

Title	ムーアの法則とその経済的評価：日本の半導体産業に対する省察
Author(s)	井上，敬介
Citation	年次学術大会講演要旨集，29：46-50
Issue Date	2014-10-18
Type	Conference Paper
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/12392
Rights	本著作物は研究・技術計画学会の許可のもとに掲載するものです。This material is posted here with permission of the Japan Society for Science Policy and Research Management.
Description	一般講演要旨

ムーアの法則とその経済的評価 —日本の半導体産業に対する省察—

○井上敬介（北陸先端科学技術大学院大学）

1. はじめに

日本の半導体メーカーは、1980年代に世界の売上高ランキングで6社が入るなど最盛期を迎えたが、1990年代に入ってから凋落期に陥り、現在では世界ランキングには東芝とルネサスの2社しか残っていない状況である。しかも日本の半導体技術の英知が結集したはずのルネサスはリストラを繰り返し、ベスト10の地位を維持することすら危うくなっている。

これまで、様々な角度から日本の半導体産業の凋落原因が分析されてきた。本稿では、ムーアの法則を経済的側面から評価し、そのトレンドが示す意味合いと、総合電機メーカーの一事業部門として発展した日本の半導体メーカーの過去の事業戦略とを照合して凋落の原因を探求している。

2. ムーアの法則と半導体産業の発展

2.1 ムーアの法則とは

半導体の集積密度は18か月から24か月で倍になる、というのが有名なムーアの法則である。インテル創業者の一人であるゴードン・ムーア博士が提唱したことからその名が付いた[1]。この法則は、長らく半導体技術開発の重要な指針となり、トランジスタの微細加工技術開発が進んでいったのである。

18か月で2倍の集積度向上は、3年で4倍、10年で100倍となることを意味する。DRAMは2000年頃まで、まさにこのペースで1チップ当りのビット容量を増加させてきた。飛躍的な性能向上のおかげでエレクトロニクス産業は大きく発展することができた。ムーアの法則は産業に多大な貢献をしてきたと言える。

2.2 ムーア法則の技術的評価

ムーアの法則を技術的に裏付ける指導原理が、1974年にIBMのロバート・デナード[2]らが発表したスケーリング則である。これに従って微細化すれば、集積度が向上するだけでなく、トランジスタの動作速度も向上し、消費電力が低下する。MOSトランジスタの場合、縦、横、高さをそれぞれ2分の1にし、電圧を2分の1にすれば、トランジスタの動作速度は2倍になり、消費電力は4分の1になり、集積度は4倍になる。ムーアの法則はこれを3年で達成するという指針なのである。

2.3 ムーアの法則の経済的評価

ムーア自身が行った2003年のISSCCでの基調講演[3]の中で、トランジスタ単価は10年で100分の1に下落していることが示されている。10年で100倍の集積度を達成する一方で、トランジスタ当りの価格はちょうど反比例しているのである。掛け算すると“チップの単位面積当りの価格は一定”で推移していたことになる。つまり10年経つと性能が100倍でも同じ価格で手に入るようになる。おかげで半導体チップは、あらゆる産業で使われるようになった。その結果、同じくムーアのISSCC2003の基調講演資料にあるように、半導体産業規模は10年で10倍のペースで成長したのである。

10年で10倍なら年平均成長率は26%とかなりの高成長になる。WSTSの統計によれば1986～1995年の10年間で、MOSメモリの出荷金額は39億ドルから535億ドルと13倍以上の成長を遂げている（図1）。しかしながら次の10年間（1996～2005年）では360億ドルから485億ドルと1.3倍程度しか成長していない。年平均成長率は3%である。集積度のペースが変化せず、面積価格が一定であるならば、チップ価格は下落していることになる。実際、DRAMの平均価格は1995年のピークを境に下落しており、価格競争の激しさを物語っている（図2）。半導体産業の成長神話は1995年を境に変調していたのである。

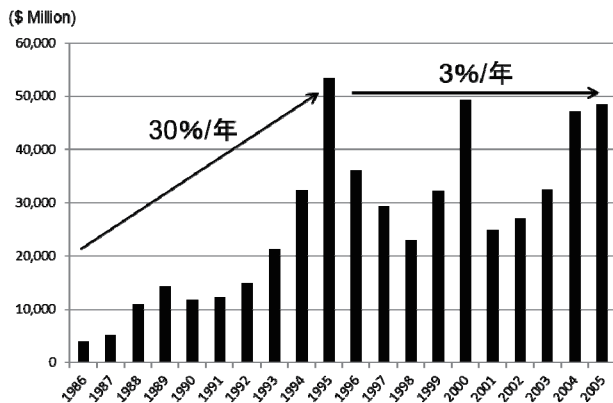


図 1. MOS メモリの出荷金額推移

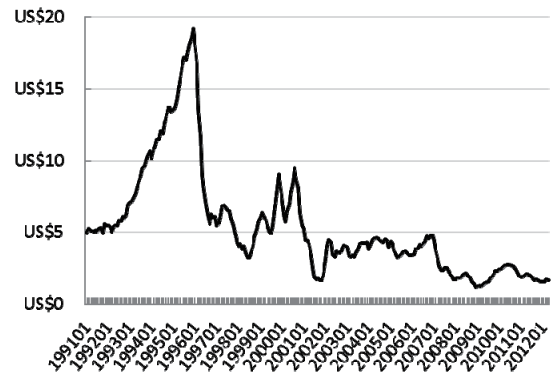


図 2. DRAM の平均価格推移（月間）

3. コスト競争を勝ち抜くための規模の経済性追求

半導体の成長が鈍化しても微細加工技術の進化は変わらない。微細化を進めるにはプロセスが複雑になり工程数が増える、より高い精度が求められる装置は高額になっていく。しかし面積当たり価格は一定を保たなければならない。それに応じて面積当たりコストも一定にしなければ収益を維持できない。この課題を解くためには規模の経済性を追求して生産効率を上げていくことになる。さもないとニッチ市場か或いは高い参入障壁を築いて他社が簡単に入れない境地を切り開くかである。

では、具体的にどのような方法で面積当たり価格一定を維持していったのかを以下に述べる。

3.1 シリコンウェハー口径の拡大

インテルが 1K bit DRAM の生産を始めた 1970 年頃のシリコンウェハー口径は 50mm だった。その後、75 mm、100 mm と大口径化が進み、現在の主流は 300 mm となっている。次世代の 450 mm が控えているが、口径が大きくなればなるほど、1 ウェハーから取得できるチップ数は増えていく。つまり、ウェハー当りの加工費用が面積の増加比率以下であれば面積当たりコストが抑えられ、面積当たり価格一定のトレンドに対応できるわけである。

3.2 製造装置のスループット改善

製造装置の単位時間当たり処理枚数を増やすことで、工程数の増加を吸収していく。微細加工技術の要である露光装置の 1990 年代までの処理能力は、1 時間当たり 100 枚にも満たなかった。ところが 2000 年以降、ちょうど 300 mm 用の装置が普及する時期から 100 枚を超える能力を持つものが登場した。装置費用が高くなっても、1 枚当たりの償却費が以前の装置以下になるスループットが得られるようになったのである。

3.3 巨大ファブの建設によるキャパシティ増大

半導体の製造プロセスは基本的にはバッチ処理である。装置間の単位時間当たり処理能力が違うと、能力の高い装置のアイドル（未稼働）時間ができてしまう。高額な装置をできるだけ遊ばさないようにするためには、装置間処理能力のバランスを取らなければならない。装置間の搬送時間を短縮しつつ、装置の処理能力の最大公約数を求めることになる。そうなれば、おのずと装置台数が増え、大きなキャパシティを持ついわゆるメガファブへの投資が必要になる。1990 年頃は 200 mm で月産 3 万枚のでも大規模な生産ラインであったが、今では 300 mm で月産 10 万枚を超えるファブがいくつも建設されている。このくらいの規模を持たないとコスト競争についていけないのだ。

実際、TSMC のウェハー原価推移を見てみるとそれがわかる。TSMC は先端ラインの投資を続けているものの、ほぼ一定に抑えられている。キャパは 300mm への投資が本格化した 2003 年以降では年率約 20% 弱で上昇している。つまり、面積当たりコストを一定に抑えるために、キャパを一気に増やしているのである。

3.4 巨大キャパを埋める製品ラインアップの存在

キャパの増加単位の上昇は、多くのラインアップを揃えて対処するか、より汎用的な製品を作って対応するしかない。従って、より多くのファブレスメーカーを抱えるファウンドリの方が、独自に製品開

発・生産まで手掛ける IDM (Integrated Design and Manufacturer) より有利である。さもないと DRAM やフラッシュメモリといった汎用品で需要も大きい分野を狙うしかない。中途半端な規模の生産量では価格競争についていけない。

2000 年代以降、先端プロセス技術のファブ投資を実施できる半導体メーカーは徐々に減っており、現在ではメモリを手掛ける Samsung、東芝、Hynix、Micron、ファウンドリの TSMC、Global Foundry、PC 向けマイクロプロセッサで 80% 以上のシェアを誇るインテルぐらいとなっている。

4. 日本の半導体産業成長の原動力

日本の半導体メーカーの特徴は、他に機器事業などを持つ他事業メーカーの一事業部門としての位置付けであった。半導体事業立上げ時には、他の事業部からの収益を半導体事業への投資に回して、莫大な設備投資を補っていた。また、半導体は電子機器を支える重要なデバイスであるため、それを内製化し、社内消費する垂直統合戦略を担う一面も持ち合わせていた。日本メーカーの成長の原動力をまとめると、次のようになる。

- ①企業内部に蓄積された知識・資源の活用
- ②需要を生み出す優良顧客との近い関係
- ③大きな日本市場の中にある地の利
- ④政府の産業政策

時間的な流れで言い換えれば、日本政府がコンピュータ産業、半導体産業への外資の参入規制を行う一方、コンピュータ分野の 3 グループ編成や超 LSI 技術研究組合を支援し、エレクトロニクス産業を育成する政策に後押しされながら、

- ・他の事業で稼いだ収益を半導体事業へ投入、および人的リソースも人事異動によって確保。
- ・社内に存在する機器に関する技術を半導体製品に実装し、技術を集積。
- ・半導体に集積された技術知識を再び機器に搭載し、より大きな技術知識を持つシステムを構築。
- ・更に、自社のセット製品のコアとなる技術知識でない限り、セット製品で競合する他社にも外販し、半導体事業を拡大。自社にないセット製品の場合は、コア以外の標準的な部分から顧客にアプローチし、販売拡大とセット製品に関する新たな技術知識の習得。

という構図が生まれた。そして

- ・国内市場においては競争力を持つセット製品が成長し、それに伴って半導体市場も拡大。
- ・国内のセット製品メーカーには同じような半導体製品が出回る為、セット製品メーカー同士は競合しながらも製品競争力が向上。海外市場でのシェア獲得にも寄与。
- ・ラインアップを多く持つことで事業のリスク分散となり、かつ生産や販売などのインフラが共通に活用できる範囲の経済が働く。

という好循環を生み出したのである。

5. 日本の半導体産業の問題点

2 章、3 章で述べたように、半導体産業は 1995 年頃を境にムーアの法則の技術的および経済的側面を維持しつつ、市場成長率の低下という流れに転換した。日本メーカーはこの転換点に気が付かなかったか、あるいは気付いてもその流れに対応できなかったのである。ここではセット（最終製品）と半導体を併せ持つ社内一体体制がどのような問題を引き起こしたかについて述べる。

5.1 社内リソース配分の非効率化

社内のセット機器向け優先の開発、供給体制であるため、セット事業部の要望を断ることは容易ではない。例えば他社向けに開発した方が半導体事業の収益が向上するとしても、社内のリード役であるセットへの貢献をトッププライオリティに置かざるを得なかった。ところがどのセット事業も強いとは限らないし、中には他社の半導体が引き受けてくれなかったものが社内を持ち込まれるケースもあるだろう。しかし非効率化を引き起こす原因の多くは、実は強いセット事業部の依頼にある。

強いセット事業部からの要請は、製品競争力を高めるために高性能・高機能の半導体を求めるケースが多い。スケジュール的にも厳しいものになる。反面、それらの要求に応えることで半導体事業部が鍛えられる。しかしながらノウハウや技術の全面的な移管が起こるわけではない。なぜならセット事業部は回路設計やファームウェアの開発は自分達で行い、半導体事業部はチップ実装を手掛けるという分業を行うので、半導体側に回路やファームウェアの技術が直接移転されることはない。また、半導体事業部が開発したチップをそのまますぐ外販することはできないので、外販用に改変するかセット事業部の製品発売からしばらく時間が経ってから漸く外販が許される。但し、外販のためのファームウェアなどのサポートは半導体側独自で対応しなければならない。セット事業部との共同開発成果をそのまま使うことはできず、半導体事業としては新たな工数が必要になる。

また、強いセット事業部の要求仕様はハイエンド向けが中心となるので、それほど数量が見込めない。外販によって開発コストを薄めようとしても、シェア争いするような競合に販売することは敵に塩を送ることになるとして躊躇される。そこで強力なライバルではない下位メーカーに売り込むことになるが、そのようなメーカーではハイエンド向け半導体を使いこなす力がなく、狙う製品セグメントもミドルからローエンドが販売の中心であることが多いので、結局は社内需要のみで開発費を償却することになる。もちろん社内で開発したハイエンド向け LSI を搭載したセットから得られる収益と合わせた事業評価を行わないといけないが、外販も視野に入れた場合、その評価はあいまいになりがちである。

半導体事業が社内のセット製品の競争力強化と外販事業の両面を持つ場合、それぞれの事業評価のバランスをどう取るかは難しい課題であり、はっきりとした方針が打ち出されない限り社内リソースの配分が効率化されているとは言えないのである。

5.2 マーケティング力の劣化

大口である社内顧客を優先的に考えるので、自社のセットの得意分野は社内情報に頼ることになる。外販のためにセットの競合メーカーに行っても、相手は半導体事業部を経由して競合のセット事業部へ情報流出することを恐れて基幹部品を購入することはないからである。技術的な問題からリスクのある企業から半導体を購入する場合でも、そのメーカーには製品情報をできるだけ出さないようにした。セット事業部が安心して半導体の開発を任せられるのは、セットを持たない半導体専門メーカーもしくは、セット事業部が強くないメーカーということになる。これは電卓用 IC の開発時でもシャープで見られたことである。

しかしながら強いセット事業部がいつまでも競争力を持つとは限らない。セットの競争環境が変化してしまい、それまでの強みが通用しないことも起こりえる。コンピュータの場合はダウンサイジングの波に押されてメインフレームの需要が伸びず、PC が台頭してきた。日本の半導体メーカーは社内のコンピュータ事業部からの情報を優先したために、DRAM に要求される品質と価格が変化していることに気がつくのが遅れてシェアを失っていったと考えられる。

5.3 国内市場に偏った内向き体質

1980 年代後半から 1990 年代前半にかけて、日本の半導体市場は世界最大であった。国内市場では官庁や企業のシステム投資、VTR の普及が進み、自動車や家電製品の輸出も伸張して日本の半導体市場が急成長したためである。そのため、国内の顧客を重視する体制が出来上がったと考えられる。

この体質は 1990 年代半ばから日本市場は縮小しているにも関わらず、あまり変化していない。ルネサスの 2006 年度地域別売上構成を見ると 50%以上を日本市場に依存しており、極端な日本市場偏重になっていることがわかる。世界中での日本市場は 20%前後しかないので、グローバル企業にしてはバランスを欠いていると言わざるを得ない。ルネサスは体質を変えられないまま、産業革新機構の支援を仰ぐことになったのである。

1990 年代はエレクトロニクス産業が東南アジアでの生産を本格化し、PC や携帯電話で日本企業がシェアを落としていった結果、日本の半導体市場はそのポジションを低下させている。しかしながら日本の半導体メーカーは国内の顧客を重視したままになった。これは次の二つの点が要因と考えられる。

まず、日本の顧客がハイエンド志向であったため、対応できるメーカーが大手メーカーに限られてしまい、日本の半導体メーカーが受注しやすい状況であった、ということが挙げられる。携帯電話用 LSI の事例がそのことを表している。

日本の携帯電話の方式は他の地域では使用されず、日本市場だけにしか需要がなかった。しかしながら機能・性能は世界最高水準であり、それを実現する半導体の開発は携帯電話事業を抱える日本メーカ

ーが請け負っている。数量が出なくても開発せざるを得ないため、グローバル展開している TI や ST マイクロと比べると数量で圧倒的に差を付けられてしまった。結果的に同じ開発費をかけても出荷数量が桁違いのためにコストが割高となるが、社内のセット事業部からの低価格要求の圧力のために大きなマージンを乗せられない低収益の製品となってしまった。

次の点は、日本企業同士が互いに牽制し合うため、業界としての非効率性が生じたことである。通常、セット事業部と共同開発した LSI がそのまま外販されることはない。外販用に回路を変更するか、半年から 1 年の時間をおいてから外販が開始されている。セットで競合する半導体メーカーからは、汎用品以外購入しないので、各社独自で開発することになる。開発費が上昇しても全てのセットが競争に勝ち残れるわけではないので、同じ分野で多くの LSI が開発されることは、業界全体としては非効率な結果を招くことになったと考えられる。

内向き体質でも市場が大きかった頃は問題なかったが、国内市場が変化したからといって急に顧客を切り替えることはほとんど不可能である。まして顧客の要求が技術的に魅力的（あるいは自社のセット事業部からの要求）ならば、たとえ販売数量がそれほど多くなくても知識の習得という観点から請負うのであろう。グローバルな視点が欠如していたことは否めない。

5.4 経営判断の遅さの問題

日本の半導体メーカーがファブレスメーカーへも転換できなかったのは、多くの人材を抱える生産事業所を簡単に切り離せない、日本的な雇用習慣の問題があって経営判断が遅れた可能性はある。

かつては歩留まりの高さと品質の安定度で日本メーカーの製造技術に優位性があり、多くの製造技術者や優秀なラインオペレーターを自社で抱えていた。生産部門を切り離す際は雇用問題に手を付けざるを得ないが、長らく終身雇用を前提としてきた習慣が、その決断を遅らせていたのであろう。

今となっては生産事業所の売却や早期退職募集などが当たり前になっているが、切羽詰まった後の施策である感は否めない。フィリップスやモトローラ、TI といった老舗の欧米半導体メーカーは、半導体産業の構造変化を読み取り、日本メーカーより 10 年近く早い決断をしている。日本メーカーでは東芝は NAND フラッシュ、ソニーはイメージセンサーに選択と集中を行い、それぞれの領域で世界シェアトップクラスになっていることを考えると、やはり経営判断のタイミングが遅れたと言わざるを得ない。

6. まとめ

ムーアの法則は技術的側面で語られることがほとんどであった。本稿ではその経済的側面に焦点を当てて半導体産業の構造変化を分析し、経済的にムーアの法則を維持するためには微細化が進んでも面積当たりコストを一定にする施策を取らなければならないことを指摘した。

また、日本の半導体産業の成功要因を分析し、それが半導体産業の構造変化によって逆に弱みとなることを考察した。ムーアの法則の経済的評価が不十分なまま、構造変化への対応が遅れたために今日の衰退をもたらしたのである。

日本の半導体産業の栄枯盛衰を振り返り、他の産業へその教訓が活かされて日本の産業全体の競争力が高まっていくことを望む。

【参考文献】

- [1] Moore, G.E.: “Cramming more components onto integrated circuit,” Electronics, Volume 38, 1965.
- [2] Dennard, R.H. et al. : “Design of ion-implanted MOS-FET’s with very small physical dimensions,” IEEE J. of SSC, v9, n5, pp.256-268, 1974.
- [3] Moore, G.E.: “No exponential is forever: But “Forever” can be delayed!” ISSCC, Volume 46, 2003.