

■ 展望・解説 ■

21世紀への産業展開

—技術革新のダイナミズムと地球的諸問題

Industrial Development towards 21st Century
—Dynamism of Technological Innovation and Global Issues



弘 岡 正 明*

Masaaki Hirooka

1. はじめに

第一次産業革命以来200年余りにわたり、技術革新が急速に進展し、今日の高度文明社会が構築されてきた。これまで、経済発展に重要な役割を果たしてきた各種技術革新の発展経緯を詳細に検討してきたが、そこには技術の発展と、その結果生まれた新製品の普及とで構成される技術革新の流れが詳しく読み取れる。それらの傾向を解析することにより、技術革新のダイナミズムが明らかになってきた^{1)~7)}。それらの経験から、今日進展している各種科学技術のパラダイムを解析し、21世紀の産業展開の動向を探らうとする。一方、近年地球環境問題がクローズアップされ、従来のような野放図な経済発展が許されない状況になりつつあり、持続可能な経済発展が求められる時代となってきた。特に、資源・エネルギーの有限性の問題が現実のものとなりつつあり、クリーンな再生可能エネルギーの開発が喫緊の課題となってきた。技術予測と開発政策をどう進めるべきか、技術革新のダイナミズムの経験からこれらの諸問題を検討する。

2. 技術革新のダイナミズムと産業展開

技術革新の進展は経済学的には新製品の普及の挙動として論述される。しかし実際の技術動向からすれば、それは長期にわたって展開されてきた研究開発の最後の成果として新製品が上市されるのであり、製品の本格的な普及の前に約20~30年の潜在的な開発期間が存在する。筆者はその期間を技術軌道 (Technological trajectory) と名付けた。それはあたかもそれぞれの技術に固有の発展の軌道があるかのように解析できるからである。

新製品の普及については多くの研究があり、1957年、

Grilichesら⁸⁾がとうもろこしの新種の普及がロジスティック方程式によく合うS字型の曲線になることを示して以来、製品の普及についての研究が多く発表されてきた。事実筆者らの研究では、ロジスティック式の直線変換を行ったFisher-Pryプロットから、製品普及が、それぞれの製品に固有な拡散係数を持つことが検証された¹⁾。

一方、技術が開発される開発期間では、技術軌道をどのように整理すれば技術発展の状況を相対的に比較、記述できるかが問題となる。一つの整理の仕方は技術開発に伴い取得される特許の件数の経時変化を示せば、その累積曲線がS字曲線となり、技術が進歩するにつれて、曲線は増加関数として変化する。これまで数多くの技術革新について検討したところ、いずれの技術革新においても、一連の発明は有限の期間に集中して発生し、技術が成熟してしまえば、もはやレベルオフして、それ以上の発展は起こらなくなる。このような一つの技術革新に属する一連の発明のクラスターは、200年前の第一次産業革命の頃では約60年のタイムスパンに分散していたが、最近では、20~30年の間に集中して発生することが明らかになってきた。そこで特許の数を集計することを省いて、もっと単純に縦軸を技術のレベルとして考え、それぞれの主要発明が行われた年代を任意のS字曲線上にプロットして、技術軌道を作成することを考えた。すなわち技術の発展も、その知識が人から人へと伝播して行く過程であると認識することによって、普及と同種の拡散現象であると見なすことができる。そこで、技術軌道もロジスティック曲線で表現できることとなり、以下のような手法を採用することにした。すなわち、一連の主要発明の集団を集約することにより、技術軌道の継続期間を同定すれば、その期間に応じたロジスティック曲線が決定できるので、その上にそれぞれの発明の年代をマークし、S字曲線を作成できる。この手法によって、一つ

* 流通科学大学情報学部教授

〒651-21 神戸市西区学園西町3-1

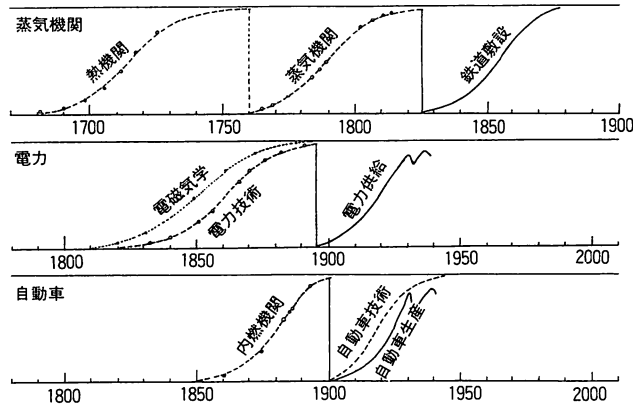


図-1 エネルギー・動力の技術革新パラダイム

の技術革新は、20～30年のスパンを持つ技術軌道とそれに続く製品普及のSカーブのカスケードによって示すことができる。

図-1はエネルギーに関連した技術革新として電力、蒸気機関、内燃機関を選び、それらの開発の経緯を技術軌道と製品普及のカスケード関係によって示したものである。技術軌道は点線で示し、丸印はそれぞれの主要発明の行われた年代を位置づけたものである。電磁気学成立の経緯も対比して示した。蒸気機関の技術革新では、18世紀初頭にセイバリーやニューコメンの熱機関の発明があり、約60年のタイムスパンがあるが、J. ワットが分離凝縮器をつけて熱効率を大幅に向上してから、具体的な工業的実用化の域に達し、工業動力としての応用展開が進み、新たなパラダイムへと進展した。その結果、繊維工業の動力、蒸気船、蒸気機関車などへ発展し、産業革命の主役となって行ったのである。このような各種の応用展開を一つの技術軌道とすれば、その製品普及の段階は、蒸気機関車による鉄道の総延長で示すことができる。電力技術の技術軌道は、電磁気学の発展と同時並行的に進展した。発電機が完成しても、交流による長距離送電が可能になってはじめて発電事業が成立し、ナイアガラ水力発電所の建設を契機に普及が始まった。自動車の開発は、タイムラーとベンツによるガソリン自動車の発明によって完成するが、それは一連の内燃機関開発の技術軌道の中で位置づけられる。自動車の普及は、1913年のフォードによるテイラー方式による大量生産体制の確立を契機としてアメリカが普及の主導権を握った。自動車、電力ともに、1929年の大恐慌によって生産量が大幅に落ち込んでいるのがみられる。これらの例で解るように、それぞれの技術軌道が十分熟成して、実用化への

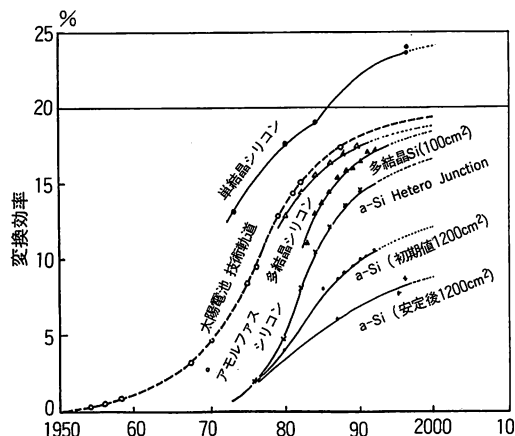
布石が完成してはじめて、製品の普及が始まることが分かる。すなわち、技術が生まれてから、200年前では約60年、今日でも約20～30年の歳月の後、技術軌道が成熟し、ようやく市場の評価に耐えられる製品が普及し始めることが認められる。したがって、一つの技術革新は、約30年の技術軌道と、約20～30年の普及期間のカスケードとして構成される。特に重要なことは、技術軌道が明確なスパンを持つ有限、固有な物理量として把握できるという発見である。

3. エネルギー開発と技術予測

石油の究極埋蔵量が増加しなくなってからすでに20年ほど経過している。今後石油発見の新しい期待が極めて低いことから、新エネルギー開発の必要性が高まっている。エネルギー開発はニューサンシャイン計画の発足により、新たな体制ができつつあるが、なお多くの課題が山積している。エネルギー関連の技術開発について、技術軌道のコンセプトを用い、いくつかの事例について解析を行ってみたい。

3.1 太陽電池

太陽電池の開発は、1954年にシリコン単結晶太陽電池が提案されてから40年以上の歳月が過ぎ、すでに技術軌道は成熟期にある。これまでの開発期間を包括する技術軌道は、図-2に示すように、ロジスティック普及曲線として作図すれば、普及率10%から90%までのタイムスパン、 $\Delta F_{1-9} = 25$ 年 ($a = 0.1757$) の曲線で記述できる。これまでのシリコン太陽電池の変換効率 は図に示すように、定常的に向上してきたが、その経時変化は技術軌道の曲率と平行して変化していることがわかる。究極の変換効率はその曲率の延長上に求められるべきとすれば、今後の到達効率はそれほど大き



資料：NEDOニューサンシャインプロジェクト報告，中島貞雄，桜井良文，「超伝導，アモルファス材料」学振新書(1990)等より作成

図-2 太陽電池の開発技術軌道と変換効率の変遷

くなくことになる。

太陽電池の普及はずでに始まっているが、 1200cm^2 のa-Siの安定化後の変換効率は10%に満たない。多結晶シリコンでは17%の変換効率が達成されたとのことであるが、今後その実用効率がどこまで期待できるかである。通産省の展望としては、今日の3万kWから、2000年で40万kW、2010年で460万kWに拡大する計画とされるが、これが達成されれば、国内電力の2%余りが賄われることになる。従来の技術軌道と普及軌道のカスケード関係が今回も成立するとすれば、 $\Delta F_{1-9} = 25$ のスパンでみると、2015年頃に究極市場の50%に達する。

3.2 超電導

超電導はエネルギー開発と深くかかわっているので、セラミック超電導体の発見以来大きな期待が寄せられてきた。超電導の技術軌道は、 $\Delta F = 25$ 年で近似すれば、図-3に示すように、いくつかの軌道からなっていることが認められる。1911年にオンネスが超電導を発見して以来、各種の金属材料が開発されてきた。その後、超電導理論の研究が活発化し、BCS理論を中心に一本の科学軌道ともいべき展開が明瞭に認められる。戦後、グラファイト、ポリチアジル、そして有機超電導体と非金属系で各種の超電導体が発見されるようになってきた。その中で、田中昭二らは、1975年にペロブスカイト型の超電導体を発見。ベドヌルツ、ミュラーらによるセラミック超電導体の発見の端緒を作った。これら一連の非金属系超電導体を一つの技術軌道で整理すれば、25年の軌道はほぼ成熟期にある。

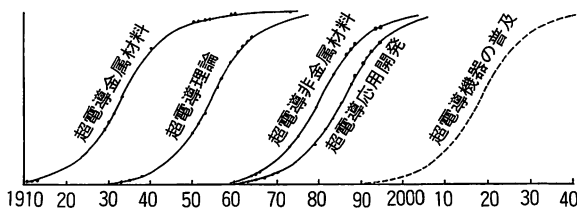


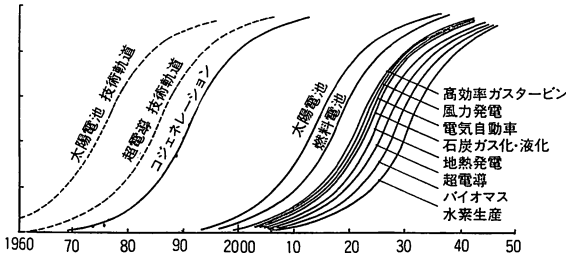
図-3 超電導科学技術パラダイムの進化と実用化予測

課題は超電導体の応用技術の開発軌道である。ニオブ系の超電導体の線材が開発されてから、超電導体の応用研究が軌道に乗り始め、25年の技術軌道では、すでに成熟期に入ってきた。セラミック超電導体を用いた応用研究も、ネオジウム系の発見により各種の用途展開が活発化してきている。この技術軌道のカスケード接合により実用化製品の普及の予測を作図すれば、2000年初頭より超電導機器の実用化が本格化し、2040年頃をピークとするSカーブとして普及曲線を描くことができる。

3.3 技術予測とエネルギー開発の展開

科学技術庁では、過去30年にわたって、5年ごとにデルファイ法による技術予測をおこなってきた。このほど第6回の技術予測が公表された⁹⁾。技術予測は電子情報技術などではかなり正確に行えるが、材料、エネルギー系などではなかなか予測が難しい。しかし、これまで6回の技術予測の経過を比べてみると、太陽電池にしろ超電導体にしろ、いくつかの設問の難易度の順位は、そのまま維持されており、科学者、技術者の判断は正確に反映されている。しかし、回を追うごとに予測年は先送りされており、いつまでも現実が追いつかない。このことは、実際に研究が進んでみると、予想以上に難しいということもあるが、設問が余りに理想的で、非現実的な問いがあるのかもしれない。そこで、エネルギー技術に関して、技術予測の結果を、技術軌道との関連で検討してみた。

デルファイ法では、技術が何年に開発されるか、あるいは何年に実用化されるか、普及するかなど、一点で答えるようになっている。しかし、実際の開発では多くの技術がクラスターとして進行するから、それら一連の技術を一つの軌道として整理し、普及についても、どの程度の市場規模を持って普及とするのかを明確にしておく必要がある。そこで、今回の解析では、太陽電池、超電導など、複数の予測課題が挙げられているものは、一つの技術軌道として整理し、普及については、究極の市場規模の10%に達したときを普及年



資料：科学技術政策研究所，第六回技術予測調査報告(1997)などにより作成

図-4 エネルギー開発と実用化技術予測

とした。図-4の中の各種のエネルギー技術の普及曲線はそのような整理をもとに作成した。一方、太陽電池と超電導の技術軌道は図-2, 3に示したものであり、コージェネレーションの普及は実際の生産量に基づいて作成したものである。また、太陽電池、超電導の普及曲線は技術軌道のカスケードとして接続したものを示した。太陽電池、超電導のデルファイ技術予測はこの中に示さなかったが、それらの普及年度は接続予測のものより更に先送りとなっており、非現実的な、過大要求である可能性が考えられる。その他のエネルギー開発は、2000年初頭から普及が始まり、2040年ごろにピークを迎える一連の集団となっている。これらのエネルギー技術の技術軌道は個々に同定していないが、すでにかなり進行していると思われるので、普及がこれらより先送りされることはなさそうである。

4. 21世紀へのハイテク技術の胎動

以上のエネルギー技術の実現についての予測から、

21世紀初頭に多くの技術が普及し始める。一方で、21世紀のハイテク技術がどうなるのかが知りたいところである。すでに学んだところでは、最近の技術軌道は約25年のスパンで広がっており、それに普及のSカーブが約25年のスパンでカスケード接続している。21世紀にも同じパターンが続くとすれば、今日動いている技術軌道から、21世紀のハイテク産業のコア技術の普及の状況を予測することができる。それらの先進技術は今日のハイテク産業のコア技術ではなく、まだ具体的には商業化されていないものである。図-5はこれまでの経済発展に大きな役割を果たしてきた各種の技術革新の技術軌道とそれらの製品普及のSカーブのカスケード関係を示したものである。今日のハイテク産業の技術軌道はすでに成熟しており、その延長上には多くを期待できない。21世紀初頭のハイテク産業は現在立ち上がりかけている別の技術軌道をベースに発展する。これらの軌道を予測することは簡単ではないが、少なくとも言えることは、今それらの技術はすでに開発が始まっているものでなければならないことである。これらの技術軌道としてここでは、分子素子、蛋白工学、精密高分子を選んだ。これらに共通していることは、いずれも分子・原子レベルで制御が行われということである。これらの詳細についてはすでに論述したところである⁵⁾⁶⁾。これらの事例に加えて、上述したような各種エネルギーの技術軌道が見えているから、それらの普及時期をカスケード接続すれば、図に示したように、時を同じくして、2010年から40年にかけてSカーブが広がる展開となる。今の技術軌道のどの程度の技術レベルまで実現するのが課題であるが、こ

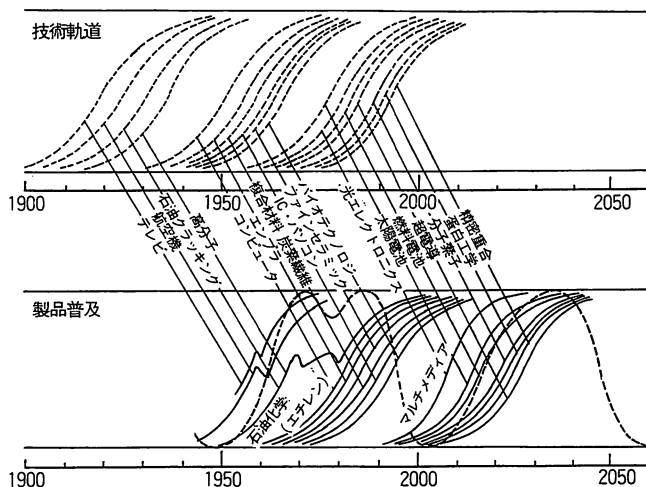


図-5 技術軌道と製品普及の相関-21世紀への展望

の時期が遅れることはない。したがって、不十分な技術レベルで具体化したときは、さらなる発展はずっと先の新しく進化した技術軌道に俟たねばならないことになる。

すでに、論述したように²⁾⁵⁾、製品の普及はコンドラチェフ景気循環の上昇期で集中的に起こり、経済成長の原動力となってきた。図-5の製品普及の欄に示した山形の曲線は、経済の景気循環を表わすコンドラチェフ波である。21世紀初頭に再び景気の上昇期があり、ここに各種の技術普及が再び集中的に始まるとの予測となった。しかし、現実には地球環境問題や資源賦存量、人口、食料問題など従来あまり考慮してこなかった諸問題が顕在化してくるので、多くの負担がかかってきて、景気浮上の効果が従来のように期待できるかどうか、予断を許さないものがある。

5. エネルギー資源の賦存量と環境問題

ローマクラブの提言「成長の限界」が発表されてからすでに25年が経過した。また、20年後には「限界を越えて」が公表され、事態がさらに深刻となってきたことが示された。図-6はこれらの報告書に提示されたシミュレーションの結果を対比して示したものである。人類生存のシナリオは、人口の減少開始が前回の2050年から、今回は2020年に早くなっている。この間、発展途上国の人口増加、先進国の経済規模の増大のいずれもが抑制できずに推移した結果、事態はより深刻化してきたといえる。

近年、ようやく環境問題に対する認識が高まってきたが、その主眼は炭酸ガス対策による温室効果の抑制に向けられている。確かに事態は予断を許さないもの

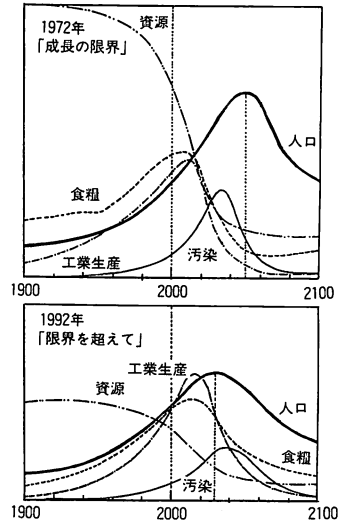
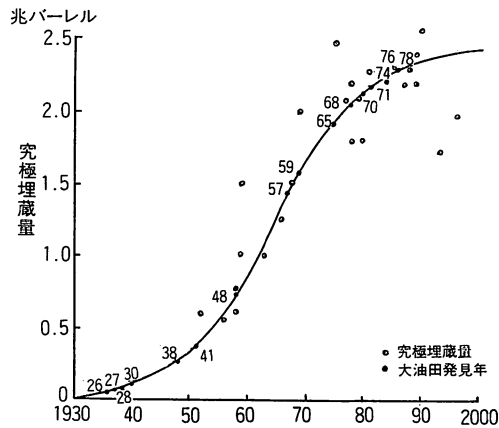


図-6 人類生存のシナリオローマクラブ予測の変遷
資料：D. H. メドウズ等、「成長の限界」、ダイヤモンド社(1972)
D. H. メドウズ等、「限界を越えて」、ダイヤモンド社(1992)

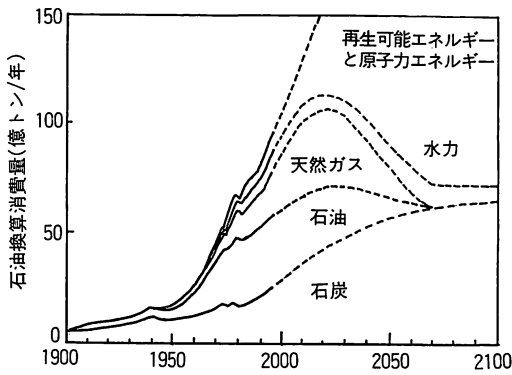
があろうが、問題はそれにも増して、エネルギー資源の枯渇、食料問題など、より深刻な案件について決定的な対策が見出されていないということである。先進国でのエネルギー消費の減少が見られないだけでなく、発展途上国での経済成長が大幅に進展してきたことから、世界経済の拡大基調が地球の規模で加速度的に推移している。このことは地球環境問題が急速に悪化の方向に進んでいることに連動する。いま人類がもっと喫緊の課題とすべきはクリーンな再生可能エネルギーを手にすることであると思われる。その意味で、現在のエネルギー開発のシナリオの中で、石油に代わ

- 大油田発見年譜
- 1926 ベネズエラ(ラグエラス)
 - 27 イラク(キルクー)
 - 28 イラン(ガク・サラン)
 - 30 ベネズエラ(バケロ)
 - 38 イラン(アガジャリ)
 - 41 サウジ(アブカイ)
 - 48 サウジ(ガワール)
 - 48 ソ連(ロマシキモ)
 - 57 ベネズエラ(ラマ)
 - 59 リビア(ゼルテン)
 - 65 ソ連(サモトル)
 - 68 アラスカ(ブレードホー)
 - 70 イギリス(フォーティーズ)
 - 71 イギリス(プレント)
 - 74 イギリス(ニニアン)
 - 74 ノルウェー(スタットフィヨルド)
 - 76 メキシコ(カンタレ)
 - 78 メキシコ(アバタン)



出典：エネルギー・資源学会編、「エネルギーと未来社会」、省エネルギーセンター(1991)資源エネルギー年鑑(1988)などから作成

図-7 大油田発見と究極埋蔵量の推移



資料：依田 直，電力中央研究所(1996)，WECなどより作成

図-8 世界の一次エネルギー消費量の変遷

る中枢となるべき新エネルギー開発の展望が開けていないことが問題である。

石油・天然ガスの由来については諸説があり，マグマからメタンまたはその他の炭素由来物質が上昇して来るとの説¹⁰⁾があり，これまで主流の生物起源説と対立した考えが浮上している。この説が正しければ，石油に代わるエネルギー源として期待される。確かに，深海で大量のメタンハイドレートが見つかっていても，しかし，それらの資源の可能性はなお謎に包まれており，具体的な対策は立っていない。現実には，石油・天然ガスが明らかに減少していることである。図-7は，これまでの大油田発見の経緯と，究極埋蔵量の推移である。少なくともこの20年ほどは，もはや大油田の発見はみられなくなり，究極埋蔵量は，むしろ下方に推移してきている。この図から，石油の発見の経緯がやはり一つのSカーブを描いており，すでにピークに達していることが理解される。

図-8は世界の一次エネルギー消費の長期予測である。この最近の需給予測から，石油は2020年頃からその需給がタイトとなり，2070年頃にはほとんど採掘できなくなることを示している。図-4，6，8の比較から，新エネルギー開発のテンポがこれで間に合うのか，もう一度詳細な検討を要すると思われる。

6. 21世紀への課題—まとめ

以上，技術革新のダイナミズムについての解析から得た手法を用いて，長期的な地球的諸問題，特にエネルギー開発問題を中心に検討を加えた。その結果，

(1) 技術革新のパラダイムは，技術開発期間である技術軌道とそれにカスケード接続した製品普及のSカーブより構成される。最近の技術軌道は約25年

のスパンを持つ。

- (2) 太陽電池，超電導の技術軌道を同定し，そのカスケード接合により製品普及の時期を予測した。デルファイ法での技術予測より早い実現時期となり，デルファイ法の設問が過剰期待の可能性がある。
- (3) 技術予測で多くのエネルギー開発が2010年から2040年にかけて，具体化するとの判断となった。
- (4) 現在開発が進んでいる技術軌道から，21世紀のハイテク産業のコア技術を予測し，2010年から2040年にかけて製品普及が立ち上がり，上記エネルギー開発と時を同じくして，コンドラチエフ景気波動の上昇期を形成するとみられる。
- (5) 石油の長期需給予測，ローマクラブの予測などと対比して，上記のエネルギー開発計画が，地球的諸問題の解決に十分間に合うのかどうか，再検討すべきであると思われる。特に，石油を十分代替できる量のクリーンエネルギーの開発が，最優先課題であると考えられる。
- (6) 地球的諸問題のような長期予測をもう少しきめ細かく行い，技術開発の重点項目とその優先順位を決める恒常的な技術政策が必要と思われる。

参考文献

- 1) M. Hirooka and T. Hagiwara, "Characterization of Diffusion Trajectory of New Products in the Course of Technological Innovation", Kobe University Economic Review, 38, p47-62 (1992)
- 2) 弘岡正明, 「技術革新のパラダイムと産業展開」, 化学経済, 40, [1] 14-24 (1993)
- 3) 弘岡正明, 「技術革新のダイナミズム—バブル崩壊とテクノグローバリズムの新潮流」, 化学経済, 41, [1] 25-33 (1994)
- 4) 弘岡正明, 「技術革新のパラダイムと景気循環」, 国民経済雑誌, 169, [2] 57-77 (1994)
- 5) 弘岡正明, 「技術革新のダイナミズムと研究開発戦略」, 科学と工業, 69, [11] 451-467 (1995)
- 6) 弘岡正明, 「技術革新パラダイムと産学官の交流」, プラスチックスエージ, エンサイクロペディア1997年版, 38-51 (1996)
- 7) 弘岡正明, 「技術革新のダイナミズムからみた21世紀の産業展開と地球的諸問題」, 流通科学大学論集, 経済経営情報, 5, [2] 53-68 (1997)
- 8) Z. Griliches, *Econometrica*, p502 (1957)
- 9) 科学技術政策研究所, 「第6回技術予測調査」(1997)
- 10) T. ゴールド著, 脇田宏監訳, 「地球深層ガス」, 日本経済新聞社 (1989)