



RIETI Discussion Paper Series 03-J-018

汎用技術としての半導体

池田 信夫
経済産業研究所



Research Institute of Economy, Trade & Industry, IAA

独立行政法人経済産業研究所

<http://www.rieti.go.jp/jp/>

汎用技術としての半導体

The Semiconductor as a General-Purpose Technology

池田信夫¹

IKEDA Nobuo

要旨

情報技術は、20世紀後半に急速な進歩をとげ、生活のあらゆる場に影響をもたらす「汎用技術」となったが、その背景にはコンピュータの中核となる半導体の集積度が40年以上にわたって指数関数的に向上してきたという特異な技術革新がある。この原因は、素材となるシリコンの価格がほとんど無視できるという物理的な特性に加えて、半導体が機械の動作をデジタル信号のスイッチに還元し、ハードウェアの物理的な特殊性を「抽象化」したことに求められる。その結果、業界ごとの固有技術が標準的なプラットフォームにもとづく汎用技術とソフトウェアに置き換えられる一方、応用技術と汎用技術が分化し、垂直統合型の産業が水平分業型に転換する傾向が広がっている。日本の半導体産業が凋落した大きな原因は、このような構造変化を見誤り、統合型の産業構造に過剰適応したためと考えられる。「情報家電」における日本メーカーの優位も、長期的には家電がコンピュータの水平分業型アーキテクチャに組み込まれる過程と考えたほうがよい。

¹ 独立行政法人経済産業研究所 上席研究員。草稿に有益なコメントをいただいた安藤晴彦、奥野正寛、鈴木重徳、瀧澤弘和、中馬宏之、長岡貞男、藤村修三、元橋一之の各氏および経済産業研究所、産業研究所、一橋大学イノベーション研究センターでのセミナー参加者に感謝したい。ただし本稿で表明される見解の責任は、著者個人に帰属するものである。

はじめに

20 世紀前半の産業にもっとも大きな影響を与えた技術革新が、石炭から石油へ、あるいは電力へという「エネルギー革命」だったとすれば、20 世紀後半のそれがコンピュータやインターネットによる「デジタル革命」であることは、もはや歴史的な事実といえよう。両者には多くの共通点があるが、最近、注目されているのは汎用技術(*general-purpose technology*)という考え方である(Helpman 1998)。これは蒸気機関、鉄道、電力のように、それ自体は特定の用途をもたないで、他の技術を可能にする技術(*enabling technology*)である。通常の技術革新は、与えられた目的を達成する効率を上げるので、その効果も市場で評価できるが、汎用技術そのものは目的をもたないので単独では評価できず、広く普及しないと効果はあらわれないため、普及には長い時間がかかることが多い。

汎用技術の普及において重要な意味をもつのは、技術標準である。それは必ずしも工業規格として法的に定められる必要はなく、パソコンのように事実上の標準であってもよいし、インターネットのように非営利組織が決めてもよい。この意味で、コンピュータのコードは、Lessig(1999)もいうように一種の法である。それは製品の規格を決めるばかりでなく、産業構造やグローバルな競争にも影響を与える。いいかえれば、汎用技術は応用技術の基礎となる「制度」の一種であり、これを分析することは「技術的制度分析」ともいべき手法の実験ともなろう。

汎用技術の中でも、情報技術の特徴は、技術革新がきわめて急速で、しかも長期にわたって続いていることである。その原因は、コンピュータの中核となる半導体の技術的な特異性によるところが大きいので、いま情報産業に生じている変化を理解するには、半導体技術を理解する必要がある。したがって本稿では、半導体の歴史をやや技術的な詳細に立ち入って論じるとともに、その産業構造への影響をなるべく標準的な経済理論によって説明することを試みる。第 1 節では、トランジスタの誕生から集積回路、そしてマイクロプロセッサへと至る技術革新の歴史を簡単に振り返り、第 2 節ではそれによる技術的アーキテクチャの変化が半導体技術とコンピュータの驚異的な進歩をもたらしたことを明らかにする。第 3 節では、こうした技術的な変化が企業組織を「水平分業」型に変えている原因を分析し、第 4 節では業務設計と組織構造がどのような関係にあるかを整理し、第 5 節で日本の情報産業が半導体産業の歴史から得られる教訓を考える。

1. トランジスタからマイクロプロセッサへ

量子力学の生んだ汎用素子

コンピュータは、デジタル信号を変換するスイッチの巨大な集積である。アラン・チューリングが証明したように、すべての計算は符号の変換操作に帰着するので、「入力が a のとき b を出力する」といった論理ゲートを組み合わせれば、原理的にはどんな複雑な計算

も可能だからである。スイッチを実現する方法としては、機械式の計算機では歯車やリレーなどが使われたが、これは処理速度に限界があり、初期のデジタル・コンピュータでは真空管が使われた。しかし真空管は、加熱した電極から放出される電子を制御することによってスイッチを行うため、体積も発熱量も大きくなり、寿命も短かった。これはコンピュータのように多くのスイッチを使う場合には致命的な欠陥であり、たとえば 18000 本の真空管を使った初期のデジタル・コンピュータ ENIAC は、1 日に何回も切れる真空管を交換しなければならなかったという。デジタル・コンピュータは、半導体の発明によって初めて工業製品として成立したといっても過言ではない。

半導体は、導体と絶縁体の中間の特性をもつ物質である。電子は、エネルギーの低い価電子帯かエネルギーの高い伝導帯のどちらかの状態にある。導体では価電子帯と伝導帯のエネルギー準位が近いので、電荷をかけるとエネルギーを得た電子が次々に価電子帯から伝導帯に移って電流が流れるが、絶縁体の電子はすべて価電子帯にあり、伝導帯との間のエネルギーの差（禁制帯）が大きいため、電子が伝導帯に移ることはない。しかし半導体では、禁制帯の幅が比較的小さいため、価電子帯の電子に十分エネルギーを与えると伝導帯に移り、電流を通すようになる。たとえばシリコンの結晶は、通常は絶縁体だが、微量の不純物をまぜて電圧をかけると導体になるので、これを使って外部電圧で出力を制御する論理ゲートを作ることができる。いいかえれば、半導体はデジタル信号を電子のエネルギー準位の差として表現する電子スイッチなのである²。

AT&T（米国電話電信会社）のベル電話研究所では、機械式の電話交換機を電子式に変える研究のなかで、半導体が 1930 年代から研究されていた。半導体の特性は量子力学によってわかっていたが、材料のコントロールがむずかしく、動作が確認できなかったのである。しかし 1947 年、ジョン・バーディーンとウォルター・ブラッテンが実験に成功し、この素子はトランジスタと命名された。初期のトランジスタは、ゲルマニウムの結晶に 2 本の電極を刺した点接触型で、動作の安定性に問題があり、実用には至らなかったが、のちに素子をサンドイッチ状にはさんだ接合型トランジスタがウィリアム・ショックレーによって開発され、これが主流となった。

素材としては、高い純度の結晶を容易に得ることができて高温でも動作するシリコンが主役となった。シリコン（珪素）は、岩石や土の主要な成分であり、酸素に次いで地球上で 2 番目に豊富に存在する元素である。その原価は（精製コストを除けば）ゼロに近いので、素材の稀少性に制約されない技術革新が可能になったのである。これは幸運な偶然であり、もしもガリウム砒素のような稀少金属によってしか半導体の実現できなかったとすれば、今日の情報産業はなかっただろう。

電力がエネルギーの効率を上げたように、半導体は情報の効率を上げる素子である。ただ熱力学の第 1 法則（エネルギー保存則）によって、エネルギーを消費せずにエネルギーを生産する「フリーランチ」は不可能だが、情報にはそういう制約はない。特にデジタル

² 半導体技術の詳細については、たとえば堀田(2000)参照。

情報は、もとの物理的な特性を「抽象化」して、信号があるかないかという符号に単純化しているので、コピー（再生産）は容易である。トランジスタは、デジタル信号を電子エネルギーのきわめてわずかな差で表現して処理するため、エネルギーの稀少性による制約はほとんどなく、いくら素子を微細化してもスイッチの機能には影響を与えない。量子力学によって予言された「小宇宙」で起こる現象が、半導体の素子としての高い自由度を可能にしたのである(Gilder 1989)。

シリコンの書物

とはいえ初期のトランジスタは、真空管の代替品としてはすぐれていたが、配線は物理的に行い、回路を実現するにはプリント基板に多くのトランジスタを並べなければならなかった。この欠点を克服して集積度を高めるため、ひとつのシリコン・チップに多くのトランジスタを寄せ集めたのが集積回路（IC）である。世界で最初のICとされるのは、1959年にテキサス・インストルメンツによって出願された「キルビー特許」だが、これはトランジスタを寄せ集めただけで、集積度を高めるには限界があった。これに対し、その数ヵ月後にフェアチャイルドのロバート・ノイスが出願した特許は、図1のようにシリコン基板（ウェハ）を空气中で加熱して二酸化シリコン（絶縁体）の膜を作り、そこに回路をプリントする2次元的な構造をとったため、プレーナ（平面）プロセスとよばれた。

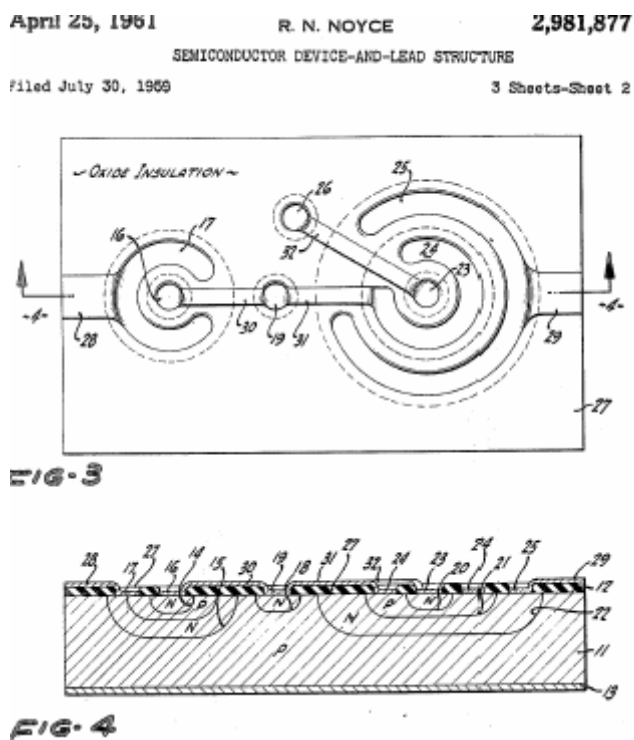


図1 プレーナ特許

プレーナ技術によって、素子と配線がひとつの工程で一体成型され、動作の安定性が高まるとともに大量生産が可能になった。この工程では、酸化膜にパターンを描いたフォトマスクをつけて感光させ、膜にできたパターンに従ってエッチングしてシリコンを露出させ、そこに不純物を注入し、金属を蒸着して配線する。この工程は、写真製版によく似ているのが印象的である。つまり IC とは、シリコン・ウェハに多くの回路（活字）を印刷した「シリコンの書物」なのである。これによって半導体の技術革新は、いかに配線を微細化して限られたスペースに多くの情報を乗せるかという問題に単純化され、集積度が飛躍的に向上した結果、その価格も（情報量あたりでは）紙よりはるかに安くなった。今日の半導体も、基本的にはプレーナ技術にもとづいており、これが今日の情報産業を可能にした最大の汎用技術ということができよう(Langlois 2002)。初期のコンピュータは、トランジスタや抵抗器などをプリント基板に配置し、多くの基板をラックに入れてひとつのマシンを構成する方式だったため、「計算能力はコストの 2 乗に比例する」という経験則（グロッシュの法則）があった(Ceruzzi 2000:p.177)。基板や筐体などのオーバーヘッド（共通部分）は一定だから、ひとつの基板に多くのトランジスタを乗せるほど効率が上がる「規模の経済」が生じ、たとえば 100 万円の小型コンピュータを 10 台つなぐよりも、1000 万円の大型コンピュータを 1 台使ったほうが 10 倍の性能が出せるわけである。

しかしプレーナ技術によって、多くのトランジスタが 1 個のシリコン・チップに乗り、この法則は逆転し始めた。たとえば、1955 年に IBM が初めてトランジスタを搭載した汎用機は 2200 個のトランジスタを搭載していたが、これは 1971 年のマイクロプロセッサ（インテル 4004）1 個とほとんど同じである。つまり半導体の集積度が飛躍的に上がり、かつてのプリント基板に相当する機能がひとつのチップに集積されることによって、固定費は半導体の設計・製造コストとなり、そこに多くの素子を集積すればするほど効率が上がるようになったのである。いいかえれば、かつて基板と素子の関係で成立していた共通部分のコスト節約効果が、素子の中でシリコン・ウェハと回路の関係に置き換えられたわけである。しかも処理速度が極限まで高まると半導体の中の回路の長さが速度を決めるようになったため、集積することによって性能が上がる「集積の経済」が生じるようになり、コンピュータ全体のダウンサイジングやモジュール化が急速に進んだ。

チップの中の汎用コンピュータ

初期の IC は、きわめて高価だったため、用途の 95% 以上は、コストを無視しても小型化が要求される軍事用で、回路に特定のアプリケーションが埋め込まれた「ハードワイアド」型だった。これを改良して半導体を汎用技術にしたのが、1971 年にインテルの発表したマイクロプロセッサ（マイクロコンピュータ）である³。論理演算は、物理的なスイッチを使

³ テキサス・インストルメンツは、1970 年に最初のマイクロプロセッサを開発したと主張している(Morris 1990:p.54)。インテルはマイクロプロセッサの特許を取ったが、「集積回路による汎用のプロセッサ」という概念を実装する方法はいろいろあるので、他のメーカーは別の CPU を作ることができた。

わなくても、「入力が a なら b を出力せよ」といったプログラムを書いて、コンピュータに実行させることもできる。プログラム内蔵型コンピュータの概念の最初のモデルとなったチューリング・マシンでは、ハードウェア（ヘッド）を完全に抽象化し、記憶容量（テープの長さ）は無限大と仮定しているのので、すべての演算はソフトウェアによって実行されるが、これでは処理量が膨大になるので、フォン・ノイマンの設計では要素的な「命令セット」を実行する回路をハードウェアに備えている。記憶装置のなかった ENIAC は、6000 のスイッチで物理的につなぎ換えることによってプログラムを変更するハードワイアード構造だった。初期の IC は、いわば ENIAC と同じ構造をとっていたわけである。このプログラムを論理回路から分離し、命令を実行するモジュールだけを独立させたのがマイクロプロセッサだった。

インテルがマイクロプロセッサを開発するきっかけは、日本の電卓メーカー、ビジコンからの注文だった。当時の電卓は、キーボードからの入力に応じて加算・減算・関数などの命令を受け持つ論理回路で処理するものだったので、命令を変えるたびにチップセット全体を設計しなおさなければならなかった。この設計コストを軽減するため、命令を論理回路から分離しようというのがビジコンの依頼だったが、これは容易ではなかった。当時、ビジコンの技術者としてインテルに設計を依頼した嶋正利は、マイクロプロセッサという発想が生まれたときの様子を次のように回想している。

1969 年 8 月下旬のある日、ホフ[インテルの技術者テッド・ホフ]が興奮気味に部屋に入ってきて、3、4 枚のコピーを我々に手渡した。これが 4004 中央演算ユニットを中心とした、世界初のマイクロコンピュータ・チップセット MCS-4 の原型である。今まで、どちらかという沈黙していたホフが、突然顔を紅潮させ、興奮気味に、とうとうとしゃべり出した。「4 ビットの CPU」という新しいアイデアの提案に、我々はあっけにとられた。（嶋 1987:p.41）

ホフの発案したのは、機械語を処理する機能だけをもち、処理内容はプログラムとして外部から読み込む、新しいタイプの論理回路だった。加算・減算などの電卓に固有のマクロ命令は、他の電子機器では役に立たないが、「データを格納する」とか「加える」といった機械語（命令セット）は、どういう処理でも使える。そこで、論理回路はこうした汎用的な命令を処理する回路だけをもち、電卓に固有の機能はソフトウェアとしてメモリ(ROM)に入れることによって機能に柔軟性をもたせるのがマイクロプロセッサだった。この名称は、電卓のようなマクロ命令ではなく、単純なマイクロ命令（機械語）を処理することからつけられた。これは汎用的な CPU と、そこに内蔵されるプログラムをわけることによって、ひとつの半導体をフォン・ノイマン型（プログラム内蔵）コンピュータにするものである。こうした着想は 1960 年代の初めからあったというが、当初の IC ではひとつのチップに乗せられるトランジスタが数十個と限られていたので、多くの機械語を処理することは不可能だった。実用に耐える速度で命令を処理する汎用コンピュータは、1000 個以上の

トランジスタを集積する LSI (大規模集積回路) によって初めて可能になったのである。このように物理的な回路が抽象化され、論理的なプログラムと切り離されることによって、半導体のモジュール化は急速に進んだ。

チューリング・マシンのような論理的なモデルでは、命令をソフトウェアで書くのも回路で実現するのも同じことだが、実装するコストには大きな違いがある。初期の IC のように機能ごとに違う論理回路を設計すると、ひとつの半導体で機能を実現できるが、プログラムをいったん回路に書き込んでしまうと、変更や修正に多額のコストがかかる。逆にソフトウェアで実装すると、修正するのは簡単だが、補助記憶装置が必要になり、設計が複雑になる。一律にどちらがよいとはいえないが、ハードワイアド型は低コストだがオプションが狭く、ソフトワイアド型はその逆といえよう。半導体の機能が複雑になるにつれて、設計変更などのオプションを広げることが相対的に重要になる一方、メモリの価格が下がったため、汎用の CPU と DRAM によって回路を構成することが合理的になったわけである。

しかし 4004 の開発には予想以上に長い時間がかかり、ビジコンは経営危機に直面したため、インテルはビジコンに開発費の一部を返却する代わりに 4004 の著作権を取得することを提案した。論理設計における最大の技術革新であるマイクロプロセッサの価値を認識できなかったビジコンは、権利をわずか 6 万ドルで売ってしまい、のちに倒産した。

2 . 技術革新とアーキテクチャ

ムーアの法則

このように汎用技術が目的を特定しないインフラとなり、通常の企業と分離される傾向は、電力や電話でもみられた。しかし、これらの公益事業が拡大するとともに巨大化し、成熟産業となったのに対し、半導体はその進歩とともに小さくなり、また技術革新のペースもほとんど衰えない。これについて、インテルのゴードン・ムーア (当時フェアチャイルド) は 1965 年、次のような経験則をのべた。

最小コストの半導体部品の複雑性は、おおむね毎年 2 倍の比率で増加してきた。まちがいはなく、短期的にはこの比率は、増えるとはいわないまでも持続すると予想される。長期的には、それが少なくとも 10 年間ほぼ一定に保たれないと信じる理由はないが、増加率はやや不確かである。(Moore 1965)

この予言は 10 年後に再検討され、当時のデータをもとにして「18 ヶ月で 2 倍」と修正された。現実にも、インテルの CPU では、1971 年の 4004 で 2250 トランジスタだったのが、2000 年のペンティアム 4 では 4200 万トランジスタとなっている⁴。これは 29 年間で約 2 万

⁴ <http://www.intel.com/research/silicon/mooreslaw.htm>

倍、すなわちほぼ 2 年で 2 倍のペースである。また処理速度（クロック周波数）もほぼ同じペースで上がっているため、半導体のコストを計測した実証研究(Nordhaus 2002)によれば、1960 年ごろから 20 世紀末までの 40 年間で、計算量(Million Units of Computing Power)あたりのコストはほぼ 1/1 億、すなわち 18 ヶ月で半分というムーアの法則どおりにコストが低下している（図 2）。

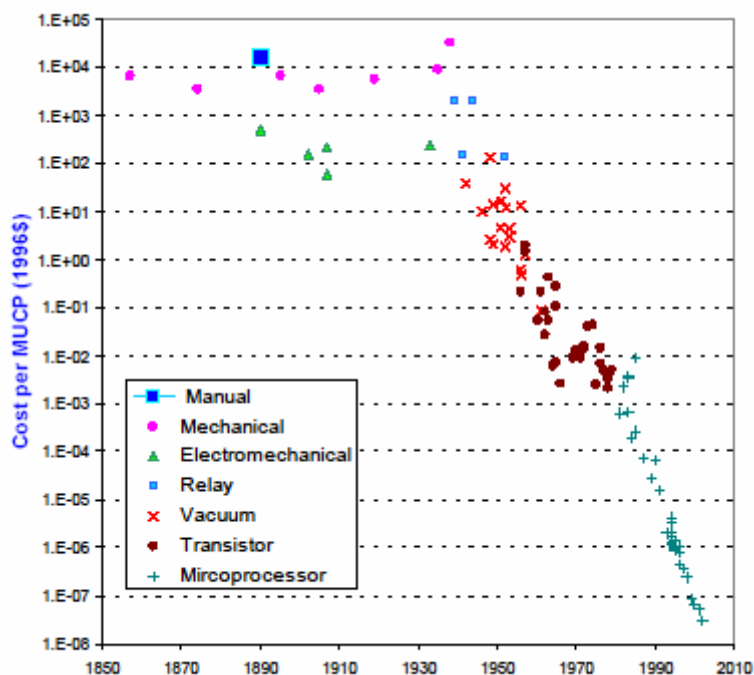


図 2 計算量あたりのコスト (Nordhaus 2002)

もちろん、この「法則」は自然界の規則性を反映したものではないが、このように一定率の技術革新が 40 年以上にわたって続いたのは、技術史のなかでも空前の出来事である。その最大の原因は、前述のように材料であるシリコンの価格がほぼ無視できるという偶然である。一般にコストダウンの収穫が逡減するのは、ボトルネックとなる資源の制約があるためである。たとえば、自動車の技術革新がいくら進んでも、その価格は原材料の鉄の価格以下にはなりえない。しかしシリコンの価格は、回路を設計するコストに比べると無視できる程度なので、半導体の価値は、そこに書き込まれる情報（回路技術）の価値で決まる。この意味でも、半導体は書物やコンパクトディスクなどに近い。

第 2 の原因は、プレーナ技術によって工程が単純化されたことである。初期のトランジスタのような複雑な 3 次元構造になっていると、それを組み合わせて集積度を高めることは困難だが、プレーナ構造によって半導体の製造は印刷のような 2 次元の技術となった。しかも印刷する活字の大きさには一定の制約があるのに対して、半導体の機能は電子レベ

ルで実現されているので、情報量は微細加工によって限りなく増やすことができる。

第3の原因は、量産効果が劇的に上がったことである。DRAM や CPU のように特定の用途に依存しない汎用の半導体が大量生産されると、規模の経済で単価が下がり、それによって応用範囲が広がって分業の利益が大きくなり、それによってさらに規模の経済が強まる、という正のフィードバックが生じる。こうして蓄積される技術的知識には学習効果が大きいので、成長理論で知られる収穫逓増の効果によって投資の収益率が減衰しないと考えられる(Jovanovic-Rousseau 2002)。

ハードウェアの抽象化

しかし微細加工には物理的な限界があるので、この傾向が無限に続くとは考えられない。回路の幅は、フォトマスクで露光する光の波長で制約されるが、現在もっとも短い回路の幅は 100 ナノメートル (ナノは 1/10 億) 以下という極限状態になっており、これ以下は X 線の領域になる。しかし X 線による露光技術は、20 年以上にわたって開発が続けられながら実用化しておらず、ここから先は抜本的な工程の変化がないと微細化はむずかしいという(JEITA 2003)。シリコン以外の材料も一部では使われているが、コストの点で用途は限られ、多層化・大型化などの技術も、発熱が制約になって成功していない。

他方ソフトウェアは、「アンディ・グロヴが与え、ビル・ゲイツが奪う」といわれるように、ムーアの法則を相殺して複雑化してきた。マイクロソフトの計算によれば、1975 年に 4000 行だった BASIC のソースコードは 20 年後には約 50 万行になり、1982 年に 27000 行だったマイクロソフト・ワードは 20 年で約 200 万行になった(Schaller 1996)。これは 20 年で約 100 倍と、ムーアの法則の 1/100 程度だが、扱うデータ量も大きくなってきたので、ハードウェアへの要求はつねに上がっている。こうしてソフトウェアの複雑化が高性能の半導体を要求し、半導体の高速化によってさらにソフトウェアが肥大化するという相乗効果によって、CPU の高速化とソフトウェアの複雑化が進んだ。

その結果、固有のハードウェアで処理を行うワープロや CAD などの専用機は姿を消し、汎用の CPU とソフトウェアに置き換えられる傾向が一貫して続いている。日本では、MS-DOS の時代には日本語処理や画面表示などの部分でコンピュータ・メーカーごとに別のデバイスを使っていたが、MS ウィンドウズでは、ハードウェアの違いは OS(Operating System)によって抽象化され、特定のデバイスに依存した処理はできなくなった。メモリアクセスも、OS を介して行う「プロテクト・モード」になったので、アプリケーション側で処理を最適化することはできないが、複数のタスクを独立に処理できるようになった。それでもウィンドウズで動くアプリケーションはアップルのコンピュータでは動かないが、インターネットは OS の違いも抽象化し、HTML(Hypertext Markup Language)や Java は、どんなハードウェアでも動く。このように高次の抽象化を行うほど汎用性は高まるが、コードを機械語に「翻訳」するプロセスが増えるので、処理速度は犠牲になる。逆にいえば、ハードウェアの性能の向上によって、処理効率よりも複数のハードウェアで実行できる普

遍性のほうが重要になったため、抽象化が進んだといえよう。

ただし、限りなくモジュール化や抽象化が進むわけではない。一時は OS の違いを超える「普遍言語」として期待された Java も、処理速度が遅く不安定で、大規模なアプリケーションはあまり開発されていない。OS でも、CPU に依存する入出力やメモリ管理などの部分だけを「マイクロカーネル」として分離してハードウェアを抽象化する設計思想が 1990 年代に流行したが、期待されたほどの性能を上げることができなかった。CPU でも、回路の構成を効率化することによってハードウェアを抽象化して処理速度を上げる RISC(Reduced Instruction Set Computer)技術が開発されたが、多数派にはなっていない。

3 . 垂直統合から水平分業へ

規模の経済と分業の利益

コストが 40 年で 1/1 億になるという爆発的な技術革新は、常識を超えた変化をもたらす。たとえばカメラで撮影したアナログの映像をデジタル処理して、最後にアナログの写真にプリントするのは、明らかに無駄だが、ここで浪費されるのは、きわめて安価になった計算能力であり、それによって現像などのコストが節約できるなら、この無駄は正当化される。しかも半導体の価格は 3 年で 1/4 になるので、少しぐらいのコスト上の不利はすぐ逆転するのである。こうしたコスト構造の変化によって固有技術が半導体とソフトウェアに置き換えられる結果、図 3 の左のように部門ごとに垂直統合された固有技術が、右のように全部門にわたる汎用技術とそれを部門ごとに応用する応用技術の水平分業に変わる。

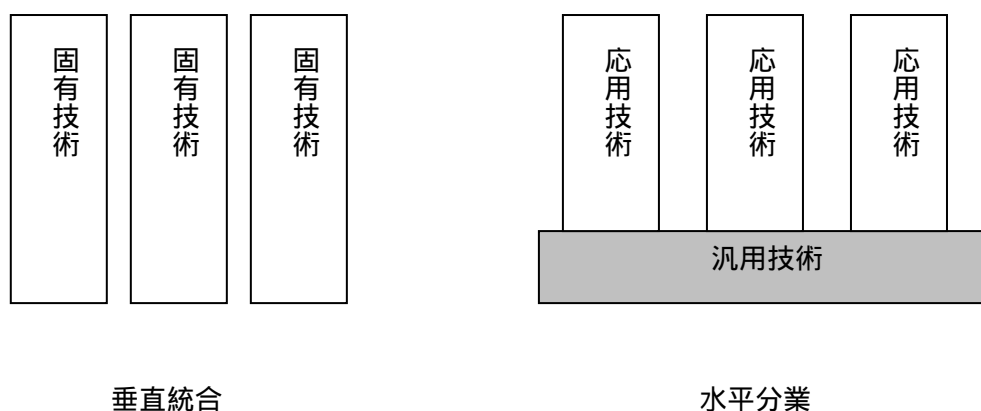


図 3 技術のアーキテクチャ

その関係を、ごく簡単なモデルによって整理してみよう(cf. Bresnahan-Gambardella 1998)。いま経済に N 社の企業があり、 i 社が固有技術を使って専用機（たとえばフィルムカメラ）を生産する場合のコストを C_i^L 、生産量を q_i とし、これを固定費用を f_i と可変費用 $v_i q_i$ にわ

ける（限界費用は一定とする）。他方、半導体を外部から調達して同じ機能の製品（たとえばデジタルカメラ）を作り、アプリケーション・ソフトウェアを自社で開発する部門 A における企業 i のコストを C_i^A 、半導体を開発する部門 G（1 社のみとする）のコストを C^G とすると

$$C_i^L = f_i + v_i q_i$$

$$C_i^A = g_i + w_i q_i$$

$$C^G = h$$

と書ける。ここで g_i はソフトウェア開発費、 w_i は G 部門から半導体を調達するコスト、 h は半導体メーカーの固定費用（開発・設計コスト）とする。アウトソーシングを行うことによって研究開発などにかかる固定費用は節約できるが、部品を市場で調達するため可変費用は高くなる、すなわち $f_i = g_i$ 、 $v_i = w_i$ と仮定し、半導体の生産においてはコストのほとんどは固定費なので、半導体部門の原材料費は無視する。ここで規模の経済（平均費用の逓減）は仮定によって明らかだが、固有技術と汎用技術のどちらが規模の経済が大きいだろうか？これをみるために、それぞれの部門のすべての企業が固有技術を採用した場合と、すべてが半導体を採用した場合のコストを N について集計して、 $C_i^L = C^L$ 、 $C_i^A = C^A$ 、 $f_i = F$ 、 $g_i = G$ 、 $q_i = Q$ 、 v_i 、 w_i の平均値をそれぞれ v 、 w と書くと、

$$C^L = F + vQ$$

$$C^A = G + wQ$$

となる。固有技術から汎用技術の社会的コストを引いた差を Q とすると、汎用技術が効率的なのは、 $Q = C^L - C^A - C^G = F - G - h - (w - v)Q \geq 0$ 、すなわち

$$Q \geq \frac{F - G - h}{w - v} \quad (1)$$

となるときである ($h < F - G$)。また仮定によって Q は減少関数なので、(1) 式の等号をみたす Q の値を Q^* とすると、 $0 < Q < Q^*$ のとき半導体（汎用技術）のほうがコストが低くなり、 $Q > Q^*$ のときは、 Q が増えるほど固有技術のほうがコストが低くなる。すなわち、部門数 N を所与とすると、生産量が増えるほど規模の経済は大きくなる。他方、分業の利益は、 Q を一定とした場合に企業の数 N が増えることによって生じる開発コストの重複を半導体によって節約する効果である。費用の平均値を $f = F/N$ 、 $g = G/N$ とすると、半導体を使ったほうがコストが低くなるのは、 $\{(f - g) - (w - v)q\}N - h \geq 0$ 、すなわち

$$N \geq \frac{(w - v)Q + h}{f - g} \quad (2)$$

となるときである。(2) 式で等号の成り立つ N と Q の値を N^* 、 Q^* とすると、図 4 のように N^* は Q^* の増加関数となり、これより上では汎用技術が、その下では固有技術が有利になる。これは 1 企業あたりの生産規模が大きいときは固有技術が効率的になり、企業の数

増えると汎用技術が効率的となることを示している。製品が多品種・少量生産になるにしたがって、特定の部門における規模の経済よりも分業の利益の効果が強まるわけである。

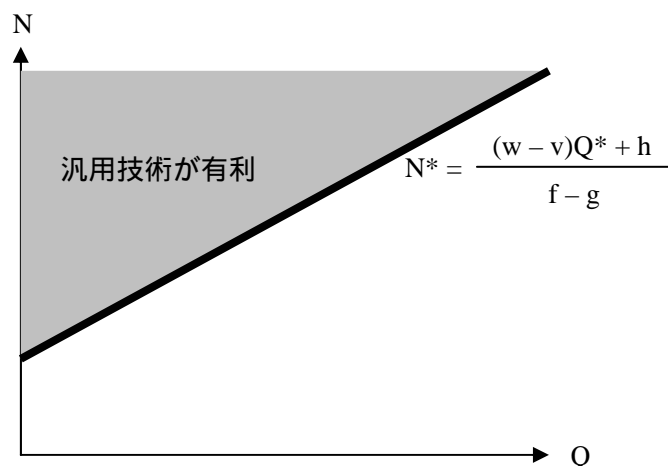


図4 汎用技術と固有技術

アーキテクチャと企業の境界

マイクロプロセッサの成功を支えたのは、絶え間ない応用範囲の拡大だった。4004 を開発する前のインテルの主力商品は半導体メモリであり、電卓の商品としての将来には大した期待をもっていなかったため、一種の「保険」として他にも転用できる汎用チップを開発したという（嶋 1987）。ひとつのアプリケーションの市場が小さくても、応用できる種類が多ければ、汎用技術を採用したほうがよいからである。現実には、4004 は汎用チップとしてはあまり売れなかったが、その後で作られた 8 ビットの CPU、8080 は史上初のパソコン「アルテア 8800」に使われた。

市場の拡大は、大量生産によってコストを低下させるとともに、投資拡大によって技術革新のエンジンともなった。その効果は、図 4 でいうと、 N^* の低下と考えることができる。(2)式より、 N^* は w および h の低下によって減少するから、 $N > N^*$ となる領域は下方に増加する。すなわち半導体のコストが急速に低下することによって、汎用技術が有利になるのである⁵。CPU の市場が全世界に拡大するとともに、その開発はきわめて資本集約的なプロジェクトになった。初期の 8 ビット時代には、多くのベンチャー企業が CPU を作っていたが、16 ビットの CPU、8088 が IBM-PC に採用されると、インテルの CPU が事実上の業界標準となり、CPU を製造するのはモトローラなど数社だけとなった。この意味で、1981 年に発表された IBM-PC はコンピュータ産業全体が水平分業型の産業構造に移行する「分水

⁵ このモデルは汎用技術が社会的に効率的になることを示しているだけで、それが実際に選ばれるかどうかは別の問題である。実際には、汎用技術と応用技術には補完性があるので、たとえばモーターが普及しないと電力も普及しない。このため、汎用技術の普及には数十年かかることもある。cf. Helpman(1998)

嶺」であり、これによって垂直統合型のコンピュータ・メーカーは姿を消し、部品メーカーと組み立てメーカーに専門分化することになった。ハードウェアの中核である CPU が汎用技術になると、垂直統合型の組織で一貫生産を行うことは困難になるからである。この点についてインテルのアン德里ュー・グローヴは、おもしろいエピソードを紹介している。

私は、IBM の担当者が大手パソコン・メーカーに OS/2[IBM のパソコン PS/2 の OS]の採用を依頼している現場にたまたま居合わせたことがある。[・・・]IBM の担当者の主な任務は OS/2 を普及させることなのだが、この担当者はそれを売り込もうとしながらも諦めている風でもあった。一方、相手のコンピュータ・メーカーの代表は、OS のような技術の要をパソコンで競合関係にある IBM に頼りたくないという様子だった。二人の間のやりとりは、ぎこちなく、不自然で、商談はとうとう成立しなかった (Grove 1996: 訳書 pp.58-9)

OS/2 と MS ウィンドウズは、機能的にはほとんど同じだったが、多くのパソコン・メーカーがウィンドウズを採用したのは、マイクロソフトがハードウェアを製造していないためだった⁶。インテルも初期にはセカンドソース(複数のメーカーにライセンス生産させる)契約で複数の供給先を保証した。セカンドソースは、相手に大きな投資をさせてから価格を引き上げる「ホールドアップ問題」を防ぐために外部オプションを作る「人質」の一種であり(Farrell-Gallini 1988)、水平分業もこうしたコミットメントと考えることができる(しかしインテルは、独占的地位が確立した 80386 以降はセカンドソースを廃止した)。

このような技術的アーキテクチャの変化によって、企業の境界も影響を受ける。組み立てメーカーが部品を調達して生産を行うとき、事後的な再交渉のリスクを最小化することは重要な問題である。契約理論でよく知られているように、組み立てメーカーの設備と部品が補完的で外部オプションが小さいときには、ホールドアップが起きやすいので、垂直統合する(あるいは内製化する)ことが効率的となるが、部品が独立で他に代替品があるときはホールドアップは起こらないので、外部から調達したほうがよい(Hart 1995)。したがって部品が標準化されてグローバルに標準化されると、経営資源が多くの子会社に分散する垂直統合型の企業よりも特定の部品に資源を集中して全世界に売るインテルやマイクロソフトのような専門型企業が有利になるのである。

4 . 業務と組織のアーキテクチャ

半導体産業の専門分化

半導体産業のなかでもモジュール化と水平分業が進んでいる。付加価値ベースでみると、

⁶ ハードウェア・メーカーからライセンスを受けて互換機を作ると、ホールドアップされる危険が大きい。たとえばアップルの「マッキントッシュ」は一時、OS を互換機メーカーにライセンスしたが、経営陣の交代にともなってライセンスを打ち切り、多くのマック互換機メーカーが倒産した。

世界の半導体生産額の約 30%はマイクロプロセッサで、約 20%はメモリだが、生産個数で見ると、90%以上が電気製品や機械に組み込まれている工業用の半導体である。こうした特定用途むけの半導体は、かつてはユーザー（最終財メーカー）が個別に回路設計を行っていたが、次第に標準的なアプリケーションを搭載した ASIC(Application-Specific IC)が量産されるようになった。これは、いわばカスタム・ソフトウェアがパッケージ・ソフトウェアに進化したようなものである。さらに最近では、製造に必要な設備投資が巨額になり、きわめて高い稼働率が要求されるため、設計と製造が分離され、現在は半導体の約 90%が外注で製造されている。外注先としては、IBM などの半導体メーカーのほか、「ファウンドリ」とよばれる製造専門の企業が増えている。現在、世界の半導体の 16%（個数ベース）がファウンドリで生産されており、この比率は 2010 年までに 30%に達すると予測されている（図 5）。これに対して製造設備はもたず設計だけを行って回路を知的財産(IP)としてライセンスする「ファブレス」とよばれる半導体メーカーもあらわれ、設計と製造が専門分化したことが 1990 年代の半導体産業の特徴である⁷。

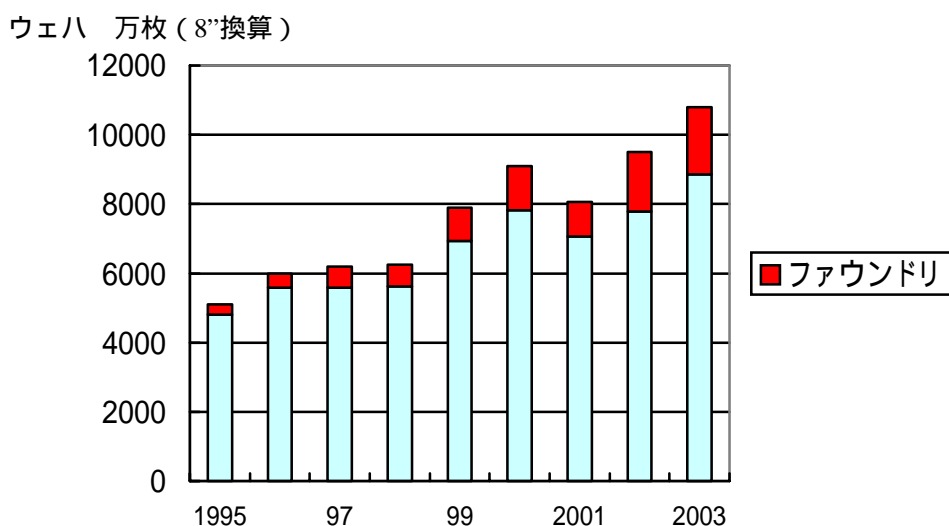


図 5 世界の半導体生産高とファウンドリの比率 (SEMI 調べ)

しかし半導体においても、分業化がつねに望ましいわけではないし、専門メーカーがつねに強いとも限らない。Macher (2003)の実証研究によれば、水平分業の効果は、技術が成熟して標準化された「自律的」技術革新では高いが、設計と製造の協力が重要な「システムの」技術革新では小さい。DRAM でも、最新鋭の大容量メモリは内製化されるが、同様の製品が増えて価格競争が激しくなると、外注化されることが多く、集積度のそれほど高く

⁷ このような設計と製造の分業は、組み立て製品では早くから見られる。たとえばデル・コンピュータはファブレスの先駆であり、シスコ・システムズも自社ではほとんど製造していない。逆に、電子部品の製造だけを請け負う EMS(Electronics Manufacturing Services)とよばれる企業が増えている。

ない製品や古い世代の製品では、IP を市場で売買してファウンドリで実装する水平分業がとられることが多い。同様の傾向はハードディスクでもみられ、技術革新の初期にはすべての部品を一体生産する垂直統合型の企業が有利だが、成熟すると部品がモジュール化され、専門企業のほうが高い業績を上げるようになる(Christensen et al. 2002)。この関係は、図6のように示される。

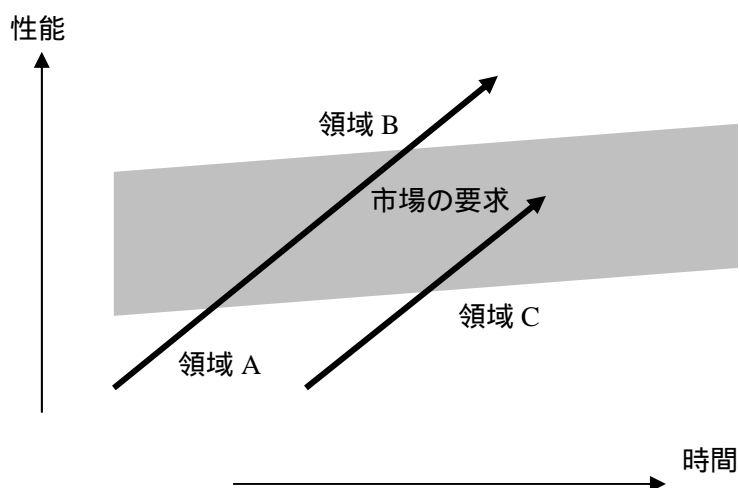


図6 統合型技術とモジュール型技術 (Christensen et al. 2002)

図の影のついた部分は、市場の要求する性能の上限から下限までを示す。既存の技術(左の矢印)の初期には、機器の性能が市場の要求を十分満たしていないので、システム全体の完成度を上げる必要があり、垂直統合型の企業によるコーディネーションが有利になる(領域A)。しかしやがて技術が成熟すると、製品の性能が市場の要求を超える「過剰品質」になる(領域B)。技術の成熟ともなるとインターフェイスが安定すると、個別の部品だけを生産するモジュール型の新しい技術が出現し、水平分業によってコストダウンを実現する(領域C)。こういうサイクルが、製品の世代が交代するたびに繰り返されるといのがハードディスク業界の実証研究の結果である。

マイクロプロセッサでも、普通のパソコンには最新の超高速 CPU は必要ないので、インテルのセレロンのような低価格の製品では、モジュール化された設計がとられている。集積度の低いシステム LSI では、ユーザーが既存の IP モジュールを組み合わせで設計し、仕様をインターネットで送って、数週間で製品が完成するシステムもあるという(Bass-Christensen 2002)。図4のモデルでいうと、これは性能上の要求が高い場合には、汎用技術を個別の用途にあわせて修正するコスト g が大きく、時には不可能($(f - g) - (w - v)Q < 0$)だが、技術が普及すると g が低下し、半導体の価格が下がって可変費用 w も低下するので、 N^* が下がって Q^* が上がる、すなわち外注するとか汎用の半導体を購入するとかしたほうが安くなる、と解釈できる。

インターフェイスの抽象化

標準的な契約理論（所有権アプローチ）によれば、資産の補完性が大きい場合には垂直統合型の企業による一貫生産が効率的だが、資産が独立である場合には、外注するほうが効率的になる(Hart 1995)。しかし情報産業では、物的資産の所有形態よりも、どの程度ひろく情報を共有して共同作業を行うかという業務設計との関連が重要である。一般に、マルチタスクの業務が相互に独立している場合は、外注して市場の強いインセンティブで生産することが効率的だが、業務に（エッジワースの意味で）補完性が強く、しかも成果の計測しにくい管理部門の業務が重要な場合には、定額賃金のような「弱いインセンティブ」で生産したほうがよい(Holmstrom-Milgrom 1991)。計測しやすい営業などの業務だけに努力が集中して管理業務がおろそかになると、チーム全体の生産性が落ちるからである⁸。逆に、業務のインターフェイスが抽象化され、コーディネーションの効率が上がると、業務の独立性が高まって水平分業が進む⁹。

半導体で重要なのは、技術的知識の共有様式である。かつて日本の半導体産業の強みは、組織内に蓄積される「暗黙知」の共有だといわれ、設計部門と製造部門の緊密な情報交換がその高い品質を実現した(Okimoto-Nishi 1994)。自動車産業に典型的に見られるように、多くの部品を組み合わせる補完性の高い業務については、工程の最後になって設計上の問題を検出する職能別分業体制よりも、製造段階の問題を設計にフィードバックすることによって早めに問題を解決する日本型の情報共有システムが効率的なのである。しかし1990年代以降、半導体技術では、物理設計についても回路をモジュール化して記述するHDL(Hardware Description Language)などの標準的な言語ができ、EDA(Electronic Data Automation)とよばれる設計ツールによって設計が行われるのが今日では通例である(Turley 2003:ch.3)。こうしたツールを使えば、ユーザーが回路設計をHDLで行ってデータを送り、ファウンドリがそれをEDAで実装する、という形で実質的に「ソフトワイアド」型にすることができ、ユーザーの仕様にあわせながら固定費を減らすことができる。

このように製造段階の問題が設計段階の「形式知」に抽象化されると、調整は設計段階ですべて行い、製造段階では原則として手直しをしないことによって製造期間を短縮し、コストを削減できる。自動車のような物理的なコーディネーションが数多く発生する製品では、部門間の「すり合わせ」をなくすことは不可能だが、半導体の扱うデジタル情報は、基本的には信号があるかないかという単純な情報なので、インターフェイスを標準化すれば複雑なコーディネーションをなくすことは可能である。現実の半導体産業でも、同一の企業内で設計・製造が行われる場合でも、事後的な調整は行わないことが通例である。

⁸ Hart et al. (1997)は、公的な施設（たとえば刑務所）の運営を民間に委託すると、事前に契約しにくいサービスの質を犠牲にして、過剰なコスト削減が行われることを示している。このように契約しにくい業務が重要な場合には、国営による弱いインセンティブで運営したほうがよい。

⁹ Baker-Hubbard (2003)は、運送業界で運行管理を行うコンピュータの採用によってアウトソーシングが増えた事例を分析し、この点を実証している。

しかし、こうしたソフトワイアド型の半導体においても、設計と製造が完全に分離されるわけではなく、むしろ設計段階で製造段階の問題がわかるため、インターフェイス調整が抽象化され、設計段階で行われるようになる（徳丸 2002）。多くの製造業で採用されている 3 次元 CAD でも、設計と製造の調整が「前倒し」になる現象が観察されている（竹田 2000）。これはソフトウェアをパッケージとして商品化し、実装するときユーザーがカスタマイズするのと同じである（日本のソフトウェアの効率が悪いのは、商品の段階でカスタマイズするためである）。もっとわかりやすい例でいえば、かつて出版においては、手書きの原稿を活字に組んでから校正を行っていたが、現在は著者の書いた電子ファイルを入稿する前に完全に校正するため、印刷所でゲラを読んで朱を入れるといった事後的な調整がなくなり、精度も格段に上がった。データがデジタル化されてコーディネーションが設計（執筆）段階に統合されると、逆に編集と印刷はまったく独立になり、海外の印刷会社に発注することも容易になった。

これは一見、モジュール化とは逆の統合化が起こっているように見えるが、実際には両者は同じ現象の両面である。IBM のシステム/360 以来、コンピュータをモジュール化するためには設計ルール（アーキテクチャ）が明示的に共有されている必要があり、この設計ルールが共有されている限り、個々のモジュールの内部を独立に変更しても問題は起こらない（Baldwin-Clark 2000）。設計ルールはトップダウンで決められ、システム/360 の場合には同じ設計ルールが 20 年以上にわたって使われた。IBM-PC 互換機の CPU と OS のインターフェイスも 20 年以上、基本的には変わっていない。半導体の場合にも、設計ルールが抽象化されて設計と製造が分断されているためにコーディネーションの必要がなくなり、ファブレスとファウンドリが独立に作業を行うことができるのである。

業務設計と組織構造

インターフェイスの抽象化と各モジュールの分権化は、半導体製造装置メーカーの登場によって強まった。これも最初は半導体メーカーの使っている装置を外販するものだったが、次第に専門メーカーがあらわれ、特に半導体露光装置ではニコン・キャノンの 2 社で世界のシェアの半分以上を占めるに至った。しかし最近では、半導体露光装置でも部品のモジュール化が進み、ほとんどの部品を外注で調達するオランダの ASML が世界最大のメーカーになった。こうした新しい企業は、レンズなどの基幹的な部品の性能では日本メーカーには及ばないが、製品のカスタマイズを容易にして納期を早め、ユーザーと設計段階で情報交換するなど、オープンなネットワークを作ることによって急成長を遂げた（中馬 2002）。製造装置や設計ツールが整備されて、半導体に参入する企業が製造装置一式を買えば自前の技術がなくても半導体を製造できるようになった結果、日本の半導体技術は製造装置によってアジアに流出し、研究開発部門をほとんど持たないマイクロン・テクノロジーやサムスン電子などがコスト競争の勝者となった。

歴史的には、垂直統合型しかなかった産業構造が水平分業型の出現によって多様化した

が、一方から他方に「進歩」するわけではなく、どちらかが常にすぐれているわけでもない。コンピュータやインターネットのように外部性の大きい技術では、ひとつの汎用技術が国際標準になると、もとの統合型に戻ることは不可能だが、半導体のアーキテクチャはローカルな規格なので、異なる設計ルールが共存し、分業型から統合型に戻ることもある。DRAM のように世代の交代するデバイスでは、ある世代の初期には物理的な限界に挑戦するためにシステム的な最適化が必要になるので統合型で開発され、コモディタイズするにつれて新規参入やコスト競争によって分業型に変わり、世代が変わるとまた統合型になるというサイクルが見られ、製品別にみても、アプリケーションとのシステム的な開発に必要な CPU や ASIC などには統合型が多い。整理すると、半導体産業においては、業務設計と組織設計の間に表 1 のような関係があり、次のような定型的な事実がみられる：

資産の所有権などの組織構造と設計ルールなどの業務設計には補完性があり、これらのアーキテクチャは同型になる。

所有権、インセンティブ、業務設計などの効率的な組み合わせは垂直統合型か水平分業型のいずれかである

	所有権	インセンティブ	調整コスト	設計ルール	業務区分
垂直統合	統合	弱	大	個別的	システムの
水平分業	独立	強	小	抽象的	モジュール的

表 1 業務設計と組織構造

この 2 種類以外の組み合わせや中間的な形態は例外的にしかみられず、競争力も高くない¹⁰。たとえばシリコンバレーの半導体産業は、水平分業（モジュール）型の組織をとっていたが、DRAM の微細加工のためにシステム全体の最適化が必要になると、日本企業に敗れた。逆に垂直統合型の「総合電機メーカー」の一部門で半導体を製造していた日本企業は、後述するように、製品（業務区分）がモジュール化するにつれて競争力を失った。こうした組織パラメータは互いに補完的なので、同じ方向に動かさないと全体としての効率は上がらないのである(Holmstrom-Milgrom 1994)。このように産業のアーキテクチャが 2 極化するのには、情報産業全体にみられる傾向だが、すべての製造業に一般化することはできない。自動車、家電、精密機械など部品の複雑性が高く、かつ小型化などのために製品全体を物理的に最適化する要求の強い部門では、資本関係の弱い系列企業との長期的関係に

¹⁰ この定型的な事実の重要な例外は、DRAM のトップ・メーカー、サムスン電子が垂直統合型の組織をとっていることだが、同社は韓国政府の財閥再編によって作られた特殊な企業であり、政府の資金援助を受けているので、典型的な民間の事例とはいえない。

よってシステム的な開発が行われている。これは資本の所有権の代わりに人的な「会員権」によって企業を統合する垂直統合型の変種ともいえようが、機械工業や電機産業全体が情報産業になるなかで、こうした人的な情報共有システムは、効率の高いデジタル情報共有システムに代替されてゆく傾向がある（池田 1997）。

5. 日本の戦略

日本半導体産業の盛衰

日本の半導体産業は、1980年代には世界の生産高の40%を占め、通商問題となって日米半導体協定が結ばれたりしたが、今日ではシェアは最盛期の半分近くにまで落ちている（図7）。特に、最盛期には日本メーカーのシェアが世界の80%を超えたDRAMでは、シェアは6%にまで落ち込み、国内で生産しているのはNECと日立製作所の出資するエルピーダメモリ1社になってしまった。この原因は、日本の電機メーカーが半導体産業の成長期の統合型アーキテクチャに過剰適応した結果、その成熟にともなうアーキテクチャの多様化に十分対応できなかったことにあると考えられる。

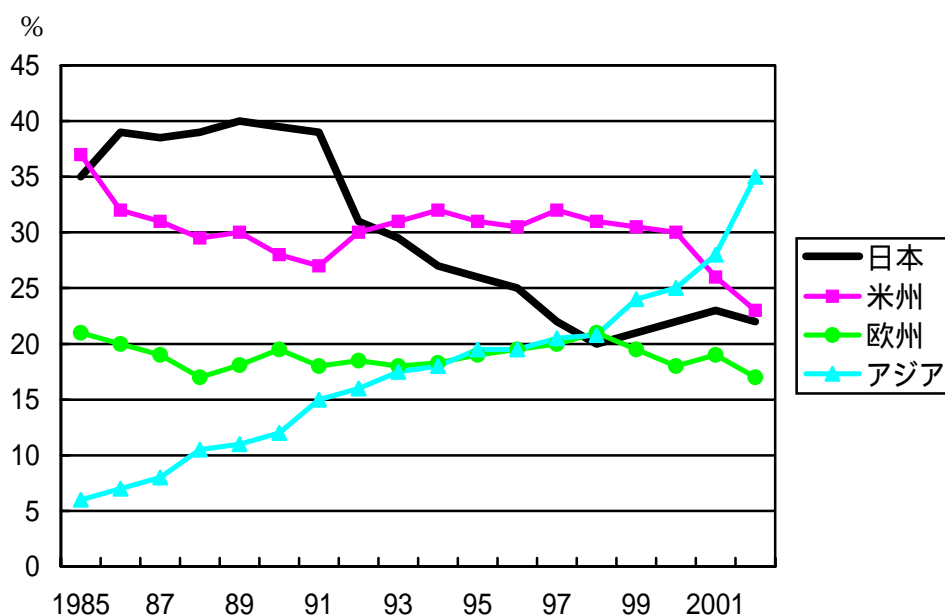


図7 世界の半導体の出荷額シェア（WSTS調べ）

日本が米国を抜いた1980年代初めの16kDRAMのころは、プロセスの大部分は手作業で、ウェハは1枚ずつピンセットで処理装置に脱着して箱に入れて搬送し、エッチングのときは人間が顕微鏡でミクロン単位の位置合わせをしたという（藤村 2000:pp.97-100）。こうした「半導体農業」といわれたような労働集約的な作業では、クリーンルームの管理やチー

ムワークの微妙な「すり合わせ」が歩留まりに大きな影響をもたらすが、1980年代末の1MDRAM以降は、工程は自動化され、プロセス技術は製造装置に体化されて移転され、その「組み合わせ」によって生産できるようになった。こうした変化によって、独自技術をもたない韓国メーカーが日本メーカーを抜き、DRAMから撤退した米国メーカーがファブレス化する一方で、ファウンドリによる製造技術の高度化では台湾が先頭に立ったが、日本メーカーではそういう組織革新はほとんどみられなかった。

また、1980年代までは「総合電機メーカー」であることで、「シリコン・サイクル」の底でも内部補填によって経営が維持でき、社内に一定の市場が確保できるという「範囲の経済」があったが、グローバルな市場が拡大してDRAMの生産個数が億単位という状況になると、こうした優位性は失われる。コモディタイズした素子を低コストで大量に生産するには、研究開発投資は必要なく、特定のデバイスに巨額の設備投資を集中し、世界中から注文を受けて高い設備稼働率を維持する必要がある（ファウンドリの損益分岐点は稼働率90%以上だといわれる）。研究開発投資を広く浅く行っている日本メーカーには、このような業務形態をとることは困難なので、アプリケーションを統合したシステム素子(SoC)などの統合型の製品に移行し、不得意分野であるDRAMから撤退した。

コンピュータ産業においても、このような汎用技術による水平分業化の流れを見誤り、業界ごとの固有技術を守ったことが日本企業の立ち遅れの原因となった。1980年代のパソコン市場で、競争優位を決めるのはシステムであって個別の製品の品質ではないということがはっきりした後、日本の電機メーカーは各社ごとに互換性のないパソコンを製造し、国内市場で無意味な消耗戦を続けた。ようやく1990年になって、IBM主導の規格「DOS/V」によって日本語処理が統一され、日本メーカーが国際規格のパソコンを作り始めたころには、世界のコンピュータ市場はインテル・マイクロソフトとIBM互換機・周辺機器を作るアジアのメーカーに支配され、日本メーカーの居場所はなかった。

しかし、日本の情報産業の劣位も宿命的なものではない。パソコンでは立ち遅れたものの、NC工作機分野では、1969年に発売された「ファナック260」は3種類のコントロール・ユニットに9種類のベイシック・オプションと約20種類の付加オプションを組み合わせたモジュール構造をとった。このモジュールの内部構造はハードワイアード型だったが、それがソフトウェアで置き換えられるようになったのは、工作機械として世界で初めてCPU（インテル8086）を搭載した1979年の「システム6」以降である。このアーキテクチャの転換にあたっては、システムを全面的に設計しなおす必要があったため、インテルの技術者に設計図を公開して共同開発が行われ、また在来型のNC工作機とまったく別のチームで設計が行われたという（柴田ほか2002）。

新しい競争戦略

半導体の応用範囲が広がるのにもなって、固有技術がソフトウェアに置き換えられ、ハードウェアが標準的な汎用技術になるという水平分業は、情報産業だけでなく全産業に

広がっている。その結果、業種の境界が曖昧になり、たとえばパソコンにも工作機にも計測器にも同じ CPU が内蔵されると、機能の違いはアプリケーション・ソフトウェアの違いにすぎない。他方、応用技術と汎用技術の境界（インターフェイス）は明確に定義され、世界全体で標準化される傾向が強い。いわば、これまで業種ごと（あるいは国ごと）に縦割りになっていた情報産業が、グローバルに横割りになるうとしているのである。半導体の技術革新とコストダウンの効果は、他のどんな技術よりも強力だから、こうした傾向は今後も、情報産業を超えて全産業に広がるだろう。この流れは、半導体とまったく異なる素子があらわれない限り、変わるとは考えられない。

このように暗黙知がすぐデジタル化され、形式知となって流通する情報産業において、競争優位を維持することは容易ではない。1990 年代の米国の情報産業の優位の原因を、米国政府のプロ・パテント（特許重視）政策の成功に求めるのは一面的である。たしかに初期のインテル互換 CPU やマイクロソフトの互換 OS は著作権訴訟によって駆逐されたが、両者をつなぐ BIOS（基本入出力装置）は互換機メーカーによって供給され、多くの PC 互換機が登場した。半導体の歴史を振り返ると、AT&T は（規制によって電子機器は製造できなかったため）トランジスタを低料金でライセンスしたし、インテルのマイクロプロセッサについての特許は他のメーカーが独自に CPU を開発する妨げにはならなかった。むしろ情報産業では、伝統的な製造業に比べて財産権の保護が弱かったことが激しい競争を生み出し、その急成長をもたらしたのである(Langlois 2002)。

こうした変化の根本原因は、半導体という量子力学的な素子によって、コンピュータの性能の向上が通常の古典力学的な制約をまぬがれていることである。エネルギーには稀少性があるので、これを財産権で保護して排他的にコントロールする価格メカニズムが有効だが、デジタル情報は媒体の違いを超えて自由に流通するので、それを物的に直接コントロールすることは効率的でなく、賢明な戦略ともいえない。短期的な利益を守るためにプラットフォームを囲い込むと、アップルの「マッキントッシュ」や IBM の PS/2 のように、みずからを少数派に追い込む結果になり、日本の半導体メーカーのように系列内の暗黙知が流出することを恐れるあまり閉鎖的な協業体制をとると、かえって技術革新に立ち遅れてしまう。

インテルやマイクロソフトが今日の優位を築いた原因も「収穫逓増で大きい者がひとり勝ち」といった単純な話ではなく、初期には規格をオープンにして事実上の標準となり、独占的地位を確立するとともに徐々に統合型に変えた結果である。これは競争政策からみると議論の余地はあるにしても、水平分業構造においてデジタル情報を間接的にコントロールする戦略としては合理的である。インターネットやオープンソースなどの新しい技術の世界で起こっているのも、要素技術の優劣よりもアーキテクチャの優劣を競う「プラットフォーム競争」である。これには技術だけではなく企業戦略や特許制度などもからむので、単純な「必勝法」はないが、少なくともいえるのは、この競争でリーダーシップ

をとるには、技術を何らかの形でオープンにすることが不可欠だということである¹¹。

6. 結論

日本の半導体産業は、長いトンネルを抜けて「復活」の時期を迎えたともいわれる。メモリでは、回路の微細化が極限に近づくとつれて従来のプロセス技術を根本的に見直す必要が生じ、日本メーカーの競争力が相対的に回復している。携帯電話やデジタルカメラなどの「情報家電」では、小型化・多機能化など日本の得意な「すりあわせ」型のコーディネーションが優位を發揮しやすい。こうした「ユビキタス」型のシステムでは、アプリケーションとOSを一体で半導体に組み込むので、モジュール型システムにおける米国標準のくびきを逃れて日本が独自の技術で利益を上げることができる、という類の議論があるが、これは錯覚である。携帯電話の半導体に組み込まれたソフトウェアは数百万ステップにもものぼり、かつての大型コンピュータに匹敵する。OSとしてLinuxが普及していることからわかるように、こうした組み込み半導体も論理的なアーキテクチャはフォン・ノイマン型になっており、むしろ逆に家電がコンピュータになるのである。

したがってシステム素子も今後、国際的な標準化が進むだろう。長期的にみれば、現在の日本の優位も一時的なものであり、システム素子もいずれ「コモディタイズ」することは避けられない。日本のメーカーの願望とは逆に、コンピュータやインターネットで起こった要素技術のモジュール化とプラットフォームのグローバル化という流れが家電の内部構造にも押し寄せてくるのであり、「日本発の国際標準」で世界市場を制覇しようなどという発想は有害無益である。むしろ日本メーカーに優位性があるとすれば、iモードや「写メール」のように販売部門と製造部門の連携によって多様化する消費者の要望をいち早く製品化するノウハウだろう。

このような状況では、個々の企業は自社の得意分野に集中するとともに、産業全体としてはなるべく多様な技術と組織のアーキテクチャをもつ必要がある。日本でも、電機業界の主流ではない工作機で、しかも親会社（富士通）から独立したファナックが高い革新性をもちえたという事実は示唆的である。また、DRAMからの完全撤退を避けるための窮余の一策として設立されたエルピーダメモリの社長に、外資系企業から転じた経営者が就任してから業績が急速に回復しているという事実も、「日本型企业システムは情報産業には向かない」といった宿命論への反証だろう。日本の情報産業の最大の課題は、こうした実験によってモノリシックな産業構造を「脱統合化」し、多様化することである。そのために必要なのは、「ユビキタス」への公的支援ではなく、自由な技術革新を可能にするインフラ（特に電波）の開放と、内外の資本によって企業を解体・再構築する「企業コントロールの市場」だろう。

¹¹ もちろん企業は収益を上げなければならないから、どこかで独占を維持する必要がある、その組み合わせが今後の企業戦略として重要である。cf. Gawer-Cusumano (2002), Chesbrough (2003).

参考文献

- Baker, G.P. and Hubbard, T.N. (2003) "Make Versus Buy in Trucking", *American Economic Review*, 93:551-572
- Baldwin, C. and Clark, K. (2000) *Design Rules: The Power of Modularity*, MIT Press.
- Bass, M.J. and Christensen, C.M. (2002) "The Future of the Microprocessor Business", *IEEE Spectrum*, <http://www.spectrum.ieee.org/WEBONLY/publicfeature/apr02/mlaw.html>.
- Bresnahan, T. and Gambardella, A. (1998) "The Division of Inventive Labor and the Extent of the Market" in Helpman (1998).
- Ceruzzi, P.E. (2000) *A History of Modern Computing*, MIT Press.
- Chesbrough, H.W. (2003) *Open Innovation*, Harvard Business School Press.
- Christensen, C.M., Verlinden, and M. Westerman, G. (2002) "Disruption, Disintegration and the Dissipation of Differentiability", *Industrial and Corporate Change*, 5:955-993.
- Farrell, J. and Gallini, N.T. (1988) "Second-Sourcing as a Commitment", *Quarterly Journal of Economics*, 103:673-94.
- Gawer, A. and Cusumano, M.A. (2002) *Platform Leadership*, Harvard Business School Press.
- Gilder, G. (1989) *Microcosm*, Simon and Schuster.
- Grove, A.S. (1996) *Only the Paranoid Survive*, Doubleday. (『インテル戦略転換』七賢出版)
- Hart, O. (1995) *Firms, Contracts, and Financial Structure*, Oxford University Press.
- Hart, O., Shleifer, A. and Vishny, R. (1997) "The Proper Scope of Government", *Quarterly Journal of Economics*, 112:1127-61.
- Helpman, E. (1998) *General Purpose Technologies and Economic Growth*, MIT Press.
- Holmstrom, B. and Milgrom, P. (1991) "Multitask Principal-Agent Analysis", *Journal of Law, Economics, and Organization*, 7:S24-52.
- Holmstrom, B. and Milgrom, P. (1994) "The Firm as an Incentive System", *American Economic Review*, 84:972-991.
- Jovanovic, B. and Rousseau, P. (2002) "Moore's Law and Learning-By-Doing", *Review of Economic Dynamics*, 5:346-375, <http://www.nber.org/papers/w8762.pdf>.
- Langlois, R.N. (2002) "Computers and Semiconductors" in Steil, B., Victor, D.G. and Nelson, R.R. (eds.), *Technological Innovation and Economic Performance*, Princeton University Press.
- Lessig, L. (1999) *Code and other Laws of Cyberspace*, Basic Books.
- Macher, J.T. (2001) "Vertical Disintegration and Process Innovation in Semiconductor Manufacturing", <http://emertech.wharton.upenn.edu/OldTechConfPapers/macher.pdf>.
- Moore, G. (1965) "Cramming More Components Onto Integrated Circuits", *Electronics*, April 19, <ftp://download.intel.com/research/silicon/moorespaper.pdf>.

- Morris, P.R. (1990) *A History of the World Semiconductor Industry*, Institute of Electrical Engineers
- Nordhaus, W.D. (2002) "The Progress of Computing", Cowles Foundation Discussion Paper,
http://nordhaus.econ.yale.edu/prog_030402_all.pdf.
- Okimoto, D. and Nishi, Y. (1994) "R&D Organization in Japanese and American Semiconductor Firms," in Aoki, M. and Dore, R. (eds.), *The Japanese Firm*, Oxford University Press.(『システムとしての日本企業』NTT 出版)
- Schaller, B. (1996) "The Origin, Nature, and Implications of Moore's Law",
<http://mason.gmu.edu/~rschalle/moorelaw.html>.
- Turley, J. (2003) *The Essential Guide to Semiconductors*, Prentice-Hall.
- JEITA (2003) 『IC ガイドブック』日経 BP 企画
- 池田信夫(1997) 『情報通信革命と日本企業』NTT 出版
- 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』白桃書房
- 嶋正利(1987) 『マイクロコンピュータの誕生』岩波書店
- 竹田陽子(2000) 『プロダクト・リアライゼーション戦略』白桃書房
- 中馬宏之(2002) 「『モジュール設計思想』の役割」(青木昌彦・安藤晴彦編『モジュール化』東洋経済新報社)
- 徳丸宜穂(2002) 「コード化・モジュール化と技術開発組織の進化」
<http://www2.ipcku.kansai-u.ac.jp/~setiyama/Newcomb/record/files/tokumaru020706.pdf>
- 藤村修三(2000) 『半導体立国ふたたび』日刊工業新聞社
- 堀田厚生(2000) 『半導体の基礎理論』技術評論社