

サイエンス型産業における新規事業策定のための 論文書誌データベースの応用に関する研究

品川 啓介 (キヤノンマーケティングジャパン株式会社)

1. 緒言

本研究で扱う「サイエンス型産業」という言葉は、ここ 10 年くらいの間に使い始められた言葉であり、背景説明が無い場合に「サイエンス」と「産業」という語の組み合わせだけでは曖昧さを拭えないため、あえて「科学依存型産業」と記すことで特徴を明らかにすることもある。しかし、最近ではこの分野の産業の経済に与える影響が強くなってきており、科学技術白書(平成 20 年度版)にも「サイエンス型産業」という言葉が使用されるようになり、「サイエンス(自然科学)に準拠した産業群、あるいは自然科学の重要性がとりわけ高い産業群」として定義されるに至る。代表的な産業群としてはエレクトロニクス産業、IT 産業、医薬品産業などが挙げられ、これらの分野で生まれたモジュールをシステム化したアプリケーションには、TV (Television), PC (Personal Computer), DSC (Digital still Camera), DVD (Digital Versatile Disc), カーナビゲーションシステム、医療機器、太陽電池など枚挙にいとまが無く、サイエンス型産業は新市場の創出に欠かせないものとなっている。この「サイエンス型産業」の特徴は、課題の達成に基礎的な自然科学にまでさかのぼったアプローチが重要な役割を果たしていることである。さらに補足を加えると、現在の「サイエンス型産業」

は代表的な産業群から推察されるように、単一の自然科学分野のみに支えられている産業ではなく、数学、物理、化学、物理化学、化学工学、材料工学、機械工学、電気電子工学、医学、薬学他、異なる分野の複数の自然科学について基礎から応用、実用研究に至るまで蓄積してきた知見の融合の上に成り立つ産業であることである。このため、サイエンス型産業の研究進捗を分析するためには網羅的にこれらの知見を読み解く必要がある。

本研究に関わる先行研究は、Schumpeter のイノベーションの議論の後、研究開発と新産業の創造 (= 新製品と新ビジネス) の因果関係について欧米を中心にこれまで様々な研究と議論がなされてきた。代表的な研究としては、1960 年代の Mansfield など MIT の研究グループによる研究開発と新規ビジネスや産業創出に関する研究や、新産業創造におけるサプライッシュとデマンドプルの研究、最近では Cantwell の技術競争力とイノベーションに関する研究が挙げられる。いずれも、研究開発投資はイノベーションに大きな影響を与え、国や企業の発展に深く関係することが扱われている。これらの研究を通じて、自然科学分野の研究進捗調査の重要性についての認識が広まり、早くは化学分野における Chemical abstracts¹ や工学分野に範囲を絞った Compendex² による研究動向調査、最近では諸分野の実用技術を網

羅する特許データベースを用いた出願動向の調査などが試みられている。ところが Chemical abstracts や Compendex に代表される単一分野や特定範囲のデータベースによる科学研究進捗の分析は該分野の詳細な研究動向の把握には適しているが、最近の「サイエンス型産業」のように複数分野の科学知識の融合結果として生まれる産業を客観的に分析することが難しい。広範囲な産業分野の実用技術を網羅する特許データベースもあるが、「産業上の利用可能性」の追求を主目的としない自然科学の理論・原理などの研究が対象外となり、基礎から実用に至る技術を偏り無く分析する点で適さない。加えて特許データは公開までに審査手続きで2年程度の時間を要することからタイムラグが発生してしまう。以上から、現在「サイエンス型産業」の研究進捗の把握は特定の学会のトレンドや特許の出願動向の調査などに限られ、体系的かつ具体的なデータの取得・分析法がほとんどないのが現状である。

このため本研究では、自然科学分野のほぼ全領域において基礎研究から実用研究まで網羅する市販の論文書誌データベースを研究進捗調査の情報源とし「自然科学分野において毎年発行される論文数の推移が研究進捗や研究投資の集中の度合いを示す」と仮定し、客観的な検索式を設定の上、任意の分野に関わる査読論文を抽出し、毎年の論文掲載数がかかるように編集した後、該当製品の市場データと照らし合わせることで市場形成（市場の発生や成長）に与える影響を推測するとともに、その妥当性を確認する手法を検討する。現時点で市販の論文書誌データベースの検索可能な範囲は、論文中に記述されるタイトル（題目）、アブストラクト、著者キーワードに留まるが、これらには論

文の具体的な研究手法と結果、技術用語や事象を含むため、「サイエンス型産業」の種となる研究を抽出することができると考える。これまで、この視点からの論文書誌データベースの分析例は無いため、調査の手法も簡素で単純なものに限定されるが、これを利用することで少なくとも研究投資の急増する分野を把握することができ、研究開発に直接携わるメーカ、間接的関わりを持つアプリケーション製造メーカや商社などが新産業参画の準備を進めることができると考える。過去の事例として、青色発光ダイオードにおける ZnSe 結晶化研究や、超伝導素子開発研究など、たとえ研究数が急増したとしても回避できない物理限界に直面し実用に至らない例もあるが、それでも実用化の可能性の高い分野を最初に振り分ける指標として極めて有効であると考えられる。本研究では、エレクトロニクス産業における電子デバイス分野で、市場規模は小さいが、LSI (Large scale integrated circuits), FPD (Flat panel display) に並ぶ第三の波と呼ばれ³、大規模市場の出現が期待される MEMS (Micro electro mechanical systems) 産業を対象に選び、論文書誌データベースを活用して科学の進捗を明らかにする。なお MEMS は、機械要素部品であるセンサー、アクチュエータなどと電子回路を一つのシリコン基板、ガラス基板上に集積化したデバイスを指す。MEMS 分野の研究進捗を客観的に示すことは、まだ為されておらず本研究の目的達成のみならず、社会への貢献も大きい。

II. 調査手順

1. 調査に用いた論文書誌データベース

現在、自然科学分野を基礎研究から実用研究まで網羅する市販の論文書誌データベースとしては Web of science (米国 Thomson scientific 社) や Scopus (オランダ Elsevier B.V. 社製) 等が良く知られており、国立国会図書館や各大学図書館等で利用されている。いずれも同等の収録量、検索能力を有するデータベースである。これらの中から本研究では調査対象の MEMS 分野の研究推移を探るため、Scopus を選択した。Scopus では収録されている全論文から、書誌情報の論文タイトル (題目)、アブストラクト、著者キーワード中に、検索者が決定した検索キーワードを含む論文を抽出することができる。論文の収録は現存すると言われている査読ジャーナルおよそ 23000 誌中、約 16500 誌であり、ジャーナルタイトルベースでは 7 割以上をカバーしている。検索システムには同義語、関連語が付与される統制用語辞典を含み、検索に適切な専門用語が分からなくとも、本質的な語を選ぶことで妥当な検索結果を得ることができる。このため、得られた結果はかなりの確度を有する。問題は英語文献が対象であるため、他の言語の論文は収録対象にされないことである。ただし、MEMS を含む電子デバイス関連の査読文献は、英文が主体であり調査には問題は無いと考える。本研究では、個々の論文が記述する研究の重みは等価であると仮定し、論文数推移が概ねの研究推移を示すとして議論を進める。

2. 調査対象と方法

本研究では MEMS 分野を分析対象とし、研究推移と市場推移を比較する。ただし、MEMS は近年市場への製品の導入期に入ったばかりであり、これから成長する途上にあるので研究推移の市場へ及ぼす影響の検討は予測の域を超えない。そこで MEMS と同じエレクトロニクス産業で既に成長市場が成立している青色発光ダイオード、LSI、FPD の研究推移と市場の関係を調べ共通して得られる傾向のモデル化を図る。このモデルを基にして MEMS 分野の科学進度の把握を試みる。

なお、本研究の分析対象として MEMS 分野を選んだ詳細な理由は以下のとおりである。MEMS は将来、電子デバイス分野で大きな市場成長が予想される領域であるが、いまだ世界市場規模が 1 兆円程度と小さく⁴、多品種少量生産のため技術の進歩を見積もることが難しい。ところが、LSI、FPD などの各種電子製品や自動車、航空機、などの機械製品との組み合わせで、これまでにない付加価値を生み出す可能性があり、これらの産業の成功に続く大きな産業に成長することが予想される。これを受け、ここ十数年国家レベルのプロジェクトが盛んに行われている分野である⁵。従って、現在 MEMS 分野の研究動向調査は重要な位置づけにある。

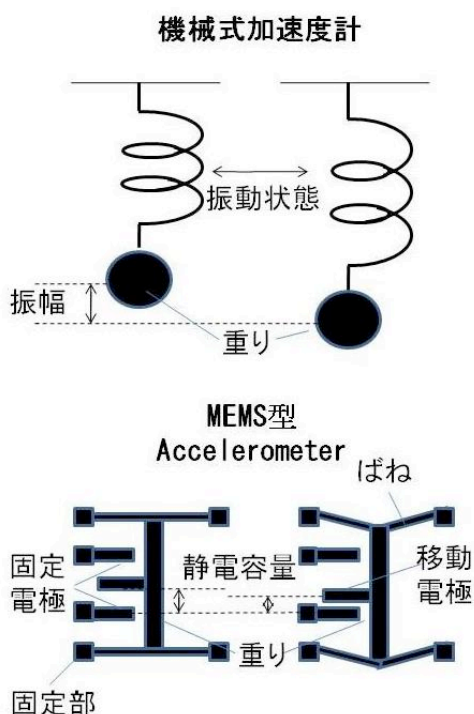
本研究では特に MEMS 分野において近年市場が活発になりつつある MEMS 型センサ (以後 Sensor と表す) 分野全般と中でも市場が成長期に入りつつある MEMS 型加速度センサ (以後 Accelerometer と表す) とする。これらについて論文書誌データベースで得られた論文数推移の結果を基に分析し、研究進捗が市場に与える影響を考察する。

3. MEMS について

MEMS の本質を理解することを目的に MEMS 型 Accelerometer を例に、従来の機械式加速度計と比較し MEMS の特徴を明らかにする。

図表 1 は、MEMS 型 Accelerometer と機械式加速度計の構造の違いを示す模式図である。機械式加速度計は、ばねに固定された重りが外力を受け、慣性力を得て振動する際の振幅を測定し加速度を算出する。機械式加速計は従来の機械加工技術を基に設計されており、全体の大きさは数 10 センチ程度であり、後に述べる MEMS 型の Accelerometer よりも遥かに大型で、重りも非常に重く安定した慣性運動に至るまでに時間を要する。

図表 1 機械式加速度計と Accelerometer の比較図



注記：筆者が 2008 年 7 月 14 日長野実装フォーラム・第 24 回 YJC セミナーにおいて東北大学江刺正喜教授の MEMS デバイスのパッケージングの講演等から得た知見をまとめ作図した。

その一方、Accelerometer は LSI 製造用途のシリコン基板を流用し、LSI 微細加工法を MEMS 専用に改善した手法で製造する。基本となる設計寸法は数百マイクロメートル程度と小さく、重りも機械式の数百万分の 1 の重さであり、短時間に慣性力を得ることができ応答性の良い加速度測定が可能である。Accelerometer の加速度測定は重りと一体の移動電極と、外部の固定電極との間の静電容量の変化から算出する。

以上の特徴から Accelerometer は高感度を有し且つ精度の高い小型電子部品として位置づけられている。Accelerometer は単体で最終製品を構成することは無く、振動の察知が付加価値を高める電子製品や機械製品内に一部品として内蔵される。この点では他の MEMS 部品も同じ役割を担っている。

最近では、Accelerometer は自動車、ゲーム機、携帯電話、デジタルスチルカメラなどに搭載され身近な生活にまで浸透している。

III. 結果と考察

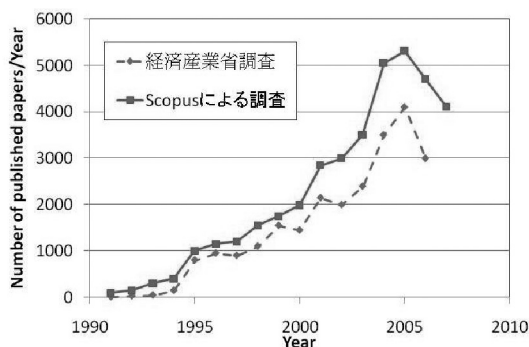
1. 論文書誌データベースによる研究推移調査の妥当性

本研究に用いる論文書誌データベース Scopus での論文検索数における妥当性を検証する。図表 2 に経済産業省が報告した MEMS に関する論文発表状況⁶と、Scopus による調査結果を示す。ここでの Scopus による調査結果は、筆者が同データベースにて、論文を構成するタイトル（題目）、アブストラクト、著者キーワードに MEMS の類の語（MEMS または Microelectromechanical devices または Micromachining または Micro system technology）

を含む論文数を抽出し、毎年の論文掲載数がかかるように編集した結果である。

図表から分かるように両者の結果において、論文数は1990年ごろから上昇を始め、2005年に一度ピークを迎えており増減に関して定性的に概ね整合が得られている。絶対量については、Scopusを用いた結果は経済産業省調査の結果よりも1割程度多い。ただし、本研究は論文数の概ねの推移から研究推移を読み取ることを課題としているので、以後、Scopusが示す研究推移は本研究の分析に対して支障ないと考ええる。

図表2 MEMS 関連論文数推移の比較



注記：筆者がScopusを用い、MEMS類の語をキーワードとして検索式として抽出した論文数を掲載年ごとに編集した結果と、経済産業省報告のデータを比較している。

2. 過去事例 (LED, LSI, FPD) による研究推移と製品市場推移の特徴把握

本節では、研究数推移と市場推移のモデルを検討する。まず研究数推移のモデルを立案する前に、先行研究の多い、市場推移について振り返る。

ある製品市場が、現在どのようなステージにあるかということ把握するモデルとして1950年にDean, J.が提唱した「プロダクト・ライフサイクル」という概念が広く知られてい

る。製品が市場に投入されてから、寿命を終え衰退するまでのサイクルを体系づけたものであり、製品の売上と利益の変遷を、導入期、成長期、成熟期、衰退期に分類し、それぞれの段階における戦略の示唆を与えている。例えば、導入期は製品を市場に投入する段階であり、需要も小さく売上も大きくはない。ここでは良く製品認知度を高め市場を拡大する戦略がとられる。次のステージの成長期は売上と利益が急増する段階で競合他社も増加する。ここではニーズが多様化するため製品改良や差別化戦略が重要となる。成熟期は市場の成長が鈍化し、売上、利益とも頭打ちになる段階である。ここでは、コストの優位性を生かしたシェアの維持が優先される。衰退期は値引き競争が頻繁に行われ、売上も利益も減少する時期である。ここでは、既存顧客の維持とブランドの残存価値を他の製品に移譲することが望まれる。Rogers, E.M. [1962]は*Diffusion of Innovations*の中で、この「プロダクト・ライフサイクル」の各ステージにおいて、これらに対応するマーケットセグメントに属する購入者が出現する様子を導き、その頻度曲線は正規分布となることを示した。時系列に出現する購入者群をグループ分類し頻度を示すと以下になることも述べている。

- イノベーター (革新的採用者) 2.5%
- アーリー・アダプター (初期少数採用者) 13.5%
- アーリー・マジョリティー (初期多数採用者) 34.0%
- レイト・マジョリティー (後期多数採用者) 34.0%
- ラガード (採用遅滞者) 16.0%

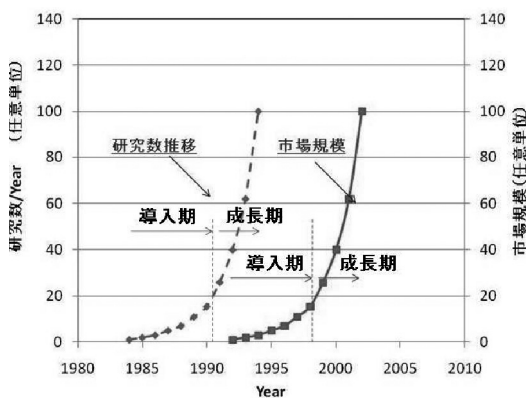
これらの購入者群の属する領域を「プロダクト・ライフサイクル」の各ステージに当てはめると、導入期にはイノベーターが、成長期にはアーリー・アダプターとアーリー・マジョリティーの一部が、成長期はアーリー・マジョリティーの一部とレイト・マジョリティーが、衰退期はレイト・マジョリティーの一部とラガードが主体となる。本研究では、新たな製品市場が「プロダクト・ライフサイクル」の成熟期までに至るような成功を得るためには、導入期の画期的な新技術を受け入れてくれる人々(イノベーター)に製品が認められるだけでは無く、少なくとも実利を優先する人々(アーリー・アダプターとアーリー・マジョリティー)に受け入れられる必要があると考え、「プロダクト・ライフサイクル」の導入期、成長期の成立に寄与する研究推移がどのようなものであるか検証する。これを進めるにあたって、Rogers, E.M. によって分類された購入者群の新製品の購買動機はそれ

ぞれ異なり、その前段の科学の進捗にもこれに応じた研究ステージの違いが存在すると仮定する。具体的には、「プロダクト・ライフサイクル」の導入期の要求に対応する研究の導入期が、成長期の要求に対応する研究の成長期が存在するという仮定をたてた。それぞれの研究期は、需要、認知度、競合状況の異なるマーケットセグメントに対応した研究が必要となるため、研究数と推移に違いが発生すると考え「プロダクト・ライフサイクル」の導入期と成長期の購入者の頻度を参考に、研究の導入期は緩やかに研究数が増加し、研究の成長期には研究数が急増すると仮定し図表3に示すモデルを設定した。

図表3に示すモデルが妥当であるかは、本研究の対象であるMEMS分野で直接分析すべきであるがMEMS市場は近年発生したばかりであり検証は難しい。そこで同じサイエンス産業分野で既に研究の成長期と市場の成長期を経ている青色発光ダイオード、LSI、FPDについてこのモデルが成りつつ簡単に触れる。

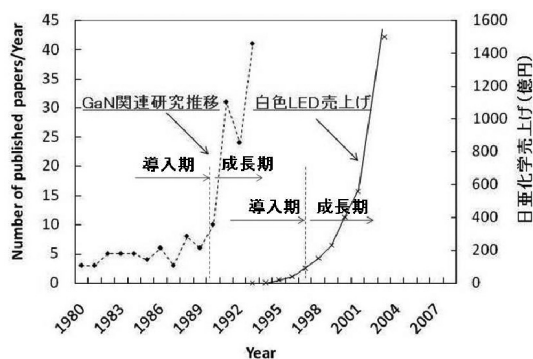
図表4に1980年から現在に至る青色発光ダイオードの研究と、この発明がきっかけで実用化した白色発光ダイオード⁷の市場推移を示す。ここから研究推移は論文数推移にて議論を進める。この論文数推移は筆者がScopusを用いて、論文を構成するタイトル(題目)、アブストラクト、キーワードに青色発光ダイオードの基盤材料のgallium nitrideまたは、この技術語の略語となったGaNを含む論文数を抽出し、毎年論文掲載数がかかるように編集した結果である。この時期の白色発光ダイオード市場については世界市場データの入手が難しいので、中村修二氏と日亜化学との間の裁判で公表された資料中の、日亜化学の白色発光ダイオードの売上を記す。

図表3 研究数推移と製品市場推移モデル図



注記：市場規模は、Dean,J.の提唱した「プロダクト・ライフサイクル」の導入期、成長期を模して記したものである。研究数推移は筆者がRogers, E.M.が「イノベーションの普及学」で示したイノベーター、アーリー・アダプター、アーリー・マジョリティーの「プロダクト・ライフサイクル」における頻度を基にこれに対応する研究数推移が存在すると仮定して記したモデル。

図表 4 青色発光ダイオードの GaN 結晶研究論文数推移と市場規模推移を示す図



注記：論文推移は筆者が Scopus を用い、"GaN or gallium nitride" and "LED or Lite emitting diode" を検索式として抽出した論文数を掲載年ごとに編集した結果。市場規模は、日亜化学の白色ダイオードの売上をプロットしたものの。

記載した期間において日亜化学は白色発光ダイオード市場で独走していることから、このデータは概ねの世界市場推移の傾向を把握する上では問題無いと考える。研究推移を見ると、1980年～1990年頃まで論文数の推移は緩やかな増加傾向であるが、それ以降は急増している。そして数年のタイムラグを持って1992年以降に「プロダクト・ライフサイクル」導入期に入り1996年以降に成長期に移っている。以上から白色ダイオードの市場規模と研究推移については図表3で示したモデルの形態が概ね反映されていると考える。

さらに確証を高めるために青色発光ダイオード研究に関わる主なトピックを以下に記す。山口の報告によると、「プロダクト・ライフサイクル」の導入期にあたる1992～1995年には中村氏が1990年に開発したツーフロー方式のCVDが用いられ、1996年以降の「プロダクト・ライフサイクル」の成長期においては、日亜化学社員の発明した量産に適した方法が用いられている。前者について、ツーフロー法を権

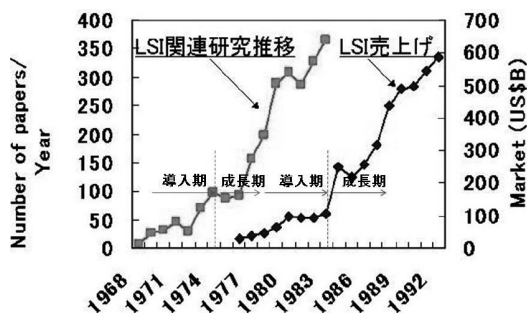
利化した特許公報には、1985年に発表されたほぼ類似のCVD法が先行例として記載されている。両者の因果関係は記されていないが、同種の方式が芽生えたことは、1990年のツーフロー法の誕生までに、何とかGaN結晶を実用化する十分な知見が形成されていたことを示すものである。後者については、ツーフロー法の量産性改善法なので、少なくとも1990年以降に開発されたと推測される。以上から、1980～1990年頃までの科学知識が、1992～1995年頃の「プロダクト・ライフサイクル」における導入期に、1990年以降の科学知識が1996年以降の成長期に反映されたものと考えられる。従って、青色発光ダイオードの研究推移と市場推移を示す調査結果は、図表3に示したモデルのそれぞれの形状が似ているだけでなく、異なるマーケットセグメントに対応する研究が存在していたことを示唆する事例と考えられる。

同様にして初期のLSIの研究推移と市場成長について調べた結果を以下に述べる。図表5は筆者がScopusを用いて、論文を構成するタイトル(題目)、アブストラクト、キーワードにLSIまたはLarge scale integrated circuits含む論文数を抽出し、毎年の新たな論文掲載数が分かるように編集した結果である。市場は世界市場であり、LSIの売上データの分析で信頼の高い米国のSIA(Semiconductor Industry Association)の世界市場のデータをプロットした。ここでLSIの研究数は1960年後半から緩やかに増加し1976年以降急増している。これに呼応するように、市場は1976年頃からスタートし1985年頃まで緩やかな増加を続けその後急増している。

1980年代の中頃はLSIのさらなる微細加工

と大量生産の要求からサブミクロン領域の微細加工の必要性が生じた時期であり、これを可能とする半導体ドライプロセス技術が導入された頃である。この半導体ドライプロセスの技術研究は、1975年頃からスタートしている。以上からLSIも、「プロダクト・ライフサイクル」の導入期には、研究の導入期の科学知識が寄与し、「プロダクト・ライフサイクル」の成長期には、研究の成長期の科学知識が寄与したものと考える。

図表5 初期のLSIの論文数推移と世界市場規模推移を示す図

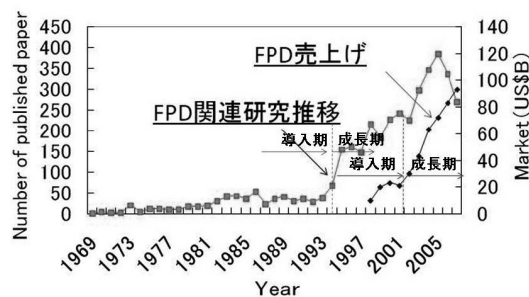


注記：論文推移は筆者がScopusを用い、「LSI」 or “Large scale integrated circuits” を検索式として抽出した論文数を掲載年ごとに編集した結果。市場規模は世界市場であり米SIA (Semiconductor Industry Association) データを編集したものの。

もう一つの事例としてFPDの研究と市場成長についても述べる。図表6は、筆者がScopusを用いて、論文を構成するタイトル（題目）、アブストラクト、キーワードにFPDまたはFlat panel display含む論文数を抽出し、毎年の新たな論文掲載数がかかるように編集した結果である。市場は、世界市場でありFPDの売上データの分析で信頼の高い米国の米Display search社データの世界市場のデータをプロットした。FPDの研究は1960年代からスタートし1995年まで緩やかな増加を続けそ

の後急増し、市場は1998年から2001年まで緩やかに増加し、その後急増している。FPDの研究において1996年頃はFPDの表示性能上の問題であった視野角問題についてもほぼ目処がつき、生産能力の向上を意識した研究がスタートした時期であり、一方2001年は現在の大量生産技術の基礎となる第五世代の面積ガラス基板が製造に導入された時期である。

図表6 FPDの論文数推移と世界市場規模推移を示す図



注記：論文推移は筆者がScopusを用い、「FPD」 or “Flat panel display” を検索式として抽出した論文数を掲載年ごとに編集した結果。市場規模は、米Display search社データを編集したものの。

従って、以上からFPDも、「プロダクト・ライフサイクル」の導入期には、研究の導入期の科学知識が寄与し、「プロダクト・ライフサイクル」の成長期には、研究の成長期の科学知識が寄与したものと考える。以上の結果から、LSI, FPDともに、図表3のモデルに近い傾向が現れていると考えられる。

3. MEMS分野の現状分析

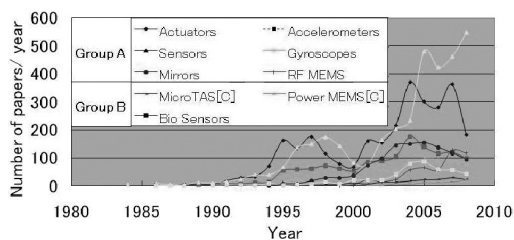
前節では、複数のエレクトロニクス産業において、図3に示すモデルに近い状況が現れていることを述べた。本節では、エレクトロニクス産業の一つのMEMS産業について分析する。現在MEMS分野の市場は規模が小さいことに

加え、多品種少量生産の形態を有するため研究の進捗や市場予測を見積もることが難しい。そこで Scopus にて、MEMS 各デバイス品種の研究推移を論文数で推測する。

図表 7 に筆者が論文を構成するタイトル（題目）、アブストラクト、キーワードに MEMS の類の語と、MEMS の各デバイス品種を示す語である Actuators（Actuator を有する可動部品を束ねる総称を示す）、Accelerometers（加速度センサ）、Sensors（Sensor 品種全般を示す）、Gyroscopes（角加速度センサ）、Mirrors（光通信、プロジェクタ向け MEMS）、RF MEMS（通信制御 MEMS）、Micro TAS（Micro Total Analysis System）、Power MEMS（超小型発電 MEMS）、Bio sensors（バイオ系 MEMS）を含む毎年の論文掲載数分かるように編集した結果である。特徴を把握しやすくするため、研究開始が 1995 年以前の Actuators、Accelerometers、Sensors、Gyroscopes、Mirrors、RF MEMS を Group A、それ以降に研究が開始された Micro TAS、Power MEMS、Bio sensors を Group B と定義し分析を試みる。

Group A の論文数推移の特徴は、2000 年までに緩やかな上昇と飽和、もしくは小さなピークがあり、2000 年以降に急増が見られることである。一方 Group B の論文数推移の特徴は、論文の絶対数が Group A より格段に少なく、研究の発生から現在まで概ね緩やかな増加を続けておりピークを持たないことである。ここで Group A としての MEMS デバイス群は、「プロダクト・ライフサイクル」の導入期に入っておりこれを実現した研究推移についても一般認識が存在する。そこで、Group A について論文数推移と一般認識を組み合わせることで研究進捗を客観的に見積もることができるか検討する。

図表 7 各 MEMS デバイスの論文数推移を示す図

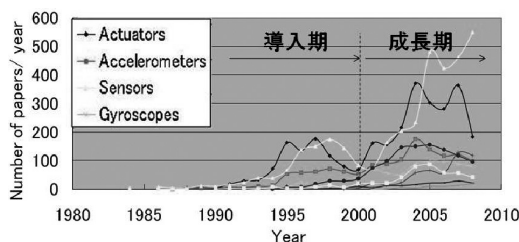


注記：筆者が Scopus を用い、MEMS の類の語と、MEMS の各デバイス品種を示す語を検索式として抽出した論文数を掲載年ごとに編集した結果。

まず図表 8 に図表 7 から抜き出した Group A のみの研究推移を示す。この分野の MEMS の研究推移に関する認識を述べている文献は比較的多く、例えば財団法人マイクロマシンセンターの分野別動向調査を参考にすると、概ね 2000 年以前には MEMS 基盤構造確立に焦点を当てた基礎研究が主体に行われており、2000 年以降には量産性、精度、品質を兼ね備えた生産技術を実現するための応用研究が主体に行われている。ここで前述した Group A 各デバイスに関わる研究の論文数推移が図表 3 のモデルに近い増加の傾向を有している点を加味すると、2000 年を境に研究の導入期、研究の成長期を区分することは妥当と考えられる。

なお図表 8 では、研究の導入期と成長期の境の 2000 年に研究の継続的な増加を一旦阻む「谷」または「飽和」が見られる。これは、研究の導入期終了時期と研究の成長期におけるスタート時期の一致が招く研究総数の落ち込みと捉えることで説明がつく。また落ち込みが長期に渡る場合、「プロダクト・ライフサイクル」の成長期への移行阻む「死の谷」の一因になり得るが、これらの解釈は今後さらに研究が必要である。

図表 8 Group A の論文数推移を示す図

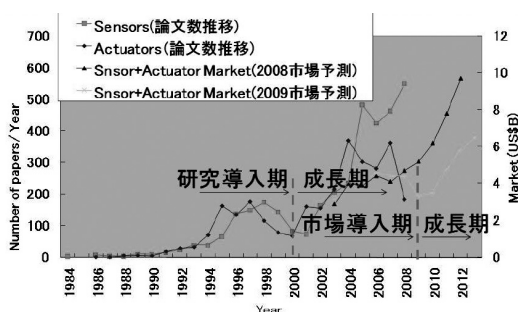


注記：筆者が図表7においてMEMSの各デバイス論文数推移について編集した結果をGroup Aについて抜き出した。

以上に述べたように Group A の研究推移は、2000年を境として、研究の導入期と成長期が現れている可能性が高い。そして、前節の研究推移と市場推移の関係から推測すると、研究の導入期と成長期の寄与により「プロダクト・ライフサイクル」の導入期と成長期における市場の増加が予測される。そこでこの確証を高めるために、図表9にGroup AにおけるSensorsとActuatorsを例にした研究推移と最近の市場推移の比較を示す。それぞれの論文数推移は、図表7にて筆者がMEMS各デバイスの毎年の論文掲載数を編集した結果からSensorsとActuatorsについて抜き出したものである。市場は、金融危機前（2008年）と後（2009年）に米国IC insights社から発表された2003～2013年のSensorsとActuatorsの合計の世界市場であり、2008年以降の予測を含めて記されている。図表中、Sensor, Actuatorともに研究は1985年頃に始まり緩やかに増加し、一旦低下した後、2000年以降急増している。一方、市場は研究の導入期の終了後間もなく発生し、緩やかな成長の後、2008年（2008年の市場予測）または2010年（2009年の市場予測）以降は急成長期に入る。前節の仮定に準じて解釈すると、研究の導入期における基礎研究が「プロダクト・ライフサイクル」の導入期に、研究

の成長期における応用研究が、「プロダクト・ライフサイクル」の成長期に寄与していると考えられる。また、ここで注目すべき点は、金融危機後の市場予測は2009年に落ち込みが見られるものの、2010年以降の成長率は、金融危機前の成長率と概ね同等であることである。これは研究の導入期と成長期に得られた科学知識は、不況下においても「プロダクト・ライフサイクル」の導入期と成長期の市場規模を拡大するポテンシャルに成り得る事例を示唆していると考えられる。このことからSensor, Actuatorは、図表3のモデルに近い推移を示していると考ええる。

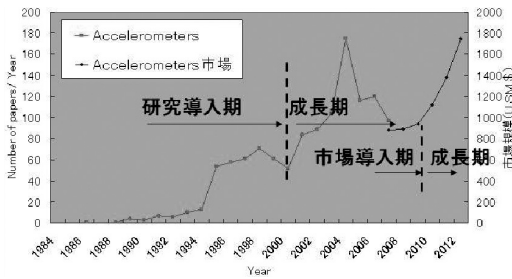
図表 9 Sensor, Actuator の論文数推移と市場推移を示す図



注記：図表7において筆者各MEMSの各デバイス論文数推移について編集した結果をSensor, Actuatorについて抜き出した。市場推移はIC Insights社が公表している世界市場データ。

この傾向がMEMS分野の個別のデバイスにも共通した傾向であるか確証を得るために、その代表例として、図表10に図表9で調べたSensorを構成する一分野であり、近年発展の著しいAccelerometerについても結果を示す。

図表 10 Accelerometer の研究推移と市場推移を示す図



注記：図表 7 において筆者各 MEMS デバイス論文数推移について編集した結果を Accelerometer について抜き出した。市場推移はフランス Yole Development 社が公表している世界市場データ。

この図表中の Accelerometer の論文数推移は、図表 7 にて筆者が MMS 各デバイスの毎年の論文掲載数を編集した結果から Accelerometer を抜き出したものである。また、Accelerometer の市場は、フランス Yole Development 社が発表した世界市場であり 2008 年以降の予測を含めて記す。この図表においても図表 3 と同様の傾向が表れており、研究の導入期と考えられる緩やかな研究数の増加領域とその後急増する成長期、および一連の研究推移に対してタイムラグを持って「プロダクト・ライフサイクル」の導入期と成長期が現れている。なお図表 10 で研究の成長期後半に研究数が低下しているのは、研究によって開発の目的が立ち、論文として成立しにくい製品仕様に関わる実用開発へ移行した結果と推測する。

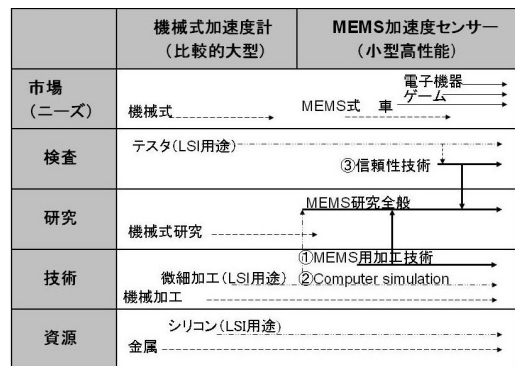
4. MEMS 分野の詳細分析

第 2, 3 節では歴史背景や一般認識などから「プロダクト・ライフサイクル」の導入期、成長期の要求に対応する研究の導入期、成長期の存在を示し、この区分によって新産業の市場成長の予測がある程度可能であることを示した。

このモデルを将来の新規事業策定に応用するには、第 2, 3 節のような歴史背景に依存しない客観的な区分法が必要である。そこで本節では、「プロダクト・ライフサイクル」における導入期から成長期への移行を可能とする科学的因子の特徴を基準に研究導入期と成長期の区分が可能であるか検討する。

その因子を明らかにするために、サイエンス型産業における市場の特徴を整理する。一般にサイエンス型産業の市場はニーズと新テクノロジー（研究）の融合により発生するとと言われる。ところが市場成立前のニーズは潜在的であり確証を得ることが難しい。このような分析の困難さを抱えてはいるが、ニーズの実現を目論む組織は研究を実用化に導く「環境と機能」というフィルターを介し、見込みがあれば「プロダクト・ライフサイクル」の導入期、成長期を満たすための研究を存続させると仮定し、この「環境と機能」を分析することで研究の導入期と成長期の区分を試みる。そこでフィルターと称した「環境と機能」のモデルを図表 11 に示す。

図表 11 Accelerometer を例に研究を実用化に導く普遍的な因子を時系列に整理した図



注記：筆者が考案した図。図表中「市場」と「資源」は社会的な環境を示し、「検査」、「研究」、「技術」は自然科学の因子を示す。

なお、ここでは Accelerometer を例に議論を進める。図表において左から右へ時間の推移を示す。最上段の「市場」と最下段の「資源」は研究を取り巻く「環境」であり、研究存続の動機に関わる社会的な因子である。中段の「検査」、「研究」、「技術」は、動機の下で、導入期の研究を成長期の研究に移行を促すところの自然科学を根拠とする「機能」である。先ず、「環境」について述べる。産業化が明確では無い Accelerometer の研究の導入期において、研究の存続動機が芽生えた際に、「市場」と「資源」の関連性がどの程度認知されていたかは想像の域を超えない。しかし、Accelerometer が「プロダクト・ライフサイクル」に示される成長期に入りつつある現在、Accelerometer はハードディスク、自動車、カメラ、ゲーム機など多くの機器に搭載され、既存製品の信頼性・安全性向上や嗜好の充実に貢献し急成長市場を築きつつある。このことから、「市場」と「資源」は研究存続の動機の強い源泉となっていたことは予想できる。そこで考え得る「資源」「市場」の役割について、加工材料のシリコンの持つ産業上の特徴と、これを加速度計に適用した際に期待できる効果から考察する。「資源」については機械式加速度計の時代には金属が中心であったが、微細加工が可能な LSI 製造用シリコン材料の出現によって超小型の MEMS 型 Accelerometer 創出の可能性が生まれたはずである。これを基に、実用化を目論む目利きは、「プロダクト・ライフサイクル」における導入期の要求を満たす Accelerometer の基盤構造研究（あるいは導入期の研究）および成長期の要求を満たす量産研究（あるいは成長期の研究）の必要性を見だし、前述のハードディスク、自動車、カメラ、ゲーム機などに直結するイノベ-

ションを予見したのではないかと推測する。すなわち「資源」と「市場」の関連性の認知によって、研究の存続が決定されたと考える。従って、「環境」は研究を存続させる動機を推測する因子となる。

これらの研究を存続させる動機の存在下において、導入期の研究を成長期の研究へと移行させる「機能」について述べる。ここで「機能」は「検査」「研究」「技術」から成る。図表中、「研究」欄に示すように、過去に機械式加速度計の研究は完成しているが、この研究の単純な延長で Accelerometer を実用化することはできない。なぜなら、従来の機械加工の方法では微細加工が困難であり、少なくとも LSI 製造で培った微細加工法が必要になる。またこの微細加工を適用しても 2, 3 節で述べたように、異なるマーケットセグメントの購買者は、結果的にそれぞれのセグメントに適した製法を必要とする。例えば画期的な新技術を重視するイノベーターの要求を満足させるには大量産に相当する革新的な製造法が整わなくとも LSI 製法を含む既知の製法を何とか組み合わせ改善を加えることでシリコンに微細加工を施し、少量でも新構造の Accelerometer が完成すれば良い。しかし、アーリー・アダプター以降の実利を優先する人々を満足させるための製品には導入期の研究に比して、これを凌駕する量産性、精度、品質を兼ね備えた生産技術の研究が必要である。従って、導入期の研究を成長期の研究へと移行させるには、他の産業同様、①専用加工技術、② Computer simulation（「技術」欄参照）、③信頼性技術（「検査」欄参照）の研究の成熟が必要になる。

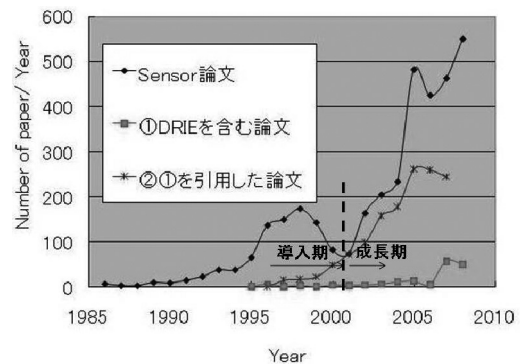
そこで、これら①専用加工技術、② Computer simulation、③信頼性技術について研究推移を

調べる。またこれら①②③の生産技術研究の有用性を理解するために、被引用数の増加の傾向についても調べる。なお①②③の要素技術は主な MEMS デバイスの基本構造上、本格的な生産に不可欠な技術であるので、各種 Sensor デバイスを束ねる意味を有する Sensor についても適用を試みる。

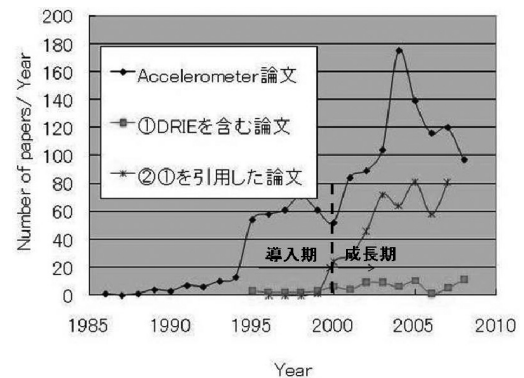
まず①専用加工技術として、重要な加工技術の一つである DRIE 技術 (Deep reactive ion etching) を含む研究の推移を調べる。DRIE 技術には、MEMS 加工に必要な加工寸法・精度を満たすエッチング技術のブレークスルーが盛りこまれている。図表 12 は筆者が論文を構成するタイトル (題目)、アブストラクト、キーワードに MEMS の類の語と MEMS の各デバイス品種を示す語である Accelerometers, および Sensors の集合中に DRIE または Deep reactive ion etch の語を含む毎年の論文掲載数がかかるように編集した結果である。図表には Sensor と Accelerometer 全般の論文数推移とこの中に含まれる DRIE 技術を含む論文数及び、この被引用論文推移が示されている。図表から分かるように、Sensor および Accelerometer の研究は 1986 年から開始されているが DRIE を構成に含む研究の出現は 1995 年まで待つこととなる。それまでは DRIE 技術を本格的に用いること無く Sensor, Accelerometer の研究、議論、試作が行われていたと考える。従ってこの期間は、研究対象として量産性、精度、品質を兼ね備えた生産技術があまり意識されていないと推測する。

ところが概ね 2000 年以降は DRIE 研究を含む論文が増加しこれらの被引用論文もそれ以上に増加している。このことから本格的な生

図表 12 (a) Sensor と (b) Accelerometer 全般の論文数とその内 DRIE 技術を含む論文数及び、この被引用論文数を示す図



(a) Sensor



(b) Accelerometer

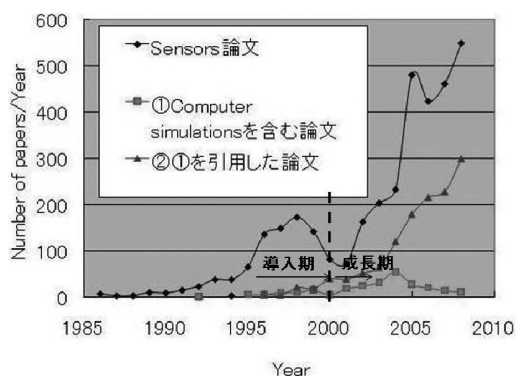
注記：筆者が Scopus を用い、"DRIE" or "Deep reactive ion etch" and "Sensor", "DRIE" or "Deep reactive ion etch" and "Accelerometer", を検索式として抽出した論文数を掲載年ごとに編集した結果。

産に向けた意識が高まってきたことが考えられる。なお 2000 年は第 3 節で示した Sensor, Accelerometer 研究の導入期と成長期の区分と概ね一致する。従って、ブレークスルーとなる専用加工技術は、「プロダクト・ライフサイクル」における導入期から成長期への移行を可能にする科学的な因子の一つとする考察には妥当性があると考えられる。

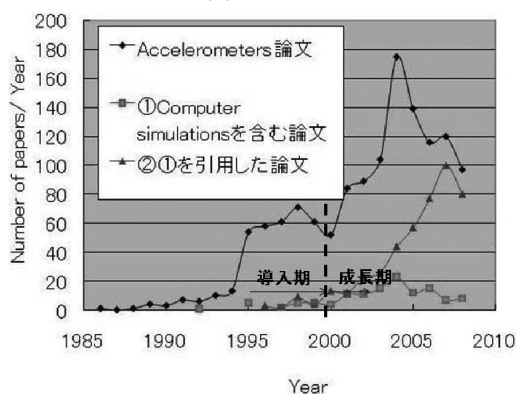
同様の手法で、② Computer simulation についても述べる。このカテゴリーで確認する事項は、設計支援に関わる研究推移である。現在 MEMS 設計を支援するソフトウェア製品には Intellisuit, Coventor ware, MEMS one などがあるが、論文が公共性を重視する性格上、論文のタイトル（題目）、アブストラクト、キーワードにこれらの製品名が掲載される例は少ない。技術を実質的に示す CAA（Computer aided analysis）、CAD（Computer aided design）、他、MEMS の設計支援を遂行する語で検索する必要がある。そこで、著者が MEMS, Sensor, Accelerometer の論文で用いられるキーワードについて設計支援に関わり最も頻繁に用いられる語を抽出した後、統制用語辞書にて意味範囲を確認し、検索に適切な語を決定した。この手順によって選ばれた語は、Computer simulation である。図表 13 は筆者が論文を構成するタイトル（題目）、アブストラクト、キーワードに MEMS の類の語と、MEMS の各デバイス品種を示す語である Accelerometers（加速度センサー）、および Sensors（Sensor 品種全般を示す）の集合中に Computer simulation の語を含む毎年の論文掲載数がかかるように編集した結果である。図表には Sensor と Accelerometer 全般の論文数推移とこの中に含まれる Computer simulation 技術を含む論文数及び、この被引用論文推移が示されている。結果を見ると①と同様の傾向があることが分かる。

最後に、③信頼性技術についても述べる。このカテゴリーで確認する事項は、前述した信頼性技術に関わる論文数推移である。信頼性技術を支える要素には、各種の機械的不良、不良

図表 13 (a) Sensor と (b) Accelerometer 全般の論文数とその内 Computer simulation 技術を含む論文数及び、この被引用論文数を示す図



(a) Sensor



(b) Accelerometer

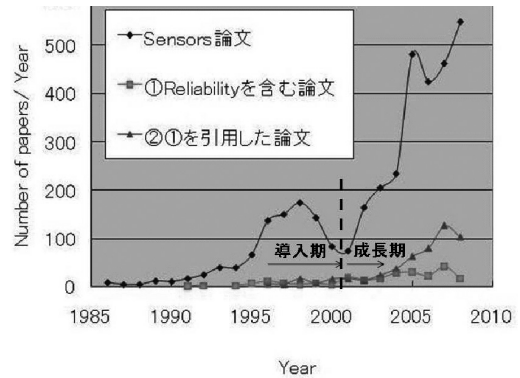
注記：筆者が Scopus を用い、“Computer simulation” and “Sensor”, “Computer simulation” and “Accelerometer” を検索式として抽出した論文数を掲載年ごとに編集した結果。

解析、テストング、許容限界、寿命保証などに関わる研究が挙げられる。そこで、著者が Sensor, Accelerometer の論文で用いられるキーワードについて信頼性技術研究を広くカバーし且つ頻繁に用いられる語を抽出し、統制用語辞書にて意味範囲を確認し、検索に適切な語を決定した。この手順によって選ばれた語は、Reliability である。図表 14 は筆者が論文を構成するタイトル（題目）、アブストラクト、キーワードに MEMS の類の語と、MEMS の各デ

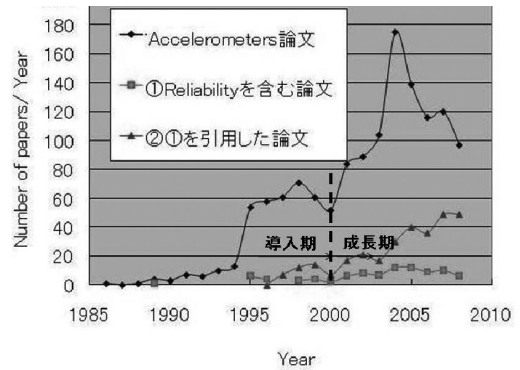
バイス品種を示す語である Accelerometers (加速度センサ), および Sensors (Sensor 品種全般を示す) の集合中に Reliability の語を含む毎年の論文掲載数がかかるように編集した結果である。図表には Sensor と Accelerometer 全般の論文数推移とこの中に含まれる Reliability 技術を含む論文数及び、この被引用論文推移が示されている。ここでも①と同様の傾向があることが分かる。以上から、基盤研究を本格的な生産技術研究に導く普遍的な因子の推移を調べることで、市場の導入期を主眼にした研究ステージであるか、市場の成長期を主眼にした研究ステージであるか区分が可能になった。

以上に述べた手法を用い、MEMS 研究としては研究開始が遅く、図表 7 の Group B に属する Micro TAS の研究推移と市場について検討する。Micro TAS は医療、環境などの各種検査分野の一部を担う MEMS であり、近い将来新たな市場切り開く可能性が高い。ただし未だ製品市場が存在せず現状では専用加工技術の絞り込みは難しいため、Computer simulation 研究 (図表 15 参照), Reliability 研究 (図表 16 参照) の発生と推移について調べた結果を示す。Computer simulation, Reliability を含む研究の出現は Micro TAS 全般の研究開始よりも数年待つことになる。それまで専用の Computer simulation, Reliability 技術を用いることなく Micro TAS の研究、議論、試作が行われていたと考える。研究開始より数年経た時点で Computer simulation, Reliability の研究が開始されるが、Sensor, Actuator, に比べてこれらの研究数の絶対量が非常に少ない。特に Reliability 研究は被引用論文を含めても数件である。これらのことから、Micro TAS

図表 14 (a) Sensor と (b) Accelerometer 全般の論文数とその内 Reliability を含む論文数及び、この被引用論文推移を示す図



(a) Sensor

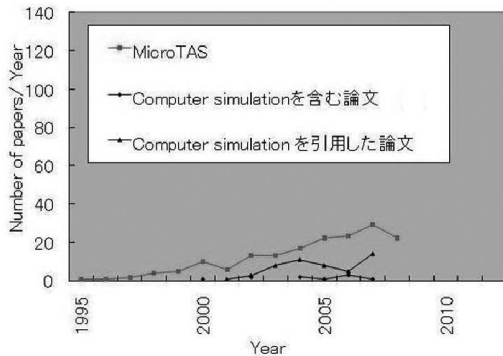


(b) Accelerometer

注記：筆者が Scopus を用い、"Reliability" and "Sensor", "Reliability" and "Accelerometer" を検索式として抽出した論文数を掲載年ごとに編集した結果。

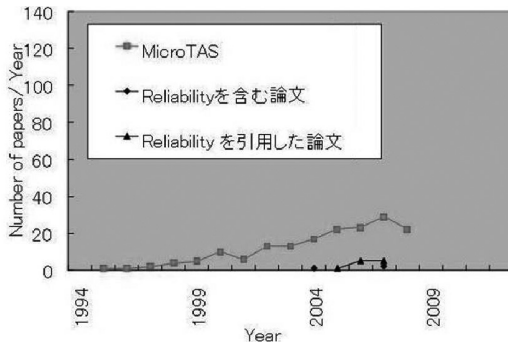
は現在、「プロダクト・ライフサイクル」の導入期を目指す研究の導入期中盤以降にあると考えられるが、実利を求める人々を対象とした成長期に向けた研究は行われておらず実用化はまだ見込めないことが推察できる。フランス Yole Developpement 社の市場調査報告を見ても Micro TAS について直近の市場は見出されていない。

図表 15 Micro TAS 全般の論文数推移とその内 Computer simulation 技術を含む論文数及び、この被引用論文数を示す図



注記：筆者が Scopus を用い “Computer simulation” and “Micro TAS”, を検索式として抽出した論文数を掲載年ごとに編集した結果。

図表 16 Micro TAS 全般の論文数とその内 Reliability を含む論文数及び、この被引用論文数を示す図



注記：筆者が Scopus を用い, “Reliability” and “Micro TAS”, を検索式として抽出した論文数を掲載年ごとに編集した結果。

以上、研究の導入期、成長期の区分について普遍的な因子である「市場」、「資源」、「検査」、「研究」、「技術」の概念を導入し客観的な区分方法を考案しその妥当性を検証した。これにより、導入期研究の進行中に発生する成長期への移行を察知する基本的な手立てが確立できた。この手法は、将来成長する新分野における新規事業の策定に重要な判断材料になると考える。

IV. まとめ

論文書誌データベースから得た研究推移により「研究による知見の蓄積に従い市場が開かれていく」というサイエンス型産業における一般的な認識を客観的に捉えることができた。その手立てとして研究の導入期、成長期という市場の可能性を予測する上で重要な二つの因子を指摘し、これらが市場牽引のポテンシャルを見定める条件になることを確認した。さらに研究の導入期における基盤研究を研究の成長期の生産技術確立を主眼とした研究に導く普遍的な因子である「専用加工技術」「Computer simulation」「信頼性技術」の研究進度からに導入期、成長期の区分を試み、これらが客観的な判断材料になることを確認した。この手法を利用し、現在、研究進度の把握が難しいとされる MEMS 分野の Sensor, Accelerometer, Micro TAS について研究進度と「プロダクト・ライフサイクル」における市場のステージの関係を明らかにし理にかなった結果を得た。これは、研究開発に直接携わるメーカー、間接的関わりを持つアプリケーション製造メーカーや商社などが新産業参画の準備を進めることを可能とするものである。これにより本研究の知見は、新規事業策定に大きく貢献すると考える。

(注)

- 1 アメリカ化学会の下部組織 CAS が発行している化学および関連分野の文献抄録誌である。1907年に創刊され、現在では化学の研究に不可欠な巨大データベースとして世界中で利用されている。
- 2 オランダ Elsevier 社が提供する、工学分野の代表的な国際的論文書誌情報データベース。1920年に創刊され、全世界約 5,000 タイトルの雑誌掲載論文と会議録掲載論文を採録し、総計 900 万件以上の書誌レコードを提供し、年間約 50 万件の書誌レコードが追加される。
- 3 三宅常之 [2008] 「半導体が MEMS 技術を融合へ」イー

ヴィグループジャパン MEMS セミナー 2008 TKP 東京
駅八重洲ビジネスセンター (2008年5月23日)

- 4 Yole Developpement. "Status of the MEMS industry Evolutions of the applications for mobile phones" Sensor Expo (2009.04.) .
- 5 日本では、1990年代のマイクロマシンプロジェクトに始まり最近のファインMEMSプロジェクト、Beans プロジェクトがある。欧州では欧州研究開発フレームワーク内のMEMS関連プロジェクト、米では、DARPA (国防総省高等研究計画局) のNano-MEMS Program が国家レベルのプロジェクトとして知られている。
- 6 2008年7月31日東京ビックサイトで行われた高集積・複合MEMS製造技術開発プロジェクト(ファインMEMSプロジェクト) 中間成果発表会資料(経済産業省産業機械課是永基樹氏の発表資料)より筆者が編集した。
- 7 1990年代の青色発光ダイオードの登場で市場ニーズの強かった白色ダイオードの製品化が可能となったことはよく知られている。

【参考文献】

- 塩場公規 玉田俊平太 児玉文 [2005]「科学依存型の産業」
RIETI Discussion Paper Series 05-J-009
- 後藤晃, 小田切宏之 [2003]「サイエンス型産業」NTT出版
- Schumpeter, J.A., [1926] *Theorie der Wirtschaftlichen Entwick 2 Aul., Drucker & Humbt.* (塩野谷裕一, 中村伊知朗, 東畑精一訳 (1980)「経済発展の理論」岩波書房)
- Mansfield, E [1961] *Technical Change and the rate of Imitation, Econometrica*, 29, pp 741-766
- Mansfield, E [1968] *Industrial Research and Technological Innovation, An Econometric Analysis*, WW. Norton & Company
- Cantwell, J [1989] *Technological Innovation and Multinational Corporations*, Oxford and Cambridge, Blackwell
- 近能善範 [2008]「自動車のエレクトロニクス化と先端技術開発協業」東京大学ものづくり経営研究センターディスカッションペーパー MMRC-J-198
- 竹内寛爾 [2009]「車載半導体の製品開発における産業間コラボレーションの阻害要因」2009年度研究発表大会報告要旨集 pp137-140
- 前田龍太郎 [2005]「MEMSのはなし (SCIENCE AND TECHNOLOGY)」日刊工業新聞社
- Dean, J. [1950] *Pricing policies for new production*, Harvard Business Review, November-December, p. 28.
- E. M. Rogers [1962] *Diffusion of Innovations*, The Free Press
- 菅野卓雄 [1980]「半導体プラズマプロセス技術」産業図書株式会社
- 船田文明, 栢川正也 [1997]「ディスプレイ・デバイスの現状と動向」シャープ技法 69号 1997年12月 pp5-16
- 泉谷渉 [2005]「これがディスプレイの全貌だ」かんき出版

国内外技術情報調査委員会 [2008]「平成19年度分野別動向調査報告書」財団法人マイクロマシンセンター

【資料】

平成20年度版 科学技術白書

【インターネット資料】

- 山口栄一 [2004]「青色LED「200億円判決」の決定的な誤りーリスク・チャレンジからのリターンを発明の対価と混同してはならない」Discussion Paper Series#04-02 技術革新型企業創生プロジェクト (2004年3月)
(www.doshisha-u.jp/~ey/images/pdf/BlueLED_Judgment.pdf)
- 米 Semiconductor Industry Association (SIA) データ。
(<http://www.sia-online.org/galleries/Statistics/GSR1976-Jun09.xls>)
- 米 Display search 社データ。
(<http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20051215/111655/>)
- 米 IC insights 社データ。
(<http://www.icinsights.com/news/bulletins/bulletins2009/bulletin20090430.html>)
(<http://www.icinsights.com/news/bulletins/bulletins2008/bulletin20080326.html>)