

半導体産業における 垂直非統合のプロセスと要因分析

末 永 啓一郎

要 旨

トランジスタの発明以降、半導体産業は急激な発展を遂げると共に、生産拠点は様々な国へ広がっていった。本稿は、こうした現象の要因の1つとなった垂直非統合に焦点を当てる。まず、半導体産業の発展と垂直非統合の現状について述べた上で、半導体産業の垂直非統合のプロセスを検証し、半導体産業における垂直非統合の要因を明らかにする。

半導体産業の垂直非統合をもたらした要因を企業参入という視点からみると、以下のようなものが挙げられる。第1に、急激な市場拡大と、頻発する技術革新の下で、激しい競争に生き残るためには、他の産業の専門的な技術を利用せざるを得なかった。自社でそうした技術を育成することは、時間的に不可能であった。第2に、特殊な技術を持ったままスピンオフする企業が続出した。そうした企業の誕生を促す環境が存在したことも垂直非統合を促す要因となった。また、半導体工場の建設には莫大な費用が必要なため、設計など特定の工程に特化せざるを得なかったという事情もある。第3に、工程によって労働集約度やエネルギー集約度が異なり、垂直非統合型の産業組織の方が利点が大きかったという側面もある。

キーワード：半導体産業、垂直非統合、産業発展、キャッチアップ、ファブレス、ファウンドリ

はじめに

半導体産業は、トランジスタの発明以降、急激な発展を遂げてきた。半導体生産の中心であったアメリカでは、1952年のトランジスタの出荷額は約200万ドルに過ぎなかったが、1960年以降、ICの出荷額も増加し始め、1974年の半導体出荷額は約36億4,600万ドルにも達した(図1)。この間の年平均成長率は、約30%にも上っている。1976年以降も年平均20%近い成長を遂げ、2005年の全世界の半導体出荷額は、約2,275億ドルに達した(図2)。

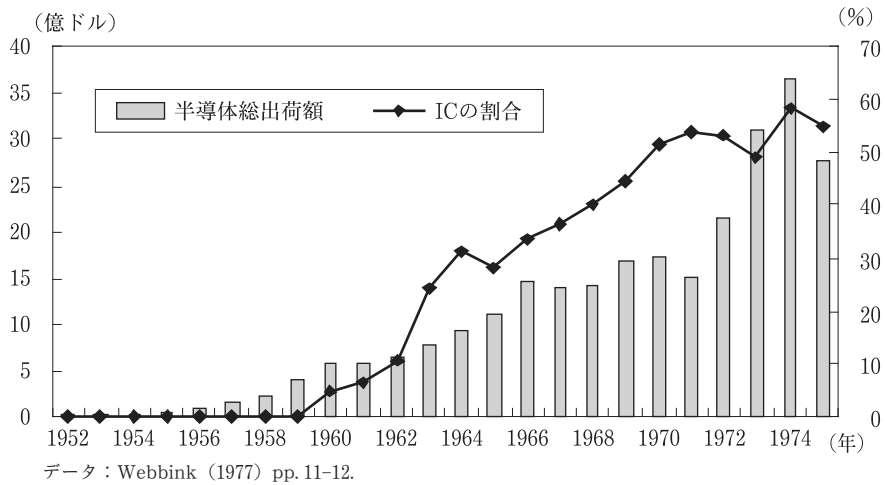


図1 アメリカにおける半導体の出荷額とICの割合

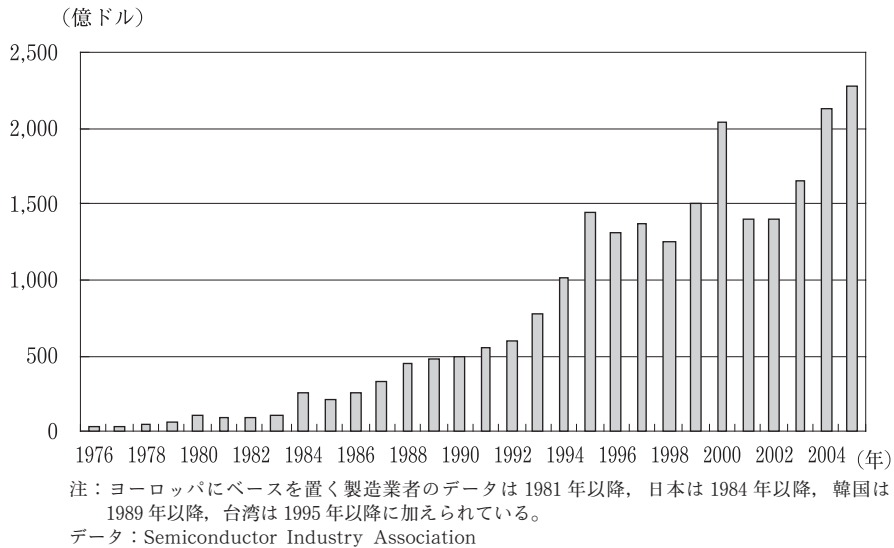


図2 全世界における半導体出荷額

半導体産業は急激な発展を遂げると共に、生産拠点はアメリカから日本やヨーロッパ、そしてアジア諸国へと広がっていった。1980年代には日本が北米を抜いて首位に立ったが、1990年代に入ると徐々にシェアを下げ、北米に再逆転された。そして、それと入れ代わるようにして、アジア太平洋地域が、1980年代から製造能力を付け始め、日本と北米を抜いて、首位に立っている(図3)。

このように半導体産業が急激な発展を遂げながら、様々な国に広がっていった要因としては、半導体技術のポテンシャル、各国の社会的能力や政策など様々な要因が考えられるが、本稿では、

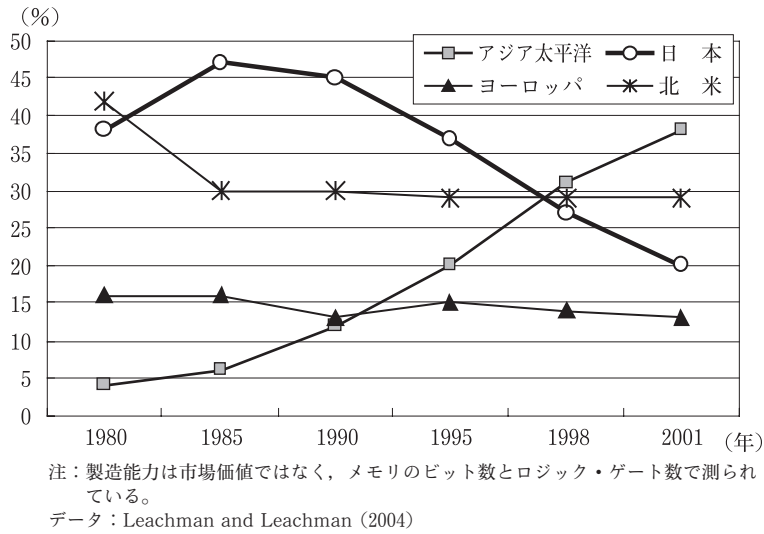


図3 半導体の製造能力の地域分布



図4 半導体の製造工程

半導体産業における垂直非統合に焦点をあてたい。この垂直非統合が、半導体産業の発展、および各国への拡大に大きな影響を及ぼした要因の1つと考えられるからである。以下では、まず、半導体の製造工程の概要と垂直非統合の現状について述べた上で、半導体産業の垂直非統合のプロセスを検証し、半導体産業における垂直非統合の要因を明らかにする。

まず半導体の製造工程についてであるが、図4は、半導体（特にIC）の製造工程の概要を示したものである。ICの製造を行うためには、まず回路を設計するとともに、シリコン・ウエハの製造などを行う。その後、シリコンのウエハに回路を書き込み、チップとして組立られた後、検査工程に回される。回路設計から、組立・検査まで、各工程では、非常に高度な技術を体化した様々な製造装置が用いられている。

半導体技術が生まれた当初、原材料の加工、製造装置の作成なども、デバイス・メーカーが行っていたが、その後、様々なプロセスが、デバイス・メーカー以外の企業で行われるようになる。半導体製品のベースとなるシリコンは、当初、単結晶の精製から行うデバイス・メーカーが多かったが、次第に専業メーカーへの依存度が高まり、1992年には、デバイス・メーカーのシリコン・ウエハ内製化率が、米国11%、日本4%、欧州2%、アジア他2%程度にまで下落した⁽¹⁾。1990

表1 企業類型に基づく半導体の時価総額の割合

(単位：%)

年	ファブレス	IDM	ファウンドリ	製造装置	EDA	IP	組立・検査
1994	7.7	76.1	0.0	12.3	3.9	0.0	0.1
1999	7.4	70.1	6.2	10.5	2.5	1.3	2.0
2004	12.0	59.3	9.5	13.9	1.7	1.0	2.6

出所) Strojwas (2005)

年代後半には、IBM がシリコンの内製を停止し、日立製作所がシリコン内製部門を信越半導体に移管するなど、さらに内製化率が低下している。

半導体製造装置の内製化率については、正確なデータがないが、電子ジャーナル(2005)によると、2004年の世界の主要半導体製造装置の市場は約3兆2,295億円に上っており、例えば、そのうち最大の市場であるステッパ&スキャナ(約4,787億円)については、ASML、ニコン、キヤノンの上位3社で99%のシェアを占めている。大半のデバイス・メーカーが、この3社から装置を調達しており、内製化率は極めて低いと考えられる。他の製造装置についても、内製化している企業もあるが、多くは、資本関係のない外部の企業から購入することが多い。

世界のチップ販売額に占めるファブレスの割合も2001年時点で10.9%に上っており、さらに拡大していくことが予想されており⁽²⁾、世界の製造能力に占めるファウンドリの割合も2001年時点で25%に達している⁽³⁾。組立工程についても、2003年時点で、独立系の請負業者が、全世界の組立工程の26.7%を占めており、さらに拡大していく傾向にある⁽⁴⁾。

各半導体企業の時価総額を企業類型別にみると、IDM⁽⁵⁾のシェアが次第に低下し、ファブレスやファウンドリなど特定の工程に特化した企業のシェアが高まりつつある。また、EDA⁽⁶⁾や包装・テストの部門の時価総額は低いですが、製造設備の企業は、一定のシェアを維持していることが分かる(表1)。

I 半導体産業における垂直非統合のプロセス

では、半導体産業では、どのようなプロセスで垂直非統合が進んでいったのか。本節では、垂直非統合のプロセスを工程別に検証していく。

シリコン

トランジスタが発明され、市販され始めた1950年代前半、トランジスタの主となる半導体材料は、ゲルマニウムであった。ゲルマニウム・トランジスタを製造するため、各社は、高純度のゲルマニウムの精製及びそのための装置の製造を基本的に自社で行っていた⁽⁷⁾。しかし、ゲルマ

ニウムは融点が低く、温度が高くなると不良の原因となったため、シリコンへの移行が必要となる。1954年に、テキサス・インスツルメンツ社がシリコン・トランジスタを発表してからは、ゲルマニウムからシリコンへと次第に移行していった。

しかし、高純度多結晶シリコンの精製は、非常に高度な化学処理を必要とするため、トランジスタの製造を行っていた企業は、ワッカー・ケミー社やデュボン社などの化学系企業から高純度多結晶シリコンを購入し、単結晶やウェハの加工を行っていた⁽⁸⁾。1950年代後半以降、モンサント社やダウ・コーニング社なども高純度多結晶シリコンの市場に参入し、日本でも東海電極製造や日窒電子化学がこの市場に参入する。その後こうした企業は、デバイス・メーカーの指導の下で単結晶とウェハの製造を行うようになったが、生産効率や資金効率の向上のため、材料メーカーに逐次的に生産が移転されるようになる⁽⁹⁾。デバイス・メーカーの中には、テキサス・インスツルメンツ社のように、多結晶シリコンの製造まで行う企業が存在したり、単結晶シリコンの生産を行う企業がインゴット⁽⁹⁾の段階でデバイス・メーカーに納入した時期もあったが、現在では、多くのデバイス・メーカーが、シリコン・ウェハの製造までを専業メーカーに依存するようになった。

この垂直非統合のプロセスでは、化学企業など外部の企業が参入したり、デバイス・メーカーが多結晶シリコンの製造など上流工程まで進出したりしながら、時代とともに、シリコン・メーカーとデバイス・メーカーとの間の境界も変化していった。これは、規模の経済や生産効率といった要因の影響を受けていた場合もあるし、競争上の技術的コアを確保するための戦略であった場合もある。また、多結晶シリコンの精製のように、莫大な電力や水素などの供給が必要な場合には、特定の工程を海外の企業に依存することもある⁽¹¹⁾。現在では、ウェハを内製するデバイス・メーカーも減少し、ウェハを生産するシリコン・メーカーの寡占化が進んでいるが、これは、ウェハの直径が拡大するにつれ、研究開発費が莫大なものとなり、いくつかの企業がウェハの製造から撤退したためである。

単結晶シリコンを上げるための装置も、当初は、デバイス・メーカー自身が開発・製造しなければならなかった。その後、レイボルト社、ハムコ社、フェロ社、シルテック社など、単結晶の引上げ装置を市販する企業も現れたが、シリコン・メーカーが単結晶引上げについてのノウハウを蓄積するとともに現在では、ほとんどのシリコン・メーカーが引き上げ装置を内製化している。これは、シリコン・メーカーが、引上げ技術を内部化することで、他社との優位性を維持しようとしているためでもある⁽¹²⁾。

製造装置

前工程や後工程で用いる製造装置も、当初は、実験装置の域を出ていないものも多く、大半の

製造装置は、デバイス・メーカーが内製していた。しかし、プレーナー・プロセスが開発され、特殊な製造設備が必要となると共に、また、デバイス市場に新たに参入した規模の小さい企業は、半導体製造装置の開発にまで手が回らなかったために、半導体の製造装置に特化した企業が増加し始める。1960年代初頭には、マテリアルズ・リサーチ社、GCA社、キュリック・アンド・ソファ社、サムコ社など独立製造装置メーカーが出現した。こうした製造装置のベンチャー企業は、デバイス・メーカーのベンチャー企業と同様、デバイス・メーカーや他の製造装置メーカーの重役によって設立されることが多かった。1960年代終盤には、ヴァリアン社、ジェネラル・シグナル社、パーキン・エルマー社など、それまで科学設備や真空管を作っていた大企業も、半導体製造装置市場に参入し始め、次第に、半導体製造装置産業が形成されていく。その後、大手デバイス・メーカーの中には、製造装置を内製し続ける企業もあったが、急激な技術進歩と開発費用の負担に耐えられず、外部調達に切り替える企業が増えていった⁽¹³⁾。

例えば、半導体製造装置の中でも、最も高度な技術が必要といわれる露光装置については、フェアチャイルド社がフォトリソグラフィ技術を開発したり、ステップ・アンド・リピート・カメラを製造するなど、デバイス・メーカーとしてのみならず、半導体製造装置の技術においても先端的な企業であった⁽¹⁴⁾。その後、1960年代には、半導体製造装置メーカーであるクリック・アンド・ソファ社のコンタクト・アライナーが露光装置市場を支配するようになり、1973年には、パーキン・エルマー社のMicralign プロジェクション・マスク・アライナー、1978年には、GCA社のステッパが導入されるなど、アメリカの企業を中心に、製造装置メーカーが露光装置の発展を牽引していった⁽¹⁵⁾。

パーキン・エルマー社は、元々、世界最大の分析機器のメーカーだったが、アメリカ空軍との契約で、スキャニング・アライメント・システムの生産を行ったのをきっかけに、半導体設備の市販も行い、大きな成功を収めた⁽¹⁶⁾。ステッパを最初に実用化したGCA社は、それ以前に、天文学者によって設立されたデビッド・マン社を買収していたが、そのマン社の技術的能力がステッパの開発につながった。1980年代後半になると、日本のニコンやキヤノンがステッパ市場において優勢となる。この二社が成功した要因としては、通産省のVLSIプロジェクトも挙げられるが、従来から培ってきたレンズ技術や精密機械技術によるところも大きい⁽¹⁷⁾。

半導体の生産は、微細化が進むとともに、従来とは異なる技術が必要となることが多い。特に、露光装置のように高度な技術が必要な場合には、それまでの装置を生産していた装置メーカーやデバイス・メーカーよりも、半導体産業とはあまり縁のなかった、特殊技術を持った企業が、革新的な製品を開発することもある。

後工程

1960年代には、後工程が発展途上国で行われるようになる。1961年にフェアチャイルド社が香港にトランジスタの組立工場を設立したのを皮切りに、モトローラ社やテキサス・インスツルメンツ社を含む多くのアメリカのデバイス・メーカーが、組立工場をアジアなど発展途上国に建設していった⁽¹⁸⁾。当時、後工程は、非常に多くの労働者を必要としたため、低賃金労働者が豊富に存在する発展途上国は、非常に魅力的であった⁽¹⁹⁾。また、海外での付加価値部分のみに関税を課すアメリカの関税政策や、発展途上国における輸出加工区の設置なども、アジアへの組立工程の移転を促した⁽²⁰⁾。発展途上国に後工程を移転し始めた当初は、アメリカのデバイス・メーカーが、子会社を設立して工場を建設するが多かったが、受入国側の政策の影響もあって、次第に、発展途上国企業への委託という形が増えていった。

現在では、台湾の企業を中心に、後工程専門の企業が、1つの産業を形成している。組立工程に対するデバイス・メーカーの要求も、半導体デバイスの複雑化に伴って高度化しており、様々なタイプの組立技術を持ったアジアの後工程専門メーカーが、半導体生産において、必要不可欠な存在となっている⁽²¹⁾。後工程の場合は、元々、前工程とのインターフェースが明らかであり、労働集約度の違いのために、生産拠点が発展途上国に移転されることとなった。その過程で後発国企業が後工程に参入し、技術力を高めることで、半導体産業の重要な一部となっていった。

EDA

半導体デバイスの回路設計は、ICのトランジスタ数が500個程度の頃は、1人の設計者が手作業で回路設計を行うことが出来たが、集積度が上がると共に、非常に手間のかかるものとなり、自動設計ツールの必要性が高まっていった。当初は、デバイス・メーカーがそうしたツールを内製していたが、内製ツールは、基本的に自社内でしか利用できなかったため、他社に販売して開発費を回収することができず、集積度のさらなる上昇と共に、自動設計装置を内製することが困難となっていった。1970年代末から、カルマ社、アプリコン社、コンピュータ・ビジョン社など、EDAの開発を専門とするベンチャー企業が現れ、80年代後半には、EDA産業が独立することになる⁽²²⁾。

ファブレス

1980年代には、チップス・アンド・テクノロジーズ社、シーラス・ロジック社、ザイリンクス社といったファブレス企業が誕生する。こうした企業は、デバイスを生産するための工場を持たず、デバイスの設計に特化することで、短期かつ柔軟に製品を設計できるようになった。デバ

イスの製造は、当初、IDMなどに委託していたが、IDM側にとっては、製造設備が稼動していない時期に委託があれば、製造設備を有効活用できるという利点があった。

ファブレス企業が出現した要因としては、様々な要因が考えられる⁽²³⁾。製造プロセスとしてCMOS⁽²⁴⁾が優勢となり、デバイス製造の技術が標準化されたことで、デバイスの設計者と製造のエンジニアの分業が可能となったことも1つの要因であろう。また、デバイスを製造するために必要な投資額が莫大なものとなり、新規参入を目指す企業が、製造プロセス以外の工程にしか参入できなくなったという事情もある。こうした企業に資金提供するベンチャー・キャピタルは、その他の投資機会が増えていたこともあり、半導体製造という莫大な資金が必要となる投資には消極的であった。その他、ASIC⁽²⁵⁾に対する需要の拡大が、設計業務に対する需要を拡大させたことや、EDAやIP⁽²⁶⁾を提供する専門企業が増えたことも、ファブレス企業の増大を促す要因となった。

ファウンドリ

ファブレス企業の増加を受け、1987年にはファウンドリ専門のTSMC社が誕生する。それ以前にも、ファウンドリ業務を行うIDMは存在したが、IDMにとって、ファブレスからの受託は副業に過ぎず、品質や納期、機密の点で問題があった。また、ファウンドリ専門の企業は、IDMのセカンド・ソースとして貢献するという面もある。半導体を製造するためには、莫大な投資が必要であり、技術サイクルも早く、また半導体業界特有の「シリコン・サイクル」も存在するため、デバイス・メーカーは、自社で製造をすべて行うことが技術的にも資金的にも難しくなっていた。そこで、リスク回避という目的もあって、TSMC社などのファウンドリに製造を委託する企業が増えていった。ファウンドリ側としては、幅広い技術レベルを扱うとともに、様々な種類の製品を製造できるようにすることで、技術サイクルやシリコン・サイクルの問題に対応できることができた。TSMC社の成功を受けて、1995年には、UMC社がファウンドリ専業となり、その後、続々と、ファウンドリ専業の企業が誕生し、半導体産業に占めるファウンドリの比率も年々高まっている⁽²⁷⁾。

II 半導体産業における垂直非統合の要因分析

半導体産業の歴史が始まった当初は、デバイス・メーカー自身が、大半の工程を担当していた。これは、Stigler(1951)が論じているように、新しい産業は、既存の経済システムとつながりが少ないため、原材料や製造装置、販売業者、利用者、労働市場などを自分たちで準備せざるを得ないためである。その後、産業の発展とともに、垂直非統合が可能となっていく。垂直非統合

を拡大させる主体は、新たに参入した企業であるが、参入する企業は大きく分けると3つに分類できる。第1に、半導体以外の産業に従事していた企業が、得意な技術を活かして参入するケースである（多角化のケース）。第2に、それまで半導体産業に従事していた従業員が、特定のスキルなどを活かして、新たに企業を立ち上げるケースである（スピンオフのケース）。第3に、後発国の企業が、低賃金などの比較優位を活かして参入するケースである（後発国のケース）。

では、どのような場合に、企業の参入が生じたのであろうか。1つの重要な要因は、半導体の生産に様々な専門技術が必要となったことである。リーダー的なデバイス・メーカーでも、短期間で開発することが出来ない工程もあった。その場合には、市販されている機器を半導体用に手直しして利用するケースや、専門の企業に特別な仕様を提示して開発してもらうケースもあった。

その後、デバイス・メーカーの中には、技術を蓄積すると共に、そうしたプロセスを内製化して、垂直統合を行うケースもあった⁽²⁸⁾。しかし、全体的にみると、垂直非統合が進むケースの方が多かった。当初、様々なプロセス（製造装置の開発・生産も含む）を自社で行うか、専門の企業と共同で行うことが多かったデバイス・メーカーも、やがて内製するのをやめ、他の専門メーカーへ外注することが増えていった。これは、そのプロセスを自社で行うよりも、他社に依存した方が得策と判断したためであるが、様々なリスクも存在した。特に、重要な技術を他社に握られ、技術支配力や市場支配力を利用される可能性もあった。しかし、活発な企業参入と技術革新が生じている中では、長期的な予測を行うことは困難であった。相対的に技術水準がそれほど高くなかったプロセスでも、特殊な技術革新が生じることによって、半導体の製造プロセスにおける重要な工程となることもあった。最先端のデバイスを開発・生産しているメーカーほど、最先端技術を開発しながら複数の工程のすり合わせを行う必要があるため垂直統合を維持する必要性が生じる場合があるが、こうした企業でも、シリコンや製造装置の多くを、外部企業から調達している。

こうした企業参入を可能としている要因としては、生産工程やインターフェースの標準化も挙げられる。シリコンのウェハにしても、様々なウェハが存在するが、ウェハの基本的な製造方法が確立し、デバイス・メーカーがウェハ上に書き込むプロセスが確立していったことによって、シリコン・ウェハ産業とデバイス・メーカーとの分離が容易となった。また、すでに述べたように、CMOS技術が標準的なものとなり、設計と製造の間の境界がある程度明確になったことが、ファブレスとファウンドリの誕生を促したという側面もある。

また、製造装置についても、デバイス・メーカーが内製を行っていた時点では、各企業が独自の仕様で製作していたため、企業間での互換性はなかった。しかし、短期的な利益確保などを目的として、装置の外販を行ったり、製造装置部門に従事していた従業員や関連企業が別の企業で販売を行うようになるにつれて、製造装置とプロセスとの間のインターフェースが次第に明確と

なっていった。その後、性能の高い装置などのインターフェースが標準的となり、垂直非統合の境界が次第に明確となっていく。その結果、製造装置に特化して参入することが容易となり、製造装置産業がますます発展していくこととなった。そして、EDAについても同様のことを指摘できる。当初は、企業によってEDAの仕様は異なっていたが、徐々に標準化が進み、それとともにEDA産業への参入がさらに容易となっていった。そして、この参入がさらに標準化を促していくという相乗効果も見逃すことは出来ない。

Baldwin and Clark (2000) が論じているように、コンピュータ産業の垂直非統合は、IBMのシステム/360におけるモジュール化が起因となったが、これは、システム/360の設計段階で、アーキテクチャが決められ、インターフェースのデザイン・ルールが明確にされたことによって生じたものである。もちろん、コンピュータ産業における垂直非統合は、様々な要因が影響を及ぼしているものの、相対的にみると、事前に明確にされたアーキテクチャによって、垂直非統合がある程度、人為的に生じたといえることができる。それに対して、半導体産業における垂直非統合は、明確なアーキテクチャの下で進んだわけではなく、より試行錯誤の中で、経路依存的に進んでいった。

また、こうした垂直非統合の発展は、半導体技術の応用可能性や、それに伴う市場の質的・量的拡大とも関係している。半導体の生産は、元々、真空管の機能を半導体に置き換えるところから始まった。それゆえ、半導体技術をどのように発展させるべきかは、ある程度明確であり、当初の重要な目標は、動作の信頼性の向上と、コストの引下げであった。ICが発明され、信頼性が大幅に増大し、低コスト化の道筋も立ったことから、その後は、微細化に向けて様々な技術開発努力が続けられていく。このように、技術開発の方向性がある程度明確であったため、各企業は、どういった技術を採用するかについては難しい選択を迫られたものの、微細化という一定の方向に向けて技術開発努力を強力に推し進めていくことができた。

また、技術開発に成功し、技術的リードを獲得した場合に得られる高い利益も、様々な技術開発を促す要因となった。半導体デバイスの急激な市場拡大もさることながら、半導体デバイスの応用可能性が次々と広がっていったことも、半導体産業への様々な企業の参入を促していった。半導体技術は、民生用としては、まず補聴器に利用され、ラジオやテレビ、電卓やコンピュータ、携帯電話や様々な家電製品へと応用範囲を次々と広げ、半導体産業の規模は、急激に拡大していった。こうした市場拡大の可能性が、短期的かつ長期的な収益獲得の可能性を拡大させ、それに伴って、技術開発努力を刺激していった。

こうした半導体市場の量的・質的拡大は、微細化のための様々な技術の必要性とも相まって、他産業からの参入を促した。他の産業において市場が限界に近づき、新しい収益拡大の源泉を求めていた他産業の企業にとっては、半導体産業は、それまで培ってきた自社の専門技術を活かし

で多角化を図るための格好の産業の1つであった。

また、アメリカン・ドリームを夢見た企業家が、それまで勤めていた企業からスピノフする際、資金的理由から、特定の工程に特化せざるを得ない状況があったことも、半導体産業の垂直非統合を促す要因の1つとなった。これは、アメリカの半導体産業従事者の独立精神の旺盛さとも関係している。半導体産業の発展を主導したのはアメリカの企業であるが、半導体産業の垂直非統合を主導したのもアメリカの企業である。製造装置を初め、EDA 産業やファブレスの出現もアメリカ企業が主導した。これは莫大な成功報酬を容認するアメリカの文化や社会制度、ベンチャー企業を支援する様々な制度も影響しているものと考えられる。また、独占禁止法が大企業の市場参入の制約となったという点も見逃すことは出来ない。

半導体産業で垂直非統合が進んだもう1つの理由は、工程によっては、コスト競争力が非常に重要となることである。多結晶シリコンの生成は、非常に莫大な電力を必要とし、水素や塩素の豊富な供給が可能な化学コンビナートが必要なため、日本のシリコンウェハ・メーカーは、多結晶シリコンを海外からの供給に依存するようになってきている。また、すでに論じたように、当初、後工程は、手作業で行われていたため、低賃金労働者が豊富に存在する発展途上国で行われるようになった。半導体デバイスの重さと容積が価格に比べて小さく、輸送費が安くつくことも、垂直非統合に大きく影響している。その後、後工程でも自動化が進み、低賃金労働者の存在の重要性は、次第に低下していったが、後工程に従事していた台湾の企業などが、後工程専門の技術力を身に付け、後工程専門メーカーとしての基盤を確立していったというケースもある⁽²⁹⁾。

おわりに

半導体産業における垂直非統合のプロセスでは、非常に多くの企業が特定の工程に次々と参入した。この企業参入という視点からみると、半導体産業における垂直非統合の要因を次のようにまとめることが出来る。第1に、急激な市場拡大と、頻発する技術革新の下で、激しい競争に生き残るためには、他の産業の専門的な技術を利用せざるを得なかった。自社でそうした技術を育成することは、時間的に不可能であった。第2に、特殊な技術を持ったままスピノフする企業が続出した。そうした企業の誕生を促す環境が存在したことも垂直非統合を促す要因となった。また、半導体工場の建設には莫大な費用が必要なため、設計など特定の工程に特化せざるを得なかったという事情もある。第3に、工程によって労働集約度やエネルギー集約度が異なり、垂直非統合型の産業組織の方が利点が大きかったという側面もある。

本稿では、垂直非統合のプロセスと要因に焦点を当てたが、垂直非統合に関するいくつかの重要な論点には余り触れることが出来なかった。第1に、技術革新を生み出す上で、IDM など、

より垂直統合型の企業が重要な役割を果たす場合もあるが、こうした企業形態の多様性がさらに技術革新を活発にしているという面もあるし、技術革新の必要性が企業形態の多様性を生み出しているという側面もある。例えば、Teece (1996) は、イノベーションが体系的か自律的かによって、最適な企業形態が異なるのではないかと論じている。これはシュンペーターのマーク I・II の問題とも絡んでおり、産業発展を考える上で重要なテーマである。

第2に、半導体産業における垂直非統合は、後発国のキャッチアップにも大きな影響を与えた。特定の工程に特化して参入することが可能となり、その参入を足がかりに、その他の工程に進出することも可能となった。韓国は、後工程だけでなく、前工程にも進出したし、台湾は、ファウンドリだけでなくファブレスにおいても急成長を遂げている。また、最近、中国がファウンドリで力を発揮し始め、ファブレスも発展していることも注目に値する。先端的な産業になればなるほど、技術的な乖離が大きくなるため、後発国のキャッチアップが困難になるという説もあったが、特定の工程に特化することが可能であれば、キャッチアップも不可能ではなくなった。

垂直非統合のプロセスでは、デバイス・メーカーが意図しなかった現象も数多く生じた。シリコン・ウェハや後工程などでも、高い技術力が重要となり、各製造装置の寡占化も進んだ。また最先端の製造装置や材料を入手できれば、比較的容易にデバイスの生産が出来るようになったため、後発国の企業がキャッチアップ、あるいはリープ・フロッピングすることも可能となった。今後は、垂直非統合の影響についても詳しく検討しながら、産業発展やキャッチアップ型発展についての考察を行っていきたい。

〈注〉

- (1) 竹腰 (1994) 24 頁。
- (2) Arensman (2003) 参照。
- (3) Leachman and Leachman (2004) p.212 参照。
- (4) Anonymous (2004) 参照。
- (5) Integrated Device Manufacturer の略。垂直統合型デバイスメーカーとも呼ばれる。半導体の設計・開発から、生産・販売まで一貫して行う。
- (6) Electronic Design Automation の略。電子設計自動化とも呼ばれる。設計作業を自動化し支援するソフトやハードのことをいう。
- (7) Braun and Macdonald (1982) 参照。
- (8) Caleb (2005) 参照。
- (9) 竹腰 (1994) 71 頁参照。
- (10) ウェハを生産するためには、まずシリコンの純度をイレブン・ナインと呼ばれるような水準にまで高めて単結晶の状態で引き上げ、それをウェハ状にスライスする必要がある。単結晶の状態で上げられた塊をインゴットという。
- (11) 高純度多結晶シリコンを生産するためには、金属シリコンからの精製に多結晶シリコン 1 トンあたり約 25 万～30 万 kWh もの電力が必要となる。また、塩酸を製造するための水素や、塩素の安定供

給を行える化学コンビナートも必要となる。

- (12) 高田・小松崎 (2000) 参照。
- (13) この段落については、Stowsky (1987, 1989) を参照。
- (14) 肥塚 (1996) 39 頁参照。
- (15) Stowsky (1989) pp. 247-248 参照。
- (16) Stowsky (1987) p. 20 参照。
- (17) 廣田 (2002) 参照。
- (18) 当初は、メキシコやエルサルバドルなどにも組立工場が建てられたが、政治的・社会的不安の影響から、その生産能力は相対的に縮小していった。Brown and Linden (2005) 参照。
- (19) アメリカで組立工程まで行くと、製造費の半分以上を組立工程の直接労働費が占めることとなった。1970 年時点の賃金水準をアメリカと比べると、シンガポールは 11 分の 1、香港は 10 分の 1 であった。U. S. Department of Commerce (1979) 参照。
- (20) 田村 (1982) 参照。
- (21) Brown and Linden (2005) 参照。
- (22) EDA の歴史については、三輪 (2001) や Hobday (1991) 参照。
- (23) Macher *et al.* (1999) p. 268, Macher and Mowery (2004) p. 331, Hobday (1991) 参照。
- (24) Complementary Metal Oxide Semiconductor の略。相補形金属酸化膜半導体とも呼ばれる。p チャネルと n チャネルの両方を用いるため、動作速度が高く、消費電力を節約できる。
- (25) Application Specific Integrated Circuit の略。特定用途向け集積回路とも呼ばれる。特定の用途のために設計、製造される集積回路のことをいう。
- (26) Intellectual Property の略。半導体の設計データやシミュレーション・モデルのことをいう。
- (27) ファウンドリについては、佐藤 (2000) 参照。
- (28) 韓国の半導体産業のように、後工程からスタートして、前工程まで行うようになったケースもある。ただし、韓国の半導体企業の中で、後工程からスタートし、1990 年までに前工程を含む一貫生産を行うようになった企業は韓国電子のみであるが、国内で後工程の基盤ができ、世界の半導体産業についての理解を深めることができたことは、韓国の電子産業の発展にとって大きな刺激となった (徐 1995)。しかし、韓国企業は、半導体材料や、製造装置市場への参入が少なく、多くを輸入に依存している。Hobday (1995) は、後発国の企業が、OEM からスタートし、技術力を蓄積すると共に、ODM へと移行し、最終的に、地場企業が自社ブランドで製造を行う OBM へと発展していくプロセスを描いている。
- (29) 現在、台湾の後工程メーカーが中国大陸に次々と進出しているが、これは、人件費が安いためというより、中国で前工程を行っている工場や、デバイスを利用するシステム企業に距離的に近いためなど、コスト以外の要因が大きい。

参考文献

- Anonymous, 2004, "Outsourcing for IC-packaging continues to climb," *Silicon Strategies*, May 7. (<http://www.eetimes.com/news/semi/showArticle.jhtml?articleID=20000257>)
- Arensman, Russ, 2003, "Fabless Goes Global," *Electronic Business*, February, 54-59.
- Baldwin, Carliss Y., and Kim B. Clark, 2000, *Design Rules, vol. 1: The Power of Modularity*, MIT Press. (安藤晴彦訳『デザイン・ルール — モジュール化パワー —』東洋経済新報社)。
- Braun, Ernest and Stuart Macdonald, 1982, *Revolution in Miniature: The History and Impact of Semiconductor Electronics Re-explored in an Updated and Revised Second Edition*, Cambridge University Press.

- Brown, Clair and Greg Linden, 2005, "Offshoring in the Semiconductor Industry: Historical Perspectives," *Institute of Industrial Relations, Working Paper*, 1-26.
- Caleb, III Pirtle, 2005, *Engineering The World: Stories From The First 75 Years of Texas Instruments*, Southern Methodist University Press.
- 電子ジャーナル, 2005, 『2005 半導体製造装置データブック』電子ジャーナル社。
- Hobday, Michael, 1991, "Semiconductor Technology and the Newly Industrializing Countries: The Diffusion of ASICs (Application Specific Integrated Circuits)," *World Development*, 19, 375-397.
- Hobday, Michael, 1995, *Innovation in East Asia: The Challenge to Japan*, Cheltenham: Edward Elgar.
- 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『戦後日本の技術形成 — 模倣か創造か —』日本経済評論社, 第5章, 127-162頁。
- 肥塚浩, 1996, 『現代の半導体企業』ミネルヴァ書房。
- Leachman, Robert C. and Chien H. Leachman, 2004, "Globalization of Semiconductors: Do Real Men Have Fabs, or Virtual Fabs?", Edited by Marin Kenney with Richard Florida, *Locating Global Advantage: Industry Dynamics in the International Economy*, ch. 8, 203-221.
- Macher, Jeffrey T. and David C. Mowery, 2004, "Vertical Specialization and Industry Structure in High Technology Industries," *Advances in Strategic Management*, 21, 317-355.
- Macher, Jeffrey T., David C. Mowery, and David A. Hodges, 1999, "Semiconductors", in David C. Mowery ed., *U.S. Industry in 2000: Studies in Competitive Performance*, National Academy Press, ch. 10, pp. 245-286.
- 三輪晴治, 2001, 「半導体産業におけるアーキテクチャの革新 — ビジネス・アーキテクチャの仕掛け合い —」藤本隆宏・武石彰編『ビジネス・アーキテクチャ — 製品・組織・プロセスの戦略的設計 —』有斐閣。
- 佐藤幸人, 2000, 「分業体制の系譜 — 台湾半導体産業の進化過程 —」『アジア研ワールド・トレンド』9月号, No. 60, 35-41頁。
- 徐正解, 1995, 『企業戦略と産業発展 — 韓国半導体産業のキャッチアップ・プロセス —』白桃書房。
- Stigler, George J., 1951, "The Division of Labor is Limited by the Extent of the Market," *The Journal of Political Economy*, 185-193.
- Stowsky, Jay S., 1987, "The Weakest Link; Semiconductor Production Equipment, Linkages, and the Limits to International Trade," BRIE Working Paper, 27, 1-70.
- Stowsky, Jay S., 1989, "Weak Links, Strong Bonds: U.S. — Japanese Competition in Semiconductor Production Equipment," in Chalmers Johnson, Laura D'Andrea Tyson, and John Zysman, *Politics and Productivity: The Real Story of Why Japan Works*, Ballinger Publishing Company, ch. 6, 241-274.
- Strojwas, Marcin, 2005, "An Empirical Study of Vertical Integration in the Semiconductor Industry," Ph.D. thesis, Harvard University.
- 高田清司・小松崎靖男, 2000, 『21世紀の半導体シリコン産業 — 技術開発と市場展望 —』工業調査会。
- 竹腰敏男, 1994, 『半導体シリコンビジネスのすべて — 8インチ・エピウェーハ化が焦点 —』工業調査会。
- 田村真治, 1982, 「アメリカ半導体産業の成立と国際的展開」『政経研究』第36巻, 3-28頁。
- Teece, David J., 1996, "Firm Organization, Industrial Structure, and Technological Innovation," *Journal of Economic Behavior and Organization*, 31, 193-224.
- U.S. Department of Commerce, 1979, *A Report on the U.S. Semiconductor Industry*.
- Webbink, Douglass A., 1977, *Staff Report on the Semiconductor Industry: A Survey of Structure, Conduct and Performance*, U.S. Federal Trade Commission.

A Study of Vertical Disintegration in the Semiconductor Industry

Keiichiro Suenaga

Abstract

The semiconductor industry has accomplished amazing growth, and the production base has extended to various countries. This paper pays attention to vertical disintegration that became one of the factors of such a phenomenon. At first, the current state of vertical disintegration is described. Then the process of vertical disintegration is verified. At the end, the factor of vertical disintegration is analyzed.

The factor to bring vertical disintegration of the semiconductor industry is as follows. First, the market expanded rapidly, and the technological innovation happened frequently. To survive severe competition, the enterprise could do nothing but depend on a special technology of other industries. Secondly, the enterprise that did the spin-off with a special technology came out one after another. The environment that urged such a spin-off became one of the factors of vertical disintegration. Thirdly, the difference of factor intensity often pressed vertical disintegration.

Keywords: Semiconductor, Vertical Disintegration, Industrial Development, Catch-up, Fables, Foundry