

2008/08/19

第2章 SEMATECH* メンバー主導で、先端量産技術開発実用化に挑戦

SEMATECH は米国半導体産業の復権とその後の世界半導体産業の技術開発に貢献し、米国にとっては大成功と言えるコンソーシアムである。ここではその SEMATECH の活動経緯と成果を整理した。先ず SEMATECH 設立当時の時代背景を振り返り、次いで設立から現在に至るまでの SEMATECH の主な歴史を記述し、SEMATECH でどのような成果が生まれ、産業育成に貢献したかを述べ、成功要因を分析する。SEMATECH の特徴としては、20 年も続いていること、実践的な実用化研究を重んじていること、SEMI と協業して世界標準を決めていこうという戦略に裏付けられていること、1998 年以降はチップメーカーのみでなく材料、装置、ソフトなど世界のあらゆる関連企業に対して次世代技術開発の場を提供する努力を継続していること、会員企業への貢献度評価 (ROI) を定期的に行って事業に反映していることなどが上げられる。その活動は学界の支援、国立研究所の支援を幅広く手厚く受けている。また SEMATECH は技術開発のみでなく産業界を支える人材育成の助成も行い、更に企業誘致などで地域貢献もしている。本報告では SEMATECH ボルカリ社長とのインタビューも織り込んでいる。

1. はじめに

International SEMATECH のホームページ¹⁾に掲載されている年次報告書 (Annual Report) を読むと、参加企業の知的財産権は尊重しながらも、出来るだけ透明性を保とうとしているのに気が付く。日本の超エルエスアイ技術研究組合²⁾が大成功を収めたように、この SEMATECH も米国にとっては大成功であった。米国半導体産業の復権に貢献し、その後 International SEMATECH と名を変え、再び SEMATECH と名称変更**しているものも、その間次第にオープン化し、当初の国策コンソーシアムから脱皮を図り、グローバルな観点から世界の半導体メーカー会員企業に成果を提供し続けて、現在に至っている。

* SEMATECH は SEMiconductor MANufacturing TECHnology の略であり、本文内で使用している SEMATECH、International SEMATECH、ISMI、ATDF、SEMI/SEMATECH 及びそれらのロゴはすべて登録商標である。そのため本文では敢えて日本語訳にせずそのまま使用する。本書ではその他 Selete など日本の登録商標も多数使用させて頂いた。

** リエゾンの谷奈穂子氏によると、SEMATECH の正式名称は当初から一貫して SEMATECH であり、その後、国際化に伴い International SEMATECH のブランドを採用したが、2004 年にコーポレートアイデンティティを見直すに当り、業界で通常使われている SEMATECH という短いブランドに変更した。International が無くても国際化路線には変更は無いとのことである。

一方日本でも超エルエスアイ共同研究組合後、10年ほど前から再び民間企業出資の株式会社半導体先端テクノロジーズ(Selete)と、国の出資による技術研究組合超先端電子技術開発機構が発足し、他の共同研究組織も誕生、変遷を重ねながら現在に至っている。是非日本もこのような共同研究を有効に活用し、産業の活性化に役立ててもらいたい。³⁾

ここでそのSEMATECHの経緯と成果を再度整理しておくことも、日本の産業活性化の参考にする上で有意義と考える。本章ではまずSEMATECH設立当時の時代背景を振り返り、次いで設立から現在に至るまでのSEMATECHの主な経緯を記述し、その結果、SEMATECHでどのような成果が生まれ、その技術がどのように産業育成に貢献したかを述べ、その上で成功要因を分析する。

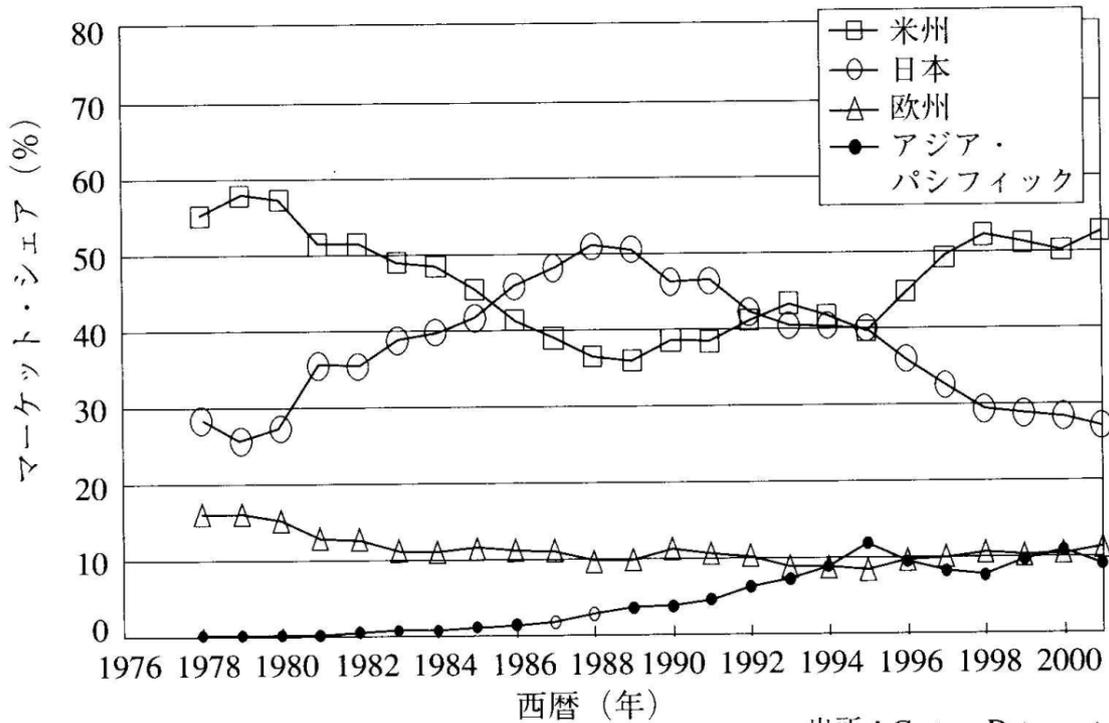
2. SEMATECH 設立時の時代背景

図1のグラフは小宮啓義氏著「日本半導体産業の課題」⁴⁾に引用されているもので、米ガートナー・データクエスト(Gartner Dataquest)社の調査による半導体メーカーの国籍別市場占有率の推移を示したものである。グラフの下にSEMATECHに関係する主要年表を示した。1970年後半まで圧倒的市場占有率を占めていたのは米国企業であった。それが超エルエスアイ共同研究組合の効果もあって1980年代は日本企業が進出し、1985年には両者が拮抗し、やがて日本企業が抜き去る時代が来る。しかし1988年-1989年を底にして米国企業が巻き返し、1992年-1995年の両者拮抗時代を経て、以降、再び米国企業の再逆転となった。一方日本企業は韓国、台湾企業の追い上げもあり凋落している。ここで米国企業の市場占有率が落ち始めた1980年から1989年に底を打つまで、米国ではどのような対策が検討、実施され、そしてそれがその後どのように引き継がれて行ったのかを概観して見よう。そのためには単に半導体業界のみでなく、もっと広く米国の産業競争力を見なければならぬ。

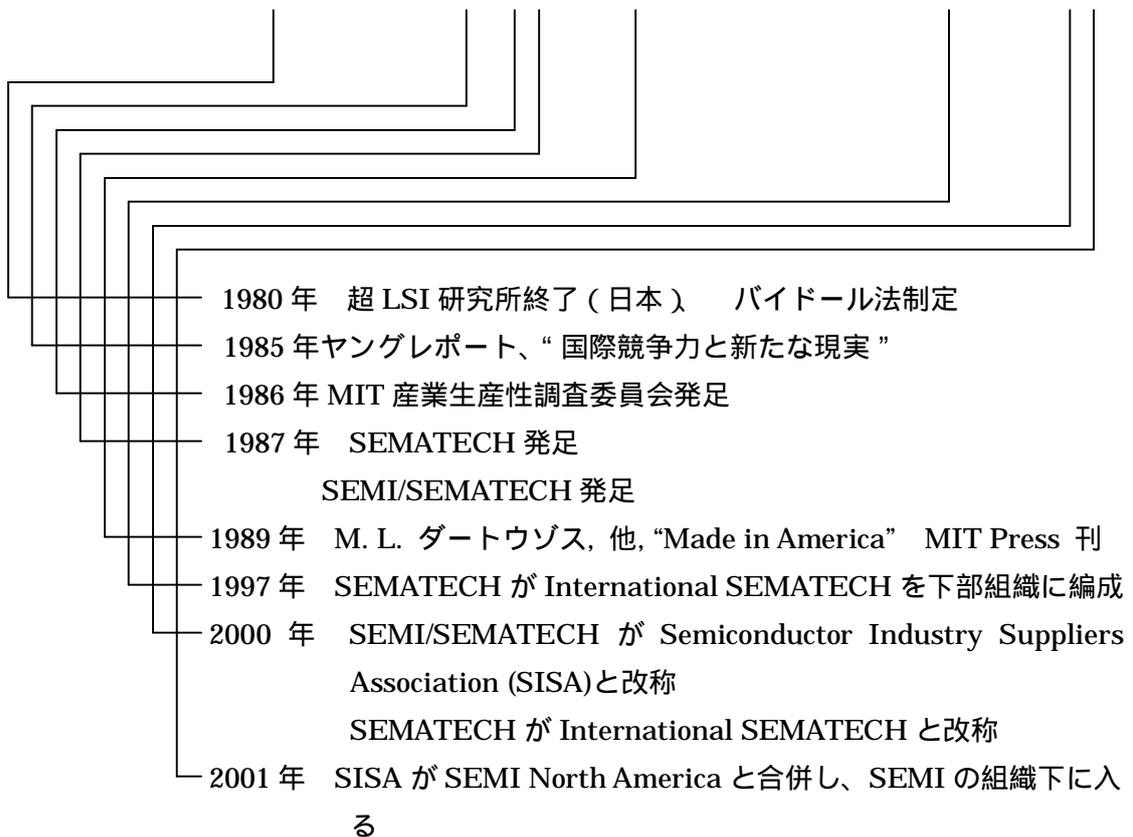
1980年代の米国は膨大な貿易赤字と財政赤字を抱えていた時代であった。建て直しを図るロナルド・レーガン大統領の下に1983年6月、「産業競争力に関する大統領諮問委員会」が設置され、ヤングレポート「国際競争力の新たな現実」の報告、バイ・ドール法の施行と続く。⁵⁾1986年にはマサチューセッツ工科大学(Massachusetts Institute of Technology以下MITと記す)が「産業生産性調査委員会」を発足させている。これはコンピュータサイエンス研究所所長のM. L. ダートウゾス教授を委員長とし、副委員長に経済学科のR. M. ソロー教授、主査に原子力工学科R. K. レスター教授を配して、14名の委員で構成する委員会であり、1989年に「Made in America」をまとめている。⁶⁾これは半導体業界に限定するものではなく、広く米国産業界向けのものであるが、図1の米国企業の半導体市場占有率が底を打つ時点で提言書がまとまっており、半導体業界の分野にとっても時宜を得た形になった。

図 1 半導体メーカーの国籍別市場占有率推移と関連する米国の主なエポック

グラフは小宮啓義; 「日本半導体産業の課題」 p.8 より⁴⁾



出所：Gartner Dataquest



2003年 ISMI 設立
2004年 International SEMATECH を SEMATECH に改称
ATDF 設立
2007年 ATDF が SVTC Technologies と合併

米国ではこのような産官学の動きがあって、アンチトラスト法（米国における独占禁止法）の下でも、政府の補助金が出て、日本の超エルエスアイ技術研究組合共同研究所(以下第1章²⁾と同じく超 LSI 共同研究所と記す)のような共同研究体制が推奨されるようになり、1987年に SEMATECH(SEMiconductor MANufacturing TECHnology)が発足した。尚、当時の時代背景を映す書も数多い^{7)・11)}ので、詳細に興味をお持ちの読者は多くの著書から総合的に検証されるとよい。

3 . SEMATECH 及びその関連組織の歴史 ^{12) 14)}

1980 年以来、米国製半導体の世界市場での占有率が減衰していることを踏まえて、米国半導体工業会(Semiconductor Industry Association 以下 SIA)と米国半導体研究コーポレーション(Semiconductor Research Corporation 以下 SRC) が 1986 年 5 月に共同体設立計画を策定する委員会を設定し、上記 SEMATECH が結成された。半導体製造における共通的な技術課題を解決する目的で、1987年に会員企業から計 1 億ドル/年、国防省から 1 億ドル/年の、合計 2 億ドル/年を投じ発足している。¹⁶⁾

当初の会員企業はアドバンスド・マイクロ・デバイス(Advanced Micro Devices Inc.、以下 AMD)、アメリカン・テレフォン・アンド・テレグラフ(American Telephone and Telegraph Co. 以下 AT&T)、ディジタル・イクイプメント・コーポレーション (Digital Equipment Corp. 以下 DEC)、 Harris (Harris Corp.)、ヒューレット・パッカード (Hewlett-Packard Co. 以下 HP)、インターナショナル・ビジネス・マシーンス(International Business Machines 以下 IBM)、インテル (Intel)、 L S I ロジック(LSI Logic)、マイクロン(Micron Technology)、モトローラ(Motorola)、ナショナルセミコンダクター (National Semiconductor)、ロックウェル(Rockwell)、テキサス・インスツルメンツ(Texas Instruments 以下 TI) である。

因みに 2007 年 12 月末時点の SEMATECH と ISMI(後述)の主な会員は、AMD、HP、IBM、Intel、インフィニオン(Infineon Technologies、独)、マイクロン、National Semiconductor、NEC エレクトロニクス(NEC EL、日)、パナソニック(Panasonic、日)、キマンダ (Qimonda、上記 Infineon Technologies 社のメモリ製品部門、独)、ルネサス (Renesas、日)、サムソン(Samsung、韓)、スパンション(Spansion Inc.)、TI、東芝(Toshiba、日)、TSMC (Taiwan Semiconductor Manufacturing Company, Limited、台湾積體電路

製造股份有限公司、台湾)と国際色豊かに大幅に入れ替わっている。これについては5.4で後述する。尚、国名を記述していない企業は総て米国企業である。

話を元に戻して、当初のSEMATECHの運営には、会員半導体メーカーの他、国防省高等研究計画局(ARPA)、SEMI/SEMATECH(後述)、およびSRCも参加していた。その拠点はテキサス州の州都であるオースチン市であり、1988年から製造関連技術基盤を強化するための研究開発活動が開始されている。1991年米国の国家半導体諮問委員会〔National Advisory Committee on Semiconductors (NACS)〕は、後の半導体技術ロードマップの先駆けとなる予測を発表し、それを受けてSEMATECHはそれまでの直径6インチから直径8インチ(200mm)ウエーハ対応ラインに改変する作業を開始した。SEMATECHは当初デバイス、プロセスの開発に重点を置いていたが、その後日本の超LSI共同研究所²⁾の方針と同様、主として半導体生産設備開発に重点を置くように軸足を移している。¹⁷⁾これが効を奏し、図1に見られるように、1994年までには、米国籍の半導体メーカーは市場競争力を回復し、市場占有率も日本企業と拮抗するに至り、1996年には半導体製造装置メーカー共々、その復権が明確になった。

そして1995年政府資金援助が終了し、SEMATECHに非米国籍企業の参加が認められるようになると、米国籍企業6社と非米国籍企業7社とで、SEMATECHの下部組織として、直径300mmのシリコン基板を用いるLSI生産工場のための装置及びその関連の標準規格や仕様を決めるための組織I300I(International 300mm Initiative)を設けた。そして1997年、I300Iは同じく300mmウエーハ技術を検討していた日本の300mm半導体技術連絡会J300と共に、グローバルな共通ガイドの設定に関する「300mm半導体工場のためのグローバル・ジョイント・ガイダンスの同意書」(Global Joint Guidance Agreement)に署名して標準化のリーダーシップを握った。

更に1998年SEMATECHは、国際化を進めるための新しい下部組織としてInternational SEMATECHを発足させた。これはその後、アジア、ヨーロッパおよび、米国のメンバーが、共同で半導体製造技術の研究開発を推進する世界規模のコンソーシアムに順調に成長した。そこで2000年1月、SEMATECHは自らの名称もInternational SEMATECHに改称した。2002年には東京エレクトロン(株)がInternational SEMATECHの装置供給業者用施設を利用する参加企業になっている。

2003年までに、International SEMATECHは、ニューヨーク州やテキサス州などの地方政府とも研究開発業務で連携できるような制度を整えた。そして同年ニューヨーク州立大学オルバニー校(第4章参照)での、極端紫外線(EUV)プログラムを公式にスタートさせた。このオルバニーナノテク研究所のSEMATECH管轄部門は現在International SEMATECH Northと呼ばれている。

そして同年11月にはInternational SEMATECHは新たに、半導体製造における生産性向上とコスト低減を推進するため、自前のコンソーシアムであるInternational SEMATECH Manufacturing Initiative(ISMIと略されている。正式名称、略称いずれも

登録商標なので、以後原文のまま使用する)を発足させた。SEMATECHに参加していない企業でも ISMIに参加できるようにして門戸を広げている。¹⁴⁾ 2004年にはリソグラフィに関する会議を開催、同年4月テキサス州およびテキサス大学と共に先端材料研究センター〔Advanced Material Research Center(AMRC)〕の設立を発表、そして同年の半ばには生産性(Manufacturability)や収益性を含めた研究をするため、1988年より試作ラインとして使っていた施設をAdvanced Technology Development Facility(ATDFと略されている。これも登録商標なので以下原文のまま使用する)として子会社化し、SEMATECHに参加していない企業でもATDFを活用できるようにして、一層開放の度を進めている。¹⁴⁾ 図2はATDFの写真として公表されたものであるが、¹⁸⁾ これはSEMATECH全景写真でもある。広大な敷地面積内に、62000sqft(5600m²)のクリーンルームを持ち、その内42000sqft(3800m²)がクラス1(1ft³内に0.5μm以上のごみが1個以下という清浄な空間)である。

そして、2004年9月、International SEMATECHはオースチンの本体部門を再びSEMATECHという名称に戻した。International SEMATECHの名称は下部組織として残し、オルバニーにその下部組織としての本社機能を移している(第4章参照)。SEMATECHの本社は依然としてオースチンにあり、2005年にはプログラム主体の会員制にして、現在、完全グローバルにし、企業が参画しやすいように門戸を広げている。¹⁴⁾そしてATDFは2007年12月、SVTC Technologiesと合併し²⁰⁾⁻²³⁾その基盤を更に強固なものにした。この合併は、「幅広いテクノロジー関連企業に、先端半導体プロセス装置や機能を、より確実に且つコスト効果を高めて提供するためのもので、今後の半導体やナノテクノロジー技術開発の強力な試作ファクトリーの誕生である」として発表されている。²⁰⁾ ATDFもSVTCも共に名称に変更は無い。

もう一つの流れとしてSEMI/SEMATECHの活動がある。^{20)・26)} もともと半導体の製造装置や材料の標準を作ってきたSEMI(Semiconductor Equipment and Materials Institute)は、その性格上、広く国際標準を決めねばならない立場から、米国内のみを向いてスタートしたSEMATECHより一歩先んじて国際化を目指し、SEMATECH発足の年、1987年に名称の最後の単語を変え、SEMI(Semiconductor Equipment and Materials International)に改称している。

一方、米国内を向いて設立されたSEMATECH参加企業に対応すべく部品、材料、装置メーカーをまとめ、SEMI/SEMATECHという国内向けの組織を、SEMATECH敷地内に作った。²⁴⁾²⁵⁾ 一時はこのSEMI/SEMATECHに185を越す企業が参画し、²⁶⁾他のコンソーシアムや国立研究所²⁷⁾等との提携も盛んに進めてきたが、逆に他との重複も多く次第に参加企業も減少するようになった。そこで組織活性化をめざし2000年にはSemiconductor Industry Suppliers Association(SISA)と改称する^{24)・28)}も、翌2001年にはSEMI北アメリカ支部(SEMI North America)と合併し、SEMIの組織下に戻っている。²⁹⁾³⁰⁾ ともあれ、このように装置や部材の標準を作成する機構と直接タイアップして活動を進めて来

図 2 SEMATECH Austin 及び Advanced Technology Development Facility (ATDF) の全景 D. Anderson; SEMATECH Symposium Japan 2007 予稿集¹⁰⁾



(写真の使用を許諾された SEMATECH 広報部と、斡旋されたセミコンダクタポータル社長谷奈穂子氏に感謝する)

たことは、SEMATECH の一つの特徴と言える。

以上“歴史的な観点から”、SEMATECH に見られる特徴は

1. 20 年も続いていること、
2. 最初はデバイス、プロセス技術主体だったが、すぐ日本の超 LSI 共同研究所同様、設備開発、米国系企業の設備産業育成に主力を置きなおしていること、
3. SEMI と協業して、仕様を定めて世界標準を決めていこうという戦略に裏付けられていること、そして
4. 1998 年以降門戸を広く開けておき、チップメーカーのみでなく材料、装置、ソフトなどあらゆる企業が次世代技術開発に参加しやすい環境を作る努力を継続していることにある。

4. SEMATECH の主な成果と技術移転

4.1 特許から見た技術波及効果

通常、ある組織の技術成果あるいは移転実績を計るモニターとしては、特許状況（出願数、権利保有数、分野など）を調べるのが手っ取り早い。開発された技術の内、特許として認められるレベルの技術はどのくらいあるのか、その技術はどのように産業界に波及したのかなどを調べれば、成果の客観的な評価が出来るからである。それには、特許マップを作るのが常套手段である。^{31) 32)}

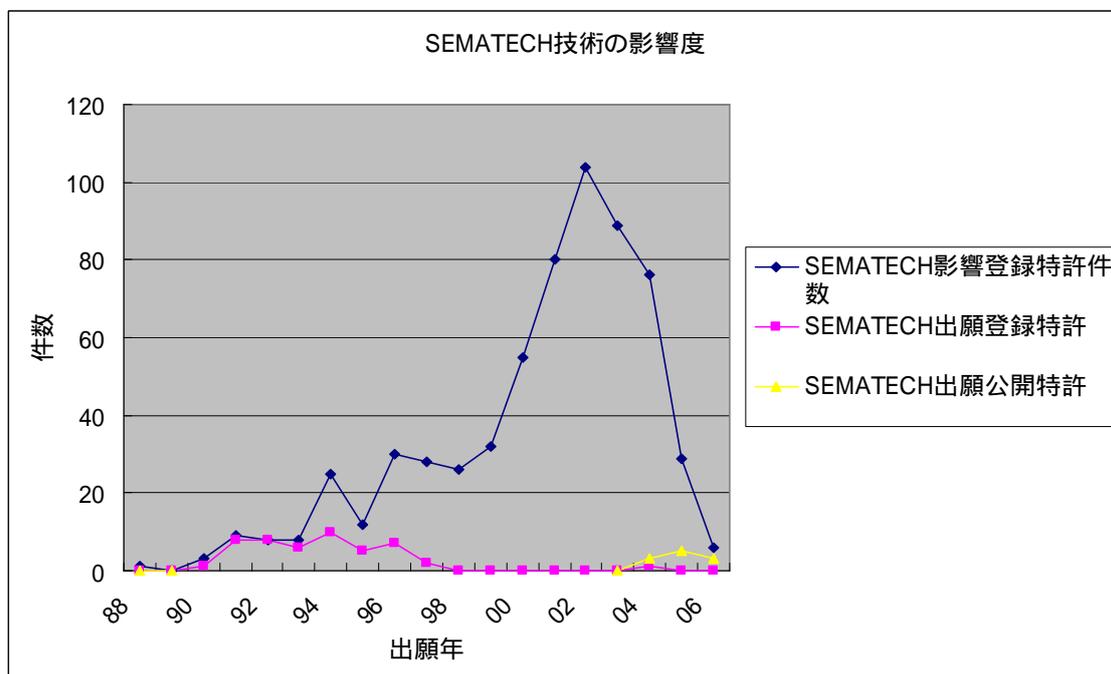
2007年8月15日時点で、米国特許庁〔United States Patent and Trademark Office (USPTO)〕のホームページ³³⁾にアクセスし、Quick Search（以後、実際に試みる読者のためクリックし易いようにホームページで使われている用語をそのまま記載する）を試みた。入力する term として SEMATECH と International SEMATECH を記入して検索すると、SEMATECH または International SEMATECH が出願人になっている登録特許が 58 件、公開特許が 12 件ヒットした。SEMATECH または International SEMATECH という言葉が明細書や表紙のどこかに記入されている All Field で検索すると、登録特許が 619 件、公開特許が 302 件ヒットする。米国では公開制度の発足が遅かったため、登録件数より公開特許件数の方が少ない。

図3は登録特許の出願年次別の推移を表すグラフである。これより SEMATECH、または International SEMATECH は 1988 年から 1997 年までは出願しているが、1998 年以降は殆ど出願していないことが判る。先に見た通り International SEMATECH が発足したのが 1989 年なので International SEMATECH 発足後は、ずっと特許出願して来なかったことになる。一方、公開特許を調べてみると、2004 年から SEMATECH、又は International SEMATECH 出願特許が掲載されているので、再び戦略転換し特許を出願するようになったものと思われる。

ここで All Field の場合は、出願人として記載されている場合と、明細書の中で発明者が引用している場合、及び審査の過程で審査官が引例として参照した場合のすべてが含まれる。従って図3の All Field から、SEMATECH 出願分を差し引けば、その差は SEMATECH または International SEMATECH の技術が、大なり小なり程度の差はあれ、何らかの形で影響を及ぼしたと考えられる特許の数になる。「大なり小なり」という意味は、「SEMATECH の技術を受けて発展させた場合は無論のこと、単に対比資料として引用したもの、あるいは審査官が審査上引用したものも含まれるが、少なくとも何らかの関連があるというものまで含めて」ということである。

米国の場合、登録特許 (PatFT) は 1976 年以降が掲載されており、公開特許 (AppFT) は 2001 年からである。従って All Field の登録 619 件と公開特許 302 件とが重複している部分があるので、厳密な傾向を把握するため先ず登録特許 619 件分について注目すると、

図3 登録特許件数から見た SEMATECH 出願特許件数の推移と、SEMATECH または International SEMATECH という語が明細書あるいは表紙に含まれる特許出願件数の推移 (2007年8月15日アップデート分まで)



SEMATECH と International SEMATECH 出願特許 58 件が、All Field でヒットした登録特許 619 件からそれを引いた 561 件に、何らかの影響を与えたと考えて良い。即ち登録特許件数で判断した場合、SEMATECH と International SEMATECH が開発した技術力は約 10 倍の影響を貢献度として産業界に与えたことになる。そしてそれは図 3 のように SEMATECH 出願から約 3-4 年後より顕著になってきている。これは出願から登録までの過程を考えれば肯けることである。以上は厳密性を考えて登録された特許の推移のみ見た結果であるが、公開特許を含めて考えたとしても大勢は変わらない。詳細は紙面の都合で省略するが、公開分を加味した検討結果でも、SEMATECH と International SEMATECH の技術が約 10 倍となって産業界に貢献した計算になる。

4.2 技術移転の主な具体例

具体的にどのような技術分野においてその成果が移転されたのであろうか。技術移転に関しては既に井上弘基氏の研究論文“米国の半導体製造技術 R&D コンソーシアム = セマテックについて”³⁴⁾の 3 表に 1994 年までの分がまとめられているので、それに最近の SEMATECH の年次報告書¹⁾や各メーカーのホームページから拾い集めたものを付け加え

て整理してみたい。尚ここでは、技術者にとっては馴染み深いので、企業名、装置名などは敢えて日本語に翻訳せず、一般に使われている英文のままにしてある。また企業の中には、その後、社名変更、吸収合併、あるいは事業解散したものも含まれているが、ここでは SEMATECH の貢献度を歴史的に見ているので、文献中の名称をそのまま使っている。

少々専門的になるので、理解の一助とするため半導体デバイスを生産する工程を説明しておく。半導体デバイスの生産工程では、マスク上の回路パターンをウエーハに転写する工程を繰り返す。その回路パターンをマスク上に描画する装置と、ウエーハに転写する露光装置が重要な微細加工技術の要となる装置である。この工程に使われる技術をリソグラフィ技術と言う。そこで、先ずこのリソグラフィ設備関連を<リソグラフィ>として以下にまとめた。また半導体 LSI を生産する工程としては、半導体ウエーハにトランジスタを形成したり、そこに金属配線を張り巡らしたり、またそれを絶縁するため絶縁膜を付着する。そしてそれを微細加工するのがエッチングと呼ばれる工程である。更に多層配線を可能にするため表面を平坦化する化学的で機械的な研磨 (Chemical Mechanical Planarization、または Chemical-Mechanical Polishing とも言う。以後 CMP と略記) をする工程、洗浄工程、電子やホールになる不純物にエネルギーを与え高速にしてウエーハに添加するイオン注入工程などを経る。それらの技術をまとめて<ウエーハ工程>として以下に記載した。またデバイスを作る上で、さらに計測、自動化などが見逃せない。ここでは<測定・計測・制御>とその次の<製造自動化>にまとめて、順次整理している。

<リソグラフィ>

SVGL(Silicon Valley Group Lithography Systems, Inc.)による、ウエーハ露光装置 Micrascan II(i 線、ステップ走査式縮小ミラー投影露光装置)の開発や、Etec Systems Inc. による電子ビーム露光装置 MEBES IV(マスク描画ないし将来のウエーハ露光装置)の開発などが当初の例として挙げられる。SEMATECH は当初一括してウエーハに転写する装置の開発を行ったが、その後ステッパの開発に転じ、GCA 社を支援して成果を上げた。³⁴⁾そして現在は ASML 社の液浸露光装置と、次世代用として有望視されている EUV 露光技術に注力している。¹⁾ 特に EUV 露光技術としてはオルバニーナノテク(本書第4章参照)に納入されている ASML 社のアルファード機を用い、そのインフラとして Angstrom Measurements, Inc や日本の Lasertec 社製品などを評価し¹⁾、マスク検査装置などの育成を行って周辺インフラの整備に傾注している。産業の振興という意味でこのような総合的配慮の意味は大きい。

<ウエーハ工程>

ウエーハ工程としては 絶縁膜や金属膜を成膜技術(Chemical Vapor Deposition: CVD)そして最近ではそれを原子層ごとに積層する技術(Atomic Layer Deposition: ALD)、CMP 技術、エッチング・洗浄技術、イオン注入技術などが基幹技術である。SEMATECH

はそのすべての分野で企業育成に努めており、Applied Materials Inc、Novellus System Inc.、Lam Research Corp.、などと共同開発を行って企業を育成している。¹⁾³⁴⁾

例えば、多層配線関連を見ると、 のために Westech Systems Inc.による、CMP 装置の開発がある。また のため Genus Inc.によるタングステンシリサイド CVD 装置の改良・改善（稼働率および処理能力の向上）や、 の技術として Lam Research Corp.による、枚葉式アルミエッチャー装置 Lam 4600（ECR：Electron Cyclotron Resonance 方式採用）の改良・改善（稼働率・クリーン度の向上）などが主な成果である。¹⁾³⁴⁾

<測定・計測・制御>

微細加工を行う上で製造装置以外にも重要なのは、加工されたものの計測と形状観察技術である。加工条件のモニターや加工したものの観察技術はデバイスメーカーにとっては非競合分野（pre-competitive な分野）であり、しかも必須の技術である。SEMATECH は、この分野で上記米国企業のみでなく、日、独をはじめ世界中の測定機器メーカーに参入を促し、共同開発を行っている。¹⁾

<製造自動化>

近年の微細加工技術の進展は著しく、生産に当たってはコンピュータの助け無しでは不可能になってきている。生産途中の機器のパラメータ抽出や、装置間のインタフェースとなるソフト、あるいは工程管理モデルなどが重要になってくる。一貫生産自動化システム〔APC(Advanced Process Control)又は AEC (Advanced Equipment Control)〕の開発実用化には、別々の企業が作る装置間のインタフェースの規格化が欠かせない。SEMATECH の戦略もここで世界標準を作り出し、装置産業の振興に貢献しようとしている。¹⁾

以上から言えることは、SEMATECH は<リソグラフィ>から<製造自動化>まで、ウエーハ工程のほぼ全ての分野で、広範囲に実用化研究をしているという事実である。つまり、生産に関連するほぼ総ての分野を対象にしていることが特徴である。個別の開発レベルに関して、現在どの水準まで到達しているかは、年次報告書¹⁾やシンポジウム¹⁴⁾¹⁸⁾などで明らかにされており、いずれの分野でも最高水準である。

SEMATECH の成果はこれだけではない。産業を支える人材が居なければ工場を動かすことすらできない。SEMATECH は博士コースの育成からワーカーレベルの育成まで幅広く人材育成に力を入れていることは年次報告に記載の通りである。¹⁾またテキサス州に対しては SEMATECH が存在するだけで企業誘致に成功するので、「SEMATECH 効果」があるとされている。¹⁾

5 . 成功の要因分析

5.1 SEMATECHの構造と、他の組織との提携

発足初期のSEMATECHの組織は日本の超LSI共同研究所とほぼ同じ組織だった。その辺の事情は小宮啓義氏著「日本半導体産業の課題」³⁵⁾に明らかにされている。その後、米国の業界でもAT&Tなどの半導体分野からの撤退があり、変遷を重ねたが、SEMATECH自体は継続し、2007年に発行された2006年度年次報告書で、20周年特集号が組まれている。

このSEMATECHがなぜ20年間も続いたのか、成果の評価はどのようなプロセスで行われるのかという点に、読者は当然興味が湧くと思う。それに対してSEMATECH社長のM. ポルカリ博士は次のように答えてくれた。¹⁷⁾

質問 「SEMATECHが継続的に成果を生み出した成功の鍵は何か？」

回答 「いくつかの要因があるが、主なものとしては

(1) 企業との共同体制にある。技術者研究者の20%が企業からの契約出向社員で構成されている。

(2) 量産に耐えるソリューションを追求するという点に焦点を絞っている。

(3) 多くの代替技術の中から本流を識別し、R&Dの重複と無駄を省いてきた。

(4) 参加企業が主体的に決める意思決定システムも挙げられる。

(5) 適切な時点で技術を創出してきた。実に90%以上の技術テーマが納期通り提供できている。

(6) プログラムは参加企業のニーズに従って柔軟に対応、変化できる。

ことなどである。」

つまり20%の契約出向社員を中心として参加企業が主体的に決める意思決定に基づき、参加企業のニーズに柔軟に対応しつつ、参加企業の満足度を第一優先に配慮し量産現場にすぐ適用できる技術を納期通り提供し、無駄を省いているからだということになる。

SEMATECHの組織と他の組織との連携も見応えがある。既に小宮氏³⁶⁾がその著書においても説明しているが、2001年時点の全米の半導体産業分野の産官学協力体制を見ると、縦割り、横割りなどの区別無く、いかに関係部門が総力を挙げて協力体制を組んでいるかが判る。即ち国防総省、商務省、エネルギー省、その他環境庁〔Environmental Protection Agency (EPA)〕や国立科学財団〔National Science Foundation (NSF)〕などの政府機関と共に、産業界、大学、国公立研究所が緊密に連携を取り合っている。その全体構図の中でSEMATECHは米国内外の半導体メーカーをパートナー企業にして支えられ、一方SEMATECHも半導体メーカーや材料、装置、ソフトサービス企業などの産業界に貢献するというネットワークが構成されている。紙面の都合で図の掲載は省略したが、2007年のシンポジウムで発表されたウエーハ工程 (Front End Process FEP) におけるネットワークでは台湾、韓国の大学も含めて39名の著名な大学教授陣³⁷⁾が参画している。また同じく2007年のシンポジウムで発表されたウエーハ工程の中で、電極や誘電体材料技術に協力し

ている国立研究所との連携³⁸⁾からも、例えば微細構造解析に関して問題が生じたときには、すぐ国立研究所の大掛かりな施設を使って解析できるような体制が整っている。

5.2 メンバー企業重視の意思決定

このように強固に組み上げられた組織で、意思決定はどのようになされるのだろうか。また得られた成果を客観的に評価する仕組みはどうなっているのだろうか。メンバー企業の満足をどのようにして維持しているのだろうか。それに対して、ポルカリ社長は次のように答えてくれた。¹⁷⁾

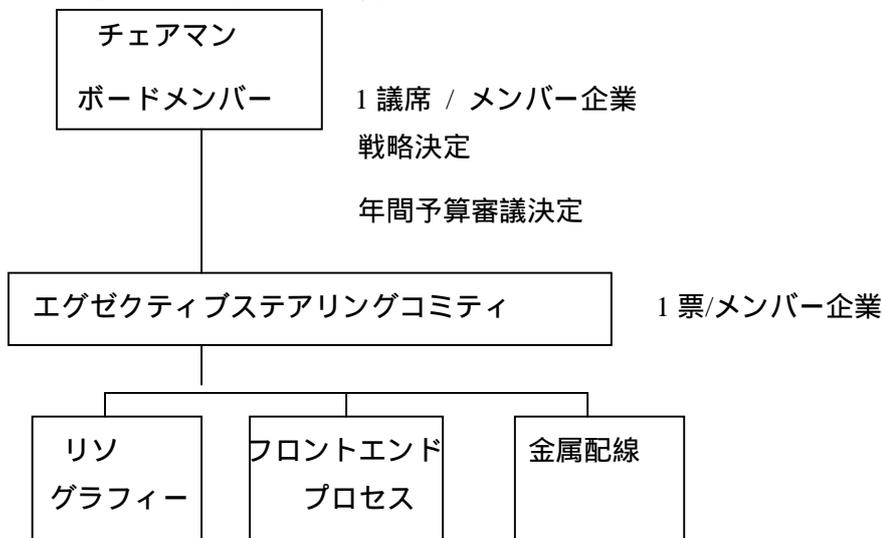
質問 「柔軟に対応、変化できる意思決定のメカニズムはどのようになっているのか。また成果はどのように計測する仕組みになっているのか？」

回答 「R&D プロジェクトの方針決定は各技術ワーキンググループとその上のステアリングコミティで練られ、SEMATECH のボードメンバーで審議決定される。すべてメンバー企業の代表が参画できるようになっている。またアドバイザー・グループも要所要所があり、プロジェクトのレビューや成果の評価(ROI 計算)をしている。」

ROI とは Return on Investment の略で、通常は投資効率のことである。この場合は SEMATECH 運営のための財務諸表上の ROI ではなく、参加企業が SEMATECH に投じた資金に対して、どのくらいの価値が参加企業に還元されたかという意味で ROI が使われている。ポルカリ社長の講演¹⁴⁾でも、「参加企業が SEMATECH に \$ 1 投じて、SEMATECH から何ドルの価値を引き出すかというのが ROI の意味である」と述べている。

質問 「意思決定組織はどうなっているのか？」

回答 「下記のようになっている。」



質問 「アドバイザリ・グループ (Advisory group) という言葉が年次報告書には出てくるが、それはどこに属するのか？」

回答 「これ全体がアドバイザリ・グループである。」

組織自体に新しいところは無い。強いて言えば各ワーキンググループとステアリングコミティとが直結しフラットな組織になっていることだろうか。因みに既述の発足 2 年後の方針転換に関しては次のように答えてくれた。¹⁷⁾

質問 「1987 年スタート時点では最新プロセス技術の開発にフォーカスを絞ったが、2 年後には最新製造設備開発にフォーカスをシフトさせたと聞く。それは事実か？そしてそれが事実なら誰がどのような理由でそのような決定を下したのか？」

回答 「プロセス開発から装置開発に主軸を移動したというのは、その通りである。当時我々のメンバー企業は、SEMATECH が最も効果的にインパクトを与えられる分野は、生産装置の開発とその改善の分野だと判断したためである。しかし 1990 年代中ほどからは、SEMATECH メンバーはコンソーシアムのフォーカスを拡大し生産装置の生産性やその改善だけではなく、リソグラフィ、配線、などウエーハ前工程の最先端技術開発にも注力するようにしている。」

質問 「超 LSI 共同研究所の所長であった垂井先生は、超 LSI 共同研究所の成功の鍵は生産設備開発に方向性を合わせたことだと主張されているが、SEMATECH もその思想だったと考えてよいか？」

回答 「我々もその通りだと思う。生産とサプライチェーン (supply chain) (筆者註：インフラ)は今でも SEMATECH の主要フォーカス分野である。」

以上の問答からも明らかなように、当初の成果の原因は製造設備開発に主軸をおいたからと述べている。現在は製造技術全般に力点を広げて来ているのは個々の設備開発だけでは生産ラインの効率向上という観点からは不十分と判断したためであろう。特に前章で見た装置間を繋ぐコンピュータ制御ラインを考えても、製造技術全般を視野に入れて装置開発を行わなければならない時代になってきている。

5.3 参加企業による成果の評価方法

それでは得られた成果の評価はどのようにして行うのだろうか。10 億ドルの桁で成果を金額換算し、メンバー企業に還元したと表明しているが¹⁾、誰がどうやって金額を算出しているのだろうか。それに対しては下記の問答がなされた。¹⁷⁾

質問 「先のご回答のように SEMATECH では参加企業の ROI を重要視しているが、研究

の ROI はみなし金額が含まれる。どうやって評価するのか？」

回答 「SEMATECH が参加企業に数式を示して、それに基づき、各企業が計算して申告する。SEMATECH はそれを集計して発表する。」

質問 「その場合、企業ごとに仮定や定義が異なることは無いのか？」

回答 「財務諸表に載るような現実の値 (Realized Value) と「みなし」が入った戦略的な値 (Strategic Value) がある。後者には、評価する企業により仮定や定義の差が考えられる。しかしその場合も毎年の変動が重要で、絶対値は問題ではない。相対値で評価している。」

この問答から判るように評価はある意味では内部評価であるが、しかし参加企業に ROI を計算させて、SEMATECH に参加していることの満足度を参加企業自身に確認している点では、外部評価と言っても良いだろう。SEMATECH 運営の基本にこの参加企業への ROI を置いていることが特徴と言える。それ以上に、成果を ROI という金額換算で、定期的に、はっきり把握するという仕組みは、大いに参考にして良い。

5.4 メンバー企業満足度第一の運営

意思決定メカニズムと成果の評価方法が判ったので、次に具体的な運営に関して尋ねてみた。¹⁷⁾ メンバー変更も著しいがそこに何か問題が潜んでいないか、あるいはメンバー変更は運営上支障となることはないのだろうかと考えたからである。

質問 「大変失礼な質問であるが、当初のメンバーと現在のメンバーとは大幅に入れ替っている。このような多くの企業が入れ替わる理由は何か。このようなメンバー企業変更は SEMATECH の運営に問題ではないのか？」

回答 「産業界に影響力のあるメンバー企業を保持することは、SEMATECH のビジネス戦略にとって大変重要である。現在 16 社 (筆者注: 2007 年 9 月のインタビュー時点は 14 社で、2007 年 12 月時点の数と異なるが、3 章記述に合わせ 2007 年 12 月時点の数に修正した) の企業が SEMATECH と ISMI に加入しているが、このメンバー企業の総売上高は世界の半導体総売上高の半分以上を占めている。つまり半導体業界を代表していると言える。

しかし我々は過去 20 年間で著しく変化し、非常に流動的な、移ろいやすい (筆者注: 対談では volatile という単語が使われた) 業界に居る。例えば当初のメンバー企業だった DEC と AT&T はこの半導体業界から撤退したし、他の企業も半導体の“製造”を前ほど重視しない方向に、つまり他の力と併せ持つような方向にビジネスの舵を切っている。そのような時代にメンバー変更が生じるのは至極当然である。」

質問 「つまり「20 年も経てばすっかり変わる。DEC や AT&T も撤退した。SEMATECH は状況に応じて体制を整え、半導体業界に貢献するようにしてきた。むしろ変化に柔軟に対応して、その時点その時点で、最も効率よく業界に貢献することを考えてきた」というこ

とで、むしろ柔軟な変化は長所という意味か？」

回答 「その通り。」

換言すれば、「組織運営としては、SEMATECH を必要とする企業が SEMATECH を活用しその成果を持ち帰ることで、SEMATECH の組織そのものが常に最先端企業に活用され、最先端技術の実用化に貢献すればよい。会員企業が入れ替わり立ち代り変わろうが、組織として生き生きとしていればよい」という考え方である。

ここで既述の図3の特許出願推移について確認した。設備産業を育成し、特許権で権利を保護する戦略とすれば、それが特許出願動向に現れるはずである。ところが1997年以降2003年まで出願記録が無い。あるいはあっても極めて少ない。これはどのような戦略を意味するのだろうかと気になったからである。

質問 「我々の調査によるとSEMATECHは1997年まで54件の登録特許を保持されておられる。しかしその後は特許出願をずっとしていない。2003年になってやっと公開公報に載るようになったが、これは何を意味するのか？ 戦略上の変化があったのか？」

回答 「SEMATECHは1997年以降特許出願を中断した。それは我々のメンバー企業が知的財産権の創造より、インフラストラクチャの形成に注力するよう要請したからである。その後2003年までに非常に多くの知的財産が貯まったので、2003年以降は再び特許出願を始めている。」

質問 「特許出願数以外に客観的に成果を評価する方法はあるのか？ どのようにSEMATECHでは成果の評価を行っているのか？」

回答 「もちろん特許出願も一つの指標ではある。しかし我々にとって、あるいは我々のメンバー企業にとってもっと重要なものも他にある。つまり評価対象の中には、ROI 計算結果や、また時宜を得た開発納期達成度、また有効な結果、更には新しいメンバーやパートナーや協力者を引き入れることなども含まれる。」

即ちSEMATECH自身の知的財産より、現実のメンバー企業からの要請と評価を重んじたということである。知的財産収入でSEMATECHの経営をまかなおうという戦略意識は薄く、あくまでも参加企業満足度第一ということであろう。

6 将来動向に備えて標準策定

SEMATECHの2006年度年次報告書によると、SEMATECHは「米国にとって技術戦略と方向を、関連する全産業に示し得る唯一のコンソーシアムである。450mm ウェーハ、3次元配線、193nm液浸、EUVリソグラフィ、チャンネル部の新材料、ゲートスタックなどの世界的、かつ先端的のプログラムを動かしている。またSEMI標準やロードマップ(ITRS)をリードしている。」という組織として位置付けられている。¹⁾ SEMI や ITRS

(International Technology Roadmap for Semiconductor 半導体技術の国際ロードマップ)との連携も大きな貢献であるが、本書では SEMATECH に絞って議論を進めてきたためあまり触れていない。しかし貢献度が大きいことはあらためて記述するまでも無い。

また 2006 年度年次報告書では「SEMATECH 活動初期からみると多くのことが変化したが、資源を掘り起こしリスクを共有して、共通の課題を解決するべく協力し合うことで、顧客に価値を生み出し最高の地位を保ち続けることを至上課題とするということ自体は何ら変わっていない。」と述べられている。そして 2006 年には「新加入メンバー3 企業〔マイクロン(Micron)、NEC、ルネサス (Renesas)〕で会員数 15 社となった。」とあり、上記のような内部評価では「\$ 7M - \$14M / 会員に相当する知的財産、生産性向上、コスト低減の価値を還元した。」とその成果を ROI に換算して明記している。

では将来に関しては、SEMATECH はどう見ているのであろうか。

質問 「微細加工技術探求後の次のパラダイム、つまり More than Moore、Beyond Moore に関してはどう考えるか。例えば IMEC などでは新しい研究のパラダイムとしてポリマーエレクトロニクス、次世代の記憶装置、そして自動車用ハイパワーデバイスなど、先を睨んだ検討がなされているように見える。³⁹⁾この点についてはいかがか？」

回答 「SEMATECH としては半導体デバイスをより機能的に、そして高速にするため、やらねばならないことがまだまだ多数あると考えている。そのため我々は我々のメンバー企業の為に最も役立つ生産性向上の解を見つける努力を継続し、チャレンジも続ける。しかし我々はまた代替技術として例えばナノインプリントリソグラフィ技術なども見据えて行く。ATDF でもナノテクノロジー材料や製造技術の開発を行っていく。(筆者註：インタビュー時はまだ ATDF と SVTC の合併前であった。) また SEMATECH もバイオ、薬品、食料、自動車安全対策、次世代通信などの分野も視野に入れている。その他にもテキサスはオイル産業が盛んなのでそれに関するセンサーや MEMS も考えている。しかし今はその前にもっとやることがまだまだあると考えているということである。」

つまりまだまだやることはたくさんある。特に個々の技術開発だけでなく業界方向付けにも意を配り、ガイドライン、標準作成を行って、産業界が効率の良い開発実用化研究を行えるように持って行こうということである。例えばその良い例は、次世代工場 (Next Generation Factory、NGF と略されている) のあり方として「NGF ビジョンガイドライン 19 項目」を提唱していることにも示されている。⁴⁰⁾⁴¹⁾

7. まとめ

以上 SEMATECH の歴史から見る特徴は、20 年も続いていること、米国系企業の設備産業育成に主力を置き、実学・実用化研究を重んじていること、SEMI を介して世界標準を決

めて行こうという戦略に裏付けられていること、そして1998年以降門戸を広く開けておき、チップメーカーのみでなく材料、装置、ソフトなどあらゆる企業が次世代技術開発に参加しやすい環境を作る努力を継続していることなどが上げられる。

運営は参加企業の満足度第一主義で、参加企業への還元を第一とし、成果は参加企業のSEMATECHへの投資に対する価値の還元を金額換算しROI (Return on Investment) として参加企業に計算してもらい、評価をきちんとしている。その参加企業も、半導体の売上高で過半数を越える企業を集める努力をしており、常に業界主流となることを心掛けている。SEMATECHは会員が牽引するところに特徴があり、それが長続きする秘訣であると思う。つまりSEMATECHのプログラムは会員によって始められ、運営されて、評価を受ける。

そしてその成果である技術の移転に関しても、例えば特許面から見るとSEMATECH保有特許数の10倍以上の貢献を産業界に及ぼしている。具体的に年次報告書の中では100件以上の技術移転、100件以上の技術者、技能者トレーニング、200件以上の技術レポート、プレゼンテーション、デモストレーション、会議などがなされたとある。¹⁾ 将来に繋げるためSEMIと連携し規格面での優位性を維持し、主導権を確保しようとしている具体例として、450mmウエーハ時代の規格標準作成も既に提唱されている。更に学界の支援、国立研究所の支援を幅広く手厚く受けている。そして産業界を支える人材育成の助成も行い、ひいてはSEMATECH効果を生み出し企業誘致などで地域貢献もなされており、総合的な産業直結型の仕組みを構築している。

謝辞

セミコンダクタポータル社編集長津田建二氏には semiconportal サイトに1の拙文を掲載して頂いた。又、セミコンダクタポータル社代表取締役社長でありSEMATECHの日本リエゾンである谷 奈穂子氏には、図らずもその拙文を原稿段階で英訳し、SEMATECHに送られて、後日SEMATECH社長マイケル・ポルカリ氏 (Dr. M. Polcari) との会見が出来るようご尽力頂いた。SEMATECH シンポジウムの折に快くインタビューに応じて下さったポルカリ社長に感謝すると共に、当方からの質問を予め回送して下さった谷社長と、それに対して回答を纏めて下さったSEMATECH 広報部ディレクターのアン・イングラダー (Ms Anne Englander) 氏、及びダン・マクゴワン (Mr. Dan McGowan) 氏に御礼を申し上げたい。また図の使用に関しSEMATECHの承認を得るに当たり、谷社長には大変お世話になった。そして多方面から色々ご助言を賜った SELETE 取締役 河村誠一郎氏、またNGFガイドラインに関してご助言を頂いたSEMATECH/ISMI日本リエゾンの中村守孝氏に、心より御礼を申し上げる。

(三浦義男、鴨志田元孝)

参考文献

- 1) SEMATECH ホームページ <http://www.sematech.org/>の About SEMATECH の所に年次報告書が掲載されている。
- 2) 垂井康夫：本書第1章。
- 3) 鴨志田元孝：“SEMATECH Annual Report を読んで”、SemiconPortal Site (2007.9)。
- 4) 小宮啓義；「日本半導体産業の課題」、電子ジャーナル刊(2004)の p.8、図 1-1
- 5) 例えば上山明博；「プロパテント・ウォーズ」、文春新書(2000)の p.124-127
- 6) M. L. Dertouzos, et al., 「MADE IN AMERICA」, MIT Press(1989); 依田直也訳 MIT 産業生産性調査委員会マイケル・L・ダートウゾス、リチャード・K・レスター、ロバート・M・ソロー；「Made in America」草思社(1990)の p.28、および委員会構成は p.456-p.465
- 7) エズラ・ヴォーゲル (E. F. Vogel) 広中和歌子、木本彰子訳；「ジャパンアズナンバーワン」TBS ブリタニカ刊(1979)、尚その後同著者、上田惇生訳；「ジャパンアズナンバーワン再考」TBS ブリタニカ刊(1984)、および同著者、福島範昌訳；「ジャパンアズナンバーワンそれからどうなった」たちばな出版(2000)が出ている
- 8) A. S. Grove；「HIGH OUTPUT MANAGEMENT」William Morris Agency Inc (1983)；A.S.グローヴ著、小林 薫、上田敏晶訳；「ハイ・アウトプット・マネジメント」早川書房刊(1984)
- 9) A. S. Grove；「ONE-ON-ONE WITH ANDY GROVE」, William Morris Agency Inc(1987)；A. S. グローヴ著、小林 薫監訳；「ワン・オン・ワン」, パーソナルメディア刊(1990)
- 10) T. J. Peters and R. H. Waterman, Jr.: 「IN SEARCH OF EXCELLENCE」, Harper & Row, Publishers, Inc. (1982); T. J. ピーターズ、R. H. ウォーターマン著 大前研一訳 「エクセレントカンパニー」講談社刊(1983)
- 11) 竹内弘高、石倉洋子；「異質のマネジメント」[日本の同質経営を超えて]マネージャー431 人現場からの提言、ダイヤモンド社(1994)
- 12) 例えば SEMATECH のホームページ
<http://www.sematech.org/corporate/20years.htm> に SEMATECH の Time Line が詳細に記述されている
また“THE WALL STREET JOURNAL”：JUNE 23, 1989 も参考にした
- 13) 例えば半導体コンソーシアム一覧を掲げているセミコンダクタポータルサイトの web
<http://www.semiconductorportal.com/GSC/shodescr.cfm?nm=International%20SEMATECH>
- 14) M. R. Polcari; "New Models for R&D Partnerships", SEMATECH Symposium Japan 2007 予稿集 p.3-p.15(2007.9)

- 15) 例えば The Wall Street Journal の June 23, 1989 の記事に More Competitors turn to Cooperation と題した記事が掲載されており、SEMATECH 黎明期の経緯が記述されている
- 16) M. R. Polcari; SEMATECH Press Conference
- 17) M. R. Polcari; 2007年9月13日筆者とのインタビューにて
- 18) D. Anderson; "A New Model for Research & Development", SEMATECH Symposium Japan 2007 予稿集 p.115-p. 122(2007.9)の p.117 下図、池田修二 ;“ ATDF のご紹介 ”、http://www.sematech.org//meetings/archives/other/7917/7_APDF.pdf (2006. 3. 15)
- 19) Giang Dao;"SEMATECH Overview", SEMATECH Symposium Japan (2006)
Http://ismi.sematech.or/meetings/archives/other/7917/1_SEMATECH_overview.pdf
- 20) SEMATECH News:" SVTC Joins Forces with SEMATECH Foundry ATDF",
<http://www.sematech.org./corporate/news/releases/20071204.htm> (2007)、日本語訳は C. Martell, D. McGowan, 谷 奈穂子 ;“ SVTC と SEMATECH の試作ファンドリ－ATDF 合併 半導体プロセス開発における協力試作ファンドリ－誕生 ” (2007.12.5)
- 21) ATDF の発表 <http://www.atdf.com/>; “Breaking News” (2007)
- 22) SVTC の発表 <http://www.svtc.com/breakingnews/index.php;> “SVTC and ATDF Merge” (2007)
- 23) <http://www.svtc.com/breakingnews/faq.php> ;” SVTC and ATDF Merge – FAQ” (2007)に、合併の理由、ベンチャーキャピタルの投資理由、合併契約の発効時期、トップマネジメント、従業員数、従業員の職の確保、ビジネスモデル、合併が顧客に及ぼす効果、双方のパートナー企業への影響、SVTC の歴史、ATDF の歴史などがまとめられている。
- 24) K. Framm and Q. Wang; "SEMATECH Revisited: Assessing Consortium Impacts on Semiconductor Industry R&D", Securing the Future: Regional and National Programs to Support the Semiconductor Industry (2003) Board on Science, Technology and Economic Policy (STEP), National Academies Press p.254
http://books.nap.edu/openbook.php?record_id=10677&page=254 の p.255
- 25) LTW Automation, Inc.のホームページ
<http://www.ltwautomation.com/homepage.shtml>の Links to Related Sites にロゴマークと内容が説明されている。SEMI の I の意味は SEMI Japan のホームページの SEMI at a Glance 掲載の年表も参照
- 26) Silicon Integration Initiative, Inc (1995 年 6 月 2 日)
<http://si2.org/Inthenews/pr1995/index.htm>
- 27) Sandia National Laboratories News Release (1998 年 2 月 18 日)

- <http://www.sandia.gov/media/semisema.htm>
尚、当時の米国半導体産業における政府 大学 産業界の協力体制は JEITA ホームページ http://strj-jeita.elisasp.net/pdf_ws_2002nendo/STRJ.pdf
- 28) Electronics Weekly (1999 年 12 月 7 日)
<http://www.electronicweekly.com/ARTICLES/1999/12/07/13908/SEMISematech+expands+scope+changes+name.HTM>
- 29) SEMI Japan のホームページ http://wps2a.semi.org/wps/portal/_pagr/136/_pa.136/699
記載の SEMI AT-A-Glance の年表より
- 30) PR Newswire Associate, Inc.
<http://www.prnewswire.com/cgi-bin/stories.pl?ACCT=104&STORY=/www/story/05-31-2001/0001504811&EDATE=#linktopagetop>
- 31) 特許マップ、パテントマップに関しては例えば中村茂弘、「攻めの特許とパテントマップ」,
発明協会刊(1993)
- 32) 鴨志田元孝 ; 「これからの知的財産実務」 3.4 章、税務研究会刊(2007)
- 33) <http://www.uspto.gov/patft/index.html>
- 34) 井上弘基 ; “ 米国の半導体製造技術 R&D コンソーシアム = セマテックについて ”
機械経済研究 No.24、 p.47 (1994)
- 35) 小宮啓義 ; 「日本半導体産業の課題」, 電子ジャーナル刊(2004)の p.121
- 36) 小宮啓義 ; 「日本半導体産業の課題」, 電子ジャーナル刊(2004)の p.93 図 5 - 1
- 37) R. Jammy ; “Front End Process Division Overview of Logic and Memory Programs”,
SEMATECH 20th Anniversary Symposium Japan 2007 講演予稿集 p.81-p.94 の
p.93 の上図
- 38) 同上、 p.93 の下図
- 39) 例えば <http://www.arrm.be/mainprogram.aspx> に IMEC の第 17 回年次研究レビュー
ー報告会プログラムが掲載されており、最後の日のセッションが More than Moore
について計画されている。
- 40) S. Kramer, “450mm Implementation—First Steps”, SEMATECH 20th Anniversary
Symposium Japan 2007 講演予稿集 p.39—p.49 p.44—p.46
- 41) J. Draina; “300mm Prime Productivity Improvement”, SEMATECH 20th
Anniversary Symposium Japan 2007 講演予稿集 p19—p.35