

<論文>

半導体露光レーザーメーカーの製品アーキテクチャ —クローズなモジュラーがもたらす競争優位性—

田路則子
佐藤政之
榎波龍雄

要旨

半導体露光装置の基幹部品エキシマレーザー・デバイスを製造するギガフォトン、製品アーキテクチャ・シフトを乗り越えて、米国サイマーと肩を並べて 2 強の地位を維持している。その製品アーキテクチャは、外部に対してクローズなモジュラーである。クローズにすることで得られる便益は大きく、オープンにしたならば起こりえたリスク、すなわち、外部企業が得る情報を極力抑えて模倣を防ぐことができた。それは、ギガフォトンの製品が川下の完成品ではなく、川上の部品であったことによりもたらされた。

キーワード：製品アーキテクチャ、モジュラー、インテグラル、オープン、クローズ

Abstract

Gigaphoton is a manufacturer of excimer laser devices, which are core parts of semiconductor exposure equipment. That company managed to overcome an architecture shift and still secure a competitive position by sharing the market with another company. The product architecture is modular and also is closed to the outside. The closed architecture brought the company huge benefits. Because of that, the company could prevent outsiders from getting useful information and avoid the high risk of imitation. We attribute that success to the business domain. The product was located upstream, not downstream, of the manufacturing stream.

Keywords: Product architecture, Modular, Integral, Open, Close

1. 研究目的

「サイエンス型産業」とは、サイエンス、つまり科学に依拠した産業群、あるいは基礎的な科学の重要性がとりわけ高い産業群のことを指す（後藤・小田切, 2003）。本稿で取り上げる半導体とは、例えば IC（Integrated Circuit）のように数 mm²から数百 mm²角の面積を持った矩形形状のシリコンに、最大 10 億ものトランジスタ、抵抗、コンデンサといった電気信号を操作する素子と、それらを結ぶ微細な配線が作り込まれた高度な技術が必要とする集積回路から構成され、典型的なサイエンス型産業の 1 つである。

この半導体は、我々の身近なところでいうとパソコンやタブレット型 PC、スマートフォンなどの CPU¹やメモリに使われる他、冷蔵庫や電子レンジのような白物家電や自動車にも必要不可欠である。経済成長と共に増大するエネルギー需要の一因は、半導体というサイエンス型産業のめざましい発展がある。

半導体の製造は、シリコン・ウエハの作成から最終製品の検査まで、およそ 20 もの工程からなり、1 台数億円もの製造装置が各工程に並ぶ。工場ではそのような高価な装置を数百台使用した製造工程を経るため、膨大な設備投資を要する。製造で最も重要な工程は、原画となる回路パターンを転写する「露光」で、半導体露光装置がその役割を果たす。その装置の担い手は、オランダの ASML Holding N.V.と、日本の株式会社ニコン、キヤノン株式会社の 3 社（以下 ASML、ニコン、キヤノン）である。

従来、日本の製造業の強さの源泉は、自動車産業のような企業横断的な知識を有した統合型人材の豊富さと、インテグラルかつクローズの擦り合わせ型製品にあるということは、藤本（2001）を始め多くの研究者により議論されてきた。半導体露光装置は、精密機器技術を要する究極の擦り合わせ型製品の 1 つである。ニコンとキヤノンは、成り立ちや戦後の事業展開の様相は異なるものの、着実に優位性を持続させてきた（廣田，2002）。しかし、その圧倒的な国際競争力を誇った日本企業が、この 15 年間、海外勢に市場を奪われている。

半導体デバイス市場では、産業の水平分業化に伴い、例えば出版業界と印刷業界、ファッションデザイナーと繊維・縫製業界、建築デザイナーと建設会社のようなファブレス設計会社とファウンドリに分化した、設計と製造の 2 極構造（藤村，2000）が経営戦略的観点から有利とされる。例えば、ベンチャーとして誕生したアメリカの Cadence Design Systems, Inc.や Ramtron International Corporation のようなファブレス企業の躍進、そして台湾の TSMC（Taiwan Semiconductor Manufacturing Company Limited）のようなファウンドリの好調（伊藤，2005）が顕著に見られ、その後、携帯電話用のチップをほぼ制したファブレス企業 Qualcomm の存在も目立ち、かつて業界の花形であった日本企業は隅に追いやられている。その理由は、日本の半導体デバイスメーカーが設計から製造までを担う統合型企業（IDM）であったため、水平分業についていくことができなかったのである（伊藤，2005；延岡，2006；田路，2009 他）。

さらに、半導体製造装置でも日本企業の競争力の低下は著しく、中馬（2004）、Chuma（2006）は、半導体露光装置メーカーの ASML、ニコン、キヤノンに焦点を当て、日本企業が直面する典型的な問題を浮き彫りにしている。ニコンやキヤノンの統合型企業は、内部で形成された暗黙知にこだわり、企業の境界を越えて外部の組織と知識を共有することができない。対して、ASML は、企業の境界を越えるバーチャル組織をサプライヤーや中立的立場のコンソーシアムや国立研究所と形成することによって、専門知識やノウハウを広く共鳴させて、新しい製品アーキテクチャを確立することができたとする。

しかし、半導体産業のすべての日本企業が劣位にあるのではない。本稿は半導体露光の基幹部品となるエキシマレーザ²のメーカー、ギガフォトン株式会社（以下ギガフォトン）を取り上げる。ギガフォトンが 2000 年に JV として再編成された当時、競合企業の

¹ Central Processing Unit。コンピュータの処理装置として働く電子回路のこと。中央演算処理装置ともいう。

² 混合ガスを利用してレーザを発光させる装置のこと。

Cymer, Inc. (以下サイマー) がほぼ市場を独占していたが、12 年間で市場シェアを 50% まで拡大し続け、現在この市場の戦いは両社による一騎打ちとなっている。なぜ、ギガフォトン、日本の半導体産業が低迷していった 2000 年以降に、市場シェアを拡大することができたのだろうか。この解明を、製品設計に関連する知識に注目した製品アーキテクチャ (Henderson and Clark, 1990) の概念に則って進めたい。また、ギガフォトンの川下に位置する ASML の製品とビジネスモデルとの関連を確認しながら進めていく。

本稿は、製品アーキテクチャの概念を使って、どのようにアーキテクチャを決定して製品開発と製造を成功に導いたのかを確認していく。

明らかにしたい点は次の 3 つである。

- ① 製品アーキテクチャがモジュラーかインテグラルかはどのように決まったのか。
- ② また、外部に対してオープンかクローズかもどのように決まったのか。
- ③ 製品アーキテクチャが大きく変化する節目を乗り越えた組織体制やマネジメントはどのようなものだったのだろうか。

ところで、露光機の製品アーキテクチャは多段階になっており、一口にモジュラーかインテグラルかを断定はできない。ある階層ではモジュラーでも、その 1 つ下の階層ではインテグラルであったりする。階層ごとに確認していくこととしたい。

本稿の重要な概念となる、モジュラー、インテグラル、オープン、クローズを説明しておこう。

モジュラー・アーキテクチャとは、部品 (モジュール) と機能の対応が明確になっており、その連結部分 (インターフェース) のルールはかなり明確化されている。ゆえに、部品ごとに、独自の設計ができる (Baldwin and Clark, 2000) というメリットがある。それに対して、インテグラル・アーキテクチャは、ひとつひとつの部品が複数の機能と関係しており、各部品間で十分に擦り合わせしなければ、まとまった全体としての性能を発揮させられない。機能と部品が「1 対 1」ではなく、「多対多」の関係にある (Ulrich, 1995)。オープン・アーキテクチャとは、インターフェースが外部にオープンにされ、性能と価格のバランスがよいものが集められる。携帯電話や PC は最たる例であり、かつモジュラーでもある。クローズ・アーキテクチャとは、インターフェースが公開されず、ひとつの組織の中で完結している。クローズかつインテグラルの例にはオートバイやセダン乗用車が、クローズかつモジュラーの例には IBM のメインフレームコンピュータがある (藤本・桑嶋, 2009)。

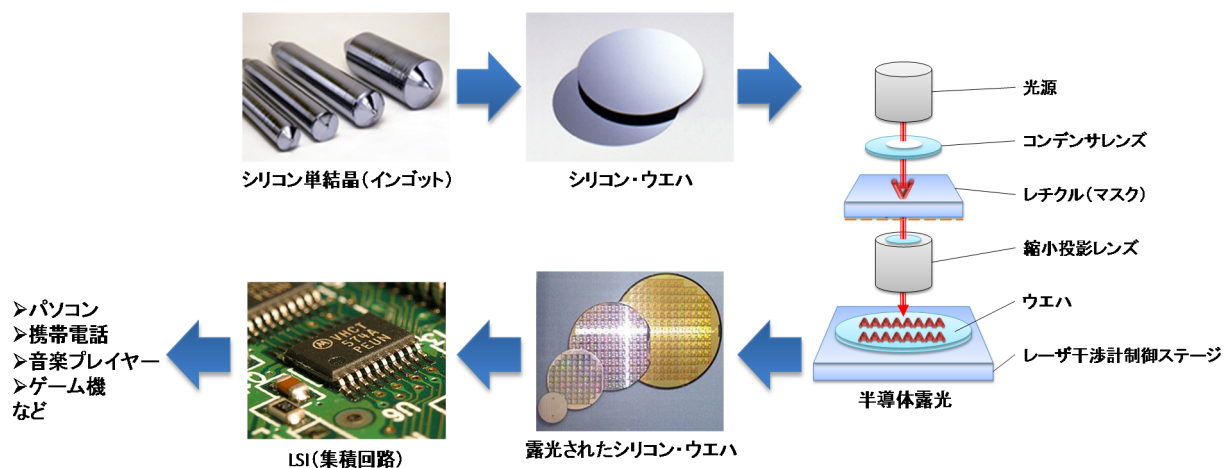
最後に、アーキテクチャが変化するアーキテクチャ・イノベーションの定義を確認しておきたい。Henderson and Clark (1990) は、設計の基本コンセプトは変わらないものの、アーキテクチャが変化するものをアーキテクチャ・イノベーションと定義した。基本コンセプトが変わらないことはコアの機能が変わらずに強化され、アーキテクチャが変化するとは構成要素間の連結が変わることを意味する。この定義に沿って、ギガフォトンのアーキテクチャが変化したかどうかを確認していきたい。併せて、その変化に対して、どのような組織体制で臨んだかも確認していきたい。立本 (2010) が解説しているように、アーキテクチャの変化を乗り越える組織体制の研究は蓄積が多く、本稿は半導体産業の一事例となろう。

2. 製品の技術的説明

2.1 半導体露光装置

半導体とは、電気を通す電気伝導体と通さない絶縁体に対し、中間的な性質を示す物質を指す。半導体は図1のような手順で作られる。シリコン（ケイ素）の単結晶からシリコン・ウェハと呼ぶ厚さ 1mm 程度、直径数十 cm の円盤状に切断し、それを「露光」することでシリコン・ウェハ上に電子回路が形成され、そのひとつひとつが LSI やメモリなどに組み込まれる。LSI やメモリは、我々が日常で利用するパソコンや携帯電話などの電気機器に組み込まれている。

図1 半導体が出来上がるまで



(出所) 筆者作成。

半導体製造で最も重要な工程は、原画となる回路パターンを転写する「リソグラフィ（Lithography：露光）」であり、半導体露光装置がその役割を担う。岡崎・鈴木・上野（2012）によると、リソグラフィ技術は、コンタクト露光法やプロキシミティ露光法（近接転写露光）、等倍投影露光法といった露光の方式が応用されてきたが、ここでは縮小投影露光法について、露光機の基本構造となる図2を用いて説明する。

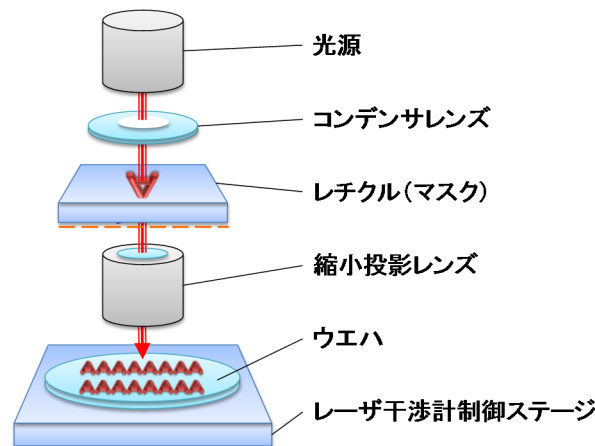
図は 6 つの主要部品から構成されており、①光源はエネルギーの変換により、人工的に光を発生させ、②光源から発した光はコンデンサレンズにより集光し、③集光した光はウェハに回路を焼き付けるための原版（パターン）であるレチクルを通り、④その光は縮小投影レンズによってレチクルのパターンを縮小し、⑤半導体素子製造の材料であるシリコン・ウェハに、⑥レーザ干渉計制御ステージによって移動（ステップ）しながら回路を投影露光する³。

³ 以下のホームページにある用語集を引用した。

「ウシオ電機株式会社」<<http://www.ushio.co.jp>>（2012年9月15日アクセス）。

「ニコン」<<http://www.nikon.co.jp>>（2012年9月15日アクセス）。

図2 縮小投影露光法



(出所) 岡崎、鈴木、上野 (2012) を基に筆者作成。

2.2 新しい露光装置：スキャナ

ウエハのサイズの大型化と解像度の高度化に伴い、露光領域部のウエハの形状を測定し、最適位置に制御するオートフォーカスシステムが開発された。また、レーザー干渉計などを用いたステージ技術が進展し、縮小系の採用に伴う解像性能の向上や、位相シフトや各種補正技術の導入のためレチクルが改良された。こうして、ステッパからスキャナと呼ばれる新しい露光方式が開発された。スキャナは、ステッパより小さな画面の光学系が使用でき、走査することで露光エリアは拡大する。

光を使用した露光機は、全系の温度や環境を制御するため、チャンバ⁴の中に格納されており、投影光学系、光源、照明系、ステージおよび、本体構造体、種々の計測系、レチクルやウエハの搬送システムなどで構成される、複雑な光学・メカユニットの集合体である。その概略化した縮小投影露光装置の具体を図3に示す。

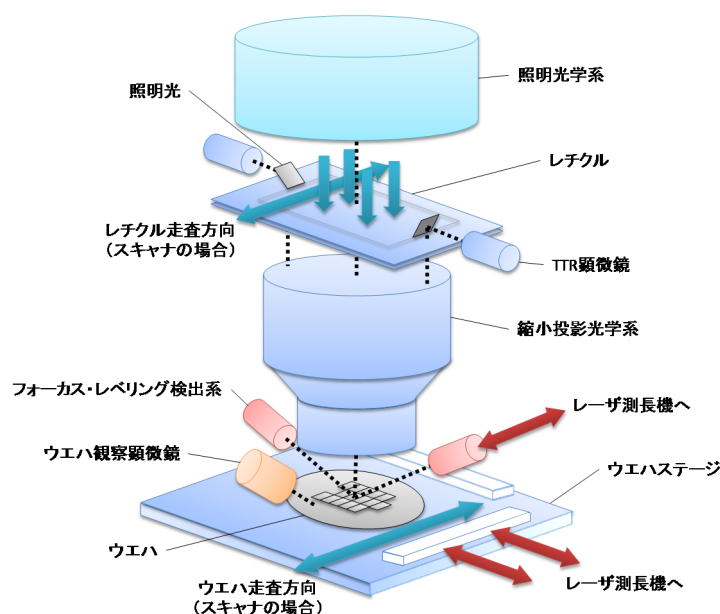
前述の説明に加えるところは、非常に複雑で精密な種々の計測系と搬送システムである。スキャン中にナノメートル⁵単位の超精密な加工精度を出すために、機構のわずかなぶれも制御する必要があり、そのためにオートフォーカス・レベリングを図の検出系で行う。つまり、これは CCD カメラのようなイメージセンサ⁶である。そして、レチクルとウエハステージを同期して走査するため、TTR (Through The Reticle) 顕微鏡でレチクルとウエハを同時に観察し、レーザー測長機によってウエハステージの位置情報を正確に測定し、高精度な位置合わせを行っている。

⁴ 減圧、酸化性、還元性、不活性ガス等の雰囲気を制御するための真空容器。

⁵ 10 億分の 1 メートル。「nm」とも記す。

⁶ CCD (Charge Coupled Device) のイメージセンサは固体撮像素子の 1 つ。デジタルカメラやビデオカメラなどに広く使用されている半導体素子を指す。

図3 半導体露光装置の光学系



(出所) キヤノンホームページ (<http://www.canon.jp>) を基に筆者作成。

3. 半導体露光装置産業のプレイヤーと市場

3.1 露光機市場とプレイヤー

露光機産業の現在、プレイヤーがオランダの ASML と日本のニコン、キヤノンの 3 社となる。ASML は 1984 年、Philips 社と ASMI (Advanced Semiconductor Materials International) 社がそれぞれ 50%ずつ出資する合弁会社として設立された企業である。3 年後には初の i 線露光機をリリース、1995 年にユーロネクスト・アムステルダム証券取引所と NASDAQ に上場している。2014 年の売上高 58 億 5,600 万ユーロ、従業員数は 14,072 名 (正社員 11,318 名、テンポラリー労働者 2,754 名: 2014 年 12 月 31 日現在)、16 カ国 70 拠点⁷で顧客サポートを行っている。

ニコンはカンパニー制を導入し、精機、映像、インストルメンツの 3 つの事業を展開している。半導体露光装置事業である精機カンパニーは、ニコンの売上全体の 27%⁸を占めていた。精機カンパニーは 1960 年代、前身である精機事業部で光学技術や精密加工技術を利用した、IC 用検査装置などの測定機を開発したことに始まり、1980 年に国産初の露光機をリリースしている。精機事業の売上高は 1,707 億 5,700 万円 (2015 年 3 月期、前期比 16.9%の減少) で、精機事業従業員数は連結 4,017 人、単体 1,604 人となる⁹。

キヤノンはオフィスビジネスユニット、イメージングシステムビジネスユニット、産業機器その他ビジネスユニットの 3 つの事業からなり、半導体露光装置は産業機器その他ビジネスユニットに含まれる。売上高は 3,990 億円 (2014 年 12 月期)、従業員数は

⁷ 2014 年 Annual Report を参照。

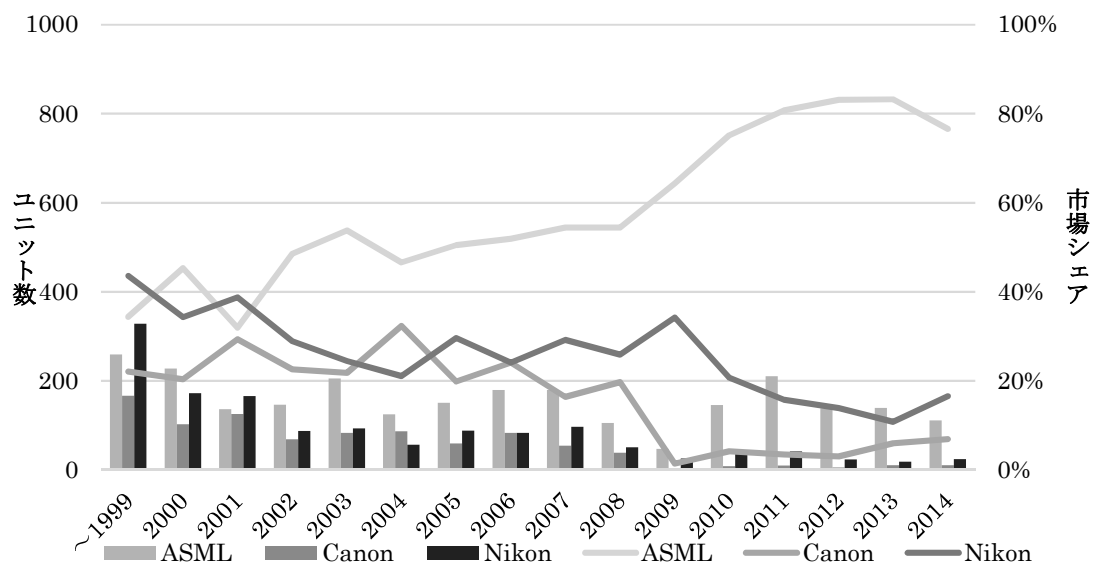
⁸ 2012 年度 3 月期のデータ。映像 (63.9%)、精機 (27%)、インストルメンツ (6.1%)、その他 (3%)。

⁹ 第 151 期有価証券報告書 (2015 年 3 月期) のデータより抜粋。また、精機カンパニーは液晶露光装置のデータも含まれる。

15,993 人¹⁰である。

中馬（2004）および Chuma（2006）は以上の 3 社による市場シェアを、1986 年から 2003 年にかけて調査している。それによると、1990 年までのニコンによる完全な独占市場に ASML が徐々に忍び寄り、1997 年にはキヤノンを超え、2002 年には 50%を占める世界の露光機メーカーとなった¹¹。2014 年までの 3 社の市場シェアを示す（図 4）。対象とした機種はエキシマレーザ搭載のスキナーのみであり、i 線や g 線を除いている。ASML の堅調な推移がわかる。

図4 半導体露光装置世界シェアの推移



（注）棒グラフは出荷ベースでのユニット数、線グラフは市場シェア。
（出所）ギガフォトン提供データを基に筆者作成。

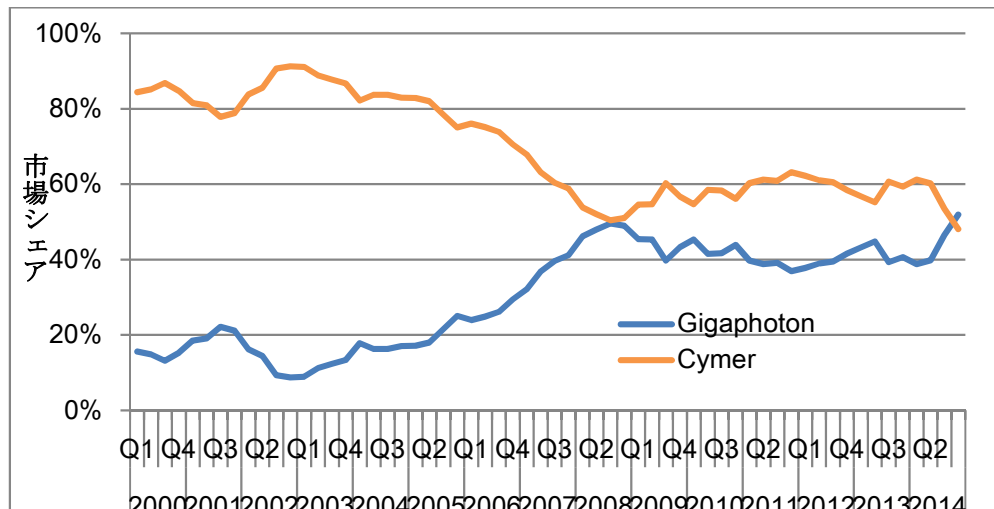
3.2 半導体エキシマレーザ市場とプレイヤー

露光機の基幹部品として使われるエキシマレーザのプレイヤーは、現在ではアメリカのサイマーと日本のギガフォトンとなる。両社の概要については次節で述べるが、設立当時、市場シェア 20%に満たなかったギガフォトンが、順調にシェアを伸ばし、2009 年には 50%を達成している。露光機メーカーと比べると、日本勢が逆の立場で奮闘していることがわかる（図 5）。

¹⁰ 第 151 期有価証券報告書（2015 年 3 月期）のデータより抜粋。また、精機カンパニーは液晶露光装置のデータも含まれる。

¹¹ ArF エキシマレーザにおいて、キヤノンは事実上開発を行っていないため、半導体用 ArF 市場という意味では、プレイヤーは ASML とニコンのみとなる。

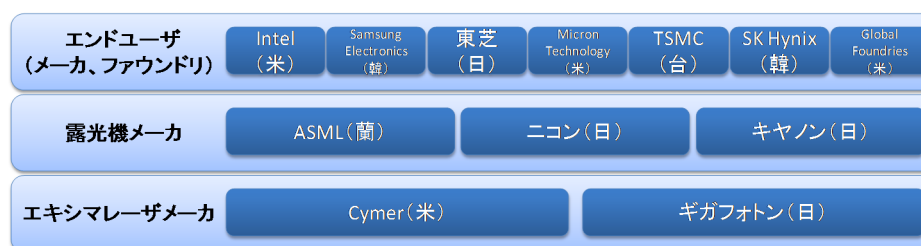
図5 半導体エキシマレーザ世界シェアの推移



(注) 出荷台数ベースでの市場シェア。
(出所) ギガフォトン提供データを基に筆者作成。

エキシマレーザを使用するエンドユーザは、LSI やメモリを製造するメーカーやファウンドリ企業となる。つまり、レーザは基幹部品として露光機に組み込まれ、その露光機をエンドユーザが使用する。半導体露光レーザメーカーから見た産業構造を図6に示す。エンドユーザは数多く存在するが、次世代の露光技術を積極的に選択して投資できる企業は数少ない。その代表的な企業をこの図に並べた。

図6 半導体露光レーザ・メーカーから見た産業構造



(注) カッコ内は本社の所在国を表す。
(出所) 筆者作成。

3.3 競合

サイマーは、露光機のレーザ開発のリーダとして 1986 年に設立され、フラットパネルディスプレイ産業の結晶化ツールの開発も手がけている。製品は光源別に、KrF、ArF (Dry)、ArF (Immersion) を中心とした DUV (Deep Ultraviolet) レーザと EUV の光源¹²である。

¹² サイマーは 2013 年に ASML に買収され、以後、EUV 光源は ASML 本体の中で開発されている。

サイマーは製品サポートを充実させるため、レーザーの稼働状況をモニタリングすることで生産性を維持し、かつランニングコストを削減することを目的としたサービスを DUV、EUV の製品に対し提供している。

本社は米国カリフォルニア州サンディエゴに位置する。国内はオレゴン州のヒルズボロにオペレーションセンターを設置する。海外支店は、オランダ、日本、韓国、中国（上海）、シンガポール、台湾に拠点を置く。

半導体露光レーザーに関しては、株式を公開した 1996 年から順調に導入台数を更新し、2002 年には 2000 台出荷を記録、リーマン・ブラザーズの経営破綻の影響を受けたためか、2009 年は伸び悩んだがそれ以降も顕著な成長ぶりであった¹³。2013 年に ASML に買収されたため、以後の財務状況の詳細は不明である。売上高は、5 億 3,862 万 5,000 ドル（2012 年）、従業員数（全世界、2012 年）は約 1,100 人であった。

3.4 ギガフォトンの沿革

ギガフォトンとは、株式会社小松製作所（コマツ）の研究開発部門から発足した古い歴史を持つ。リソグラフィ用超高压水銀灯のトップメーカーであるウシオ電機は、露光機の光源であるエキシマレーザーの研究・開発から製造、販売までを手掛けるため、コマツと共同出資して 2000 年ギガフォトン設立した。

社名の由来は、ギガビット¹⁴時代に対応する光（光子＝フォトン）である。また、イニシャルの「G」が「成長」を表す。つまり、露光技術で半導体産業を支え、共に成長するという意味合いがある。

本社は、コマツの小山工場内（栃木県小山市）にあり、第 2 の拠点となる平塚事業所はコマツの湘南工場内（神奈川県平塚市）に位置する。コマツの時代から培ったレーザーの技術開発の経験と実績を継承し、KrF、ArF（Dry）、ArF（Immersion）を中心としたエキシマレーザーを販売する。特に ArF はインジェクションロックという方式による、装置に 2 台のチャンバ（ツインチャンバという）を配置した技術により、安定した性能と低いランニングコストで高出力なパワーを実現する「GT シリーズ」製品を開発している。この GT シリーズはツインチャンバシステムにより共通のプラットフォームを採用し、主要部品を共通化し、部品ごとの仕様アップグレードを行うことで要求性能を実現する。

国内のサービス拠点は栃木県小山市、神奈川県平塚市、三重県四日市市、広島県広島市、熊本県熊本市に事務所を構える。海外は北米（2 カ所）、韓国（1 カ所）、中国（4 カ所）、台湾（4 カ所）、シンガポール（1 カ所）、欧州（1 カ所）である。国別導入台数では、台湾、米国、韓国、日本、中国、欧州の順に多く、グローバルな事業展開が行われている。設立当時から、着実に導入実績台数は増えており、2011 年は 1,000 台の出荷を達成、2014 年には 50%の世界シェアを獲得している。

¹³ 1996 年からの Annual Report を参照。

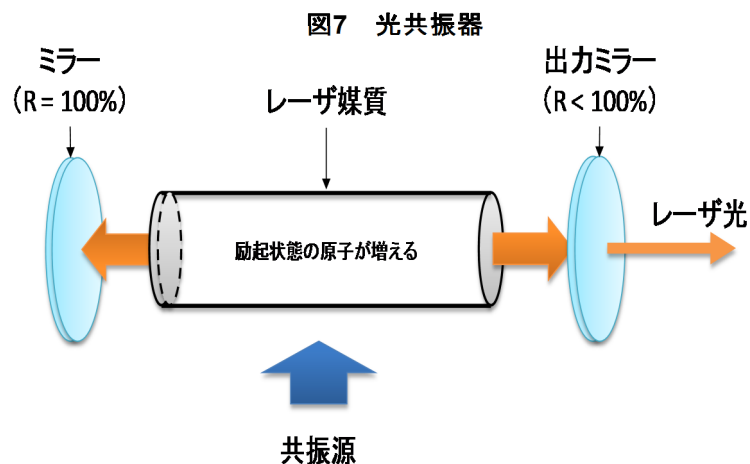
¹⁴ ビット（bit）はコンピュータが扱うデータの単位、ギガ（giga）は 10 億を表す。

4. エキシマレーザの製品開発

4.1 レーザの原理

レーザ媒質中に基底状態（Ground State）で存在する原子が外部からの電子や原子、光子との衝突または相互作用によってエネルギーを受けた場合、電子が外側の軌道に飛ぶことで励起状態（Excited State）となる。この現象を吸収（Absorption）と呼ぶ（Basting and Marowsky, 2005）。一定時間後に光を放出し、再び基底状態に戻る。これがレーザの原理である。

図 7 のように、多くのレーザ媒質に共振源を当てることで励起状態の原子が増え（Pumping）、基底状態の原子数を上回った状態を反転分布状態（Population Inversion State）という。この状態で外部から同じ周波数の光信号を送ると、同一方向に光を放出し増幅信号が得られる。レーザ媒質を 2 枚のミラーで挟み、その間で光を往復させることで光はさらに増幅する。右側のミラーは R （Reflective） $< 100\%$ 、つまり部分反射のため増幅された光を放つ。



（出所）Basting and Marowsky（2005）を基に筆者作成。

4.2 エキシマレーザ装置の仕組み

実際の写真を図 8 に示す。サイズは $2800 \times 820 \times 2050\text{mm}$ （幅×奥行き×高さ）となる。

図8 エキシマレーザ装置とその図面



（注）製品：GT40A。

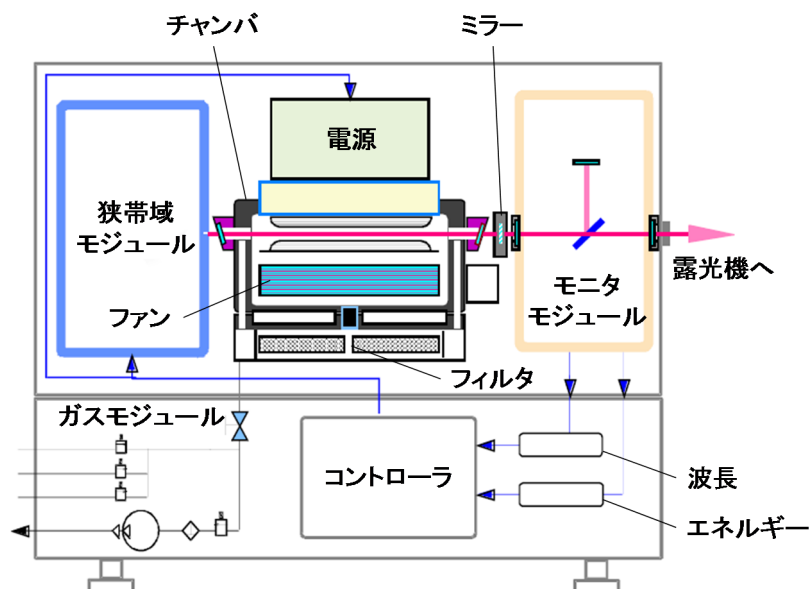
（出所）ギガフォトンホームページ（<http://www.gigaphoton.com/>）。

装置は 3,000 から 4,000 もの部品で構成されるといわれている。ArF エキシマレーザは、193nm という波長を持つ光を放つ。その放つ光のパワー出力の大きさ、波長の安定性、スペクトルの幅が、回路パターン転写にとって重要な仕様となる。ArF エキシマレーザの構成概念図である図 9 を基に主要部品の役割を説明する。

放出するレーザ媒質がチャンバに相当する。この部品はレーザを発生するための心臓部となる。チャンバ内にフッ化アルゴン (ArF) を閉じ込め、上部にある電源によって電気エネルギーを加えることで高速電子が原子に衝突し励起状態となり、発光することができる。

半導体露光レーザの特徴は、極めてスペクトル幅が狭いことである。レーザは通常単色光でスペクトル幅が非常に狭いが、それをさらに狭いスペクトル幅にする必要がある。なぜなら、スペクトル幅が広がるとレンズでフォーカスした際にフォーカス位置が一点に集中せず、微細加工が不可能なためである。光の色によってフォーカス位置も変わるため、スペクトル幅が狭いほど、より微細加工ができる良好な光となる。これを実現させるのが狭帯域モジュールである。実物は手で抱える程度の大きさである。レーザの原理で説明したように、通常はレーザ媒質、つまりチャンバの両脇にミラーを設置するが、左側はミラーの代わりにこの狭帯域モジュールを設置する。狭帯域モジュールは多くの部品点数からなる光学素子の集まりで、様々な波長を折り返す際に必要な波長を持つ光とそうでない光を区別し、光の方向を変えている。特定の波長、すなわち狭いスペクトルを持つ光のみチャンバに跳ね返し、それ以外の光は全て拡散させ、さらに、チャンバ内で光を増幅させることにより、大きなパワーを持つ光を生成して、装置の右側中央から露光機へ出力する。

図9 エキシマレーザの構成概念



(出所) 溝口 (1998)。

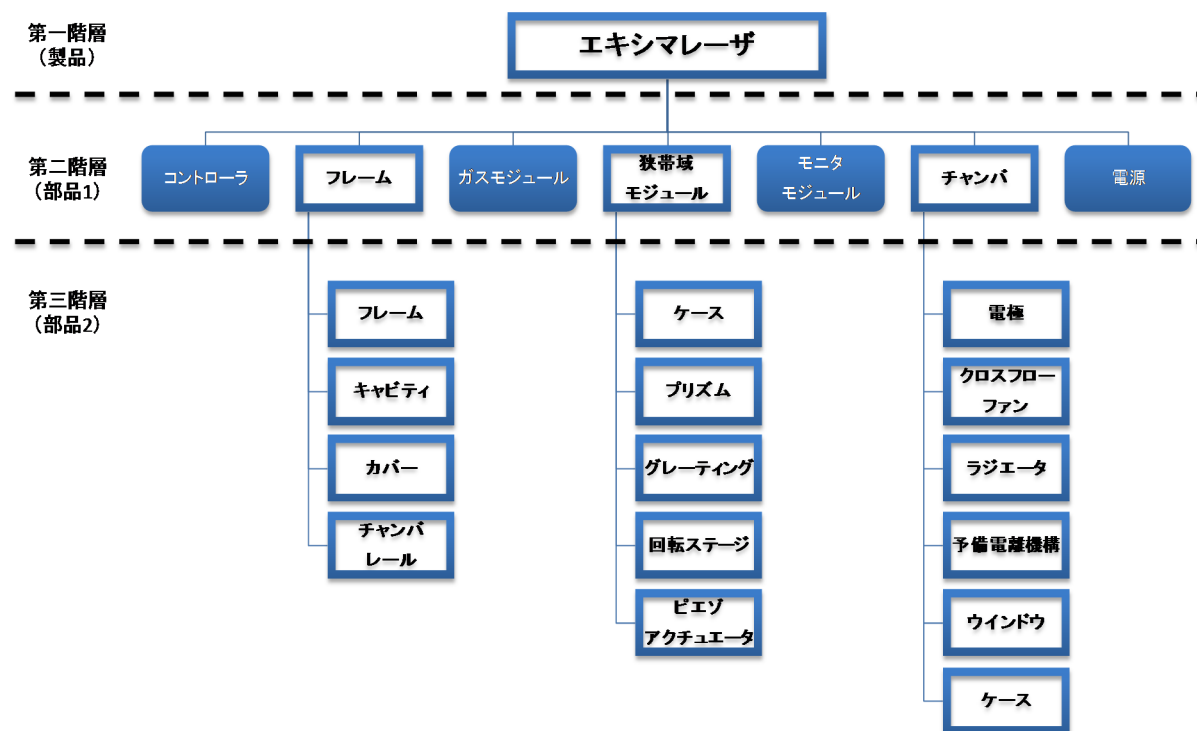
出力する手前のモニタモジュールでパワーと波長を計測する。その結果がコントローラに渡されると、ソフトウェアが制御パラメータを計算する。そのパラメータを狭帯域モジュールおよび電源に送ることによって光学素子と電源の出力が自動制御される。

エキシマレーザは、光のパワーを高めるために混合ガスが必要不可欠である。前述のように ArF エキシマレーザの場合、フッ化アルゴンを使用する。チャンバ内の構造は後述するが、チャンバにはこのようなガスの注入および排出が必要となり、それらの自動制御を行うのがガスモジュールである。

4.3 構造

ArF エキシマレーザの部品を構造化したのが図 10 である。最終製品であるエキシマレーザを第一階層とし、レーザの主要部品であるコントローラ、フレーム、ガスモジュール、狭帯域モジュール、モニタモジュール、チャンバ、電源が第二階層となる。

図10 エキシマレーザの階層構造



（注）GT21A、G41A、G42A 製品を参考。

（出所）ギガフォトン、インタビュー調査を基に筆者作成。

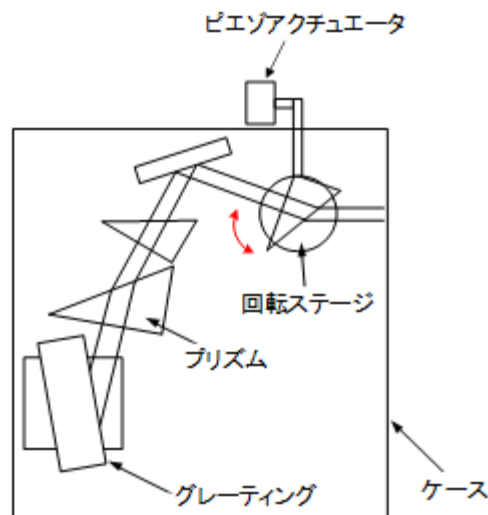
4.4 内製部品

図 10 にある第二階層の 3 つの部品（フレーム、狭帯域モジュール、チャンバ）の下にある第三階層について説明する。第二階層のフレームは、その下にフレーム、キャビティ、カバー、チャンバレールから構成されている。第三階層のフレームとは、製品となるエキシマレーザ全体を覆う筐体を指し、第二階層にある各部品を固定し光路を作る役割がある。キャビティは光共振器ともいい、光を増幅するためのミラーの配置を決める機構である。カバーとは、レーザ光が外部に漏れ人体にダメージを与えることを防ぐための遮光板であ

る。チャンバレールはチャンバの位置を固定するためのレール状の板である。第二階層のフレームは、単純にこれらの部品を覆うだけでなく、固定や位置決めを行う役割がある。また、そのフレームの製造は技術的に外注が可能だが、空気清浄度を確保するために内製している。

狭帯域モジュールはケース、プリズム、グレーティング、回転ステージ、ピエゾアクチュエータから構成されている。構造を図 11 に示す。ケースとは、狭帯域モジュールを覆う筐体で各素子の位置を固定する役割がある。プリズムとは、光を分散、屈折、全反射、複屈折¹⁵させるための、ガラスや水晶を材料とした多面体で、ここでは分光、拡大の役割を持つ。グレーティングとは、格子状のパターンによる回折を利用して干渉縞を作るために使用する光学素子で、回折格子とも呼ぶ。ここでは分光、反射の役割を持つ。回転ステージとは、そのステージ上のプリズムを動作する台である。プリズムを動作する、つまり位置を変えることで光の波長を変化させることができる。その回転ステージの原動がピエゾアクチュエータで、電圧を加えることで動作するモータのような機能を持つ。これが光の波長を変化させる量を決定している。

図11 狭帯域モジュールの構造



(出所) ギガフォトン提供。

狭帯域モジュールで性能に最も影響を与える部品はグレーティングである。より狭帯域のスペクトルを実現するためには、グレーティングの形状調整が重要である。微細な調整はギガフォトンの熟練した専門の技術者が担当する。

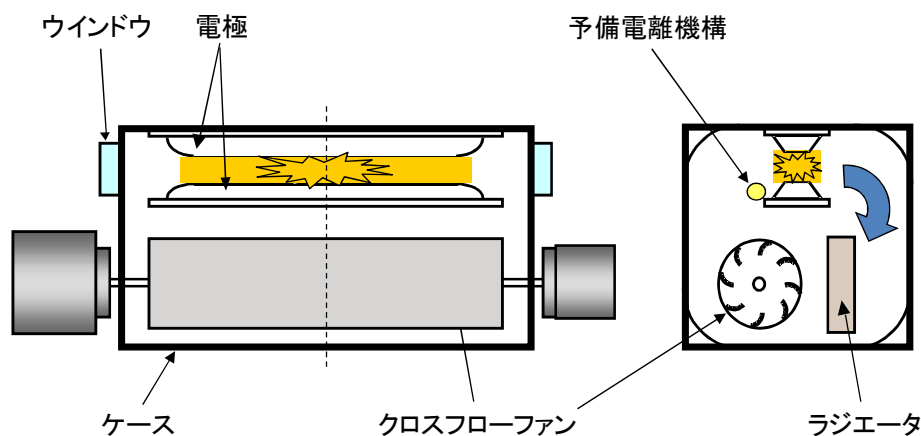
チャンバは、電極、クロスフローファン、ラジエータ、予備電離機構、ウインドウ、ケースから構成されている。構造を図 12 に示す。電極とは刀状の対抗した電動体で、電極間にある ArF や KrF といったガスの分子にエネルギーを励起させる。すると、ガスは熱を吸収しているので、ラジエータで放出しなければならない。また、放電によって不要物が生成されるのでクロスフローファンによって気流を循環させながら除去しなければならない。ガスの分子が励起したことによる光はウインドウを通して狭帯域モジュールへ受

¹⁵ 光が2つに分けられること。

け渡される。

エキシマレーザを生成するために心臓部となるのがこのチャンバである。電極の形状、ガスの循環方法、予備電離によるガスの電子の生成方法によって、エネルギーの励起の均一性が変わり、それがレーザのパワーの安定性につながる。チャンバはより大きなパワーを持つレーザを生成することが重要で、そのためにはチャンバ内部の各部品がそれぞれ連動してその役割を果たす。つまりチャンバの性能は、熟練した技術者による暗黙知の塊で、そこが基幹部品の重要な役割を果たしている。

図12 チャンバの構造



(注) 右：左の点線部の断面図を表す。
(出所) ギガフォトン提供。

4.5 内製と外部委託

本節では、研究開発・設計・製造を企業内部で実施している部品と、製造を外部委託する部品が存在する点に注目したい。図10の第二階層にあるフレーム、狭帯域モジュール、チャンバは前者で、その他が後者となる。前者は、エキシマレーザの基幹部品となるため、研究開発から製造までギガフォトン内部で実施されている。その他の外部企業で製造するコントローラ、ガスモジュール、モニタモジュール、電源は汎用部品で製造されており、設計のみギガフォトンが行い特殊製品としてそれぞれを外部企業に製造委託している。これをわかりやすく図にしたものが図13である。今は、右側のギガフォトンだけを見てほしい。研究開発、設計、製造について、内製と外部委託を示している。

図13 事業システムの統合と分業

	研究開発	設計	製造		研究開発	設計	製造
露光機 (製品)	ASML			エキシマレーザ (製品)	ギガフoton		
ソフトウェア (部品A)	ASML			フレーム (部品A)	ギガフoton		
投影レンズ系 (部品B)	ツァイス			狭帯域モジュール (部品B)	ギガフoton		
照明系 (部品C)	ツァイス、ラムダフィジックス			チャンバ (部品C)	ギガフoton		
ステージ (部品D)	フィリップス		フィリップス グループ	コントローラ (部品D)	企業D	ギガフoton	企業D
光源 (部品E)	サイマー、ギガフoton			ガスモジュール (部品E)	企業E	ギガフoton	企業E
ボディ (部品F)	フィリップス、フィリップスグループ			モニタモジュール (部品F)	企業F	ギガフoton	企業F
アライメント系 (部品G)	ツァイス、フィリップス、アジレント		アジレント、 ツァイス他	電源 (部品G)	企業G	ギガフoton	企業G

(注) 左：ASML、右：ギガフotonを表す。

(出所) 左：中馬（2004）、Chuma（2006）を基に筆者作成。

右：ギガフotonへのインタビュー調査を基に筆者作成。

4.6 製品アーキテクチャのシフト

次に ArF エキシマレーザの製品アーキテクチャの変遷を説明する。ArF エキシマレーザは大きく 2 つのシリーズ製品に分けることができる。1 つは G シリーズ¹⁶で、もう 1 つは GT シリーズ¹⁷である。G シリーズは、これまで説明してきた ArF エキシマレーザの最も基本的な構造を持つ製品である（図 9 再掲）。一方 GT シリーズはインジェクションロック¹⁸という方式による、装置に 2 台のチャンバ（ツインチャンバという）を配置した技術により、安定した性能と低いランニングコストで高出力なパワーを実現した後継機種¹⁹となる（図 14）。G シリーズから GT シリーズに移行することにより、基本的な機能は変わらないものの、性能が強化され、チャンバが増えることによるアーキテクチャの変化が確認できる。

G シリーズから GT シリーズへの変遷を詳細に明らかにすべく、仕様と部品の依存性について比較を行った。各部品と仕様との関係を結線で表している（図 15 と図 16）。

GT シリーズでは第二階層の、2 つに分かれたチャンバと OBS²⁰が増えている。2 つのチャンバによりレーザチャンバ交換という仕様も増えている。仕様や部品の増加に伴い結線の数も変化している。つまり、構成要素間の連結は変化させざるをえず、アーキテクチャが変化するアーキテクチャ・イノベーション（Henderson and Clark, 1990）が起きたことがわかる。

¹⁶ Gigabit（ギガビット）時代に対応する G を表している。

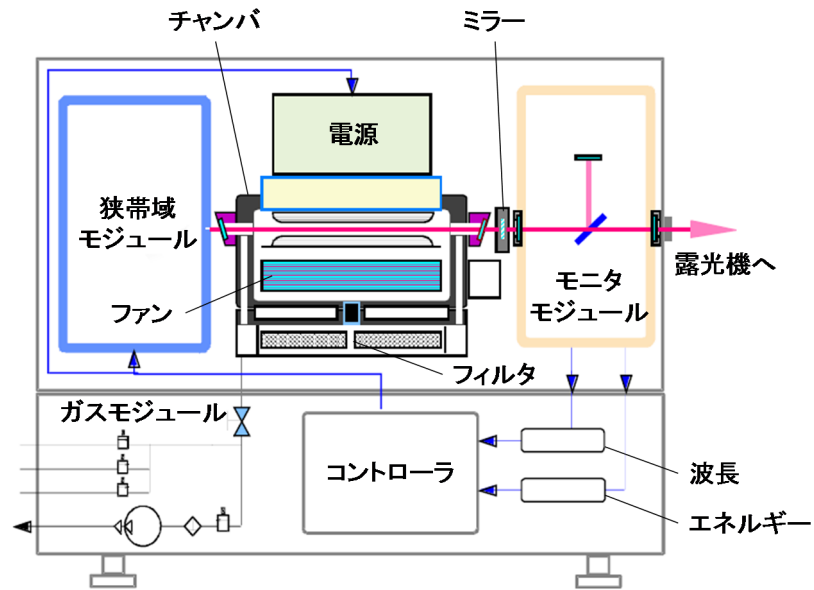
¹⁷ Gigabit Twin（ギガビットツイン）の頭文字を表している。

¹⁸ 詳細はギガフotonホームページ（<https://www.gigaphoton.com/>）を参照されたい。

¹⁹ GT シリーズでは、第二階層の部品がほぼ互換性のあるように設計されている。第二階層のチャンバや電源などの各モジュールは、高出力・長寿命を実現するために改良し続けられており、より高性能なモジュールに置き換えられていき、それがヴァージョンアップとしてリリースされる。

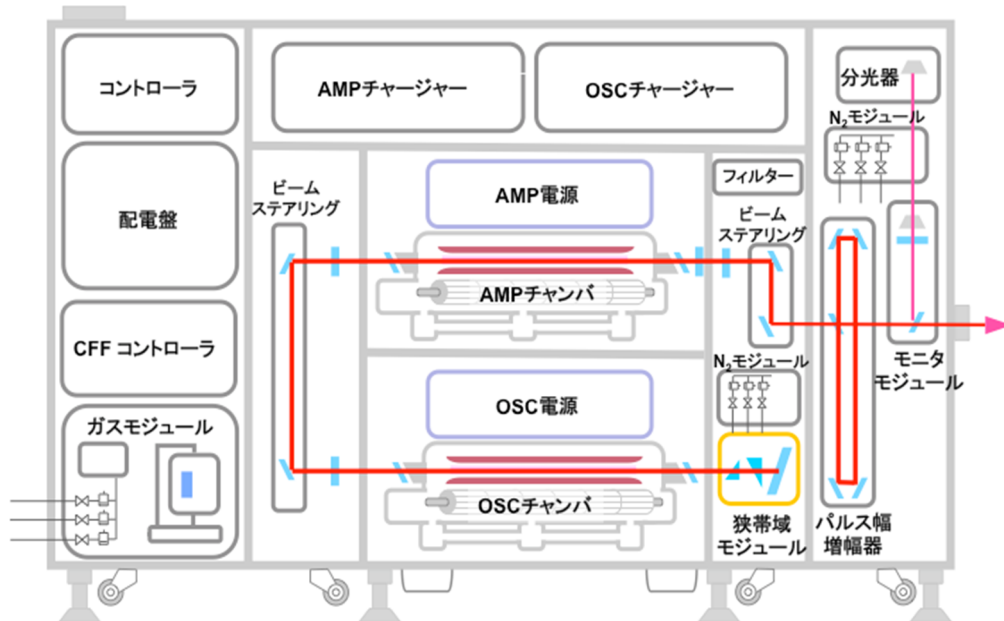
²⁰ Oscillator Beam Steering。オシレータチャンバのビームをアンプチャンバに注入するための光軸を調整する。

図9（再掲）G シリーズの構成



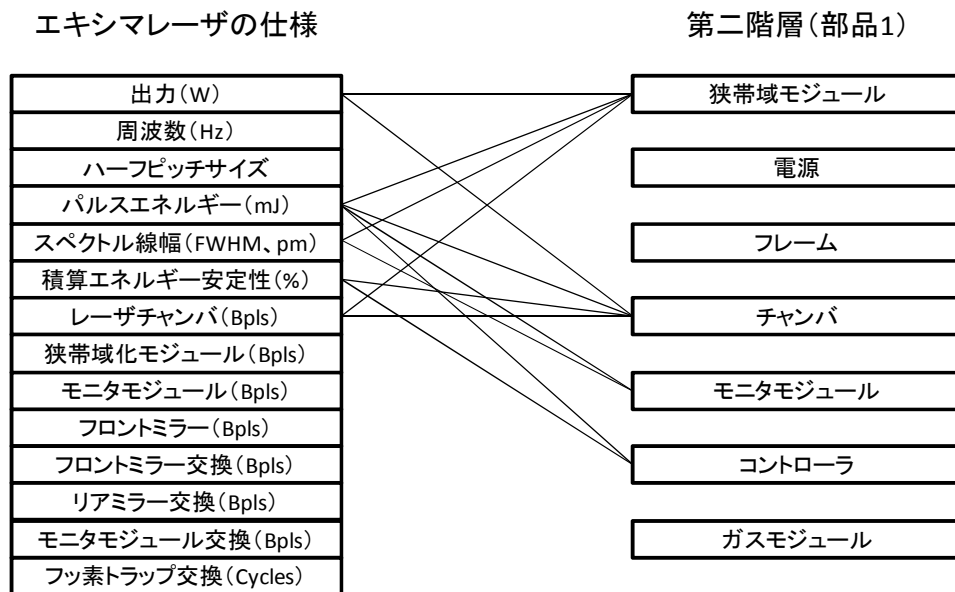
(出所) 溝口 (1998)。

図14 GTシリーズの構成



(出所) ギガフォトン提供。

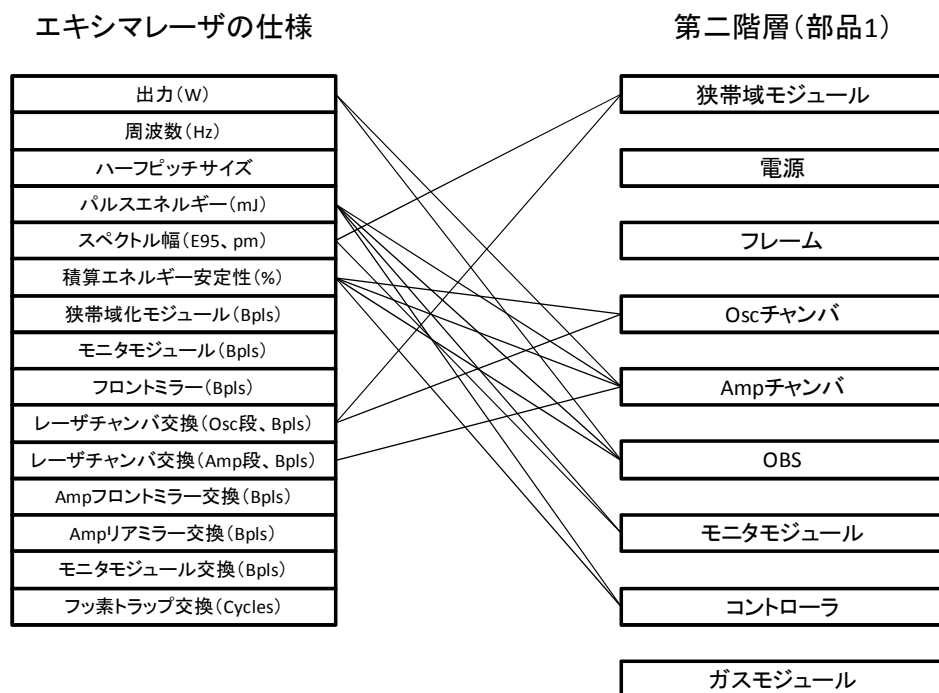
図15 Gシリーズの仕様と第二階層（部品1）の依存関係



(注) G20A、G41A、G42A 製品共通。

(出所) ギガフォトンへのインタビュー調査を基に筆者作成。

図16 GTシリーズの仕様と第二階層（部品1）の依存関係



(注) GT40A、GT60A、G61A、GT62A、GT63A 製品共通。

(出所) ギガフォトンへのインタビュー調査を基に筆者作成。

4.7 新しい製品アーキテクチャを担う組織

GT シリーズの開発を担ったチームと、従来の G シリーズを継続して行うチームは別組織であった。それには特殊な事情があった。コマツとウシオ電機の JV として 2000 年に設立されたギガフォトン¹⁾は、単独企業として収益に責任を持たねばならない法人となったが、実態は研究開発費がかさみ、赤字の状態であった。そこに、露光機メーカーから、高出力パワーという厳しい要求が課されることとなった。そこで、新しいツインチャンバを開発するチームを、親会社のコマツに移籍させて取り組ませることになった。人件費の処理だけではなく、開発現場そのものが隔離され、技術者の交流は断絶した。必要な情報交換は、書面を使って行われた。ユーザーとやり取りをしなければならない営業担当からの強い要請により、月に 1 度だけ、情報交換する機会が設けられた。完成したツインチャンバのプラットフォームは、ユーザーから高く評価され、長く活用されている。

5. ギガフォトンと ASML のアーキテクチャの相違

ギガフォトンの ArF エキシマレーザは、第二階層の基幹部品として狭帯域モジュールとチャンバ、そしてフレームを内製していた（図 13）。特に狭帯域モジュールとチャンバの内部は巧妙な調整が必要なことから熟練の暗黙知を要する技術者が製造を行っていることを前章で確認した。第二階層の基幹部品の内部は相当な擦り合わせを必要とするインテグラルになっている。その他の第二階層の部品については、設計を自社で行い、製造を外部企業に委託することで開発コストを削減している。第二階層の部品（各構成要素）を連結させてインターフェースを形成するには、最初の時点では多大な努力を必要としたかもしれないが、一旦インターフェースを確立させるとその後は困難ではない。出荷前に、ギガフォトンの社内ですべてを終える。

製造工程の詳細を説明したい。各構成要素は並行して組み立てられ、最も時間がかかるのは 15 日間の動作確認である。ASML の検査基準書（数十ページ）に従って、試験を行って合格、不合格を判定しなければならない。試験はステップになっており、合格の場合は次へ進む。不合格になると、関連する構成要素を調整して再試験する。梱包に 1 日かけ、出荷して、オランダの ASML に納入するのに 1 週間程度かかる。ASML で据え付けするのに 2 日をかけ、引き渡してから見直しが必要になることはほとんどない。つまりは、組み立てから引き渡しまで、早い機種で 1 カ月、複雑な機種はそれを超えることもある。ASML に出荷された後は、ASML がギガフォトンの製品を含め、調達したいろいろな構成要素を露光機に組み上げていく。

ここで、図 13 を再掲して、ギガフォトンと ASML の製品アーキテクチャの比較をしてみたい。ASML は露光機の組み立てとソフトウェアに関しては自社で統合的にを行い、それ以外は外注しており、オープン型であることがわかる。一方、ギガフォトンは、基幹部品の設計から製造まで内製化し、その他の部品は自社で設計し特殊製品として製造を委託している。つまり、クローズ型であるといえる。

図13（再掲）事業システムの統合と分業

	研究開発	設計	製造		研究開発	設計	製造
露光機 (製品)	ASML			エキシマレーザ (製品)	ギガフォトン		
ソフトウェア (部品A)	ASML			フレーム (部品A)	ギガフォトン		
投影レンズ系 (部品B)	ツァイス			狭帯域モジュール (部品B)	ギガフォトン		
照明系 (部品C)	ツァイス、ラムダフィジックス			チャンバ (部品C)	ギガフォトン		
ステージ (部品D)	フィリップス		フィリップス グループ	コントローラ (部品D)	企業D	ギガフォトン	企業D
光源 (部品E)	サイマー、ギガフォトン			ガスモジュール (部品E)	企業E	ギガフォトン	企業E
ボディ (部品F)	フィリップス、フィリップスグループ			モニタモジュール (部品F)	企業F	ギガフォトン	企業F
アライメント系 (部品G)	ツァイス、フィリップス、アジレント		アジレント、 ツァイス他	電源 (部品G)	企業G	ギガフォトン	企業G

(注) 左：ASML、右：ギガフォトンを表す。

(出所) 左：中馬（2004）、Chuma（2006）を基に筆者作成。

右：ギガフォトンへのインタビュー調査を基に筆者作成。

ASML のオープン型は、最後の段階で非常に繊細な調整を要する。Chuma（2006）によると、組み立てに 4-10 日間、顧客のカスタマイズ仕様に合わせるために 20-30 日間、顧客の設置現場での最終テストに 20-30 日間かかるという。これに比べると、ギガフォトンの製品は、自社内で調整が完了できることになり、完全に自己統制できる製品なのである。

6. 結論

研究目的であげた 3 点は次であった。

- ① 製品アーキテクチャがモジュラーかインテグラルかはどのように決まったのか。
- ② また、外部に対してオープンかクローズかもどのように決まったのか。
- ③ 製品アーキテクチャが大きく変化する節目を乗り越えた組織体制やマネジメントはどのようなものだったのだろうか。

①について、モジュラーかインテグラルかは、構成要素間の連結の複雑性、つまり、調整が困難かどうかによって決まるという原則が製品アーキテクチャ論にはある。しかし、露光機の構成要素間の調整はかなり困難であるにもかかわらず、ASML の露光機は 7 つの構成要素からなるモジュラーになっている。ソフトウェアのみ内製し、ほぼすべてのハードウェアを外注している。したがって、2 カ月以上、調整を行うという状況になっている。

ギガフォトンの製品も 7 つの構成要素からなるモジュラー・アーキテクチャであるが、主要な構成要素を内製している点が ASML とは異なる。それでも、構成要素間を調整するために、ASML の露光機ほどではないものの、ある程度の時間を要する。構成要素間の連結は単純とはいえない。その理由は、多様な専門領域にわたる、サイエンス度が高い知識を扱うがゆえに、擦り合わせに時間がかかるということであろう。さらに、主要な構成要素の内部は微妙な調整が必要なことから、自社の技術者が設計と製造を行って擦り合

わせを行う。立本（2010）が指摘するように、モジュールの中味はかなりインテグラルになりやすいという原則に即している。

①の結論として、インテグラルかモジュラーに簡単に二分離できない製品アーキテクチャがあり、本事例はそれに該当することがわかった。モジュラーにはほとんど擦り合わせが必要ではない完全なモジュラー（Baldwin and Clark, 2000）もあれば、インテグラルに近い不完全なモジュラー（Chuma, 2006）もある。ギガフォトンの製品も、ASML の製品も不完全なモジュラーということになるだろう。サイエンス度が高い領域では、そのような製品アーキテクチャが出現しやすいのではないか。そして、擦り合わせに際しては、担い手の専門知識や能力が大きく影響する。ギガフォトンは、製品に必要なコアの知識を保有しているため、ASML ほど、擦り合わせに苦勞することはなかったのである。

②の外部に対してオープンになるのか、クローズになるのかについては、川上の部品から川下の完成品までの流れの中で、当該製品がどこに位置するかで決まる。ギガフォトンは、外部に対してクローズである。もしかすると、第二階層または第三階層のサプライヤーに情報をオープンにし、設計も委託することは可能であったかもしれない。しかし、クローズとすることで、付加価値を内部に閉じ込めて競争優位性を高めた。それを可能にしたのは、ギガフォトンの製品が川下の完成品ではなく、川上の部品であったことにある。川上の部品は特定の機能を果たすことを役割とするため、川下の完成品のようにあらゆる機能を果たす必要がない。反対に、川下に位置する ASML の露光機は多くの機能を果たす必要があり、サプライヤーから調達してきた構成要素を自社内で組みあげて、顧客の要求どおりに調整を完了するには労力がかかる。したがって、オープンなモジュラーというアーキテクチャを選択せざるをえないのである。

ところで、クローズにすることで得られる便益は大きい。オープンにしたならば起こりえたリスク、すなわち、外部企業が得る情報を極力抑えて模倣を防ぐことができる。新たな参入の脅威を減らすことができる。

③の製品アーキテクチャが変化する節目を乗り越えた理由は、前章で説明したとおり、新たな組織体制で設計に臨み、既存のアーキテクチャの担当者とは、ほぼ遮断に近い状況であったことが功を奏した。もしも、既存のアーキテクチャを意識しながら製品開発に臨んだ場合には、Henderson and Clark (1990) が指摘する、情報フィルターの作動が起きてしまった可能性が高い。組織内に発達した情報フィルターが、既存製品の改善に重要と思われるものだけを通して、新しい知識の獲得を妨げてしまったかもしれない。本稿の結論は、従来のメンバーがそのまま継続することは好ましくなく、別組織を置るか社内外の新しいメンバーを加えて再編成したほうがよいとする先行研究の主張に合致する（Chesbrough and Kusunoki, 2001; Tushman and O'Reilly, 1997; 魏, 2001, 2004; 田路, 2005）。

これらの議論のまとめとしては、川上に位置することを利用して、外部に対してクローズな、新しいアーキテクチャを別組織で開発できたことが、競争優位性をもたらしたといえよう。

ところで、本稿では、日本のニコンを取り上げていないが、ニコンは ASML と比べると、インテグラル・アーキテクチャの特性が強いと業界で認識されており、Chuma (2006) も指摘している。かつての露光機メーカーの雄であったニコンが、インテグラルからモジュラーにシフトをすることに苦しんだのとは反対に、ギガフォトンが競争優位性を保てたの

は、川上に位置する幸運によるところが大きかったといえまいか。同様の例として、Apple 社のスマートフォンを開けると、相当の部品を日本製が占めるという事実がある²¹。平たく言うと、部品に強く完成品に弱い日本企業という指摘になる。別稿では、川下に位置する日本企業に注目することとし、ニコンがアーキテクチャの変更に苦しんだ要因を分析してみたい。

ギガフォトンへのインタビュー

2012 年 8 月 2 日 副社長 溝口計

2012 年 10 月 9 日 2015 年 10 月 7 日 レーザ開発部長 松永隆

2012 年 10 月 9 日 2015 年 10 月 7 日 営業部長 榎波龍雄

ASML へのインタビュー

2015 年 9 月 4 日 Paul Manders : Manager of Logistics Supplier Management

2015 年 9 月 1 日 Jan Smits : Executive Vice President

2015 年 10 月 6 日 Guustaaf Savenije : 元 VP of Source technology

ギガフォトンへの書面による技術レビュー

2012 年 11 月 レーザ開発部長 松永隆

2015 年 6 月 営業部長 榎波龍雄

参考文献

- 伊藤宗彦（2005）『製品戦略マネジメントの構築—デジタル機器企業の競争戦略』有斐閣。
- 魏晶玄（2001）「製品アーキテクチャの変化に対応する既存企業の組織マネジメント—組織内資源の移動と再結合による異質な資源の創造プロセス—」『組織科学』 35(1)、108-123。
- 魏晶玄（2004）『イノベーションの組織戦略—知識マネジメントの組織設計—』信山社出版。
- 岡崎信次・鈴木章義・上野巧（2012）『はじめての半導体リソグラフィ技術』技術評論社。
- 後藤晃・小田切宏之編（2003）『サイエンス型産業』（日本の産業システム 3）NTT 出版。
- 柴田友厚（2008）『モジュール・ダイナミクス—イノベーションに潜む法則性の探求』白桃書房。
- 柴田友厚・玄場公規・児玉文雄（2002）『製品アーキテクチャの進化論：システム複雑性と分断による学習』白桃書房。
- 田路則子（2005）『アーキテクチャル・イノベーション—ハイテク企業のジレンマ克服—』白桃書房。
- 田路則子・甲斐敦也（2009）「半導体商社の事業ドメイン拡大のメカニズム」『赤門マネジメント・レビュー』 8 巻 5 号、pp. 211-231。

²¹ 「スマホ進化、支えるお家芸——日本製部品の独壇場（真相深層）」『日本経済新聞』、2012 年 10 月 19 日、朝刊 2 ページ。

- 立本博文（2010）「設計進化のダイナミクス：複雑システムのアーキテクチャ研究の流れ」
MMRC Discussion Paper Series No.332、東京大学ものづくり経営研究センター。
- 中馬宏之（2004）「日本のサイエンス型産業が直面する複雑性と組織限界：半導体露光装置産業の事例から」『一橋ビジネスレビュー』東洋経済新報社、52巻3号、pp. 64-85。
- 延岡健太郎（2006）『MOT [技術経営] 入門』日本経済新聞出版社。
- 廣田義人（2002）「半導体露光装置ステッパーの開発」中岡哲郎編著『戦後日本の技術形成－模倣か創造か』（第5章）日本経済評論社。
- 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）「アーキテクチャの産業論」藤本隆宏・武石彰・青島矢一編『ビジネス・アーキテクチャ』（第1章）有斐閣。
- 藤本隆宏（2003）「組織能力と製品アーキテクチャ－下から見上げる戦略論－」組織科学 Vol.36, No.4, pp. 11-22。
- 藤本隆宏（2004）『日本のもの造り哲学』日本経済新聞社。
- 藤本隆弘・桑嶋健一編（2009）『日本型プロセス産業－ものづくり経営学による競争力分析－』有斐閣。
- 溝口計（1998）「エキシマレーザーの現状と将来」『O plus E』20(12), pp. 1373-1380。
- Baldwin, C. Y., & Clark, K. B. 2000. *Design rules: The power of modularity*, vol. 1. Cambridge, MA: MIT Press.
- Basting, D., & Marowsky, G. (Eds.). 2005. *Excimer laser technology*. Berlin: Springer.
- Chesbrough, H. W., & Kusunoki, K. 2001. The modularity trap: Innovation, technology phase shifts and the resulting limits of virtual organizations. In I. Nonaka, & D. J. Teece (Eds.), *Managing industrial knowledge: Creation, transfer and utilization*: 202-230. London: Sage.
- Chuma, H. 2006. Increasing complexity and limits of organization in the microlithography industry: Implications for science-based industries. *Research Policy*, 35: 394-411.
- Henderson, R. M., & Clark, K. B. 1990. Architectural innovation: The reconfiguration of existing product technologies and the failure of established firms. *Administrative Science Quarterly*, 35: 9-30.
- Langlois R. N., & Robertson, P. L. 1992. Networks and innovation in a modular system: Lessons from the microcomputer and stereo component industries. *Research Policy*, 21: 297-313.
- Levinson, H. J. 2005. *Principles of lithography* (2nd ed.). Bellingham, WA: SPIE - The International Society for Optical Engineering Press.
- Mizoguchi, H., Inoue, T., Fujimoto, J., Yamazaki, T., Suzuki, T., Matsunaga, T., Sakanishi, S., Kaminishi, M., Watanabe, Y., Ohta, T., Nakane, M., Moriya, M., Nakaike, T., Shinbori, M., Yoshino, M., Kawasuji, T., Nogawa, H., Ito, T., Umeda, H., Tanaka, S., Taniguchi, H., Sasaki, Y., Kinoshita, J., Abe, T., Tanaka, H., Hayashi, H., Miyao, K., Niwano, M., Kurosu, A., Yashiro, M., Nagano, H., Matsui, N., Mimura, T., Kakizaki, K., & Goto, M. 2005. High-power injection lock laser platform for ArF dry/wet lithography. *Optical Microlithography XVIII*. Proceedings of SPIE, 5754: 780-789.
- Moore, G. E. 1965. Cramming more components onto integrated circuits. *Electronics*, 38(8): 114-117.
- Shibata, T., Yano, M., & Kodama, F. 2005. Empirical analysis of evolution of product architecture: Fanuc numerical controllers from 1962 to 1997. *Research Policy*, 34: 13-31.

- Tushman, M. L., & O'Reilly III, C. A. 1997. *Winning through innovation: A practical guide to leading organizational change and renewal*. Boston, MA: Harvard Business School Press.
- Ulrich, K.T. 1995. The role of product architecture in the manufacturing firm. *Research policy*, 24: 419-440.

田路則子（たじ・のりこ）

法政大学イノベーション・マネジメント研究センター所長
法政大学経営学部教授

佐藤政之（さとう・まさゆき）

法政大学大学院経営学研究科修士課程修了

榎波龍雄（えなみ・たつお）

ギガフォトン株式会社