

半導体露光装置ステッパーの開発，普及とその要因*

廣 田 義 人**

1. はじめに
2. アメリカでの半導体露光装置の発達過程
 - (1) ICの高集積化と露光装置の進化
 - (2) GCA社のステッパー開発
3. 日本での半導体露光装置の開発過程
 - (1) キヤノンの先駆的動き
 - (2) ニコンのステッパー開発
4. 日本製ステッパーの開発と普及の要因
 - (1) 要素技術の蓄積—精密機械技術
 - (2) 要素技術の蓄積—光学技術
 - (3) ステッパーの技術進歩とその性格
 - (4) 支援産業の発展
5. おわりに

1. はじめに

半導体露光装置は集積回路（IC）の素材であるシリコンウエハ上に極めて微細な回路を転写する装置であり，半導体製造において最も重要な工程を担っている。中でもステッパー（逐次移動式縮小投影露光装置）は，1977年に米GCA社（GCA Corp.）によって発表されて以来，20年以上にわたって進化を遂げながら，半導体生産ラインの中核に位置し続けている。

日本の半導体産業は戦後長らくアメリカでの開発と技術革新の後を追ってきたが，80年代後

* 2001年4月11日受理，半導体露光装置，光学技術，精密機械技術，漸進的技術進歩，特注と量産

** 大阪大学大学院経済学研究科

半から90年代初めにかけて生産額でアメリカを凌駕した。その後バブルの崩壊により景気が低迷する中で、日本の半導体産業はアメリカに再逆転されると共に、わが国が得意としてきたDRAM（記憶保持動作が必要な随時書き込み読み出しメモリー）分野でも中進国の半導体メーカーが急速な発展を遂げてきている。しかし日本はもちろん、アメリカ、更に韓国、台湾などの半導体産業が成長してきた背景には、日本製ステッパーの半導体生産ラインへの投入があったことは注目される。ステッパーの開発、生産ではGCA社が先行したが、すぐに日本の光学機械メーカーニコンがそれに追従して、急速に市場占有率を拡大した。98年現在、ニコンが世界市場の42%、やや出遅れたキヤノンも21%を占めているといわれ、日本はステッパーの分野で20年近く世界をリードしてきたと言って良い。

本稿ではこのように世界の半導体生産に大きく寄与してきた日本製ステッパーがどのようにして開発されたのか、その開発と普及を可能にした技術的要因は何であったのかを明らかにする。

2. アメリカでの半導体露光装置の発達過程

(1) ICの高集積化と露光装置の進化

ICの製造工程は表-1のようになっている。このうち露光装置はウエハプロセス工程中の露光工程で使用される。ウエハプロセス工程ではまずシリコンウエハ表面に酸化膜が形成された後、その上にフォトリソ（感光剤）が塗布される。露光工程では予め作成されたフォトマスクあるいはレチクルと呼ばれる回路の原板をウエハに重ねて、上から光を照射して原板の回路図をウエハ上に転写する。その後現像されて非感光部のレジストが除去され、露出した酸化膜を次にエッチングして除きシリコン表面を露出させる。この露出したシリコン部分に硼素や燐などの不純物をイオン注入などの方法によって拡散させる。ウエハ表面を絶縁膜で被覆した後、レジスト塗布工程に戻る。このような一連のウエハプロセスを20回前後繰り返して、ウエハ上に回路が形成されていく。

表-1 ICの製造工程

ウエハ製造工程	シリコン単結晶成長→ウエハ切断→ウエハ研磨
ウエハプロセス工程	ウエハ洗浄→酸化膜形成→フォトリソ塗布→露光→現像→エッチング→不純物拡散→薄膜形成→ウエハ検査
組立工程	ダイシング→ボンディング→封止→仕上→マーキング
検査工程	製品検査→信頼性試験

1950年代にアメリカで開発されたICは70年代以降高集積化の歩みを早め、それと共に露光工程で転写されねばならない回路はますます微細になってきている。この回路の微細度を表わす尺度は設計ルールと呼ばれ、回路の最小線幅で表現される。70年代初頭の1KDRAMの設

(1) 第2位は近年台頭してきたオランダASML社で29%を占める（データクエスト社調べ）。

計ルールは $10\mu\text{m}$ であつが、現在の256MDRAMでは $0.25\mu\text{m}$ である。このような回路の微細化の過程で露光装置もそれに応じたものが開発され、半導体産業に供給されてきた。半導体露光装置をまず開発したのはICの開発、実用化で先行したアメリカであつた。ICの揺籃期には半導体メーカーが自ら露光装置を製造していたが⁽²⁾、60年代には半導体製造装置メーカーがコンタクトアライナーという初期の露光装置を生産した⁽³⁾。コンタクトアライナーは原寸大の回路が多数描かれたフォトマスクをウエハ上に載せて、ウエハ全面を一括露光する密着露光方式を採用している。これらアメリカ製露光装置は、以後60年代後半から70年代後半にかけて、未だ装置メーカーが育っていなかった日本にも競って輸入された⁽⁴⁾。73年には米パーキン・エルマー社(Perkin-Elmer Corp.)が反射投影式の新しい露光装置を開発した。この装置は反射鏡を用いることによってマスクに描かれた回路原図をウエハ上に投影する方式を使っている。投影方式では密着露光で問題となったウエハとマスクの接触による双方の損傷が避けられるため、反射投影型露光装置は広く普及した。しかし反射投影型露光装置は、解像度が密着露光に比べて劣るため、 $2\mu\text{m}$ 以下の最小線幅が要求される256KDRAM以降のいわゆる超LSIの製造には適用できなかった。

(2) GCA社のステッパー開発

1970年代に超LSI製造の本命と考えられ開発の中心となっていたのは電子ビーム描画装置であつた。しかしこの装置は回路描画速度の遅さという致命的問題を抱えていた。そこで電子ビーム描画装置実用化までの一時的な橋渡し役として登場したのが、逐次移動式縮小投影露光装置ステッパーである。これまでの露光装置はいずれも原寸大の回路図を等倍でウエハに転写していたが、ステッパーは原寸の10倍大の回路原板(レチクル)をレンズによってウエハ上に縮小投影することにより $1\mu\text{m}$ 台の解像度を実現した。ステッパーはウエハ全面を一括露光することはできず、ウエハを逐次断続的に移動させながら露光を繰返し全面に回路を転写する。

ここで一般にはなじみの薄いステッパーの構造について説明しておこう。その後半導体量産工場で多く用いられることになる日本製ステッパーの主要部を図一1に示す。このうちの照明光学系と縮小投影光学系の概要を示すのが図一2である。超高圧水銀灯で発生した紫外線は楕円鏡で集光され、インテグレート(複眼レンズ)を通過して均一な照明光となり、拡大された回路原図が描かれたレチクルを照射する。レチクル像は投影レンズで例えば $1/5$ に縮小されてウエハ上に結像する。ウエハは図一3に示すようなステージの上に乗せられている。ステージは下から順に、水平方向に移動するYステージ、Xステージ、垂直方向に微動するZステージ

(2) 肥塚浩『現代の半導体企業』ミネルヴァ書房、1996年、39頁。

(3) Stowsky, Jay S. "Weak Links, Strong Bonds: U. S.-Japanese Competition in Semiconductor Production Equipment," in Johnson C., Tyson L. D., Zysman J. ed., *Politics and Productivity: The Real Story of Why Japan Works*, Ballinger Publishing Company, 1989, P. 263.

(4) 日本半導体製造装置協会編『「半導体立国」日本一独創的な装置が築きあげた記録一』日刊工業新聞社、1991年、60、83、84、190頁。

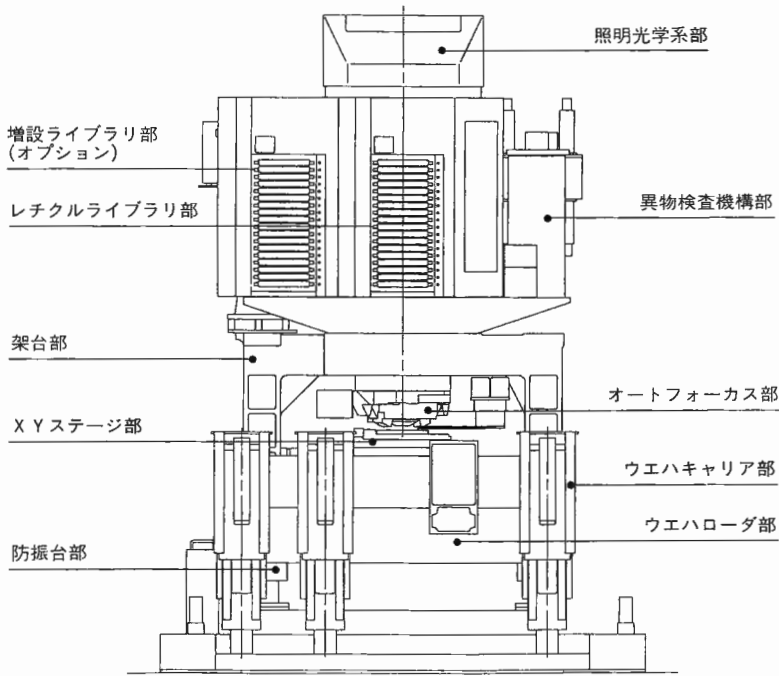


図-1 ステッパーの構造

出典：『ICとNSR探検』第2版(株)ニコン 精機第一営業部管理課, 1992年

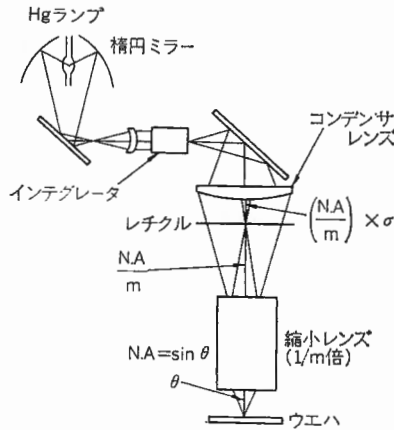


図-2 ステッパーの照明・縮小投影光学系

出典：武部紘二「マスク合せ・露光装置」(『機械設計』第27巻第12号, 1983年11月)

半導体露光装置ステッパーの開発、普及とその要因(廣田)

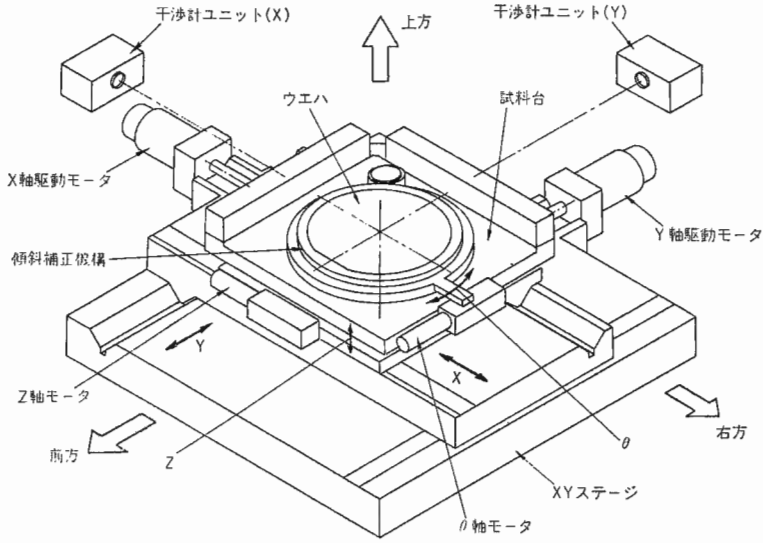


図-3 ステッパーのステージ

出典：坂戸啓一郎「最近の位置決め技術とセンサ」(『機械設計』第34巻第9号, 1990年8月)

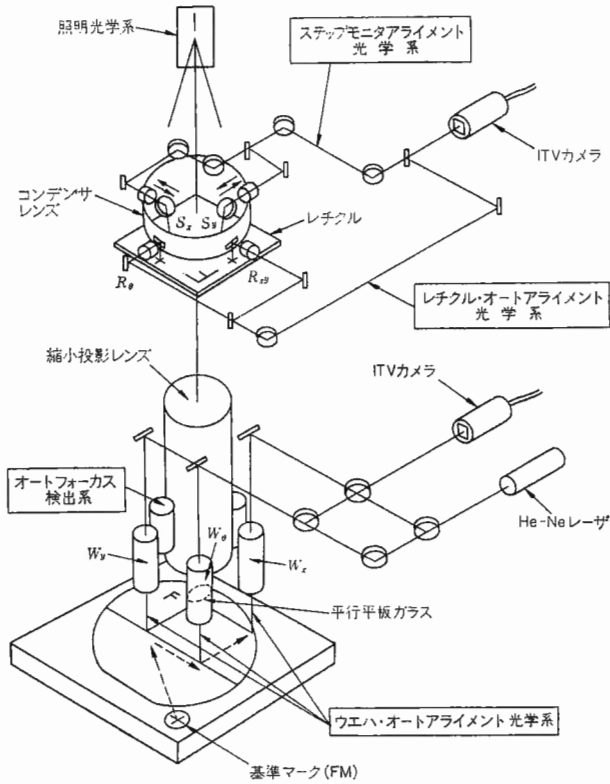


図-4 ステッパーのアライメント光学系(出典：図-2に同じ)

が積み重なっている。一度に露光できる範囲は例えば15mm×15mmなので、最初の露光が終わればすぐに次の露光位置へX, Yステージが移動しなければならない。この移動速度は直接スレープット（1時間当りのウエハ処理枚数）に影響する。しかも回路を完成させるには同一のウエハ上に20回前後の露光が繰り返される必要があり、その際のレチクル像の総合的重ね合わせ精度は最小線幅の $1/5 \sim 1/6$ 、例えば1 MDRAMでは $0.2 \sim 0.17 \mu\text{m}$ が必要である。⁽⁵⁾総合的重ね合わせ精度は多岐にわたる要因に影響されるので、ステージの位置決め精度は4 MDRAMで $0.01 \mu\text{m}$ のオーダーが要求される。⁽⁶⁾またZステージは焦点合わせのために上下に微動させる必要がある。これらのステッパーの構成要素のうち、位置決めを必要とする部分にはすべて精密な測定装置が付属しており、このうちX, Yステージの位置決めは図-3のようにレーザー干渉計⁽⁷⁾を使用している。ウエハのZステージへの位置決め、レチクルのレチクルステージへの位置決めは図-4のようにレーザーあるいは光電顕微鏡でウエハとレチクル上のマークを検出することによって行なっている。

さて実用的ステッパーの開発、生産に最初に成功したのは米GCA社であるが、ステッパーの技術的起源は同社が買収したデビッド・マン (David W. Mann) 社にある。天文学者によって設立され、50年代にコンパレーター等の天体観測用機器を製造していたマン社は、精密に移動できるステージに載せた天体写真を顕微鏡で観察して座標を計測するコンパレーターを応用して、顕微鏡を投影光学系に置き換えることにより、半導体のレチクルを $1/10$ に縮小してマスク上に精密な間隔で繰り返し転写できるマスク製造装置フォトリピーターを61年に完成した。GCA社の一部門となった後も半導体産業向けフォトリピーターの生産は継承され、日本を含め世界的に極めて高い市場シェアを持っていた。76年にはマスクを載せるステージの精度を改善し、その位置決めレーザー測長システムを採用した3696型フォトリピーターが開発された。ところが近々生産ラインへの投入が予想された電子ビーム描画装置は回路をウエハ上に直接描くため、マスク製造、即ちフォトリピーターを必要としない。この危機感に促されてGCA社はフォトリピーター3696型をベースとして、投影対象をマスクからウエハに置き換えると共に、ステッパーに不可欠なアライメント (alignment, 形成済み回路とその上に形成する回路との重ね合わせ) 機構を付加して、77年にステッパー4800DSW⁽⁸⁾を発表した。この世界最初の実用的ステッパーは急速に普及し、高い市場シェアを獲得する。

(5) 天野今朝芳, 伊沢久男「超精密光学機器」精密工学会編『精密機構』オーム社, 1987年, 145頁。

(6) 高橋一雄“半導体製造装置における位置決め技術”『日本機械学会第663回講習会講演論文集』1988年。

(7) レーザーの干渉を利用した精密測長装置。

(8) GCA社については楢岡清威『マイクロリソグラフィの歴史とステッパーの誕生』私家版, 1996年を参照。アメリカの半導体露光装置の世代交替とそれに伴うメーカー (GCA社を含む) の盛衰を技術革新の性格と社内技術情報システムとの関係から説明しようとした論文として Henderson, R. M., *The failure of established firms in the face of technical change: A study of photolithographic alignment equipment*, Dissertation, Harvard University, 1988. がある。GCA社のステッパー4800DSWについては, Resor, G. L., Tobey, A. C., “The Role of Direct Step-on-the-Wafer in Microlithography Strategy for the 80's” *Solid State Technology*, August 1979. 長谷真司 “フォト

当初中継ぎと見られていたステッパーはレンズ性能の向上、光源の進化などの技術革新により光露光の限界を次々に突破し、現在に至るまでこの方式が半導体製造に使われ続けている。しかし GCA 社はステッパーの生産増加により84年に最高売上高を記録した後、続く半導体不況によって経営が行き詰まり⁽⁹⁾、88年に米ゼネラル・シグナル社によって買収された。日本でも80年代の初めまでは GCA 社製ステッパーが盛んに輸入されたが、80年代後半以降、日本製露光装置が日本はもとより世界市場においても急速にシェアを伸ばしていく。GCA 社製ステッパーの成功と失敗の技術的要因については、ニコンの事例と比較しながら第4章で検討する。

3. 日本での半導体露光装置の開発過程

(1) キヤノンの先駆的動き

日本における半導体露光装置の製造は一時日立製作所によって行なわれたこともあるが、主導してきたのはニコンとキヤノンであった。もともとカメラなど光学機械メーカーである両社は、半導体製造関連の部品、機器の製作でも意外と長い歴史を持っているが、当初半導体露光装置への展開により積極的であったのはキヤノンである。

キヤノンは1965年、投影型露光装置の開発を念頭において IC 製造用に的を絞った超高解像力レンズの開発に着手し、67年に U レンズを完成した。このレンズを用いてキヤノンは半導体露光装置の開発を始め、69年に半導体等倍焼付装置 PPC-1 を完成した⁽¹⁰⁾。71年には縮小投影によって1.5 μm 線像が焼き付けられるレンズの開発に着手し、73年にそのレンズを搭載した1/2縮小焼付機 FPA-120を完成させる。続いて分解能0.8 μm のレンズの開発に基づいて1/4縮小投影の手動式ステッパー FPA-141を開発用として発表した。

しかし需要の中心であったコンタクトアライナーではなく、より高い光学技術を活用して投影露光装置から市場に参入するというキヤノンの先進的試みは、営業上うまくいかなかった。当時 IC の集積度はまだ低く、露光装置としてはコンタクトアライナーで十分で、それが盛んに輸入されている時代であった。投影型露光装置は精度的には優れていたが、高価な U レンズを使用しているため、価格においてコンタクトアライナーに勝てなかったのである。これに気付いたキヤノンは遅れてコンタクトアライナーの開発に着手する。しかし後発であったため、従来型のコンタクトアライナーそのままではなく、主光束がウエハ一面に垂直に入射する照明系を採用することによって、マスクとウエハの間に隙間を確保し、マスクとウエハの接触による損傷を回避する近接投影露光方式を採用した PLA-300 を75年に発売した。この後継機種

リソグラフィの変遷の中の DSW 方式の位置づけ”『Solid state technology/日本版』1979年9月、田原元彦“10対1縮小投影露光装置4800DSW”『電子材料』1982年3月を参照。

(9) GCA 社の経営破綻の原因は半導体不況やニコンとの競合だけでなく、生産量急増の中での納期遅れ・レンズの調達難と品質不良・サービス体制の不備等による顧客離れ、情報収集能力の不足による開発テーマの選定ミスと新型ステッパー導入時期の誤り、一貫性のない多角化など、いろいろな重大な要素が輻輳している。

(10) 『キヤノン史 技術と製品の50年』1987年、96～7頁。

PLA-500シリーズはキャノン製露光装置の最初のベストセラーとなった。

一方でキャノンはパーキン・エルマー社で採用されていた反射投影方式による露光装置の開発をめざした。反射投影露光方式はレンズを用いず、台形ミラー、凸面鏡、凹面鏡の組み合わせによって、マスクの回路を等倍で転写する。一括露光ではないが、走査（スキャン）方式を採用しているため、スループットはステッパーより高く、レンズを通ると吸収される短波長の遠紫外線も使用できるのが特徴である。キャノンの反射投影型露光装置は75年に基本特許が出願され、77年には設計が始められた。翌年これに注目した超エル・エス・アイ技術研究組合（以下、超LSI研と略す）が同方式の露光装置の開発をキャノンに委託した。その成果として79年、市販向け反射投影型露光装置MPA-500FAが発表され、80年代前半のベストセラーとして、64~256KDRAMの生産に貢献した。この成功に促されてMPAに経営資源が傾注されたことと超LSI研から開発を委託されたステッパーが等倍投影型であったことから、キャノンでの製造用縮小型ステッパーの商品開発はニコンに遅れて81年に始まり、84年にFPA-1500FAが初出荷されることになる。

(2) ニコンのステッパー⁽¹¹⁾開発

超LSI研はキャノンに等倍投影型ステッパーと反射投影型露光装置を発注する一方、ニコン（当時日本光学工業(株)）に縮小投影型ステッパーの開発を委託した。これにより開発された試作機が日本最初の製造用ステッパーの原型となり、同時に以後のニコンのステッパー生産への傾斜を促す契機となった⁽¹²⁾。ニコンは1969年に等倍投影型のプロジェクションマスクプリンタを製作したのを嚆矢として半導体露光装置へ進出し、74年にも近接投影露光方式のプロキシミティプリンタを開発していたが、いずれも販売実績はわずかで、キャノンのような大きな需要には結びつかなかった。

当社の光学設計陣は、将来の高集積化に対応するためには、光学理論から見て、1対1の焼付け方式ではコンタクト、ノンコンタクトの別なくいずれ解像度に限界が生じるとの見通しをもち、それに代わって、マスク製作に用いているステップ・アンド・リピート方式でウエハにレチクルパターンを直接縮小焼付けする方式に向かわざるをえないとの考えを持って⁽¹³⁾いた。

それにもかかわらず、ニコンはステッパーの開発に慎重であった。

ニコンにステッパーの開発を委託した超LSI研は、米IBMの次世代コンピューターに実装されると予想されていた超LSIの試験研究を実施するため、通産省の主導のもとに鉱工業技術研究組合法に基づいて76年に設立された。構成する組合員はコンピュータ総合研究所（富士通、

(11) ニコンのステッパー開発については、馬場政孝“ステッパーに関する技術論的考察”『中央大学企業研究所年報』第15号、1994年も参照されたい。

(12) ニコンの99年度の製品別売上高比率は半導体関連機器50.8%、カメラ33.9%である。

(13) 『光とマイクロと共に ニコン75年史』1993年、332頁。

日立、三菱が設立、略称CDL)、富士通、日立製作所、三菱電機、日電東芝情報システム(略称NTIS)、日本電気、東京芝浦電気の7社であった。超LSI研は76年度から79年度まで、組合員と通産省工業技術院電子技術総合研究所から約100名の研究者の派遣を受けて設立された共同研究所を中核として、CDL、NTISでもそれぞれ400名近くの研究者を動員した。この4年間はコンピューターの資本及び輸入の自由化対策としての電子計算機開発促進費補助金制度から300億円の国庫補助を受けて、これに組合員への賦課金420億円を加えて、合計720億円の予算で研究開発が進められた。⁽¹⁴⁾

共同研究所で共同研究に従事する研究者は競合する半導体メーカーから派遣されていたので、既得のノウハウを開示する必要がなく、しかも各社が関心を持つ、基礎的で共通したテーマが選ばれた。その中の主要なテーマの一つが半導体の微細パターン形成装置の開発であった。当時の予想では、80年代の半ば頃に最小線幅1 μm の1Mビット超LSIが登場し、同年代末にはサブミクロンオーダーの加工が必要になると考えられた。⁽¹⁵⁾しかし従来の光による転写は2 μm が限界というのがその時点の常識であり、1 μm 以下の微細加工には電子ビームによる直接描画が不可欠になると予測された。⁽¹⁶⁾この予測に従って電子ビーム描画装置の開発試作に主力が注がれた。しかし電子ビームによる直接描画はスループットが悪いので、一方で経済性が高いと考えられる新しい転写装置の開発がテーマに盛り込まれた。⁽¹⁷⁾共同研究所に最も熱心であった東芝出身の武石喜幸第3研究室長が開発テーマとして提案した光露光装置は、既存技術の延長線上にあったため当初通産省の関心を引かなかったが、電子ビーム描画装置で製作したマスクの試験装置という名目で採択された。⁽¹⁸⁾こうした経緯からステッパーの開発は縮小型、等倍型共に東芝出身者を中心としてそれに日本電気、三菱電機からの出向者を加えた共同研究所第3研究室が担当した。⁽¹⁹⁾試作機の発注先を決定したのは武石氏で、共同研側は解像度、スループット、アライメント精度など基本仕様のみを提示し、装置の考案はメーカー側に一任された。キヤノンが従来の自社製品の延長線上にある装置を試作したのに対し、ニコンはGCA社製品の影響を受けた試作品を開発した。ニコンはマン社続いてGCA社に長い間フォトリピーター用高解像力レンズを供給しており、70年頃にはステッパーのデザインコンセプトをGCA社にプレゼンテーションしている。⁽²⁰⁾しかしこの提案は「生産効率の面から採用されなかったため、当社自身での開発に向けて設計部門の一部で研究を開始し」⁽²¹⁾ていた。またステッパーへの参入にあたってニコ

(14) 『超エール・エス・アイ技術研究組合15年の歩み』1990年、30～48頁。

(15) 垂井康夫『ICの話 トランジスタから超LSIまで』日本放送出版協会、1982年、152頁。

(16) 前掲『「半導体立国」日本』144頁。

(17) 垂井康夫“共同研究所における超LSI基礎技術研究の成果”『電子工業月報』第22巻第5号、1980年5月。

(18) 当時共同研究所長であった垂井康夫氏からの聞き取り調査(2000年1月27日)。また垂井康夫『超LSIへの挑戦』工業調査会、2000年も参照。

(19) 室員15、6名からなる第3研究室は露光装置のほか、電子ビーム描画装置(共同研究所全体で3方式開発されたうちのの一つ)、レジスト、フォトソード転写等を担当していた。

(20) 前掲『「半導体立国」日本』115頁。

(21) 前掲『ニコン75年史』332頁。

ンはGCA社の工場見学を許されている。⁽²²⁾ニコンのステッパー試作機(VL-SR2)は主要部分の試作を経て、77年7月に部品加工が始まり、9月に最終仕様が決定した。組立は11月に始まり、78年3月に試作機は共同研究所に持ち込まれた。その後第3研究室で試作機の評価が行なわれたが、TTL・AF(レンズを通した自動焦点合わせ)用レーザー光を投影レンズに入れるためにレチクルとレンズの間にダイクロイックミラーを入れて光軸を曲げるという設計ミス⁽²³⁾を犯していたため、⁽²⁴⁾光学的調整が完全にはできなかった。またウエハを載せるステージのステッピング動作、自動アライメント機構にも不具合があり、⁽²⁵⁾半導体を試作するには至らなかった。

共同研究所での試作成果を受けて、東芝はニコンに2号機を発注し、ニコンは社内評価用と合わせて2台を製作して、80年1月に完成した。⁽²⁶⁾78年に東芝は社内に置かれた超LSI研の分室にGCA社製ステッパー4800DSWを設置しており、2号機の発注にあたってこれをニコンの参考⁽²⁷⁾に供したという。2号機は1号機で犯した設計ミスを改め、AF光を投影レンズを通さずにウエハに直接斜め横から当てることで、光軸を直線にした。ステージの構造はDSWを参考とせず、1号機と同じニコン独自の形式を踏襲したが、1号機の問題点は克服された。試作2号機は80年4月に東芝に納入され、256KDRAMの試作に成功している。ニコンはこれに先立ち同年2月に2号機とほぼ同じ仕様のNSR-1010Gを発表し、11月から市販を始めた。4800DSWとNSR-1010Gの優劣は明確ではないが、ニコンが縮小率を1/10から1/5にして露光範囲を10mm×10mmから15mm×15mmに広げた新機種を発売したあたりから、ニコンの優位が目⁽²⁸⁾についてくる。

こうして開発されたステッパーは当初の予想をはるかに越えて現在に至るまで、最先端の半導体量産ラインで使用されている。それは要するにレンズの高性能化ないし露光光源の短波長化によって、より微細な回路の転写が可能になったからである。

レイリー(Rayleigh)によると、解像力は以下の式で表わされる。

$$\text{解像力} : R = k\lambda / NA$$

$$\text{焦点深度} : Df = \pm \lambda / 2 NA^2$$

k: 定数(例えば量産レベルで0.8, 研究レベルで0.6)

(22) “光と超LSI ステッパー・最新レポート7”『日刊工業新聞』1981年2月4日。工場見学の時期は不詳。

(23) 薄膜による光の干渉を利用して、特定波長の光だけを反射し、他の光を透過する鏡。

(24) 金谷富士夫“初期のステッパー開発”『応用物理』第67巻第8号, 1998年。

(25) 当時東芝から日電東芝情報システムに出向して、共同研究所でのステッパー試作に実務レベルで参加し、続く東芝発注の2号機の共同開発にも従事した中瀬真氏(現(社)日本電子工業振興協会技術部部長)からの聞き取り調査(2000年1月26日)。

(26) Nakase, M., Shinozaki, T., “Resolution and Overlay Precision of a 10 to 1 Step-and-Repeat Projection Printer for VLSI Circuit Fabrication”, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. ED-28, No. 11, November 1982.

(27) 前掲中瀬真氏の言。

(28) 久保脩治“シリーズ最先端技術に生きる日本の匠の技 第2回”『月刊Semiconductor World』1997年8月参照。

λ : 露光波長

NA: 投影レンズの開口数

この式からわかるように、縮小投影型ステッパーは基本的に投影レンズの高 NA 化と露光光の短波長化によって、光の限界を次々に打破することができたのである。露光波長はかつての近紫外線 g 線の 436nm (ナノメートル, 10^{-9}m) から i 線の 365nm を経て、現在波長 248nm の KrF (フッ化クリプトン) エキシマレーザーが用いられるようになり、それによって最小線幅 $0.25\mu\text{m}$ の 256MDRAM が生産されている。これに対して、当初超 LSI の量産を目標としていた電子ビーム描画装置はレチクルの製作に使用されたり、ASIC (特定用途向け集積回路) の製造に用いられているが、半導体量産の主流にはなっていない。

このように共同研究所の本来の意図とは少しくずれて、その最大の波及効果はステッパーの誕生とその国際的普及であったと言われる⁽²⁹⁾。共同研究所からの試作発注はニコンにとってステッパー開発のトリガーとなり、発注仕様で指定された解像力 $1\mu\text{m}$ という高い目標に向かって開発が進められた。しかもその過程で「何よりも良かったのは、ユーザーとベンダがあればほど密着してディスカッションしながら開発ターゲットにベクトルを合わせた」⁽³⁰⁾ ことであったと言われるように、ユーザーとの間で緊密な情報交換が行なわれたのである⁽³¹⁾。また試作品の開発が国庫補助金とユーザーの拠出金を財源として委託発注されたことは、装置メーカー自身が 1 社で多額の開発資金を負担しなければならないという大きなリスクを免除するという効果があったことも指摘されている⁽³²⁾。しかしステッパーは共同研究所からの委託によって突如として開発されたわけではない。共同研究所は 4 年間のみという設置期間の制約の中で一定の成果を上げる必要から、電子ビーム描画装置を含めて、既存技術を基盤として実現可能な開発目標を設定していた。転写装置も同様であって、キヤノンの反射投影露光装置は独自に開発が先行していたし、ニコンもステッパーへの進出意志を持つと共にその開発の前提となる要素技術を歴史的に十分蓄積していたのである。

4. 日本製ステッパーの開発と普及の要因

(1) 要素技術の蓄積—精密機械技術

逐次移動式縮小投影露光という半導体回路の転写方式は、フォトリピーターの延長線上に誰

(29) 前掲『「半導体立国」日本』130～1頁。

(30) 前掲書、131頁。

(31) ニコンと東芝との関係で言えば、2号機の共同開発以降も両社間で定期的に会合が持たれ情報交換が行なわれると共に、ニコンが開発した新機種は最初に安値で東芝に納入される代わりに、同社でバグ出しが行なわれたという(前掲中瀬真氏の話)。

(32) 佐久間昭光、米山茂美“イノベーションと産業進化—日本の半導体製造装置産業の形成と発展—”『ビジネスレビュー』Vol. 39 No. 1, 1991年12月及び佐久間昭光『イノベーションと市場構造』有斐閣、1998年、59～100頁を参照。

超 LSI 研の投じた開発費は縮小型、等倍型ステッパーが共に 1.5 億円、反射式投影露光装置が 2 億円と言われるのに対し(『日経エレクトロニクス』1978年10月16日、52頁、1979年4月2日、44頁)、製品価格はニコン NSR-1010G が 1.35 億円(『日刊工業新聞』1981年2月4日)、キヤノン FPA-

もが思いつく発想だったため、特定企業が基本特許を押さえることはなかった。⁽³³⁾ そのため80年代初頭、商業ベースでステッパーを発表していた企業は8社以上あった。⁽³⁴⁾ このうち最初に市場に受け入れられたGCA社の4800DSWとニコンのNSR-1010Gには他社製品とは異なる共通の特徴があった。それはアライメント方式に見られた。他社が用いたTTL (through the lens) アライメント方式は投影レンズを通して直接レチクルとウエハの位置合わせを行なうため高精度で、半導体チップ一個ずつの重ね合わせも可能であったが、アライメントに時間がかかるという弱点を持っていた。一方GCA社とニコンのステッパーは投影レンズの外側に装着した専用のアライメント光学系を用いるオフアクシス (off axis) 方式を取り、間接的に一度アライメントした後は移動量検出用レーザー干渉計を頼りにXYステージを逐次移動させながら回路を転写していく。このためステージにはより安定した極めて高い機械精度が要求されるが、アライメントはより容易で所要時間が少なかった。⁽³⁵⁾ 従来フォトリピーターの製造に従事してきた、あるいはそれを見てきた両社にとって、フォトリピーターにアライメント光学系を後付けした形のオフアクシス方式は自然な着想であった。と同時に優れた技能者を多く抱え、フォトリピーターないし他の製品で高精度XYステージの製造経験を蓄積してきた両社とりわけニコンは、他社のように空気軸受やリニアモーターといった時期尚早な先端技術を用いなくても、転がり軸受とサーボモーターを組み合わせた単純かつオーソドックスな構成で高精度なステージ移動を実現することができた。⁽³⁷⁾

211FAが5,000万円(同1978年11月14日)、同MPA-500FAが8,000万円(同1979年11月27日)であった。
 (33) GCA社はステッパーの開発にあたって特許を取っていないし、ニコンもステージについてはノウハウが流出するので、特許を出願していない(「いんたびゅう 吉田庄一郎氏」『日経メカニカル』1985年5月20日)。

(34) 中瀬真“本格量産機として動き始めたダイレクトステッパー”『電子材料』1982年1月、山中洋示、和田俊男“縮小投影露光技術”同誌、1980年11月参照。

80年代初頭のステッパーメーカーとしては本文中に登場する企業以外に、フォトリピーターから進出したTRE社*(旧エレクトロマスク社、後にASML社が買収)、イートン社の出資で76年に設立されたオブチメトリックス社、後にパーキンエルマー社*に吸収されるリヒテンシュタインのセンサー社(パーキンエルマー社の露光装置部門はSVGL社を経てASML社へ)、オランダのフィリップス(後にASML社設立)、東独のカルツァイス・イェナ社*、フランスのトムソン-CSF社*などがあった。なおこのうち、*印の企業及びGCA社を超LSI研究組合共同研究所におけるステッパー開発の過程で担当の篠崎俊昭氏(東芝出身)が訪問調査している(「第32回共研討論会資料-投影焼付技術調査-」1977年7月28日)。

(35) 住友商事でGCA社のステッパーを扱っていた長谷真司氏(現住商電子デバイス(株)社長)によると、GCA社はオフアクシス方式で特許を取っておくべきだったと言う(聞き取り調査、2000年2月15日)。

(36) 内田傳之助氏、長谷真司氏からの聞き取りによる。また大西順雄“世界の機械技術 米国編”『日経メカニカル』1985年11月18日のGCA社についての報告を参照。

(37) ニコンのXYステージの案内面は前掲図3のように、工作機械のベッドに一般的なV溝と平面の組合せを採用している。但しステッパーの場合は工作機械のように直接摺動させずに、ステージとステージの間に針状ころ軸受(ニードル・ベアリング)を入れて、摩擦抵抗を引き下げ、付着すべり(スティック・スリップ)を回避している。これにより高速・高精度位置決めが容易になっている。(佐伯裕史、森谷英一郎“特集超精密技術 第2部位置決め”『日経メカニカル』1986年6月30日参照)一方GCA社のステージは粗動ステージと微動ステージに分かれており、粗動ステージには滑り軸受とステップモーターを、微動ステージには板ばねとリニアモーターを用いている(田原、前掲論文)。各社ステージの特徴について詳しくは、井澤實編著『精密位置決め技術』工業調査会、1989年、

このようにGCA社とニコンが高度な精密機械技術を既に持っていたことが、オフアクシス方式による高精度アライメント方式を可能にし、それに伴って高いスループットが実現されて、両社製品の普及が促されたのである。GCA社の精密機械技術はデビッド・マン以来のコンパレーター、フォトリピーター、パターンゼネレーター⁽³⁸⁾といった天体観測機器や半導体製造装置の製造によって築き上げられ、そのための熟練技能者が育まれた。一方ニコンは半導体製造装置そのものの製作経験は乏しかったが、以下のような長年にわたる精密機械技術の蓄積を持っていた。

光学系を用いた精密機器はレンズだけでなく機械的部分にも高精度を必要とするが、特に光学的精密測定機は最も精度を要求される。ニコンの前身日本光学工業では戦前から社内用測定機を手掛けていたが、日中戦争以後光学的測定機の輸入が困難となり、各種精密測定機を国産化⁽³⁹⁾した。その経験と指揮装置や大型測距儀などの光学兵器製造が、日本光学に精密機械技術の蓄積をもたらした。

戦後も精密測定機は日本光学の事業分野のひとつであり、その発展に伴って精密機械技術が進歩した。戦後日本光学の精密機械技術の画期となったのは、1961年に東京教育大学(現筑波大学)光学研究所から受注したルーリングエンジン(刻線機)の開発であった。その仕様は、金属を蒸着したガラス基板にダイヤモンドカッターを用いてピッチ $1\mu\text{m}$ 以内で平行に長さ 100mm 以上の溝を10万本以上刻線し、その際のピッチ精度を $0.01\mu\text{m}$ 程度、溝の真直度を $0.1\mu\text{m}$ 以内とする、というものであった。「当時はまだレーザーが実用化されていなかったので……マイケルソンの干渉計でダイヤモンドカッターの送り量を計測し、サブミクロンの位置ぎめ制御を実現」とともに「戦前に指揮装置のねじ、歯車、カムなどの超精密仕上げを経験している熟練の組立作業員によって、平面の仕上げや組立誤差の除去、滑らかな動きなど念入りな修正」を行なって64年に1号機が完成した。そのルーリングエンジンは「①ベッドの剛性、ルール面の真直度と平行度、②送りねじのピッチ精度、③光波干渉計による位置制御、などに技術的特徴があるが、……その精密送り機構を通して、……サブミクロンの位置ぎめ制御が実現できた意義は大きかった⁽⁴⁰⁾」。

69年、通産省工業技術院計量研究所へレーザー⁽⁴¹⁾光を使用した標準尺自動測定機を納入し、ここで精密長さ測定にレーザー干渉技術が実用化された。70年には半導体メーカーからの特注で

303～332頁および鳥海正樹「半導体製造装置における位置決め技術」『精密工学会誌』第57巻第10号、1991年を参照。XYステージの仕上の苦勞については、相田洋『NHK電子立国 日本の自叙伝 [完結]』日本放送出版協会、1992年、305～20頁および現代情報工学研究会『ニコンの技術者集団』ダイヤモンド社、1985年、55～63頁を参照。

(38) レチクルを製造する装置で、フォトリピーターと似た構造を持つ(檜岡、前掲書、10頁参照)。

(39) 目標位置の測定データを解析し、砲弾や魚雷を発射するために必要なデータを算出する軍用機械式計算機。陸軍では算定具と称した。

(40) 前掲『ニコン75年史』217～8頁。

(41) 測長用干渉計に使用する周波数安定化レーザー(He-Neガスレーザー)装置はその後74年に自社開発され、位置検出をする光電顕微鏡と共に、寸法測定やXYステージなどの移動制御を高精度化、自動化できる基盤が整った(前掲書、277～8頁)。

フォトマスク測定用の光波干渉座標装置を完成し、翌年これを改良して世界初の光波干渉式座標測定機を製品化した。これはマスクやレチクルのパターン寸法や座標値をレーザー干渉計のついたXYステージと光電顕微鏡により精密に自動計測できるもので、ステッパーに使われているXYステージの原型ができたことになる。こうしてルーリングエンジンで精密位置決め技術、標準尺自動測定機でレーザー干渉測長技術、光波干渉式座標測定機でXYステージと順次、ステッパーにつながる技術が蓄積された。

GCA社、ニコンに続いてステッパーの営業生産に成功したキヤノンは84年に市販したステッパーFPA-1500にTTLアライメント方式を使ったが、翌年にはレーザー干渉計を搭載したオフアクシス方式を採用している。ステージもニコン同様ニードルベアリングを用いたところが案内を使用していた。ただキヤノンの精密機械技術はニコンとは異なる特徴を持っていた。それはアメリカの先端技術との直接的接触を持ったという点である。キヤノンはパーキン・エルマー社光学機器事業部技師長のフォーマンらが70年に設立したザイゴ(Zygo)社に出資した。彼らはアポロ11号の月面反射鏡のプロジェクトに従事した技術者達で、レーザー応用のための超精密光学素子の加工・測定に関して世界的な技術を持っていた。キヤノンは同社からガラス用超精密平面加工機を導入し、手作業に代わり機械による超平面加工技術が可能になった⁽⁴²⁾。これによって開発されたL型スコヤ(光学的直角定規)はレーザー干渉計の反射面としてステッパーのステージに搭載された。更に73年、キヤノンはザイゴ社の技術を利用して、非球面レンズ加工用の超精密非球面研削機を開発した。「この加工技術開発の過程で、日本ではまだ未知の領域であった空気軸受、レーザー干渉寸法計測、超精密機械制御、構造用新素材、微細研削・研磨現象の解明など、超精密加工の基礎をなす要素技術が当社に蓄積され、他の部門や製品に波及して効果を上げた⁽⁴³⁾」。こうした高度な精密機械技術を持っていることがステッパーメーカーとして成功する一つの技術的要因であった。

ところがこうした既得の精密機械技術を有していたとしても、熟練技能に依存した精密機械の製造は需要の増大に直面した時、生産拡大の桎梏となる。従来フォトリピーター等を年間2~30台しか製造していなかったGCA社デビッド・マン部門がステッパー生産を年間400台に引き上げるのは難しかったのである。一方ニコンは量産の最右翼に位置するカメラから工場用高精度光学機械まで多様で豊富な生産経験を持っていた。その上ニコンはステッパーの市販を始めるにあたって同種のステージを持つ反射型微少寸法測定器のステージのみの量産試作を行っており⁽⁴⁴⁾、ステッパーの量産に備えている。この精密機械の量産経験の有無がGCA社とニコンのその後の発展を大きく左右した。他方資金力のあるキヤノンは熟練技能の不足を精密加工設備、精密測定設備の導入によって克服していくという方策を選択している⁽⁴⁵⁾。

(42) 前掲『キヤノン史』122, 151, 209~10頁。

(43) 前掲書, 150~1頁。

(44) 前掲『ニコン75年史』338頁。

(45) キヤノン(株)宇都宮光学機器事業所半導体機器事業部小木曾光利部長によると、熟練工は半導体

(2)要素技術の蓄積—光学技術

精密機械技術と共にニコン、キヤノンとGCA社その他のステッパーメーカーの優劣を生んだのはレンズの設計・製造技術の有無であった。GCA社及びその他のステッパーメーカーは投影レンズを主に独カール・ツァイスから調達していた。GCA社はニコンに倣ってスルーポットの高い縮小比1/5の新製品を供給しようとしたが、市販が決定的に遅れて市場をニコンに奪われた主たる原因の一つは投影レンズの調達が遅れたことであった⁽⁴⁶⁾。GCA社は82年にレンズ部門を傘下に置くなどの対策をとるが、品質の揃った高精度投影レンズの安定的確保は生産の重大な隘路であり続けた。これに対しニコンとキヤノンの強みとなった光学技術は以下のように歴史的に形成されていた。

1917年に光学兵器国産化のために設立された日本光学は測距儀や潜望鏡などの生産を始めた。しかしこれらは必要な技術水準が高く、不良品が山積したため、21年ドイツから技術者を招聘した。彼らから光学設計、ガラス加工、機械加工等の指導を受け、技術水準は急速に向上した。また関東大震災によって陸・海軍の光学関係の工場が被災したのを契機に、軍の日本光学への依存が強まると同時に技術が移転された。敗戦まで日本光学の主要な製品は光学兵器であったが、その中で33年以降写真レンズの研究、設計を継続し、戦後の民需転換の基礎が作られていた。

レンズの素材である光学ガラスも光学兵器と同様、第1次大戦による輸入途絶のために、軍によって国産化の試みが始まり、日本光学も製造研究を開始した。しかし光学ガラスの製造は技術的に難しく費用もかかったため、戦後ドイツからの輸入が再開すると研究は中断された。その後22年に日本光学は研究を再開し、翌年には海軍技術研究所の光学ガラス研究部門をそのまま受け継いで、軍の光学ガラス製造技術が日本光学に集約された⁽⁴⁷⁾。27年には外国製光学ガラスに劣らない高品質の光学ガラスを量産することが可能になった⁽⁴⁸⁾。

戦後日本光学は民需転換の中心としてカメラの開発に尽力する。民需用カメラの製造経験を持たなかった日本光学はその製品化に苦勞するが、50年に発売されたニコンS型はレンズと共にアメリカ人によって高く評価された。レンズはアメリカで検査され、その結果は「ニッコールの平均性能はドイツ製品よりはるかに優秀」で「精度も光学性能もきわめて高く、ドイツ品よりつぶがそろって」おり、「解像力の優秀さと収差の少ないこと⁽⁴⁹⁾」が評価された。カメラ用

露光装置の製造ラインには不必要であるが、下丸子の試作部門にはいるとのことである(聞き取り調査、1999年3月31日)。

(46) 住友商事ないしその子会社でGCA事業の初期から最後まで携わった内田傳之助氏(現SEMIジャパン代表)は縮小率1/5レンズの量産の遅れとレンズの均質性の欠如がGCA社にとって致命傷となったと指摘している(聞き取り調査、2000年2月15日)。GCA社は1982年にコヒーレント社(Coherent Inc.)からレンズを製造するトロペル(Tropel)事業部を買収する(*Securities and Exchange Commission Form 10-K, GCA Corporation For the fiscal year ended January 3, 1988*)が、ツァイス社への依存からは脱却できなかった。

(47) 1915年以来、東京砲兵工廠精器製造所で実施されていた陸軍での光学ガラス製造研究は既に海軍に一本化されていた。

(48) 前掲『ニコン75年史』45～7頁。1933年の自社需要の6割を自給。

レンズとしての性能は、戦前の技術蓄積を基礎に、戦後の早い時期に世界最高水準に到達していた。

レンズのその後の進化の方向のひとつは高解像力化である。そしてこの延長線上にステッパーの投影レンズがある。戦後アメリカからわが国にマイクロフィルミングシステムがはいってきたが、付属の縮写レンズは英字用のため、漢字に対しては解像度が不足していた。ここから高解像力レンズへの需要が生まれ、56年に高解像力レンズマイクロニッコールが誕生した。更に60年頃、フォトマスク製作用としての高解像力レンズについて照会が寄せられるようになった。これに応じて62年、フォトマスク製作専用高解像力レンズとしてウルトラマイクロニッコールが完成した。日本光学は国内のみならず米国のNASA 関係やIC 製造装置メーカーからの要望でフォトマスク製造用ウルトラマイクロニッコールをシリーズ化し、この分野で世界市場を独占した。そしてこのウルトラマイクロニッコールを基礎にして日本光学はステッパーへ進出することができたのである。

同時に光学ガラスも進歩した。日本光学は51年に光学ガラスメーカー⁽⁵⁰⁾5社の中心となって共同研究を行ない、数々の新種ガラスを試験溶解した。続いて54年に日本光学はガラス溶解に従来の粘土るつばに代わる白金るつばを導入し、浸食性のある原料の溶解が容易になった。⁽⁵¹⁾白金るつば溶解法の確立によって55年から溶解が始まったランタンフリントガラスはマイクロニッコールに使用されている。ニコンは光学ガラスを全量自給しているわけではないが、社内で新種の硝材開発が可能であるため、レンズ設計の自由度は高く、レンズ開発に有利である。

こうして日本光学は超高解像力レンズで世界に先駆けたわけであるが、その製作に関して次のように述べられている。

ウルトラマイクロ・ニッコールの製造に当たっては、まず光学ガラスの材料の厳重な選別を行なった。脈理や気泡のチェックには万全を期すとともに、ガラス内部のひずみをなくすためにアニール(焼鈍)処理を十分にほどこした。レンズは許容誤差ゼロに近い精度をださなければならないので、熟練者により磨き上げられ、面精度は従来の倍に当たる検査を実施して、最良のものとした。レンズの単体の中心厚、さらに貼合せレンズの合成中心厚は、設計値の誤差を100分の1以下に抑え、レンズの偏心は心出し顕微鏡で厳密に検査した。調整と検査が一体となって作業を進め、レンズの偏心を厳しく抑え、レンズ間隔の確認を行なって調整したレンズを、投影検査によって非対称性・解像力などの測定をして、その値によってはさらに調整を繰り返すという手順で、最良の状態に仕上げた。しかしこれらの製造・検査技術は格別新しいものではなく、当社が従来から保有している技能・技術を結集したものであった。設計部門では何本かに1本良品にまとまればよいと思ってい

(49) 前掲書、139頁。原出所は *The New York Times*, December 10, 1950.

(50) 日本光学工業、小原光学硝子製造所(現オハラ)、小西六写真工業(現コニカ)、富士写真フィルム、千代田光学精工(現ミノルタカメラ)の5社。

(51) 『貿易之日本 別冊 世界のニコンが築く光学技術の全貌』通巻248号、328～9頁。

たところ、製造部門ではほとんど全部を良品として完成させた。ウルトラマイクロ・ニコールは、光学設計技術とともに、製品としてつくりあげる製造での技術・技能があったからこそ誕生しえたものであった。⁽⁵²⁾

このように製造に熟練を要する高解像力レンズはステッパーの需要増加に伴って生産を増やす必要に迫られ、85年ニコンはレンズ研磨道場「嚶鳴館」を開設して、熟練技能者の養成に力を注いだ。

一方キヤノンも、光学ガラスは外部から調達しているものの、社内にレンズの設計・製造部門を有している。キヤノンは48年まで日本光学からレンズの供給を受けていたが、戦時中に日本光学からの移籍技術者達がレンズの設計・製造を始めていた。戦後レンズの製造技術はカメラの量産化とともに機械化が進み、⁽⁵³⁾ステッパー用縮小投影レンズの組立に関しても、キヤノンは次のような技術を開発した。

それまでのUレンズ組立ては、玉押し（レンズの軸合わせ調整）の方法によるもので、熟練技能者にしかできない工法であった。不確定要素が多いため高精度化には対応し切れず、また量産は不可能に近い状態だった。81年、……「巧みの機械化」をモットーとしてレンズ構成法そのものからの検討に着手した。その結果、部品の単体精度を向上させることにより、単純に組み込む“投げ込み”でUレンズの組立てが可能となる見通しを得たことから、サブ・サブミクロンのレンズ加工機、測定機、鏡筒加工機、組立機など数多くの超精密機器の開発に力を注いだ。取付け・取外し誤差をなくしてナノメーターの再現性を保証するため、加工機自体に計測機能をもたせたオンマシン計測も多数導入した。このような一連の技術開発によって、目標とした“投げ込み”によるレンズ組立てが実現した。それまで、ステッパー量産の最大のネックとなっていただけに、このUレンズ量産技術の確立は大きな成果であった。⁽⁵⁴⁾

こうしてキヤノンはニコンとは異なる方法で投影レンズの量産能力を獲得したのである。

レンズの設計技術に関しては、戦後計算機の発達による計算の高速化とノウハウの蓄積が急速に進んだ。キヤノンではそろばんによる手計算から、手回しの計算機を経て、59年にリレー式電子計算機の使用が始まる。62年には電子計算機が導入され、計算が高速化すると共に、64年にはレンズの自動設計プログラムが完成した。⁽⁵⁵⁾そしてUレンズもコンピューター利用技術の拡充の中から開発された。82年、光学設計技術やコンピューター利用技術に関するノウハウを集大成した対話型光学設計システムが完成して、あらゆる光学系の設計に本格的に対応可能となった。80年代に開発された機能の中にはマスクアライナー照明系評価計算、ステッパーレン

(52) 前掲『ニコン75年史』213～4頁。ニコンのレンズ研磨の熟練技能については、前掲『ニコンの技術者集団』74～81頁および前掲『世界のニコンが築く光学技術の全貌』333～6頁も参照。

(53) 日本光学では54年にカーブジェネレータの導入による荒摺の機械化が行なわれ、56年には研磨工程に円形24軸レンズ研磨機が導入された。

(54) 前掲『キヤノン史』335頁。

(55) 前掲書、100～1頁。

ズ最適化・機能向上のソフトも含まれている。このように光学計算へのコンピューター導入は設計の高速化と共に、体系的な設計ノウハウの蓄積とその利用を容易にし、ステッパーの投影レンズの絶えざる開発を可能にした。

以上のように精密機械技術と光学技術という要素技術とそれらを量産に適用できる能力を事前に具備していたことが、日本の光学機械メーカーがGCA社その他の欧米メーカーとの開発競争に勝った最大の技術的要因であった。

(3)ステッパーの技術進歩とその性格

GCA社のステッパー発売以降、最近に至る半導体量産用ステッパーの先端的仕様の推移を表一2に示す。この表からわかるように、ステッパーは半導体の高集積化を実現するため、次第に解像度を高めてきた。また生産性向上のため、露光面積（フィールドサイズ）の拡大とウエハサイズの大型化に対応してきた。先に掲げたレイリーの式を再度参照すると、解像度の改善にはレンズの高NA化と露光光の短波長化という二つの基本的方法がある。いずれの方法も焦点深度を浅くし、焦点合わせの高精度化を必要とするが、焦点深度が浅くなる度合いを考慮すれば、レンズの高NA化を進めるより、露光光の短波長化を進める方が望ましい。しかし露光光の変更は新たな光源とその波長に対して高感度を有するフォトリソの開発を必要とし、リソの変更は半導体製造工程の変更をも意味した。このため現実には表一2のように露光光一定の下でレンズの高NA化を進め、それが限界に突き当たって初めて露光光を短波長化するという形での技術進歩が繰り返された。g線からi線への光源の変化は1990年頃、i線からKrFエキシマレーザーへの転換は95年頃に生じている。このKrF光源の採用は同時にステッパーの構造上の技術革新を引き起こした。従来の水銀灯を光源とするg線、i線といった近紫外線には光学ガラスのレンズを使用することができたが、KrFエキシマレーザーには透過率の点から合成石英製レンズしか使用できず、硝材費の高騰を招いた。このレンズ径の約3乗に比例する硝材費を削減するため、レンズの直径付近の帯状部分だけを用いてレチクルを走査することにより広い矩形領域に転写する方式が開発された。従来レチクルは固定でXYステージも露光中は静止していたが、新型の走査式ステッパーでは露光中にウエハステージを動かすと共にそれと完全に同期させてレチクルを縮小倍率の逆数倍、即ち4倍の速度で移動させている。高速、高精度でのレチクルとウエハの同期的移動のために、走査式ステッパーではレチクルとウエハのステージの案内に空気軸受が、駆動にリニアモーターが採用された。

日本メーカーによって推進された以上のようなレンズ縮小投影露光装置の進歩に対して、露光装置での競争力回復をめざしたアメリカは、87年超LSI研究組合に倣ってセマテック (SEMATECH, Semiconductor Manufacturing Technology Inc.) を設立し、政府、半導体メーカー、装置メーカーの力を結集して、斬新なコンセプトによるミラー縮小投影露光装置を開発した。⁽⁵⁶⁾しかし現在までこの新たに提起された露光方式は普及していない。このようにステッパー

表-2 量産用ステッパーの先端的仕様の変遷

発売年	メーカー	装置形式	露光波長	縮小倍率	フィールドサイズ(mm)	NA	解像度(μm)	ウエハサイズ(mm)	スルーアット(枚/時)	価格(億円)	適用DRAM
1978	GCA	4800DSW	g	1/10	□10	0.28	1.25	φ100	31~34	1.2	
1980	ニコン	NSR-1010G	g	1/10	□10	0.35	1	φ100	60	1.4	
1981	ニコン	NSR-1505G	g	1/5	□15	0.30	1.2			1.4	64~256k
1983	GCA	6300DSW	g	1/5	φ20	0.3	1.1				
1984	ニコン	NSR-1505G3A	g	1/5	□15	0.35	1	φ125	50	1.6	256k
1984	ニコン	NSR-1010i3	i	1/10	□10	0.35	0.8			1.6	256k
1984	キヤノン	FPA-1500	g	1/5	□14	0.35	1	φ100	60		1M
1985	キヤノン	FPA-1550	g	1/5	□14	0.35	1	φ150	32	1.5	1M
1986	キヤノン	FPA-1500MII	g	1/5	□15	0.43	0.8	φ150			
1986	ASML	PAS2500/10	g	1/5	□14	0.38	0.8	φ150	65	1.1m\$	
1986	GCA	8500DSW	i	1/5	□15	0.35	0.7			1.8	4M
1987	ニコン	NSR-1505G4D	g	1/5	□15	0.45	0.75	φ150	50	1.7	4M
1987	日立	LD-5010i	i	1/5	□15	0.40	0.6	φ150	45	1.9	4M
1987	ASML	PAS2500/40	i	1/5	□15	0.40	0.5	φ150	46		
1988	ニコン	NSR-1505EX	KrF	1/5	□15	0.42	0.5	φ150	10	3	16M
1988	ニコン	NSR-1505G6E	g	1/5	□15	0.54	0.65	φ150	53		4M
1988	キヤノン	FPA-1550MIII	g	1/5	□15	0.48	0.7				4M
1988	ASML	PAS2500/30	g	1/5	□15	0.43	0.65	φ150	69		
1989	ニコン	NSR-1505i6A	i	1/5	□15	0.45	0.65				4M
1989	ニコン	NSR-1755G7A	g	1/5	□17.5	0.54	0.65				4M
1989	キヤノン	FPA-1550MIVW	g	1/5	□20	0.55	0.65				4M
1989	ASML	PAS5000/50	i	1/5	□15	0.48	0.5	φ150	50	1.6m\$	16M
1990	ニコン	NSR-1755i7A	i	1/5	□17.5	0.5	0.5	φ150	60		16M
1990	ニコン	NSR-2005G8C	g	1/5	□20	0.60	0.55	φ150	66	2.5	16M
1990	キヤノン	FPA-2000i1	i	1/5	□20	0.52	0.5	φ150	57	2.5	16M
1990	日立	LD-5015iCW	i	1/5	□17.5	0.5	0.5			2.8	16M
1990	ASML	PAS5500/70	KrF	1/5	□15	0.42	0.45	φ150	30	2.5m\$	
1991	ニコン	NSR-2005i8A	i	1/5	□20	0.50	0.50	φ150	65	2.7	16M
1991	ASML	PAS5500/60	i	1/5	□18	0.54	0.45	φ200	70	2.3m\$	16M
1992	キヤノン	FPA-2500i2	i	1/5	□22	0.54	0.45	φ200	47	2.9	16M
1992	日立	LD-5015iDS	i	1/5	□22		0.5	φ150	65	3	16M
1992	ASML	PAS5500/80	i		□21	0.48	0.5	φ150	88	2.5m\$	
1992	ASML	PAS5500/90	KrF	1/5	□21	0.50	0.35	φ150	80		
1993	ニコン	NSR-2005i9C	i	1/5	□22	0.57	0.45	φ150	65	3	64M
1993	ニコン	NSR-2005i10C	i	1/5	□22	0.57	0.45	φ200	50	3	64M
1993	キヤノン	FPA-2500i3	i	1/5	□20	0.60	0.40	φ200	41	2.9	64M
1993	ASML	PAS5500/100	i	1/5	□22	0.6	0.40	φ200	63	3.0m\$	
1994	ニコン	NSR-2005EX10B	KrF	1/5	□22	0.55	0.32	φ200	47		64M
1994	ニコン	NSR-2205i11D	i	1/5	□22	0.63	0.35	φ200	60	3.9	64M
1994	キヤノン	FPA-3000i4	i	1/5	□22	0.63	0.35	φ200	58	3.5	64M
1995	ニコン	NSR-S201A	KrF	1/4	25×33	0.6	0.25	φ200	50		256M
1995	キヤノン	FPA-3000EX3	KrF	1/5	□22	0.6	0.25	φ200	53	5.3	64M
1995	ASML	PAS5500/200	i	1/5	□22	0.6	0.35	φ200	80		
1996	ニコン	NSR-2205EX12B	KrF	1/5	□22	0.55	0.28	φ200	63	4	64M
1996	ニコン	NSR-2205i12D	i	1/5	□22	0.63	0.35	φ200	70	3.5	64M
1996	キヤノン	FPA-3000i5	i	1/5	□22	0.63	0.35	φ200	74	4.3	64M
1996	ASML	PAS5500/300	KrF	1/4	□22	0.57	0.25	φ200	80	5m\$	
1997	ニコン	NSR-S202A	KrF	1/4	25×33	0.6	0.25	φ200	80		256M

1997	ニコン	NSR-2205EX14C	KrF	1/5	□22		0.25	φ200	85		
1997	キヤノン	FPA-4000ES1	KrF	1/4	25×33	0.63	0.25	φ200	73	7	256M
1997	キヤノン	FPA-3000EX5	KrF	1/5	□22	0.63	0.22	φ200	90	6.3	256M
1997	ASML	PAS5500/500	KrF	1/4	26×33	0.63	0.22	φ200	96	7.7m\$	256M
1998	ニコン	NSR-S203B	KrF	1/4	25×33	0.68	0.18	φ200	85	8.5	
1998	キヤノン	FPA-5000ES2	KrF	1/4	26×33	0.68	0.18	φ200	100	8.3	256M
1998	ASML	PAS5500/900	ArF		26×33	0.60	0.15				
1999	ニコン	NSR-S204B	KrF	1/4	25×33	0.68	0.18	φ300	75	9	256M
1999	キヤノン	FPA-3000EX6	KrF	1/5	□22	0.65	0.15	φ200	117	7.5	256M
2000	ニコン	NSR-S205C	KrF	1/4	25×33	0.75	0.15	φ300	84	11	
2000	キヤノン	FPA-5000AS2	ArF	1/4	26×33	0.70	0.11	φ300	88	17	256M
2000	キヤノン	FPA-5000ES3	KrF	1/4	26×33	0.73	0.13	φ300	88	9.5	256M

出典：「日刊工業新聞」、「日経産業新聞」、「電子材料」、「Solidstate Technology」に依拠して作成。
一部他の資料にて補完。

注：原則として量産用設備を対象とし、開発用と明示された設備は除外した。

露光波長はg線=436nm, i線=365nm, KrFエキシマレーザー=248nm, ArFエキシマレーザー=193nm。

フィールドサイズの□10は10mm×10mmを、φ20は直径20mmを示す。

NAは開口数(Numerical Aperture)、価格中m\$は100万ドル、適用DRAMは量産可能なDRAMの最高集積度を示す。

ウエハサイズはスルーブットに対応しており、必ずしも最大サイズではない。

は市場に登場して以来、今日までレンズによる縮小投影露光という基本構造を踏襲しながら進歩してきた。こうしたレンズの漸進的改良によるステッパーの技術進歩は光学技術を社内に持つニコンとキヤノンにとって極めて有利に作用したのであり、同時に両社の努力の成果でもあった。光源やフォトリソの技術革新の担い手は外部の独立した専門メーカーであるが、⁽⁵⁷⁾レンズの改良は光学機械メーカーが主体的に自身の技術戦略に則った計画の上に推進できたのである。

それではステッパーの技術進歩の流れの中にニコン、キヤノン、GCA社、それに日立製作所とASML社(ASM Lithography B.V.)の技術的動向を位置づけてみよう。各社の技術戦略の違いが最も顕著に現れたのはi線ステッパーの投入時期であった。ニコンは84年に先駆的にi線ステッパーを発売するが、そのままi線には転換しなかった。1/5ステッパーの発売に遅れたGCA社は焦点深度において有利なi線ステッパーへの転換に86年から乗り出す。80年にg線ステッパーを開発していたが、同じくレンズを内製できない日立製作所は87年に量産用⁽⁵⁸⁾i線ステッパーを発表する。ところがこの時期、十分な感度を持ったi線用フォトリソは

(56) ミラー投影方式の最大の長所は、光が光学素子(ミラー)を透過しないため、広帯域の波長の光を利用できる点にある。但し同方式は革新的な発想によるブレイクスルーを要し、それに伴い装置と光学素子の構成も大きく変化する。これに対しレンズ投影方式は、光が光学素子(レンズ)を透過する際に吸収されて発熱しレンズを変形させないよう、光の波長の狭帯域化とその波長に対し透過率の極めて高い硝材の開発を必要とする。

セマテック及びそこでの露光装置開発については、井上弘基「米国半導体産業における産業政策の登場=セマテック」『機械経済研究』30号、1999年5月および宮田由紀夫「共同研究開発と産業政策」勁草書房、1997年、164~178頁を参照。

(57) 例えば水銀ランプはウシオ電機、エキシマレーザー光源は米サイマー社、レジストは東京応化工業が代表的である。

(58) 日立製作所はステッパーの開発当初、ニコン製レンズを使用した。その後は仏サーコ社、ツァイス社更にミノルタからレンズを購入した。

まだ開発されておらず、i線ステッパーは半導体生産ラインに普及しなかった。フォトレジストはその後高感度化が進み、g線i線共用レジストの開発によって半導体プロセス技術が共通化したのを受けて、90年からi線ステッパーの普及が始まる。この時期までニコンはg線によりながらレンズの高NA化を徹底して推し進め、継続的に解像度を高めることができた。しかしGCA社はi線の普及を待たずにゼネラル・シグナル社に買収され、セマテックによる製品開発支援を受けても復活することはなかった。一方キヤノンはg線からi線を経ずに直接KrFエキシマレーザーに移行すると判断して、経営資源をエキシマステッパーの開発に集中した。ところが硝材のi線透過率の向上とレジストの改良によって89年にi線化の動きが明確化するに及んで、キヤノンは急速にi線ステッパーの開発に着手したものの出遅れは避けられなかった。i線ステッパーが最も微細な回路を形成する時代は約5年間続き、その後も微細度の低い部分の露光に使用されている。

93年に日立製作所は不採算を理由に64MDRAM以降のステッパー開発を停止し、電子ビーム露光装置に専念すると発表した。同じ年キヤノンはパーキン・エルマー社の露光装置部門を継承したSVGL社(Silicon Valley Group Lithography Systems Inc.)からセマテックを通じて開発されたミラー縮小投影露光装置の技術導入を図るが、結局この提携はアメリカ側の思惑で実現しなかった。256MDRAM以降同方式が主流となるという予想の下でのキヤノンの計画は失敗し、また同方式がこの世代の主流になることもなく、キヤノンは新型ステッパーの自社開発による対応を余儀なくされた。ニコンは86年に東芝と三菱電機からの特注に基づき、プロセス及びアライメント評価用KrFステッパーを開発し⁽⁵⁹⁾、91年に64MDRAM開発用機を市販している。超LSI研究組合でのステッパー開発を通じて培われたニコンと東芝の絆は技術交替の節目においてニコンの技術開発に強い影響を与えてきた。これはニコンが的確な方向に絶妙のタイミングで技術開発を進めることができた要因の一つであろう。こうして先行したニコンのキヤノンに対する優位は維持されてきた。他方で84年にフィリップスとASMインターナショナル社(Advanced Semiconductor Materials International N.V.)の出資によって設立されたASML社は、空気軸受による案内とリニアモーターによる駆動を特徴とするフィリップスで開発されたXYステージを搭載したステッパーを製造してきたが、走査方式によるステッパーが精度的にこれらの案内と駆動方式を必須とするに及んで、技術的競争力を強めつつあるように思える。

8、90年代の半導体露光技術の進歩とその性格は、光学技術を内包するという日本のステッパーメーカーの特徴を競争力の源泉とすることを可能にしたのであり、またその結果でもあった。

(59) KrFステッパー開発時の投影レンズについての検討課題は、Kameyama, M., Ushida, K., "Excimer Laser Stepper for Submicron Lithography", SPIE Vol. 774, 1987を参照。

(4) 支援産業の発展

日本においてカメラなどの光学機械が、メーカーによって部品加工から組立まで一貫生産されることは少なく、特に高度成長期以降、光学機械工業の外注依存率の高さは顕著である。従って光学機械メーカーの生産について考える場合、メーカーを支援する中小企業の存在を視野に入れる必要がある。ここではニコンを例にとり、その外注への依存状況の変化と光学機械からステッパーへの需要変化に対する協力会社の対応について述べる。

ニコンの外注依存の端緒は戦時中の光学兵器増産要請のもとでの加工外注先の確保であった。戦争末期には「外注協力工場の充実にも力を入れ、資金援助や技術指導はもとより、人的にも密接な連携を保ち、生産増強に必要な部品や材料を調達した⁽⁶⁰⁾」が、1944年には108社からなる日本光学協会が結成された。戦後カメラ生産が軌道にのるとともに外注量が増えたため、53年に外注先31社で協会が再結成された。更に59年発売の高級一眼レフカメラニコンF、65年発売の普及型一眼レフニコマートFTのヒットによってカメラの需要は急増し、外注量の増大と外注先の開拓によってこれに対処したため、ニコンの外注比率は58年度の14.5%から、以降急激に上昇した(表-3参照)。

その一方でニコンは自ら生産子会社を設立していく。63年設立の栃木ニコン(レンズ製造)、68年設立の水戸ニコン(カメラ部品機械加工さらに組立)、71年設立の仙台ニコン(カメラ部品加工・部分組立)⁽⁶¹⁾である。日本光学・大井製作所でのカメラ生産は次第に子会社へ移管され、子会社では部品生産から一貫組立へと進んだ。その結果88年にはニコンからカメラ組立職場がなくなった。前掲表-3のように85年以降ニコンの生産構成に占める半導体関連機器の比率が急増

表-3 ニコンの外注状況の推移

年度	生産高比率		外注比率	関係会社発注比率	外注工場数
	カメラ	半導体関連機器			
1960	56.5%	%	33.0%	%	70
65	58.3		42.4		170
70	62.4		57.6		500
75	67.9		56.5		550
80	66.3		62.9	41.9	500
85	52.5	17.0	66.5	40.0	600
90	41.0	32.5	66.2	49.8	800
95	21.2	60.0	65.9	58.0	800

出典：『有価証券報告書』各年版より作成

注：1960年度は下半期のデータ

外注比率=外注加工費/製造総費用

関係会社発注比率=関係会社外注費/外注加工費

(60) 前掲『ニコン75年史』90頁。

(61) 他に生産子会社として、愛知ニコン(74年設立、眼鏡用レンズ)、那須ニコン(79年設立、眼鏡用プラスチックレンズ)、黒羽ニコン(80年設立、顕微鏡対物レンズ加工)、蔵王ニコン(81年設立、測量機、顕微鏡の部品加工、投影機の組立調整)、Nikon(Thailand)(90年設立、レンズ)がある。

するが、それに伴って関係会社への発注比率が増加している。栃木ニコンの生産はカメラ用交換レンズからステッパーの縮小投影レンズ、更に本体組立てへと移行し、従来高級一眼レフの生産を中心としてきた水戸ニコンでもステッパーのレンズ鏡筒などの部品生産の受注が急増した。同様に一部協力会社でもステッパーの部品生産への取り組みが始まる。

92年時点でニコンの協力事業協同組合に所属する協力会社は53社である。このうち32社が機械加工ないし機械組立を、10社がレンズ研磨等の光学素子の加工を担当している。機械加工・組立の協力会社であるA社は日本光学の技術者であった現会長によって46年、川崎市に設立された。A社は創業後まもなく日本光学の下請け加工、続いて自社ブランドのポンプ製造を始め、以来産業用ポンプ生産と光学機械の下請け製作を事業の中心としてきた。光学機械分野では日本光学のほかキヤノンからも受注して、眼鏡用レンズメーター、工業用万能投影機、8mm映写機、測量機(レベル)、カメラ用オートドライブ、カメラ部品などの加工、組立が行なわれた。高度成長期の69年には設備拡充と人材確保のため山形県白鷹町に山形工場を開設し、以後同工場がA社の主力製造拠点として発展していく。しかしその後のカメラや光学機械の受注減少の中で、A社は84年からニコンの半導体製造装置の部品、ユニットの受注を始めた。従来の光学機械やカメラから半導体製造装置への生産の転換は、高精度加工と大物部品加工に対応するため、マシニングセンタや門型5面加工機など多数の大型工作機械の新規導入、3次元測定器などの計測機器の購入、組立工場へのクリーンルームの設置を必要とした。現在、A社の資本金は4,000万円で、270名の従業員を擁し、売上構成はポンプ44%、ステッパー部分ユニット36%、残余が光学機械、精密機械加工となっている。ステッパーの中でA社が製造している部分は、レチクルの収納部、異物検出部、搬送部からなるオートレチクルローダーと投影レンズ保持装置用外枠である。このようにして比較的規模の大きい協力会社は、設備機械の転換を行なってニコンのカメラ、光学機械からステッパーへの主力製品の転換に対応した。もっともステッパーの枢要部品の機械加工、仕上、部分組立、組立、調整は社内あるいは一部、直系子会社で行なわれているのであり、従来カメラ部品等を製作していた協力会社すべてが、サイズ、精度、生産台数の異なるステッパーの部品製作に転換できたと考えることはできない。

5. おわりに

これまでステッパーの生産に成功してきたニコンとキヤノンは光学機械生産という共通項を持ちながらも、その成立ちや戦後の事業展開の様相は異なっていた。軍事的要請によって国策的に設立されたニコンは戦前から蓄積された光学技術と精密機械技術を基盤に、戦後製品の民

(62) 『日刊工業新聞』、1997年9月4日。

(63) 国内カメラ生産は仙台ニコンに集約することが発表されている(『日刊工業新聞』、1996年11月19日)。

(64) 『光とマイクロと共に ニコン75年史 資料編』1993年、60頁。

(65) A社についての記述は同社総務課長M氏からの聞き取り(2000年1月28日)とA社50年史編纂委員会編『A社の歩み50年』1996年による。

需転換を図り、高度成長期にマニュアル一眼レフカメラで品質の評価を確立した。戦前に距離計連動カメラの国産化をめざす中小企業として発足したキヤノンは、戦後早くから光学・精密技術に電子技術を加えて、電卓から複写機、更にプリンターへと積極的に多角化を推進し、企業規模を拡大してきた。ニコンは低成長期に入ってからカメラ市場の成熟、高級一眼レフからコンパクトカメラへの需要の変化、カメラの電子化傾向の中で、競争力維持に苦しみ、高技術商品である半導体露光装置へ事業の重心を移した。キヤノンはその経営多角化戦略の一環として、またその技術的核とするため半導体露光装置へ進出した。

ステッパーを開発しようとする企業にとって、まず第一に必要なのは精密機械技術であった。ニコンの精密機械技術は戦前の兵器や測定機の生産で最初の基盤が作られ、戦後は研究機関やメーカー向け特注品を製造する中で先端技術に挑みそれを獲得してきた。こうした単品の特注品製造は量産品生産より熟練技能者への依存度が高く、彼らの維持、養成につながった。これはニコンの製造技術面の特性となった。そして特注品製造の過程を通じてステッパー開発の技術的基盤が段階的に自ずと準備されていた。高度成長期にブランド力を持ったカメラで利益を上げながら、他方で要求水準の高い先端技術分野からの特注品に対応した意義は大きい。資金的に見ても、売れるかどうかわからない新製品を自己責任の下で開発するのではなく、売り先の決まっている特注品を製造することは資本節約的に手持ちの技術領域を広げることになる。しかもカメラはサイズが小さく量産品であるのに対し、ステッパーはサイズが大きく受注生産品である。ニコンが手掛けてきた特注品はカメラの量産では経験しえない、ステッパーに近いサイズ、精度を持つ製品の少量生産の経験をももたらした。ステッパーの開発にあたっては特注品の単品生産の経験が不可欠だったのであり、その生産拡大に際しては市販品の量産技術の経験が生かされた。高解像力レンズの場合もそうであったように、大きな市場を求めて量産すると共に、高い水準の特殊な需要に応じてきたことが企業の技術基盤を豊かにしたのである。一方キヤノンの精密機械技術の形成過程はニコンのような技術の内部蓄積が唯一の方法ではないことを示唆している。キヤノンは世界的先端技術への接触によって、より高い技術を獲得できた。これはニコンの戦前の光学技術の形成についても見られるように、キャッチアップ過程では有効であった。そして精密機械と高解像力レンズの需要拡大に対して、ニコンよりも企業規模が大きく資金力の豊かなキヤノンは製造および計測の機械化を推進して、製造ラインにおける熟練技能の排除に努めた。ニコン、キヤノンの両社はそれぞれの強みを生かして独自の対応を採ったのである。

更にその後20年間にわたるステッパーの技術進歩の特性は光学技術を持つニコンとキヤノンの優位性を持続させたのであり、同時に両社による着実なレンズ改良の結果であった。とりわけニコンはユーザーとのつながりがより緊密であったため、技術の選択と新技術投入の時期設定がよりの確であり、また硝材の開発能力を持つため、レンズ設計の自由度がより高かった。このためニコンはキヤノンに対する優位を維持することができた。しかし90年代後半に入って、

これまでの日本の光学機械メーカーの国際的な圧倒的優位は徐々に失われつつある。解像度が $0.1\mu\text{m}$ に近づいてきて光学系を用いた露光方式がいよいよ限界に近づいており、必要とされる要素技術の構成が大きく変わる可能性が高まっている。またレンズ縮小投影露光装置でも90年代後半になって走査型が一般化し、ここに至ってステージの案内面に空気軸受が、駆動装置にリニアモーターが使用され始めた。ステッパー開発の初期からこれらの要素技術を採用していたフィリップスの子会社 ASML 社はここ数年来シェアを次第に伸ばしてきており、更に2000年10月にミラー縮小露光装置を手掛けてきた米 SVG 社を買収して、ステッパーの市場シェアでニコンを上回ろうとしている⁽⁶⁶⁾。要素技術の変化はこれまでの技術蓄積に基づく優位性を弱め、製造費に占める購入品費の増加をもたらすと共に、露光光源やレンズ硝材のメーカーは世界的に数社に限定され、製品の差別化が困難になっているのである。

Development of Equipment for Step-and-Repeat Projection Exposure For IC Fabrication and its Diffusion

by

Yoshito HIROTA

(Osaka University)

Equipment for step-and-repeat projection exposure or a stepper is crucially important to LSI circuit fabrication. The first commercial stepper was developed in 1977 by the GCA Corporation of the United States. Recently, however, the global market has become part of an oligopoly of the Japanese camera makers, Nikon, Canon, and ASML, a subsidiary of Philips.

The David W. Mann Co., a predecessor of GCA, was founded about 1950 as an astronomical instrument maker. Depending on its skilled mechanics, the company began in 1961 to produce equipment for IC fabrication, especially photo repeaters. The stepper was developed by attaching an alignment device to a photo repeater. Nikon was familiar with the equipment and supplied one of the key components of photo repeaters, a high-resolution lens, to GCA. When the demand for the steppers increased significantly, GCA was not able to deliver the products of homogeneous quality on time. GCA and its lens supplier, Zeiss, had had no experience producing precision products in large quantities. In 1977, Nikon's first prototype stepper was ordered by cooperative laboratories of the VLSI Technology Research Association, which was subsidized by MITI. In 1980, Nikon-built steppers were placed on the market. Nikon had acquired the technology of optics

(66) 『日経産業新聞』, 2000年10月8日。ASML社の強みとしては、モジュール設計による顧客の設備投資負担の軽減(一部取替による性能向上)、モジュールの平行開発・製造による短納期、親会社フィリップスとの技術協力、ツアイス社との提携などが挙げられている。

and precision mechanics as it developed an assortment of high precision optical instruments that included the ruling engine and measuring machines. Nikon was also experienced in producing mass-producing cameras as well as one-of-a-kind items. Thus, Nikon overtook GCA on the world market. Thereafter, the Japanese stepper builders by themselves have been improving the capacity of resolution through gradual improvements of projection lenses and by occasional changes of light sources by special suppliers.