

技術力から見た日本半導体産業の国際競争力

湯之上隆

ITEC Research Paper Series

04-07

December 2004

技術力から見た日本半導体産業の国際競争力

同志社大学 技術・企業・国際競争力研究センター
リサーチペーパー04-07

湯之上隆

同志社大学 技術・企業・国際競争力研究センター (ITEC)

専任フェロー

〒606-8580 京都市上京区今出川通烏丸東入

電話:075-251-3836 FAX:075-251-3139

yunogami@doshisha-u.jp

キーワード: 日本半導体産業、国際競争力、技術力、コスト競争力、技術文化

本文内容の専門領域: 半導体産業論

著者の専門領域: 半導体産業論、半導体の微細加工技術、プラズマ応用工学

要旨

現在の日本における半導体生産に関する技術の国際競争力を分析した結果、過剰な要素技術を使い、高いインテグレーション技術力と生産技術力により、過剰品質の半導体デバイスを生産している反面、要素技術、インテグレーション技術および生産技術全てにおいて、安く作るための技術力が劣っていると論じた。すなわち、日本半導体産業は、技術の的を外したために、国際競争力を失った仮説を提言した。

技術を切り口として DRAM の歴史を考察した結果、1970 年から 1980 年にかけて、要素技術の極限性能を追求し高品質 DRAM を生産する技術文化が日本半導体産業に形成され、これが現在の過剰な要素技術と過剰品質に繋がっていることを示した。この技術文化により高品質 DRAM を生産した日本は、1980 年代にシェア世界一になった。しかし、1990 年代に DRAM 需要が大型コンピュータから PC に変化したにもかかわらず、この技術文化を変えることができなかつた日本は、結果的に技術の的を外し、コスト競争力で諸外国に抜かれ、国際競争力を低下させたと推論した。

謝辞

本論文は以下の研究成果である。①同志社大学における文部科学省 21 世紀 COE プログラム「技術・企業・国際競争力の総合研究」プロジェクト。②NEDO ルネッサンスプロジェクトのテーマ「半導体産業における科学的知見と製品開発能力の在り方」。③財団法人・村田学術振興財団の研究テーマ「技術力から見た日米韓中台の半導体産業比較および日本半導体産業の国際競争力向上のための研究」。

本研究は、京都大学経済学研究科大学院博士後期課程の吉岡英美女史の学位論文を読んだことがきっかけになりました。その後も、数多くの議論をさせて頂き、数多く学ばせて頂きました。更には、一部調査を共同で推進しました。吉岡英美女史に感謝の意を表します。

株式会社半導体先端テクノロジーズ(セリート)の元取締役第一研究部長・有門経敏博士には、有意義な意見とコメントを多々頂きました。更に、セリートにおける技術者への調査を共同で推進させていただきました。心から感謝申し上げます。

溝上裕夫氏には、沖電気工業株式会社の元 DRAM 生産責任者、および検査装置メーカーのケーエルエー・テンコール株式会社の元代表取締役社長のご経験から、日本半導体産業の生産技術力に関する有益なコメントおよび意見を頂きました。ここに御礼申し上げます。

本研究に関する有益なアドバイスを多々下さり、本研究論文の執筆を強く勧めて下さった慶應義塾大学総合政策学部・榊原清則教授に心から感謝申し上げます。

技術力から見た日本半導体産業の国際競争力

湯之上隆

1. はじめに

本論文の第一の目的は、1990年から2000年にかけて日本半導体産業の国際競争力の低下の原因を、生産に関する技術力の視点から説明することにある。更に、本論文の第二の目的は、仮説ではあるが、現在の日本半導体産業の技術力における国際競争力を明らかにすることにある。

まず、技術者および経営者など日本半導体産業の業界関係者は、上記競争力低下の原因は経営、戦略およびコスト競争力にあり、技術力には問題が無いと考えていることを調査結果や文献を使って示す。

次に、多くの先行研究が上記と同様な主張をしている中で、藤村修三(2000年)が技術開発力に問題があると言う分析をしていることを示す[1]。

一方、筆者は、競争力低下の原因が藤村の主張する研究開発力の問題にあるのではなく、日本半導体産業が技術的を外していることにこそ真の問題があることを、次の手順により示す。まず、半導体の生産に関する技術を、要素技術、インテグレーション技術および生産技術の三段階に分けて定義する[2]。次に、具体的な調査事例を分析する事によって、三段階に定義した技術における現在の日本半導体産業の国際競争力を評価する。その結果から、仮説として、日本半導体産業は、過剰な要素技術を使い、高いインテグレーション技術力と生産技術力により、過剰品質の半導体デバイスを生産していることを論じる。また、日本半導体産業は、要素技術、インテグレーション技術および生産技術の全てにおいて、安く作るための技術力が劣っていることを論じる。つまり、日本半導体産業は技術的を外していることを導き出す。

更に、何故、日本半導体産業が技術的を外すことになったのかを、三段階の技術を切り口として、DRAMの歴史を振り返ることにより考察する。まず、1970年から1980年にかけて、日本半導体メーカーには、要素技術の極限性能を追求し、高品質DRAMを生産する文化が形成され、これが現在の過剰な要素技術と過剰品質に繋がっていることを示す。次に、この技術文化により、1980年代には高品質DRAMで世界一なったことを論じる。ところが、吉岡英美(2004年)が指摘したように、1990年代には、DRAMの需要が大型コンピュータからPCに変化した[3]。それに伴って、安く大量生産する技術力がDRAMビジネスの競争力の源泉になったにもかかわらず、技術文化を変えることができなかったことが、日本半導体産業の国際競争力低下の原因となったことを論じる。

2. 問題提起

2.1 研究の背景

1990年から2000年にかけて、日本半導体産業の国際競争力は大きく低下した。日本の半導体業界関係者は、競争力低下の原因をどのように考えているのだろうか？結論から言うと、技術者も経営者も、経営、戦略およびコスト競争力が問題であったと考えている。一方、技術開発力および技術力に問題があったとは考えていない。この根拠となる二つの事例を以下に示す。

第一の事例は、半導体コンソーシアムの一つ、半導体先端テクノロジーズ(セリート)[4]の技術者21人へ行った調査結果である[5]。まず、日本が国際競争力を低下させた真の原因は何か？と問うと、21人中14人がコスト競争力の問題を指摘した。その他にも、多くの技術者が経営や戦略の欠如を大きな原因と考えていた。一方、技術力の低下を問題にしたのはわずか2人であった。また、日本の技術力を諸外国と比較すると、21人中20人が「同等以上」と回答した。その詳細を問うと、「技術力では負けていなかった」、「技術力を米国、韓国および台湾と比較すると同等以上であった」、「現在も技術力では負けていない」という主張であった[6]。すなわち、この調査結果から、日本の技術者は、日本半導体産業の国際競争力低下の原因は、経営、戦略、コスト競争力にあり、技術力には問題が無いと考えていることがわかる。

第二の事例を示す。半導体業界の方向性を決めるために、調査、情報収集および分析活動を行う民間のコンソーシアムとして、1995年に半導体産業研究所が設立された[7]。幹部や研究員は、日本半導体メーカー10社から出向している。その半導体産業研究所が、半導体メーカーの社長などの経営者と関係する大学教授をメンバーとして半導体産業戦略推進会議を発足した[8]。

その推進会議が2003年に作成した報告書「我が国半導体産業の課題と対応」によれば、日本半導体産業の課題として、まず、「コスト競争力」、次に「百貨店型の多品種展開」が挙げられている。一方、技術力については、「我が国の設計技術は、韓国、台湾に対しては優位にあるものの、米欧に劣後している。製造プロセス技術は、我が国技術は米国と並んで首位であるが、フロントエンド技術では韓国に追い上げられている」とある。更に、同報告書による日本半導体産業がとるべき対応策としては、①経営改革および組織改革、②コスト削減、③設計・システム部門の強化、④技術開発(共通化・標準化による技術開発の合理化および優位技術の育成)、⑤応用市場の開拓、および⑥知的財産の保護や貿易ルールの活用などが挙げられている。

すなわち、上記報告書によれば、技術力については、設計技術に問題があるとしながらも、生産に関する技術力を憂慮する調査結果も対策案も無い。

上記二つの事例を総合すると、日本半導体業界の技術者も経営者も総じて、日本半導体産業の国際競争力低下の原因は、経営、戦略およびコスト競争力などにあり、技術、特に生産に関する技術力には問題が無いと考えていることがわかる。

筆者が調べた限りでは、多くの先行研究が上記と同様な主張をしている。例えば、

伊丹敬之(1995年)は、日本は選択と集中ができず戦略が無かったことを競争力低下の原因に挙げている[9]。大矢根聡(2002年)は、日米半導体摩擦により、日本は販路が絶たれ、米国と韓国の成長を促したとしている[10]。川西剛(1997年)は、投資判断の遅れ、すなわち戦略の問題と、アジア諸国に比較してオーバーヘッドが大きいことによるコスト競争力の低さを指摘している[11]。

そのような中、藤村は、日本の国際競争力低下の要因として、唯一技術開発力の問題を取り上げている。その主張は、以下の二点である。

(1) 第一のポイントは、「物理限界」を更新する力、すなわち科学に基づく技術の開発を行う力が十分ではない[12]。

(2) 第二のポイントは、「物理限界」の組み合わせを最適化する能力、すなわち技術を産業に展開するためのシステム化能力が不十分[13]。

筆者が定義した三段階の技術に基づいて、上記二つの要因を言い換えれば、日本半導体産業は、要素技術開発力が弱く、インテグレーション技術力も低いということになる。もっと簡単に言えば、生産に関する技術開発力の低下が国際競争力を喪失した原因であったと言う主張であろう。

一方で、藤村は、韓国、台湾および米国マイクロテクノロジーなどが台頭してきた要因を以下のように分析している。まず、半導体装置メーカーの成長により、「DRAMは装置を買えば誰にでもできる」状況になったことが背景にあった。これをうまく利用した韓国は、売れ筋の装置をそろえることにより大きく成功した[14]。ファウンドリーメーカーである台湾は、デバイスの開発費がいらず、他社に先駆けて先端の装置をそろえる必要が無い。その結果、製造コストを低く抑えることができた。この特徴により勢力を伸ばした[15]。米国マイクロテクノロジーは、初めからコスト競争力で勝つことを目指した。そのために、日本より簡素な工程フローを構築し、更にデバイス自体を小さく作り、一枚のウエハから取れるチップ数を増やした[16]。すなわち、これらの国やメーカーは、技術力ではなくコスト競争力の強さで台頭してきたと主張している。

藤村が指摘している技術開発力の低下は、本当に生じていたのであろうか？ 技術開発力が低下すれば、実際の技術力も低下すると考えられる。しかし、日本半導体業界関係者からは、技術力低下の兆候は窺うことができない。どちらの主張が正しいのであろうか？

また、藤村も日本半導体産業界関係者も、競争力低下の要因としてコスト競争力の問題を挙げている。しかし、コスト競争力と技術力は全く別物と認識されている。果たしてこの認識は正しいのであろうか？ コスト競争力に半導体生産に関する技術の関与は無いのであろうか？

2.2 研究の動機

半導体の生産に関する技術に焦点を絞った場合、上記で見てきたように、藤村が技術開発力に問題があると指摘して入るものの、日本半導体産業界の関係者は、技術力に問題があるとは考えていない。それでは、1990年から2000年にかけて業界関係者が「技術力では負けていなかった」と言う根拠はどこにあるのであろうか？ 現在も、「技術力では負けていない」と言う根拠はどこにあるのであろうか？ 技術を、要素技術、インテグレーション技術、および生産技術の3階層に分けた場合、昔も今も「負けていない」という技術とは、一体何か？ そして、業界関係者も藤村も指摘していたコスト競争力の問題に技術の関与は無かったのか？ 一体、現在の日本半導体産業における技術の国際競争力はどのような状況にあるのであろうか？

日本半導体産業の今後の方向性を考える際、生産に関する技術の国際競争力を明確にしておくことが極めて重要であると考え。なぜならば、前項で見てきたように、日本半導体産業においては、「生産に関する技術力には問題が無い」ことが一般的であり、これを前提として、日本半導体産業の行く末が議論されているからである。もし、この定説が正しくなかったら、全ての政策、方針、戦略などを根底から考え直さなくてはならなくなる。

しかし、管見の限りでは、これまで、半導体産業における技術の国際競争力を論じた研究例は無い。その主たる原因は、半導体メーカーが秘密主義を取っているため、ベンチマークにより技術力の直接比較を行うことが難しいことにある。その他に、半導体の生産に関わる技術が複雑なため、技術の定義が曖昧だったことも影響していると思われる。

2.3 研究の目的

本研究の目的は、1990年から2000年にかけて日本半導体産業が国際競争力を低下させたことに、半導体生産に関する技術力の問題が関係していたか否か、関係していたとしたらどのように関係していたかを明らかにすることにある。更に、本研究のもう一つの目的は、半導体生産に関する技術に関して、現在の日本の国際競争力を明らかにすることにある。

この目的のために、次節では、半導体の生産に関する技術を、要素技術、インテグレーション技術および生産技術の三段階に分けて定義したい。

3. 半導体の生産に関する技術

図1に示したように、半導体の生産に関する技術は、①要素技術、②インテグレーション技術、および③生産技術の三段階に分けられる。更に、それぞれの階層の技術について、高い技術力とはどのようなものを示す。

①要素技術

半導体生産工程を構成する最小基本単位のプロセス技術を要素技術と呼ぶ。具体的には、シリコンウエハ上に薄膜を形成する成膜技術、その薄膜上にレジストマスクを形成するリソグラフィ技術、マスクに従って加工するエッチング技術、加工後に残渣やパーティクルなどを除去する洗浄技術、加工したパタンサイズ測定およびパーティクルや欠陥などを検出する検査技術などがある。また、リソグラフィとエッチングをまとめて、微細加工技術と呼ぶ。

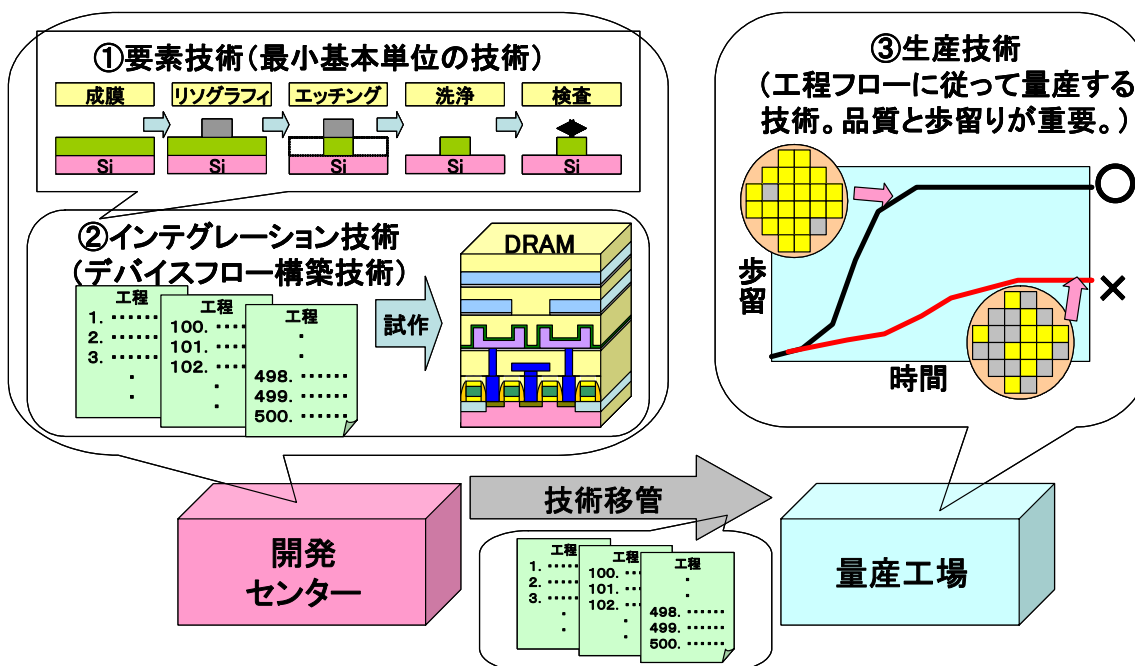


図1. 生産に関する3段階の技術の定義

ここで、エッチング技術を例にとり、その中でも最も微細な加工が要求されるトランジスタのゲート電極加工を取り上げて、高い技術力とはどういうものなのかを説明する。

ゲート電極には、異方性加工が必要となる。異方性とは、一方向にのみ加工が進む性質である。エッチング技術としては、図 2 (a) のBのように電極の側壁が下地に対して垂直である場合が最も優れている。一方、Aのように側壁が斜めになっている場合や、Cのようにオーバーハングしている場合の加工は、技術力が低い。これらの指標は、ゲート電極の形状が、トランジスタの性能やそのばらつきに大きく影響するところから決まってくるものである。

加工寸法とパタンの縦横比については、より微細な寸法で、縦横比の大きな加工ができるほど技術力が高い。図 2 (b) で言えば、AよりB、BよりCの技術力が高い。

この他にも、加工速度が速い、処理速度(スループット)が速い、ゲート電極の下地削れが小さい、レジストマスクとの選択比が高い、ゲート電極の下部にある絶縁膜に欠陥などのダメージを与えない、などの優劣においても、技術力の高低が存在する。

更に、加工は、直径 20~30cmのシリコンウエハ全面に渡って行うため、上記で挙げた加工特性がばらつく。従って、全ての特性において、ばらつきが小さいほど技術力が高い。例として、図2(c)に加工寸法のばらつきを示す。ばらつきの小さいAの方がBより技術力が高いといえる。

ゲート電極のエッチング技術が高いということは、単に微細な寸法の加工ができるというだけでなく、上記のような複数の特性を総合して技術力の高低が決まる。また、技術開発力が高いということは、高いエッチング技術を独自に開発できること、さらには、その加工限界を更新できることを意味する。

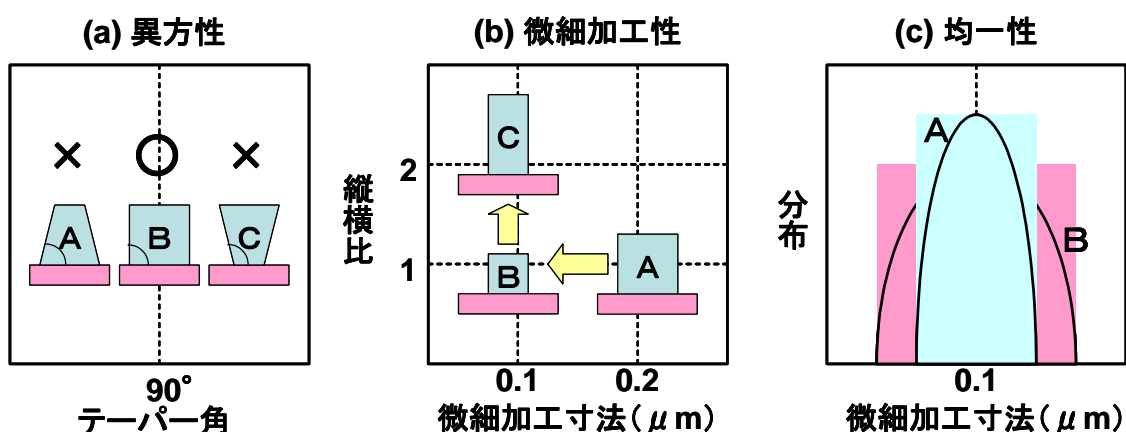


図2. 高いエッチング技術力とは？

②インテグレーション技術

上記要素技術を組み合わせて、半導体デバイスをシリコンウエハ上に形成するための工程フローを構築する技術をインテグレーション技術と呼ぶ。例えば、DRAM では、500 工程に及ぶフローを構築する。その際、半導体デバイスの電流電圧特性、動作速度、消費電力性などの性能において、目標スペックを実現することが重要となる。

では、高いインテグレーション技術とは何か？ 工程フローを構築する際、より高性能な半導体デバイスを実現できる方が、技術力が高いといえる。また、コスト競争力の点からは、同じ性能の半導体デバイスで考えた場合、なるべく短期間で工程フローを構築できる方が、技術力が高い。同じように、なるべく少ないマスク枚数および少ない工程数によりフローを構築できる方が、技術力が高い。

このように、インテグレーション技術力に関しては、性能とコストに関する二つの評価軸がある。

③生産技術

インテグレーション技術によって構築した工程フローに従って、シリコンウエハ上に、目標とする品質の半導体デバイスを作りこみ量産する技術を生産技術と呼ぶ。生産技

術においては、品質と歩留りが重要な意味を持つ。

まず、ここでいう品質には、性能、信頼性および均質性の三要素が含まれている。性能とは、集積度、電流電圧特性、動作速度、消費電力性など半導体デバイスの特性を意味する。これらは、インテグレーション技術により工程フローが構築された時点でほぼ決定される。信頼性は、製品出荷時の不良率と長期保証性が評価の基準となる。長期保証性にはインテグレーション技術も関係しているが、信頼性の良し悪しを決めるのは基本的に生産技術力である。均質性とは、性能と信頼性のばらつきが小さい半導体デバイスを生産する能力である。均質性には要素技術力および生産技術力が大きく影響する。

一方、歩留りとは、シリコンウエハ上に作りこんだ半導体デバイスの完成品に占める良品の割合のことである。半導体デバイスは直径数20~30cmの円形のシリコンウエハ上に数百個単位で作られる。しかし、数百に渡る工程を経る際、装置から発生するパーティクルやプロセスマージン[17]の小さい工程が存在するために、欠陥などの不良が生じる。その結果、一枚のシリコンウエハ上に作りこまれたすべての半導体デバイスが正常に動作するとは限らない。そのため、歩留まりという概念が必要になってくる。

では、高い生産技術とはどのようなものか？ まず、より高い性能と信頼性を持つ半導体デバイスを均質に量産できること、すなわち一言でいえば高品質な半導体デバイスを生産できる工場は技術力が高いといえる。たとえば、図3に示したように、ある品質について、Bの分布を作る生産技術は、AやCよりも技術力が高い。

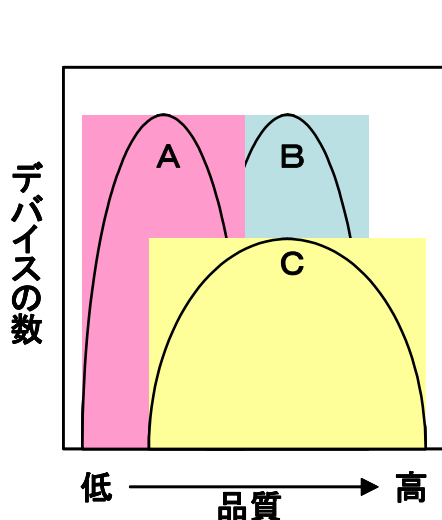


図3. 技術力と品質の関係

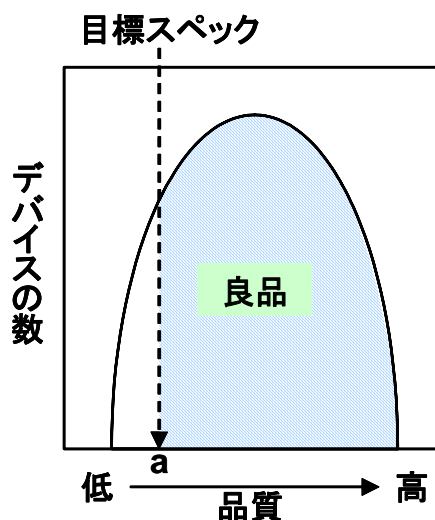


図4. 品質と歩留りの関係

また通常、量産初期段階では、歩留まりが低い。これは、最初の工程フローには、プロセスマージンが小さい工程やパーティクル発生数の多い工程が、数多く存在するからである。そこで、量産工場では、問題工程をいち早く見つけ、その工程を改善することによって、速やかに歩留りを上げる必要がある。従って、前掲図1の③に示したように、高い歩留りを実現すること、なるべく短期間で高歩留りを実現すること、および高

歩留りを安定して維持することが、技術力の高さを示す。高い歩留りは、相対的に半導体デバイスの原価を下げる。従って、技術力はコスト競争力と無縁ではないことがわかる。つまり、高歩留りを実現する技術が高いほど、相対的に半導体デバイスの原価を下げるができるために、高いコスト競争力が得られる。

以上から、インテグレーション技術力と同様に生産技術力にも、品質とコストに関する二つの評価軸があることがわかる。

ここで、品質と歩留りの関係を、図 4 を用いて明らかにしておく。一枚のシリコンウエハ上において、性能や信頼性などの品質はこの図のように分布を持つ。この品質に関する目標スペックが値 a にあるとすると、値 a 以上は全て良品となる。これを半導体デバイス全数で割った値が歩留りとなる。従って、目標スペックを値 a より高く設定すれば、良品の数は減少し、その結果歩留りは低下することになる。すなわち、同じ品質分布であっても、目標スペックの設定如何によって歩留りは変動する。このため、高い歩留りが得られているから、その半導体デバイスは高品質であるとは言えない。品質と歩留りは全く異なる指標であることを確認しておく。

4. 技術力から見た現在の日本半導体産業

4.1 技術力の調査方法

次に、前節で定義した三段階の技術およびその技術力を測る指標を用いて、日本半導体産業の技術に関する国際競争力を検討してみたい。技術に関する国際競争力を調査する最も有効な方法は、複数の半導体メーカーをベンチマークすることである。しかし、半導体メーカーは秘密主義を取っている会社が多く、ベンチマークを行うことが難しい。そこで、以下の調査を行うことにより、日本半導体メーカーと、アジア諸国の半導体メーカーとの技術力の比較を行った。調査方法の概略を以下に記す。

(1) 装置メーカーの技術者への聞き取り調査

装置メーカーは、世界中の半導体メーカーに装置を納入している。装置メーカーの技術者は、装置を据え付け、プロセスを立ち上げる際、半導体メーカーの技術者とやり取りをする。その際、装置メーカーの技術者は、半導体メーカーの技術力を肌で感じることができる。したがって、装置メーカーの技術者は、その装置に関する要素技術について、日本と諸外国の半導体メーカーを比較することができる。このような技術者を聞き取り調査した。

(2) ファウンドリーメーカーに生産委託している日本半導体メーカーの技術者への聞き取り調査

ファウンドリーとは、設計は行わず、半導体デバイスの生産だけを請け負う半導体メーカーである。台湾や中国に多く存在する。日本の半導体メーカーがこのファウンドリーに生産委託をするケースがある。その際、日本半導体メーカーが構築した工程フロ

一を、ファウンドリーメーカーに移管して、半導体デバイスを生産する。その際、日本半導体メーカーの技術者は、自社とファウンドリーメーカーの技術力を比較することができる。このような技術者を聞き取り調査した。

(3) 日本半導体メーカーから諸外国の半導体メーカーへ転職した技術者などへの聞き取り調査

日本半導体メーカーから、諸外国の半導体メーカーに転職した技術者は、退職した日本半導体メーカーと、転職先の半導体メーカーの技術力を比較することができる。このような技術者を聞き取り調査した。

4.2 調査結果

上記に示した三種類の調査により得られた結果を以下に示す。

①要素技術

あるドライエッチング装置メーカーの技術者によれば、「日本の微細加工技術力およびその開発力は諸外国よりも高い」[18]。また、台湾のファウンドリーメーカーに生産委託している日本半導体メーカーの技術者[19]、日本からアジアの半導体メーカーに転職した技術者[20]も「日本の要素技術力および要素技術開発力は高い」という。特に、「ある日本の半導体メーカーの微細加工技術は抜群に優れている」[19]という。その一つの要因として、「日本だけが装置を特注する」傾向があることが窺えた[18]。すなわち、この日本半導体メーカーは、装置メーカーが提供する標準装置の性能では満足できず、更に高い性能を求めめるため、装置の特注を要求すると思われる。

また、「台湾のファウンドリーメーカーは要素技術を装置メーカーに依存」[19]しており、アジアの半導体メーカーは、「新技術を創出することができない」[20]ということからも、日本の要素技術力およびその開発力は相対的に高いといえる。

しかし、装置メーカーの技術者によれば、「日本の要素技術力およびその開発力は過剰気味である」[18]という。このように評価できるのは、「他国の半導体メーカーは、特注などせず、標準装置を用いて、同じような半導体デバイスを生産している」[18]ためである。また、抜群の微細加工技術を有していないアジアの半導体メーカーも、標準装置を用いて日本半導体メーカーと「同じ集積度および最小線幅の半導体デバイスを生産している」[19]ということにも基づいている。

②インテグレーション技術

ある半導体メーカーの技術者によれば、「高性能な半導体デバイスを作るためのインテグレーションについては、日本の技術力は高い」という[21]。しかし、「目標スペック以上のトランジスタを作ろうとする」[21]などの傾向があることから、要素技術と同様、過剰性能を目指している可能性が高い。

一方、低コストで半導体デバイスを作るためのインテグレーション技術力は低い。その理由は以下の発言から窺える。台湾のファウンドリーメーカーに生産委託している日本半導体メーカーの技術者によれば、日本で構築して移管した工程フローについて、ファウンドリーの技術者から「工程フローが長すぎる。これではペイしない」と言われ、2/3の長さに削減されてしまったという[19]。「デバイスが動作しないのではないか？」と不安だったが、動作に問題は無く、歩留りも上がり、ビジネスも好調に推移しているとのことである[19]。また、日本はアジアに比べて、「マスク枚数も工程数も多い」[21]ことから、コスト競争力に問題があることがわかる。

③生産技術力

高品質な半導体デバイスに関する生産技術力は高いと思われる。その理由は以下の事例から窺える。アジアに進出した日本半導体メーカーの DRAM 量産工場の技術者によれば、「現在、10年以上保証できる DRAM を生産できるのは、当工場だけだ」という[22]。10年以上保証できる高品質 DRAM を海外の工場で量産できる生産技術力は高いといえる。しかし、DRAM の主要な用途が PC であることを考えると、これは過剰品質と言わざるを得ない。なぜなら、PC には 10 年保証などの高品質 DRAM は必要ないからである。

一方、日本は、コスト競争力に優れた生産技術力は低い。その理由の一つは、台湾と比較すると「歩留りの立ち上がり速度が遅い」[21]からである。その上、日本半導体メーカーは「装置のスループットが悪いため、装置台数が多い」という[21]。また、日本半導体メーカーが歩留りとともに、あるいは歩留り以上に高品質にこだわりがあるのに対して、アジアのある半導体メーカーは、「歩留まり向上」への取り組みが徹底している[20]。それは、新しい半導体デバイスを開発する際、「日本は新技術を導入したがる」傾向があるのに対して、このアジアの半導体メーカーは「歩留りを向上させる可能性が無いなら新技術は導入しない」ことから窺える[20]。そのため極力、「装置を変えない、プロセスを変えない、工程を変えない」ことに徹する[20]。例えば、KrF[23]によるリソグラフィを延命に延命を重ね、設計ルール 100nm 以下の半導体デバイスを生産しているという[20]。他社は 130nm 世代から、新しいリソグラフィ技術 ArF[23]に切り替えている。ここまでいくと、「このアジアの半導体メーカーの既存装置を延命し使いこなす技術は高度である」という[20]。

4.3 仮説

以上のように、断片的な調査ではあるが、三段階の技術に関して、日本半導体産業の技術力を分析した。その結果、次の仮説を提示する。

日本半導体産業の要素技術力およびその開発力は高い。また、高品質な半導体デバイスを作るためのインテグレーション技術力および生産技術力も高い。しかし、要素技術は過剰な技術力であり、高いインテグレーション技術力と生産技術力によって作

られる半導体デバイスは過剰品質となっている。

一方、コスト競争力の点から言えば、要素技術、インテグレーション技術、および生産技術の全てに大きな問題があるといわざるを得ない。装置は特注し、スループットが悪いため装置台数は多い。その上、マスク枚数および工程数が多く、アジア諸国ほど、歩留まり向上が徹底されていない。

この仮説に基づけば、藤村が日本半導体産業の国際競争力低下の原因として主張した要素技術開発力およびインテグレーション技術力の低下は、実際には起きていないと考えられる。むしろ、アジア諸国に対する日本のそれらの技術力はどちらも「過剰」なほど高いと評価することができる。

要するに、技術を切り口としてみた日本半導体産業の問題点は、要素技術、インテグレーション技術および生産技術の全てにおいて、高品質な半導体デバイスを作るための技術力には優れているものの、安く作るための技術力が劣っているところにあるといえる。一言でいえば、日本半導体産業は技術の的を外したといえる。

5. 技術力から見た DRAM の歴史

前節では、技術力から見た日本半導体産業の現在の状況を論じた。その結果、過剰な要素技術と、高いインテグレーション技術および生産技術を用いて、過剰品質の半導体デバイスを生産していることが示唆された。では、このような技術文化は、いつ、どのようにして形成されたのだろうか？

そこで、この節では、技術力の点から DRAM の歴史を振り返ってみる。その結果、現在の日本に見られる技術文化は、25 年以上も前に形成されたことを示す。更に、そのようにして形成された技術文化により、1980 年代に DRAM のシェアで世界一になったが、1990 年代には、まさにその技術文化のために国際競争力を失っていったことを明らかにする。

5.1 1970 年～1980 年代の DRAM の歴史

(1) 1980 年代の DRAM における競争力の源泉

1971 年にインテルが 1K ビット DRAM を発明したことから DRAM の歴史は始まった。図 5 に示したように、1970 年代は、DRAM を生み出した米国がシェア 1 位を占めた。日本は、大手家電メーカーが揃って DRAM に注力し、次第にシェアを増大させた。1980 年代中旬には、米国を抜いてシェア一位となった。

このとき、DRAM の競争力の源泉は、高品質にあった[24]。また、吉岡英美によれば、日本が米国を抜き去る過程は、次のように分析されている[25]。図 6 に示した日本のコンピュータ出荷額の推移[26]を見ると、1970 年代から 1980 年代にかけて、大型コンピュータの出荷額が増大する。これに伴って、日本の DRAM シェアも増加し、1980 年には米国を抜き去る。更に、1980 年代中旬には、シェア 80% を占めるに至る。つまり、日本は、大型コンピュータ用 DRAM の生産でシェア世界一になった。

このとき、大型コンピュータメーカーが DRAM メーカーに要求したのは、高品質な DRAM であった。特に信頼性については要求が厳しく、「25 年保証を要求された」[27] という。この要求には、電話の交換機用の DRAM に長期保証を必要とした電電公社（現・NTT）も影響を与えたといわれる[28]。日本半導体メーカーは、このような厳しい信頼性を実現する高品質 DRAM の生産に無類の強みを発揮し、シェアで米国を抜き去ったのである。

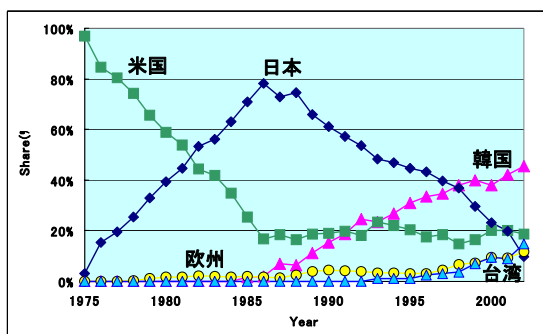


図5. DRAMの国別シェア

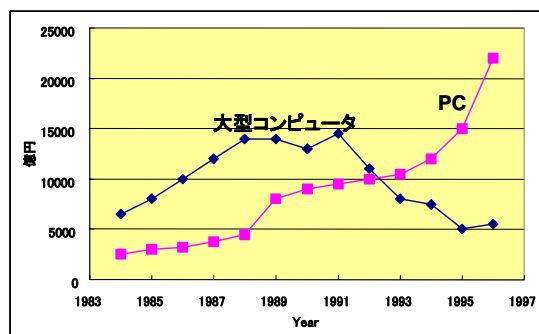


図6. 日本のコンピュータ出荷額

(2) 高品質 DRAM を生み出す技術力

では、25 年の長期保証を実現する高品質 DRAM を生み出した技術力とは、どのようなものであったのだろうか？ それは、極限性能を追求する微細加工技術と、高品質を迫及する技術であるといえる。そして、このような技術文化が日本半導体メーカーに形成され定着し、現在の過剰技術および過剰品質に繋がったと考えられる。以下にその詳細を述べる。

① 極限性能を追求する微細加工技術

半導体デバイスは、3 年毎に 4 倍の割合で集積度を増大させてきた。これをムーアの法則と呼ぶ。一方、集積度の増大とともに、3 年毎に 0.7 倍の速度で微細化が進んだ。スケールリング則に従って微細化すれば、集積度が増大するだけでなく、高速化と低消費電力化も実現できる。すなわち、微細化するだけで高性能になる。そのため、DRAM を始めとする半導体デバイスは、常に微細化を推進し続けてきたのである。

微細化の推進において、半導体メーカーが直面した最大の問題は、微細加工性と均一性の確保であった。より微細な加工を実現すれば高性能な DRAM ができる。均一性の良い微細加工ができれば、再現性よく均質に高性能な DRAM を生産できる。しかし、1970 年代初期に用いられていた密着露光方式[29]によるリソグラフィ技術や等方的なウェットエッチング技術[30]では、微細化と均一性の向上が困難であった。

この問題に対処するために、日本半導体メーカーは、微細加工技術における革新的な装置を創出した。まず、第一に、縮小露光投影方式[29]を実用化したステツパを

ニコンおよびキャノンなどが 1970 年代後半に開発した[31]。このステップを用いることにより、微細で均一性と再現性の良いレジストマスクの形成が可能になった。

第二に、ドライエッチング装置[30]の実用化が挙げられる。1970 年代後半から 1980 年初頭にかけて、NEC の系列会社・日電アネルバ、東芝と徳田製作所、および日立製作所などが、次々と、リアクティブエッチング (RIE) と呼ばれるドライエッチング装置を開発した[32]。この RIE により、ウェットエッチングでは不可能だった異方性加工が、これらの装置を用いることにより可能になった。

これらの技術革新により、日本半導体メーカーは、微細加工性と均一性の確保を同時に手に入れた。日本半導体メーカーの微細加工技術者は、常に装置の極限性能を引き出そうとした。その性能に満足できなくなると、自ら新装置を開発した。また、半導体メーカーと装置メーカーが共同で新装置を開発することも珍しくなかった。

②高品質を追及するインテグレーション技術と生産技術

高性能で信頼性の高い DRAM を形成するためには、工程フローにもたくさんの工夫を盛り込む必要があった。高性能なトランジスタを実現するための新構造、薄膜の欠陥や荷電粒子による電氣的ダメージを低減するための熱処理工程、および欠陥や寸法などの検査工程などがふんだんに取り入れられた。その結果、マスク枚数や工程数は増大して行った。しかし、1970 年代後半から 1980 年代において、これらは、高品質 DRAM の工程フローを構築するために必要不可欠なことであった。

量産工場においては、極限性能を追及した装置を使い、高性能を実現するための工夫を盛り込んだ工程フローに従って、高品質な DRAM の大量生産を目指した。生産ラインの技術者は、技術革新によって登場した新しい装置を、次々と使いこなした。また、パーティクルの低減やプロセスマージンの拡大と併せて、ここでも各工程の極限性能が徹底的に追求された。

このようにして、25 年保証の高品質 DRAM の量産に一旦成功すると、それが次世代以降の基準となった。つまり、高品質 DRAM を生産することが当たり前のことになり、更に、より高い品質を目指すことになった。前世代の製品より、品質で劣る DRAM を生産することなど、あり得ないことであった。

③技術文化の形成と定着

以上のようにして、1970 年代後半から 1980 年代にかけて、要素技術の極限性能を追求し、高品質 DRAM を生産する技術文化は形成されていったものと考えられる。また、このような技術文化は、日本半導体メーカーの競争力の源泉であった。ユーザーから高品質 DRAM を要求されていたため、ビジネスの点から言っても理にかなったことであり、必要不可欠なことであった。その結果、日本半導体メーカーの技術者が要素技術の極限性能を追求し、高品質 DRAM の生産を目指す技術文化は、ごく常識的なこととして定着していったものと考えられることができる。

つまり、現在の過剰技術と過剰品質の半導体デバイスを生産する技術文化は、今から 25 年以上も前に形成されたのである。そして、このような技術文化が定着した日本半導体産業は、低コスト DRAM を大量生産することにより韓国や台湾が台頭してくる 1990 年代を迎えて、どのような対応をしたのだろうか？

5.2 1990 年代の DRAM の歴史

(1) 1990 年代の DRAM の競争力の源泉

1990 年代に入ると、まず、コンピュータの世界に変化が起きたことが前掲図6から読み取れる。大型コンピュータの出荷額が低下する一方で、パーソナルコンピュータ(PC)の出荷額が急激に増大する。

この動きにあわせて、DRAM の国別シェアにも変化が起きる。1980 年代中旬にシェア世界一を誇った日本は、大型コンピュータの出荷額が低下するにつれて、徐々にシェアを低下させる。一方、韓国は、PC 出荷額が急増するのに伴って、確実にシェアを増大して行き、1998 年に日本を抜いてシェア世界一になった。

吉岡によれば、韓国のキャッチアップは次のように説明される[33]。コンピュータの世界市場における製品構成の変化は、DRAM 需要の変化を引き起こした。つまり、DRAM の主な消費先が、大型コンピュータから PC へとシフトした。この PC 用の DRAM を大量生産することによって、韓国は日本を逆転しシェア世界一となった。また、DRAM メーカーがマイクロテクノロジー社となった米国も、2000 年にはシェアで日本を抜き去った。

このとき、PC 用の DRAM に要求されたのは、低コストと数(規模)であった。PC 用 DRAM には、25 年保証のような高品質は必要無い。PC 用 DRAM の競争力の源泉となったのは、低コストであったと言える。これに基づき、韓国および米国マイクロテクノロジーは、安価な DRAM を大量生産することによってシェアで日本を抜き去った。

(2) 低コスト DRAM を生み出す技術

それでは、安く大量生産する技術力とはどのようなものであろうか？ 一言でいえば、要素技術、インテグレーション技術および生産技術の全てにおいて、コスト競争力に優れた技術力を目指すことである。

まず、要素技術は、装置メーカーからプロセス付きの標準装置を購入することにより入手するという方法を取ることができる。これによって、開発にかかるコスト、工数および時間を削減できる。また、既存技術と装置を極力延命することに注力する。この延命に高い技術力を追求する。

次に、インテグレーション技術においては、適正性能の半導体デバイスを実現する工程フローを短期間で構築することである。また、マスク枚数と工程数を極力減らす。デバイス構造をなるべく単純にし、ダメージ低減や検査工程を可能な限り削減する。例えば、米国のマイクロテクノロジーは、日本半導体メーカーの 2/3 のマスク枚数で

DRAM の工程フローを構築し、大幅なコスト削減を実現した[34]。

量産工場においては、最低限の目標品質を満たした上で、速やかに高歩留りを実現し、それを維持することを徹底する。そのためには、各装置のスループットを向上させ、プロセスマージンを拡大し、パーティクルの発生を極力防止することに注力する。

極限性能を追求する要素技術や高品質 DRAM を生産する技術と違って、このようにコスト低減を目指した技術というのは、地味で泥臭いイメージがある。しかし、これも一つの重要で高度な技術である。米国マイクロテクノロジーが 2/3 のマスク枚数で DRAM を生産した事を聞いて、これに挑戦した日本半導体メーカーもあったが、「やってみただけできなかった」[27]という。つまり、2/3 のマスク枚数で DRAM を生産する技術力は、すぐには真似ができないほど高度であるといえる。

韓国の DRAM メーカー、米国マイクロテクノロジーおよび台湾のファウンドリーメーカーは、基本的には、上記のような技術を追求することによって、コスト競争力を向上させたといえる。

5.3 技術力から見た日本半導体産業の国際競争力低下の原因

低コストが DRAM の競争力の源泉となったとき、日本半導体メーカーは、どのような対応をしたのであろうか？ DRAM 需要の変化が起きたことは日本半導体メーカーも気付いたはずである。しかし、結果的にみれば、日本は、25 年前に形成された技術文化を変えることができなかったのである。要するに、1980 年代と変わらず、過剰な要素技術を使って過剰品質の DRAM を生産し続けたのである。3.2 節の調査結果で明らかになったように、その技術文化は、現在においても日本半導体メーカーに浸透している。その結果、日本半導体産業は、コスト競争力で敗退し、DRAM から撤退することになったのである。

5.4 日本半導体産業の誤謬

PC用 DRAM を安く大量生産する韓国にシェアで抜かれた日本半導体産業の言い分は、第二節で見たように、「経営、戦略、コスト競争力で負けた」、「技術では負けていなかった」という二言に集約された。

「技術では負けていなかった」という評価は、ある意味では正しい。なぜならば、高品質 DRAM を生産する技術では、確かに韓国や米国に負けていなかったからである。また、微細加工技術などの要素技術に関しては、高い技術力と開発力を有していたことからそのような評価できる。つまり、高品質 DRAM における過去の成功体験と、昔も今も優れた要素技術力を有していることが、日本半導体産業が「技術では負けていなかった」と主張する背景にあると推察される。

しかし、「技術では負けていなかった」という日本の思い込みは、日本半導体産業を窮地に追い込む原因になった。それは、1990 年以降、高い要素技術力も、高品質 DRAM を生産する技術も、需要の大半を占めるようになった PC 用 DRAM の競争力と

はなり得なくなったからである。むしろ、コスト競争力が重要な PC 用 DRAM にとっては、過剰技術と過剰品質は、競争力にマイナスの作用を及ぼす。つまり、1990 年以降、日本半導体メーカーは技術的をはずし続けているのである。ここに、日本半導体産業の第一の誤謬がある。

第二の誤謬は、もう一つの言い分「経営、戦略、コスト競争力で負けた」という見解の中にある。日本半導体産業は、「コスト競争力」はもっぱら規模の経済とそれを実現するための投資に起因するものと考えており、技術とは関係の無い要素と認識している。しかし、これまでに説明してきたように、半導体生産に関する技術もコスト競争力に大きく影響している。すなわち、低コスト DRAM を生産するための特徴的な技術が確かに存在するのである。それは、既存装置を延命する要素技術であり、少ないマスク枚数と工程数で短期間にフローを構築するインテグレーション技術であり、速やかに高歩留りを実現する生産技術である。これらの技術は、日本が得意とする高品質 DRAM を生産する技術とは全く質が異なる。従って、日本半導体産業は、低コスト DRAM を生産する技術力で、韓国や米国マイクロテクノロジーに敗北したのである。

6. むすび

本稿では、半導体生産に関する技術を、要素技術、インテグレーション技術、および生産技術の三段階に分けて定義し、これら技術を切り口として、日本半導体産業の現在と過去の技術力を論じた。ここまでの分析結果は以下の通りである。

現在の日本半導体産業の技術力に関して、以下の仮説を提示した。日本は、過剰な要素技術を使い、高いインテグレーション技術力と生産技術力により、過剰品質の半導体デバイスを生産している。また、日本は、要素技術、インテグレーション技術および生産技術の全てにおいて、安く作るための技術力が劣っている。すなわち、日本半導体産業は、技術的を外したために、国際競争力を失ったことを論じた。

1970 年から 1980 年にかけて、要素技術の極限性能を追求し、高品質 DRAM を生産する文化が日本に形成された。これが現在の過剰な要素技術と過剰品質に繋がっている。この技術文化により、1980 年代に高品質 DRAM を生産した日本はシェア世界一になった。しかし、1990 年代には、DRAM の需要が大型コンピュータから PC に変化しているにもかかわらず、日本半導体メーカーは、この動きにあわせて技術文化を変えることができなかった。その結果、低コスト DRAM を大量生産する韓国などに敗北した。このような技術の問題も、日本半導体産業が国際競争力を低下させた大きな原因の一つと考えることができよう。

注および参考文献

- [1] 藤村修三(2000)「半導体立国ふたたび」日刊工業新聞社。
- [2] 三段階の技術の定義と詳細については第三節で論じる。
- [3] 吉岡英美(2004)「DRAM 市場における三星電子のキャッチアップに関する一考察－DRAM 需要特性の変化の視点から－」韓国経済研究、Vol.4、pp.21-44。
- [4] 正式名称は、(株)半導体先端テクノロジーズ。英語名は、Semiconductor Leading Edge Technologiesで、Seleteまたはセリートと略す。セリートは日本半導体メーカー10社以上が参画して作られたコンソーシアムであり、次世代トランジスタ、配線およびリソグラフィなどの微細加工技術に関する要素技術およびモジュール技術の研究開発を行っている。セリートの技術者は、各半導体メーカーの開発センターや量産工場などから出向している。
- [5] 2004年9月に半導体先端テクノロジーズの元取締役第一研究部長・有門経敏氏と筆者の共同により行ったアンケート調査結果による。
- [6] 2004年9月に著者が行ったセリート技術者5人へのインタビューによる。
- [7] 半導体産業研究所は、富士通、松下電器産業、NECエレクトロニクス、沖電気工業、ルネサステクノロジー、ローム、三洋電機、シャープ、ソニーおよび東芝の10社を会員として、1995年に設立された。英語名は、Semiconductor Industry Research Institute Japanで、SIRIJと略す。設立の趣意は、「日本半導体産業を活性化し産業の国際競争力を向上させ、併せて半導体の持つ多くの可能性へ挑戦することを目指し、各種ビジョンと実行プランを策定する」と書かれている。会員会社からの出向社員で構成され、必要に応じて半導体業界や関連業界の有識者からなる研究会を組織し、調査・情報収集・分析活動を行う事になっている。
- [8] 独立行政法人産業総合研究所の吉川弘之理事長を議長とし、富士通・秋草直之社長、東北大学・大見忠弘教授、東芝・大山昌伸常任顧問、慶應義塾大学・榊原清則教授、日本電気・佐々木元会長、産業技術総合研究所・中島一郎理事、三菱電機・長澤紘一専務、日立製作所・長谷川邦夫専務、および次世代半導体研究センター・廣瀬全孝研究センター長を委員として組織された。
- [9] 伊丹敬之(1995)「日本半導体産業 なぜ三つの逆転は起こったか」NTT出版株式会社。
- [10] 大矢根聡(2002)「日米韓半導体摩擦 通商交渉の政治経済学」有信堂。
- [11] 川西剛(1997)「わが半導体経営哲学」工業調査会。
- [12] 前掲書[1]、236頁。
- [13] 前掲書[1]、237頁。
- [14] 前掲書[1]、151頁。
- [15] 前掲書[1]、48頁。
- [16] 前掲書[1]、161頁。
- [17] プロセスマージンとは、プロセスの余裕度のようなもの。ぎりぎり実現できるようなき

わどい状況で半導体デバイスを生産すると、何らかの理由でプロセス特性が少し揺らいただけで不良の山ができる。インテグレーションしたばかりの工程フローには、このような余裕度の小さな工程が多数潜んでいる。量産工場では、このような工程を見つけ出し、多少プロセス特性が揺らいでも不良にならないように、プロセス条件を変更したり、デバイス構造を改善したり対策をする。

[18] 2004年5月4日に著者が行ったドライエッチング装置メーカーの技術者へのインタビューによる。

[19] 2004年4月27日に著者が行ったある日本半導体メーカーの技術者2人へのインタビューによる。この半導体メーカーはファウンドリーに生産委託をしている。

[20] 2004年7月10日に著者および吉岡英美が行ったある日本半導体メーカーからあるアジアの半導体メーカーへ転職した技術者へのインタビューによる。

[21] 2004年4月19日に著者が行ったある日本半導体メーカーの技術者へのインタビューによる。この半導体メーカーはファウンドリーに生産委託をしている。

[22] 2004年1月28日に著者が行ったある日本半導体メーカーの東南アジアにあるDRAM工場の技術者へのインタビューによる。

[23] 光を用いたリソグラフィ技術においては、形成できるレジストマスクの最小線幅が、光の波長に比例している。従って、波長の小さな光を使うほど、微細なレジストマスクを形成できる。光の波長は、超高压水銀灯のg線(436nm)、i線(365nm)、krF(248nm)、ArF(193nm)へと転換してきた。大雑把に言うと、波長の約半分程度の改造が可能のため、130nm世代まではKrFが使われ、100nm世代からはArFを用いるところが多い。

[24] 野中郁次郎、永田晃也(1995)「日本型イノベーション・システム -成長の軌跡と変革への挑戦-」白桃書房、第5章 米山茂美、野中郁次郎「集合革新のダイナミクス-半導体産業におけるDRAM開発の研究事例-」。

[25] 前掲書[3]。

[26] 前掲書[3]、30頁。

[27] 2004年8月19日に筆者および吉岡英美が行った元日立製作所・半導体事業部・本部長へのインタビュー結果による。

[28] 前掲書[24]、211頁。

[29] 密着露光とは、予め焼き付けるべきパターンを形成しておいたフォトマスクにウエハを密着させ、光を当てて、写真のようにパターンを転写する方式である。この方法では、マスクとウエハが露光ごとに接触するため、マスクが消耗し欠陥が生じて歩留りが低下する問題があった。また、フォトマスクに開口したサイズより微細なレジストマスクは、原理的に形成できない。このような問題を解決したのが、フォトマスクとウエハの間に距離をとって露光する縮小投影露光である。これらの詳細については、例えば、岡崎信次・鈴木章義・上野巧著(2003)「はじめての半導体リソグラフィ技術」工業調査会、などを参照されたい。

[30] 当初、半導体の加工は、薬液を用いたウェットエッチングが主流であった。例え

ば、シリコンは KOH 溶液で、酸化シリコンはフッ酸溶液を用いてエッチングしていた。しかし、ウェットエッチングでは、加工があらゆる方向(これを等方性という)に進む。そのため、レジストマスクの下にエッチング溶液が回りこみ、アンダーカットが生じる。その結果、パタンの側壁は斜めになる。1K~4K ビット DRAM における 10 ミクロン以上の加工には問題にならなかったが、16K ビット以降に、5ミクロン以下の微細加工が要求されると、まっすぐ加工する異方性加工が必要不可欠となった。これを解決したのが、リアクティブイオンエッチング(RIE)と呼ばれるドライエッチング技術であった。この詳細については、徳山著(1992 年)「半導体ドライエッチング技術」産業図書、などを参照されたい。

[31] 垂井康夫監修(1991)「半導体立国日本 独創的な装置が築き上げた記録」日刊工業新聞社、第 4 章。

[32] 前掲書[31]、第 5 章。

[33] 前掲書[25]。

[34] 金澤洋平(2000)「わが国半導体産業のめざすべきところ ―台湾、韓国等との比較の下で」財団法人機会振興協会。