

台湾における半導体産業の一考察

—ファウンドリーと汎用メモリビジネスの形成—

陳 禮 俊

目 次

1. はじめに
2. 台湾の半導体産業
 - 2-1 台湾半導体産業の規模
 - 2-2 台湾半導体産業の構造
 - 2-3 ファウンドリーと汎用メモリビジネス
3. 学習効果
 - 3-1 半導体産業の学習効果
 - 3-2 半導体産業の集積の経済
4. 台湾半導体産業の展望
 - 4-1 シリコンサイクル
 - 4-2 台湾中部大地震の影響
 - 4-3 積極的な設備投資
5. 終わりに

1. はじめに

産業革命以降、工業先進諸国は圧倒的な科学技術の優位性を背景にして、産業に技術革新を取込み、長期的に国際政治・経済の発展を支配してきた。特に1947年12月、トランジスタが発明された頃から、現在に至るまで、「産業の米」と呼ばれる半導体産業は、世界的にエレクトロニクス産業の基盤産業

として、「戦略的産業 (strategic industry)」と位置付けながら、目覚ましい発展をなし遂げた。しかしながら、厳しい市場競争の結果として、従来、米国と日本が支配してきた半導体産業では、1980年代の後半から、変化の兆しが見えてきた。つまり、台湾及び韓国など、アジア系の半導体メーカーの新規参入により、メモリチップ (memory chip) の分野で、驚異的躍進を遂げると共に、台湾メーカーにおけるファウンドリービジネス (foundry business) の展開は、独自のビジネス形態を形成しながら、半導体市場に大きなインパクトを与え、新たな変化をもたらした¹⁾。

半導体産業の研究は、1970年代後半、日米半導体摩擦の激化に連れて、その関心が高まりつつある。製造技術、応用範疇のみならず、産業政策、経営管理及び環境安全問題など、様々な角度から議論されている。特に、半導体産業の特徴の一つは、製造技術の進歩が極めて重要な役割を果たしていることがしばしば指摘されているが、技術進歩の要素を内生変数 (endogenous variable) として取扱う場合、その試みの一つとして、K. J. アローは、技術進歩を過去に累積された粗投資 (gross investment) の関数として定式化することで、学習効果 (learning effect) の概念を経済成長モデルに導入した。

Webbink (1977), Dick (1991) 及び Irwin and Klenow (1994) などは、学習曲線 (learning curve) 仮説の実証研究を行う際、半導体産業は最も良い研究対象の一つであることを指摘したが、半導体製造における学習効果の重要性が強調されつつにもかかわらず、そのメカニズムと特徴についての説明は、未だ不十分であると言わざるを得ない²⁾。Gruber (1995) は、DRAMと

1) 例えば、日本の半導体産業は主力とするDRAM (記憶保持動作が必要な随時書き込み読み出しメモリー) 分野での韓国、台湾メーカーの追い上げにより、収益力が急速に衰えている。

2) Webbink, D. W. (1977) "The semiconductor industry: a survey of structure, conduct, and performance", Staff Report to the FTC, US Government Printing Office, Washington, DC.

Dick, A. R. (1991) "Learning by doing and dumping in the semiconductor industry", Journal of Law & Economics 34, P. 133-P. 159

Irwin, D. A. and P. J. Klenow (1994) "Learning-by-doing spillovers in the semiconductor industry", Journal of Political Economy 102, P. 1200-P. 1227

EPROMなど、二つ異なる性質を持つメモリチップを用いて、半導体産業の学習曲線及び市場構造の原動力 (dynamics of market structure) について、実証研究を行った結果、集積市場の原動力 (aggregate market dynamics) を決定する際、EPROMのみが学習曲線の存在を認めるのに対して、DRAMが、むしろ規模の経済 (economies of scale) の効果が比較的顕著であることを検証した³⁾。このことは、半導体市場では、市場構造の原動力と公共政策など、二つの要素は深く関連していることを意味している⁴⁾。そのほか、Dick (1992)は、日米半導体摩擦問題に関して、(1)製品サイクルの早期段階から、急激な値下がり、(2)製品の連続的サイクルに伴って、日本製品の市場浸透率が上昇しつつあること、(3)日本の半導体メーカーは、長期的に渡って、コスト以下の市場価格で、製品を販売し続けていることなど、DRAM市場の特徴を指摘しながら、日本メーカーのダンピング (dumping) 行為を訴えていた。

日米半導体摩擦問題は、1996年、第2次「日米半導体協定 (United States-Japan Semiconductor Agreement)」の失効及び「日米半導体民間合意 (United States-Japan Nonofficial Semiconductor Agreement)」の成立

3) DRAM (dynamic random access memory) とは、リフレッシュ動作を必要とするRAMのことで、情報の記憶を容量 (capacity) への電荷の有無によって行うメモリである。一方、SRAM (static random access memory) とは、リフレッシュ動作を必要としないRAMであり、メモリセル (memory cell) がフリップフロップ (flip-flop) 回路 (触発回路) で構成されており、一度書き込まれた情報は電源を切るまで消えない。SRAMは動作タイミングが容易で、リフレッシュ動作も不要なために使いやすく、高速性能も得られやすい。記憶している情報が容量のリーク電流 (leak electric current) によって、時間の経過とともに消えるために、一定時間ごとに、情報を読み出して、再度書き込みを行う必要があり、これをリフレッシュ動作という。DRAMはSRAMに比べて、メモリセルの面積が小さく実現できるので、大容量で経済的なメモリが得られる。EPROM (erasable programmable read only memory) とは、記憶内容が電氣的に書き込み可能で、紫外線に当てて消去が可能なプログラマブルROMである。プログラムの消去はICパッケージの石英ガラスを通して、外部から紫外線を照射することにより行う。

4) Gruber Harald (1996) "Trade policy and learning by doing: the case of semiconductors", Research Policy 25, P. 723-P. 739

Dick Andrew R. (1994) "Accounting for semiconductor industry dynamics", Int. J. Industrial Organization 12, P. 35-P. 51

に伴って、実際に終止符を打った⁵⁾。但し、摩擦問題を解消した要因の一つは、1990年代以降、半導体産業におけるアメリカの復活と日本の相対的衰退であることを指摘しておきたいと傍らに、台湾と韓国の半導体メーカーの市場参入は、新たな競争環境をもたらしたことも決して無視できないほど、重要な要因の一つと思われる。

1980年代後半から、本格的に世界半導体市場に躍進してきた台湾と韓国の企業、特に韓国のDRAM製品は、日米半導体協定のもとに置かれて、極めて大きな恩恵を受け、この分野の市場シェアを拡大してきた。これらの議論について、谷光 (1994, 1999) の研究は多大な示唆を与えている⁶⁾。1990年代に入って、半導体産業の動きの特色の一つは、韓国半導体メーカーの躍進である。米国メーカーが汎用メモリ (その代表的製品がDRAM) 事業を縮小、付加価値の高いMPUや専用品の拡大という戦略を採り、日本メーカーが汎用メモリで利益と技術基盤の確立を図り、徐々にMPUと専用品の比率を高めようとしているのに対し、半導体産業への参入の遅かった韓国メーカーは大胆な汎用メモリ集中戦略で進み、成果を上げてきた (谷光, 1994)⁷⁾。一方、台湾では、90年代にDRAMの製造に着手し始めたものの、韓国と比べれば依然として、その比率が低い。むしろ台湾では、ファウンドリービジネスの比重はさらに上昇する傾向にある。

半導体産業における韓国と台湾の個別及び比較研究は、近年、盛んに行われていた。朝元 (1996) は、台湾におけるコンピューター・半導体産業の展

5) 1980年代、日本の半導体産業の生産規模は、アメリカを凌いだ。その時点で、半導体摩擦問題を激しいものにした。1986年9月2日、日米半導体協定が締結され、アメリカのDRAM市場における日本製品の価格、マーケットシェアは監視下に置かれた。1996年8月1日、第2次日米半導体協定が発効し、1996年7月31日に失効したと傍らに、8月2日「日米半導体民間合意」(バンクーバー合意)が成立した(個別産業における「資本国籍主義シェア」と「政府関与」について、官民共に合意が出来ずため、民間レベルの協定に踏み切った)。

6) 谷光太郎 (1994), 『半導体産業の軌跡—日米攻防の半世紀』, 日刊工業新聞社

谷光太郎 (1999), 『半導体産業の系譜—巨大産業を築いた開拓者たち』, 日刊工業新聞社

7) 前掲書, P. 237

開について分析し、その発展要因を、(1)産業の技術水準が国際レベルに達したこと、(2)産業のインフラ整備が整えていること、及び(3)組立技術力が高いことを指摘したと傍らに、両産業の補発性 (complementary) が高いことを示しているが、コンピューター及び半導体産業は、それぞれ極めて多岐たる製造技術及び産業基盤を必要としているため、共通な発展要因があったとしても、それぞれの度合が異なるに違いない⁸⁾。Sung (1997) は政治経済学の視点から、半導体産業における政府干渉の度合を分析し、台湾のほうが韓国より、政府主導型であることを主張している⁸⁾。但し、この論点には、多大な問題が残っている。すなわち、彼は台湾の産業構造を理解していないまま、安易に中小企業の特徴及び産業全体の経営戦略を看過したことである。安部、佐藤、永野 (1999) は、(1)韓国の半導体産業の発展は台湾よりも速く、今日でも産業の規模では開きがあること、(2)産業の担い手たる企業の性格がまったく異なること、(3)製品構成が異なること、(4)韓国は一貫生産メーカーが中核となっているが、台湾には従来一貫生産メーカーが比較的少なかったことなど、韓国と台湾の半導体産業の相違点を指摘し、それを、資金制約、起業精神及び半導体産業に対する深い理解など、三つ要因で説明している⁹⁾。1997年のアジア金融危機以降、韓国と対照に、台湾半導体産業は、依然として比較的堅調な発展を示していることから、安部らの論点は適切だと思われる。青木 (1999) は、(1)分業、(2)学習効果、(3)長期的取引、及び(4)情報交換など、四つの視点に基づいて、台湾半導体産業における分業ネットワークの生成・成長の要件を検証している。台湾政府がIC産業発展のために行ったことは、市場干渉 (intervention) ではなく、カタリスト (catalyst) として、民間の持つ参入、競争、退出といった自己調整機能 (coordination) がよりよ

8) 朝元照雄 (1996), 『現代台湾経済分析—開発経済学からのアプローチ, 勁草書房, P. 101—P. 126

8) Sung Gui Hong (1997) “*The Political Economy of Industry in East Asia, The Semiconductor Industry in Taiwan and South Korea*”, Edward Elgar, Northampton, MA, USA

9) 安部誠・佐藤幸人・永野護 (1999) 「産業からのアプローチ—比較と波及の分析—」『経済危機と韓国・台湾』, アジア経済研究所, P. 57—P. 75

く働くよう、民間の制度を補完する役割を果たしているを主張している（青木，1999）¹⁰⁾。この指摘について、筆者はまったく同感である。但し，Gruberが指摘したDRAM製品における規模の経済は，韓国の汎用メモリ集中戦略の成果を評価する際，役に立つと思われているが，台湾の半導体産業をより深く理解するため，異なるアプローチで接近する必要がある。

本稿は以上の視点に基づいて，異なる角度から，台湾のファウンドリーと汎用メモリビジネスの形成過程を分析することにしたい。その目的は，台湾半導体産業の発展過程，産業構造の現状を把握することによって，その発展の成果を評価することにしたい。

2. 台湾の半導体産業

1974年にまで，台湾では，半導体産業は事実上存在していなかったが，その規模が国内総生産に占める割合は徐々に上昇しつつあるのみならず，国際市場でのシェアも着実に伸びている。

半導体産業の特徴の一つとして，研究開発費と設備投資の売上高に対する比率の高さとその絶対額の大きさである（谷光，1994）¹¹⁾。しかしながら，台湾の場合，中小企業が企業全体に占める割合が非常に高いのみならず，極めて重要な役割を果たしていることは多くの研究者によって指摘されたが，半導体産業発展の基盤としては，決して望ましい環境とは言えなかった。特に1970年代の台湾は，工業化の離陸期（take off）の初期段階にあり，農業，軽工業から重化学工業へ移行するための生産技術は勿論，工業化を推進するために必要な巨額資金さえ，外資（foreign capital）に依存する状況にあった¹²⁾。

10) 青山修二（1999）『ハイテック・ネットワーク分業 台湾半導体産業はなぜ強いのか』，白桃書房，P. 17

11) 前掲書，P. 200

12) 外資は華僑資本を含む。

台湾半導体産業は歴史的には、1974年に工業技術研究院 (ITRI, Industrial Technology Research Institute) に電子工業研究所 (ERSO, Electronics Research & Service Organization) が設立されて以来、政府の主導により発展している。1976年にアメリカのRCA社から $7\mu\text{m}$ ($1\mu\text{m}$ は1,000分の1mm)のCMOS ICの設計、製造技術を導入した¹³⁾。ITRIでは、これを基礎に、数年に渡るIC関連の研究開発計画を推進し、その成果をスピナウト (spin-out)方式という方法で、民間企業を育成し、産業基盤を築いている¹⁴⁾。これらの会社には、技術や資金、生産設備などと共に、聯華電子 (UMC, United Microelectronics Corp.) に13人、台湾積体電路 (TSMC, Taiwan Semiconductor Manufacturing Co., Ltd.) に98人、世界先進積体電路 (VIS, Vanguard International Semiconductor Corp.) に300人弱といったように、ITRIから数百人規模の人材が、技術者や経営幹部としてスピナウトした¹⁵⁾。

台湾の半導体産業は、1980年代の後半から、飛躍的成長を遂げ、設備投資の規模を欧米、日本を上回る勢いで、生産能力を拡大し続けてきた。

台湾半導体産業の発展過程を、(1)萌芽期(1975年以前)、(2)技術移転期(1975年～1979年)、(3)技術移転導入期(1979年～1983年)、(4)技術移転開発期(1983年～1988年)、(5)キャッチアップ期(1988年～現在)など、5期に分けることができるが、詳しい内容について、青山(1999)の研究に参照されたい¹⁶⁾。

13) 相補型金属酸化膜半導体 (CMOS, complementary metal oxide semiconductor), 通称“相補型 MOS”。MOSはシリコンなどの半導体表面に酸化膜を介して、金属を付けた構造の装置。

14) スピナウトは、ある組織から分離し、独立化し、小規模の組織をつくることを意味している。台湾の半導体産業の発端は、經濟部がITRIに資金を投入し、モデル工場を建設した後に、関連技術者と共に、独立した株式会社を設立する。1979年設立のUMC(聯華電子)を第1号として、1987年にTSMC(台湾積体電路)、1988年にTMC(台湾光罩)、1994年にVanguard(世界先進積体電路)と言ったように、中核となる半導体の製造会社、ないし関連産業を次々と設立した。

15) 水橋佑介(1998)「台湾電子工業立国への40年」, 交流 No. 566, 財団法人交流協会

16) 前掲書, P. 21-P. 48

2-1 台湾半導体産業の規模

1980年、台湾では、IT (information technology) 産業を発展するために、台北市の南西約70キロ離れた新竹市の近郊で、「新竹科学工業園区 (HSIP, Hsinchu Science-based Industrial Park)」を設立した¹⁷⁾。以来、台湾の半導体産業は、IT産業と共に、着実に発展し続けている。HSIPは、台北から1時間30分、桃園国際空港から40分、台中港、基隆港など、国際港へ各々2時間程度の交通至便な位置に立地している。園区内には、管理局のほか、ITRI、交通大学 (NCTU, National Chiao Tung University)、清華大学 (NTHU, National Tsing Hua University) など、理工系の基礎研究機関が隣接しており、これらは研究開発 (R & D) 技術訓練に大いに貢献している。HSIPは、産業地区、居住地区、レクリエーション地区に区分されている。産業地区には、各企業の工場や研究所などが整然と区画割されている。居住地区には、住宅のみならず、銀行、郵便局、スポーツ施設、湖、レストラン、書店など、この地域に住む人々の生活に必要な施設が整備されている。レクリエーション地区には、緑豊かな公園があり、環境保護のために、各工場からの一定レベルに浄化された工業排水は、管理局の排水処理場でさらに浄化されて、公園の緑化などに利用されている。そのほか、海外から優秀な企業の立地誘致、或いは海外の半導体産業で活躍している華人技術者の帰国を招聘し、技術者たちの子供の教育問題を解決するため、園区内には、国家科学委員会 (NSC, National Science Council) 直轄、完全なる英語で講義する小中学校が設けられているなど、HSIPは、アメリカのサンフランシスコにあるシリコンバレー (Silicon Valley) に匹敵するほどの社会資本が投入されている。

HSIPに立地している企業は、法人税が5年間免税され(赤字決算の場合は

17) IT産業の定義について、OECDの“IT Outlook”では、半導体、コンピューター、情報サービス産業など、三つの分野を含んでいる。HSIPには、主に半導体、コンピューター及び周辺機器、通信、光エレクトロニクス、精密機械、バイオテクノロジー産業など、六つの分野の企業が立地している。

実質10年まで免税), 住民税も免税される。技術者などには住宅も無償貸与されている。ここでの公用語は英語であり, 経営の手法もシリコンバレー方式で, 若い経営層が積極的な設備投資を行うことなど, 驚異的なスピードで力を付けている。また, 技術者も, 1985年から1991年にかけて, 年間約6,000人の半導体関連技術者が海外で技術を習得し, 台湾に帰国しており, このうちのプロセス・エンジニアは, 大半, 日本で養成された技術者であった。また, NCTUでは, 年間約1,000人の半導体の研究者, 技術者が養成されている。

1998年末現在, HSIPの労働人口は72,623人で, そのうち, 41,253人 (56.8%) が半導体産業に従事している。総生産高は2,308億元 (約8,240億円) に

表1 台湾半導体産業の規模

	A. 生産高		B. 就業人口		C. 労働生産性		D. R&D費用		E. 稼働工場数	
	億元	成長率	人	成長率	百万元	1986=100	億元	D./A.	新規	累計
1986	32.91	—	1,723	—	1.910	100.00	—	—	0	1
1987	38.09	15.74%	2,191	27.16%	1.738	91.02	—	—	0	1
1988	68.08	78.73%	4,114	87.77%	1.655	86.64	4.12	6.05%	2	3
1989	116.57	71.23%	6,192	50.51%	1.883	98.56	7.77	6.67%	4	7
1990	146.49	25.67%	7,853	26.82%	1.865	97.66	12.94	8.83%	5	12
1991	233.17	59.17%	9,375	19.38%	2.487	130.21	14.39	6.17%	3	15
1992	322.14	38.16%	10,912	16.39%	2.952	154.56	19.50	6.05%	4	19
1993	558.39	73.34%	12,773	17.05%	4.372	228.88	35.16	6.30%	6	25
1994	840.85	50.58%	16,313	27.71%	5.154	269.86	46.48	5.53%	9	34
1995	1,479.50	75.95%	22,496	37.90%	6.577	344.32	74.28	5.02%	7	41
1996	1,570.53	6.15%	29,510	31.18%	5.322	278.63	116.89	7.44%	10	51
1997	1,998.84	27.27%	37,681	27.69%	5.305	277.72	159.99	8.00%	9	60
1998	2,308.29	15.48%	41,253	9.48%	5.595	292.95	218.81	9.48%	7	67

資料：科学園区管理局「新竹科学工業園区統計資料」1999年版, SEMI, ERSO/ITIS, ITIS Report, (Nov, 1998) より作成

登り、1986年の70倍にまで増加した。1980年代から、台湾の電子産業 (electronics industry) は目ざましい成長を示し、経済全体の牽引車となったが、そのうち、半導体産業は、就業人口、稼働工場数の増加と共に成長するのみならず、労働生産性の増加及び生産高に比例して、巨額な資金を研究開発に投入することは、技術進歩の成果を挙げながら、長期的な国際競争力を維持する要因に繋がる (表1)。

2-2 台湾半導体産業構造

半導体産業では、垂直的には、設計、マスク製作、ウェーハ工程、組立、検査など、幾つかの工程に大きく分けらる。米国、日本、韓国及び欧州諸国の半導体メーカーは、これらの工程をほとんど社内に取り込み、一貫生産を行っている。いわゆる垂直統合企業である (IDMs, integrated device manufacturers)。しかしながら、近年、半導体産業の主な変化の一つとして、垂直統合 (vertical integration) から垂直分業 (vertical specialization) への移行が進んでいることが挙げられている。その主な原因は、半導体製造の各工程における技術革新が、まさに神速のスピードで進んでおり、しかも競争力を維持し、或いは新規工場を稼働するために、膨大な投資が必要としているのみならず、一貫生産を維持するための資金、経営管理及び研究開発に、IDMとしての機能を思うように出せないのが実態である。このため、垂直分業が一種の趨勢となってきたのである (曹, 1999)¹⁸⁾。

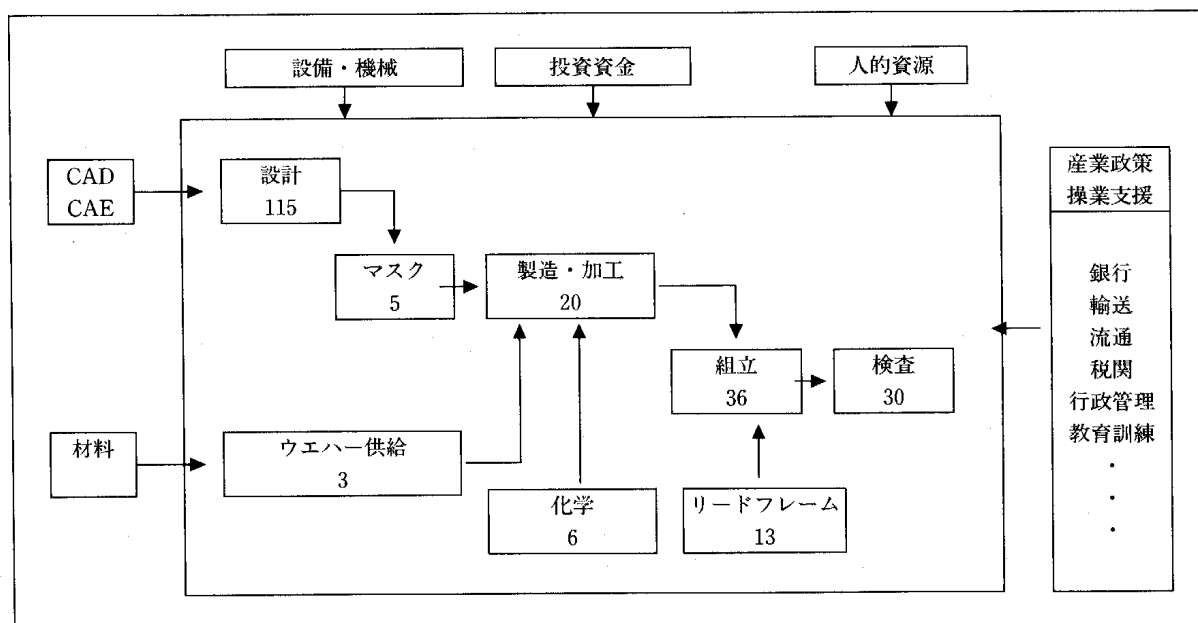
先述したように、台湾では、中小企業が企業全体に占める割合が非常に高いため、半導体産業、特にIDMに投資する資金力は持たなかった。そのため、台湾では、中小企業の特徴を生かして、発展の初期段階から、徹底した垂直分業システムに取り込み、独自の分業構造を構築するほか、ITRIからスピントアウトした者は、それぞれの得意分野に相応しい新規事業を起こし、数多くの

18) 曹興誠 (1999) 『台湾IC産業の競争力について』, P. 39 (曹興誠 (Robert H. C. Tsao)) はUMCグループの会長)

垂直分業企業 (SDMs, specialized device manufacturers) を育成した。

1998年末現在、台湾の半導体産業は、115社の設計会社 (design house)、5社のマスク製作会社、20社に登る半導体製造 (ウェーハ工程) 企業、36社の組立企業に加え、30社の検査企業など、それぞれの専門企業が、直接的に半導体製造に携わる形で、徹底した垂直分業システムを形成しているほか、半導体製造に必要な設備装置、資本金、人的資源及び原材料は、ほとんど海外から輸入し、製造分野に特化する構図である。特に、製造・加工分野のうち、台湾独自のファウンドリービジネスは、世界半導体市場の注目を浴びている。ファウンドリービジネスを中核に、その発展や規模の拡大と共に、設計、マスク製作、組立企業及び検査など、異なる分野の会社は、緊密に協力し合い、また、同分野の会社は激烈に競争し合いながら、技術革新及び経営の合理化を図り、台湾半導体産業の基盤を固めつつある (図1)。

図1 台湾半導体産業の分業構造



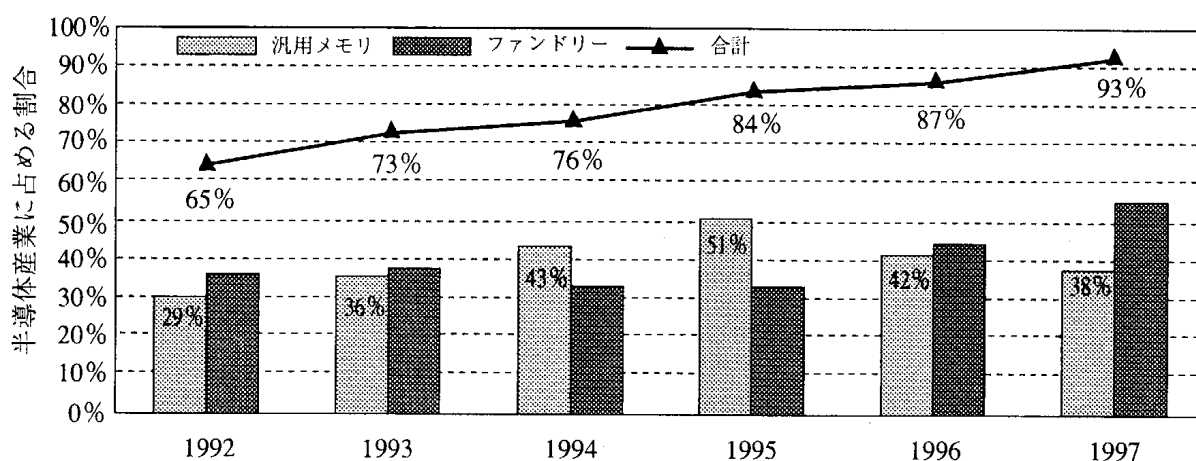
資料：ERSO/ITRI, 1999年

注：数字は企業数を表す

台湾の半導体産業は構造的に、主に二つのビジネス形態から構成されている。一つは、TSMCに代表される受託生産、すなわち、ファウンドリーと言わ

れるビジネスで、台湾で世界初のビジネス形態ができあがった。これが年率約58.16% (1992年～1997年) という著しい成長を見せ、1997年には台湾半導体生産額の55.3%にも達した。もう一つが、DRAM, SRAM及びマスクROMなどを中核とした汎用メモリビジネスである。1992年には、この二つのビジネス形態で、生産高は、すでに台湾半導体産業全体の65%に達し、その後は、若干変動はあったものの、1997年には93%にまで増加した (図2)。

図2 台湾半導体産業の構成 (生産高)



資料：産業タイムズ社『アジア半導体/液晶ハンドブック』, 1999年より作成

ファウンドリービジネスにおいては、設計と製造、組立及び検査工程などの分業を促し、台湾のピュアファウンドリー (pure foundry) 企業と米国のファブレス (fabless) 企業がパートナーとなっている。完成した半導体製品の知的財産権 (IP, intellectual property) に纏わる諸問題には、生産を委託する側が対応するところも多く、自社に十分な技術財産がなくても、事業化しやすい特徴を持つほか、生産委託側から技術指導を受けるなど、技術情報やノーハウが蓄積できる可能性もある (学習効果)。一方、汎用メモリビジネスにおいては、DRAM製造企業の多くが、先進技術を持つ海外企業と合弁会社を設立など、パートナーシップを組む形で技術供与を受けている。

1998年に入ると、世界半導体市場は予測通りの成長を見せず、汎用メモリビジネスの市場状況が悪化し続けたため、各国が生産拡張にブレーキをかけ

だした。こうした厳しい状況のなか、台湾半導体産業にファウンドリー化の波が本格的に訪れている。Acerのほか、Mosel Vitelicは6インチウェハ工場でのOEM獲得を目指している。VIS, 世大半導体(WSMC, Worldwide Semiconductor Manufacturing Corp.), Nanya, PSC, Winbond及びMXICなどが、ファウンドリービジネスに参入する意向を示している(後述)。また、ファウンドリービジネスメーカー間の競争は激化しており、今後ますます激しい争いを繰り広げることが予想されている。

2-3 ファウンドリーと汎用メモリビジネス

ファウンドリーとは、鑄造、鑄造工場という意味で、半導体産業では、ウェーハ工程の製造技術を持つメーカーのビジネス形態の一つで、客先であるファブレスメーカーが製品の回路設計及びレイアウト設計まで行ない、前工程だけを請け負い、ウェーハの形態で納品する。製造工程として、(1)酸化(oxidization)、シリコンウェーハを1,000°C~1,200°Cの酸素雰囲気中で反応させることにより、シリコン表面に、安定な物質である薄い酸化シリコン(SiO₂)膜を形成すること、(2)化学的気相沈殿(CVD, chemical vapor deposition)、気相での化学反応を利用して、絶縁膜(insulator film)や導電膜(conductor film)を形成すること、(3)リソグラフィ(lithography)、マスク上のパターンはウェーハ上のフォトレジスト(photo resist)に露光転写させる。フォトレジストの露光された部分は現像により除去され、パターンとして定着すること、(4)エッチング(etching)、酸化膜や金属膜(metal film)をシリコンウェーハ上のレジストパターンに従って、忠実に食刻すること、(5)不純物注入(impurity implant)、シリコンウェーハに不純物を選択的に注入(doping)し、P型、N型の領域を形成すること、(6)スパッタリング(sputtering)、真空放電(vacuum electric discharge)により発生するアルゴンイオン(argon ion)を金属ターゲットに衝突させることにより、はじき出される金属原子を、金属ターゲットに対抗して置かれたウェーハの表面に堆積させ、金属薄膜を形成させること、(7)プロービング(probing)、ウェーハ工程で完成したウェー

ハ上の各チップの電気的特定 (electric characteristic) を検査することなど、大きく七つのプロセスに分けられる。極めて複雑な加工プロセス、化学反応を経るほか、異なる分野の先端技術が使われている。

1987年、TSMCが設立され、設立時に100%ファウンドリービジネスに特化する方針を打ち上げ、世界初の「ピュアファウンドリー」メーカーとしてスタートした。TSMCは、経営陣はすべてITRIからスピンアウトし、或いは海外の名門半導体企業から、有望な人材を招聘し、台湾政府の資本が投下されており、フィリップス (Koninklijke Philips Electronics N. V.) を始めとする幾つかの投資家たちによって成立っている企業で、いわゆる国策会社 (state policy firm) とも言える存在である¹⁹⁾。TSMCは設立時から、一貫して、ファウンドリービジネスに特化し、自社ブランドは一切持たない。この方針が世界中から受け入れられ、世界有数の半導体メーカーに躍進するに至っている。また、ITRIからスピンアウトを第1号として、1979年に設立したUMCは、1995年に、社内の設計部門を独立させ、ファウンドリービジネスに特化する戦略を打ち出し、積極的な生産体制の整備を進めている。1999年現在、ファウンドリービジネスにおけるTSMCとUMCの市場シェアは85%を超え、生産高は、それぞれ502億元 (約1,807億円)、184億元 (約662億円) で、台湾半導体産業全体の30%に登る。

TSMCの創業者、張忠謀氏 (Morris Chang) は、半導体加工技術の高度化・微細化に伴い、半導体製造工場が巨大化して行こうとしている半面、工費1,000万~2,000万ドル程度の小規模な半導体製造工場を作りたいとする台湾国内の中小企業からのニーズと、これを実現するために、政府助成を求める声が絶えずあることに注目し、大規模な製造設備を一つ設けて共同利用すれば、中小企業が莫大な設備投資に足をすくわれることもないと考えた。これ

19) TSMCの創業者は、台湾政府が1985年、米国から、台湾の工業技術研究院院長として招いた張忠謀 (Morris Chang) である。張は、テキサスインスツルメンツ (TI, Texas Instruments) 上級副社長 (半導体生産担当) を経て、ジェネラルインスツルメンツ (GI, General Instruments) 社長兼COO (chief operating officer) の職にあった、高名な華人経営者である。

が、自社製品を一切持たず、第三者に対して、純粹に受託加工生産 (OEM, original equipment manufacturer) のみを行う半導体会社、台湾積体電路公司設立の提案であった (青木, 1999)²⁰⁾。

その背景には、設計部門の拡大である。台湾半導体産業の設計部門は、発展の初期から、製造部門を先行しているのみならず、レベルは極めて高いため、日本、韓国などの先進国に輸出する実力を持つ。例えば、1983年6月、シリコンバレで設立されたVitelic (現Mosel Vitelic, Inc.) は、台湾人技術者が出資する小さな設計会社でありながら、日本企業とほぼ同時、韓国企業より速い時期に、1986年6月、ERSOとの共同研究プロジェクトで、1MのDRAM開発に成功した。しかしながら、当時台湾の政府、或いは民間企業は超大型集積回路 (VLSI, very large scale integration) の製造設備、技術を持たずため、ERSOの実験室で成功した技術を韓国のチップメーカーに売却をせざるを得なかった。そのほか、Mosel (現Mosel Vitelic, Inc.) は、16K、64K及び256KのSRAM技術を、それぞれ日本の富士通 (Fujitsu Limited)、韓国の現代 (Hyundai Electronics Inc.) 及び日本のシャープ (Sharp Corp.) に売却した経緯もある。1987年、Vitelicは、日本及び韓国の半導体メーカーに技術を供与することにより、得られた特許権使用料 (royalty) は約3,000万ドルに登り、収益の50%に相当すると言われている。1986年末まで、台湾は数多くのVLSI設計技術者を抱えているにもかかわらず、大量生産の設備投資はなかったため、台湾で開発された数々の技術は外国の半導体メーカーへ売り出された (Sung, 1997)²¹⁾。

TSMCの設立と同時に、台湾の半導体市場は大きな変化をもたらした。従って、1989年、TSMCの第1工場の稼動により、台湾は本格的に汎用メモリビジネスに参入しはじめた。

1987年1月、台湾茂矽 (Mosel Vitelic, Inc.) に続き、同年9月に華邦電子

20) 前掲書, P. 34-P. 35

21) 前掲書, P. 54。但し、1987年1月、MoselはVitelicと共同出資で、HSIPで、Mosel Vitelic, Inc. を設立し、台湾有数の汎用メモリメーカーとなった。

(Winbond Electronics Corp.), 1990年に德基半導体 (TI-Acer, Texas Instruments-Acer Inc.), 1994年12月に世界先進積体電路 (VIS) 及び力晶半導体 (PSC, Powerchip Semiconductor Corp.), 1995年3月に南亜科技 (Nanya Technology Corp.) など, 汎用メモリに特化する半導体メーカーは, 次々と設立した²²⁾。そのほか, 1989年12月に設立された旺宏電子 (MXIC, Macronix International Co., LTD.) は, EPROM, フラッシュメモリ, マスクROM及び通信用LSIなど, 不揮発性メモリ (nonvolatile memory integrated circuits) ビジネスに特化し, 世界有数のメーカーに躍進している²³⁾。これらの企業は, 自社工場を建設するまで, 創立初期及び自社工場で生産を賄えきれない場合, ファウンドリービジネスのサポートを受けることによって, スムーズに生産調整を行っている。

台湾主要汎用メモリメーカーのプロフィールを簡単に紹介すると, Mosel Vitelicは, 1988年に1M CMOS, SRAMで世界の半導体市場に登場し, 1999年現在, 製品構成は, 約95%がDRAM, 民生用IC及び音声ICが約3%, SRAM

22) 德基半導体は, 米国の大手半導体メーカー, テキサスインスツルメンツ (德州儀器) と台湾のコンピューターメーカー最大手, 宏碁集団 (Acer Group) と共同出資で, 設立された会社であった。但し, 1998年6月, 宏碁集団は德州儀器的所持株を12億ドルで買収し, 100%宏碁集団の傘下に置かれ, 社名を宏碁半導体 (ASMI, Acer Semiconductor Manufacturing Inc.) に変更したが, 1999年7月, TSMCはASMIの株を30%購入し, 経営権を手に入れ, 社名を台碁半導体 (TSMC, TSMC-Acer Manufacturing Corp.), さらに, 2000年6月末をめぐり, TSMCを存続会社として, 合併される予定である。その背景には, DRAMs ビジネスの激しい競争及びファウンドリービジネス需要の拡大にある。一方, 南亜科技は, 台湾民営企業の最大手, 台湾塑膠集団 (Formosa Plastics Group) の関連会社, 南亜塑膠 (Nan Ya Plastics Corp.) の出資会社である。台湾の伝統産業が本格的に半導体産業に進出し, 大きな注目を浴びている。

23) フラッシュメモリ (flash memory) とは, 記憶情報を全ビット, 或いはブロック単位で, 一括消去できるメモリであるのに対して, EEPROM (electrically erasable programmable read only memory) がビット (bit) 単位で記憶情報を消去する。EEPROMに比べて, 書き換え可能回数は少ないが, セル構成が簡略のため, 大容量化が可能で, ビット当たりのコストを低く抑えることができる。マスクROM (mask read only memory) とは, ユーザーの要求に従って, ICメーカーの製造工程中のマスクにより, メモリセルに“1”, または“0”を書き込むROMである。マスクROMは, 他のメモリに比べてメモリセルの面積が小さく, 大容量化が最も進んでいる。

が約2%と、圧倒的にDRAMが占めている。Winbondは、規模としては、TSMC及びUMCのファウンドリービジネスメーカーに次、台湾3番目の半導体会社であるが、ブランドメーカーとしては、台湾最大となっている。VISは、1990年から1994年にわたり、ITRIの「サブミクロン加工技術開発5ヵ年計画 (Submicron Technology Development Five Years Project)」の一環として、開発に成功した製造技術を台湾国内の半導体メーカーに移転することにより、設立された。開発開発技術目標 (technology driving vehicles) として、16M DRAMと4M SRAMを製品に選び、8インチ(200mm)ウェーハに、最小線幅 $0.5\mu\text{m}$ の微小加工技術を開発に成功した。TSMCを主要株主に、国策会社で、台湾唯一のDRAM専業メーカーという存在であり、1999年は第2工場(1B)を強化し、 $0.19\mu\text{m}$ のデザインルール (design rule, 微小加工技術) 対応で、64M及び128M DRAMを生産している。VISは、台湾で、はじめての8インチウェーハ工場(1A)を保有するメーカーとして知られているが、1998年末現在、台湾で像働中の8インチウェーハ工場は17箇所までに増加している(表2)。PSCは、日本の三菱電機 (Mitsubishi Electric Corp.)、兼松 (Kanematsu Electronics Ltd.)、台湾の力捷電腦 (UMAX Data Systems, Inc.)、中華開発信託及び行政院(内閣)の合弁で設立された。スタート時はDRAMに特化しているが、その後、画像処理用メモリ分野にも参入した。現在は、ファウンドリービジネスも手掛けており、三菱電機からの技術供与を受けながら、徐々に業務を拡張している。HSIPに保有している8インチウェーハ工場は、 $0.25\mu\text{m}$ のデザインルール対応で、主要な生産品目は128M SDRAMであるが、すでに25%の生産能力をファウンドリーに転換している。Nanyaは、南亜塑膠 (Nan Ya Plastics Corp.) の出資会社で、第1工場は、 $0.2\mu\text{m}$ のデザインルール対応で、主要な生産品目は16M、64M DRAMである。1998年11月に、IBMと $0.2\mu\text{m}$ 以降の微細加工技術で提携し、新規稼働中の第2工場は、64M、128M及び256M DRAMなど、最先端メモリの生産を開始することになっている。

1990年初期から、本格的に汎用メモリビジネスに参入しはじめた台湾の半

表2 台湾半導体メーカー8インチウェハ工場の現状

	工場番号	投資金額 10億ドル	生産能力 枚/月	量産開始日	建設開始日	業務内容
VIS	1 A	0.6	15,000	1994年10月	1990年11月	DRAM
	1 B	0.7	25,000	1997年1月	1995年7月	DRAM
ASMI	1 B	0.5	25,000	1995年6月	1997年8月	DRAM
	2	2.0	50,000	1997年7月	1995年10月	DRAM
Nanya	1	1.0	30,000	1996年6月	1995年1月	DRAM
PSC	1	0.8	25,000	1996年7月	1995年3月	DRAM
Winbond	4	1.5	40,000	1997年12月	1995年6月	DRAM
PROMOS	1	1.6	40,000	1997年3月	1995年10月	DRAM
TSMC	3	1.2	35,000	1995年8月	1993年12月	foundry
	4	1.0	30,000	1997年1月	1995年4月	foundry
	5	1.0	30,000	1998年1月	1995年11月	foundry
UMC	3	1.0	28,000	1995年9月	1994年3月	foundry
USC	1	1.0	33,000	1996年5月	1995年5月	foundry
USIC	1	1.0	25,000	1998年3月	1995年12月	foundry
UTEK	2	0.8	20,000	1997年10月	1996年1月	IDM-foundry
WSMC	1	1.0	25,000	1998年7月	1997年2月	foundry
MXIC	2	1.2	30,000	1997年7月	1995年6月	IDM
合計		17.9	506,000			

資料：産業タイムズ社『アジア半導体/液晶ハンドブック』，1999年より作成

注：USC，USIC，UTEKはUMCのグループ会社である。

WSMCは2000年6月30日をめどに，TSMCに吸収合併される予定。

導体メーカーは，量産体制を整え続けているが，量産を開始する1990年代の後半は，まさに厳しい生存競争の環境に置かれた。世界半導体市場におけるDRAMの生産高(出荷額)は，1995年の422.3億ドルをピークに，1996年は前年比38.6%激減の259.3億ドルに，1996年はさらに19.98%減の207.5億ドルに

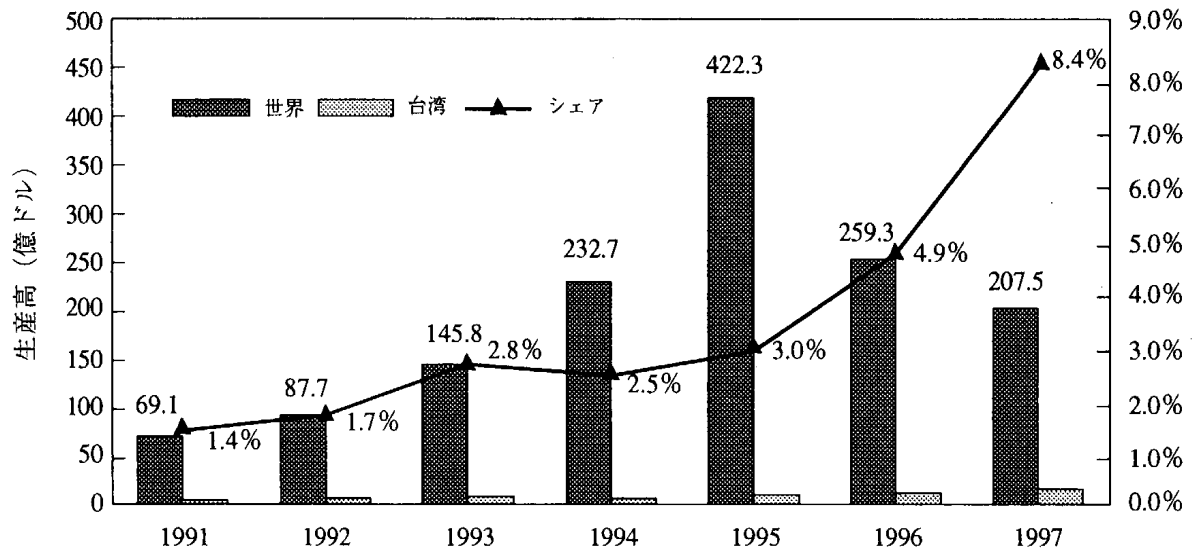
落ち込んだ。その背景には、1986年9月の日米半導体協定以降、DRAM中心に投資を続けてきた韓国メーカーの躍進により、1990年代初期から、大量な余剰供給をもたらした。DRAMの価格が急激に下落したが、1995年、Windows 95の発売により、パソコン市場の需要増に伴って、DRAMの需要は急増し、一時的に供給不足に陥れたためである。そして、1997年の世界半導体産業は、米国の大手DRAMメーカー、マイクロン (Micron Technology, Inc.) による16M DRAM大增産と韓国メーカーによる投げ売り (dumping) が主因となり、メモリ不況が一段と深刻化した。但し、この厳しい競争環境及び不況のなか、台湾の汎用メモリビジネスは国際競争力を維持しているため、着実に伸び続き、市場のシェアを拡大しつつある (図3)。

台湾の半導体産業はファウンドリービジネスの好調によって、1997年及び1998年の産業全体の規模は、それぞれ前年度より、27.27%及び15.48%上昇したが、DRAMメーカー及びIDMメーカーはほとんど赤字を計上した。1998年台湾大手半導体メーカーの業績を調べると、Winbond, Mosel Vitelic, VIS及びPSCなど、汎用メモリビジネスメーカー4社合計での赤字は、生産高448億6,700万元(約1,615億2,100万円)に対して、112億6,700万元(約405億6,100万円)に登り、一方、黒字、しかも高い利益率を計上できたのは、TSMC, UMC及びUSCなど、ファウンドリービジネスに特化するメーカー3社のみとなった (表3)。

3. 学習効果

学習効果は、累積生産量の増加率と単位コストの低下率との間に一定の関係があるということである。ある時点 t における累積生産量を x_t 、単位コストを y_t とおけば、 t 時点と $t+1$ 時点の間の累積生産量の増加率は $\frac{x_{t+1}}{x_t}$ 、単位コストの低下率は $\frac{y_{t+1}}{y_t}$ と表され、この間に次のような関係式が成立する。

図3 DRAM産業の生産高



資料：蘇艷文(1999)「全球DRAM市場競争態勢剖析」『1999電子工業市場年鑑』，新電子科技雜誌主編，P. 165

表3 1998年台湾大手半導体メーカーの業績

単位：百万NT\$

会社名	生産高	経常利益	利益率	業務内容
TSMC	50,233	15,344	30.5%	foundry
UMC	18,432	4,407	23.9%	foundry
Winbond	15,558	-396	-2.5%	DRAM
Mosel Vitelic	12,704	-2,016	-15.9%	DRAM
Macronix	12,334	-1,604	-13.0%	IDM
USC	11,976	3,749	31.3%	foundry
VIS	9,861	-4,972	-50.4%	DRAM
PSC	6,744	-3,883	-57.6%	DRAM
UTEK	3,907	-978	-25.0%	IDM-foundry

資料：台湾証券取引センターの株価観測公表資料より作成
(証券交易所股市観測公布資料)

$$\frac{y_{t+1}}{y_t} \equiv \left[\frac{x_{t+1}}{x_t} \right]^b \quad (1)$$

ここで、 b は学習率に対応した定数であり、通常負の値をとる。

(1)式で、 x_t と y_t の値、すなわち、時点 t における累積生産量と単位コストが与えられると、その後の x と y の間には、次のような関係式が成り立つことになる。

$$y \equiv y_t \left[\frac{x}{x_t} \right]^b \equiv \frac{y_t}{x_t^b} x^b \quad (2)$$

ここで、 $\frac{y_t}{x_t^b} \equiv k$ (定数) とおくと、

$$y \equiv kx^b \quad (3)$$

となり、指数曲線である(2)式が学習曲線を表す式である。さらに、(2)式で両辺の対数をとると、

$$\log y \equiv \log(kx^b) \equiv b \log x + \log k \quad (4)$$

となり、累積生産量の対数値 $\log x$ と単位コストの対数値 $\log y$ が傾き b 、 y 切片が $\log k$ の直線になることが分かる。

3-1 半導体産業の学習曲線

半導体 (semiconductor) はシリコンウェーハ (silicon wafer) に電子回路を構成するトランジスタ (transistor)、ダイオード (diode)、抵抗 (resistor)、コンデンサー (condenser) などの素子 (element) を作り込み、素子間を相互配線することにより、電子回路として機能させるもので、いわゆる集積回路 (IC, integrated circuit) である。トランジスタなどの素子は、シリコン、その化合物及び数種類の金属からできあがる。

ICの製造工程は、使用する技術や設備装置、製造環境により、ウェーハ工程、組立 (assembly) 工程、検査 (test) 工程など、三つに大きく分けられ、一般的にウェーハ工程は前工程、組立及び検査工程は後工程と呼ばれているが、その前に設計とマスク (mask) 製作など、二つ重要な工程がある (図1)²⁴⁾。

ウェーハ工程では、単結晶のシリコンインゴット (silicon ingot) から切り出され、表面研磨され、5 (125mm) から12 (300mm) インチ径のシリコンウェーハ上に、不純物注入、薄膜形成、フォトエッチング (photo etching) を繰り返すことにより、素子回路を形成し、チップを完成させる。

ウェーハ上のICチップには、回路原版であるマスクやレチクル (reticle) から、回路パターンが転写される。大規模なICでは、一つのチップ上に数千万個の素子が集積され、配線の長さは延べ数十メートルにも及ぶ。

ICの大規模化、高集積化は、微細加工技術の進歩と共に進展した。微細加工技術の中心になるのがフォトエッチング技術であり、マスクやレチクル上に描かれた回路パターンを露光転写するリソグラフィと、酸化膜や金属薄膜を転写されたパターン通りに加工するエッチングからなる²⁵⁾。微小加工技術のレベル (最小線幅) は、量産レベルで $0.18\mu\text{m}$ 、研究開発レベルでは、 0.13 から $0.12\mu\text{m}$ に達している。このため、ウェーハ工程の作業環境には、クラス1レベル無塵室 (clean room) が必要であり、また、ウェーハ製造には、超高純度の薬品やガス、超純水が使われている²⁶⁾。

ウェーハ工程を完了したシリコンウェーハ (ICチップの一群 (batches)) は、組立工程で、超極薄ダイヤモンド砥石 (blade) を高速回転させたダイシ

24) 設計とは、商品企画で決められた機能を、ICとして実現するために、理論図、回路図及びマスクデータに変換することである。マスクデータは写真技術を使い、各層毎にガラス基板上にパターンとして転写される。レチクルと呼ばれているこの原版は、ICパターンの原寸法の1~10倍のパターンが形成され、それをステッパ (stepper) によってウェーハに、或いはフォトリピータ (photo repeater) によってフォトプレートに投影露光させる。

25) リソグラフィとは、平板印刷における石版術を語源とするが、半導体分野では、基板上にレジストパターン (resist pattern) を形成する技術を指す。

26) クラス1とは、1立方フィート中にある $0.1\mu\text{m}$ 以上の塵の数が1ヶ以下のレベルである。

ングソー (dicing saw) で、個々のICチップチップ単位に切断、分離される。分離されたICチップは、リードフレーム (lead frame) に接着固定された後、エポキシ樹脂で、最終外形にモールド (molding) 成形される。モールド成形後、外部リードを成形したICは検査工程で、電気的特性検査を実施し、所定の機能を満たす良品のみを選別し、ICとして完成する。

IC製造工程のうち、ウェーハ工程は最も重要 (critical) で、そのコストも最も高いと言われている。複雑な加工プロセス、化学反応を経て、所定の機能を満たす良品のみ、商品としての価値が付けられるため、IC製造の効率は「良品率 (yield factor)」で決められている。新規稼働の企業、或いは新製品製造の初期段階では、良品率は極めて低いが、製造技術の熟練により、学習効果が現れ、良品率が次第に上昇する。

ICチップチップ単位コストは C 、良品率は Y_f と表され、次のような関係式が成立する。

$$C \equiv C_v + C_f \equiv \frac{W_c}{Y_f N_d} + C_f \quad (5)$$

C_v は可変費用 (variable cost), W_c はウェーハのコスト, N_d はウェーハ上で転写されるICチップチップの数 (die), C_f は固定費用 (fixed cost) で、ここでは後工程の単位コストを表される。但し、 N_d は技術パラメータ (technology parameter) の関数で、微小加工技術 (design rule) によって決まる。微小加工技術が進歩すればするほど、ウェーハ上に与えられた固定面積に転写される N_d の値が大きくなる。従って、ICチップチップ単位コスト C は、二つのパラメータ、すなわち、良品率 Y_f と微小加工技術によって決定される。

ウェーハの面積は W_a 、素子数は E 、最小線幅は D_r 、配線層の数は N_i 、マージンは M 、不完全チップの数は N_i と表され、次のような関係式が成立する。

$$N_d \equiv \frac{W_a}{\frac{E \cdot D_r^2}{N_i} + M} - N_i \quad (6)$$

IC製品が今日のように、広く普及した理由の一つに、低価格化が挙げられ

ている。ICチップは1枚のウェハから、多数のチップが取られ、大量生産によるコストダウンができるからである。但し、微小加工技術の発展による集積度の向上にもかかわらず、大容量化や高機能化により、チップ面積は確実に大型化し、1枚のウェハから取れるチップの数は減少している。DRAMを

表4 DRAMチップ面積と集積度 (研究発表レベル)

分野	開発年度	DRAM	チップ面積 (mm ²)	素子数 (万個)	最小線幅 (μm)
VLSI	1977	64K	20	14	3
	1980	256K	40	56	2
	1984	1 M	50~	220	1.1
	1986	4 M	88~	870	0.8
ULSI	1987	16M	130~	3,500	0.55
	1990	64M	484	14,000	0.40
	1993	256M	676	56,000	0.25
	1995	1 G	780	224,000	0.18
	1996	4 G	936	896,000	0.13

資料：(財)日本電子機械工業会 (1997) 『ICガイドブック (第7版)』, P.39

注：チップ面積, 素子数, 最小線幅の数字は代表値

表5 ウェハ口径と理論チップ収量の関係

ウェハ口径	面積比	収量	1 M	4 M	16M	64M	256M
5 インチ	1	チップ収量	191	100	64	12	6
		チップ収量比	1	1	1	1	1
6 インチ	1.44	チップ収量	288	156	100	24	12
		チップ収量比	1.5	1.6	1.6	2	2
200mm (8 インチ)	2.48	チップ収量	554	302	202	44	30
		チップ収量比	2.9	3.0	3.2	3.7	5.0
300mm (12インチ)	5.58	チップ収量	1,290	710	482	112	74
		チップ収量比	6.8	7.1	7.5	9.3	12.3

同表4

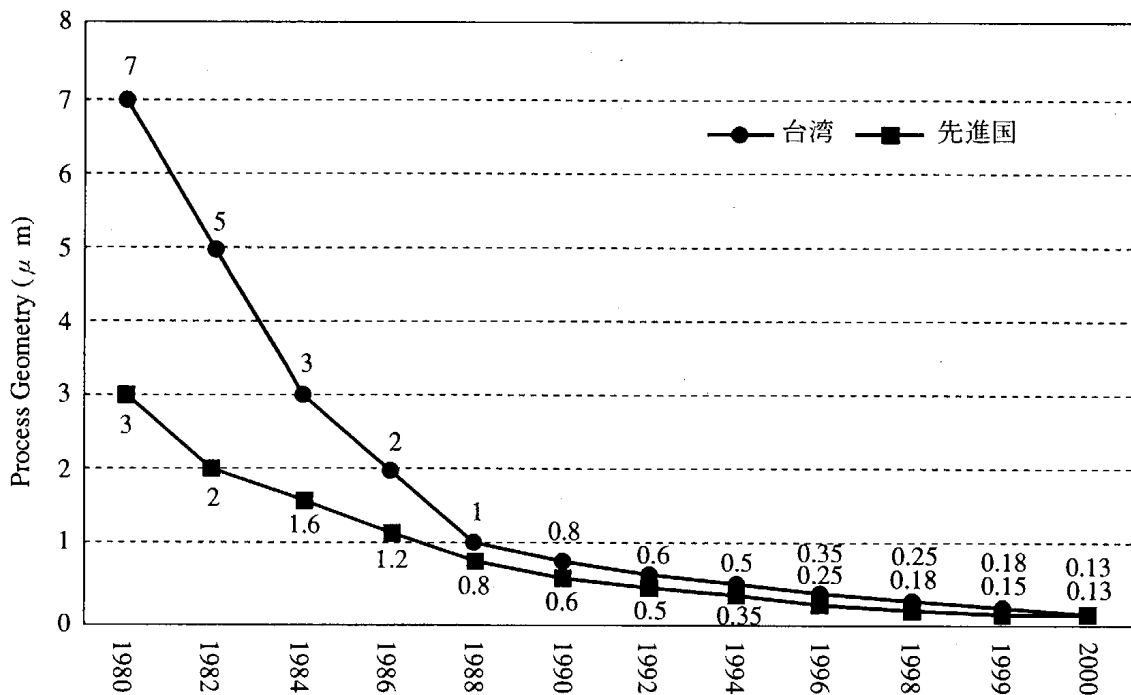
例に、ウェーハ口径と理論チップ収量 (N_d) の関係を見ると、同じチップ面積の場合、口径の大きなウェーハほど、ウェーハ面積比以上に N_d が増し、また、チップ面積が大きくなる（集積度が上がる）ほど、ウェーハの有効利用が減少することが分かる（表4、表5）。

日本の半導体メーカーは、「超LSI国家プロジェクト（1976年～1980年）」を契機に、(1)微細加工技術、(2)結晶技術、(3)設計技術、(4)プロセス技術、(5)試験評価技術、及び(6)デバイス技術などの6項目で、何れも大きな成果を挙げている。特に、1980年代より、DRAMの微細加工技術を開発し、また、その量産技術に集中的な投資を行った結果、世界半導体産業のリーダーとなった。DRAMの微細加工技術は、他の半導体製品を開発するための先行技術として、重要なものであったが、現在では、その構図は、半導体装置メーカーの技術向上などの要因に伴って、優位性は崩れている。

台湾の半導体産業の発端は、1976年にアメリカのRCA社から $7\mu\text{m}$ の CMOS IC の設計、製造技術を導入したことを述べたが、発展の初期段階では、加工技術にはまったく優位性はなかった。製造技術の熟練及び研究開発の進展により、学習効果が現れはじめ、直接に微細加工技術の技術革新に繋がり、先進国との技術格差は、1980年後半から、ほとんどなくなった（図4）。一方、台湾半導体産業における製造工程の良品率 Y_f は、速い段階で、優れた生産技術を持ち、すでに一流レベルに達しており、優位性に富んでいると言われている。結果として、台湾半導体産業は、国際競争力を有することは明らかである。例えば、16M DRAMの損益分岐価格（break-even price）を見ると、米国、日本、韓国及び台湾半導体メーカーは、それぞれ4.36ドル、5.28ドル、4.79ドル、及び4.24ドルであり、台湾は米国より2.75%、日本より23.58%、そして、韓国よりも11.48%安いである²⁷⁾。その背景には、台湾半導体産業の垂直分業構造は、可変費用 C_v のほか、固定費用 C_f の各工程にも、市場競争原

27) 詳細は青木(1999)前掲書、P. 67。資料出所はIDCジャパン調べ、1997年9月現在、R & Dコストを除くコスト分析（日経産業新聞、1998年1月20日）。

図4 台湾半導体産業の微小加工技術革新（最小線幅）



資料：温清章『台湾の半導体産業の発展状況及び将来展望』，1999年より作成

注：2000年は予測

理が導入され，常に競争価格 (competitive price) を維持できたからである。

3-2 半導体産業の集積の経済

集積の経済 (agglomeration economies) とは，都市経済学 (Urban Economics) の用語で，多数の産業や企業が空間的に集中することによって，生ずる個別企業にとっての費用の節約や収入の増加で，いわゆる一種の外部経済 (external economies) が生み出されている。個別の企業，或いは産業の規模の経済 (economies of scale) だけでは，その程度にも限界があり，都市規模の拡大にはつながらないことを意味している。ここでは，その概念を半導体産業に取込み，設計，マスク作成，ウェーハ，組立，検査工程，ないし流通 (marketing) など，あらゆる半導体産業に関わる企業，或いは産業を特定し，半導体産業の総生産関数を定義する。

$$Y_{IC} \equiv f(N, K) \tag{7}$$

但し、 Y_{IC} 、 N 及び K は、それぞれ半導体産業の総生産額、就業者及び民間資本を表す。集積の経済が存在しない時、総生産関数は就業者及び民間資本について収穫不変 (CRS, constant return to scale) である。市場を経由しない、企業間取引により、技術的な外部性がもたらされると仮定すれば、規模の経済性で、集積の経済を正当化することができ、収穫逡増 (IRS, increasing return to scale) となる。次に、総生産関数に政府のインフラ整備により、社会資本の変数 G を導入すると、

$$Y_{IC} \equiv f(N, K, G) \quad (8)$$

総生産関数としては、様々な関数型を想定することができるが、単純なコブ・ダグラス型生産関数 (Cobb-Douglas production function) を取上げると、

$$Y_{IC} \equiv AN^{\alpha}K^{\beta}G^{\gamma} \quad (9)$$

但し、 A 、 α 、 β 、 γ はすべて正の乗数で、さらに就業者のパラメータが社会資本の投入により、上方にシフトという仮定を導入すると、

$$Y_{IC} \equiv AN^{\alpha}K^{\beta}N^{\gamma \log G} \quad (10)$$

このとき、半導体産業における集積の経済の大きさは、 $\log G$ となる。(8)式で両辺の対数をとると、

$$\log Y_{IC} \equiv A + \alpha \log N + \beta \log K + \gamma \log G \log N \quad (11)$$

集積の経済が成立するには、(1)資源及び交通の便益 (advantage)、(2)不可分性 (indivisibility) 及び規模の経済、(3)外部性 (externalities) 及び非価格の交互作用 (nonprice Interaction)、及び(4)消費及び生産活動における多様性 (variety) の選好 (preference) など、4つの要素が必要である (Fujita, 1989)²⁸⁾。HSIPでは、半導体産業関連の分野のみならず、コンピューター周辺機器、通信、光エレクトロニクス、精密機械及びバイオテクノロジーなど、

表6 新竹科学工業園区産業別生産高の推移

単位：NT\$：億元

	半導体	コンピューター 周辺機器	通信	光エレクトロ ニクス	精密機械	バイオ テクノロジー	合計	成長率
1986	32.91	118.66	9.65	6.05	2.72	0.44	170.43	—
1987	38.09	199.06	23.48	12.18	2.69	1.85	277.35	62.74
1988	68.08	353.26	45	15.99	3	4.53	489.86	76.62
1989	116.57	345.92	69.85	13.9	5.81	7.13	559.18	14.15
1990	146.49	370.34	113.6	11.43	8.18	5.58	655.65	17.25
1991	233.17	373.44	135.65	18.21	10.46	5.78	776.71	18.5
1992	322.14	385.71	124.48	20.18	13.28	4.59	870.38	12
1993	558.39	541.77	134.7	35.64	16.22	2.87	1,289.59	48.28
1994	840.85	719.08	147.29	47.24	19.46	3.72	1,777.64	37.81
1995	1,479.50	1,215.44	170.02	100.29	24.92	2.01	2,992.18	68.32
1996	1,570.53	1,212.37	192.63	175.34	0.27	2.47	3,181.47	6.36
1997	1,998.84	1,409.62	271.32	278.49	34.14	4.04	3,996.46	25.61
1998	1,308.29	1,598.94	264.48	297.6	75.02	5.69	4,550.02	13.87

資料：科学園区管理局『新竹科学工業園区統計資料』1999年版

六つの分野のIT産業が同時に立地している。これらの産業は半導体製品と少なからず関連を持ち、供給と需要の市場を同時に作り出したため、産業としての集積効果が高いことは、HSIP成功の要因の一つであろう（表6）。

4. 台湾半導体産業の展望

半導体産業は、1996年以来、1999年夏まで不況に喘いできた。その要因は、時期により、様々であるが、過剰な設備投資及びアジア金融危機の影響は大

きいと考えられる。このため、需要と供給の間に、極めて大きなアンバランスが生じ、各国の半導体メーカーは、景気が回復するまで、赤字覚悟で、半導体チップを生産し続けたのである。これがパソコンなど、電機機器の価格低下の原動力となり、一部メーカーの収益拡大の一端となった。しかしながら、パソコン販売台数の拡大、一台当りのメモリ搭載量の増大、韓国、日本メーカーの減産から、メモリを中心に半導体価格は、安定しはじめている。

台湾半導体産業の設備投資は、1998年にアジア経済通貨危機の影響を受け、若干減速したものの、将来の需要拡大を見据えて、設備投資を急速に再開している。ERSOなど、政府関係機関が集計した台湾主要半導体メーカー10社の中長期的な設備投資計画によれば、その金額は792億ドル(約8兆4,700億円)に達する予定である。日本および韓国の半導体メーカーは、長期的不況の影響を受け、企業収益が悪化し、思い切った投資ができない状況であることに対して、台湾の半導体メーカーは、未だ豊かな投資環境を持つことで、今後の市場状況を把握することは、さらに難しくなっている。

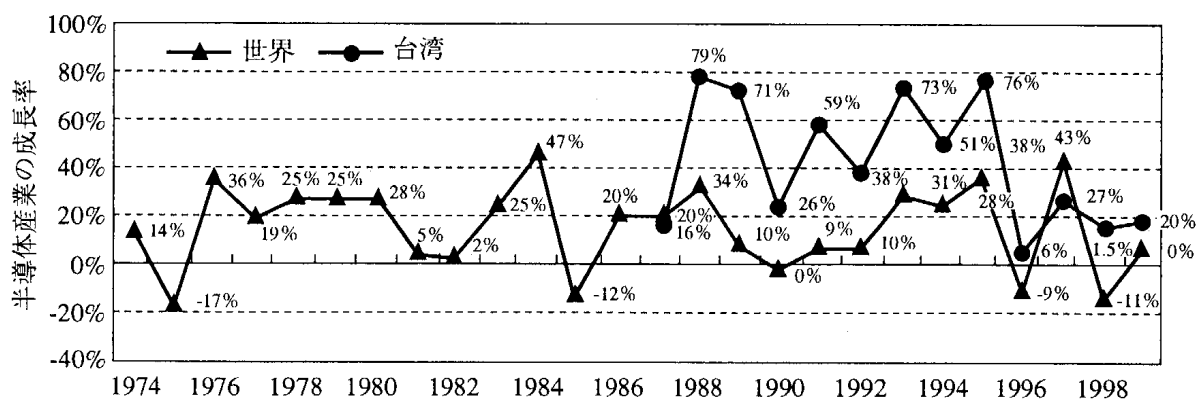
4-1 シリコンサイクル

半導体産業における過去の成長過程を追って見ると、3～4年毎に、成長のピークとボトム(bottom)を伴った周期が見られる。いわゆる「シリコンサイクル(silicon cycle)」と呼ばれるもので、半導体に特有の好不況の波である。シリコンサイクルの変動には、経済全体の状況によって、様々な要因が挙げられるが、その基本的な要素は、半導体産業の特質にあると言われている。半導体製品は、電機機器の部品としての性格上、電子機器の好不況による需要の変動の影響を大きく受ける。また、半導体産業は、設備産業であることから、供給能力と需要には、時期的にずれが生じてしまう。これらのことにより、成長の強弱がより大きく増幅されてしまうためである。

台湾半導体産業の発展は、1980年代の後半から軌道に乗りながら、世界市場と大きく連動している。但し、台湾半導体産業の構造の特徴から見られるように、ファウンドリービジネスは、もともとニッチ(niche)であり、競争

が比較的緩やかであった。また、ファウンドリービジネスの受託製品は多様であり、価格変動は激しくないため、安定したパフォーマンスが維持できた。そして、台湾半導体産業の規模は、比較的小さいため、汎用メモリ分野における赤字経営が計上されたとしても、着実に発展することが出来た。そのため、台湾のシリコンサイクルの曲線は、半導体市場の景気変化に少なからず影響を受けながらも、より高い成長率を維持できた（図5）。

図5 世界的なシリコンサイクル



資料：Dataquest, IN-STAT, TI, HSIP

4-2 台湾中部大地震の影響

1999年9月21日午前1時47分台湾で、マグニチュード (magnitude) 7.2級の大地震が発生した。台湾の中部，北部を中心に，死者2,087名，負傷者8,711名，全壊家屋7,274棟，半壊家屋5,696棟など，大きな被害を受けたが，この大地震は，経済活動にも大きな影響を与えた。

HSIPは，震源地からかなり離れていたとはいえ，新竹などのパソコン (personal computer) 関連企業が受けた打撃は小さくない。停電で，生産ラインのほとんどが操業停止に追い込まれた。台湾のIT産業の中核となっている半導体産業は，HSIPに25社の半導体メーカーが集中しており，生産高は台湾全体の半導体生産の90%を占めている。これらのメーカーは，地震による工場の損壊などの被害は比較的少なかったものの，停電で一時操業中止をせ

ざるを得なかった。台湾ハイテク産業の心臓部に当たるHSIPには、地震直後から優先的に電力供給が行われてきたが、量産体制を維持するには充分ではなく、生産ラインは一時的にストップする形になった。HSIPには、9月26日から電力供給が全面復旧され、半導体メーカー各社は操業の再開を急いでいた。10月中旬には生産ラインが全面復旧できた。試算によると、今回の台湾大地震で、台湾半導体メーカー25社の生産総額は125億元（約450億円）減少し、これは生産高全体のわずか4.8%にすぎなかった。また、減少する利益も25億元（約90億円）に止まると、試算されている。

1999年、半導体メーカー各社の生産高の予測は、TSMCが750億元（約2,700億円, 49.4%増）、UMCグループが580億元（約2,088億円, 52.6%増（グループ統合の効果））、Winbondが300億元（約1,080億円, 92.3%増）、Mosel Vitelecが200億元（約720億円, 57.5%増）、そのほか、MXIC, VIS, PSC, NanYa, ASMIなどが、それぞれ100～150億（約360～540億円）元で、合計2,600億元（約9,360億円, 12.7%増）に達する²⁹⁾。

台湾半導体を支える組立、検査などの後工程の状況は、台中近辺の工場の被害状況が心配されていたが、日月光グループ（ASE, Advanced Semiconductor Engineering）や華泰電子（OSE, Orient Semiconductor Electronics）などは、南部に拠点を持っているため、被害はなかった。但し、台湾大地震の影響は半導体の価格相場に顕著に現れてきた。地震発生前から上昇する傾向にあったDRAM価格は、地震後に一気に急騰しはじめた。また、マスクROM, SRAMの供給不安も懸念されているが、幸いに今回の大地震が台湾半導体産業にもたらした衝撃は、一時的なものである。

台湾の半導体産業の優位性はすでに確立されており、他地域への移転は今のところ見られない。半導体産業は、各種の税制優遇を受けており、科学技

29) 9月は、半導体生産の規模、設備稼働率、相場が最も高い時期であり、地震の停電により、生産高の減少に関して、は様々な試算が行われ、大きな差がみられている。全体で、約125億元（約450億円）に相当する。また、失われる経常利益も25億元（約90億円）に止まるといふ。そのうち、TSMとUMCがそれぞれ13億元（約47億円）、8億元（約29億円）を占め、最も多かった。

術の人材も豊富なので、生産コストには国際競争力を持つ。従って、現在のところ、メーカーは海外に生産拠点を移す必要性が全くない。しかしながら、外部から見れば、台湾半導体メーカーがHSIPに集中しているという経営リスク (management risk) は懸念されるところで、今回南部地区の地震被害が比較的軽かった事から、半導体メーカーは2番目の科学工業園区、台南科学園区 (TSIP, Tainan Science-based Industrial Park) に工場建設の進度を速め、リスク分散を図るだろう。

4-3 積極的な投資

HSIPの成功は、世界IT産業の注目を集めるほか、立地を希望する企業が殺到するほど、約600ヘクタールに登る園区は、IT産業に埋め尽くされ、飽和状態にある。新規企業の立地問題、長期的発展及び国際競争力を維持するため、2番目の科学工業園区、TSIPの開設は、1993年に考案された。と同時に、約1年間、投資企業の募集が行われ、短期間中に半導体メーカー21社、精密電子機械メーカー14社、バイオ・テクノロジー関連企業3社に及び投資申請があり、その投資総額が1兆2,000億元 (約4兆3,200億円) を越えたことである。こうした積極的な投資意欲は、HSIPの経験を背景に、経済界が台南科学園区の長期的な発展に確信を抱いていることを示しているほか、台湾民営企業の活力、強力な投資能力、起業家の旺盛なベンチャー精神並びに企画能力を示している。そして、TSIPを推進するもう一つの意義は、バランスのとれた地域発展を促進するということにもある。

1997年7月、台南科学園区開発準備処 (事務所) の設立と同時に、TSMCは同園区内での製造工場と研究所の起工式をおこなった。

1998年、世界的半導体産業の景気が低迷するなか、台湾の大手半導体メーカー、UMCは、日本大手鉄鋼メーカー、新日本製鉄 (Nippon Steel Corp.) の子会社、日鉄セミコンダクター (Nippon Steel Semiconductor Corp.) の株式を100%取得し、同社の経営権を手に入れた³⁰⁾。TSMCは、オランダのフィリップス社およびシンガポールの投資会社 (EDB社) と12億米ドルを共

同出資し、シンガポールにウェハ工場を設置する (TSMCの持ち株比率は32%)。そして、ASEは、世界の組立・検査工程市場でのトップシェア獲得とグループの規模拡大を目指し、1999年初めから、積極的に企業買収を行ってきた。まず、ASEグループ傘下の福雷電子 (ASE TEXT) は1999年3月、米国ISE社の株式70%を購入した。購入総額は9,800万米ドルである。ISE社は米国最大のIC専門検査工程会社で、前半の検査工程技術には定評がある。一方、ASE TEXTは後半の検査工程業務に長けており、今回の買収により、双方が大きな利益を得ることになる。また、同年7月、ASEはモトローラ社が韓国と台湾に所有していた組立・検査工程工場を買収した。買収総額は3億6,800ドルに登る。台湾の半導体企業は、巨額な資金を半導体産業に投じていると傍らに、資本輸出の余裕を見せている。

Dataquestの統計によると、1998年の世界半導体メーカー投資額上位10社のうち、台湾企業が3社占めている。UMCは前年比10%増の13億1,600万米ドルで、世界4位 (1997年は10位)。TSMCは昨年比11%減の10億9,500万米ドルで8位 (同9位)。Winbondは同24%増加し、10億8,300万米ドルに上り、9位 (同18位) に浮上している³¹⁾。このように、台湾の半導体生産能力 (capacity) の世界に占める比率は、1996年5.9%から、1997年の7.9%、1998年の9.4%、1999年の11.0%、そして2000年の12.6 (予測) になっている³²⁾。

TSMCは、TSIPに建設中の8インチ (200mm) ウェハ工場に続き、HSIPに12 (300mm) インチウェハ工場の新設を含めた投資計画を進んでおり、総投資金額は4,100億円に登る。また、UMCもTSIPに300mmウェハ工場の計画を明確に打ち出した。さらに、2000年1月にTSMCの資本参加を受け、6月30日に吸収合併される予定のWSMCも第2工場の建設を急ピッチで立ち上

30) 1998年9月29日、新日本製鉄は、平成1998年3月期で、70億円の債務超過に陥るなど、業績不振が続いている子会社の店頭公開企業、日鉄セミコンダクターの持ち株を、100%台湾の半導体大手UMCグループに売却し、国内の半導体生産から撤退すると発表した。これにより新日鉄は、日本国内の半導体生産から撤退する。

31) 経済日報、1998年9月15日

32) ERSO『ITIS計画』、1999年4月

げている。TSMCなどが巨大投資に踏み切ったのは、生産高に比べて、株式の時価総額が250億ドルという凄まじい評価を市場からもらっていることが背景にある。当面、台湾半導体産業のパワーは、一切の衰えを見せることなく、昇竜の勢いで突き進むと見られている（表7）。

表7 台湾における半導体前工程工場の新増設計画

会社名	建設地	投資額 億円	ウェハ 口径	最小線幅	生産能力 枚/月	業務内容	完成予定
TSMC	TSIP	1,500	200mm	0.18 μ m	40,000	foundry	2001年IV季
	HSIP	2,600	300mm	0.13 μ m	25,000	DRAM	2001年I季
UMC	TSIP	3,100	300mm	0.13 μ m	30,000	foundry	2000年IV季
WSMC	HSIP	1,300	200mm	0.25 μ m	30,000	foundry	2000年I季
Winbond	HSIP	1,200	200mm	0.20 μ m	15,000	DRAM	2000年I季
	TSIP	1,800	300mm	0.18 μ m	20,000	DRAM	2002年以降
ACER	TSIP	1,500	300mm	0.18 μ m	15,000	foundry	2001年以降
Mosel Vitelic	TSIP	2,000	300mm	0.18 μ m	30,000	DRAM	2001年以降
MXIC	HSIP	1,300	300mm	0.18 μ m	15,000	IDM	2001年中
PSC	HSIP	1,600	200mm	0.18 μ m	30,000	DRAM	2000年II季
	HSIP	1,800	300mm	0.13 μ m	20,000	DRAM	2002年III季
Nanya	桃園	1,300	200mm	0.13 μ m	30,000	DRAM	2000年II季
合計		21,000			300,000		

資料：『半導体工場ハンドブック 2000』，産業タイムズ社，1999年11月，P.17より作成

5. 終わりに

台湾半導体産業の発展過程を顧ると、TSMCの創立者、「台湾半導体産業の父」と言われている張忠謀氏は、米国の名門大学、マサチューセッツ工科大学（MIT, Massachusetts Institute of Technology）を卒業し、職探しをする際、初任給の僅か1ドルの差で、当時数十万人の社員を有する巨大企業、

フォード自動車 (Ford Motor Company) への入社を断り、電球、テレビ、ラジオ及び真空管製造で名高なSylvania社 (すでに倒産した) へ入社し、半導体産業に人生を注ぎ込みはじめた³³⁾。TSMCは、台湾半導体メーカーの最大手とはいえ、企業の規模では、依然として、中小企業の典型である。但し、台湾半導体産業が開拓したファウンドリービジネスは、多くの才能を持つ技術者たちに、大きな夢を与えている。つまり、半導体産業における徹底した垂直分業構造の形成は、各製造工程に技術革新の誘因 (incentive) を作り出し、それぞれの分野で競争し合いながら、ダイナミックな産業構造を形成している。台湾半導体産業は国内のみならず、世界的にも大きな影響を与え、例えば、TSMCの海外取引先は、70%を超え、半導体先進国の大手メーカーのほか、シリコンバレーに小さな一室しか構えられない無名なデザイナーにも、頭脳で一攫千金の機会を与えたのである。現在、台湾やシリコンバレーの半導体メーカーは、プロセス・設計 (IP, システム特許) など、半導体産業の情報をインターネット上などで公開しており、IPの供給を専門に行うメーカーも現れは始めている。そのため、インターネットさえあれば、世界中どこでも、この公開されたIPを活用することにより、最先端の設計・開発ができるようになってきている。この時代の流れから、一つ伺えることは、今後、ファウンドリービジネスの役割は、ますます重要になりつつあり、世界半導体産業における台湾メーカーの最大な貢献として評価しうるだろう。

谷光 (1999) は、米国以外で日本だけが半導体大国となった原因を、(1)日本人が極めて好奇心に富んでいること、(2)トランジスタ技術を受け入れる技術的土壌があったこと、(3)トランジスタを事業として興そうとする起業家の存在、(4)物作り蔑視の思想が日本社会にはないことなど、四点を挙げられている³⁴⁾。半導体産業の世界市場における日本メーカーのシェアは、1988年にピークの52%に達したが、1990年代に入って、低落の一途を辿り、1998年の

33) 1952年9月電機学士、1953年9月電機修士。張忠謀 (1998) 『張忠謀自傳 (上冊) 1931-1964』, 天下文化, P. 81-P. 89

34) 前掲書, P. 214-P. 215

29%となり、ピーク時の半減となってしまったのである。その背景には、二つの要因が考えられる。一つは、1985年のプラザ合意により、円高に伴い、電子産業を中心に、製造業の海外シフトが進み、半導体需要が国内から国外へ移行してしまっただことである。もう一つの要因は、1989年代まで、日本が世界をリードした民生用電子機器が成熟期を迎え、電子産業の担い手がパソコンに移り、この分野では、米国が圧倒的な強みを発揮することになったことである。すなわち、時代は日本が強かった「アナログ (analog) 中心の時代」から、PCで象徴される「デジタル (digital) 中心の時代」へと移り変わり、日本はこの「デジタル革命」の波に取り残されてしまったのである (牧本, 2000)³⁵⁾。台湾の半導体メーカーは、常にシリコンバレーの最新の情報が流れ、製造品目も巧にアメリカと競合しない形で、OEM生産を行っている。部品だけの製造を行うと競争により、値崩れのリスクがつきまとい、こうしたリスクを避けた経営戦略を考案したわけである。

本稿は、学習効果及び集積の経済の視点から、台湾半導体産業におけるファウンドリーと汎用メモリビジネスを分析した。台湾の半導体産業は、政府の育成政策のもとに、高成長を果たしてきた。多くの起業家、経営者は、台湾中小企業特有の性質を生かして、垂直分業を徹底し、多彩な半導体関連企業の群れが生まれ、産業全体は活気に溢れ、台湾の半導体産業の特徴となっているほか、垂直分業の効果として、各生産工程における学習効果が生じ、技術革新の要因に繋がる。一方、世界IT産業の製造拠点となりつつある台湾では、半導体産業の供給と需要の市場が同時に作り出したため、集積の経済の効果が大きいと見られている。この二つの要因によって、台湾半導体産業の発展を可能にしたことを筆者が考えている。そして、台湾のモデルは、日本、或いは発展途上国の地域産業育成、発展政策を考案する際、大いに参考となるだろう。

35) 牧本次生 (2000) 「半導体産業の再生と再建に向けての提言」『電子』, 日本電子機械工業会, vol. 40 No. 2, P.8-P.16

今後の研究課題として、先進諸国と比較研究を行い、台湾半導体産業における各工程の特徴及び競争原理を模索することにしたい。