

研究開発のダイナミックスの定式化と その鉄鋼への適用可能性

小指 軍夫*

A Consideration on Dynamics of R&D and Possibility of Its Application to Steel Technology

Isao KOZASU

Synopsis : Relationship between R&D resource input and R&D output is dynamic in nature. If this dynamics is understood well by researchers and engineers, it can help them plan and perform R&D effectively. There have been several proposed dynamic models, but they are intended for planning and analysis for managerial purposes and not necessarily describe and predict dynamics. It is shown in this paper that, based on simple hypotheses, a simple qualitative equation describing R&D dynamics can be obtained where basic variable describing technological competitiveness is taken as technological stock. The hypotheses are in the following: (1) Relative increment in technological stock ($\Delta S/S$) is proportional to relative increment in cumulative resource input ($\Delta R/R$). (2) Technological stock decreases with time at a constant rate. (3) There is a certain delay time for the resource input to produce result. The resulting equation is as follows:

$$S = R(t - \gamma)^{\alpha} e^{-\beta t}$$

where α is an efficiency parameter, β is a decay or obsolescence parameter, and γ is delay time. For examples, this equation together with another minor hypothesis can describe well-known favorable effects of focused resource investment, switching of R&D subject, and top-heavy investment. The meanings of these parameters are also discussed in relation to the efficiency in R&D. The model can also be applied to various case studies of resource input and R&D output.

Key words : research and development; dynamics; modelling; technological stock; technological flow; resource investment.

1. まえがき

研究開発の効率的な進め方や管理については多くの刊行物があり、実際的な手法などについて有益な情報を提供している。しかし研究資源の投入と成果の関係を時間軸上で論じたもの、つまり動力学の本質（ダイナミックス）に触れたものは少ない。本論文ではこのようなR&Dダイナミックスの一般的表現の可能性について論じてみる。ダイナミックスの数式的表現が得られれば、もともと理工系である研究者自身の理解が容易になり、研究開発の自発的な効率的推進に寄与することが期待される。

ダイナミックスの要素としてつぎの2つの基本的関係が考えられる。第1に技術のフロー（研究開発の直接の成果）とストック（成果の蓄積）の問題がある。継続的に研究開発を行う場合はフローが発生するとともに、フローはストックとして蓄積してゆく¹⁾。最近はこの蓄積はテクノストックと呼ばれることも多い。まったく新しい分野の開発を行う場合以外は、実際に適用される技術はストック的であることが多い。とくに鉄鋼業のような成熟産業ではストックが相対的に重要になる。このようなフローとストックの考え方はマクロな生産性の解析手法である Total Productivi-

ty Factor (TPF)²⁾の考え方や、開発戦略の策定などに例³⁾が見られるが、これらは本質的に、統計データに基づいた解析による定量性を指向しているため時間的取り扱いについては離散的であり、動的記述の面は弱い。

第2に技術レベルは研究開発開始後に時間の経過とともに、はじめは上昇するが、やがて技術の減耗による低下が起こる。これはいわゆるプロセスや製品の競争力のライフサイクル現象⁴⁾である。減耗は技術の陳腐化や、競争の熾烈化などで生ずる相対的な現象である。これらの2点の仮説に基づくと、研究資源投入量と研究成果（技術力としてのストック）の時間的変化について比較的簡単な数式的表現が得られることを以下に示す。ただしこのダイナミックスはまだ定性的な性格はかなりあるものの、効率的な開発の進め方についてある程度の直観的な洞察を得やすくするツールにはなりうる。このアプローチはいわば「研究者のためのR&Dダイナミックス」を指向するものである。

2. 研究開発のダイナミックス・モデルの構築

一般論として、開発課題を決定して研究資源を投入すると、成果としての技術のフローが発生し、技術のストック

平成10年1月27日受付 平成10年4月13日受理 (Received on Jan. 27, 1998; Accepted on Apr. 13, 1998)

* NKK技術開発本部 (Research and Development Division, NKK Corp., 1-1 Minamiatarida-cho Kawasaki-ku Kawasaki 210-0855)

も増加する。しかし一方ではストックは時間とともに、減耗、減少する。これに関するダイナミックスのモデルは研究資源の投入に対する研究成果の時間的変化を記述するものである。フローとストックの相対的重要度は産業分野によって異なり、未成熟・成長分野ではフローが、成熟分野ではストックがより重要になる。ここでは成熟産業である鉄鋼業を考えて、研究成果としてストックを考えることにする。このストックはある意味で、技術レベルないしは競争力を表すと考えてよい。なお研究資源はある程度の定量的記述が可能であるものの、フローとストックの定量化は多くの試みにも拘わらず、一般的にはまだ確立していない。したがってここでは研究資源、フロー、ストックのすべてをいわば「概念的な量」として取り扱うことにする。

まず特定テーマあるいは特定分野についての研究資源、研究成果の時間 t における概念的な累積量を下記のように定義する。

$R(t)$: 累積研究資源投入量, 内容として人的費用 (研究者, 補助者, 支援部門) と直接費 (設備費, 運転資金) など。

$S(t)$: 技術蓄積量, 内容としてはプロセス, 設備, 製品に関する技術的内容, 特許, データベース, ノウハウ, 研究者個人に蓄積される知識・経験, 論文・講演などの成果の加重的総和。

モデルの基本的な特性については次のような4つの仮説をおく。

仮説1: 「技術蓄積量の相対的な増分($\Delta S/S$)は累積資源投入量の相対的増加量($\Delta R/R$)に比例する。」

$$\frac{\Delta S}{S(t)} = \alpha \frac{\Delta R}{R(t)} \dots\dots\dots(1)$$

これはたとえば新たに1億円投入する場合、すでに過去にその課題に1億円投資している場合と、100億円投資している場合では、今回の1億円投資の効果は前者のケースの方が大きいと考えることに相当する。具体的には、鉄鋼のように過去の資源投入量の大きい分野では、単位投入量効果が逡減してくることを意味する。 α は投資の効率を示すパラメーターと考えられるので、これを投資効率係数と呼ぶことにする。技術の枠組み、たとえば新規技術か既存技術かが変わらなければ、 α は時間的に一定と考えられる。しかし長期的に見ると、技術そのものの性格も変化し、外部的には競合技術も含めた技術の枠組みも変化するため、 α も変化するものと考えられる。 S と R を時間に対する連続量とし、 α を一定として(1)式を積分すると(2)式が得られる。

$$S(t) = R(t)^\alpha \dots\dots\dots(2)$$

仮説2: 「技術蓄積は相対的に時間とともに一定の速度で減少する。」

$$\frac{\Delta S}{S(t)} = -\beta \Delta t \dots\dots\dots(3)$$

β は時間的減耗の割合を示す係数であり、外的要因として競争の熾烈化、新競合プロセス・新製品の出現による現技術の陳腐化、内的要因として知識を担う技術者や技術伝承を担う技能者の喪失や不足などの要因などにより値が大きくなる。これらの要因を陳腐化で代表させ、 β を陳腐化係数と呼ぶことにする。 β の時間的変化については、 α の時と同じ議論が当てはまる。ネットの ΔS の変化は(1)式と(3)式を組み合わせた(4)式になる。

$$\Delta S = S(t) \left(\alpha \frac{\Delta R}{R(t)} \right) - \beta S(t) \Delta t \dots\dots\dots(4)$$

β を一定として、(4)式を t に対して連続として積分すると、原始関数として(5)式が得られる。

$$S(t) = R(t)^\alpha e^{-\beta t} \dots\dots\dots(5)$$

つまり減耗は指数関数的減衰項として入ってくる。

仮説3: 「資源投入の成果 (フローおよびストック) が出るまでには遅れ時間がある。」

これは研究遂行のための準備段階 (たとえば研究設備の準備, 新規分野であれば人材の育成, 獲得), および支援技術の発展などが必要なために生ずる。この遅れ時間を γ とすると(5)式の右辺の時間は t ではなく $t-\gamma$ になる。

$$S(t) = R(t-\gamma)^\alpha e^{-\beta(t-\gamma)} \dots\dots\dots(6)$$

ただし(6)式は成果が得られ始めた時点から減耗が始まると考えたケースである。既存分野に新規参入する場合などは、資源投入開始時からすでに外部的に競争などによる陳腐化が進行していると考えられ、この場合は下の式になる。

$$S(t) = R(t-\gamma)^\alpha e^{-\beta t} \dots\dots\dots(7)$$

仮説4: 「研究開発が成功するためには、ある臨界技術蓄積量を超える必要がある。」

臨界技術蓄積量を S_{th} とすると

$$S(t) \geq S_{th} \dots\dots\dots(8)$$

が必要条件である。ただし S_{th} 自体も時間とともに変化する量であり、たとえば競争の激化とともに増大する。他方 $S < S_{th}$ に留まるならば、技術は蓄積されても、事業的にはその開発の意味がなくなる。

以上の前提を踏まえて、比較的単純化したケースについて考察を進めてみることにする。まず研究資源投入量は t について(9)式のように時間的に一定の投資を続けるケースを考える。

$$R(t) = t \dots\dots\dots(9)$$

α , β の合理的かつ定量的設定の根拠はまだ確立されていないが、時間遅れがない場合について、典型的に技術蓄積が増加するケース、減耗が激しいケースについて α と β をパラメータとして示したのがFig. 1である。以下のすべての図における曲線は数式により計算したものであるが、ダイナミクスの理論的パターンを論じるために座標軸は相対的なものにした。Fig. 2は $\alpha=1.5$ の場合の、技術蓄積

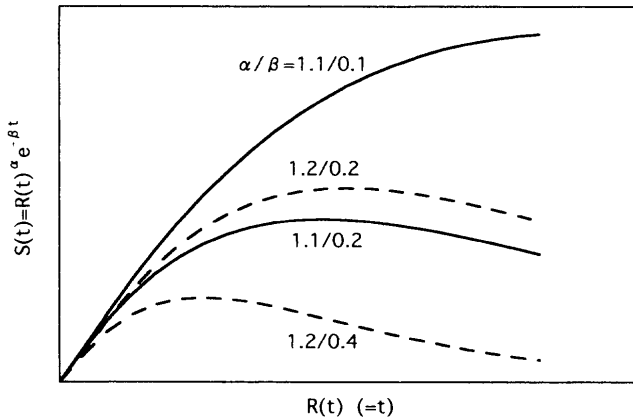


Fig. 1. Qualitative relationship between cumulative resource investment (R) and technological stock (S) where $R=t$.

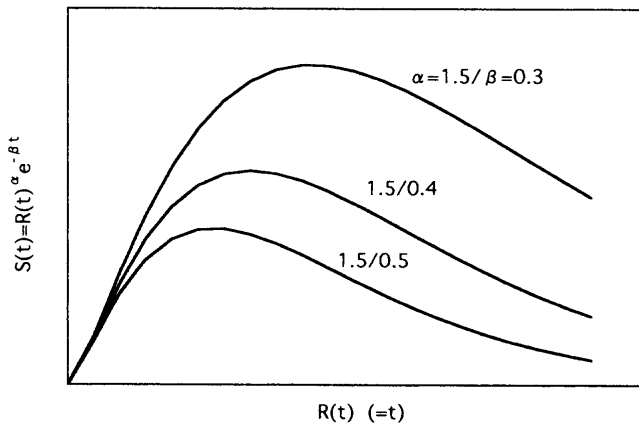


Fig. 2. Effect of obsolescence parameter (β) on the relationship between cumulative resource investment (R) and technological stock (S) where $R=t$.

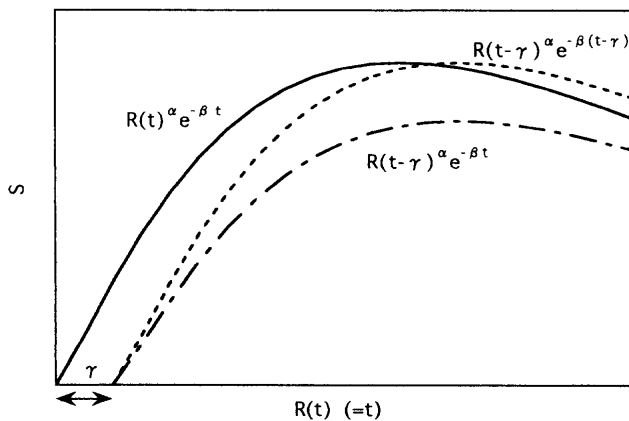


Fig. 3. Effect of delay time (γ) on the relationship between cumulative resource investment (R) and technological stock (S) where $R=t$. ($\alpha=1.2$, $\beta=0.2$, $\gamma=1$)

量(S)に対する陳腐化係数(β)の影響を示したものであり、減耗率の影響の大きいことが読みとれる。Fig. 3は S に対する遅れ時間(γ)の影響を示したものであり、(6)式、(7)式の意味の差を読みとることができる。なお一般的な $R(t)$ について計算を行う場合には、(4)式は定積分形の下の(10)式の形で用いることになる。

$$\ln\left(\frac{S}{S_0}\right) = \alpha \ln\left(\frac{R}{R_0}\right) - \beta(t-t_0) \dots\dots\dots(10)$$

ただし添字0は初期の状態を示す。

3. ダイナミクス・モデルの応用例

上に述べたダイナミクスのモデルを用いて、2, 3の簡単なケースのダイナミクスについて検討してみる。

3.1 研究資源の集中または分割投入の効果

一定量の研究資源を1テーマに集中して投入するか、複数のテーマに分割投入するかのケースについて考えてみる。ただし、ここでは各テーマのダイナミクスは同じであり、遅れ時間効果はないものとする。1テーマへの集中投入、2, 4, 6テーマへ等分に分割投入した場合の各テーマ個別の技術蓄積量をFig. 4に示す。この場合技術蓄積量がある臨値 S_{th} を越えた場合が開発の成功に対応すると考える。この図のようなケースでは分割が多くなると成功の確率が低下することが読みとれ、いずれのテーマも成功しない。つまり研究資源を n 分割して n 年研究を継続しても1テーマに集中投下した場合と同じにならないことを示している。これは技術の減耗(陳腐化)の効果が大きく利くためであり、通常いわれている集中投入の効果を示されている。ただしかなり大量の資源を投入する場合を考えると、集中投資の効果はあるものの、最適分割による全体的な成功率の向上も重要な課題になる。鉄鋼のような成熟技術分野では共同研究開発の必要性が挙げられている。これは上の資源の分割投入の逆であり、たとえ1社の資源投入量が成功の臨値以下であるとしても、 n 社が共同で行えば、開発に成功する確率は大きくなる。しかしこの場合に

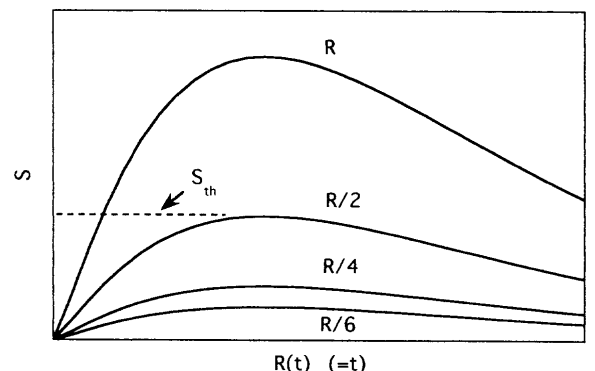


Fig. 4. Effect of divided resource investment (R/n) on technological stock where $R=t$. ($\alpha=1.2$, $\beta=0.2$)

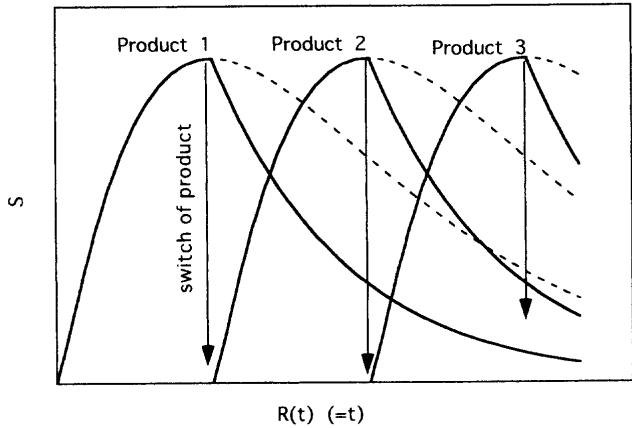


Fig. 5. Effect of switching of R&D subject (product) on technological stock (S) where $R=t$. (Dotted lines show the cases where switching is not made.) ($\alpha=1.2, \beta=0.2$)

は、競争の激しい分野は取り上げ難く、また研究開発の効率も必ずしも n 倍の資源投入に対応するものとはならない可能性がある。なお以上の議論は工学的な研究開発についてであり、発見や科学的データの蓄積を目的とする伝統的な純粋理学的研究 ($\beta=0$) には当てはまらない。

3.2 製品・プロセスの切り替え

特定のテーマ (たとえば製品) の研究開発を長期間継続すると、その研究開発の成果自体の効果が、フロー、ストックの両面から見て、低下してくる。この場合、現目標製品テーマを途中でやめて、新たな目標製品テーマに研究投資を切り替えて資源投入を行う場合の技術蓄積の変化を Fig. 5 に示す。ただし同図では時間遅れの影響は考慮していない。なお点線は現製品にそのまま投資を継続した場合の技術蓄積である。この図からわかるように、さいわいシーズがあって研究投資をたとえば同一製品分野の新しいテーマに切り替えられれば、旧テーマを継続する場合に比べて、長期間にわたってその製品分野の競争力優位を維持することができる。このようなパターンは IC 分野の DRAM の世代交代などに見られ、陳腐化が急速でライフサイクルの短い分野に典型的に現れるものである。このようなパターンを可能にするためには、研究者のシーズの創出努力、経営者の最適の切り替えタイミングの決断の両輪が必要になる。

3.3 研究投資の投入パターンの影響

これまでは時間的に一定の研究資源の投入を継続するケースについて議論してきたが、時間的な資源投入パターンの影響も当然考慮しなければならない。ここでは特定の期間に特定の総資源投入を行うケースについて、時間的に一定の量の投資を継続する場合と、初期投入を全投入の $1/2$ とし、それ以降前者の $1/2$ の割合で投入を続ける場合の技術蓄積を (10) 式により計算したのが Fig. 6 である。ここでは期間を $t=15$ 、全投入量 $R=15$ 、投入率一定の場合は $R=t$ 、初期投資の大きい場合を $R=7.5+0.5t$ としている。この図

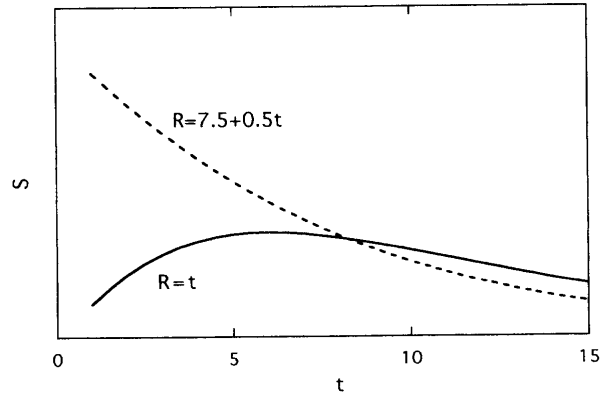


Fig. 6. Effect of investment pattern with time on technological stock where the total investment volume is identical. ($\alpha=1.2, \beta=0.2$, investment period=15)

から分かるように、初期に集中的に投入を行う方が立ち上がりの効果が大きく競争力が大きい。後期には技術蓄積は一定投入のケースよりも低下するが、これは初期の高い技術蓄積の減耗が利いてくることによると考えられる。一般的にいわれている初期の集中投資の有効性が示されている。ただし現実的には、初期に集中投資できる開発課題は、成功の確率の高いものに限定されると考えられる。したがってこれに先行するシーズ技術の発掘と見極め、本格的開始時の決断が重要になる。

4. 研究開発の効率化と各パラメーター

研究開発の効率化に関して、研究資源の集中投下、タイムリーな新規テーマへの切り替え、初期集中投下などの R, S の「量的」効果についてすでに Fig. 4-6 に示した。モデル式の α, β, γ の各パラメーターも研究開発の効率と「質的」に密接に関係している。ここではこれらのパラメーターの特性と効率化との関連について定性的に考察してみる。

4.1 α : 投資効率係数

一般的に α は新規の技術では今までの蓄積がないため、資源投入開始後のある時期には急速に技術が蓄積されるので高く、技術成熟段階では小さいと考えられる。しかしこのような枠組みの中でも、ある時点での、あるいはある限界の大きさの期間における α を決定するのは主としてマネージメントの優劣と考えられる。具体的にはポテンシャルの高い研究者の獲得、配置とその活性化、研究開発そのものについては、分野・課題・目標の設定、推進方法の最適化と柔軟性のある運営などに関わるマネージメントである。

4.2 β : 陳腐化係数

一般論として、 β は他律的要素と自律的要素の双方に依存する。他律的には、 β は特定分野の技術発展の初期では低く、それが発展して競争が激化した段階に入ると高くな

り、成熟期では再び低下するものと考えられる。ただし技術が独創的であり、知的財産権によって保護されたものならば、 β は低い値を維持できる。このような状況を得るためには、重点技術への継続的資源投入を行い、他社に対して技術の優位性維持を図ることなどが必要になる。自律面、すなわち企業内で低い β を得る方策としては、技術的蓄積の大きい専門職の育成・活用・活性化、技術伝承の効率的実施、利用価値の大きいデータベースの構築などが重要と考えられる。

4.3 γ : 時間遅れ定数

通常 γ は新規性の高い分野、あるいは逐次的スケールアップが必要な大規模開発ほど大きくなると考えられる。 γ を小さくする方策としては、関連する汎用的基盤技術および要素技術を自力で準備しておく一方、アウトソーシングの活用、得意分野を持つ他企業との提携などが考えられる。他方遅れ時間はある程度止むを得ないとしても、これに対応する早期着手の経営的判断や、研究資源の初期集中投下などで遅れ時間の効果を軽減できる。

鉄鋼業は成熟に近い段階にあるといわれている。この段階では残された有望なシーズは多くはなく、成功確率から見た投資効率は低下し、 α は低下する。また累積資源投入量 R の局面では、既に設備規模が大きくなっているため、いわゆる投資効果逓減の法則から、それ以前の発展期と同一の効果をj得るための投資規模が大きくなる ($\Delta R/R$ 効果)。このような場合の対策としては、在来技術分野・区分を組み替えた枠組みの中でのシーズ発掘、技術の再構築を試みるjこと、または在来技術の枠組内であれば他社との共同開発の態勢を構築することなどが有効であろう。しかしこの場合でも逓減効果を免れることはできないので、あくまでも発想の異なる新テーマの創出は重要である。

以上に示したように、研究開発のダイナミックスの記述が可能であり、簡単なケースについてはある程度の定量的な取り扱いも可能と思われるが、未だ定性的な段階にあることは認めざるを得ない。たとえば過去のデータにおいて、技術蓄積量はある尺度で記述できるとしても、これに対応する資源投入のデータが欠落していることが多く、定量的解析を困難にしている。このようなケースの取り扱いについては、別途詳しく検討する必要がある。またこれまでは個別の開発をイメージして議論してきたが、技術蓄積の比重の大きい鉄鋼分野において、個別の技術蓄積と企業あるいは業界全体の技術蓄積の推移のj関係の議論も重要である。さらに技術蓄積は直ちに利用可能というわけではなく、ストックをフローに転化するするための資源投入も必要である。これらの残された問題については別の機会に議論し

たい。

5. 結言

現在研究開発の資源投入と成果実現のダイナミックス・モデルについてはいくつかあるが、これらは研究開発の企画立案などのマネジメントに関するもので、j現業の技術者、研究の実行レベルにまで十分関与するものとは言い難い。ここではこのレベルの関係者たちが理解でき、研究開発の実践に役立てるための「定性的なダイナミックス」を構築することをj試み、以下の結果を得た。

(1) 鉄鋼業のような成熟技術分野では、技術力として技術蓄積が重要である。技術蓄積の時間的变化(ダイナミックス)は次の仮説をおくと簡単な数式で表現できる。仮説1: 技術蓄積量(S)の相対的増分は累積資源投入量(R)の相対的増分に比例する。仮説2: 技術蓄積量は相対的に時間とともに一定の速度で減少する。仮説3: 投入資源による結果が技術蓄積として実現するまでには一定の遅れ時間がある。

(2) 上の仮説から、時間的に連続な技術蓄積量に関する研究開発のダイナミックスのモデル式が得られた。

$$S(t) = R(t - \gamma)^\alpha e^{-\beta t}$$

ただし α は投資効率係数、 β は陳腐化係数、 γ は遅れ時間定数であり、上の式では α 、 β は時間に対して一定としているが、中長期的には時間依存性を考慮する必要があると考えられる。

(3) 本モデル式の応用例として下記のようなケースを検討し、妥当と思われる結果を得た。1) 研究資源の複数テーマへの分割投入効果、2) 新テーマへの切り替えの効果、3) 初期重点投資の効果。また α 、 β 、 γ のパラメーターと研究開発の効率化の関係についても考察した。

(4) 本モデル式は定性的なものであるが、限定されたケースでは定量的な解析が可能なケースも想定されるので、それらについて今後各パラメーターを具体的に求めて行くことが必要と考えられる。

文 献

- 1) 佐藤隆三: 技術の経済学, PHP研究所, 京都, (1985), 233.
- 2) 産業科学技術の動向と課題, 通商産業省編, 通商産業調査会, 東京, (1992), 73.
- 3) 林雄二郎: 科学のライフサイクル, 山田圭一編, 中央公論社, 東京, (1975).
- 4) 高柳誠一: 第8回シンポジウム講演要旨集, 研究・技術計画学会, 東京, (1993), 3.