



Hitotsubashi University  
Institute of Innovation Research



一橋大学イノベーション研究センター

東京都国立市中2-1  
<http://www.iir.hit-u.ac.jp>

# 半導体分野における技術の構造と研究開発

## Structure of Technology and R&D System in Semiconductor Industry

藤村修三

Shuzo FUJIMURA

一橋大学イノベーション研究センター

Institution of Innovation Research, Hitotsubashi University

### 1. はじめに

1970年代後半から本格的に世界市場への進出を始めた日本の半導体産業は、80年代にはDRAMを中心に世界を席卷し、80年代中頃の256KDRAMでは一時的に世界市場の90%を手中に収めた。しかし、256Kから1MDRAMをピークに、日本の半導体産業は競争力を失い、特に、「半導体は装置を買えば誰にでも作ることができる」と言われるようになった90年代後半以降は、コスト競争力に優る韓国・台湾メーカーと高度の設計力と経営力により特定デバイス市場を事実上占有するインテルやTI等米国メーカーの狭間にあって、相当に厳しい状況となった。リストラや企業再編による体質改善と携帯電話やデジタル家電の市場拡大によって日本の半導体メーカーの企業業績は昨年あたりから改善され、かつての勢いを取り戻しつつあるように見える。日本の半導体産業は蘇ったのだろうか？

半導体産業が高度の科学知に裏打ちされたサイエンス型産業(科学知が産業に取り込まれるまでの時間が短い産業)であることに異を唱える人はいないであろう。そうであるならば、日本の半導体産業が競争力を維持拡大して行くためには、良質の科学知を創造しそれを速やかに産業利用していくための優れた技術的イノベーション・システムが構築されなくてはならない。「研究」を「知識を生み出すこと」、「開発」を「知識を集積して『財』(モノやサービス)を具現化すること」、「具現化された『財』の生産性を高めること」とするならば、ここで言う「技術的イノベーション・システム」とは、研究によって生み出された科学知を集積して新製品を作りだし、さらに生産性を高めることにより市場競争力を確保するための製品開発システムのことである。

科学知を産業に結びつける、という点に関し、2000年から2001年にかけて経済産業省経済産業研究所によって主催された国際競争力研究会が国内半導体デバイス・メーカーに対してアンケート調査を行っており、興味深い結果が得られている<sup>1)</sup>。

それによると、「『更なる微細化・複雑化に対応するため、分子・原子レベルでの挙動解析に取り組まざるを得ず、そのために高度な量子力学的知見を使いこなせる人材の確保や大学との更なる連携などが重要となってきた』という指摘について、ど

のようにお考えでしょうか。」という問いに対して、アンケートに回答を寄せた国内半導体メーカー8社の内の5社が「非常に重視している」もしくは「ある程度重視している」と答えており、科学知利用の必要性は明瞭に認識されていた。しかし、「科学、技術など専門的知識ストックの面で、大学や政府関係研究機関は、比較対象国と比べて、貴社の当該事業に十分貢献しているでしょうか。」という問いに対しては、回答した7社全てが欧米との比較において「貢献は乏しい」と答えており、韓国・台湾との比較でも5社が「貢献は乏しい」(残る2社は「ある程度貢献している」としている。また、同様に「当業界において自社内で基礎的研究を実施する『総合研究所』の位置づけについてはどのようにおかんがえでしょうか。」との問いに「ある程度重視している」と答えたのは2社のみで、他の5社の内、1社は「どちらとも言えない」3社は「あまり必要ではない」、1社は「廃止した」と答えており、大学、政府関係研究機関と共に、自社の総合研究所に対しても厳しい評価を下していた。

この国際競争力研究会のアンケート結果は、一見、科学的知見が必要となった企業が大学や政府関係研究機関、あるいは企業研究所をより厳しい目で見えるようになったことを示しているように思われる。しかし、平成15年度の科学技術白書によれば、科学技術に関する学術論文の国別論文数占有率は米国に次いで2位でイギリス、ドイツ、フランスより上位であり、被引用回数占有率でも米国、イギリス、ドイツに次ぐ4位で、フランスよりも上位である。この結果は、科学知の産出能力において我が国は米国には劣るものの、ヨーロッパ各国に比べては同等以上であり、韓国・台湾に対しては明らかに上回っていることを示している。そして、その学術論文の大半が大学、政府系研究機関、企業研究所から生み出されたものであることを考えると、国際協力研究会のアンケート結果における半導体企業の回答が矛盾したものであることがわかる。すなわち、多くの日本企業が、科学知を求めていると言いつつ、相当に高い科学知産出能力を持つ日本の大学、政府系研究機関、及び企業研究所を、役に立たないと評価しているからである。

本稿ではこの知の創出に対するアカデミアでと産業界の認識の違いが日本企業の研究・開発に与えた影響を整理し、今後科学知を産業化していくために必要な研究・開発システムの在り方を考察する。

## 2. 我が国における「研究」と「開発」

1985年米国は自国の産業再生、競争力強化の目的からヤング・レポートを作成し、先進諸国との間でドル安容認、いわゆるプラザ合意をとりつけた。当時絶頂期を迎えていた日本の半導体産業に対しても米国からの状況改善要求の圧力は強く、翌86年にはその後の日本半導体産業に大きく影響を与えたとされる日米半導体協定が締結されている。

そのような中、科学技術政策においても、米国からの「基礎研究タダ乗り」との批判を受け、日本政府は官民を挙げての「基礎研究」の充実を推進した。その結果、多くの企業が基礎研究の充実をはかり「基礎研究所」ブームとも呼ばれる状況が出現した。しかし、当時大学や国立研究所(以下、国研)などを中心とするアカデミアでは「基礎研究」とは目的を限定しない好奇心に基づく科学の追究を意味したのに対し、多くの企業では「基礎研究」を製品出荷まで5年以上の時間がかかる長期の開発と

位置づけていた<sup>2)</sup>。(同じく、3年から5年を要する開発を「応用研究」、3年以内の開発を「開発」と位置づけており、これは当時通産省が企業の研究開発活動を「基礎研究」「応用研究」「開発研究」の三段階に分けて整理していたことに対応する。)実際、当時の新聞などには、好景気の余裕もあってか、大学や国研と企業は別とする意見が多く見られる。この研究に対する基本的な立場の違いもあり、企業と大学・国研との間で共同研究などの情報交換や価値観の共有化を図る動きはそれほど進まなかった。

90年代に入り日本経済の停滞が始まると、大学や国研にも産業に役立つ目的研究を望む声次第に挙がり始める。特に、不況が深刻化した90年代半ば以降は「研究」自体がオーバー・ヘッドの主要因の一つとされ、研究部門の縮小廃止、研究者の研究部門から事業部門への配置転換などが急速に進められた。その一方で、大学や国研などに新商品開発に結びつく基本特許の取得など、産業界への直接貢献を望む声が強くなり、2000年以降は、経済産業省の大学ベンチャー1000社のキャンペーンもあり、TLO やリエゾン・オフィスと言ったより直接的な産業貢献推進施設が国立大学にも多数設置されるようになる。

このように、研究・開発に関する大学・国研と企業の過去約20年間の動きを見たとき、企業の大学や国研に対する態度は、80年代後半の「企業の研究とは別物」と距離を置く姿勢から、「長期新製品開発」のための特許取得、さらにはベンチャーによる製品や市場の創出と「直接的な『財』の創出」を要求する姿勢へと変化している。80年代の研究開発モデルを見直すことなく、不況により自分たちの手が回らなくなった部分をそのまま大学や国研に補填してもらうことを望んでいるように見えるのである。元々の研究開発モデルによれば企業の意味する「基礎研究」とは長期的開発であったから、大学や国研がアカデミアにおける「基礎研究」すなわち科学知の創出を行っても、それを産業化するためのシステムは企業側に備わっていなかった。いくら大学や国研が優れた科学知を創造しても、結果として産業展開できない以上それは「役に立たない」のであり、産業化が可能な の意味での開発、知を集積しての財の具現化、までを大学や国研に求めることになったと考えられる。

### 3. 日本企業の研究開発システム

山口は米国のAT&T Bell研究所、IBM、及び日本のNTT、日立、東芝、NEC、富士通などの1978年以降の論文発表と特許の出願状況の推移を調査し、興味深い結果を得ている<sup>3)</sup>。

Bell研究所、IBM共に90年代に入って研究所の改変を行った結果、91、92年をピークに論文数は経年ごとに減少したが、それに代わって、特許数はどちらの企業も増加した。ベル研究所の研究者の在籍期間の調査から、この論文から特許への変化は人の入れ替わりによってもたらされたと推察された。すなわち、単純化して言えば、論文を書く人が去り、特許を書く人が入った、という図式である。

一方、日本企業も1995年以降やはり研究部門を縮小しているが、研究部門縮小に伴う論文数や特許数の変化は90年以降の米国の変化とは大分様相が異なっていた。日本を代表するハイテク企業である日立、東芝のいずれもが97年以降論文も特許も減少させていたのである。このことはすなわち、科学・技術の知識創造能力そ

のものが縮小していることを示唆している。日立、東芝ほどではないにせよ、NEC、富士通、等の他の民間ハイテク企業も大筋で同じ傾向であった。結局、日本のハイテク企業が90年代後半に行った研究所の縮小は、「基礎研究」の縮小を目的としながら実は技術創造システムの縮小であったと考えられる。

このBell研究所やIBMと日本企業の違いを知るために、それらに所属する研究者、特に科学知の創出に関わるようないわゆる基礎研究を行っていた研究者の研究活動状況を論文と特許で調べた<sup>4)</sup>。

図1、図2、図3、はBell研究所、IBM、日立製作所からPhysical Review B誌に筆頭著者として論文を発表した研究者がその組織で純粋科学論文誌、応用科学論文誌にそれぞれ筆頭著者、共著者としてどの程度論文を発表しているかをプロットしたものである。

Physical Review B誌は固体物理学において最も権威のある雑誌の一つで、この分野の研究者の大半が掲載を望む雑誌である。ライバル誌も無くはないが、良質の研究結果の相当多くがこの雑誌に掲載されると考えて良く、半導体産業の根幹をなす固体物理学の動向を見るには最適の論文誌である。

Bell研究所とIBMについては1990年にPhysical Review B誌に筆頭著者として論文を発表した研究者の一部について、日立製作所については1988年から2000年までにPhysical Review B誌に筆頭著者として論文を発表した研究者全員について調べている。Bell研究所とIBMを1990年に限ったのは共にPhysical Review B誌への発表が多いこと(1988~2000年までだと共に約1000の論文を発表している)、Bell研究所は1991年より、IBMは1993年以降純粋科学の研究を縮小しているからである。日立製作所に関しては、日立製作所に所属する研究者が筆頭著者となっているPhysical Review B掲載論文数が少ないこと(70報でBell研究所、IBMの十分の一以下:それでも1988~2000年の間では日本の企業ではNTT、NECに次いで三番目)から調査対象機関を1988~2000年とした。ただし、97~2000年の間に日立製作所所属の研究者が筆頭著者となったPhysical Review B掲載論文数は13報しかなく、その意味では大半は基礎研究に力を入れていた頃に書かれたものである。すなわち、三社とも基礎研究を積極的に行っていた時期について調査を行ったことになる。なお、データはAmerican Institute of Physicsのデータ・ベースを用いた<sup>5)</sup>。この調査で、純粋科学論文として数えたのは、Physical Review, Physical Review Letters, Journal of Chemical Physics, AIP Conference paper, Nature等の論文誌に掲載された論文であり、応用科学論文として数えたものはJournal of Applied Physics, Applied Physics Letters, Journal of Vacuum Science and Technology, Journal of Optics, Review of Science Instruments等に掲載された論文である。

図1に示すように、Bell研究所で1990年のPhysical Review B誌に筆頭著者として論文を発表した研究者は筆頭著者として論文を発表する場合はほとんど純粋科学論文誌に発表しており、共著者としては応用科学論文誌にも発表する場合があることが判る。共著者として論文に名前が載るのは主として、自分と同じ研究チームの他の研究者の研究に協力した場合、もしくは他の研究チームの研究に協力した場合である。前者の場合は研究テーマが共通する場合が多いので、本人が筆頭著

者で書く論文と同じ論文誌に発表する機会が多く、後者は協力先の研究チームの発表先に名前が載ることになる。従って、図 1 の結果は Bell 研究所で 1990 年の Physical Review B 誌に筆頭著者として論文を発表した研究者は主体的には純粋科学の研究をしており、必要に応じて応用科学の研究をしているチームに協力する、といった研究姿勢であったと推察される。

図 2 は IBM で 1990 年の Physical Review B 誌に筆頭著者として論文を発表し

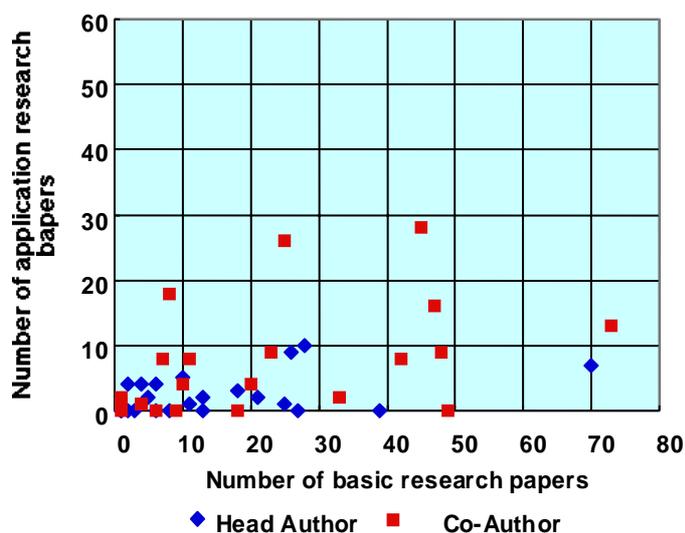


図 1. Bell 研究所研究員の論文発表性行; 1990 年の Physical Review B 誌に Head Author として論文を発表した研究者の Bell 研究所での論文発表形態

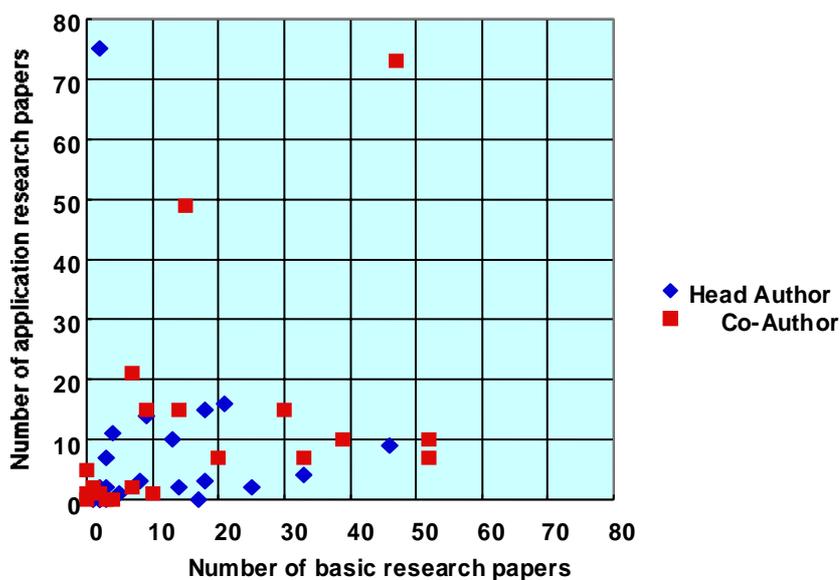


図 2. IBM 研究員の論文発表性行; 1990 年の Physical Review B 誌に Head Author として論文を発表した研究者の IBM での論文発表形態

た研究者の論文発表傾向であるが、純粋科学論文誌への発表が多いものの、Bell

研究所の研究者に比べると応用科学論文誌へも筆頭著者として数多く投稿しており、応用科学研究にも主体的に取り組んでいたことが判る。

日立製作所の研究者も図 3 に示すように、論文数は少ないものの純粋科学研究、応用科学研究の両方に主体的に取り組んでいる。

図 4、図 5、図 6 はさらに特許を考慮した図である。縦軸には筆頭著者として純粋科学論文誌に、掲載された論文数に対する発明者になっている特許数の比を採り、横軸には応用科学論文誌に筆頭著者として掲載された論文数の筆頭著者として

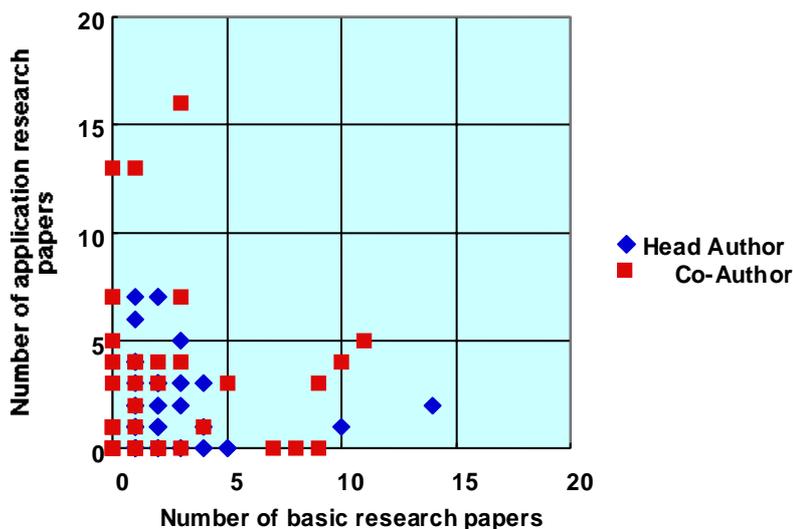


図3. 日立製作所研究員の論文発表性行; 1988 ~ 2000年のPhysical Review B 誌にHead Authorとして論文を発表した研究者の日立での論文発表形態

純粋科学論文誌に掲載された論文数に対する比を採っている。特許は米国特許として登録されたもので、データ・ベースとしては米国特許庁のものを用いた。

図 4 を見ると、Bell 研究所の研究者を示す点はほとんどが横軸上の1以下のところにある。すなわち、Bell 研究所の研究者の多くが純粋科学研究専任とも言える研究者であったことが判る。

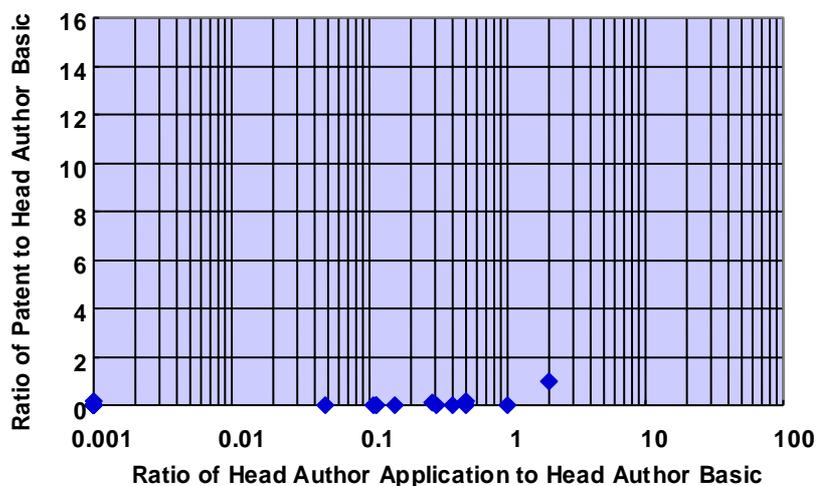


図4 . Bell研究所研究員の論文と特許;1990年のPhysical Review B誌にHead Authorとして論文を発表した研究者の応用科学論文数(Head Author)、特許数の純粋科学論文数(Head Author)に対する比

図5 から判るように、IBM の研究者の一部は Bell 研究所の研究者と同じような研究性向を持っているが、多くは純粋科学論文、応用科学論文を書き、かつ特許も

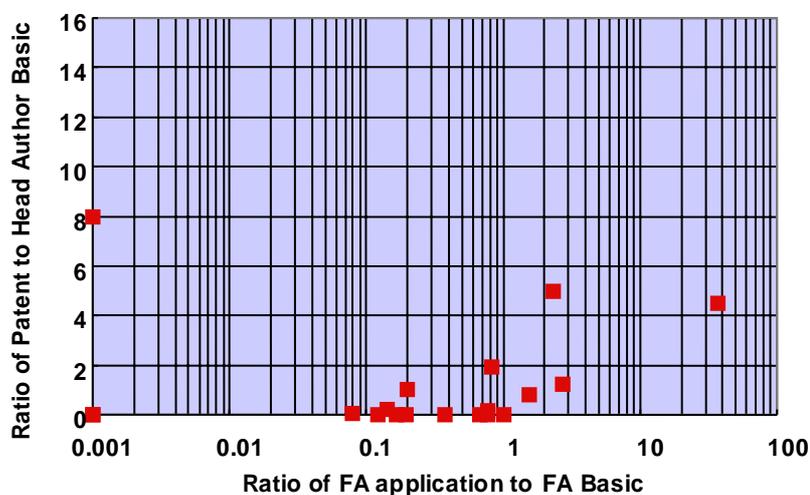


図5 . IBM 研究員の論文と特許;1990年のPhysical Review B誌にHead Authorとして論文を発表した研究者の応用科学論文数(Head Author)、特許数の純粋科学論文数(Head Author)に対する比

出願している。また、応用科学論文数の純粋科学論文数に対する比率が高いほど特許を多く出しているように見える。

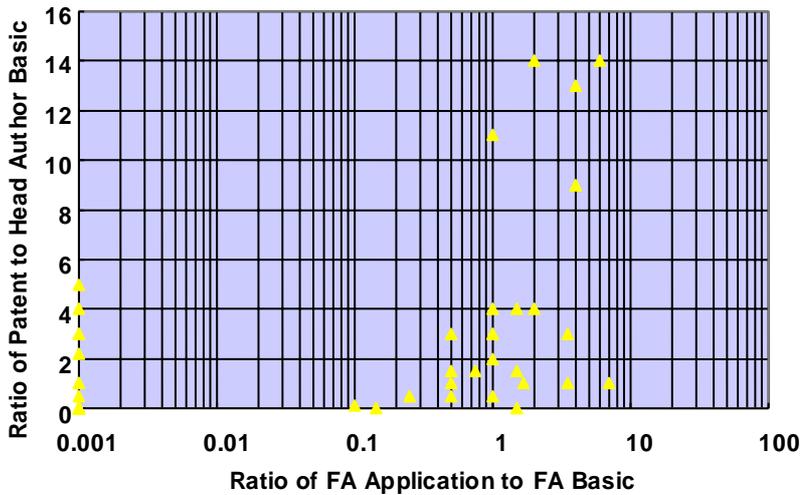


図6. 日立製作所研究員の論文と特許; 1988~2000年のPhysical Review B誌に Head Authorとして論文を発表した研究者の応用科学論文数(Head Author)、特許数の純粋科学論文数(Head Author)に対する比

図6 日立製作所の研究者を調べた結果であるが、一見して判るように、Bell 研究所や IBM の研究者に比べて特許の純粋科学論文数に対する比率が高い。また、多くの研究者は応用科学論文数の純粋科学論文数に対する比率が1以上である。日本の応用物理分野の研究者が最も多く投稿する Japanese Journal of Applied Physics 誌が今回のデータには含まれてないことを考慮すると、図6の多くの点は右にシフトするはずである。にもかかわらず、一部の研究者を除けば、Physical Review B 誌に筆頭著者として論文を発表した研究者であっても、その多くは日立の場合には純粋科学論文数よりも応用科学論文数の方が多く、かつ特許を論文数に比して数多く出願している。

以上のことから、Bell 研究所は純粋科学、応用科学の間でかなり分業的に研究する形態を取っていたのに対し、IBM は緩やかな分業態勢を採っていたと考えられる。一方、日立の研究者の主眼はむしろ開発にあって、必要に応じて応用科学の研究、さらには純粋科学の研究を行っていたように見える。すなわち、Bell 研究所、IBM は「物理限界の更新を伴うイノベーション・システム」を組織として動かそうとしていたのに対し、日立ではそれが研究者個人にゆだねられていたように思われる。従って、Bell 研究所や IBM では論文を書く人が去っても、特許の産出に大きな影響は無かったが、日立では論文と特許は同じ人によって生み出されていたため、論文を書く人をリストラすることで、特許も減少してしまった、と考えられる。

もし日本企業の多くが日立と同様の研究開発システムを採用していたとすると、それは日本企業が「科学知の創出」と「科学知・技術知を結集しての新しい財の創造」を優れた個人の力に依存していたことを意味する。そして反面、それは日本企業に組織としてのイノベーション・システムが欠如していたことを示すことに他ならない。

#### 4. これからの研究・開発システム

これからのイノベーションを一般化して考えるために「パフォーマンス分布図」と名付けた概念図を用いる。「パフォーマンス分布図」の縦軸には着目している技術に求められるパフォーマンスの大きさを、横軸にはその技術が用いられる環境が技術に与える制約の強さを採っている。原点はその技術が実行される理想的な環境である。図7は「パフォーマンス分布図」をあらゆる技術に一般化したものである。「物理限界」とあるのは着目している技術の理論的なパフォーマンスの限界である。技術がハードウェアによるものならば、構成している方式(メカニズム)と技術を実行するのに用いられる材料の物性値で決定される。コンピュータのソフトウェアの場合は、オペレーションシステムとコンピュータのハードウェアで決まるパフォーマンスの限界が「物理限界」である。「装置限界」は対象としている技術がその設計の意図どおりに実現されたときのパフォーマンスで、実際に実現されたパフォーマンスの最高を示すと考えてよい。「実行限界」は現実に目の前で用いられている技術のパフォーマンスのレベルで、従って、技術を実行するためのパラメータを上手く設定できれば「実行限界」は「装置限界」に一致する。さらに、技術が想定した理論に基づいて理想的に具現化されるならば、「装置限界」は「物理限界」と一致することになる。

筆者は文献(6)において、このパフォーマンス分布図を用いて、16KDRAM以前は実行限界の調整更新能力が、64K~4MDRAMの時代は主として装置限界の更新能力が、そして16MDRAM以降の時代は物理限界の更新能力が競争力を決める大きな要素になっていたことを示した。実際、64MDRAMに相当する0.25 $\mu$ m以降の半導体プロセスではCMP、Cu配線、Low-k材料、High-k材料、超解像露光技術、液浸露光等、材料の変更やプロセス方式の変更が多々見られる。そこで、ここでは64MDRAMに相当する0.25 $\mu$ m以降の技術の状況についてパフォーマンス分布図を用いて分析し、研究・開発に求められる要素について考察する。

物理限界の更新能力が必要になったことの典型的な現象が露光波長の短波長化であった。g線→i線→KrF→ArF→(F<sub>2</sub>)と短波長化が進んだが、それに伴いKrF

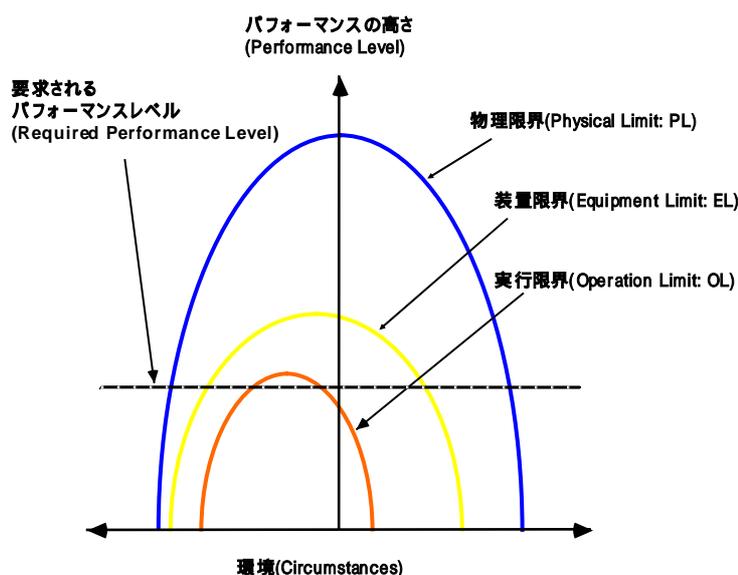


図7.技術の階層

レーザー以降はレジスト材料も変更を余儀なくされている。また、 $0.15\ \mu\text{m} \sim 0.13\ \mu\text{m}$  レベルになると、位相シフト・マスクに代表される超解像露光技術も不可避となってきた。これは g 線から i 線への短波長化では露光波長という一つの物性値を変化させれば微細化に対処できたがその後は露光波長だけでなくレジスト材料の基本的な物性値の検討や位相シフトという新たな物理現象の導入なしに求められる微細化に対処できなくなったことを示している。さらに、65nm、45nm用の露光技術として期待されている液浸露光ではウェハを浸す液の物性値の検討が必要となっており、微細化のために選択すべき材料(物性値)は増える一方である。

このフォトリソグラフィという一つモジュールについての技術の構造変化は以下のようにまとめることができる。16K以前は装置のメンテナンスやオペレータの技能がそのパフォーマンスを決めていた、すなわち実行限界の扱いがパフォーマンスの決め手となっていたのに対し、64K～4M時代はコンタクト一括露光から縮小投影露光へと露光装置が進化し、装置の能力がパフォーマンスを決した。装置限界の時代となったのである。4M以降物理限界の更新が重要となるが、最初の短波長化であるg線からi線への移行では、更新しなくてはならない物理限界は基本的に露光波長だけであった。一つの物性値を変えるだけで、あとのプロセス要素、例えばレジストの物性値、露光面付近の屈折率(空気の屈折率)等を変更する必要はなく、レジストで言えば塗布膜厚や現像条件などのプロセス実行のためのパラメータ調整、すなわち実行限界の調整で目的を達することができた。これはフォトリソグラフィを複数の要素からなる一つのシステムとして捉えたとき、露光波長という一つの物性値の変更、物理限界の更新によりシステムのパフォーマンスが向上したことになる。これは、結果から見るとリニア・モデルによる技術レベルの向上と捉えることができる(図8参照)<sup>7)</sup>。そして、i線からKrFへの移行ではレジスト材料の変更が起こり、 $0.25\ \mu\text{m}$ から $0.18\ \mu\text{m}$ への対応において位相シフト・マスクの導入が検討され $0.15\ \mu\text{m} \sim 0.13\ \mu\text{m}$ レベルの微細化においては、それは不可欠となっている。次の微細化レベルへ進むのに、複数の物理限界の同時更新が必要となっているのである。

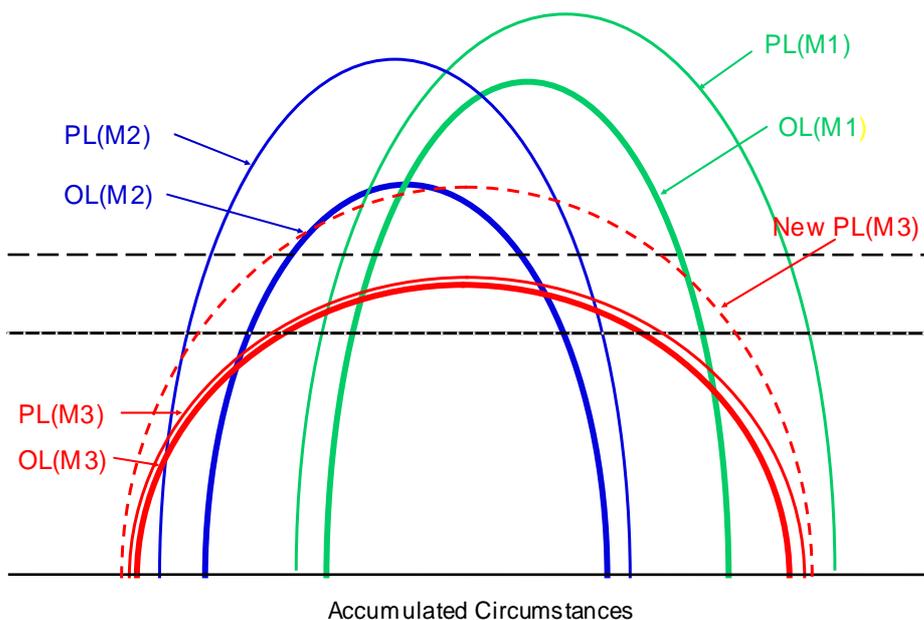


図 8 . リニア・モデルに見える系

赤、青、緑の三つの要素技術から成り立っているシステムで、赤の物理限界を更新し、青と緑の実行限界を調整すればより高度なシステム・パフォーマンス（実行限界の積集合）が得られる。一つの物理限界の更新が新システムを実現したように見える。

物理限界は物理法則と物性値で決まる限界であるから、装置限界や実行限界のように改良や改造によって任意に調整変更することはできない。システムを成立させるために物理限界の変更が必要となったときに実行可能なことは、適切な物理限界を持つ材料なり方式なりを導入することだけである。すなわち、過去、我々はシステムのパフォーマンスを向上させるために、実行限界の調整、装置限界の調整の後実行限界の調整、一つの物理限界の更新と他の要素の装置限界調整及び実行限界調整、を行うことを研究・開発の役割としてきた。しかし、ここに述べたように、最近ではこの上位に「物理限界の適切な選択」という新たな段階が必要となっている。これは、これまでの研究行為において目的とされた、一つの要素技術の物理限界を突破すること、とは異なる科学知の扱いである。

この研究・開発における新たな「物理限界の適切な選択」という段階を「物理限界のシステム化」と呼ぶことにすると、「物理限界のシステム化」を実行する研究・開発技術者には少なくとも二つの能力が求められる。一つはシステムのパフォーマンス向上を目的として新たに現れる要素技術の物理限界を理解できることであり、もう一つはシステムが実際に稼動する環境とそこで求められるパフォーマンスのレベルを理解していることである。前者の「物理限界の理解」は物理限界の更新を図る際の必要事項であり、科学知の創出を行う研究者に求められる能力である。一方、後者の「システム稼働環境の理解」は実際にシステムのパフォーマンス向上を扱う開発技術者に求められる能力である。従って、例えば図 4 に現れた Bell 研究所の研究者は一つの物理限界の更新は得意とするかもしれないが、特許をほとんど出願していないことからわかるように、恐らく最終的なシステムの動作環境と求められるパフォーマンスは

理解できていないように思われる。その意味で「物理限界のシステム化」には不向きな人たちであると想像できる。一方、日立の研究者たちは科学知の創出と「財」の具現化を行っており、「物理限界のシステム化」を行う能力を持つ可能性は高いように思われる。

半導体デバイスの最小線幅が90nm、になり、デバイスの目的とする特性に対してあらゆるプロセスで材料やプロセスの適正選択が必要となった現在、日本の半導体デバイス・メーカーが復活しつつある背景にはこの「物理限界のシステム化」を行い得る人材が存在することがあるように思われる。

今後65nm、45nmと微細化が進むに従い「物理限界のシステム化」の重要性は増す一方である。新材料の検討などが必要とされる要素技術の研究・開発全てを一企業内で行うのは財政的にも難しく、大学やコンソーシアムなど企業外部の積極利用を図るべきであるが、「物理限界のシステム化」は半導体デバイス・メーカーが行うべき研究の一段階である。要素的な科学知の創生を行っている大学や国研を交え、イノベーション・システムでの企業の役割を改めて検討すべきであると思われる。

## 5. まとめ

80年代日本の半導体デバイス・メーカーは研究・開発の全ての段階を内包していた。バブル崩壊とそれに続く平成不況の中で、オーバー・ヘッド解消のために科学知の創出を行う研究部門を縮小した。しかし、その結果は「財」の創造能力も失うものであった。これは日本企業の研究・開発システムが個人の能力に依存したもので、組織的にイノベーションを行う形態になっていなかったためと考えられる。しかし、複数の物理限界を同時に更新しなくてはより高いシステム・パフォーマンスを得られなくなる時代に入り、適切な物理限界を選び取る「物理限界のシステム化」が重要な研究・開発要素となった。その結果、イノベーション推進を個人に依存していた日本企業は「物理限界のシステム化」を推進し得る人材を抱えていたことになり、結果的に有利な状況が生まれている。今回の好況はこのような偶然が作用した可能性が高く、この機により組織的な研究・開発システムの構築を図る必要がある。

## 参考文献

- 1) 「平成12年度 我が国産業の国際競争力に関する調査研究 報告書」  
平成13年3月、経済産業省 経済産業研究所
- 2) 藤村修三 (2002) 「研究開発における知識創造力」一橋ビジネスレビュー、50  
(2) pp.46-58.
- 3) 山口栄一「定量的データに基づく問題提起」、フォーラム「持続可能な新産業  
創生のシナリオ」記録、21世紀政策研究所、2002年4月、pp.8-13.
- 4) 平成15年度 NEDO 委託研究「日米半導体関連技術研究開発従事者の社会的  
意識に関する基礎調査」報告書
- 5) ( [http://scitation.aip.org/scitation\\_login.jsp](http://scitation.aip.org/scitation_login.jsp) )
- 6) 藤村修三「半導体立国ふたたび」日刊工業新聞社、(2000).
- 7) 藤村修三「技術の構造とイノベーション - 科学・技術に基づいた製品開発の  
モデル - 」ルネッサンス・プロジェクト Discussion Paper Series #04-01

( <http://www.cisrep.jp/p05.html> )

- \* 本稿は2004年7月20日にアジュール竹芝(東京都港区海岸1-11-2)で開催された日本学術振興会、半導体界面制御技術第154委員会第46回研究会「半導体産業への提言」の講演予稿として書いたものをベースとした。