

半導体の歴史

— その23 20世紀後半 超 LSI への道 —

超エル・エス・アイ技術研究組合（3）と 日本光学工業におけるステッパー開発経緯



株式会社フローディア
代表取締役社長

おくやま こうすけ
奥山 幸祐



垂井康夫

超エル・エス・アイ（LSI）技術研究組合の超 LSI 共同研究所の大きな成果の一つであるステップ式縮小投影露光装置（ステッパー）の開発の意義を理解して頂くために、前稿ではホトリソグラフィ技術と、その成り立ちについて触れ、効率的な縮小投影露光を可能にしたステッパーの出現が微細加工技術の限界を突き破り、半導体集積回路の高集積化を可能にしてきたことについて述べた。この稿では、

如何にステッパーが生み出され、量産適用されていったかについて触れる。

1978年にステッパーを世界で初めて発売したのはアメリカの精密機器製造会社 GCA（Geography Corporation of America）である。GCA 社は1958年に設立され、航空写真の解析を行っていたが、その後、デビット・マン社（David Mann Company）が1961年に世界最初に縮小投影技術を使ったフォトリピーター装置を発表すると、これを吸収合併し、1968年には10倍のマスクを製作できるパターンジェネレーターを開発している。この装置には X 及び Y 方向に移動可能な高精度の XY ステージが搭載されている。1976年には、ステージの位置決めヒューレットパッカード社のレーザー測長器を搭載したパターンジェネレーターとフォトリピーターを発表しており、このフォトリピーターでは除振台や精密な温調空間を作るための恒温チャンバーなどが採用されており、この時点ですでに、ステッパーに

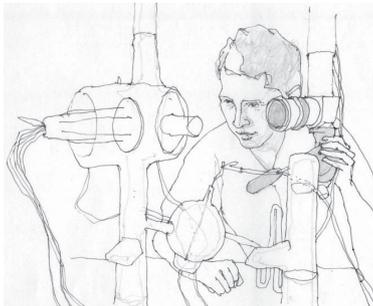
必要な要素技術が開発されている。1980年代初頭には GCA 社のステッパーが全世界の約90%を占めている。

この GCA 社を猛追したのが、日本光学工業株式会社（以降、日本光学工業と記す。後のニコン）とキヤノンの2社であり、それを導いたのが超 LSI 共同研究所である。超 LSI 共同研究所は1976年に日本光学工業にステッパーの試作機を発注し、日本光学工業は1978年の GCA 社のステッパー発売と同時期に試作機を納入する。その後、日本光学工業とキヤノンは量産機を開発し1980年半ばには GCA 社を抜き、1980年代後半には両社で世界の90%を占めるようになる。

前稿にも記載したように超 LSI 共同研究所の役割は、単に研究所に研究員を集めて研究を進めた事ではなく、むしろ研究所が核になり、研究所長である垂井康夫の「基礎的共通の」と言う言葉の元に日本国内の半導体製造メーカー、材料メーカー、装置メーカー、及び国家機関を1つに結集し、電子ビーム装置やステッパー開発、またはシリコンウエーハの品質向上に向け、それらを有機的に結合させたことにある。この役割を果たすために超 LSI 共同研究所は、半導体産業における技術動向、課題、対応策を具体的且つ的確に捉え、関連メーカーが持っている個々の技術力、開発力を見定めることで開発委託メーカーを選抜し、そのメーカーの特質を最大限に生かすことに努める。日本におけるステッパー開発は、その構図が最大限に生かされた事例と言える。この時の関連メーカーが日本光学工業とキヤノンである。超 LSI 共同研究所から、日本光学工業が縮小投影露光型のステッパー試作機、キヤノンが等倍型投影露光型のステッパー試作機の発注を受ける。この試作機開発をきっかけに、その後、両社とも縮小型投影露光型のステッパーを製品化し、LSI の高集積化を可能にする超微細加工技術を長期間に亘り牽引して行くことになる。特に、この時点で、縮小投影露光型のステッパー装置の開発を依頼された日本光学工業は開発に必要な3つの基本技術を持ち合わせており、この超 LSI 共同研究所からの試作機の受注によって、日本光学工業自らこれらの技術を融合させ、ステッパー装置を完成させる機会を得る。これによって、日本光学工業は半

導体装置産業へ本格的に参入することが可能となり、ステッパ装置の世界市場において20年間程の長期に亘ってトップの座を維持することになる。1984年にオランダのフランダース地方政府が策定した半導体共同研究所 IMEC (Inter-university Microelectronics Center vzw) と、同年にフィリップス社から分社化して設立され同じくオランダに本拠地を置く ASML 社との長年の戦略的パートナーシップと世界戦略によって2000年代半ばに入り、ASML 社にその座を奪われることになるが、それまでの20年間ほどの長期間に亘る繁栄の原点は超 LSI 研究所からのステッパ装置の試作機受注が起点となる。そして、この間、世界の先端微細加工技術を日本のこの2社で牽引してゆくことになり、1980年代後半には2社で世界のステッパ装置の90%のシェア(日本光学工業60%、キヤノン30%)を占めている。また、その基本技術となるレンズを中心とする光学技術を用いた光学機器の分野は今日でも大きな国際競争力を維持し続けている。

■ 超 LSI 共同研究所における光露光技術の位置付け ■



武石喜幸

半導体のはなし21に記載した1975年の超 LSI 共同研究所設立準備会議時点では、共同研究所が目的とする1.0 μm プロセス以降の世代の加工技術として光露光技術は研究内容には取り込まれず、電子線ビーム技術に絞られている。その後、1976年初頭の共同研究所設

立における組織編制も電子ビーム技術、シリコン結晶技術、評価技術で組まれており、今更、光露光技術を取り上げることに意味がないと言う雰囲気の中で研究が開始されている。

その進め方に疑問を持ったのが第3研究室室長の武石喜幸である。電子ビーム方式は電子ビームを走査しながらパターンを描画する手法であるため、光露光方式のようにマスクと言う原版を作って、これを一括して転写して行く方法に比べると量産性が圧倒的に低くなる。光露光方式に本当に未来がないのか、検討を続けるべきではないのかと疑問をもったのである。この時点で、前稿に記載したような縮小投影露光により、それまでのウェーハ全面を対象にして求められていた焦点深度のタガを外すことにより解像度を向上し、光露光技術の限界を変えられると明確に判断したわけではないが、生産数の少ないマスクパターン描画には高精度描画が可能な電子ビーム方式になるが、量産性が

要求されるウェーハ上の微細パターン加工は光露光方式になる可能性が高いと見込んだのである。1976年当時はコンタクト・アライナーからプロキシミティ・アライナーに切り替わり、従来のコンタクト・アライナーでの欠陥が激減し量産歩留が向上している時期である。しかしながら、プロキシミティ・アライナーでは解像度限界が4 μm と悪く、この解像度を上げる手法として投影露光方式に望みを託す。武石は篠崎敏明、松本らに相談し、日本光学工業とキヤノンを個別に検討し、日本光学工業に10対1の縮小投影露光装置を、キヤノンに1対1の等倍投影露光装置の試作機を発注することを決意する。日本光学工業に縮小投影露光装置試作の発注を決めたのは、「ウルトラマイクロ・ニッコール」、「ルーリングエンジン(ruling engine)」、「光電センサー」と言った高解像力投影レンズや高精度高速ステージ操作、高精度位置検出技術などのステッパ装置に必要な3つの技術を持ち合わせており、特に日本光学工業の高解像力投影レンズの技術力を認めたためと推測される。武石らはこれらのステッパ装置試作機の発注を共同研究所で提案するが、光リソグラフィーは共同研究所の主旨に合わないといわれ、電子ビーム描画装置で作成したマスクを検証する装置と名前をごまかして認めて貰っている。試作機を発注したのは共同研究所設立と同年の1976年である。受注した日本光学工業とキヤノンは2年を費やし、1978年に日本初の本格的なステッパ装置を完成させて共同研究所に納入している。等倍投影露光型ステッパを納入したキヤノンも、その後縮小投影露光型のステッパ装置を開発し、両社とも1980年代初頭にはLSI量産用のステッパ装置を完成させることになる。

以下、日本光学工業におけるステッパ開発に至るまでの経過、そして開発、量産について株式会社ニコンホームページ「Nikon 知られざるニコンの歴史」、鶴田匡夫著「第7・光の鉛筆」、吉田庄一郎著「超精密マシンに挑む ステッパ開発物語」などを参考に振り返る。ここではステッパ装置開発に焦点を絞り、そこに関与した日本光学工業について振り返るが、1950年代後半から1970年代にかけて、欧米の技術力を吸収しながら工夫を重ね、独自技術へと進化させることで、1980年代から1990年代の繁栄を築く様子は日本光学工業に限らず、ライバル会社のキヤノンも含め多くの日本企業が歩んだ道である。

■ 日本光学工業 ■

日本光学工業は1917年7月に光学兵器の国産化を目的として、東京計器製作所光学部・岩城硝子製造所・藤井レンズ製造所が合同し、三菱の資本により設立されている。当時、日本海軍は潜水艦建造を計画していたが第一次世界大戦中であり、光学機器の先端を行くドイツが敵国であったため、潜望鏡が手に入らず、国産化に踏み切らざるを得なくなり

設立されたものである。第一次世界大戦が翌年終了すると、1921年にドイツ人技師8名を招聘し光学技術を向上させ、潜望鏡、双眼鏡、狙撃用眼鏡、測距儀などの軍需光学機器を製造していく。戦前は東京光学と軍需光学機器製造の双壁として「陸のトーコー・海のニッコー」と称されている。1931年に写真レンズの商標を「ニッコール」(Nikkor)としている。1945年に太平洋戦争終結に伴い、眼鏡、顕微鏡などのレンズや主力製品となるカメラなどの民生品に転換してゆく。1946年、35mmカメラの名を「ニコン」(Nikon)と定め、後にブランド名となる。ドイツのカメラ名門メーカー「エルンスト・ライツ・オプティッシェ・ヴェルケ (Ernst Leitz Optische Werke)」に追いつき、追いこすことを目標として1948年の6×6cm判二眼レフカメラ、35mm高級カメラ「ニコンI」を、1950年「ニコンS」を発売する。この年にライフ誌のハンク・ウォーカー (Hank Walker) は、ニコンSとニッコール85ミリF2レンズを朝鮮戦争の取材に携行、ニューヨーク・タイムズにてその優秀さを伝えている。1957年に「ニコンSP」を発売してゆく。この「ニコンSP」は後年、エルンスト・ライツ社の「ライカM3」にならぶ名機として高い評価を得ているが、1954年に発表された「ライカM3」はレンジファインダーカメラとして当時最高とまで言われるほどの技術を余すところなく投入しており、その性能の高さのあまり日本光学工業を始めとする日本のカメラメーカーがそろって一眼レフカメラへと開発方針を大転換させるきっかけになる。1959年、ライカ判一眼レフカメラ「ニコンF」を発売する。このカメラは「ニコンSP」をベースに設計された最初のプロ用一眼レフカメラであり、このとき採用された「ニコンFマウント」は同社レンズの標準規格として以後使用され続けることになる。この一眼レフカメラへのシフトにより、エルンスト・ライツ社を追い越しカメラ部門は大きく成長して行くことになる。一方、「ライカM3」の出来が良すぎたエルンスト・ライツ社は1眼レフ化に乗り遅れてしまい勢いを無くして行く。

■ ウルトラマイクロ・ニッコールの開発



脇本善司

1959年にジーン・ヘルニがプレーナー技術を発表すると、日本光学工業に翌年の1960年初頭には日本国内の電気関係メーカーや印刷会社から、マスク製作用レンズについての問い合わせが来るようになり、マスク製作用レンズ「ウルトラマイクロ・ニッコール105mm F2.8」を1962年に開発したことは前稿に述べた。このレンズを開発したのが脇本善司である。脇本は1948年に東京大学工学部大学院 (小穴純研究

室) を卒業し、日本光学工業に入社している。当時、日本光学工業では既にニコンカメラが発売され、レンズは初期の50mm F3.5、50mm F2、50mm F1.5、85mm F2などが発売されている。脇本の最初の仕事は85mm F2の修正である。当初簡単に思われた修正は、地道な計算を経ないと無理であることを悟るとともに、その面白みにはまって行く。その後、当時最高級のカール・ツァイスのレンズであるゾナーに近接領域で性能が著しく落ちるという欠点があることを見出し、これと差別化を図る為に、より近接での接写が可能なレンズ開発に挑戦するなどを初め、多くのレンズ開発を繰り返しながら力をつけて行く。その中で、国会図書館の漢字原稿をコピーする際のマイクロレンズの開発を担当する。マイクロレンズは複写、または縮写するレンズである。この開発は官民共同のプロジェクトで、東京大学理工学部教授の小穴純 (小穴は脇本の大学時代の恩師) の依頼で始まる。この依頼を受けた日本光学工業は東 (小穴と同窓で脇本の先輩) と脇本の2人が担当する。当時のマイクロレンズは英文字の複写はできたが、漢字のコピーには解像力が低すぎ、新しいマイクロレンズの設計を求められる。この時期に、アサヒカメラの依頼によってローライフレックスについていた抜群の解像力を持つセノタールレンズを解析していたため、これを参考に独自技術を用いて開発したのが、日本光学工業初のマイクロレンズとなるマイクロニッコール5cm F3.5であり、1954年に完成している。このレンズにフィルターを付けて単色に近い光源で試験し、画面の中央部では数100本/mmの解像力を得ている。小穴はこのレンズを用い、1955年に岩波文庫版「たけくらべ」70ページを縮小率1/13.5、1966年に「JOSA1955年1月号」74ページを縮小率1/26.8でそれぞれのマイクロカード (125mm×75mm) を作成している。脇本はその後、ニコンS用のマイクロニッコールのバックフォーカスを長くするために、修正設計し、焦点距離を5mm伸し、マイクロニッコール55mm F3.5を開発し、1961年に鏡筒単体で等倍まで撮影可能なマニュアルのタイプのレンズが発売される。

日本国内の電気関係メーカーや印刷会社から、半導体製品製造用のマスク製作用レンズについての問い合わせが来るようになったのは、その前年の1960年初旬である。各メーカーは具体的な使用目的や条件を明らかにしないためにマイクロニッコールの使用を進める。その後、電機メーカーがIC製作に必要なマスクを大手印刷会社に依頼しているが、印刷会社で使用している製版用レンズではその要求に答え切れず、日本光学工業に高解像用レンズの問い合わせをしていることを知る。日本光学工業では、この要望に応えるために1961年3月から開発プロジェクトを発足させる。レンズの目標仕様を、使用光e線 (水銀ランプの $\lambda = 546.1\text{nm}$) 単色、撮影倍率1/30、画面サイズ20mm角 (一括露光を想定)、解像力500本/mm以上とする。その担当を

任されたのが脇本であり、この仕様に基づき、105mm/2.8のマイクロレンズの設計、半年の試作期間を経て1962年8月に完成する。それまで、写真用の解像力は収差の関係で、300本/mmが限界とされたが、400本/mmの解像力を得る。当初の目標値はクリアしなかったものの、当時最高の解像力で、このレンズをウルトラマイクロ・ニッコールと命名する。

このウルトラマイクロ・ニッコールの性能向上を脇本らに実現させて行くのが、脇本の恩師である小穴である。小穴は日本光学工業に超マイクロ写真用として解像力1000本/mmのレンズを要望してゆく。脇本らは、顕微鏡の40倍対物レンズをもとに撮影倍率1/25、e線単色の仕様で29.5mm/1.2のレンズの設計を開始する。コーティングに初めて多層反射防止膜を使用するなどをして、1964年11月に逐次露光法を想定した画面サイズ2mmの範囲に1260本/mmの世界最高の解像力を持つウルトラマイクロ・ニッコールの開発に成功している。

小穴は、このレンズを用いて小説「チャタレイ夫人の恋人」の英文全ページを当時の10円切手大の中に縮写し、同一レンズを用いて拡大しても原本同様の解像度が得られることを証明し、その年の9月に国際光学会議で発表し大きな反響を得ている。小穴はマイクロニッコールから始まり、ウルトラマイクロ・ニッコールにかけて、脇本らに超解像のレンズの製作を求め、完成したものを解像力テストすることでレンズの技術力向上に貢献している。日本光学では、半導体ウェーハ径、撮影装置の精度、総合撮影倍率、感光材料などの特性に応じたレンズ設計をし、ウルトラマイクロ・ニッコールシリーズとして一括撮影用2本、逐次撮影用3本の新レンズを追加し、1965年8月にサンフランシスコで開催された第10回写真光学装置技術協会（SPIE）で発表している。これらの開発を進めている最中の1965年4月に脇本、高橋、川上の3名が「超精密複写用レンズの開発」で、科学技術長官表彰を受けている。ステッパー開発を開始する11年前のことである。

III ルーリングエンジン



吉田庄一郎

後の1976年にステッパー装置開発を牽引することになる吉田庄一郎は、日本光学工業のレンズ・カメラ事業の黎明期である1956年に日本光学工業に入社している。配属されたのは花形のカメラ設計部門ではなく、大学や研究所などから受注する特注品の設計部門である。最初の仕事は東大東京天文台が進めていた36インチ（約91cm）の反射型天体望遠鏡の開発プロ

ジェクトへの参画である。日本光学工業はこの望遠鏡を2台受注し、1台を岡山天体観測所に収めることになる。吉田はそこでいきなり望遠鏡の設計を任される。戦後間もない時期で、専門技術者がいない為である。吉田は海外の先進技術の情報を集め、構造研究を行い、4年がかりで完成させ、1960年に設置している。

その後、直ぐに2号機に取り掛かる。1号機の経験を元に改良に取り掛かったが、相変わらず海外の雑誌や文献などの最新情報の学習が不可欠であることに疑問をもつ。当時、海外で開発された工作機械を購入し、その機械を使用して製品となる装置を製作するのが当たり前環境であり、機械技術が欧米から大きく遅れをとっている。明治維新から90年経つても、真の技術力にはまだ大きな格差があったのである。吉田は入社後4年間で一つの仕事を成した時点で、このままマザーマシンとなる工作機械や検査装置などを海外に依存して良いものかと疑問を持つ。吉田29歳の時であり、配属が花形のカメラ設計部門でないことへの不満を持っていたこともこの疑問の原因となっていたようである。カメラ設計部門が「ニコンF」を前年に発売し、「不朽の名機」と騒がれていた時であり、自分も何か大きい事を成し遂げたいと言うフラストレーションが疑問を膨張させていたようである。その折に、吉田は「ルーリングエンジン」と言う超精密刻線機の開発プロジェクトに出会う事になる。日本光学工業は1961年に東京教育大学光学研究所からルーリングエンジンの受注を受け、吉田はその開発メンバーに指名されたのである。

ルーリングエンジンは回折格子を製造するための工作機械である。回折格子は分光器の心臓部であり、ガラスや鏡面に細かい溝を設け、そこを通過する光を回折、干渉させてスペクトルを得る光学部品である。1mm幅に1000本程度の溝が必要であり、この微細な刻線を行うのがルーリングエンジンと呼ばれるマザーマシンである。ガラスや鏡面にダイヤモンドカッターで溝を刻み、溝と溝の微細なピッチ（間隔）を維持しながら真っすぐに削るには、ダイヤモンドカッターとガラス基板の精密な位置制御や駆動制御が必要である。欧米では、このような精密加工がかなり昔から行われていたが、日本では1960年代までこの精密加工技術がなく、海外から輸入したルーリングエンジンで回折格子を製作している。1960年代、日本光学工業では分光分析機を新事業として検討しており、回折格子を内作するためのルーリングエンジンの必要性が認識されるようになる。

吉田はこのルーリングエンジンを1号機と2号機の2度で亘って開発することになる。1号機は1961年から1964年、2号機は1967年から1971年にかけて開発される。1号機は3年で完成するも精度や安定性において実用に耐えられるものではなく、学術や研究用の小型の回折格子を作成するにとどまり、開発プロジェクトが解散してしまう。吉田は

諦めきらず、その後もボランティアで改良作業を続ける。

ルーリングエンジン1号機の刻線方式は、1956年から4年間にわたり文部省によって行われた回折格子刻線機基礎研究の成果をふまえたもので、ダイヤモンドカッター側でピッチを設定し、ガラス基板が往復して刻線する方式である。ダイヤモンドカッターの位置決めにはサブマイクロメートル単位の精度が求められ、ルーリングエンジン1号機ではそれが十分には達成できていない。ルーリングエンジン2号機の開発は、文献調査から始める。吉田と同期入社で当時、主任研究員の鶴田匡夫（ニコン元副社長）を含めた4人のスタッフが、入手可能な文献はすべて読み尽くし、ルーリングエンジン1号機の出来具合も教訓として刻線方式をマサチューセッツ工科大学（MIT）が確立した、ダイヤモンドカッターとガラス基板の双方の動きを完全に同期させる制御システムを採用する。後にこの制御システム方式がステッパーでの駆動部分の動作方式の原型になる。ガラス基板を連続的に移動させピッチを設定し、ダイヤモンドカッターを往復運動させて刻線する方式であり、ダイヤモンドカッターの動きは光学センサーでモニターし、ガラス基板の移動はレーザー干渉計で計測する。光学センサーとレーザー干渉計から得られたそれぞれの位置情報にもとづき、ガラス基板の移動速度を調整する方式である。MITはこの方式によって、精度の高い刻線を実現していたのである。1968年、吉田は米国に出張しMITのルーリングエンジンを製作していた米国の工作機器メーカーであるムアー・スペシャル・ツール社（ムアー社）を見学する機会を得る。実際に世界トップレベルの技術を見て技術格差に愕然とする。予算や納期を考慮し、ルーリングエンジン2号機のダイヤモンドカッターホルダーやガラス基板搭載ステージなど、基本的な機械部分はムアー社に製作を外注することを上司に提案する。あまりの投資額の大きさに、「どうしてもやりたいのなら、社長のところへ行って掛け合ってみろ」といわれる。吉田と研究所主任研究員の鶴田は、社長白濱浩の部屋を訪ねる。そして、白濱と担当役員を前に、「ルーリングエンジンは、会社の未来に不可欠な機械です」と必死に説得した所、白濱は「ダメだ」とはいわず、基本的な機械部分はムアー社に製作を外注することが決定する。

一方で、レーザー干渉計を含むガラス基板搭載ステージの制御システムの開発、ダイヤモンドカッターの研磨技術、回折格子の量産に向けたレプリカ製作技術などの開発は日本光学で行う。

1971年、ルーリングエンジン2号機の基本部分が、横浜製作所の専用室に据え付けられる。吉田らは世界最先端の装置を隅々まで調べ上げ、自前で製作できる技術力を蓄えて行く。1974年、分光分析機「ニコン・モノクロメータG-250」に搭載する2インチ角の回折格子の量産が開始される。ステッパー開発を開始する2年前のことである。

日本光学工業はルーリングエンジンの経験によって精密工作技術、計測制御技術などを得ることができ、これらの技術と光電センサー技術、超高解像力のウルトラマイクロ・ニコールを基本要素としてステッパーを開発することになる。国立科学博物館はルーリングエンジン2号機を昨年、2011年度の重要科学技術史資料登録に選定し、昨年9月27日に館長の近藤信司から吉田に登録証を授与している。選定理由には、「ルーリングエンジンの技術は、半導体露光装置の基盤技術につながり日本の半導体製造技術の礎となった」とある。

光電センサー技術と半導体産業への参入

吉田は1968年の1か月に及ぶ米国出張で、米国の技術力の高さに心を揺さぶられる。この出張とルーリングエンジン開発の経験から浮かび上がってきたのが「オプテックス（光学）とエレクトロニクスの融合」と言う考え方である。吉田は37歳になる翌年の1969年に「光電センサー会議」を社内です立ち上げ、この会議を3年間続けている。参加自由で15人程のメンバーである。「光電センサー」とは光を電気信号に変換して、視覚に捉えられないものを読み取る装置を指している。光学機器にエレクトロニクスを導入して人間の視力を遥かに上回る光の目を作り、それをビジネスの種にしようとする吉田が考えて立ち上げた会である。社内の光学、機械、電気専門家が垣根を取りさり議論を重ねて行くにしたがい、徐々に新製品の構想が生まれるようになる。このグループが掲げた目標が「光電センサーを備えた認識ロボット」である。工業用自動引っ張り試験機、タイヤの識別機など光電センサーを組み込んだ自動化装置を顧客から受注して製品化に結び付けて行く。しかしながら特注品であり、1台が売れてもリピート品に結びつかない。次々と新製品を生み出しては、新しい製品を考え出してゆかなければならず、後年、吉田は著書で、この時のことを「熱いタン屋根の上のネコ」と比喩している。

リピート品が取れだしたのが、レーザー座標測定器であり、半導体製造に使用されるフォトマスクの検査装置である。ルーリングエンジンで開発した超精密技術に光電顕微鏡を組み合わせた装置で、0.1 μ mまで検出可能なマスク欠陥検査装置である。第一号の顧客が日立であり、その後、富士通、三菱電機、東芝と受注が続き、一連の納入実績が各種の寸法検査装置やマスクの自動欠陥検査装置など周辺機器の開発に結びついてゆくきっかけとなる。この装置をきっかけとして日本光学工業が半導体産業に足を踏み入れて行くことになる。

吉田らは1972年頃になると、すでにステッパー装置のコンセプトを持つようになる。この頃、脇本と吉田の2人を、ボストンに本社があるGCA/デビットマン社の社長ウィラーが訪ねており、この時、吉田らは日本光学工業のレン

ズを使った縮小投影型露光装置（ステッパー）のコンセプトを提示している。その時、ウィラーは「そんな精密な位置決め精度を求められる機械は、生産性が低く、量産に適さないだろう」とあまり興味を示さなかったが、その4、5年後に米国でウィラーらがステッパーの開発を発表しており、吉田は「やられた」と残念がる。吉田らと対談した時点ではウィラーはマスクパターン描画には縮小投影型露光は適しているが、ウェーハ上での微細加工には量産性はないものと考えていたが、その後を考え直したものと推定される。冒頭に示したように、ウィラーらは1976年にはステッパーの要素技術を取り揃えている。

脇本らのレンズ技術に、吉田が開発を進めてきたルーリングエンジン、光電センサーなどの技術が融合できる状態が、1972年から1974年頃には日本光学工業の中にも出来あがっており、ステッパーを作れと言う要求が半導体業界から生み出されれば、直ぐにでも対応できる技術力が整う。

■ ステッパーの誕生

1976年に超LSI共同研究所からステッパー装置の受注を受けた日本光学工業は開発に踏み切る。吉田が開発を取り纏め、脇本らに協力を求めながら、機械関係の金子茂三郎、レンズ検査の大野康一など優れた技能を持つ熟練者たちを含む多くの専門家を招集する。金子や大野らは日本光学工業内の「専修科」と呼ばれた中・高卒者のための技術養成所を卒業し、独学で専門知識を付け、大卒以上の知識を持ち合わせた優秀な技術者である。当時、戦後間もなく、実力があっても家庭の事情で進学できない人が多く、このような人々が現場力が保たれていたのである。金子はステージ製作で高精度の機構の実現に、大野は高性能レンズの検査に尽力している。ステージ移動の精度は「東京から富士山山頂に向かって真っすぐに矢を放ち、テニスボールに当てる」水準が求められており、それを実現している。

1978年7月にステッパー装置の試作機 VL-SR2が完成し、超LSI共同研究所に納入している。超LSI共同研究所は日本光学工業がこの装置の設計においてきわめて慎重であったと評価していることが、研究所長である垂井康夫の著書「世界をリードする半導体共同研究プロジェクト」に記載されている。たとえば、投影光学系は後軸を垂直に配置して結像性能の安定化を図る一方、マスクの配置も垂直に配置することによってほこりの付着による欠陥の発生を予防している。光源には超高压水銀灯からのg線を利用しているがこの水銀灯を本体から分離して配置し、光を集光レンズで集めて短波長化した後に光ファイバでコンデンサ光学系に導くことにより、水銀灯の熱線を遮断する工夫を施している。光ファイバはその間で組み換えて、光源の「むら」が出ないように、コヒーレンシーも無くすような工夫も施されている。

超LSI共同研究所ではこのステッパー装置の試作機を試行し、多くのデータを積み重ね、装置メーカー、半導体メーカーにフィードバックしている。そこでの試作機の高い評価で自信を得た日本光学工業の技術陣はステッパーの製品化を会社の上層部に提案してゆく。日本光学工業は1978年暮れにステッパー2号機の製品企画案を決定し、1980年1月に完成し商用機としてシチズン時計に納めている。翌月の2月にはステッパーの量産計画を決定し1981年に量産機が完成し、1号機を日本電気、2号機を東芝に納めている。その後、シリコンサイクルに巻き込まれ、苦しい局面を迎えるが、次第に技術力の高さを認められ、1980年代後半には世界トップの座を確保し20年間程その座を確保し続けたことは前述の通りである。

■ 超エル・エス・アイ技術研究組合の意義

これまで、「半導体のはなし21」から4回に亘り、超エル・エス・アイ技術研究組合とその中の超LSI共同研究所の成り立ち、電子ビーム装置、ステッパー装置の開発などについて、関連会社での開発も含めて記述したが、超LSI共同研究所のもう一つの大きな成果はシリコン結晶技術の開発である。この開発を進めたのは第4研究室（室長 飯塚隆）である。この進め方は、半導体メーカーの要望を纏めてシリコンメーカーに伝え、それを元にシリコンメーカーに次世代大口径ウェーハを試作させたものを評価し、その結果をシリコンメーカーにフィードバックしてゆく活動を行っている。この活動によりシリコンメーカーは的確に半導体メーカーのニーズを捉えることで、大口径化や品質向上を図ることができるようになり、半導体製造の基盤技術として成長してゆくことになる。具体的には、当時、次世代大口径化として求められていた125mm径のウェーハをシリコンメーカー5社に試作を依頼し、そのウェーハの「反り」と微小欠陥の2点に絞って詳しく測定と分析を行い、その結果をシリコンメーカーにフィードバックし、新たなウェーハの試作を依頼することを繰り返している。これによって日本のシリコンメーカーのウェーハの品質が格段に向上する。

超エル・エス・アイ技術研究組合が果たした役割は1 μ m世代以降の微細加工技術、シリコン結晶技術に道筋をつけると共に、日本の半導体製造、装置、シリコン結晶などのそれぞれのメーカーを育成したことにある。

それまでの半導体製造メーカーは半導体製造装置を外国から輸入するか、自作する方法で得ており、特に精密加工が必要な微細加工装置などは欧米から輸入することで成り立っている。装置製造会社は1970年代初期に漸く欠陥検査装置などの周辺装置で半導体製造装置産業に細々と参入しだしたばかりである。一方、これまで日本光学工業を例に

1950年代から1970年代初頭までを振り返ったが、ライバル会社のキヤノンにおいても劣らず同じ歩みをしており、日本の半導体製造装置産業の多くは1945年に終戦を迎えて“ゼロ”から出発し、1950年代に入ると欧米の技術を導入し、1960年代になるとその技術を改良し、1970年代に独自の技術に育て上げ、1980年代に世界に向け販売するに至る。1976年の超エル・エス・アイ技術研究組合とその中の超LSI共同研究所の発足は、この中の1970年代における独自技術開発と同期している。超エル・エス・アイ技術研究組合発足の動機はIBM社のフューチャー・システム（FS）計画への危機感であるが、1950年代から1970年代初頭までの日本企業の開発努力とそれを促しバックアップした当時の通産省、日本電信電話公社を中心とした国策が功となり、日本全体の技術力が危機感と感じられるレベルに到達していたからこそ持てた危機感である。言い換えれば、IBMのFS計画が、単なる“高嶺の花”でなく、頑張れば“手の届く花”と感じられるレベルにあったものと考えられる。その結果、“高嶺の花”そのものは曇気楼のごとく消えてなくなった跡に、その曇気楼を追い続けて作り上げた日本の半導体製造技術及び装置技術が実体となって忽然と浮上することになる。この中で、超LSI共同研究所は学会発表200件（組合全体では400件）と著しく、4年間と限られた中で大きな成果を上げている。

一方、超LSI共同研究組合は超LSI共同研究所の他に、日立、富士通、三菱の3社によるコンピュータ総合研究所（CDL）、日本電気、東芝による日電東芝情報システム研究所（NTIS）の3つの研究所から構成されている。CDLは各社間で融合することなしに、実質的には各社ともほぼ単独で研究を進めたが、NTISは東芝側が大型コンピュータ事業からの撤退を決意していたこともあり、担当者達をNTISに出向させることで、結果的に1つの研究所として

融合した体制で研究を進めている。両研究所とも大型コンピュータ用の高性能システムLSIと主記憶装置となるDRAMの設計、製造技術の研究開発に力を入れ、LSIの高集積・高性能化及び微細化に取り組んでゆく。そして、ここに投入された国家補助金を含む多額の開発費が相乗効果を生むことにより、日本の大手半導体製造メーカー5社は大きく力をつけて行く。

（文中、敬称を略させていただきます。）

挿絵 奥山 明日香

参考文献

- 1) 垂井康夫著「世界をリードする半導体共同研究プロジェクト」工業調査会
- 2) 高橋一雄著「露光装置技術発展の系統化調査」独立行政法人 国立科学博物館 産業技術史資料情報センター
- 3) 「ニコン」ウィキペディア フリー百科事典
- 4) 鶴田匡夫著「第7・光の鉛筆 光技術者のための応用工学」アドコム・メディア株式会社
- 5) 「ニッコール千夜一夜物語」Nikon imaging Japan
- 6) 「ルーリングエンジン1号機」「ルーリングエンジン2号機」株式会社ニコンホームページ ニコンチャンネル 知られざるニコンの歴史
- 7) 吉田庄一郎著「超精密マシンに挑む ステッパー開発物語」

次回

第25回 半導体の歴史

—その24 20世紀後半 超LSIへの道—
1980年代 DRAMにおける日本メーカーの
台頭とインテルの撤退と戦略