

# 資本財産業におけるモジュール化：半導体露光装置 v s 工作機械産業<sup>1</sup>

中馬宏之（一橋大学イノベーション研究センター）

## 1. はじめに

本論の目的は、資本財産業における国際競争力の規定要因としてのモジュラー設計思想<sup>2</sup>の役割について、半導体露光装置産業と工作機械産業の事例を通して検討することである。敢えてこれらの二つの産業を取り上げるのは、主に以下の4つの類型化された事実が存在することによる。つまり、(1)半導体露光装置は、従来わが国企業が得意としてきた「摺合せ」(インテグラル)型製品<sup>3</sup>の究極に位置しているが、モジュラー構造を“売り”にしているオランダ・ASMLの製品に90年代後半にシェアを奪われつつある、(2)わが国工作機械産業は1981年以来2000年に至るまで19年間世界の王座に君臨しているが、その中核製品であるCNC複合旋盤やマシニングセンターの“売り”の一つが高度なモジュラー性にあるとされている、(3)ニコン・キャノンに代表されるわが国半導体露光装置メーカーは典型的な垂直統合型企業であるが、上記オランダ・ASML自体はアウトソーシングとR&Dコラボレーションに依存した量産特化型の企業である、(4)わが国を代表する工作機械メーカーの多くが、オランダ・ASMLと類似のアウトソーシングとR&Dコラボレーションに依存した量産特化型の企業である、の4つである。

これらの類型化された事実を文字通りに捉えると、上記2産業において、モジュラー設計思想が国際競争力の規定要因となっている可能性をうかがわせる。加えて、半導体露光装置産業と工作機械産業のいずれにおいても、装置・機械の複雑化・高度化、露光・加工精度の急速な向上が著しい。さらに、これらの装置・機械を駆使して生産される多くの製品のライフサイクルが急速に短期化しているため、いずれの産業においても“Time to Market”が重要な経営戦略上の課題となっている。したがって、このような状況は、Baldwin and Clark (2000)の言う“モジュラー化の威力”(Power of Modularity)が効果的に発揮される可能性を高めている。というのは、装置・機械を最適なモジュラー・デザインに対応した構造にすれば、当該装置・機械を構成する基幹ユニット間のインターフェースのオープン化戦略によって、(一群の企業と市場からなる)新しいモジュラークラスターを生み出すことができ、その結果、経済的な成功を目指す革新的な活動としてのイノベーション・スピードが加速され、同時により迅速な“Time to Market”への対応が可能となると考えられるからである。

上記のBaldwin and Clark流のロジックは、かなり説得的であるし、極めてもっともらしい。しかしながら、このロジックにおいては、そもそも設計思想自体が、様々な制約条件の下で内生的に生み出されるものである可能性が十分には考慮されていない。実際、設計思想は、競争力を一方的に規定する外生変数ではなく、製品のテクノロジー特性やマーケット特性、社内外でのリソースの利用可能性等から内生的に生み出されてくる可能性

<sup>1</sup> 本論は、中馬・青島(2001)と中馬(2001)を簡潔にまとめた形になっている。

<sup>2</sup> モジュラー設計思想とは、製品全体を、構造的・機能的観点からできるだけ複数の独立したユニット(モジュール)に分離して製造できるようにする設計思想のことである。そして、そのような設計思想のもとで製造された機械装置は、モジュラー構造をもっていると表現される。

<sup>3</sup> 藤本(2001)参照。

もある。したがって、本論の目的である国際競争力の規定要因としてのモジュラー設計思想の役割を的確に論じるためには、諸制約の中でのこの種の同時決定の様相を個別の産業事例に則して詳細に検討する必要性が存在するのである。<sup>4</sup>

## 2. 聞き取り調査の対象と方法

### 2.1 半導体露光装置産業

調査対象とした企業は、世界の半導体露光装置産業を代表するニコン、キヤノン、ASMLの3社、ASMLの日本での販売会社（代理店）である日製産業である。具体的には、ニコン・キヤノンに対しては、各社において製造部門で総合組立・調整確認を担当する現場の課長・組長クラス、製品技術部門の課長・係長クラス、開発設計部門のシステム設計を担当する部長・課長クラス、人事・総務課長・係長クラスに対して聞き取りを行った。

ASMLに関しては、同じく2回の調査を行った。1回目は、ベルギー・アントワープ市で行われたIMEC主催のIFST<sup>5</sup>2001のプログラムの一つとしてのASML工場見学の一員として参加する形で行われた。ASML側からの説明や工場見学、昼食会を含めて3時間30分ほどが費やされた。2回目は、同社の技術担当重役に2時間聞き取り調査を行った。日製産業に関しては、ASML担当部署の部長2名に各々2時間ずつ聞き取りを行った。なお、調査自体は、プレ調査を含めると2000年5月下旬～2001年3月中旬の期間に実施された。

### 2.2 工作機械産業

#### A. 聞き取り調査

調査対象とした企業は、日本の工作機械業界を代表する工作機械メーカー12社、関連精密部品及びCNC装置メーカー各1社である。さらに、ドイツ工作メーカー3社に対しても、現地調査を行った。聞き取り調査に際しては、上記の会社の組立・機械加工職場、そしてこれらの職場と直接的に相互交流のある開発設計の職場を対象とした。より具体的には、日本の工作メーカーの場合、従業員1000名を超える大手メーカー6社と中規模メーカー6社が調査対象とした。なお、大手メーカー選択に際しては、海外に生産拠点を設けるなど積極的な海外戦略を展開しているメーカーと、そのようなことに対してより慎重なメーカーに分かれている。また、中規模メーカーに関しては、技術力に関して特に定評のあるメーカーを選択した。その結果、最終的には、上記12社が、アメリカやヨーロッパ向けの輸出比率の高いメーカー、東南アジア向けに輸出比率の高いメーカー、国内同業者にマザーマシン級の高精度マシンを供給しているメーカーという形に分かれた。なお、

<sup>4</sup> Baldwin and Clark (2000) 14章では、この種のモジュラー設計思想の内生性について、モジュラー・クラスターの定義を拡張する形で論じられている。より具体的には、当初、「モジュラークラスター：特定のモジュラーデザインに対応して出てきた一群の企業と市場（＝財市場・労働市場・資本市場）」と定義されているが、同章の後段では、この定義中にある“市場”の中にモジュラーデザインそのものが決定される市場自体も含まれると再定義してある。しかしながら、この“モジュラーデザインそのものが決定される市場”そのものがどのようなメカニズムで機能するかについては、残念ながら十分には論じられていない。

<sup>5</sup> International Forum on Semiconductor Technology。

聞き取り調査は、1996年9月に開始され、2000年の3月中旬まで行なわれた。

## B. アンケート調査

アンケート調査については、日本メーカーの場合、1997年度の工業統計表上の金属工作機械製造業、金属加工機械製造業、部分品・付属品製造業ならびに機械工具製造業に相当する全事業所を母集団とした。アメリカメーカーの場合、工作機械及び関連メーカーの団体であるアメリカ工作機械工業会・全会員企業366社ならびに NTMA<sup>6</sup>の工作機械及び関連メーカー517社の合計883社を母集団とした。ドイツの場合、ドイツ工作機械工業界並びにドイツ工業界の協賛で毎年刊行している1997年のCD-ROM版 Rotebush (= Red Book) 上にある "Machine Tools and Manufacturing Systems from Germany" 掲載の会社273社を母集団とした。アンケート自体は、2000年の2月～4月にかけて実施された。回収率は、日・米・独で、各々30%・22%・12%であった。

## 3. 半導体露光装置・工作機械産業における競争状況

### 3.1 半導体露光装置産業

日本製半導体露光装置<sup>7</sup>、中でもステッパーと呼ばれる縮小投影型露光装置が、1976年に開始された官民共同プロジェクトである超LSI技術研究組合の研究成果として生まれたことは、良く知られている。より具体的には、このような研究成果が、ニコン製ステッパーとして1980年にはじめて国産化された。なお、当時のステッパー世界市場は、シェアの90%がGCA（アメリカ）によって占められていた。このニコン製ステッパーは、富士通・東芝・日立・NECをはじめとしたわが国半導体デバイスメーカーが256K DRAM市場において市場の90%超を握るといふ80年代初頭の強力な追い風を背景に、急速に世界市場を制覇していった。

実際、ニコンは、1983年には、早くも上記GCAを抜いて国内シェア第一位に躍りだした。そして、1984年における同社初の対米輸出後、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、同時期、ステッパーでは後発であったキヤノンも、優れた光学技術と精密機械技術で、たちまちGCAを凌駕するに至った。そして、その後の1995年位に至るまで、ニコンとキヤノンで半導体露光装置シェアの70～75%を占める時代が続いた。

しかしながら、90年代におけるわが国半導体産業が世界市場における競争力を失うに伴い、当面安泰と思われていた半導体露光装置市場においても、劇的な変化が現れた。ASML（オランダ）の大躍進である。実際、同社のシェア（出荷台数ベース）は、1990年には10%にも満たなかったが、1995年には14%まで上昇、その後、1996年16%、97年20%、98年23%、99年29%、2000年30%と増加の一途を辿っている。これに対して、ニコン・キヤノン両社のシェアは、表1に見られるように、90年代後半になって急速な低下を示す。特にニコンの減少傾向が著しい。さらに、

<sup>6</sup> National Tooling and Machining Association.

<sup>7</sup> 半導体露光装置とは、半導体集積回路（IC）の原板（レチクル）に光をあてることによってシリコンウェハ（円形のシリコンの薄い板）上に塗布・成膜された光感光剤（フォトレジスト）に同原板の回路パターンを露光・転写する装置である。

最近、ASMLによるSVGL（アメリカ）の合併が正式に決まった。その結果、両社合わせると2000年時点で37%、1999年でも36%のシェアに達しており、ASMLが、文字通り世界一の半導体露光装置メーカーとなった。

表1：露光装置産業における世界シェア（出荷台数ベース）

	1995	1996	1997	1998	1999	2000
ニコン	45%	45%	43%	44%	36%	35%
キャノン	29%	27%	25%	23%	21%	23%
ASML	14%	16%	20%	23%	29%	30%

出典：各社アニュアルレポート等の数値より作成

### 3.2 工作機械産業

わが国工作機械メーカーは、70年代半ばまでは、ドイツやアメリカのメーカーの後塵を拝している状況であった。実際、1975年における世界の国別工作機械生産額を比較すると、第1位がアメリカ、第2位（旧）西ドイツ、第3位（旧）ソ連であり、わが国は第4位に過ぎなかった。ところが、その後NC（＝数値制御）工作機械の登場と共に、わが国工作機械産業が急速に発展し、80年に（旧）ソ連、81年に（旧）西ドイツ、82年にアメリカを抜いて世界一の生産額を誇るようになった。そして、表1に見られるように、近年ドイツの追い上げが著しいものの、2000年までの19年間世界一の座を保持している。

表2：工作機械産業における世界シェア（生産額ベース）<sup>8</sup>

	1995	1996	1997	1998	1999	2000
日本	24%	24%	26%	24%	22%	24%
ドイツ	20%	20%	18%	20%	22%	20%
アメリカ	12%	12%	13%	13%	10%	11%

出典：ドイツ工作機械工業会（VDW）

### 4. 競争力規定要因としてのモジュラー設計思想：半導体露光装置産業

ASML黎明期の開発設計者達(Bielow and Beek (1991)、van den Brink et.al. (1991))によると、90年代後半の大躍進を支えた同社の唱える“モジュラー型露光装置”は、深刻な半導体不況下で存亡の危機に立たされていた同社が、長期的にアップグレード可能なマシンを提供することによってデバイスメーカーの投資効率を飛躍的に高めること狙った起死回生のための戦略商品であった。このような狙いは、半導体露光装置自体が水銀ランプ光源からエキシマレーザー光源へとドラスチックに世代交代することが確実に予想される状況で、デバイスメーカーから一定の評価を獲得することになる。ただし、同社のその後の製品展開から判断すると、このモジュラー化構想は、最終的には長期的にアップグレード可能なマシンを提供することには繋がらず、むしろニコン・キャノンに比べた大幅な

<sup>8</sup> 1999年の日本・ドイツの値は、より正確には22.4%・21.5%である。

生産リードタイムの削減という形でのメリットを享受することになった。したがって、本節では、そもそも半導体露光装置のモジュラー性がどの程度のものであるかについて再確認することから検討してみよう。

#### 4.1. 半導体露光装置：「摺合わせ」型製品の典型

モジュラー設計思想とは、製品全体を、構造的・機能的観点からできるだけ複数の独立したユニット（モジュール）に分離して製造できるようにする設計思想のことである。そして、そのような設計思想のもとで製造された機械装置は、モジュラー構造をもっていると表現される。露光装置は、ウェハー・ステージ、レチクル・ステージ、照明系、投影レンズ系、アラインメント系<sup>9</sup>、搬送系、ボディなどの基幹ユニットに分解することができる。したがって、露光装置をモジュール構造にすると、これらの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。

たしかに、このような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、稀少な匠的摺合わせ技能の節約が可能となる。そして、最終製品の性能は、各基幹ユニット・レベルでの性能が所定のスペックを満たしていれば、ほぼ自動的に保証されることになる。また、このような状況が実現すれば、各基幹ユニットの開発・製造を、各種サプライヤーに全面的にアウトソースすることも可能となる。その結果、生産リードタイムや開発リードタイムの大幅な削減が達成される。

事実、基幹ユニット間の独立性の高さという点で、ASML 製露光装置のユニークさをうかがわせるいくつかの点がある。例えば、ASML 製マシンの場合、メンテナンスのためにウェハ・ステージをユーザーが簡単に引き出して洗浄できるようになっている。同じことが、照明系部分についても言える。露光装置の場合、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）がキチンと定まっていることが、露光精度を出す上で不可欠であると言われていたという。なお、ASML の露光装置では、ユーザーがステージを勝手に引き出して戻しても、30分ほどかけて自動的に調整・変更してもとの状態に戻せる機能（カリブレーション機能とよばれる）が装置自体に備わっているという。

さらに、90年代のASMLの製品群を追ってみると、(a)光源が変化してもできるだけ共通の基幹ユニットを長く使う、(b)新製品開発の際に、新しい機能の付加を最低限（せいぜい1つか2つ）に留める、といった工夫が顕著である。例えば、前者に関しては、PAS5500というボディは1991年に導入されたものであるが、2000年までは、光源がi線であるかDUV（deep ultra violet）かにかかわらず全て同一であった。<sup>10</sup> 後者の例としては、KrF光源のステッパーを発売するときには投影レンズの縮小倍率を4：1にし、KrFをスキャナー型<sup>11</sup>にしたときにはその比率が維持された。ニコン・キヤノンでは、このような縮小倍率の変更がステッパーからスキャナーに移行するときに同時に

<sup>9</sup> アラインメントとは、レチクル（回路基板）・投影レンズを通過してきた光の束がウェハース・ステージ上に最適な像を結ぶように、主にレーザー光線を使って関連基幹ユニットの位置関係を調整・補正すること。

<sup>10</sup> カタログを見る限り、同じような戦略がキヤノンによっても採られている。

<sup>11</sup> 収差の少ないレンズの中心部分だけを使用して、レチクル上の回路を少しずつスリット（＝光が通るすき間）を通してウェハー上に露光・転写していく方式の縮小投影型露光装置。ステッパーの場合、同じ縮小投影型であるが、レチクル上の回路がウェハー上に一括露光・転写される。

行われたために、ステージと投影レンズとを同時に変更することになった。

しかしながら、露光装置のように極限性能を求められる製品の場合、上記の意味での完全なモジュール構造にすることは極めて難しい。実際、ニコン・キヤノン双方での聞き取りによれば、最新鋭のスキャン型露光装置では、配線・配管の方法やウェーハ搬送口ボットの停止位置のわずかな違い、投影レンズへのわずかな衝撃等々によっても露光精度に狂いを生じさせる。また、そもそも、ユニット単体で所定の精度が出ていても、それらを単純に組み合わせるだけでは最終精度が出ない構造になっている。というのは、露光装置では、ユニットを製造する際に適用される加工・組立精度の限界を超えた最終動作性能を求められているからである。

事実、人の手によって加工・組立される基幹ユニットの加工・組立誤差は、匠的な技能者が担当したとしても、せいぜいサブミクロン（すなわち100nm～999nm）にしか留められない。そのため、露光装置の最終動作性能は、まず1～5nmの分解能を持つアライメントスコープ（＝顕微鏡）でこれらの基幹ユニット間の位置情報を自動的に取得し、各種センサー類から得られたフィードバック情報を参照しつつ、所定精度の露光ができるようにソフトウェア的に最適制御される形で発揮される。

ところが、このような最適制御が安定的に行えるようにするためには、基幹ユニット各々が持つ個体差や、それらが組み合わさったことによって生ずるマシン全体のハードウェアとしての静的及び動的な機体差に応じて、相応しい各種の初期パラメータ値を設定してやらなければならない。そして、そもそもどのような規則性にしがってこれらの各種パラメータ値を各露光装置に設定すれば良いかが、あまりに高精度なために、理論的にはキチッと確立されていない。そのため、露光装置全体あるいはそれらを構成する基幹ユニットの癖を的確に捉えるようなデータ取りをし、そのようなデータから統計的にある種の規則性を見出す形で初期パラメータの設定をより容易にする努力が繰り返される。つまり、発見した機体の癖を、ソフト的に吸収・補正する。

この点に関し、キヤノンの製品技術係長（ウェーハ&レチクルステージ担当）によれば、問題解決に秀でた製品技術者に必要なスキル自体は、90%ほどがこのようなデータ分析から得られる漠とした経験則であり、理論的にキチッと出せる部分は10%ほどしかないということであった。もちろん、新製品でも以前の製品との連続性が高ければ、この90%の部分も次第に理論化されていき、次回の設計図面に反映されていく。言い換えれば、製品技術が確立されていく。しかしながら、ステッパーからスキャナーへといった不連続的な製品転換が起こると、ステッパーで得られた経験則の多くが、そのままではスキャナーに適用できないということが起こる。実際、装置自体の複雑化・急速な微細化の進展のため、これまで経験したことのなかった領域の現象に晒されることが多くなり、そのため、むしろ以前にもまして経験則的な部分に頼らざるを得ない部分が増えてきているという。

上記の点は、モジュラー構造を持つと言われるASML製露光装置についても例外ではない。例えば、聞き取りに際して回答者に機種を特定してもらっていないのでかなり不正確ではあるが、標準的な機種の場合、(a)ツアイスやフィリップスから送られてくる基幹ユニットをASML工場内で単純に組み付けるのに4～10日（1交替制）かかり、(b)そうして組上がった後にデータ取りをしながら最適なパラメータ値を入れていくのに2

0～30日(同)(c)その後トラックや航空機で運べる大きさに分解された基幹ユニットを納入先であるデバイスメーカーの工場ですべて組み付けて調整しウェハーへの焼き付けが可能となるまでに20～30日(同)かかるということであった。さらに、(d)デバイスメーカーから正式発注があってから換算すると、サプライヤー基幹ユニット自体を製造する時間もかかるため、標準で9ヶ月程度かかるという。

同じことは、ニコン・キヤノンについても言える。ASML同様、両者共に機種の指定がないためASMLとの単純比較はできない。また、基幹ユニット段階でどの程度までの検査・調整が行われているかの違いによって、(a)～(c)の期間は相当に異なってくる。このような制約はあるものの、工場見学時の聞き取りによると、キヤノンの場合(a)が6～21日(2交替制)で(b)が28～29日(同)、ニコンの場合(a)が6～10日(1交替制)で(b)が40～60日(同)(c)が30～50日(同)かかるということであった。<sup>12</sup>

以上の事実は、露光装置の場合、ニコン・キヤノン製マシンのみならずASML製マシンについても、総組立・調整段階で1～3ヶ月をかけて相互干渉問題を解決していくことが不可避となっていることを示している。言い替えれば、最先端の半導体露光装置とは、「摺合わせ」(インテグラル)型製品の典型なのである。したがって、モジュラー性の度合いは、極めて低い。

#### 4.2. モジュラー性向上への取り組み：三社三様

半導体露光装置メーカーにとっては、正式発注から客先納入終了までの期間を短縮できるかどうか、自社製品の競争力を大いに左右することになる。しかも、このような傾向は、Trybula(2001)に明示されているように、DRAMのライフサイクルや(ペンティアムに見られるような)ロジックLSIのライフサイクルが急速に短期化してきていることにより、より先鋭化してきている。したがって、「摺合わせ」型製品の典型とも言える露光装置ではあるが、各社ともに、納期短縮のため、モジュラー性をより高めるために、事前に設計上や組立・調整プロセス上の工夫に大きな力を注ぐようになってきている。本節では、この点を確認しておこう。

まず、総組立(以下総組とよぶ)の全体の流れを掴むために、キヤノンの例を参照してみよう。同社では、総組工程が、総組1と総組2の二つのグループに分かれている。総組1は、ボディ、ステージ、照明系、投影系などの各ユニットの組み付けを担当している。総組の所に到着するユニットの数は20～25個あり、それぞれのユニットについては、個別に通電して特定のスペックを満たしているかどうかの確認(=ユニット性能保証)がなされている。ただし、少なくとも聞き取りによる限り、これらのユニット相互間の相互干渉具体に関する検査(=functionality test)が行われている様子はなかった。

総組工程では、まずボディを組み付け、次にステージを載せる。続いて、投影レンズを組み付け、アライメント系、照明系の組付けへと続く。ここまで来ると、露光装置の本体構造が見えてくる。次の総組2では、このようにして組み上がった本体を、最適な温度管理を可能とするチャンバー(四角形の覆い)で囲み、各ユニット間に配線・配管して

<sup>12</sup> なお、ニコン・キヤノンの場合、残念ながら(d)は聞き逃してしまった。

再度通電をする。通電後には、組付け間違いなどによるメカニカルな問題がいくつか出てくるので、それをまず解決する。そして、調整確認（調確とよぶ）工程に入る。この調確工程は、大きくは、投影レンズのオートフォーカス精度等の光学系に関する検査・調整と、ステージやアライメントを含む精密機械系に関する検査・調整に分かれている。そして、このような調整のほとんどが、ソフトウェア的な変更（＝“オフセットを入れる”という言い方をする）によって行われる。

上記の総組・調確工程の流れは、ASMLでも同じである。また、ASMLでも、キヤノンと同じく、投影レンズを含めたすべての基幹ユニットに通電した形での検査・調整が、サプライヤーサイド側で搬入前に行われている。ただし、搬入されてくる基幹ユニットの数が10～11個と、キヤノンに比べるとかなり大括りになっていた。この意味で、基幹ユニット単体での調確が、より前倒しされていると言える。加えて、各ユニット毎の特定項目については、ASMLへの搬入直前と直後とで同一の検査を行い、到着した基幹ユニットに直前・直後で狂いがないか否かが確認される。

さらに、そのような検査には、ユニット毎の検査に加え、いくつかのユニットを組み合わせた形の検査（functionality test）も行われる。後者の場合、あらかじめ検査用として用意されたテストモジュールと呼ばれる装置に当該ユニットをはめ込む形で行われる。テストモジュール自体は、剥き出しの露光装置とも呼べそうなかなり大がかりな装置になっており、特定の基幹ユニットと他の基幹ユニットとの相互干渉度を検査するためのデータ取りが行われている。投影レンズユニットを除くすべ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、パスしたもののだけが総組に送られる。加えて、この種のテストモジュールは、同じものがサプライヤーに置かれており、サプライヤーサイドでも同じテストが搬送直前に行われているとのことであった。なお、投影レンズは、総組終了後の調整段階で（実際に露光を行う形で）テストされる。

ニコンの総組工程も、基本的には上記のキヤノンのものと同じである。しかしながら、近年“ブロック生産”と呼ばれる方式に転換したという。“ブロック生産”方式とは、基幹ユニットをさらに大括りにした5～6個のブロックと呼ばれるモジュールを定義し、キヤノンという総組2で通電が開始される以前に、このブロックに通電して検査・調整する方式である。組織上も、これらのモジュール毎に設計・製品技術・製造がワンセット化されている。したがって、どちらかと言えば、検査・調整をできるだけ前倒しにしているASML方式に近いものである。ただし、ニコンでは、基幹ユニット搬入前後で上述のようなASML流のテストモジュールを使用して機能チェックは行われていない様子であった。

以上の点から判断すると、「摺合わせ」型製品の典型である半導体露光装置ではあるが、3社中では、ASMLが最もモジュール性を高める努力をしている。特に、特殊なテストモジュールを用いた基幹ユニット間の機能テストには、そのための高度な工夫が込められていると思われる。この点は、十分な比較が難しいとは言え、同社製品の生産リードタイム（先述）の相対的な短さにも反映されている。したがって、この点では、ASMLのモジュール化戦略が、同社の90年代後半における競争力を相対的に高めたと言える。ただし、上述のように、ニコン・キヤノンにおいても、生産リード短縮のために同じようなモジュール化戦略が導入されつつある。



#### 4.3. 内生変数としてのモジュラー設計思想

前節では、各社間で露光装置のモジュラー度を高める試みが、三社三様に行われていることを確認した。中でも、ASMLの試みがより徹底していることが指摘された。ただし、このような相違が存在するからといって、ASML的な方法が、競争力を高める上で最良であると直ちに断言できない。というのは、現場の技能者・製品技術者・開発設計者の各々が保有する未知・既知の問題発見・解決能力の高低、あるいは各社旧知の有力デバイスメーカーサイドの露光装置に対する嗜好の違いによって、製品特性、したがってそれを規定する設計思想そのものが影響される逆向きのインパクトが存在するからである。

実際、新製品開発プロセス時や量産時において、未知・既知の問題解決能力に秀でた現場の技能者や製品技術者が十分には得難い状況であれば、そのような能力に依存することをできるだけ少なくするために、モジュールやブロック毎の完結性をできるだけ高めるというASML流のモジュラー設計思想の方が望ましい。逆に言えば、現場の技能者や製品技術者の問題解決能力が秀でていれば、上述のニコン・キヤノン流の方法に依存する方が、高精度なマシンをより短い期間でより安価に製造できる可能性もある。

さらに、露光装置を設計上どの程度までモジュール化するかを規定する要因として、デバイスメーカーの嗜好という視点も考えられる。この点については、日製産業・技術部長による以下のような一連の説明は示唆的である。

「某社（おそらくニコン）の場合、スペーサーを入れたり、投影レンズ内のレンズをいくつか交換したりして、投影レンズユニット自体が調整可能なものとなっている。ところが、ツアイスの投影レンズの場合、自動調整機能は装備しているものの、ネジ留めが全部してあって、他では回せない形になっている。そのため、ユニットとしての独立性が高い。そして、運んでも動かしても（露光）特性がなかなか変わらないという強固な構造を持っている。某社製の投影レンズの場合、運んだりすると特性値がわずかに変化することが少なくない。それは、投影レンズにフレキシビリティがあることの裏返しの特徴である。また、ツアイス製の投影レンズは、個体差の分布が小さいとも特徴付けることができる。ただし、そのような特性は、ツアイス製のレンズの、メリットでありデメリットでもある。というのは、フレキシビリティがある投影レンズであれば、さらに精度を追い込んで性能を改善することができるが、ツアイスタイプの投影レンズの場合、事後的にはそのようなことができないようになっている。例えば、某社のマシンの場合、輪帯照明を多用するデバイスメーカー用であれば、そのメーカー用に投影レンズ性能をさらに追い込むといった調整ができる。」

「ASMLのマシンは、誰が立ち上げて同じ精度ができるという意味で、日本製マシンと設計が異なっている。日本製のマシンは、設計自体がもともと調整代（＝調整余地）を残すような形になっているから、（各基幹）ユニット誤差の集積の方向が悪くて所定の精度がでにくくなるということが起こる。（ASMLのマシンで）組立が早くできるは、このような違いがあるためである。」

実際、世界で最も高度なプロセス技術を持つと言われるインテルは、中核デバイスとしてのCPUに

関しては自社生産を徹底しているし、同社半導体製造プロセスの中核を担う半導体露光装置に関しても、自社の保有する高度なプロセス技術を反映させやすい日本製マシンのみを使っているという。<sup>13</sup>

基幹ユニット間の調整代をより多く残すことは、意図的に相互干渉問題の発生確率をより高めることを意味する。したがって、敢えてそのような設計にする際には、最終露光精度の追い込みを担当する熟達した製品技術者や技能者が豊富に利用可能なことが大前提なはずである。そうすると、デバイスメーカーの好みを反映した設計ができるかどうかは、現場の技能者・製品技術者・開発設計者の各々が保有する未知・既知の問題発見・解決能力の高低に大いに依存することになる。

しかしながら、現在、露光装置自体が物理・化学的な限界に近づきつつあることを反映し、装置自体が急速に高度化・複雑化かつ巨大化してきている。そのため、現場の技能者・製品技術者・開発設計者の平均的な意味での問題解決能力の低下が起きてきている。このことは、藤村(2000)の主張するように、上記のタイプの“調整代”を残すことのコストを大幅に高めつつある。さらに、先にも述べた DRAM やロジック LSI のライフサイクルの急速な短期化といった需要サイドの要因は、納期の早さの重要性を相当に高めている。このような状況下では、現場の技能者・製品技術者・開発設計者の問題解決能力に依存するニコン・キャノン型の設計思想よりも、露光装置自体の構造のより高度なモジュラー化を企図する A S M L 型の設計思想の方が、より相応しい可能性が出てくる。しかしながら、現在各社が凌ぎを削っている次世代の F 2 レーザーを用いた露光装置については、この種の類推が真であるとは必ずしも言い切れないようである。最後にこの点について触れておこう。

非常に興味深いことであるが、前述の総組・調確段階において、A S M L とキャノンは、投影レンズの調整を基本的には行わない方針を採っている。ところが、ニコンの場合、この種の投影レンズ調整を行うことを前提として投影レンズが設計・製造されている。また、実際にも技能者の五感に頼りながら投影レンズ自体を調整する作業が少なからず行われていた。しかも、このような傾向が、微細化の進展と共に強化される傾向にあった。

たしかに、総組・調確段階で投影レンズユニットに触って調整することは、光軸が変化することを意味する。そうすると、それはアラインメント系やステージ系に影響を与えるので、そちらの調整をも誘発してしまう。その結果、調確プロセスを非常に長期化させる危険性を孕んでいる。しかしながら、露光装置が物理・化学的な限界(特に光学的な限界)に近づくに連れて、投影レンズユニットを主な原因とする相互干渉問題がより深刻化してきていることも事実である。聞き取りによっても、深刻な問題解決を要する問題の多くが、投影レンズ自体ならびに投影レンズの個体差に起因するものであることが確認できた。

このような事情が背後にあるためであると思われるが、A S M L やキャノンでは、現在は総組・調確工程で投影レンズに触ることはしていないが、微妙な表現ながら、必要性は感じている様子であった。この点に関し、先の A S M L 技術担当重役ならびにキャノンの生産担当部長は、次のようなコメントをしている。

---

<sup>13</sup> Business Week, 2000年8月28日号

「(ASMLには)事実上、投影レンズを調整する能力はない。しかし、全く投影レンズ調整をしないわけではない。最低限のことはやる。・・・(一部省略)ただし、一般的な傾向としては、微細化への要求の高まりと共に、投影レンズを調整確認工程で調整する傾向は高まっている。というのは、公差要求がより厳しくなっているし、当該レンズが様々な状況に対応できる柔軟性をもつ必要性が高まっているからである。実際、248nm(KrF)が現在のメインテクノロジーであるが、157nm(F2)の時代になれば、焦点深度等が極端に制約されるので、上記の柔軟性への要求が高まることは目に見えている。より厳しい精度要求や操作要求に応える必要があるからだ。」(ASML)

「現在では、(投影)レンズを組み付けた後にそれ自体の精度を再度調整するといったことはしていない。某社では、そのようなことをある種の調整機構をつけてやり始めているとのことであるが、そのようなことは、長期的な視点から見ると、レンズ自体の精度を劣化させる要因を作ることになり、必ずしもプラス面ばかりではない。しかしながら、レンズを装着した後にレンズが悪いということが分かって、再度また分解して組立・調整するというのでは大変な時間がかかってしまう。その兼ね合いが難しい。」(キヤノン)

したがって、次世代のF2レーザー露光装置の場合、投影レンズに全く触らないという設計方針を貫いた場合、総組・調確部分のサイクルタイムがかなり増えてしまい、結果として納期がかなり伸びてしまうこともあり得る。このような意味では、調整代をできるだけ少なくしてしまうような戦略(=モジュラー性を意図的に高める戦略)が必ずしも最良とは限らないのである。言いかえれば、半導体露光装置が物理・化学的な限界に近づくに連れてより高度な「摺合わせ」型になっていく可能性があるため、モジュラー設計思想が、逆に放棄される可能性すら出てくるのである。

#### 4.4 モジュラー設計思想とアウトソーシング、R&Dコラボレーション

露光装置のモジュラー性が高まれば、当然のことながら基幹ユニットのアウトソーシングや基幹ユニット開発に際してのR&Dコラボレーションの便益も同時に増大する。したがって、本節では、このような経路を通じての国際競争力上昇が実際に発生しているかどうかを、中馬・青島(2001)の分析結果を紹介する形で確認しておきたい。

##### A. 基幹ユニットのアウトソーシング

ASMLは、露光装置を構成する各種基幹ユニットを広汎にアウトソーシングしていると言われている。しかしながら、個々のユニット毎の製造・調達状況を聞き取りしてみると、ニコン・キヤノンとの差は実質的にそれほどないことが判明する。事実、露光装置性能の根幹にかかわる基幹ユニットのインタフェースはいずれもクローズドになっており、取引先も排他的なケースがほとんどであった。この点は、ASML製の露光装置といえどもかなりの「摺合わせ」型製品になっているという先に指摘した事実と整合的である。したがって、ASML製露光装置のモジュラー性が高いという点が、Baldwin and Clark 的

な意味でのオープンなアウトソーシング戦略を可能にしているとはとても言えない。

ただし、ニコン・キヤノンとASMLとは、依然として以下の三つの点で異なっている。つまり、A) ASMLはツアイスならびにフィリップスから半導体露光装置の命とも言われる投影レンズならびにステージの供給を排他的な形で受けている、ニコン・キヤノンはいずれも自社で開発・製造している、B) ニコン・キヤノンは露光装置製造のコア技術である測定技術を自社保有しているが、ASMLではそれがツアイスとフィリップスに分有されている、C) ASMLは、ニコン・キヤノンに比べ、デバイスメーカーの保有するプロセス技術をより効果的に獲得できる状況にあるため、よりスループット(生産性)の高いソフトウェアを提供している、の三点である。

国際競争力の源泉という意味では、上記の3要因中のA)やB)は、ニコン・キヤノンの競争力にプラスのインパクトを与えている。<sup>14</sup> しかしながら、C)のソフトウェア要因は、ASMLに対して、このような効果をはるかに凌駕するほどのプラスの便益をもたらしていると思われる。その大きな理由の一つは、ニコン・キヤノンに比べ、ASMLが、デバイスメーカーのプロセス情報をより効果的にソフトウェア開発やそれらの改訂作業に反映させることができていることにある。この点に関し、キヤノンのR&Dエンジニア(部長クラス)は以下のように言明している。

「5年以上前はデバイスメーカーのクリーンルームで起きていることは、露光装置メーカー側はほとんど知ることができなかった。明らかに問題起こしているときはプロセス情報を開示してくれたが、それ以外はありえなかった。ところが、最近ようやくオープンにしようとする気運が高まってきた。そして、一部のデバイスメーカーには、オンラインで情報を吸い上げていいという所も出てきた。(デバイスメーカーがプロセス技術を)秘密にしていると、良いものできない。この点に関しては、欧米(デバイスメーカー)の方が早くオープンにしはじめた。そして、日本のデバイスメーカーの間でも、遅ればせながら(最近になってやっと)オープンにしようとする動きがでてきた。」

「デバイスメーカーがプロセス情報をオープンにしはじめた背景には、製造現場でのアローワンス(=自社による装置の改善余地)がなくなってきたことにより、自社のプロセスを最適化するために装置メーカーの助けが必要になってきたという事情がある。そういう手助けをするためのアプリケーションソフトを売る(KLA-Tencorのような)専門の会社も出てきている。そうすると、露光装置メーカーとしても、他の半導体装置メーカーと一緒に(トータル)プロセスの整合性(=最適性)を考えなければならなくなってくる。」

なお、上述の“アローワンス”がなくなってきた背景には、デバイスメーカーからの微細化要求速

<sup>14</sup> 従来の経済理論(例えば、Klein(1988))に従う限り、垂直統合型であるニコン・キヤノンの競争力を高める傾向がある。というのは、総合組立メーカーとサプライヤーとが独立な経済主体である場合、相互間の利益相反問題が深刻になるからである。ところが、Coase(2000)に象徴的に示されているように、この種の利益相反問題が、垂直的統合によってのみ解決されるのか否かに関しては、大きな疑問が残されている。実際、企業間の排他的な取引関係であっても、Segal and Whinston(2000)などに示されているように、総合組立メーカーやサプライヤーによってなされる企業特異的な開発投資が、第三者としての売り手あるいは買い手企業の競争力にどのような影響を与えるかによって、垂直統合的な関係よりもより効率的な場合すらあり得る。

度が急速に早まってきた事情が存在する。また、そのことは、同時に、露光装置自体の基本性能とフォトマスク材料やその製造方法、レジスト材料やウェハー上のレジスト膜厚などの諸要因との相互依存性を急速に高めている。トータルプロセスの最適性を露光装置メーカーとデバイスメーカーとが一緒になって追求する必要性が増しているのも、そのためである。

## B. R & D コラボレーション

露光装置のモジュラー性の向上は、Baldwin and Clark 流のロジックに従えば、必然的に要素技術開発に関する企業間コラボレーションの必要性・便益をも増大させる。このようなロジックは、ASML 型の R & D コラボレーション方式にも当てはまっているだろうか？

事実、ASML は、システム設計以外のすべての要素技術開発をツアイス・フィリップスなどの外部企業や IMEC<sup>15</sup> などの研究機関に排他的な形で頼っている。一方、ニコン・キヤノンは、それらのほぼ全てを自社内で行っている。この点は、通常の議論からすると、ASML の劣性を意味する。というのは、排他的な契約関係には常に利益相反問題が伴いがちではあるからである。ただし、前節でも触れたように、この種の利益相反問題は、垂直統合という形態を採らなくても、人事交流方法を含めた様々な方法によって克服される可能性が十分にある。したがって、このようなニコン・キヤノンと ASML との表面上の要素技術開発体制の相違がもたらす技術開発力へのインパクトは、相当に割り引いて考えるべきだと思われる。

加えて、ニコン・キヤノンの基幹要素技術に関する自前主義を前提とした開発体制のメリットは、光露光装置が物理・化学的な意味での限界（藤村（2000）の意味での“物理限界”）に近づくに連れ、各種企業や研究所との R & D コラボレーションを前提とする ASML 型の開発体制に必ずしも勝っているとは言えなくなっている。その大きな理由は、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のメーカー、あるいはレジスト塗布・現像装置メーカー、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中で作り込まれていく必要性が増しているためである。

さらに、半導体市場が DRAM 中心の時代からロジック LSI・システム LSI 中心の時代に移行しつつあることにより、半導体デバイスが急速に多様化してきている。そのため、露光装置メーカーにとっては、新製品開発に際し、そのような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的確かつ迅速に把握する必要性が倍加している。言い換えれば、露光装置メーカーとデバイスメーカーとの R & D コラボレーションの必要性が増大している。この点について、ASML は、a) IMEC という世界中のフォトマスク・レジスト・デバイスの各メーカーが効果的に知恵を出しあえる“出会いの場”を保有している、b) デバイスメーカーのエンジニアとして豊富な経験をもつ多くの人々が経営の中核にいる、c) R & D コラボレーションの相手であるフィリップス・ツアイス・IMEC との間で少なからざる人事交流を行なっている、等々という形

<sup>15</sup> ベルギーのルーベンカソリック大学（独立行政法人）からスピンアウトしてできた研究所で、半導体のプロセス技術に関してはヨーロッパで最も強力と言われている。ヨーロッパでは、“イーメック”と発音される。

で、ニコン・キャノンに比べ、デバイスメーカーの要求をよりの確かつ迅速に把握できる仕組みを作り上げている。そして、この点が、A S M Lの競争力を高めている可能性が大きい。<sup>16</sup>

ただし、このようなR & Dコラボレーションの必要性の増大は、露光装置のモジュラー性の高まりの結果としてではなく、装置自体のテクノロジー特性や半導体市場特性から派生していることに注意すべきである。

## 5 . 競争力規定要因としてのモジュラー設計思想：工作機械産業

わが国工作機械産業は、ドルショックや石油ショックによって1970年代半ばまで瀕死の状況にあった。小林・大高(1995)によれば、工作機械産業における常用従業者数は71年に5万人超であったが、78年には2万8千人にまで減少している。このような中で登場したモジュラー構造を特徴とする安価な日本製NC旋盤やマシニングセンター(Finegold 他(1994))は、起死回生のヒット商品となった。より具体的には、いわゆるジョブショップと言われる小規模企業に爆発的な人気を得、81年には(旧)西ドイツ、82年にはアメリカを抜いて世界の生産額を達成するに至るのである。このようなNC工作機械産業発展の背後には、a) CNCメーカーとのR & Dコラボレーション、b) ベ어링、ボールネジ、転がり案内装置などの精密部品メーカーへの広汎なアウトソーシングといった企業間関係が存在したわけであるが、逆に言えば、当時のアメリカやドイツのCNC部門までをも内製化することのできた強力な工作機械メーカーに立ち向かうには、この種の企業間関係に依拠した戦略以外は考えられなかったとも言える。

### 5 . 1 . CNC工作機械：モジュラー型製品の典型

Baldwin and Clark (2000)は、モジュラー化によって達成可能な以下の三つの点を指摘している。<sup>17</sup> つまり、(1)モジュール間の相互依存性をできるだけ少なくすることにより対処可能な複雑性の範囲が広がること、(2)最終製品を構成する個々のモジュールの開発設計・生産を同時に進めることができること、(3)モジュール間の独立性を最適に保てるようなインタフェースが設定されているために、直面する不確実性への適応がより留意になること、の3点である。

70年代後半から80年代にかけて登場した日本製CNC工作機械は、まさにこれらの3つの利点を徹底して享受する形で世界市場を席卷していった。より具体的には、工作機械本体のメカニズム部分とCNC部分のインタフェースが明確に区分され、特に新製品開発プロセスにおいて、前者のメカ設計を工作機械メーカーが、後者の制御設計をCNCメーカーが担当するという徹底した分業関係が当初から導入されていた。また、このような分業関係は、次節以降で詳しく説明されるように、プロジェクト方式で両者の知恵を出し合う緊密なR & Dコラボレーションという形態で実施されて来ている。したがって、工

<sup>16</sup> このことは、露光装置メーカーにとって、Christensen and Rosenbloom (1995)が指摘しているような"Value Network"(企業が競ってユーザーの問題解決を行う場)の変化を適切に捉えることの重要性が急速に高まっていることを意味する。そして、このような事情は、彼らの指摘するように、既存の有力デバイスメーカーにより深くコミットしてきた露光装置産業の覇者としてのニコン・キャノンよりも、この2社を追いかけてきたアタッカー(attackers)としてのA S M Lにより有利に働いた可能性が高い。

<sup>17</sup> pp.90-92。

作機械メーカーサイドから言えば、自ら対処可能なマシンの複雑性の範囲を、自社内で利用可能なリソースに制約されることなく拡大可能となっている。

さらに、Finegold その他(1994)や Boultinghouse(1994)に指摘されているように、ベースマシン間においても徹底した部品の共通化とアウトソーシング化を図り、さらに一つのベースマシンに付加的なオプション機能を付加するという形で多用なユーザーの要求に応えるような設計方式が導入された。もちろん、当初、このような設計方式で対処可能なマシンはジョブショップ向けの安価なものに限られていた。しかしながら、CNC制御能力が急速に向上するに連れて、対処可能なマシンの範囲が急速に拡大していった(Mazzoleni (1999))。加えて、基幹ユニットを世界有数の精密機械メーカーにアウトソースするという形態を通して、これらのメーカーにおける要素技術開発の成果を効果的に自社製マシンに反映させるという仕組みのメリットを享受してきた。

Finegold その他(1994)は、このような状況を評して、日本の工作機械メーカーは、工作機械のモジュラー化という手法を導入して、従来クラフト的であった工作機械産業を、コストと品質が重要な要素である量産型の産業にしたと言明している。

## 5.2.R&Dコラボレーション方式

上述のように、わが国工作機械産業の躍進は、CNC旋盤とマシニングセンターを原動力としてもたらされたと言っても過言ではない(小林・大高(1995))。これらのマシンに内蔵されるCNCやサーボモーターについては、ファナックを嚆矢とし、それに続く三菱電機(名古屋製作所)、安川電機などのメカトロニクス・メーカー(以下CNCメーカーと呼ぶ)による貢献がかなり大きい(Przybylinski (1994))。

そして、CNC工作機械の高度なモジュラー性は、CNCメーカーとのR&Dコラボレーションを可能とさせる大きな要因となっている。実際、工作機械製造にあたっては、CNCメーカーからCNC装置やサーボモーターなどをソフトウェア込みで一括購入し、工作機械メーカーは、それらを自社のマシンに装着するだけで事が足りるという形にはなっていない。というのは、工作機械のメカニカルな部分とCNC関連部分とが接するインターフェース部分において、両メーカーが知恵を出し合う必要のある問題が発生することが少なくないからである。また、工作機械メーカー自体が、自らのマシンの独自性を出すために、CNCメーカーが定めた標準機能に新たな付加的機能を(有償で)追加要求することも少なくない。このような傾向は、特に新製品開発時において顕著となる。さらに、工作機械出荷後にも、CNCメーカーからのアフターケアが必要である。そのため、工作機械メーカーとCNCメーカーとの関係は、かなり長期的かつ排他的であるケースが少なくない。

例えば、工作機械業界で1位と2位とを争っているヤマザキマザックと森精機の場合、三菱電機名古屋製作所内に各々独立した制御部門が確保されており、それぞれが排他的な契約関係のもとで独自仕様のCNC装置(含むソフトウェア)の提供を受けている。そして、両者の開発設計担当者と三菱電機の各制御部門の担当者は、日常的に相互に行き来している。そのため、三菱電機サイドでは、両部門での人事異動が遮断される形になっていた。さらに、高度な制御部門を抱えていることで業界から一目置かれているE社の場合、ファナックとの間で拡張性の高い特別仕様のE社インターフェースを設定し、両社のエンジ

ニア間での分業関係ができるだけ効率的に行われるような工夫がなされている。このようなことから分かるように、有力工作機械メーカーの場合、自社のマシンとCNCとのインタフェースがオープンではなく独自仕様のケースがほとんどである。

上記の点に関し、ユニークな多軸・多系統制御システムを特徴とする自動旋盤メーカーC社（従業員1000名をはるかに超える大会社）の開発責任者（現工機開発部長）による以下のコメントは極めて興味深い。

NCメーカーにとって、利益はNC装置などのハードウェアから出ているのではなく、むしろソフトウェアの（請負）開発から出ている。実際、ファナックにおいては、様々な工作機械メーカーと特別チームを組んで開発をするという形式が一般的である。その結果、ファナックなどのNCメーカーには、このような共同作業の中から様々な貴重なノウハウが蓄積されていく。このため、ファナックや三菱電機がガリバー的な市場シェアを保持している状況が、（業界のベストプラクティスを）制御面での力がより弱い工作機械メーカーにもより効率的に波及させる一因となっている。（1997年2月）

また、聞き取り調査によると、一部の例外を除き、電子・電気専攻の新大（院）卒社が工作機械メーカーにあまり行きたがらない傾向がある。その結果、工作機械メーカーのエンジニアには、大学（院）時代に機械工学を専攻した人々の数が圧倒的に多い。<sup>18</sup> そのため、一部を除くと、各メーカーともこれらの人材確保に必死である。例えば、制御に特に強いとされるE社の人事部長は、以下のように述べている。

理工系大卒新卒者として入ってくる技術系社員の専攻は、機械工学と電気・電子工学で8：2位である。工作機械産業は電気・電子専攻の学生に亜流と考えられてしまっているため、これらの学生があまり来てくれない。E社としては、どちらも重要なので、5：5の比率で採りたい。また、できることなら、3：7程度にしても良いくらいであるが、現状では不可能である。しかし、採用者のレベルを落とすわけにはいかないのので、現状の比率になっている。いずれにせよ、電気・電子の専攻者をもっと欲しい。そのため、これらの専攻の学生については、工作機械第一志望であれば採用する方針を採っている。

一方、ファナックや三菱電機などの超人気企業では、この種の制約がより少ない。したがって、両者間の戦略的企業連合が必要な理由としては、この種の労働市場要因も効いている可能性大である。

なお、アメリカ工作機械産業においては、70年代から80年代にかけて、工作機械とCNCメーカーとが上記のような緊密なR&Dコラボレーションを実行することができず、両者がかなり距離を置いた（arm's-length）関係に留まっていた。そして、そのことがアメリカ工作機械産業の国際競争力を弱化させる大きな要因の一つとなった。また、Cincinnati MiracronやKearney & Treckerといった多くの有力工作機械メーカーは、自社内に独自仕様のCNC部門を垂直統合し、主にユーザー特殊な高級機に特化していた。

<sup>19</sup> つまり、Baldwin and Clark 流の Power of Modularity が発揮しにくい市場に対峙し続

<sup>18</sup> また、給与の面で見ても、工作機械産業が電機産業や自動車産業に比べて優位に立っているとはとても言えない。

<sup>19</sup> 以上は、Mazzoleni（1999）及びFinegold他（1994）による。



け、結果として80年代や90年代にかけて急速に競争力を失っていった。<sup>20</sup> ただし、CNC工作機械のモジュラー化がこのようなR&Dコラボレーションの主要な誘因であると言うことはできない。むしろ、CNC（あるいはNC）という新しいテクノロジー特性が、両者のコラボレーションを不可避とさせたと考える方が自然である。

最後に、上記のようなCNCメーカーによる貢献度を反映し、聞き取りによれば、各社の工作機械原価に占めるCNC関連費用の比率は、30%～40%相当に達していた。その結果、工作機械メーカーサイドには、CNCメーカーに対する根強い（価格に対する）不満が鬱積している。したがって、ここ数年オープンCNC化の動きが活発化していることは、当然の成り行きだと言える。しかしながら、このような動きも、少なくともわが国においては、十分な高まりは見せていない。ファナックの市場シェアがあまりに大きいことが一因であると思われるが、工作機械のモジュラー性の高さからすれば、この種のオープン化の動きが近い将来に活発化するのには当然の成り行きだと考えられる。

### 5.3. 基幹ユニットのアウトソーシング方式

工作機械を構成する基幹部品としては、上記CNC装置やサーボモーターに加えて、イ) 主軸とそれを支える軸受け（ベアリング）や高速・高性能モーター、ロ) X-Y-Z軸上を直線上に動かすための案内装置やサーボモーターの回転運動を直線運動に変換するボールネジ（あるいは、直接直線運動を生み出すリニアモーター）、ハ) ベッド・コラム・サドルといった機械本体を構成する大型鋳物類、等々といったものを列挙できる。

わが国有力工作機械メーカーは、これらの基幹部品の多くを世界的な精密部品メーカーへのアウトソーシングに頼ることによって多大な便益を得てきている。<sup>21</sup> 例えば、わが国工作機械メーカーでは、上記（イ）で言及した主軸のほとんどが内製されている。しかしながら、主軸を支える軸受けは、日本精工（NSK）やNTNなどの世界有数の精密部品メーカーにアウトソースされている。その際、スペック自体は工作機械メーカーが提示するが、両者のインタフェースはキチンと切り分けられている。同じことは、モーターに関しても言える。

上記ロ)の案内装置には、面接触を基本とする滑り案内装置と点接触を基本とする転がり案内装置があるが、前者の場合、キサゲを使った高度かつ骨の折れる匠的技能を要する。しかしながら、THK製を嚆矢とする転がり案内装置を使うと、キサゲ作業がほとんど不要になると共に、それを適切に取り付けるだけでキサゲに勝るとも劣らないほどの精度を出すことが可能となる（Beates（1999））。そのため、一部のマザーマシンや重切削に秀でた高級機を除くと、最近の工作機械の場合、転がり案内装置が多用されている。そして、転がり案内装置市場には、NSKやINA（ドイツ）などが参入し、熾烈な競争が展開されている。

また、ボールネジも、各社の機械構造に対応した様々なものが必要となるが、工作機械メーカーがスペックを決め、NSKや椿・中島、黒田精工などの有力精密部品メーカー

<sup>20</sup> 同じことは、日本国内においても言える。事実、70年代後半以降、池貝に代表される老舗大メーカーが凋落し、ヤマザキマザックや森精機に代表されるNC標準機メーカーが業界の雄となっていくた。

<sup>21</sup> このような精密部品メーカーへの広汎なアウトソーシングの結果、聞き取りによれば、工作機械メーカーの精密部品メーカーへの支払い額は、各社とも原価の10～20%を占めるという

にアウトソースする形になっている。<sup>22</sup> さらに、最近では、送り速度や位置決め精度への要求がよりきつくなってきているため、ボールネジに代わってリニアモーターが使用されるケースも増えているが、それらのほとんどもアウトソーシングされている。

最後に上記ハ)の鋳物に関してであるが、20年以上も前には、有力な工作機械メーカーにはほぼ例外なく鋳物工場があり、さらに、出来上がった鋳物を長期間枯らす(=残留応力を空气中で自然に除去する)目的で至るところに鋳物が散在していたという。ところが、工作機械の精度を経年的に狂わず元凶としての鋳物内の残留応力を焼鈍炉の中で自動的に効率よく取り除く技術に代表される最適制御技術の発達・標準化によって、各メーカーから鋳物工場のみならず鋳物の枯らし作業が消えていった。その結果、現在、鋳物を工作機械メーカーが自社内で吹いているケースは極めて例外的である。

以上のように、工作機械の精度向上に不可欠な基幹ユニットは、CNC工作機械の高度なモジュラー性を反映し、ほとんどが外部の精密機械メーカーにアウトソースされている。そして、工作機械と当該基幹ユニットとのインタフェースは、明確に切り分けられている。そのため、CNCメーカーの場合と異なり、新製品開発プロセスにおいて、精密機械メーカーと工作機械メーカーとが互いに交流する形でコラボレーションが行われることはない。

#### 5.4. 自動車産業からの大規模な派生需要

前節までにおいては、主に供給サイドの要因に注目してきた。しかしながら、わが国工作機械産業の発展を論じる際には、国内自動車産業の発展と当産業の demanding and knowledgeable なユーザーの役割が重要である。事実、自動車産業の工作機械産業に与えるインパクトは極めて大きく、自動車産業だけからの派生需要でも30~40%程度(日本工作機械工業会調べ)であり、自動車産業から一般機械産業(例えば、その中の金型産業など)や電気機械産業への発注分を含めると、国内工作機械需要の約60%程度は自動車産業関連であると言われている。このことを部分的に反映していると思われるが、わが国自動車メーカーの生産台数が世界一(世界の生産台数の約30%)になったのは、わが国工作機械産業が世界一の生産額を達成した1年前の1981年である。このような意味で、70年代以降におけるわが国の自動車関連産業の急速な発展が、工作機械産業に与えたプラスのインパクトは相当なものであったと言える。<sup>23</sup>

#### 5.5. 国際競争力の源泉：見逃されているもう一つの要因

前節では、わが国工作機械産業の競争力が、CNCメーカーとのコラボレーションと精密機械メーカーへの広汎なアウトソーシングから生み出されていること、そして、そのことを可能にしているのがCNC工作機械の高度なモジュラー性であること、さらに、国内自動車産業の急速な発展が莫大な派生需要をもたらしたことが指摘された。しかしながら、これらの要因だけでは、わが国工作機械産業が現在に至るまで19年間世界のチャン

<sup>22</sup> 一部の有力メーカーはボールネジを内製している。ただし、聞き取りによると、精密機械メーカーの納期が間に合わない恐れがあるといった理由が少なくなかった。

<sup>23</sup> なお、最近では、自動車に比べてIT関連の精密機械や電気機械向けの受注が大幅に増加しつつある。

ピオンとして留まっているという事実を十分には説明できない。事実、わが国 CNC メーカーや精密部品メーカーは、特に 90 年代において、広汎なグローバル化を達成してきている。さらに、90 年代における工作機械需要の過半は海外に依存している。<sup>24</sup> 加えて、世界の有力工作機械メーカーの多くが、高度なモジュラー性を誇るようになってきている。したがって、このような状況で未だに日本メーカーの優位性が揺るがない理由を、日本製マシンの高度なモジュラー性とそれらに付随する上記の要因のみに起因することには無理がある。それでは、これらの要因に加えてどのような要因が貢献していると考えられるのであろうか？

高速・高精度な NC 複合旋盤やマシニングセンターの登場は、開発設計者だけでは、彼らがいかに卓越した才能の持ち主であろうとも、独立した形で機械の細部にまで配慮の行き届いた図面を完成することをほとんど不可能にした。そのため、この種の機械のイノベーションを効率的に実践していくためには、詳細な図面ができあがってからではなく、できあがっていくプロセスで生産職場の熟練組立工・機械工に体化した熟練技能やノウハウをできるだけデザインレビュー（設計審査）プロセスの初期段階で迅速に入れ込んで行けるシステムが不可欠となってきた。

事実、先の日米独の工作機械メーカーに対するアンケート調査によれば、開発設計者が新製品開発プロセスで生産部門の代表者と一同に会するフォーマルな場があるとしているのは、日米独で各々 49%・60%・73% となっている。そして、この制度が導入されたのが 1990 年以降であると回答しているのが日米独で各々 59%・64%・64% となっている。したがって、この種の部門間の情報共有を積極的にはかるための制度導入が、かなり 1990 年代の極めて新しい現象であることが分かる。実際、この時期は高速・高精度な複合 NC 旋盤や高度なマシニングセンターが一般化してきた時期に符合しており、そのことが、新製品開発の方法に大きなインパクトを与えたことが推し量られる。

以上の点は、上記のアンケート調査の統計的な分析からも確認できる。詳細は中馬(2001)に譲るが、そこでは、「過去 10 年に開発リードタイムが短縮されてきた程度」と「過去 10 年間に量産移行後 6 ヶ月以内のクレームが削減されてきた程度」<sup>25</sup>が、主にどのような要因 (= 説明変数) によって有意に影響されているかが分析されている。この説明変数は、大きく分ければ (a) 国の違いを示す変数 (基準は日本)、(b) 組立工あるいは機械工を統合的に育てているか否かを示す変数、(c) 新製品開発の“かなり初期の時点”(= 新製品の基本スペックが決められるような時点)で開発設計者と組立工・機械工の代表者とが一同に介して設計審査を行っているか否かを示す変数、(d) 新製品開発において開発設計者がより頻繁に話し合う部門 (複数回答) を示す変数、(e) 海外生産を行っているかどうかを示す変数、(f) 公的な教育訓練機関を利用して Off-JT を行っているか否

<sup>24</sup> より具体的には、1991 年における輸出比率は 30% であったが、当該比率は、内需の急速な落ち込みなどを反映し、1995 年には 68%、1999 年には 74% と急増している。

<sup>25</sup> これらの程度は、質問票上では、いずれも「1. 変化なし、2. 10~20% 程度、3. 30~40% 程度、4. 50% 以上」の選択肢から選んでもらうことになっている。したがって、計量分析においては、いずれの短縮・削減程度に関しても、「10% ないし 30% 以上と答えた工作機械メーカーを 1, その他のゼロ」とするダミー変数を被説明変数として用いることとした。より具体的には、これらのダミー変数の動きを説明するために、プロビット推定を行った。

かを示す変数、( g ) 企業規模、( h ) 製造している工作機械の種類（複数回答）である。

分析結果によれば、日本メーカーに関しては、上記( c )に示される情報共有のための設計審査制度を導入していることが、開発リードタイムの短縮ならびに量産移行後6ヶ月間におけるクレーム数の減少の双方に極めて有意かつプラスのインパクトを与えていることが確認された。また、組立工を育てる際に総組立と部品組立の双方を経験させていること、TQCが導入されていること、新製品開発プロセスで頻繁に討議をする部門が組立職場、機械加工職場、マーケティング職場であることの有意性が確認された。ところが、アメリカメーカーに関しては、開発リードタイム短縮に関して、組立工を総組立と部品組立の双方を経験するように育てているか否かやTQCを導入しているか否かの効果は全く有意ではなかった。さらに、量産開始後6ヶ月間のクレーム削減数についても、組立工を総組立と部品組立の双方を経験するように育てているか否かだけが有意であった。

このことから、高度にモジュール化されたCNC工作機械であっても、イノベーションを迅速に生み出していくためには、R&Dコラボレーションやアウトソーシングを通じた企業間関係のみならず、企業内におけるコンカレントに情報共有を行うための効果的な仕組みが不可欠であることが示唆される。

## 6. まとめとインプリケーション

本論では、資本財産業における国際競争力の規定要因としてのモジュラー設計思想の役割について、半導体露光装置産業と工作機械産業の事例を通して検討した。特に、これらの産業においてBaldwin and Clark(2000)の言う“モジュラー化の威力”(Power of Modularity)がどれほど効果的に発揮されているかに注目した。

結論から言えば、いずれの産業においても、モジュラー構造が国際競争力の源泉となる可能性が確認された。中でも、工作機械産業においては、その威力が相当なものであり、わが国工作機械メーカーがそのような威力を十二分に享受して発展してきたことが再確認された。アメリカ工作機械産業の衰退要因を包括的に検討しているFinegold その他(1994)は、このような状況を評して、日本の工作機械メーカーは、工作機械のモジュラー化という手法を導入して、従来クラフト的であった工作機械産業を、コストと品質が重要な要素である量産型の産業にしたと言明している。

なお、以上のモジュラー化の威力によって、70年代から80年代までのわが国工作機械産業の発展はかなり説明できるものの、90年代以降の発展を説明する要因としては不十分であることも指摘された。そして、高度にモジュール化されたCNC工作機械であっても、イノベーションを迅速に生み出していくためには、R&Dコラボレーションやアウトソーシングを通じた企業間関係のみならず、企業内におけるコンカレントに情報共有を行うための効果的な仕組みが不可欠であることが指摘された。

モジュラー性を高める試みが競争力を高める可能性が高いことは、「摺合わせ」型製品の究極に位置している半導体露光装置においても指摘された。そして、その背後要因として、( a )装置自体の急速に高度化・複雑化により、現場の技能者・製品技術者・開発設計者の平均的な意味での問題解決能力の低下が起きてきていること、( b )そのために、現場技能者や製品技術者の「摺合わせ」型の問題解決能力に頼る形でマシンの最終精度を達成することのコストを大幅に高まりつつあること、( c )半導体デバイスのライフサイクルの

急速な短期化によって、“Time to Market”の重要性が格段に増大しつつあること、などがクリティカルであることが指摘された。従来、「摺合わせ」型製品の領域においては、数多くのわが国製造業が卓越した競争力を発揮してきた。しかしながら、このような製品群においても、競争力の低下状況が見てとれることは、わが国製造業にとって大きな脅威だと思われる。

ただし、露光装置の競争力に関する上記の状況判断には、留保が必要なことも指摘された。というのは、設計思想そのものは、競争力を一方的に規定する外生変数ではなく、製品のテクノロジー特性やマーケット特性、社内外でのリソースの利用可能性等から内生的に生み出されてくる可能性が高いからである。特に、半導体露光装置が物理・化学的な限界に近づくに連れて、同製品がより高度な「摺合わせ」型になっていく可能性があり、場合によっては、逆に、モジュラー設計思想が放棄される可能性すら存在する。つまり、半導体露光装置に関するモジュラー化傾向は、観察されるほど単線的なものではなく、適用されるテクノロジーによっては、そのような傾向に逆行する流れが出現する可能性が示唆されるのである。

なお、このような反モジュラー化傾向が出現する可能性があるとしても、そのことがほとんどの要素技術開発を自前で行うニコン・キャノン流の垂直統合型企業の優越性を保証するわけではないことも指摘された。というのは、露光装置が上記の物理・化学的な限界に近づくに連れて、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のメーカー、あるいはレジスト塗布・現像装置メーカー、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中で作り込まれていく必要性が増しているためである。また、このような傾向は、半導体市場がDRAM中心の時代からロジックLSI・システムLSI中心の時代に移行しつつあることによりさらに加速している。この点に関し、公共的な“出会いの場”を企業間で効果的に形成する仕組みを持たないわが国企業のハンディキャップが増大しつつあることも確認された。

## 参考文献

Baldwin, C.T. and K. B. Clark (2000), *The Design Rules: The Power of Modularity* Vol. 1, MIT Press.

Bates, C. (1999), "Applications show the way," *American Machinist*, January, pp.50-56.

Bielow, M. G. and P. T.Beek (1991), "Manufacturing Lithography Value/Cost Analysis," ISMAA Conference Paper, San Francisco, CA. pp.1-8.

Chirstensen, C.M., and R.S. Rosenbloom (1995), "Explaining the attacker's advantage: technological paradigms, organizational dynamics, and the value network," *Research Policy*, vol.24, pp.233-257.

中馬宏之・青島矢一(2001)「アウトソーシングとコラボレーションの可能性：半導体露光装置メーカーの事例から」(旧)通商産業研究所『日本企業プロジェクト』報告書。

中馬宏之(2001)「日本のもの造り方式とイノベーションとの良循環とは? : 90年代における工作機械産業の発展事例をとおして」(旧)通商産業研究所『日本企業プロジェクト』報告書。

Coase, R. H.(2000), "The Acquisition of Fisher Body by General Motors," *Journal of Law and Economics*, vol. XLIII, April, pp. 15-31.

Finegold, D., K.W. Brendley, R. Lempert, D.Henry, P. Cannon, B. Boultinghouse, M. Nelson (1994a) *The Decline of the U.S. Machine-tool Industry and Prospects for Its Sustainable Recovery*, Vol.1, Rand, MR-479/1-OSTP.

Finegold, D. (1994b) (ed.) *The Decline of the U.S. Machine-tool Industry and Prospects for Its Sustainable Recovery*, Vol.2, Rand, MR-479/2-OSTP-V.2.

藤村修三(2000)『半導体立国ふたたび』(日刊工業新聞社)

藤本隆宏(2001)「アーキテクチャーの産業論」藤本隆宏・武石彰・青島矢一編(2001)『ビジネス・アーキテクチャー』第1章、3～26頁、有斐閣。

Klein, B. (1988), "Vertical Integration as Organized Ownership: The Fisher-Body-General Motors Relationship," *Journal of Law, Economics, and Organization*, vol.4, pp.199-213.

Roest, P. and P. Schuurmans (1997) "Strategic sourcing als basis voor innovatie: ASM lithography," *Nijenrode Management Review*, Vol.2, pp.14-23.

小林正人・大高義穂 (1995) 「工作機械産業」, pp.382-412、産業学界編『戦後日本産業史』に所収、東洋経済新報社。

Mazzoleni, R. (1999), "Learning and path-dependence in the diffusion of innovations: comparative evidence on numerically controlled machine tools," *Research Policy*, vol.26, pp.405-428.

Przybylinski, S., "Case Study: Computer Numerical Controllers," in Finegold, D. (1994b) (ed.) *The Decline of the U.S. Machine-tool Industry and Prospects for Its Sustainable Recovery*, Vol.2, Rand, MR-479/2-OSTP-V.2.

Segal, I. R. and M. D. Whinston (2000), "Exclusive Contrasts and Protection of Investments," *Rand Journal of Economics*, Vol.30, no.4, pp.603-33.

Trybula, W., (2001), "Technology Acceleration and the Economics of Lithography," in I F S T 2001 (International Forum on Semiconductor Technology) held in Antwerp, Belgium, March 7-8.

van den Brink, M., B. A. Katz, S. Wittekoek (1991), "New 0.54 Aperture i-line Wafer Stepper with Field by Field Leveling Combined with Global Alignment," SPIE Conference Paper, March 1991, San Jose, CA, USA.