連載講座

ハイテク技術経営論

第3回：研究開発の動学過程

児玉　文雄

ハーバード大学のAbernathyは，長期にわたる自動車産業の技術革新を分析して，新技術がはじめて市場に導入されその後順次成熟化していく過程を定式化した．そして，導入期から成熟期に移行するにつれて，技術革新や競争の性質が変化していくことに注目し，この現象を説明する理論として，「ドミナント・デザイン（dominant design）」という概念を提唱した[1]．

この理論は以下のように要約できる．新しい技術が出現したときには，どのデザインが一番よいかについての不確実性が存在する．異なるデザインが異なる業種の異なる企業によって提案される．しかし，競争が行なわれてある程度の時間が経過すれば，多くのデザインの中の1つか数個のものが他のデザインを圧する（dominate）ようになる．このような経過を経て出現してきた「ドミナント・デザイン」（以下，これを「D−D」と略記する）は，あらゆる側面において標準化を促進する．そこで，「D−D」出現後の競争は，製品機能よりも製造コストを中心に行なわれるようになる．

しかし，この「D−D」理論は，自動車という1つの産業の詳細な観察により導き出されたものであった．したがって，この理論の普遍性についての疑問が出されている．特に，化学工業や電子工業においても成立するかどうかについては，多くの研究者が懐疑的になっている．

このような疑問に応えるため，MITのUtterbackは半導体産業を含むいくつかの産業の長期データにもとづき，実証分析を行なった．実証分析のために，「D−D」の存在を次のように定式化している．このデザインが出現する前には，多くの変種のデザインが多くの企業によって試され続けるので，競争に参加する企業の数は一方的に増え続ける．しかし，「D−D」が出現して他のデザインを圧倒するようになると，急激に参加企業数は減少する．すなわち，参加企業数の時間的変化により「D−D」の存在を間接的に証明できる．この方法を自動車と機械式タイプライターに応用し，図3−1に示すような結果を得ている[2]．

図に明らかに示されているように，参加企業数は順次増え続け，「D−D」出現の時期にちょうどピークに達し，その後は急激に減少するという整然としたカーブになっている．ちなみに，自動車の場合は1920年頃にピークに達しているが，これはT型フォードが出現した時期と一致している．

そこで，同様の方法を集積回路について応用してみた結果，想定していたパターンとは大きく異なる図3−2に示すようなパターンになることを発見した．図に明らかなように，ピークは存在せず，そのカーブは幅の広いプラトーを形成している．そこで，集積回路技術の競争においてはどの世代のどの製品も「ドミナント・デザイン」と考えられないという結論に達している．

今回の講義では，なぜハイテク産業は「ドミナント・デザイン」理論では説明できないかに分析の焦点を合わせる．そして，その理由を事例研究と数理分析の両

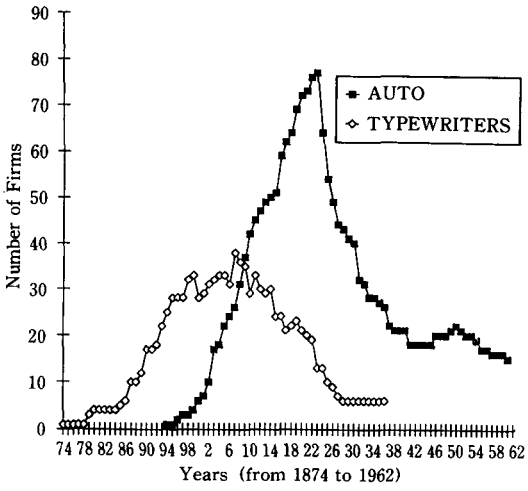

図3-1　競争参加企業数の変化［2］

こだま　ふみお　東京大学　先端科学技術研究センター
〒153 目黒区駒場4-6-1　（4月に転任）

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

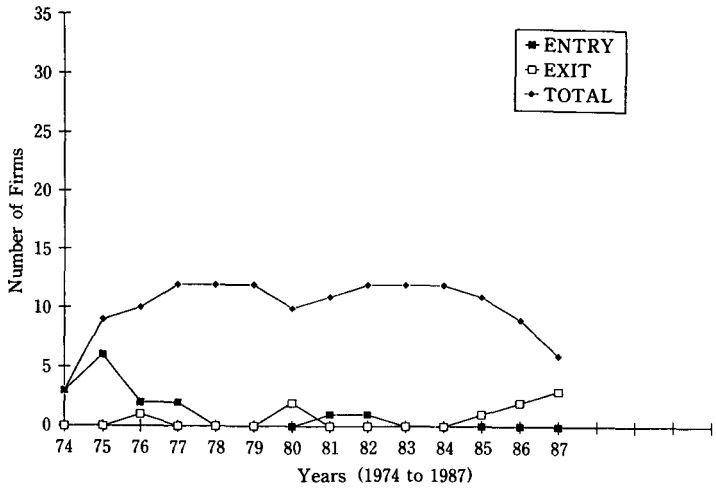

図3-2 米国での集積回路競争への参加企業数 [2]

方を通して，明らかにしよう．

光ファイバーの開発

光ファイバーの技術開発の発展過程および製品化に至るまでの流れを観察すると，技術進化の過程で，技術革新の主役がガラス製造業⟶装置製造業⟶通信事業者⟶電線製造業の順に，交替していったことがわかる．しかも，主役の交替があった時に，飛躍的な技術革新が行なわれた[3]．

光ファイバーの開発では，最初の開発はガラス製造業によってなされた．しかしこの製品には，低い「機械強度」と高い「電送損失」という2つの致命的欠陥があった．ガラスの破砕性の問題は，銅線ケーブル製造業が開発した「コーティング技術」により解決された．電送損失の問題は，光ファイバーの使用者であるNTTが，少し長めの波長を使用すれば，電送損失を大幅に削減できることを発見したことにより，解決された．

1969年，日本板硝子と日本電気の合同技術スタッフが，タリウムをドープしたファイバーを製作し，1km当たり80デシベル（db）を確認している．米国ではガラス製造業者であるコーニング社が1km当たり20dbを確認し，世界的に有名になった．このように，光ファイバーの可能性探索時代において貢献が大きかったのは，日本板硝子とかコーニング社というガラス製造業者であったといえる．

しかし，実用化に必要な機械強度や，実際の使用環境下の耐環境特性について，充分実用に耐えることを実証する課題が残されていた．この時点での主役は，銅線を主体とした通信媒体を製造していた電線製造業であった．この問題を解決したのがコーティング技術であり，1974年に住友電工により，「タンデム・ダブル・コーティング（Tandem Double Coating）」の技術が開発された．したがって，実証の時代の主役は，従来の通信媒体であった銅線を製造していた電線製造業であったといえよう．

実用化の時代になると，システムに対する過去の使用実績と信頼性が要求される．しかし，新技術を利用したシステムを率先して使用するためには，リスクを伴う．したがって，この段階で主役を演じるのは，不特定多数の使用者ではなく，このようなシステムの普及により最大の恩恵を受ける電話会社が主役となる．まず，1975年にはじまったNTTと住友電工との共同研究により，従来考えられていた（ガリウム砒素の）半導体レーザーによる0.85ミクロンより長い波長，たとえば，1.31ミクロンの発振波長を使えば，電送損失が大幅に減ることが発表された．そこで，中継距離が延びて，高いレーザーを使わないですむことになり，光ファイバーの競争力が明らかになった．同時に，半導体レーザーも長波長で常温発振するInP型が開発され，光通信が長距離通信として他のシステムより強力であることが判明した．

つづいて，電送損失が1.55ミクロンで，1km当たり0.2dbとなることがNTTにより確認されるに至り（1979年），実用化への確固たる基礎を固めた．不特定多数の潜在的ユーザーが，光ファイバー・システムの機能を確認するとともに，信頼性についてもある程度の確信をもつに至り，本格的な需要期に突入した．こ

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

の段階において必要なのは，光ファイバーの量産技術である．これを解決したのが，米国のベル研究所とコーニング社の「MCVD法（Modified Chemical Vapor Deposition）」および，これに並ぶ日本のNTTと住友電工の「VAD法（Vapor Phase Axial Deposition）」である．この段階での技術革新の主役を演じたのは，光ファイバーの事業化を推進する企業，および大口使用者の研究機関であったということができる．

この事例を一般化すると，技術革新モデルとして，前回の講義で言及した「スパイラル・モデル」を構想することができる．この技術革新モデルの本質的な特徴は，技術的アプローチと業種との間に1対1の対応関係を想定している点にある．いいかえれば，それぞれの業種が蓄積してきた固有技術を使って，それぞれ独自の方法で問題解決を企てるのである．以上を要するに，ハイテク技術における研究開発競争は従来の企業間競争から「業種間競争」に転化しているのである．

数理分析

分析レベルの選択

一般的にいうと，分析が科学的であるためには，定量的で，統計的に検証されていなければならない．しかし研究開発活動については，この種の分析は驚くほど少ない．研究開発についての概念的な研究はいくつか存在するが，これらは定量的でもなく，統計分析的でもない[4]．

この主要な理由は，研究開発活動の動学的過程を反映する統計データが存在しないからである．しかし，それ以上に重要なのは，研究開発の動学分析に最も適当な分析単位を特定できなかったことに原因があるといえる．

分析のレベルとしては，次の2つの間の選択をしなければならない．1つは個々の企業で行なわれる個々の研究開発プロジェクトであり，もう1つの高位のレベルは，その目的とかアプローチが共通するプロジェクトの集合体である「プログラム」のレベルである．先に述べた光ファイバーの事例研究において，ハイテク技術の研究開発は，企業間競争というより「業種間競争」で正確に記述できることを指摘した．そこで，ハイテク技術の研究開発の動学的モデルを考えるのに最も適当な分析単位は，特定業種に属するすべて企業からなる全体であるということになる．産業の研究開発活動は，特定の業種が特定の製品へ興味をもつことにより始まり，その製品分野における中核技術を開発することにより終了する．このような特定の製品分野へ照準を合わせた，1つの業種による一連の研究開発活動を「研究開発プログラム」と呼ぶことにする．

データ・ベース

研究開発プログラムの動学的分析には，業種別の研究開発費を製品分野別に内訳ることが必要不可欠であるということになる．そこで再び，企業の社内研究費を異なる製品分野別に内訳ている，総務庁統計局の豊富な統計が，研究開発プログラムの動学的分析のためのデータベースとなる[5]．

まず，ある業種による研究開発費がその業種の主力製品内であるのか，主力製品外であるのかの区別が重要となる．主力製品以外の分野への研究投資は，この段階では現在中心となっている事業の範囲外であるので，もし進展が思わしくなければ，中止することができる．しかし，主力製品分野内での研究投資では，中止することは難しい．このような推論にもとづき，特定業種の主力製品分野以外での特定製品分野への研究開発は，1つの研究開発プログラムに対応するものと仮定することができる．

このデータベースは1970年以来毎年収集されている．したがって，研究開発費デフレータを使って実質化すれば，後述するような統計的検定に充分な量のデータを確保することができる．すなわち，Nを業種数，Tをデータ期間とすれば，各業種について$(N-1)\cdot T$個のサンプル数を確保できる．代表的な業種（化学工業，電気機械工業，自動車工業）について，このようなサンプル値の出現頻度分布曲線を**図3－3**に示す．1970－1982年のデータをプールしたので，各業種のサンプル数は260（＝20·13）個ということになる．

図に見るように，どの業種についても，研究開発費の頻度分布は，「指数分布」に近い形になっている．このような指数型分布は，特定業種の主力製品分野以外の特定製品分野への研究開発は，ほとんどが探索研究であり，開発研究はごく少数であることを暗示している．すなわち，多くの探索研究が長期間にわたって行なわれ，かつ発展の可能性の証拠が確認されてはじめて，多額の開発投資が行なわれる．そこで，この分布曲線には，研究開発プログラムの動学的過程がみごとに反映されていると考えることができる．

しかし，この図を詳細に観察すれば，3業種の間の

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

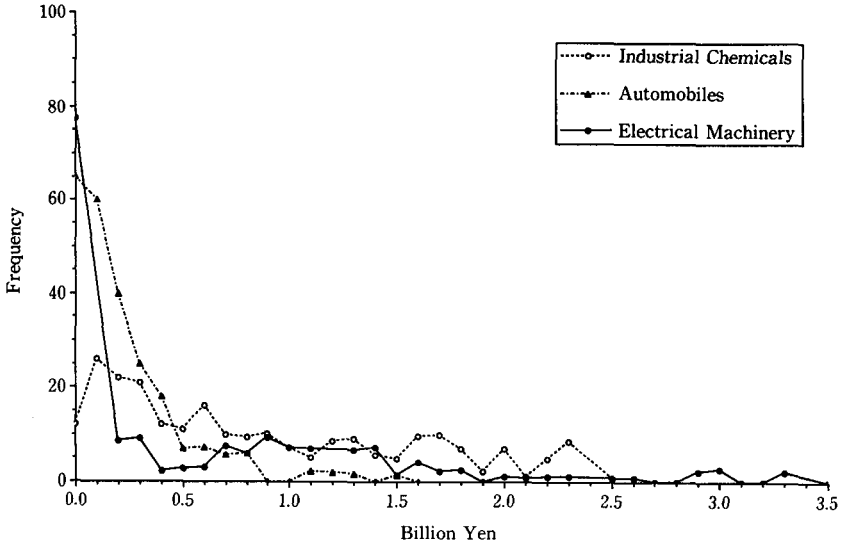

図3-3 主要業種の実質研究費の頻度分布

違いが見えてくる．化学工業の分布曲線はなだらかな指数減衰曲線を描いているが，電気機械と自動車のそれは，減衰が急激な減少曲線になっている．さらに，電気機械の減衰の「尾」は自動車よりも長いことが観察される．これらの違いが何に原因しているかを明らかにしよう．

状態推移モデル [6]

動学的モデルを構築するためには，図3－3で得られた指数型分布曲線の動学的解釈が必要である．そのためには，研究開発プログラムの状態が「探索段階」から「開発段階」へ推移していくという動学的過程を想定するのが有効である．

そこで，次のような状態推移モデルを考えることができる．研究開発プログラムは，その将来展望が明るい限り，探索段階から開発段階へとその状態を連続的に推移させていく．しかし展望が暗くなると，この状態推移過程は凍結(freeze)される．以下，この状態推移過程を数学的に定式化してみよう．

研究開発プログラムの状態は，年間投資水準(C)で表現できる．投資額Cが小さければ，このプログラムは探索段階にあり，Cが大きければ開発段階に達していると解釈できる．そこで，この探索段階から開発段階への状態推移の過程を制御する「推移凍結確率」(以下，凍結率 (freezing-rate) と略称する) という概念を導入する．この凍結率は，研究開発プログラムの状態により変化すると仮定できるので，$r(C)$という関数により表現でき，これを凍結率関数と呼ぶことにする．

まず，この凍結率関数をすでに観察された研究開発プログラムの研究投資額の出現頻度分布と関連づけてみよう．頻度分布の計算により，投資水準がCである確率，すなわちCの確率密度関数が得られている．これを$f(C)$で表わす．確率密度関数$f(C)$と確率分布関数$R(C)$との間に存在する一般的な関係

$$f(C)=d/dC[1-R(C)]=-R'(C) \qquad (1)$$

により，投資水準がCを越える確率が$R(C)$で導出できる．一方，推移凍結率$r(C)$は，研究開発プログラムへの年間投資額水準がC以上である条件下に，この推移過程が状態Cで凍結されるという条件つき確率であると解釈できる．そこで，凍結率関数について次の関係が成立する．

$$r(C)=f(C)/R(C)=-R'(C)/R(C) \qquad (2)$$

この関係式は，$r(C)$の関数形を特定すれば，$R(C)$の関数形は自動的に特定されることを意味する．さらに，$R(C)$が特定されれば，(1)式を使って，$f(C)$の関数形が導くことができる．このことは，凍結率関数形を特定すれば，研究開発プログラムの出現頻度分布が一義的に決定されることになる．$r(C)$を$f(C)$に変換する公式は，次式である．

$$R(C)=\exp[-\int_{\phi=0}^{\phi=c} r(\phi)\cdot d\phi], \qquad (3)$$

先に述べた「ドミナント・デザイン」理論を，凍結率関数$r(C)$で表現してみよう．一般的にいえば，Cが小さい探索研究では凍結確率は高く，Cが大きい開発研究ではそれに先行する探索研究でその可能性が実証されているはずであるので，その凍結確率は低い．し

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

たがって，$r(C)$はCの減少関数ということになる．D−D理論は収斂的プロセスを仮定しているので，研究開発プログラムが探索段階を過ぎて，いったん開発段階に達すると凍結されることはなくなることを意味する．以上より，D−D理論では，Cが大きくなると限りなく0に近づくという減少関数を想定していると解釈できる．そこで，いろいろと考えられる関数形の中から，次のような指数減少関数を採用できる．

$$r(C)=b\cdot\exp(-d\cdot C). \tag{4}$$

この関数はD−D理論を定式化したものであるので，「D−D型パターン（dominant-design pattern）」と呼ぶことにする．このパターンの確率密度関数は(3)式の変換公式を使って導出できる．まず，

$$\int_{\phi=0}^{\phi=c} r(\phi)\cdot d\phi=-(b/d)\cdot[-\exp(-d\cdot C)-1],$$

であるので，(3)式を使って$R(C)$を計算し，これを(2)式の前半部分に代入すれば，確率密度関数$f(C)$は次のように得られる．

$$f(C)=b\cdot\exp[(b/d)\{\exp(-d\cdot C)-1\}-d\cdot C] \tag{5}$$

統計的検定

21業種の各々について，図3−3に示したような研究開発費の出現頻度分布が観測値という形で得られている．一方，(5)式で得られた確率密度関数が理論値という形で与えられる．そこで，「統計的当てはめ（statistical fitting）」により，各々の業種がD−D型パターンであるかどうかの統計的検定を行なうことできる．

理論値として与えられる確率密度関数は，かなり高度の非線形性を有しているので，非線形最小自乗法である「マルカート（Marquard）法」を使った[7]．これはニュートン・ガウスの反復式と最急降下法の折衷案である．非線形最小自乗法で推定されたパラメータ値の有意性の検定については，充分な理論が確立されていないが，線形関数で確立されている手続きを採用した．その結果を**表3−1**に示す．

まず，「その他の工業」という業種項目では，パラメータ推定のくり返し計算が収束しなかった．これは，この項目の性質上やむを得ないことである．

収束値が得られた20業種においては，「当てはまり」のよさを示す決定係数がほとんどが0.90以上の高い値を示している．そこで，パラメータ値の有意水準が問

表3−1　D−D型パターンの統計的検定

業種名	b（t−値）	d（t−値）	決定係数
食品	0.44（32.15）	0.40（8.48）	0.9142
繊維	0.33（26.36）	0.19（5.67）	0.9197
パルプ・紙	0.57（65.08）	0.57（16.14）	0.9965
出版・印刷	0.53（12.92）	0.32（2.45）	0.9204
総合化学	0.08（33.68）	0.01（1.85）	0.8864
油脂・塗料	0.45（26.68）	0.32（6.13）	0.8967
医薬品	0.54（66.34）	0.68（18.01）	0.9889
他の化学	0.38（43.69）	0.26（10.37）	0.9683
石油・石炭	0.48（37.51）	0.52（10.42）	0.9722
ゴム製品	0.45（15.19）	0.27（3.03）	0.9153
窯業	0.30（28.06）	0.15（5.39）	0.9111
鉄鋼	0.30（35.50）	0.23（9.91）	0.9451
非鉄金属	0.28（24.36）	0.14（4.80）	0.9388
金属製品	0.30（30.06）	0.19（7.25）	0.9571
一般機械	0.18（19.36）	0.14（6.36）	0.7894
電気機械	0.30（100.40）	0.63（37.09）	0.9344
通信・電子	0.45（273.30）	0.52（79.87）	0.9885
自動車	0.28（53.76）	0.15（11.06）	0.9643
輸送用機械	0.40（112.10）	0.27（25.82）	0.9755
精密機械	0.42（52.28）	0.47（15.58）	0.9813
他の工業	−	−	−

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

題になる．D−D型パターンの確率密度関数には，bとdの2個のパラータが存在する．線形関数の類推に従えば，t−値が2.02より大きければ，有意水準95%で各々のパラメータ値が0であるという帰無仮説を棄却できる．この規則に従えば，「総合化学」以外のすべての業種において，$b=d=0$という仮説を棄却することができた．逆にいえば，総合化学工業の研究開発はD−D理論が想定しているような収斂的プロセスに従っていないと断定できる．

業種別構造の識別

D−D理論が想定しているような収斂的過程が当てはまらないとすれば，他にどのような過程が考えられるのであろうか．まず第1に考えられるのが，探索段階から開発段階への移行にはなんらの規則性がなく，基本的にはランダムな過程であるという定式化である．

このパターンでは，凍結率関数$r(C)$が定数，すなわちプログラムの状態Cに依存しないので，$r(C)=a$と置くことができ，その確率密度関数については，$f(C)=a\cdot\exp(-a\cdot C)$という指数型分布を導出できる．このパターンは，科学上の発見が事業活動に直接関係するような産業において観察されるパターンである．そこで，これを「科学依拠型パターン（science-based pattern）」と呼ぶ．

この関数を先の分析では例外的なものとなった総合化学工業に当てはめてみると，決定係数が0.89で，パラメータaの推定値は0.08で，そのt−値は37.77という高い値が得られた．したがって，総合化学工業はD−D型パターンではなく，科学依拠型パターンであると識別することができる．

D−D型パターンを否定するもう1つのパターンは，ハイテク産業の事例研究で明らかになった業種間競争である．すなわち，D−D型パターンで仮定した(4)式の凍結率関数では，プログラムがいったん開発段階に達すると，もはや状態推移の凍結はありえないと仮定している．しかし，業種間競争が存在する場合には，ある業種のプログラムが開発段階に達した場合でも，状態推移が凍結される可能性が存在する．誰かが従来とは異なる科学上の原理にもとづき，現在の製品の性能水準以上のものを達成するような技術を発見したならば，その業種の開発プログラムは凍結されることになる．

このパターンの定式化は，凍結率関数$r(C)$においてCが大きくなると0に近づくのでなく，ある正の値hに限りなく近づくという形で翻訳できる．そこで，これを「ハイテク型パターン（high-tech pattern）」と呼び，

$$r(C)=f\cdot\exp(-g\cdot C)+h \tag{6}$$

という関数形を採用する．そこで，D−D型パターンと同様の手続きに従って，確率密度関数を

$$f(C)=[f\cdot\exp(-g\cdot C)+h]\cdot\exp\left[(f/g)\cdot\{\exp(-g\cdot C)-1\}-h\cdot C\right]$$

という形で導出できる．この関数形は，高度に非線形で非常に複雑な形をしている．そこで，適当なパラメー

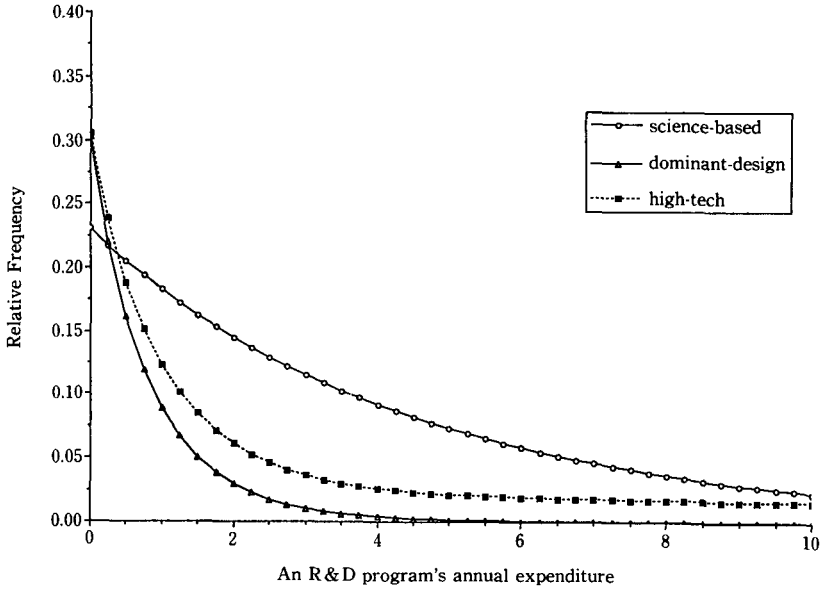

図3-4　3つのパターンの確率密度関数の相違

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

表3－2　ハイテク型パターンの統計的検定

業　種　名	h	(t－値)	決定係数
医　薬　品	0.0077	(2.23)	0.9900
一　般　機　械	0.0356	(2.97)	0.8013
電　気　機　械	0.0294	(21.19)	0.9569
通信・電子	0.0008	(3.32)	0.9886
精　密　機　械	0.0118	(2.75)	0.9841

タ値を設定して，他のパターンの確率密度関数と目に見える形で比較したのが，**図3－4**である．

この図によれば，ハイテク型パターンの関数は，他の2つのパターンと比較して，減衰の尾を長く引っ張っているという特徴が見受けられる．これは図3－3での電気機械工業の頻度分布で観測された現象とまさに一致している．

そこで，このハイテク型パターンの関数を20業種に当てはめてみた．その結果，「医薬品工業」，「機械工業」，「電気機械工業」，「通信・電子工業」，「精密機械工業」の5業種を除くすべての業種において，$h=0$という帰無仮説を棄却することはできないことが判明した．(6)式の凍結率関数においてhが0であれば，(4)式のD－D型パターンの凍結関数を仮定することになる．この5業種について，推定結果を示したのが**表3－2**である．この表では，紙面の制約上，パラメータhの推定値とt－値だけが示されている．

この結果をD－D型パターンの検定結果(表3－1参照）と比較すれば，次のことがいえる．決定係数については，5業種のすべてについて，多少の改善がみられる．たとえば，医薬品では0.9889から0.9900へ，一般機械では0.7894から0.8013へ，電気機械では0.9344から0.9569へと，決して小さくない改善を示している．このような決定係数の改善の事実と，5業種以外のすべての業種では$h=0$という帰無仮説を棄却できなかったという事実を重ね合わせれば，この5業種こそがハイテク型パターンであると積極的に認定できよう．

以上を要するに，この5業種と総合化学工業の研究開発構造は，D－D型と認定された他の大部分の業種のそれとは異なるのである．さらに，総合化学工業は，ハイテク産業とはその研究構造において大きく異なるのである．

他の計測結果との比較

電子工業と化学工業は，両者とも基礎科学に依存する度合いが強いので，その性質は類似しているとしばしば指摘される．英国SPRUのPavittの技術変化の分類では，電子工業と化学工業を科学依拠型産業という1つの分類項目に入れている[8]．しかし，この分類体系では，日本は国際競争力が非常に強い電子工業をもっているが，強い化学工業は存在しない，という事実を明らかに説明できない．

本講義で展開した分析によれば，化学工業は科学依拠型パターンに，電子工業はハイテク型パターンに分類されている．このことは，基礎科学と関連する仕方が異なることを示唆している．そこで，この問題を直接とりあげている実証的な分析と比較する必要がある．

米国での特許データ・ベースにもとづき，Narinは「科学との関連度 (science linkage)」を測る方法を開発した[9]．すなわち，1つの特許が平均して何個の科学文献を引用しているかで，この関連度を計測している．これは，各業種の技術開発における科学研究の必要性の指標である．そこで，米国で1985－1989年の期

表3－3　米国特許による「科学関連度」の計測

製品グループ	特許件数	科学関連度
科学依拠型：		
有機化学	177	1.18
無機化学	74	0.62
ハイテク型：		
医　薬　品	155	1.05
一般機械	73	0.14
通信・電子	10	0.21
精密機械	43	0.70
D－D型：		
繊維製品	19	0.10
ゴム製品	101	0.12
窯業製品	11	0.09
金属製品	18	0.03
輸送機械	13	0.07

出所：筆者のハーバード大学でのコースで，Narin氏をスピーカとして招待した時に学生に配布した資料から作成した．

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

間に公告された963件の特許について，56の製品分野毎に，引用した科学文献数の平均値を計算した．サンプル数が10以上の製品分野についての計測結果を**表3－3**に示す．

この表に示されているように，「有機化学製品」の科学関連度が一番高く，177件の特許は平均して1.18件の科学文献を引用している．次に高いのが，「医薬品」で，平均1.05件の文献を引用している．ハイテク型業種の特許の文献引用数は，1.05件から0.14件に散らばっている．しかし，D－D型業種のそれは，ほとんど0.10以下という非常に低い値に分布している．

以上を要するに，特許の引用文件数をもとにした計測においても，ハイテク産業は科学依拠型とD－D型という両極端の中間に位置することが明らかになっている．このことは，本講義の分析とNarinの分析とはそのデータ・ベースと方法論に大きな違いがあるにもかかわらず，その結論は驚くほど一致しているということである．

注釈と参考文献

[1] Utterback, J. and Abernathy, J.：Dynamic Model of Product and Process Innovation, *Omega*, Vol. 3, 6 (1975), pp. 639－656.

[2] Utterback, J. and Sarez, F.：Innovation Competition, and Market Structure, *Research Policy*, Vol. 22 (1993), pp. 1－21.

[3] 児玉文雄：研究開発に関する政策研究，研究・技術計画，2巻3号 (1987), pp. 216－225.

[4] Evenson, R. and Kislev, Y.：*Agricultural Research and Productivity*, pp. 140－155. *Yale University Press*, 1975.

[5] 総理府統計局編，「科学技術研究調査報告」，第9表（産業，製品分野別社内使用研究費）

[6] このモデルの数学的表現については，埼玉大学政策科学研究科・大山達雄教授から多大の助言をいただいた．感謝の意を表明したい．

[7] この計算において，埼玉大学政策科学研究科・刀根薫教授の開発したプログラムを使わせていただいた．詳細については，刀根薫：マイコンシリーズ1「BASIC」，培風館 (1981), pp. 137－146.

[8] Pavitt, K., Robson, M. and Townsend, J.：Technological Accumulation, Diversification and Organization, in UK Companies, *Management Science*, Vol. 35 (1989), pp. 81－99.

[9] Narin, F. and Frame, J.：The Growth of Japanese Science and Technology, *Science*, Vol. 245 (1989), pp. 660－665.

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．