁶⁾。

3-3) デュアルステージ構造

さらなるモジュール化戦略の1つのノウハウとしては、また製品のアーキテクチャそのものの特質に戻るが、デュアルステージ構造の露光装置という点である。韓国や台湾の半導体メーカーは、スループットと稼働率を装置とプロセスに求めるというユーザー特性があった。ASLM社は多くのシェアをアジアで獲得しており、アジアのユーザーのニーズを重視した戦略をとっている。スループットと稼働率を上げる装置づくりは、アーキテクチャ戦略として重要となる。

ボディを軸にプラットフォーム戦略を展開してきたASLM社であったが、300mmウエハー時代を迎えるあたり、10年間使用してきたPAS5500ボディを切り替えることにした。その際、スループットと稼働率を意識した製品アーキテクチャ構造と設計に踏み出している。スループットと稼働率対策としては、装置動作の高速化を組み込み、微細化という性能向上にも対応しようとするもので、微細化と高速化という相反するパラメータを同時に実現させるためのアーキテクチャの採用といえる。

300mmウエハー時代の装置の課題は、200mmウエハー時代と変わらないあ

るいはそれ以上のスループットを実現しながら、なおかつ加速化する微細化対応にも対応しなくてはならない。スループットを追及するとウエハー・ステージを早く動かし、露光を少しでも短時間に終わらせる必要がある。しかし、ウエハー・ステージを速く動かすと、ウエハー表面を計測する時間が少なくなり、高速動作時に発生する振動の影響によって、微細化への対応が難しくなる。こうした相反するパラメータを同時に解決しなければならない。そのためにボディを軸にプラットフォーム戦略を展開してきたが、これまでとはまったく違った新しいボディの開発が必要となり、新しいアーキテクチャ戦略で背反する課題に対処しようとした。

そこで開発した ASLM 社の製品は、ステージを 2 つ持つ「デュアステージ」と呼ばれる露光装置であった。露光装置は、そのレンズを通してレチクル上の回路をウエハーに投影する装置であるため、ナノレベルの重ね合わせ精度が要求される。レンズとウエハーはできるだけ同一光軸上になければならないというのが一般的な考え方であった。ASLM 社の新しい装置は、露光ステージと計測ステージという 2 つのステージを搭載させ、背反する課題を同時にしかも独立させて実行するアーキテクチャを採用したといえる。これまでの常識を打破アーキテクチャであり戦略といえよう。計測ステージ側では、より多くの時間を使用し計測することで高精度への要求を満たした。そして、計測されたウエハーを直ちに露光ステージ側に移動することで、加速化と高スループットへの要求も満たそうとしたのであった²⁷⁾。

ただし、アーキテクチャを刷新したとはいえ、デュアルステージという新しいボディもそれに載せる周辺モジュールは、旧モデルである PAS5500 で使われていたモジュールを極力使えるような設計が施されている。すべてを新しくするアーキテクチャ戦略ではない。例えばレンズは、PAS5500 で使われていた Starlith1100 を新しいデュアルステージ型のボディでも使うことができる²⁸⁾。レンズは基幹ユニットとして非常に重要であり、これを使いまわせるところは、やや微細化対策よりもスループットと稼働率を重視したアーキテクチャ戦略といえるかもしれないが、デュアルステージによる製品アーキテクチャ戦略の優位性は、ニコンやキャノンに圧倒したといわれているおり、その内容を引用しておく²⁹⁾。

「ニコン・キャノンは当初、300mm ウエハー時代に対応した露光装置は、200mm ウエハー時代に使用してきた装置の主に搬送系を改良し、300mm ウエハーに対応した。この装置は、200mm 時代から 300mm 時代に移行するブリッジツールと言われ、生産性を犠牲にして、精度を出していた。本格的な 300mm を迎える辺り、ニコンは S306 ボディの登場を待たねばならず、ASLM からは半年遅れたのである。ASLM は新ボディの元、各モジュ

ールを更に進化させることで、次々と新製品を投入していく。新製品の数でニコン・キャノンを圧倒するようになった」。

4. ASLM 社のアウトソーシング戦略と R&D コラボレーション

4-1) アウトソーシング戦略とその強み

こうしたモジュール化戦略でシェアを高め、2000 年の中盤以降、露光装置市場でトップを走り続けている ASLM 社であるが、モジュール化と製品アーキテクチャ戦略とならんでもう 1 つの重要な強みとして、サプライヤーからのアウトソーシング戦略と R&D のコラボレーション戦略がある。以下、こうした戦略の成功要因を考察していく。アウトソーシングとコラボレーションとは、一見すると相反するが、サプライヤーに依存しながらも協力もし合うという企業関係を作り上げている。双方の戦略は一体化したものと捉えている。しかし、相対的に独立させてそれぞれの戦略内容と特質、そして成功要因を検証していく。

モジュール化の原理からすると、インターフェイスが固定化されていれば、モジュールのイノベーションはサプライヤーに移り、アッセンブリを行う ASLM 社の完成品は、サプライヤーのイノベーション努力が直接反映される。イノベーションプロセスを自動的にかつ低コストで獲得できる。そこに優位性が生まれる。アウトソーシング戦略を実践する ASLM 社の狙いは、まずそこにある。

インターフェイスの固定化という点では、ボディをプラットフォーム化して長期的に同一仕様とし、関連する基幹ユニットであるモジュール自体は、サプライヤーによってイノベートさせようとする。レンズなど、サプライヤーである Carl Zeiss 社によるイノベート効果は大きいであろう。ボールドイン＝クラークの見解が実行されているといえる³⁰⁾。ボディの設計情報をコアパートナーに開放し、ボディはプラットフォームとして機能させる。そして、擦り合わせの場はコアパートナーに移してしまえる。ASLM 社がタッチする必要はない。各モジュール間の相互作用はインターフェイスの固定化で維持されており、つまり同一ボディの利用で解決されている。モジュール自身はサプライヤーの手での進歩が促される。そうした戦略がアウトソーシング戦略に込められており、サプライヤーの役割を視野に入れたビジネスモデルが形成されている³¹⁾。

主な基幹ユニットのサプライヤーとしては、オランダの Philips、ドイツの Carl Zeiss、米国の Cyner などがある。サプライヤーとの関わりは、ボディの仕様は ASLM 社が確定させ、関連する基幹ユニットは、サプライヤーに開発から生産までのプロセスを任せる関係といえる。そうすることで ASLM 社はアーキテク

チャの根幹部分であるインターフェイスをボディーを通じて握り、関連ユニットの開発費は縮小させ、モジュールのイノベーションと進化をサプライヤーに委ねながら、完成品の機能と性能を自動的に向上させることができる。微細化のための高性能と高機能化に向けた開発費の負担増、開発期間の長期化といった収益性への負荷の強いニコンやキャノンの戦略に対して、競争優位となったといえる。

開発費を特許数との関係からニコン・キャノンと比較してみると、2000年初期の時点での資料であるが、当時においてはASLM社の1990年以降の特許出願件数は、日本で111件、米国で65件、欧州で134件である。ところがニコンは、日本で4,541件、米国で2,536件、欧州で461件であり、キャノンは日本で2,612件、米国で1,346件、欧州で4,86件である。ASLM社の出願件数は桁違いに少ない。日本の2社に比べると数十分の一しかなく、露光装置市場での基幹となるような有力特許を持っていない。これはASLM社が、サプライヤーである開発パートナーに技術リソースを依存している証拠であり、ASLMのビジネスモデルの特質といえる。

アウトソーシング戦略が強みを発揮するのは、これまでも言及したように、サプライヤーのイノベーション能力を活用できるからである。そうした戦略を採るASLM社の「判断」が優位性をもたらしているといえるが、露光装置自体のテクノロジーの発展がそうした戦略を必然化しているところに留意する必要がある。つまり、微細化技術の追求は極限レベルのサイエンスを必要とし、もはや企業単独では追及できない領域に達しているという状況が歴然とあることが重要である。これに対応するには、アウトソースしながら、なおかつサプライヤーと協力するという企業間関係でしか対処できないことを意味する。

中馬はモジュール化が優位となる要因に、①露光装置自体のテクノロジー特性、②半導体の市場特性とをあげている。特に露光装置自体のテクノロジー特性がモジュール化を促進したところが大きいとし、露光装置自体の性能がこれまでのコア技術としての光学・精密機械技術のみならず、フォトマスクやレジストメーカー、あるいはレジスト塗布・現像装置メーカー、さらには高度なプロセス技術を有するデバイスメーカーとの共同作業のなかで装置が作り込まれていく構造が生まれていることを指摘している³²⁾。つまり、クローズ型のインテグレートしたビジネスモデルでは、イノベーションに対応できず、基幹ユニット毎に分散的にイノベーションを図らざるを得ない構造ができつつある。分散型とはつまり、まずはアウトソーシング体制とならざるを得ない。サプライヤーへのアウトソーシング戦略は、製品のアーキテクチャ戦略がモジュール化とアウトソーシングを生み出したというよりは、技術的な発展の法則がそうしたビジネスモデルを必然かさせたといえる。

もう 1 つインテグレートを低下させる要因として中馬は、生産現場で装置を使いこなす技術者や技能者の「問題解決能力」の低下をあげている。ニコンやキャノンがシェアを独占していた時代の装置には、装置を使う現場には、既知・未知の問題解決能力が残されていた。しかがってその活用のために、装置には現場で対応できる「調整代」が考慮された製品アーキテクチャが施されていたのである。装置にも現場の要請に合った個体差が作り込まれており、ビジネスモデルは擦り合わせ的でインテグレートされたなかで、匠的な統合組織力がそうした強みを実現させた。

ところが装置のテクノロジーの向上が高速化し巨大化してくると、化学的・物理的な限界に近づき、それが現場の問題解決能力を低下させてしまうのである。もはや現場の技術者や技能者だけで問題解決が図れない。つまり、「調整代」を残し開発費を負っても擦り合わせ的なアーキテクチャにする必要性はなくなってしまう。アジアのシェアが圧倒的に高い ASLM 社という特性があったが、アジアの現場には既知・未知の問題解決能力を駆使する技能者や技術者が不足していたのかもしれない。すると、最初から「調整代」を加味したアーキテクチャ戦略は意味がない。モジュール化され標準化された装置がいいことになる。

そして、最適調整のテクノロジーは、ハードウエアによる調整からソフトウェアによる調整へと変化してきている。調整用のソフトがあれば、統合する必要性やインテグレートする要素は減る。モジュールに分散させ、モジュール毎にサプライヤー関係をつくり、アウトソーシングでイノベーション能力を活用して、調整はソフトで行う、そんなマネジメントが浮かんでくる³³⁾。技術の発展事態の構造と法則性、現場の問題解決能力の低下、ソフトによる調整、こうした要因が規定的な要因となって、アウトソーシング戦略が優位性を発揮させ、ASLM 社がそれをうまく活用したといえる。

4-2)ASLM 社による R&D コラボレーション戦略の特性

モジュール化とアウトソーシング戦略が功を奏したのは、露光装置自体の微細化・高速化といったテクノロジー特性により、幅広い装置間の係わり合いと共有情報が必要となってきたためであった。モジュール化された部分だけでイノベーションを期待することはもはや難しく、広い情報の共有と関係主体のコラボレーションなくして、機能向上と性能向上が進まない環境に露光装置は取り巻かれてきたといえる。

そうした環境は、モジュールをアウトソースするプロセスのなかで、より深い係わり合いが必要となる状況を強める。ボディというプラットフォームとモジュールとのインターフェイスを握る ASLM 社であるが、ボディ自体をイノベーションしていかなければならない。またモジュールのイノベーションを実現してくれ

るサプライヤーも、広い情報や研究成果が必要となる。企業間連携が必要となってくる。かつて ASLM 社は、特許出願ではニコンやキャノンに比べて格段に少なかった。しかし、2000 年以降 ASLM 社の出願件数が急激に増加している。EUV 露光装置などの新技術開発に挑戦しており、自社開発技術については特許出願している。アウトソーシングによるサプライヤーのイノベーションを期待しながらも、R&D のコラボレーションによる製品のイノベーションも追いかけているのである。技術の発展と法則性がそうさせる状況を高めているからである。

そのプロセスで戦略的といえる内容は、プロセス、材料、装置などが集まる「共同の場」を活用し、あるいはそうした場を作りながら R&D を進めているところである。微細化は全体プロセスの最適化を高次元で実現する必要性を高め、ジェネリックな技術開発の下で、装置メーカー、材料メーカー、デバイスメーカーを含む様々なメーカーのもつ知識を融合させながら R&D を進めていかななくてはならない³⁴⁾。その際 ASLM 社は、「共同の場」として IMEC という欧州の共同研究コンソーシアムを活用しているといえるところが戦略性といえる。レンズメーカーであり、主要なサプライヤーである Carl Zeiss 社との企業間関係づくりと共同の場づくりはあるが、戦略性の軸は、コンソーシアムの長所をうまく活用しているところといえよう。

世界には、共同研究コンソーシアムといわれる研究機関がいくつかある。米国には、半導体に関して 1987 年に結成された SEMATECH がある。半導体の先端プロセス製造技術開発のための共同研究コンソーシアムである。設立当初は、アメリカ半導体産業の保護を目的としたが、1997 年以降国際化し ISMT へと改変されアメリカ企業以外の企業にも参加が開かれている³⁵⁾。コンソーシアムとは、多くの企業が参加し資金と技術を提供しあいながらジェネリックな研究成果を生み出し、参加企業へ還元していくことに主な目的がある。政府のバックアップも通常行われる。国内企業だけから構成されるのではなく、世界的な広がりを持ち、参加企業も国境を超える。

米国の SEMATECH に対して欧州には、IMEC という共同研究コンソーシアムがある。ASLM 社のコラボレーション戦略は、このコンソーシアムとの連携にある。参加企業から幅広い技術情報とニーズを取り込み、自社に持ち帰って試作機を開発する。その際にはサプライヤーとのコラボレーションも行われている。そして試作機は、コンソーシアムに提供して参加企業に試させる。その後、問題点や課題を持ち帰り更に改良していくといった開発戦略を実践する。多くの関連メーカーの開発要求や性能要求を汲み取り、それを満たすべく装置を開発しながら、参加企業にテストしてもらいながら、改良を繰り返して精度と性能を上げていくといったコラボレーションである。コンソーシアムを活用

しての R&D コラボレーションとはそうした内容を指している。

ASLM 社の R&D コラボレーション戦略の骨格は、「共同の場」としての国際的なコンソーシアムをうまく活用するところにあり、そこに優位性の源泉がある。裏を返せば、ニコンやキャノンは、自社あるいは企業間の共同、国内の共同研究機関の活用はあるものの、国際的なコンソーシアムを活用する戦略が弱いといっているであろう。

4-3) 国際的共同研究コンソーシアム=IMEC とのコラボレーション

もう少し具体的に、IMEC という機関の特徴と ASLM 社による機関の活用の実態を考察しておく。

IMEC とは、1984 年にベルギーのルーベン大学のマイクロエレクトロニクス研究室が独立してできた民間の研究所で、専任スタッフ 840 人、ゲスト研究者は企業からの派遣を含めると 1200 人に上る。当初は、フランダース政府 60% 民間 40% の資金で始まったが、最近では全体の 76% が民間企業からの資金である。大きな特徴としては、IMEC には IIAP (Industrial Affiliation Program) と呼ばれるコンソーシアム型の共同研究プログラムがある。例えば、193nm プロセスとか Low-K 材料といった外部効果の高いジェネリックなテーマが設定され、そうしたテーマのもと、デバイスメーカー、装置メーカー、材料メーカーが集まっており、IMEC の研究者と大学、企業の研究者がプリコンペティティブ (非競争領域) な応用基礎研究を協力して行うところである³⁶⁾。

コンソーシアムにおける契約は、あくまでも IMEC と参加企業との間のパイラテラルなものとなっており、契約には R0 から R2 までの段階がある。R0 では共同の成果は IMEC に帰属する。反対に R2 の場合、成果はすべてパートナーに帰属する。R1 はその中間であり、共同の成果は IMEC とパートナーの双方が所有することになる。双方とも IP の実施を妨げない。ただ、R1 にもバリエーションがあり、共同研究に企業特定の要素が入り込むと、IMEC による IP の実施に制限がつく場合がある。

こうした契約は全て、モラルハザードの問題を防ぐため、共同のタイムラインを決める最初の段階で交渉を通じて結ばれる。IIAP では、ほとんどの契約が R1 であり IP は共同所有される。つまり、常に IMEC 側には共同の成果が蓄積される。IMEC はより多くのパートナーと共同するほど所有する IP を向上させることができる。コンソーシアム事態はジェネリックな研究蓄積を所有していく。「共同の場」であると同時に R&D のストック機構でもある。パートナー企業にとっても、IP を所有することができるし、IMEC の研究成果に触れることができる。IMEC との共同研究すること自体も、その後のビジネスを有利に展開することになる。IIAP は自己増殖的な性格を特徴としている。

参加企業の技術者は、IMEC に常駐して研究を行うことになる。IMEC では、柔軟な契約を結ぶことで利害調整している。特定のプロセスステップに競合する装置メーカーが入り込まないようにしたり、デバイスメーカーと材料メーカーの間で非対称的な情報公開を設定したりする。また、材料メーカーの情報はデバイスメーカーに流れるが、デバイスメーカーの研究成果は材料メーカーには流れないなど、様々な契約形態を柔軟に使いこなすことで、異なる利害を持った企業の実質的な共同を可能にしている³⁷⁾。

さらにこの IIAP プログラムは、IMEC に参加している全ての企業に開かれている。Intel をはじめ、Micron、STMicroelectronics、Infineon、Philips、Samsung、TSMC、松下、エルピーダ、Hynix などが参加している。半導体露光装置メーカーとしては唯一 ASLM 社が参加しており、設立当初より 20 年以上この IMEC と連携している。レンズの Carl Zeiss も参加企業の 1 つである³⁸⁾。

ASLM 社の R&D コラボレーションにおいては、国際的に評価の高い IMEC を開発パートナーとみなし、材料メーカーからデバイスメーカーまで幅広い知識が融合化している IMEC との間で、良好な情報のフィードバックとフォーキャストが行われている。幅広い知識と研究成果が必要とされる現代の環境において、国際的なコンソーシアムと連携しながらの R&D 戦略が優位性をもたらしている。最新の露光装置あるいは次世代の露光装置に、液浸露光装置や EUV 露光装置があるが、IMEC には 3 台の ASLM 製液浸露光装置と 1 台の EUV 露光装置が稼動している。IMEC に参加する企業の製造プロセス研究に使われる傍ら、ASLM 社に評価がフィードバックされているのである。ジェネリックな研究開発であり装置開発であるゆえ、そうしたコラボレーションから生まれる装置は「標準化」された装置となる可能性も高い。プラットフォーム戦略的な要素も含まれている。

日本企業はコンソーシアムに参加しているけれども、積極的に研究成果を取り込もうとする戦略が薄い。中馬は半導体産業の競争力低下の要因をネットワーク分析の視点から行っている。コンソーシアムなど国際的な研究機関とのつながり度や研究成果の活用度から競争力を眺めようとしている研究といえる。日本企業のそうしたコンソーシアム活用と参加実態の特徴として、「離れ小島」的なつながり傾向があるとされる³⁹⁾。日本国内に限定すると、コンソーシアムや国家的なプロジェクトは数多くある。これまでも多くのプロジェクトが立ち上がり共同研究開発は行われてきた。国内の研究機関、国内の企業、国内の大学が主であった。そうしたスタイルは得意といえるかもしれない。しかし、国際的なコンソーシアムとなると、参加するものの、積極的な参加企業との関係づくりやコンソーシアム自体の有効利用を余り行おうとせず、孤立的に研究開発を進めている傾向があるように思われる。

4-4) 最新の開発動向と ASLM 社の強み

対して ASLM 社は、IMEC とコラボレートし、主要なサプライヤーとの間でもコラボレーションを重視している。例えば、現行の ArF 光源を用いた露光装置に対して、今後期待される露光装置に液浸露光装置と EUV 露光装置があげられる。本命は EUV であり、液浸は EUV に移行する中間的な技術といわれているが、ASLM 社は Carl Zeiss 社とともに液浸装置に関する共同開発をすでに行っている。

最新鋭の液浸露光装置に「TWINSCAN XT:1900 i」がある。32nm ノード (=45nm ノードの次世代値)の半導体量産を可能にするソリューションであるダブルパターンニング露光技術が組み込まれている。文字どおり 2 回の露光を行うことで、1/2 の解像度の回路パターン描画を可能にする手法である。そこには「Catadioptric」という反射屈折光学系技術が採用されている。Carl Zeiss 社の技術が関与している。インライン型で、1 本の筒の中に光路を収める光学系が採用されている。外見上は屈折光学系と変わらず、この開発が競争力を持つ露光装置として重要であったとみなされており、Carl Zeiss 社の工学技術がこの重要な技術に生かされている⁴⁰⁾。サプライヤーとの R&D コラボレーションの成果といえる。

また、次世代の EUV 露光装置については、IMEC、ASLM 社、そして Carl Zeiss という 3 者間のコラボレーションも進行している。EUV は、現行の ArF 露光装置とは大幅に構造が異なり、光源は波長 13.5nm の極端紫外線で、ArF の 193nm に比べて波長が大幅に短い。その光源開発は困難を極めており、現在の ASLM 社の α 機 (IMEC へ提供している試験機) は、平均で集光出力が 10 W、スループットはウェハー 10 枚/時間であるが、量産機となるにはこの 10 倍のパフォーマンスが求められる。光学系は多層膜ミラーを使った反射光学系を用いる必要もあり、ミラーの多層膜形成と研磨など高度な技術が必要とされる。

こうした EUV 露光装置に対して、ASLM 社、IMEC、そして Carl Zeiss 社は開発に全力を費やしており、このコラボレーションにより開発されようとしている EUV 装置に参加企業の注目が集まっているという。IMEC のパートナーの 80% は EUV 露光技術を重要とみなし、2007 年に IMEC のプログラムに参加した半導体製造メーカーの目的は、IMEC が備える ASLM 社製の EUV 装置である α 機の検証・開発プログラムに参加することにあるとされる。次世代の量産技術としてほぼ確信されている状況を生み出している。Carl Zeiss 社は、研究開発費の 20% を EUV 開発に充てており、ASLM 社は、EUV 露光装置を製造するラインを格納する新たなクリーンルームの増設工事を開始している⁴¹⁾。

ASLM 社と Carl Zeiss 社は互いに協議しながら、だいたい 2 週間に 1 度は開発ロードマップを改定するという。かなり密なコラボレーションとえいえる。また、IMEC を通じることで、最先端の技術動向を漏れなく把握でき、的確なロードマップを設定し、優れた技術を開発しながら、いち早く製品を市場に投入できる優位性を発揮しているといえよう。

5. ASLM 社からのインプリケーションと日本企業の戦略課題

5-1) コンソーシアムの活用と R&D ネットワーク戦略

ASLM 社がこうしたコラボレーションとネットワーク型の R&D を戦略的に構築しているのに対して、日本企業は世界的な共同研究とコンソーシアムを通じた R&D という戦略は薄い。IMEC にしても日本企業は参加しているが、そこに貢献しながら成果も持ち帰るといった状況にはない。どちらかというところ「孤立化」したスタンスをとる傾向が強いように思われる。

中馬は、半導体産業の国際競争力低下の要因を国際的な研究コンソーシアムとの関わりという視点から分析しているが、サイエンス型産業において、日本企業の競争力が低下している要因を分析するなかで、研究コンソーシアムとのネットワーク化のあり方に注目している⁴²⁾。日本の企業や研究者は、国際的な研究コンソーシアムの中では、まるで離れ小島のようなポジションにあり、コンソーシアムからの研究のフィードバック、コンソーシアムへのフォーキャストなどは非常に少ない傾向があると分析しており、「日本勢のプレゼンスは、個々の研究開発者のレベルでは相当に高い。ただし、日本勢を世界の R&D ネットワークの中で位置づけると、その孤立度の高さが顕著に浮き出てくる」と特徴づけられている⁴³⁾。

韓国や台湾勢の企業も、IMEC や SEMATECH などに可能な限り接近する形で R&D 能力を補強してきた。他方日本勢は、世界の R&D ネットワークの中で未だ“離れ小島化”しており、そのような組織特性をなかなか補強できていない。日本のこうした状況も、結果的に ASLM 社の優位性を強めている要因といえる。結局、国際的なコンソーシアムの幅広い知識やニーズ、開発技術を活用することなく、斬新な開発と競争力を持つことが困難となってきた。サプライヤーの独自のイノベーションを活用する戦略とともに、R&D 能力の向上を世界的なネットワークのなかでコラボレーションしながら図っていく必要がある。共同研究やプロジェクトを利用した R&D とコラボレーションは、日本国内ではこれまでに行われてきた。70 年代末の「超 LSI 技術研究組合」方式によるプロジェクトは、日本の技術と製品化が世界を制した。しかし、今や国内の共

同研究やプロジェクト（産官・産官学の連携）だけでは、視野が狭い開発結果となってしまう可能性があるように思われる。

5-2) 日本の国家と民間プロジェクトの体制とマネジメント課題

本稿を締め括るにあたり、日本企業の戦略課題を現状や実態を踏まえながら改めて考察しておく。

結論からすると、R&Dのコラボレーションを世界的なネットワークの中で構築し、孤立的なスタンスを打破していくことといえる。ジェネリックな研究開発力に関しては、単独企業では届かない状況が生まれている点はこれまでも言及した。従来、そうした状況を打破するには、国家レベルでのプロジェクトが重視されてきたといえる。国別に国家プロジェクトが立ち上がり、5年～10年といった長期的展望で基礎研究重視型のプロジェクトが展開され、企業への技術移転などマネジメントが行われてきた。米国のSEMATECも最初は、米国内の半導体研究の拠点であった。しかし、徐々に世界的にオープンな研究環境へと変化させ、広いスタンスから情報の共有と研究テーマの設定、開発の汎用性などを追及しているといえる。IMECにしても、半導体製造の全体ききな工程の標準化や量産技術を意識した非競争的領域の研究開発をコラボレーション方式で積み上げている。ASLM社はそうした共同研究コンソーシアムをうまく活用したR&D戦略を軌道に乗せている。

ところが日本企業の場合、研究者の研究レベルは高いものの、世界的なR&Dネットワークと研究成果の活用などがあまり上手ではないといえよう。これまでも、また現在も次世代の技術開発や基礎研究は国家レベルでも、また民間の共同研究プロジェクトでも実施されてはいる。そうした国家プロジェクトや民間プロジェクトの歴史、特徴、意義など、今回は詳しく論ずることはできないが、簡単に最近のプロジェクトの動向をまとめ、問題点とマネジメントの課題に言及し本稿を終える⁴⁴⁾。

半導体関連に限定するが、大きく2つの体制で研究開発体制が構築されているといえよう。1つはNEDOを中心とする国家プロジェクトであり、もう1つは日本半導体産業研究所(SIRIJ)をシンクタンクとする民間プロジェクトである。民間プロジェクトの実際の推進母体は、(株)半導体先端テクノロジーズ(Selete)と(株)半導体理工学研究センター(STRAC)であり、シンクタンクとともにすべて半導体メーカーである国内メーカー10社(富士通、日立製作所、松下電器産業、三菱電機、NEC、沖電気工業、三洋電機、シャープ、ソニー、東芝)が出資して設立されている。

日本の半導体プロジェクトは大雑把に見ると、非競争的で基礎研究的な領域はNEDOが管轄し、競争的で応用開発的・実践的領域をSTRACとSeleteが担

う分業体制といえる。NEDO の進め方は、テーマを設定して公募し、資金とともに委託するという方式が中心で、産業技術総合研究所（AIST）やその内部に設置された次世代半導体研究センター、あるいは超先端電子技術開発機構（ASET）などが、主な委託先であり実際の推進母体となる。2001年から2011年にわたり「MIRAIプロジェクト」という国家プロジェクトが推進された。第1期から第3期までのプロジェクトで「次世代半導体材料・プロセス基盤」プロジェクトである・微細化に対応して次世代、次々世代の技術開発プロジェクトといえる。つい最近まで第3期を実施しており、EUV装置が軸となっている。

こうした官主導の国家プロジェクトも、実用化がかなり意識されてきており、第3期にはSeleteが委託先となってプロジェクトの推進役となっている。もちろん、プロジェクトの推進役として、Seleteなどの産業界や企業だけでなく、大学も参加している。また、民間プロジェクトの方は、「ASUKAプロジェクト」として、2001年から20011年まで進められている。1006年までがASUKA、2006年からはASUKA IIとなっている。推進母体はSTRACとSeleteであり、前者が設計技術開発を後者がプロセスモジュール技術開発を担当している。

MIRAIプロジェクトが第3期を迎えた際の推進体制と参加企業・参加大学を図表-5に提示した。Seleteを中心とした「ロバスタトランジスタの開発」、「耐外部攪乱デバイスの開発」、「EUVマスクの開発」という3つのプログラムに参加企業や大学が多く、次世代の中軸となるEUV光源・高信頼化プログラムが追加され、極端紫外線露光システム技術開発機構（EUVA）が主体となり、参加企業も新しいメンバーが加わっている。光源などでウシオ電機、ギガフォト、コマツなど新興企業が加わっている。ただし、参加企業はすべて国内企業であり、海外からの参加企業は1社もない。国内に閉じたプロジェクトである。

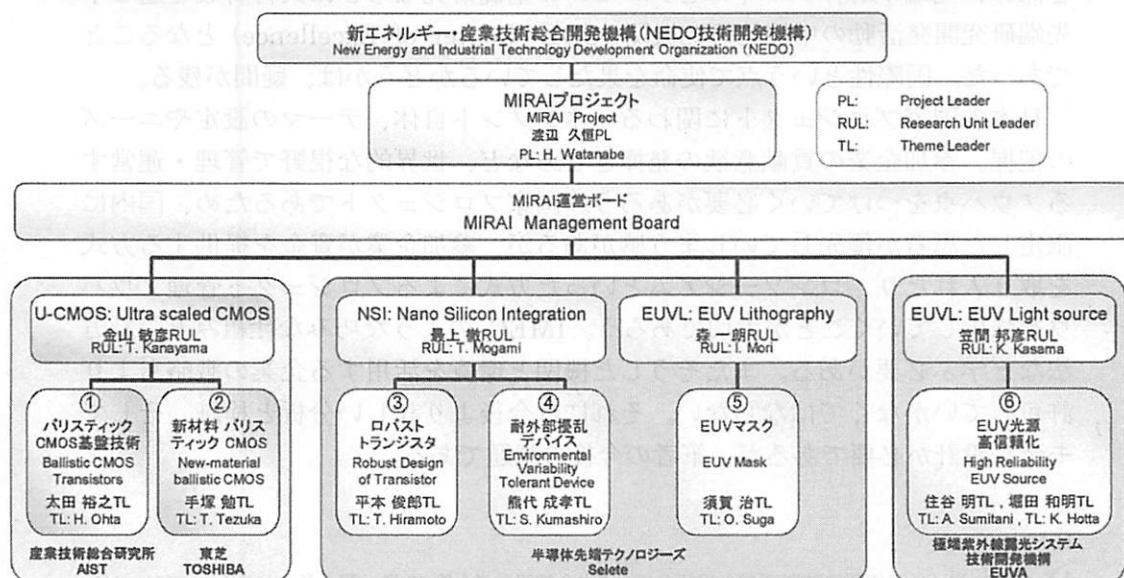
こうしたところがSEMATECHやIMECと異なり、幅広い研究や情報共有という点で、狭い範囲にとどまり、優位性につながる研究環境とはいえないように思われる。技術的な発展傾向からして、もう少し国際的な環境が必要とされるといえよう。これまでの国家プロジェクト管理のあり方を変える必要があるのではないかと思われる。確かに個々の研究レベルは低いわけではない。参加している企業の技術が世界のトップレベルといったケースはいくつかあるであろう。しかし、プロジェクト世界からは孤立的なクローズな体制であることは間違いない。情報の収集や共有はネットワークを通じて可能ではあるとはいえ、戦略的に世界に開いたオープンな共同研究環境を今後は造りこんでいく必要がある。

MIRAIとASUKAは2006年以降、統合的に一体化され、「つくば半導体コンソーシアム」によりプロジェクトの進行が図られた。つくばには、両プロジェクトを実施するにあたりスーパークリーンルームの施設が設けられ、研究開発

図表－5 国家プロジェクトMIRAIの第3期の推進体制と推進母体

推進体制

MIRAI Project Organization



テーマ別参加企業・大学機関 Participating Organizations for Each Theme

①	<ul style="list-style-type: none"> 参加機関: (独)産総研 共同実施、再委託: シャープ(株)、神戸大(土屋 英昭 准教授) 	<ul style="list-style-type: none"> Members: AIST, Sharp Corp. Academia Partner: Kobe Univ. (Assoc. Prof. H. Tsuchiya)
②	<ul style="list-style-type: none"> 参加企業: (株)東芝 	<ul style="list-style-type: none"> Member: TOSHIBA Corp.
③	<ul style="list-style-type: none"> Selete参加企業: 富士通セミコンダクター(株)、(株)日立ハイテクノロジーズ、パナソニック(株)、ルネサスエレクトロニクス(株)、シャープ(株)、(株)東芝 共同実施、再委託: 広島市立大(寺田 和夫 教授)、東大(平本 俊郎 教授)、東北大(永井 康介 教授) 	<ul style="list-style-type: none"> Selete members: Fujitsu Semiconductor Ltd., Hitachi High-Technologies Corp., Panasonic Corp., Renesas Electronics Corp., Sharp Corp., TOSHIBA Corp. Academia partners: Hiroshima City Univ. (Prof. K. Terada), Univ. of Tokyo (Prof. T. Hiramoto), Tohoku Univ. (Prof. Y. Nagai)
④	<ul style="list-style-type: none"> Selete参加企業: 富士通セミコンダクター(株)、ルネサスエレクトロニクス(株)、(株)東芝 再委託: 広島大(三浦 道子 教授)、神戸大(永田 真 教授) 	<ul style="list-style-type: none"> Selete members: Fujitsu Semiconductor Ltd., Renesas Electronics Corp., TOSHIBA Corp. Academia partners: Hiroshima Univ. (Prof. M. Miura), Kobe Univ. (Prof. M. Nagata)
⑤	<ul style="list-style-type: none"> Selete参加企業: キヤノン(株)、大日本印刷(株)、大日本スクリーン製造(株)、富士通セミコンダクター(株)、HOYA(株)、(株)ニコン、ルネサスエレクトロニクス(株)、凸版印刷(株)、(株)東芝 再委託: 兵庫県立大(木下 博雄 教授)、九州工業大(和泉 亮 教授) 	<ul style="list-style-type: none"> Selete members: CANON Inc., Dai Nippon Printing Co., LTD., DAINIPPON SCREEN MFG. Co., Ltd., Fujitsu Semiconductor Ltd., HOYA Corp., NIKON Corp., Renesas Electronics Corp., TOPPAN PRINTING CO., LTD., TOSHIBA Corp. Academia partners: Univ. of Hyogo (Prof. H. Kinoshita), Kyusyu Institute of Technology (Prof. R. Izumi)
⑥	<ul style="list-style-type: none"> EUVA参加企業: キヤノン(株)、富士通セミコンダクター(株)、ギガフォトン(株)、(株)コマツ、(株)ニコン、ルネサスエレクトロニクス(株)、(株)東芝、ウシオ電機(株) 	<ul style="list-style-type: none"> EUVA members: CANON Inc., Fujitsu Semiconductor Ltd., Gigaphoton Inc., Komatsu Ltd., NIKON Corp., Renesas Electronics Corp., TOSHIBA Corp., USHIO Inc.

(組織名: アルファベット順)

(Organization in alphabetical order)

(出所) MIRAI プロジェクト パンフレット (http://www.miraipj.jp/mirai_i/MIRAIpj-100611v1.pdf より)

拠点となっていたが、2006年以降、両プロジェクトは「つくば半導体コンソーシアム」により統括される体制へ移った。5年間で700億円規模であった。この「つくば半導体コンソーシアム」の使命として、国内外の関連機関との連携を深め、先端半導体デバイスとプロセスの基礎研究ならびに人材育成を通し手先研究開発活動の中核的研究機関(COE: Center of Excellence)となることであった。国際性という点で使命を果たしているかどうかは、疑問が残る。

日本の国家プロジェクトに関わるマネジメント自体、テーマの設定やニーズの把握、参加企業の貢献意欲の発揮させ方など、世界的な視野で管理・運営するノウハウをつけていく必要がある。国家プロジェクトであるため、国内に限定した思考が優先してしまいう感があるが、参加企業が資金を提供する方式を取り入れたり、コンソーシアムといった方式によるプロジェクト管理ノウハウを強化していくことが大切であろう。IMECのような巧みな仕組みと設計方法など学ぶ必要がある。またそうした機関と環境を活用する企業の戦略もより許可していかなくてはならない。それには今後より詳しい分析と検証、そしてモデル設計が必要であるが、筆者の今後の課題である。

注)

- 1) 肥塚 浩「半導体製造装置産業の現状分析」『立命館経営学』第49巻 第5号,2011年, pp. 101-110.
- 2) 前田和夫著『はじめての半導体製造装置』技術評論社,2011年 p.10.
- 3) 同上書,pp.26 - 32.
- 4) 同上書,p.147. なお、将来に向けては、光以外の露光方式が検討されており、電子ビーム露光、X線露光の実用化が図られている。電子ビーム露光装置はすでにステッパ用のレチクル描画に用いられている。
- 5) 同上書,p.11.
- 6) 肥塚 浩,前傾論文 p. 107.
- 7) 稼働率の問題は、アジアのユーザーだけが気にすることではない。日本のユーザーにとっても、高額な装置の稼働率問題は重要である。理想的には100%であるが、一般的には70-90%と見られている。詳しくは、和田和夫,前掲書,pp.176-177 を参照されたい。また、工程や装置ごとに稼働率は異なるように思われる。露光装置がどれほどの稼働率を実現できるかについては、筆者の推測に過ぎないが、アジアの稼働率に対する取り組みは、100%を確実に目指すといった状況であるかもしれない。
- 8) 高橋一雄「露光装置技術発展の系統化調査」(国立科学博物館 技術の系統化調査報告 第6集)2006年,p.120.なお、断りのない限り基本構造やアーキテクチャに関しては、同報告書に負っている。
- 9) プロジェクション露光装置にキャノン、ステッパ露光装置にニコン、枚葉式ドライエッチング装置に日電アネルパが開発に参加している。肥塚 浩,前傾論文 p. 110.
- 10) 高橋一雄,前掲報告書,pp.127 - 152.
- 11) ステッパでは、フォトマスクをレチクルと呼ぶ。オリエンテーション・フラットやノッチに関しては、同上報告書,p.128 を参照されたい。

- 12) ステップと呼ばれるのは、このステップアンドリピート動作による。
- 13) NA とは、Numerical Aperture の略で、光学系においてレンズへの入射光に対し、絞り半径が張る角度を α 、レンズの屈折率を n とするとき、 $n \sin \alpha$ で表される量でレンズの明るさを示す。開口数は露光装置の解像度を定める主要パラメータのひとつである。ニコンホームページ http://www.ave.nikon.co.jp/pec_j/technology/glossary.htm より。
- 14) インテグレーション技術に関しては、前田和夫,前掲書 p.53-55 が詳しい。
- 15) 立木博文・藤本隆宏・富田純一「アーキテクチャのダイナミズムと国際競争力の構築—半導体アーキテクチャ分析—」（東京大学ものづくり研究センター：MMRC DISCUSSION PAPER SERIES No.250）2009年,pp.34-43を参照されたい。
- 16) 高橋,前掲報告書,pp.135-136.
- 17) 前田,前掲書,p.143.
- 18) 同上書,p.143 - 144..
- 19) 同上書,p.54.
- 20) 日本と海外の装置メーカーとの商習慣の差ということで、特にニコンやキャノンなどの日本の装置メーカーの重荷ということでは、①ユーザーに対するカスタム仕様が装置メーカーの開発コスト負担を増大させている、②個別仕様対応のため、装置納入と装置検収に時間的ロスが生じる、③ α 機や β 機の装置メーカー負担、などが競争力を削ぐ要因となっている。総務部技術調査課「半導体露光技術に関する特許出願技術動向調査」（<http://ndl.go.jp/info:ndl/jp/pid/125/101>）より。なお、 α 機、 β 機とは、装置メーカーが開発途中でユーザーにテスト機として提供する装置を指す。
- 21) 前田,前掲書,p.55.
- 22) 立木博文・藤本隆宏・富田純一「アーキテクチャのダイナミズムと国際競争力の構築—半導体アーキテクチャ分析—」（東京大学ものづくり研究センター：MMRC DISCUSSION PAPER SERIES No.250）2009年,p.43。なお、同論文では、プロセス装置の大モジュール化が進み、プロセスインテグレーションが90年代に見られたことに関して、先端的な装置やプロセスは高価格であり投資力が必要となるが、台湾ファンドリーは、税制や国の支援などによりそうした高価なクラスターツールの導入に積極的であったことや先端的なツールの導入には、既存プロセス間のデザイン・ルールと互換性が重要であることなど、示唆に富む考察がみられる。同論文、pp.34-43を参照されたい。
- 23) 中馬宏之「『モジュール化設計思想』の役割 - 半導体露光装置産業と工作機械産業を事例として -」 青木昌彦・安藤晴彦編著『モジュール化—新しいアーキテクチャの本質—』東洋経済新報社,2006年 pp.211-243に追っている。
- 24) 加えて、同社の製品では、かなり前からユーザーがウエハー・ステージを勝手に引き出して戻しても、30分ほどで自動調整してもとの状態に戻せる機能が装置自体に備わっている。
- 25) 丹羽哲也「『すり合わせ型』と『組み合わせ型』ものづくりの共進化—半導体露光装置メーカー・ASMLの事例から—」 [http://www.jape.jp/home.nsf/Soukai9Files/\\$File/2005-2-4.pdf](http://www.jape.jp/home.nsf/Soukai9Files/$File/2005-2-4.pdf), pp.5-6.
- 26) 中馬「『モジュール化設計思想』の役割 - 半導体露光装置産業と工作機械産業を事例として -」（前掲論文）,p.223.

- 27) 丹羽,前掲論文,p.6.
- 28) なお、湯之上 隆「露光装置シェアトップの ASML その強さの源泉は速度と稼働率」『Electric Journal』2009年8月号,p.42では、ASLM社のステージを2つ持つ構造は、スループットを高める工夫であり、微細化ニーズに強く応えようとする日本の露光装置メーカーのアーキテクチャ戦略と対照的といえると特徴づけられている。
- 29) 丹羽,前掲論文,p.7.
- 30) 詳しくは、Carliss Y. Baldwin and Kim B. Clark(2000) DESIGN RULES, Vol. 1 : The Power of Modularity, The MIT Press (安藤晴彦訳 カーリス・Y・ボールドウィン+キム・B・クラーク『デザイン・ルール モジュール化パワー』東洋経済新報社,2004年を参照されたい。
- 31) なお、ASLM社のアウトソーシングなどの優位性について、中馬は「事後モジュラー性」と特徴づけている。アウトソーシングとコラボレーションが相互作用しあうプロセスで生まれる優位性があり、「事後モジュラー性」と呼んでいるように筆者には思われるが、事後モジュラー性という考え方は重要である。中馬宏行「日本のサイエンス型産業が直面する複雑性と組織限界：半導体露光装置産業の事例から」『一橋ビジネスレビュー』2004年,52巻3号,pp.64-85を参照されたい。
- 32) 中馬宏之「資本財産業における国際競争力要因としてのモジュール化：半導体露光装置 vs 工作機械産業」(一橋大学イノベーションセンター・ディスカッションペーパー (WP#01-09.) p.9. なお、半導体の市場特性ということでは、露光装置に技術的発展は、デバイスメーカーの要求を反映する。半導体市場がDRAMからロジックLSIやシステムLSI中心の時代を迎えるにつれ、装置開発に際しては多様化したデバイスメーカーの要求を各社のプロセス情報により深く立ち入った形での確かつ迅速に把握する必要性が増大している点を指摘している。
- 33) なお、中馬は、モジュラー性を高める要因として、4つにまとめている。詳しくは同上論文,p.14を参照されたい。
- 34) 青島矢一「日本の半導体産業の抱える問題と企業間協働の必要性」・・・・・・。p.20.
- 35) 立木博文「半導体産業における共同研究開発の歴史」(赤門マネジメント・レビュー)2005年,7巻,5号,pp.263-269が詳しい。Sematechに続いて、2002年にはニューヨーク州とISMTは、次世代微細加工技術研究のために、300mm半導体ウエハー対応のR&Dセンターをニューヨーク州立大学Albany校内のナノテクセンター内に建設することに同意し、共同研究コンソーシアムが活動を開始している。ニューヨーク州政府と参加企業が資金を提供するもので、参加企業にはどうコンソーシアムの中心的存在であるIBMをはじめ、東京エレクトロン、AMATなど参加している。技術的目標は、32nm以下の線幅の微細化技術を達成することにある。同論文,p.270-271.
- 36) 青島,前掲論文,pp.20-21.
- 37) 同上,p.21.
- 38) 古林高「半導体露光装置シェアの6割を獲得一躍進するASLM」『マイコミジャーナル』(<http://journal.mycom.co.jp/articles/2007/06/21/aslm/004.html>)より。
- 39) 中馬宏之「半導体産業における国際競争力低下要因を探るーネットワーク分析の視点からー」(一橋大学イノベーション研究センターIIR Working Paper WP#11-08),2011年,p.10.

- 40) 古林,前掲, <http://journal.mycom.co.jp/articles/2007/06/21/aslm/004.html>より。
- 41) 同上。
- 42) 中馬宏之「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」(前掲論文),pp.2-3を参照されたい。
- 43) 同上論文,p.8.
- 44) NEDO 研究評価委員会『次世代半導体材料・プロセス基盤』(MIRAI) プロジェクト) (中間評価報告書) 2007年,pp.1-61ならびにNEDO 次世代半導体材料・プロセス基盤 (MIRAI) プロジェクト実施方針、各年度版 (http://www.nedo.go.jp/activities/EF_00222.html) を参照している。