

# わが国半導体露光装置産業が直面する複雑性と組織限界

中馬宏之

## Increasing Complexity and Limits of Organization in the Microlithography Industry

Hiroyuki CHUMA

The paper tries to identify characteristics of the complexities and organizational limits that Japanese microlithography makers facing, to clarify the causes and effects of those characteristics and to show how they are related to the recent decline in global competitiveness in these industries. The paper introduces the new concept of “interim modularity” to explain how ASML (vis-à-vis Nikon or Canon) tries to cope effectively with the drastically increasing complexity of such a technology. The concept of interim modularity is defined as the communication benefits induced by the modular architecture during trial-and-error development processes, no matter how incomplete such architecture may be. The paper emphasizes that extremely complex tools like microlithography require “interim modularity” to effectively orchestrate the dispersion of specialized knowledge and know-how over a wide range of professionals inside and outside of corporations and that interim modularity is more effectively pursued by ASML than by Nikon or Canon.

**Key words:** microlithography, complexity, modular architecture, interim modularity, communication benefits

本論では、わが国サイエンス型産業の複雑性に対する対処状況を、同産業の典型である（光）半導体露光装置産業の事例を通して検討する。この産業においては、90年代半ばに至るまで、ニコン・キヤノンが圧倒的な強さを誇っていた。ところが、90年代半ば以降、オランダのASMLが急速に台頭し、現状では、3社間での熾烈なレッドヒートが繰り広げられている。本論の目的は、このような逆転現象をもたらしつつある要因とはどのようなものであるのか、それらの要因はどのような背景のもとで登場してきたのか、そのような要因や背景は、半導体露光装置産業を超えてどれほどの一般性をもつのか、どのような対処策が望まれているのか、といった視点からの分析を試みる。

90年代後半以降、半導体露光装置産業に転機をもたらす大きな技術上の流れ（超解像技術：resolution enhancement technology）が押し寄せてきている。このRETは、フォトマスク（集積回路原画）パターンに照射される光線

の振幅・位相・方向・極性などを微妙に制御し、光の波長の半分以下の寸法をも扱うことを可能にしている<sup>\*1</sup>。ところが、このRETは、他方で、これまでとは比較にならないほどの新たな試練を露光装置メーカーに与えはじめている。その主因は、フォトマスクからウェハーへの転写忠実度を確保することが格段に難しくなったという点である。そのため、半導体露光装置メーカーにとって、半導体デバイス・装置・材料・検査・自動設計ソフトメーカーと緊密に協力し、これらの会社が有する異種要素技術を自社保有技術と広範囲かつ深く融合させる必要性を倍加させた。しかも、90年代以降における製品ライフサイクルの急激な短期間化に伴い、この種の融合を即興演奏的に行う必要性が増大した。ASMLの台頭は、まさに、上記のような“技術変化の潮目”にあたっている。

ASMLは、社内でシステム設計だけを行い、他の研究開発（R&D）機能は、一心同体であるツァイスやフィリップ

一橋大学イノベーション研究センター（〒186-8603 国立市中 2-1） E-mail: chuma@iir.hit-u.ac.jp

\*1 Schellenberg<sup>1)</sup>は、これらの方法について、RETの歴史的発展プロセスを含めて簡潔に説明している。

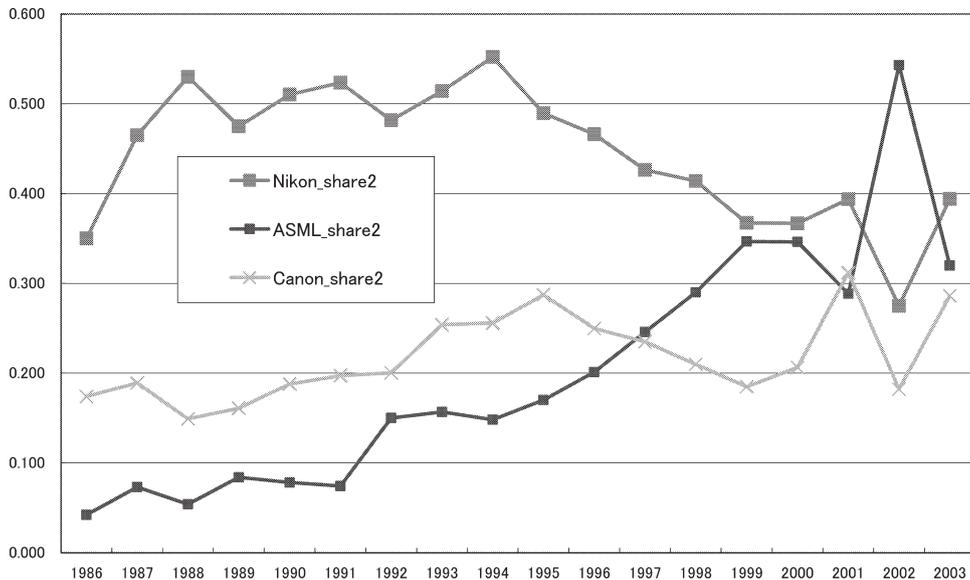


図1 半導体露光装置世界シェアの推移。各社のアニュアルレポートや各種の公開資料によって筆者作成。

ス、IMEC\*2などに全面的に依存している。そのため、一見ただけでは、なぜニコン・キヤノンを凌駕するほどの研究・開発力を有するに至ったかを理解することはなかなか難しい。ところが、より詳細に検討すると、ニコン・キヤノンとのさまざまな違いが明らかになる。大きな違いのひとつが、IMECに示される世界有数の半導体デバイス・装置・材料・検査メーカーが、一同に会して英知を結集する“出会いの場”を享受している点にあることが判明してくる。2つ目の大きな相違点は、ニコンやキヤノンに比べ、装置構造の一目瞭然性を、モジュラー設計思想に基づき相当程度に高めている点である。

露光装置自体は、きわめてインテグラルかつクロズドなものである。つまり、設計上の全体性能が、設計上の事前切り分けによる基幹ユニットごとの性能保証だけでは到底達成できない。実際、露光装置は、数か月にわたる各種データ取りとそれらの検討によって、各基幹ユニットが許容する精度限界を相当に超えた精度を保證する形で完成されていく。そのため、基幹部品間のインターフェースは固有のものとならざるを得ない。つまり、藤本<sup>2)</sup>流に言えば、露光装置とは、“究極の擦り合わせ型”製品である。この点は、ASML製露光装置も例外ではない。ところが、ASMLは、この究極の擦り合わせ型である露光装置を開発・量産していくプロセスで、本論が“interim modularity”とよぶ、「不完全なモジュラー設計思想が事後的にもたらす一目瞭然化便益」を企業内外で徹底して追求するための巧妙

な仕組みを導入しているのである。

## 1. 露光装置産業における盛衰

わが国ではじめてのステッパーは、ニコンによって1980年に商用化された。当時のステッパー世界市場は、1978年に世界で最初にステッパーを商用化したGCA（アメリカ）がシェアの90%を占めていた。ところが、ニコンは、早くも1983年には国内市場でシェア第1位に躍り出て、1990年までに破竹の勢いで世界一の座を獲得するに至った。また、ステッパー登場前のアライナーでは世界の覇者であったキヤノンも、持ち前のすぐれた光学技術と精密機械技術を生かして1983年にステッパー市場に参入した。そして、その後の1995年くらいに至るまで、ニコンとキヤノンが半導体露光装置世界シェアの70~75%を占める時代が続いていた。

ところが、90年代にわが国半導体産業が国際競争力を失っていくのと期を同じくして、図1に示されるように、半導体露光装置市場において劇的な変化が訪れた。ASML（オランダ）の大躍進である。事実、ASMLのシェア（出荷台数ベース）は、1990年には10%にも満たず、1994年に市場から撤退することになる日立製作所を下回っていた。ところが、1992年には14%のシェアを確保、その後2000年の35%前後に至るまで一貫して上昇し、2002年には50%を超えて世界一の半導体露光装置メーカーとなった。2000年以降は、3社間でのデッドヒートが繰り返されている。

\*2 IMECは、ベルギー・ブリュッセル近郊のルーベン市にあるヨーロッパ（あるいは世界）最強といわれる半導体プロセス技術に関する研究組織である。ベルギーのルーベンカソリック大学から1983年にスピノフしてきた。

表1 ArF スキャナー量産出荷時期比較：ニコン，キヤノン，ASML.

発売年	メーカー	装置型式	NA	解像度 (μm)	ウェハーサイズ (mm)	スループット (枚/時)
1998	ASML	PAS5500/900	0.60	0.150	φ 200	40 (参考)
1999	ASML	PAS5500/950	0.63	0.130	φ 200	60 (参考)
1999	キヤノン	FPA-5000AS1	0.60	0.130	φ 300	
2001	ニコン	NSR-S305B	0.68	0.110	φ 300	78
2001	キヤノン	FPA-5000AS2	0.70	0.110	φ 300	88
2001	ASML	PAS5500/1100	0.75	0.100	φ 200	90 (参考)
2001	ASML	TWINSKAN AT: 1100B	0.75	0.100	φ 300	93
2002	キヤノン	FPA-5000AS3	0.75	0.100	φ 300	105
2002	ニコン	NSR-S306C	0.78	0.100	φ 300	85
2003	ASML	TWINSKAN AT: 1200B	0.85	0.080	φ 300	103
2003	キヤノン	FPA-6000AS4	0.85	0.080	φ 300	140
2003	ニコン	NSR-307E	0.85	0.080	φ 300	112
2004	ASML	PAS5500/1150C	0.75	0.090	φ 200	135 (参考)
2004	ASML	TWINSKAN XT: 1250B	0.85	0.065	φ 300	114
2004	ASML	TWINSKAN XT: 1400	0.93	0.065	φ 300	122
2004	ニコン	NSR-S308F	0.92	0.065	φ 300	140

ニコン，キヤノンの ASML に対する競争力弱体化傾向は，表 1 に示される最先端 ArF スキャナーの開発・量産化スピードによっても知ることができる。表中のデータは，各社のアニュアルレポートなどの公開情報から拾ったものである。この表によれば，解像度が  $0.1\mu\text{m}$  以下になったあたりから，ASML の開発・量産化スピードがニコンやキヤノンのスピードを上回りはじめている<sup>\*3</sup>。

## 2. ASML とはどのような会社か

ASML は，フィリップスからスピンアウトした人々によって 1984 年に設立された。事実，ASML 製露光装置は，1973 年にフィリップスが独自開発したステッパーを起源とする。ASML 設立時は，ASM インターナショナルとフィリップス・エレクトロニクスの共同出資の形態がとられていた。ただし，ASM インターナショナルは，恒常的に赤字状態であった ASML を抱えきれず本業への集中を決定，1988 年に保有 ASML 株式の 50% をフィリップスに，残りをオランダの銀行に譲渡するに至った。ASML は，その後も，1995 年までフィリップスの子会社（フィリップスが 60% 弱の株式保有）として存在し続けた。

そのような中，ASML は 1996 年にアムステルダム証券市場と NASDAQ に上場を果たす。上場の背景には，90 年代初頭から急速に台湾 TSMC を中心としたファンドリービジネスが拡大してきたことがある。さらに，上場前の 95 年に始まった米国投資会社 FMR との関係も，大きな役割

を果たしている。事実，95 年の米国 SEC 資料によれば，FMR が，発行済全一般株式の 13% 強を購入している。なお，株式公開時点でのフィリップスの ASML 株式保有比率は約 35% であったが，その後，1997 年約 27%，2000 年約 7% と急速に低下，2003 年末時点では 4% 弱に過ぎない。ただし，ASML における企業統治上の事実上の主導権は，依然としてフィリップスが握っている。

現経営陣に目を向けると，就任したばかりの新社長 (CEO) は，フランス・トムソンのテレビ部門の副社長経験者であり，インテルやデルでの役職経験もある。さらに，前社長もフィリップスのコンシューマー・エレクトロニクス部門と半導体部門で取締役歴任後に ASML 入りしている。ARM 執行役員，モトローラや GE での半導体エンジニア経験もある。また，ST マイクロエレクトロニクスの社外取締役を兼務している。前々社長も生粋のフィリップスマンであり，ASML での社長在任期間も，90 年から 99 年までの長期間にわたった。さらに，4 名の現副社長のうち 2 名がフィリップス・セミコンダクター (COO) と AMD 出身のエンジニア，1 名が ASML 生え抜きのシステム設計者，残りの 1 名がデトロイト・トーマツ出身の財務専門家である。社外取締役たちの経歴についても，表 2 のようになっている (米国 SEC 資料 (F-20) 参照)。この表からも，ASML とフィリップス，ツァイス，TNO の一心同体ぶりを確認できる。

<sup>\*3</sup>なお，ニコンは，2001 年に ASML がニコンの 6 つの基本特許を侵害しているとして日米の裁判所に訴えた。これらは，いずれも現在 ASML の最先端露光装置に多用されている技術である。この特許紛争は，2004 年 9 月に ASML ならびにツァイスが総額で 1 億 4700 万ドルのライセンス料を払う形で和解が成立した。この事例は，現状におけるニコンの要素技術の優位性を示したのものとして興味深い。ただし，ASML ならびに ASML 連合 (ASML・ツァイス・フィリップス) の US 特許取得は，90 年代後半以降に特に最先端分野でかなり活性化してきている。

表2 ASMLの現社外取締役のプロフィール。

地位	就任年次	前職歴	兼 職
社外取締役・会長	1995	フィリップス副社長, フィリップス・コンシューマー・エレクトロニクス部門 CEO	他社・社外取締役
社外取締役	1997	TNO・CEO	同上
社外取締役	1996	カールツァイス会長・CEO	マックスプランク研究所理事, 他社社外取締役
社外取締役	2001	IBM エレクトロニクス会長・CEO, SVGL 執行役員	
社外取締役	1998	Akzo Nobel 副社長 (ファイナンスの専門家)	他社・社外取締役ならびに会長
社外取締役	2002	Unilever 社執行役員・税務部長 (法務・税務の専門)	

TNO: オランダの有名な大民間応用科学研究所, ただし実態は国立総合研究機関に近い。SVGL: シリコンバレー・リソグラフィ・グループ (米国最大の半導体露光装置会社) で2002年にASMLが買収。

### 3. 急増する露光プロセスの複雑性と組織限界

#### 3.1 露光プロセスの複雑性と“Ex ante modularity”

超解像技術 (RET) は, 90 年代半ばサブミクロンレベルの微細化要求が強まるにつれて, 世界を代表する半導体デバイスメーカーの量産現場で次々に導入されはじめた。この RET 導入は, 露光装置に新たな進化の道筋を開いた。ところが, 他方, 露光装置メーカーに, これまでとは比較にならないほどの新たな試練をも与えはじめた。というのは, RET を使用することにより, 設計上のマスクパターンから実際に製造されたマスクパターン, 製造されたマスクパターンからウェハー上のパターンへの転写忠実度を確保することが格段に難しくなったためである<sup>3)</sup>。加えて, 転写忠実度を確保できない根本原因を, 露光装置メーカーだけではなかなか究明できなくなってきた。そして, このような時期に, ASML が大躍進を遂げはじめたのである。

少なからざる人々は, 上記のような ASML の急速な躍進ぶりが, ASML 製露光装置にビルトインされている Baldwin and Clark 流<sup>4)</sup> のモジュラー設計思想の便益に帰着すると主張する。たしかに, ASML の公開資料によれば, ASML の総組工場では 10% 未満の付加価値しか生み出されていない。さらに, ASML 製露光装置の場合, ニコン・キャノンの装置と異なり, a) メンテナンスのためにステージをユーザーが簡単に引き出せる, b) メンテナンス後に自動キャリブレーション機能が働いてメンテナンス前の状況に復帰してくれる, c) 投影レンズの交換・アップグレードさえもデバイスメーカー工場内で可能である, 等々と高度にモジュラー化している。ただし, これらの事実だけから, ただちに上記の主張が真とはいえない。

製品設計上のモジュラー設計思想 (アーキテクチャー) を導入するとは, 設計上の明確な事前の切り分けによって, 製品の設計上の全体性能が各基幹ユニットの性能保証によって自動的に保証されるような状況が実現することを意味する。そして, このようなモジュラー設計思想を付与できれば, a) 対処可能な複雑性の範囲の拡大, b) 同時並

行開発・生産・アウトソーシングによる対処可能なビジネス・リスクの範囲の拡大, c) 同時並行開発・生産による各種リードタイムの短縮, といったさまざまな便益を享受できる。ただし, 上記の便益を享受するためには, モジュラー設計思想が, “製品の設計上の全体性能が各基幹ユニットの性能保証によって自動的に保証される” という意味で “完全” である必要がある。“完全” であれば, 各基幹部品をつなぐインターフェースの公開=オープン化が可能となるためである。本論では, このような意味でのモジュラー設計思想がもたらす便益を, “ex ante modularity” とよぶこととする。ところが, 半導体露光装置のように極限性能を求められる製品の場合, このような “ex ante modularity” を付与することはきわめて難しい。露光装置全体では, 各基幹ユニットが許容する精度限界を超えた精度が求められるためである。

さらに, そもそも ASML とツァイス, フィリップスとは, 排他的な契約で緊密に結びついている。そして, この事実と表 3 に示されているようなアウトソーシング状況を勘案する限り, ニコン・キャノンに比べ, ASML が上記 BC 流の b) や c) の便益を効果的に享受しているとは, とてもいえない。それでは, ASML 製露光装置を特徴づけるすぐれたモジュラー設計思想は, 90 年代後半における同社の躍進にあまり貢献していないのであろうか。

#### 3.2 “Ex ante modularity” vs. “Interim modularity”

複雑な現象に直面しても, 錯綜する要因間にある種の基本構図を見いだせれば, たとえ漠としたものであっても, 暗中模索状況から抜け出す手がかりを得られる。さらに, そのような基本構図が抽象度別にトレザブルな形で一目瞭然化されていればいるほど, より大勢の人々に同じ視角から本質が見えはじめるため, より多くの人々の知恵の結集を可能とする。その種の基本構図が, 効果的なコミュニケーションツールを提供してくれるからである。

上記の意味での基本構図とは, まさにモジュール構造であり, その背後に見いだされたロジックは, モジュラー設

表3 ASMLにおけるアウトソーシング状況.

基幹ユニット名	ASML	ニコン	キヤノン
投影レンズ系			
開発・設計	ツァイス	自社	自社
ガラス製造	ツァイスグループ (ヘラウス, ショット), コーニング, 信越石英, オハラ	ほぼ自社, 一部オハラなど	キヤノングループ (オプトロン, オハラ)
レンズ研磨・測定	ASML・Optics (旧米国 Tinsley), コーニング・Tropel	自社 (栃木ニコン)	自社
レンズ総組立	ツァイス	自社	自社
照明系			
ステージ	ツァイス (中心), ラムダフィジックス	自社	自社
開発・設計	フィリップス	自社	自社
総組立	フィリップスグループ	自社 (含む仙台ニコン)	自社
光源			
水銀ランプ (i 線)	ウシオ電機中心	ウシオ電機中心	ウシオ電機中心
DUV	サイマー (中心), ラムダフィジックス	サイマー (中心), ギガフォトン	サイマー (中心), ギガフォトン
ボディー (開発・製造)	フィリップスおよびフィリップスグループ?	自社および自社グループ	自社および自社グループ
アラインメント系			
開発・設計	ツァイス, フィリップス (一部アジレント)	自社	自社
製造 (干渉計, パーミラー等)	(アジレント, Zygo などの) 外部, ツァイス	(Zygo 等の) 外部	(Zygo 等の) 外部
ソフトウェア			
システム設計	自社	自社	自社
OS	他社	他社	他社
ユニット制御	他社	他社	他社
ツールソフト	自社 & 他社 (含むツァイス, フィリップス)?	自社	自社

計思想そのものである。このようなモジュラー設計思想は、たとえ不完全なものであっても、複雑性が錯綜していればいるほど、一目瞭然化の便益をより多くもたらしうる。本論では、そのような不完全なモジュラー設計思想が量産化に至るまでの試行錯誤プロセスでもたらす一目瞭然化便益を、“interim modularity” とよぶこととする。“interim modularity” に対して、前述の BC 流の “ex ante modularity” とは、「“完全” なモジュラー設計思想によってもたらされる数々の便益」であった。そのため、“ex ante modularity” は、IBM・PC に代表される熟したテクノロジーには容易に適用可能である。ところが、半導体露光装置のような未知かつ高度な複雑性をはらむテクノロジーでは、そもそも“完全なモジュラー設計思想” など望むべくもない。ところが、そのような複雑な装置にこそ、より広範囲に人々の知恵を結集するためのコミュニケーションツールが必要とされる。

### 3.3 藤本アーキテクチャー論と “Interim modularity”

藤本は、設計思想を、モジュラー設計思想 vs. インテグラル設計思想、オープン設計思想 vs. クローズド設計思想という形で分類する。ここでのモジュラー設計思想とは、前項の BC 流のものであり、インテグラル設計思想とは、製

品の設計上の全体性能が各基幹ユニットの性能保証によって自動的に保証されないため、事後的な擦り合わせを前提とするものである。他方、オープン設計思想とは、基幹部品間のインターフェースを産業全体で標準化するものであり、クローズド設計思想とは、その種のインターフェースが一企業内で閉じているものである。藤本は、このような定義を与えた後、わが国はインテグラルかつクローズドな設計思想を体化した製品に比較優位をもつ一方、モジュラーでオープンな設計思想を体化した製品では比較劣位をもつと主張する。藤本流の表現を借用すれば、「日本企業は擦り合わせ上手、米国企業は組み合わせ上手」となる。

ところが、藤本の定義に従えば、半導体露光装置は究極の擦り合わせ製品にもかかわらず、わが国の精密機械メーカーを代表するニコン・キヤノンが苦戦している。なぜだろうか。その理由のひとつは、藤本<sup>2)</sup> が、完成品に具体化された設計思想の役割と、それが試行錯誤を繰り返して完成されるまでのプロセスに具体化された設計思想の役割を十分に峻別していないことにあると考えられる。事実、露光装置は、完成品でみるときわめてクローズドかつインテグラルな製品である。ところが、それが完成されるまでのプロセスでみると、クローズドなインターフェースでは、企

業間のみならず企業内の英知を結集するスピードを上げられない。スピードを上げるためには、不完全ながらも一目瞭然化=オープン化を明確に意識したモジュラー設計思想が不可欠となる。しかも、モジュラー設計思想がもたらすコミュニケーション便益を高くすることができればできるほど、モジュール間に発生しているクリティカルな非線形要因をより容易に多くの人々が認知可能となるので、完成品に具現されるより精緻な設計思想により迅速に到着できる。

#### 4. ASMLの競争力を支える“Interim modularity”

##### 4.1 共同研究開発の方法 (1)

ASMLとニコン・キヤノンとの特に顕著な違いのひとつは、ASMLとIMECとの長期にわたる親密な関連である。事実、ASML露光装置の $\beta$ 機は、第1世代KrF機(89年)、第2世代KrF機(95年)、第1世代ArF機(99年)、第1世代液浸ArF機(05年)と、いずれもIMECに導入されてきている。さらに、ASMLとIMEC間での人的交流も頻繁に行われている。加えて、90年代後半、IMECとASML連合体を構成するフィリップスとの間には戦略的R&D排他契約が結ばれ、以前フィリップス中央研究所にいた100名以上の研究者がIMEC内で研究開発にいそんでいる。

IMEC内では、デバイス・装置・材料メーカーが参加するIIAP(IMEC Industrial Affiliation Program)とよばれるさまざまな共同プロジェクトが走っている。そのようなプロジェクトで重要な役割を果たしているのがASMLの $\beta$ 機である。その様子を“193 nm Optical Lithography”プロジェクト(1999年開始)でみてみると、同プロジェクトには、IMEC(1名)、露光装置メーカー:ASML(7名)、レジストメーカー(5社・17名)、レジスト塗布・現像装置メーカー(1社・1名)、デバイスメーカー(5社・13名)、フォトマスク検査・調整・ソリューション提供メーカー(1社・2名)の参加を確認できる。デバイスメーカーには、インテル、インフィニオン、マイクロン、TIといった世界の名だたるメーカーが参加している。同じことは、装置・材料メーカーについてもいえる。

前述のように、RETの本格的な導入により、各種デバイス・装置・材料・検査メーカーとの緊密なコラボレーションなしには、露光装置の迅速な開発が相当に難しくなっ

きた。ASMLは、そのようなコラボレーションの機会を、IMECのIIAPで実に効果的に得ている\*4。いいかえれば、IMECという場を通して、“interim modularity”をかなり効果的に享受しているのである。

他方、ニコン・キヤノンは、世界有数のデバイス・装置・材料メーカーが一同に会するIMEC流の“出会いの場”を有していない。たしかに、ニコンやキヤノンが、特定のデバイスメーカーや関連装置メーカーと戦略的提携を行うケースはまれではない。ただし、それらは、IMECの提供する広範囲な出会いの場と比較すると、かなり限定的なものである。また、わが国には、ASET(超先端技術開発機構)やSELETE(半導体テクノロジー)、ASPLAといったIMEC類似のR&Dコンソーシアムも存在する。ただし、周知のように、未だIMECのようなレベルでの便益を生み出せる状況にはない。

##### 4.2 共同研究開発の方法 (2)

ASMLが、ニコン・キヤノンに比較して、“interim modularity”をより明確に認知している様子は、SPIE(国際光工学会)コンファレンスにおける論文発表形態においても観察可能である。SPIEコンファレンスでは、露光装置関連のメーカーのみならず、世界有数のデバイスメーカーから数多くの露光プロセス・エンジニアたちが発表する。むしろ、発表論文数は、デバイスメーカーからのものが多い。加えて、材料メーカー、EDAソフトメーカー、大学の露光関連研究者などによる発表も少なくない。また、SPIEコンファレンスでは、一流のサイエンティストやエンジニアの非常にレベルの高いアイデアに触れられるし、貴重なコメントを得ることができる。

ASMLに比べ、ニコン・キヤノンは、世界の英知が結集する場であるSPIEコンファレンスを、より有効に活用しているとはいいがたい。この点は、やや間接的ながら、図2に示されている。この図は、ASML連合(ASML、フィリップス、ツァイス)が、1977~2004年までに開催されたSPIEコンファレンスでの報告論文数・発表形態を追ったものである。したがって、ASMLの論文発表数とは、フィリップスやツァイスとの合計である。また、その際、連合内での共同論文は、スタンド・アローン(一社単独)型の論文とみなしている。さらに、図の縦軸は論文数を、横軸は会社名と論文発表形態を示している\*5。

本論では、スタンド・アローンの論文発表が多いほど、

\*4 デバイス・装置・材料メーカーにとっても、 $\beta$ 機段階の露光装置に割安な費用でアクセスができることはきわめて魅力的である。例えば、レジストメーカーの場合、開発中の特定レジストを最新の $\beta$ 機で試せる。しかも、そのような実験結果の微妙な部分は、自社内のみにとどめておける。さらに、同業他社が実施した実験結果がある程度までIIAP内で公表されるため、ベンチマーク比較も可能となる。さらに、特定デバイスメーカーからのフィードバック情報をも獲得できる。場合によっては、特定のレジストメーカーのレジストがIMEC推奨レジストとして選出され、より大きな市場開拓すら可能となる。以上は、筆者聞き取りによる。

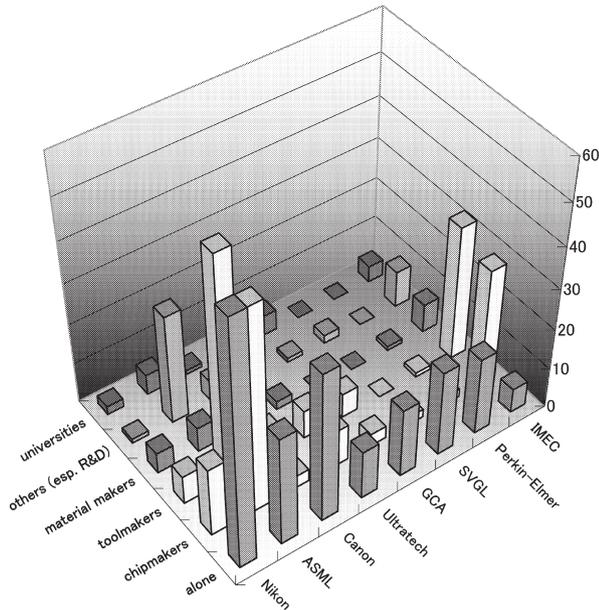


図2 SPIEにおけるASML, ニコン, キヤノンの論文発表形態 (1977~2004)。

“interim modularity” への認知度が低いとみなしている。その理由は、超解像技術 (RET) について述べたように、90年代後半以降、露光装置メーカーは、デバイス・装置・材料メーカーなどとのコラボレーションなしには、イノベーション速度を高めることが難しくなっているためである。自らの装置がより高度のモジュラー構造をしていれば、社外の研究・開発者にとってもよりわかりやすくなるので、即興演奏的なコラボレーションがより活発化するはずである。

図2によれば、ASMLは、ニコンやキヤノンに比べて、デバイスメーカーや外部研究機関との共同論文の数が格段に多い。また、図には明示されていないが、時系列的にみると、90年代以降共同論文の数が増えており、その傾向は、98年以降にさらに加速してきている\*6。他方、ニコンやキヤノンでは、スタンド・アローンの論文が圧倒的に多い。ただし、両社ともに、2000年を過ぎると共同論文数の上昇傾向を示しはじめている\*7。

#### 4.3 制御ソフトウェアの開発方法

制御ソフトウェア構造が複雑性のある閾値を超えた場

合、“interim modularity” が際立ってくる。この点に関して、ASMLとオランダ内の各種大学やベンチャー企業との結びつきは特筆に値する。ASMLは、フィリップス城下町Eindhoven市にある工科大学TU/e (Technische Universiteit Eindhoven) を中心とした諸大学と、長期間にわたって緊密な関係にある。その様子は、TU/e工学部院生によるASML関連の修士・博士論文数の多さからも類推可能である。また、同大学工学部の年報によると、優秀な院生に対しては、毎年ASML賞が贈られる仕組みになっている。さらに、TU/eは、ソフトウェア工学では、ヨーロッパでトップといわれた時期もあるという。

さらなる驚きは、ASMLが、同大学との密接な協力のもと、増大する露光装置用制御ソフトウェアの複雑性に対処するため、300 mm対応で2つのウェハー・ステージをもつきわめて斬新な露光装置“Twinscan”導入に際し、UML (unified modeling language) に基づく新しいソフトウェア・アーキテクチャーをかなり早い時期に導入していたという点である\*8。UMLを使えば、筆者にさえもわかるほどのかなり高い抽象度で、開発すべき露光装置のシステム要素を抽出し、それらの相互依存性を明確にできる。そして、UMLを導入することの最も大きな便益は、かなり高い抽象度ですぐれた一目瞭然化が可能となることである。ASMLがTU/eの協力で拡張したUMLは、このような一目瞭然化便益に加えて、TU/e開発の高度なシミュレーター (χモデル) との自動接続が図られているため、より下位の抽象度レベルで各種並行動作や継起的動作の最適制御性を確認することができるという\*8。

このようなUMLによるTwinscan用制御ソフトウェアの開発は、同装置の商用化が2000年末から開始されているので、少なくとも、その2, 3年前にはすでに始まっていたはずである。つまり、少なくとも97, 98年には、すでに一目瞭然化の便益が制御ソフトウェアの開発で享受されはじめたと考えられる。ニコンやキヤノンでは、未だ、現在商用化されている機種でUML+シミュレーターが使われている様子はない。

\*5 奥から Stand-Alone, with Chipmakers, with Tool Makers, with Material Makers, with Others (esp. R&D Inst.), with Universities である。なお、ASMLだけに限定しても、結果は変わらない。

\*6 詳しくは、Chuma<sup>9)</sup>を参照。

\*7 なお、このようなニコン・キヤノンの傾向を、両社の責めだけに帰すことはできない。というのは、両社の得意先の多くを占める日本のデバイスメーカーは、ごく最近に至るまで、自社内で開発した独自プロセス技術を、ほとんどニコン・キヤノンにオープンにしていなかったという事情があるためである。その意味では、“interim modularity” の認知の不十分さは、わが国デバイスメーカーにおいてより顕著だといえるかもしれない。

\*8 Albu, Tim F., “AML—A visual programming language for ASM Lithography,” Aug. 22, 2003 (www.ooti.win.tue.nl/projects/2002/results/Albu.20030822.pdf)

## 5. むすびに代えて

科学・技術的な革新の波は、急速なスピードで各所に容赦なく押し寄せている。このような傾向は、サイエンス型産業において特に顕著である。この種の産業では、テクノロジーおよびマーケットの急速な複雑性の高まりとともに、関連する専門人材を広範囲に駆使する総動員型の組織経営が不可欠となっている。そのために、刻々と変化していく組織内外の状況、ならびにそれらに直面している人々の知識・ノウハウが高度に一目瞭然化・共有化された組織を不可避とする。ところが、わが国サイエンス型産業においては、上記の流れに即応できずに従来型の組織限界が露呈し、局所的な最適化行動が全体最適につながらないという意味での連繋の失敗が頻発している企業が少なくない。筆者には、その大きな原因として、“interim modularity”への認知不足が影響しているように思えてならない。

本論では、前述のように、“interim modularity”を「不完全なモジュラー設計思想が事後的にもたらす一目瞭然化便益」と定義した。サイエンス型産業が直面する高度な複雑性は、この種の一目瞭然化便益、その便益に基づいて企業内外にわたる広範囲な英知の結集を効果的に行う仕組みなしには効果的に対処できない。

従来、わが国製造業の強さの源泉として、関連する部署にまたがる統合的な知識を有した統合型人材の豊富さが強調されてきた。たしかに、現在でもそのような人材は比較的豊富だと思われる。ところが、サイエンス型産業のもたらす複雑性は、そのような統合型人材の保有する知識・ノウハウをスタンド・アローンで使用しては到底対処で

きないレベルに達している。つまり、既存の統合的知識・ノウハウの抽象度を、ワンランク上げたレベルで共有化・ネットワーク化し、新たな統合的な知識を生み出すことを要請している。ところが、わが国の多くの企業においては、これよりワンランク下のレベルでの統合的知識・ノウハウが豊富なだけに、この種の新たな統合的な知識を効果的に生み出すための仕組みづくりに遅れがみられる。そのような遅れが競争力等により深刻な影響をもたらすはじめているのが、本論の取り上げた露光装置産業のようなサイエンス型産業なのではなかろうか。もしそうだとしたら、サイエンス型産業のみならず、他産業においても早急な対応が望まれる。

## 文 献

- 1) F. M. Schellenberg: “Resolution enhancement technology: The past, the present, and extensions for the future,” Proc. SPIE, **5377** (2004) 1-20.
- 2) 藤本隆宏：“アーキテクチャの産業論”，ビジネス・アーキテクチャー製品・組織・プロセスの戦略的設計，藤本隆宏，青島矢一，武石彰編（有斐閣，2001）pp. 3-26.
- 3) 森 一朗，東木達彦：“先端リソグラフィ技術の課題と革新”，東芝レビュー，**59**，No. 8 (2004) 8-12.
- 4) C. Y. Baldwin and K. B. Clark: *The Design Rules: The Power of Modularity*, Vol. 1 (MIT Press, Cambridge, 2000).
- 5) H. Chuma: “Increasing complexity and limits of organization in the microlithography industry: Implications for Japanese science-based industries,” 経済産業研究所 (RIETI) Discussion Paper (2004) 05-E-007.
- 6) J. J. A. Gevers: *Design Verification of the Twinscan Control Software*, Eindhoven (Technische Universiteit Eindhoven, 2000).

(2005年4月5日受理)