研究 技術 計画 Vol. 16, No. 1/2, 2001

【論文】

研究開発投資の最適軌道管理に関する理論的・実証的分析

渡辺千仭* 朱 兵** 藤 祐司***

平成12年5月 受付
平成13年6月 受理

研究開発投資の決断は，メガコンペティションの帰趨に決定的な影響を及ぼすようになってきている。本研究は，ポントリヤーギンの最適化理論に則り，研究開発投資・技術ストックの形成・成長の好循環軌道構築の発想に立って，研究開発の最適投資レベル決定のための実践的なモデルを開発し，その有効性を示した。さらに，それを用いて，過去20年間の日本の製造業を対象とした実証的分析を行い，本手法が研究開発投資の意思決定のための有効なツールであることを示した。

1. 序

メガコンペティションの高まりとともに，政策あるいは企業経営戦略決定者にとって研究開発投資の決断がますます重要な課題となってきている。加えて，研究開発投資支配要因の相互関係はとみに複雑化し，適正投資レベルの判断は複雑化の一途をたどりつつある。このような中で，昨今，日本の誇った研究開発投資と経済成長の好循環が破綻し，悪循環に陥りつつあることが強く懸念されるに至っている。

以上の背景のもとに，かねてから伝統的な成長理論や資源の最適配分理論等に立脚して研究開発投資の最適レベル決定のための多くの先駆的研究が重ねられてきたが，未だに実践的導入の域には達していない。

本研究は，ポントリヤーギン（1962）[1]の提唱した最適化理論に触発されて，「研究開発投資・技術ストックの形成・接続的成長の間の好循環軌道構築」の発想に立った研究開発の最適投資レベル決定のための理論的・実証的検討を行うことをねらいとする。

* Chihiro Watanabe
教授，東京工業大学大学院社会理工学研究科経営工学専攻，東京都目黒区大岡山2-12-1
** Bing Zhu
客員研究員，同上
*** Yuji Tou
博士課程1年，同上

このアプローチの核心は，技術開発に伴い産出される技術商品の市場における代替弾性値や設備投資や研究開発投資への分配を勘案した上での技術の限界生産性が鍵となるが，未だに本分析に適用し得る理論的・実証的研究がなされるには至っていない。

以上の実情に照らして，本研究では，技術の生産要素体化メカニズムに着目した技術体化型生産関数の発想に基づいて，これらの実践的な計測手法の開発を試みた。

これらをベースに，本研究は研究開発投資最適レベル決定のための実践的なモデル開発をねらいに，技術の労働，資本への体化メカニズムに基づく技術体化型生産関数を開発し，それを用いた代替弾性値や限界生産性の計測を試みることにより，この積年の問題に対処した。

その結果，実践的な分析が可能な新たなモデルを開発し，その有効性を実証することが出来た。さらに，それを用いた1975–1996年の間の日本の代表的な高研究開発強度及び低研究開発強度産業を対象とした実証分析により，研究開発投資の最適レベル及び実績値のレベルを比較検討し，それぞれの業種の研究開発投資レベルの検証・評価を行うことが出来た。

第2章では，研究開発投資の最適投資決定モデルの開発を試みる。第3章は，同モデルの鍵となる技術製

品の代替弾性値及び設備投資と研究開発投資の分配を勘案した技術の限界生産性の計測の実践的手法を示すとともに，同手法を用いてこれらの最適投資レベルのコア決定要因を計測する。以上の結果に基づき，第4章では，研究開発投資最適レベルを計測し，検証・評価する。第5章は政策含意をまとめるとともに，今後の継続的検討課題を示す。

2．研究開発投資最適管理モデル

本研究では，

① 企業が生産の成果を将来の生産及び技術革新それぞれに向けて投資分配する場合の動態管理プロセス及び，

② 技術革新への投資が，将来にわたり多様な技術製品を求める消費者のニーズを満たす程度

を明らかにし，

③ ①の供給面の制約下で，②のニーズを最大化させる技術革新への投資分配率を求める，

とのアプローチに立脚して，研究開発投資の最適投資レベル決定のための実践的なモデルを構築した。その概要は，**図1** に示す通りである。

以下に，各ステップごとのモデル展開を示す。

2.1 研究開発投資の動態プロセス

まず，企業の生産拡大及び技術革新双方に向けての投資の動態プロセスを分析するために，次のようなモデルを検討する。

企業の生産活動に伴う産出を y，それに要するインプット（生産要素）を X（ただし X：L（労働），K（資本），M（原材料），E（エネルギー））とすると，y と X との関係を示す関数（生産関数）は次のように示される。

$$y = F(X) \tag{1}$$

産出は，X のほか学習効果等の影響も受け，これは時間経過に比例するので，（1）式は時間 t を考慮した次式のように発展される。

$$y = F(t, X) \tag{2}$$

企業の技術戦略は，生産要素 X を，技術投資と専ら生産の拡大をねらいとする生産投資に，いかに配分するかによって決定される。

技術投資は，研究開発投資 r の累積たる技術ストック T で表され，T は，生産要素 L, K, M, E に対応する L_T（研究者），K_T（研究資本ストック），M_T（研究用原材料使用），E_T（研究用エネルギー使用）で構成される。

従って，技術ストック T は，

$$T = T(X_T) \qquad X_T: L_T, K_T, M_T, E_T \tag{3}$$

で示され，これを研究開発投資 r との関数で示せば，t 時点においては，

$$T_t = r_{t-m} + (1-\rho)T_{t-1} \tag{4}$$

で示される（例えば，Watanabe (1992) [2]）。

ここに，r_{t-m}: $t-m$ 時点の研究開発投資，m：研究開

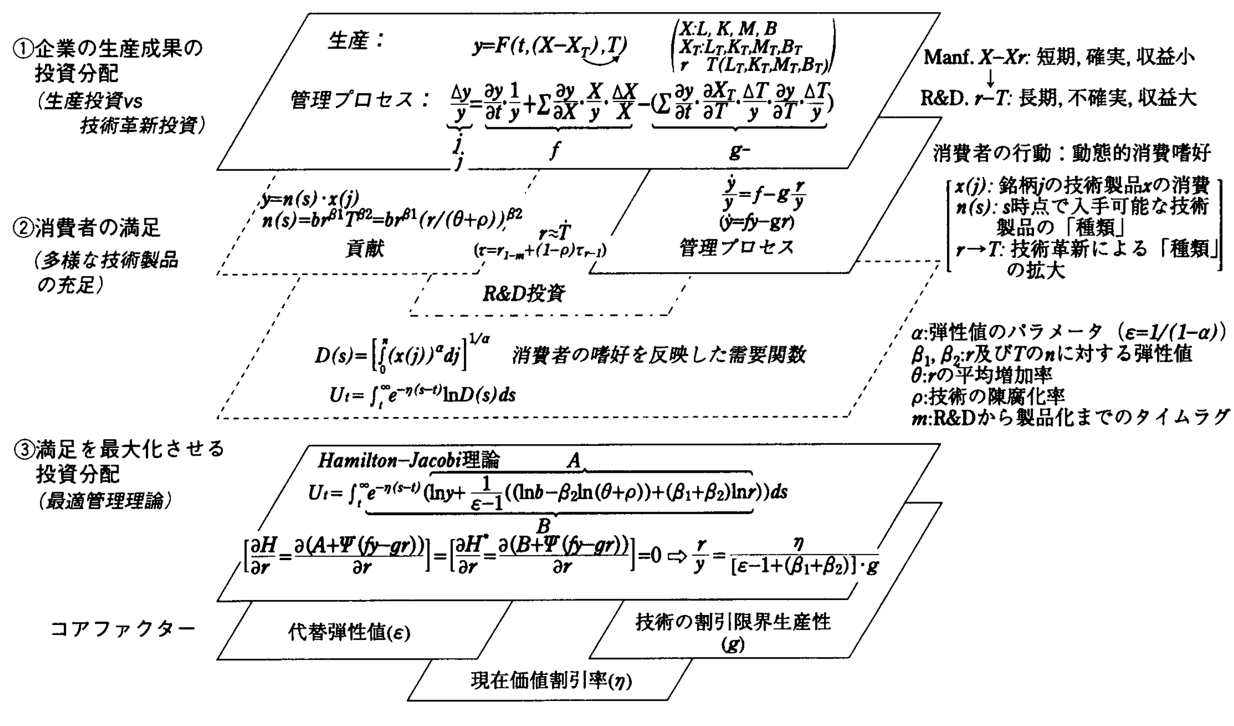

図1．研究開発投資最適管理モデル

発から製品化までのリードタイム，ρ：技術ストックの陳腐化率である。

一般に，生産要素Xは，技術投資と生産投資に分離可能であるので，(2)式は，次のように示される。

$$y = F(t, (L-L_T), (K-K_T), (M-M_T), (E-E_T), T) \qquad (5)$$

研究開発投資rはX_Tに要する費用の合計であり，またrの累積たる技術ストックTはX_Tの集積であるので，(3)式の$T=T(X_T)$はX_Tの集積状況を表す関数を$h_x(X_T)$とすると，$T=[h_x(X_T)]$で表される。[1)]

ここで，X_Tを構成するL_T, K_T, M_T, E_Tは相互に必要最小限なもの同士が無駄なく組み合わされるので，この関数は次のように示される。

$$T = T(L_T, K_T, M_T, E_r)$$
$$= \min\{h_l(L_T), h_k(K_T), h_m(M_T), h_e(E_T)\} \qquad (6)$$

従って，L_T, K_T, M_T, E_Tはそれぞれの逆関数の存在を前提に次のように示される。

$$L_T = L_T(T) = h_l^{-1}(T), \qquad K_T = K_T(T) = h_k^{-1}(T)$$
$$M_T = M_T(T) = h_m^{-1}(T), \qquad E_T = E_T(T) = h_e^{-1}(T)$$

(7)[2)]

(7)式を念頭に置いて(5)式を時間で微分すると，次式が得られる。

$$\frac{\dot{y}}{y} \approx \frac{\partial F}{\partial t}\frac{1}{y} + \sum\frac{\partial F}{\partial X}\frac{X}{y}\frac{\dot{X}}{X} - \sum\frac{\partial F}{\partial X}\frac{\partial X_T}{\partial T}\frac{\dot{T}}{y} + \frac{\partial F}{\partial T}\frac{\dot{T}}{y}$$

(8)[3)]

(4)式により，$\dot{T} \approx r$で近似されるので，(8)式は次のように示される。

$$\frac{\dot{y}}{y} = f - p\frac{r}{y} + q\frac{r}{y} \qquad (9)$$

$$f = \frac{\partial F}{\partial t}\frac{1}{y} + \sum\frac{\partial F}{\partial X}\frac{X}{y}\frac{\dot{X}}{X}$$

非研究開発生産要素及び学習効果等による生産の成長への貢献分

$$p = p(t) = \sum\frac{\partial F}{\partial X}\frac{\partial X_T}{\partial T}$$

投入要素を研究開発に割くことによる成長の減少分

$$q = q(t) = \frac{\partial F}{\partial T}$$

投入要素を研究開発に割いた結果築かれた技術ストックによる成長への貢献分

(5)式において投入要素のうち，研究開発に割く量r及びその生産に対する割合（研究開発強度）r/yが成長及びその結果の研究開発への再投資を動態的に管理する上でのコントロールパラメーターとなるので，これに関連する$(r/y)p, (r/y)q$をまとめると，研究開発投資の動態プロセスは，次式で表されることになる。

$$\frac{\dot{y}}{y} = f - g\frac{r}{y}$$

ここに$g = g(t) = p(t) - q(t)$ (10)[4)]

2.2 研究開発投資効果評価のための効用関数

次に，以上の動態プロセスにおけるコントロールパラメーター$r=(t)$の最適レベルを見極めるために，rの投資が消費者のニーズを満足する程度を示す関数（効用関数）を検討する。t時点の効用関数は，t時点($s=t$, ただしsは時間経過）から将来($s=\infty$)にわたる消費者

---

1) 例えば，$T=\sum a_x X_T$の場合は，$h_x(X_T)=a_x X_T$であり，$T=\Pi X_T^{a_T}$の場合は，$h_x(X_T)=X_T^{a_T}$となる。

2) 1975–1996の日本の製造業においては，統計的に有意な次のような逆関数の存在が示される。

	adj. R^2	DW
$\ln L_T = 3.750 + 0.500D_1\ln T + 0.508D_2\ln T + 0.496D_3\ln T - 0.127D_{79.95.96}$	0.948	1.432
(6.685) (8.751) (9.418) (9.499) (−3.578)		
$\ln K_T = 0.918 + 1.131D_1\ln T + 1.151D_2\ln T + 1.137D_3\ln T + 0.160D_{85.91}$	0.985	1.401
(1.179) (14.245) (15.379) (15.701) (2.880)		
$\ln M_T = -9.032 + 1.632D_1\ln T + 1.637D_2\ln T + 1.588D_3\ln T + 0.346D_{91.92}$	0.987	1.285
(−10.811) (19.180) (20.376) (20.583) (5.100)		
$\ln E_T = 2.726 + 0.504D_1\ln T + 0.523D_2\ln T + 0.519D_3\ln T$	0.924	2.020
(2.812) (5.104) (5.610) (5.764)		

D_1, D_2, D_3は分析期間内の次の構造変化に対応した係数ダミー（対象期間1, その他期間0）で
D_1: 1975–1986 (第1次石油危機－バブル経済); D_2: 1987–1990 (バブル経済期間); D_3: 1991–1996 (バブル経済崩壊後)を示し，その他のダミーDは分析期間内の特異時点を対象とした定数ダミー（対象時点1,その他時点0）を示す。

3) 数式展開の詳細は3.2参照

4) $g(t)$は$p(t)$と$q(t)$(技術の限界生産性)とのバランスであり，技術の割引限界生産性とも言うべきものである。$p(t)$は一定の条件下において次のように示される(3.2参照)。

$$p(t) = \sum\frac{\partial F}{\partial X}\frac{\partial X_T}{\partial T} = \sum\frac{P_X}{P_y}\frac{P_T}{P_{XT}}$$

ここに，P_y, P_X, P_T, P_{XT}は，それぞれX, T, X_Tの価格を示す。

の需要($D(s)$)の累計値で表されるので，次式のように示される。

$$U_t = \int_t^{\infty} e^{-\eta(s-t)} \ln D(s) ds \qquad (11)$$

ここに，η は現在価値割引率を示す。

消費者の技術革新への期待は,「技術革新によって多様な種類の技術製品が利用できるようになる」ところにあるので, (11)式の中核をなす需要関数 $D(s)$ は，種類 j の技術製品を $x(j)$, その種類を n とすると，n 種類の技術製品の間の代替関係を表す次式で示すことができる[3]。

$$D = D(s) = \left(\int_0^n x^{\alpha}(j) dj \right)^{1/\alpha}, \ n = n(s) \qquad (12)$$

ここに，$n=n(s)$:s 時点で入手可能な技術製品の種類

α ：技術製品間の代替弾性値係数

($\alpha = \varepsilon - 1/\varepsilon$, ε ：代替弾性値)

技術製品 x は各銘柄 j の集合 $x(j)$ であり，n は技術革新に伴う多様性の拡大を示すことになるので，(13)式に示すように，研究開発投資 r 及びそのストック T の関数で表される。5)

$$n = n(s) = br^{\beta_1} T^{\beta_2}, \ r = r(s), \ T = T(s) \qquad (13)$$

ここに，β_1 及び β_2 はそれぞれ，n の r 弾性値及び n の T 弾性値を示す。

(12), (13)式から，需要関数は次のように表される。

$$D(s) = \left[\int_0^n \left(\frac{y}{n} \right)^{\alpha} dj \right]^{1/\alpha} = \frac{y}{n} (n)^{1/\alpha} = y \cdot n^{\frac{1-\alpha}{\alpha}} \qquad (14)$$

(14)式を(11)式に代入すると,効用関数は次のように表される。

$$\begin{aligned} U_t &= \int_t^{\infty} e^{-\eta(s-t)} (\ln y \cdot n^{\frac{1-\alpha}{\alpha}}) ds \\ &= \int_t^{\infty} e^{-\eta(s-t)} (\ln y + \frac{1-\alpha}{\alpha} \cdot \ln n) ds \end{aligned} \qquad (15)$$

$n = br^{\beta_1} T^{\beta_2} \approx br^{\beta_1} \left(r/_{\theta + \rho} \right)^{\beta_2}$ であるので，6) (15)式は次の形に展開される。

$$U_t = \int_t^{\infty} e^{-\eta(s-t)} (\ln y + \frac{1-\alpha}{\alpha} ((\ln b - \beta_2 \ln(\theta + \rho)) + (\beta_1 + \beta_2) \ln r)) ds \qquad (16)$$

ρ ：技術の陳腐化率

θ ：研究開発投資の平均増加率

2.3 研究開発投資の最適化

研究開発の最適投資レベルは，2.1で導出した(10)式の動態プロセスのもとで，2.2で導出した(16)式の効用関数を最大化させるレベルである。このような動的制約条件下の最適値の解析には，ポントリヤーギンによって開発され，人工衛星の最適軌道管理を始めとする制御理論等に幅広く適用されてきた最大原理(Maximum principle) [1]の応用が有効である。実際，先に見た各種の動態的な制約条件の下での研究開発投資への最適配分の課題は人工衛星の軌道管理に酷似し，過大な分配は軌道から飛び出すことになり，逆に過小分配は失速を来たすことになる。7)

ポントリヤーギンの最大原理を用いれば, (10)式の制約下での(16)式の最大値は，随伴係数(adjoint variable) Ψ を用いて，次の関数 H (これを「ハミルトン関数」という)を最大化させる r を導出することによって求められる。ここで，随伴係数は，制約条件付最大化問題等に用いられるラグランジュ乗数の考え方と同じ発想に立ったものであるが，一定の係数ではなく，それ自体が最適化を達成する「意思」を有する動態関数

5) 企業の多様な技術製品開発への取組み動向は，一般に特許の出願動向に示される[10]ので，技術製品の種類 $n(s)$ のプロキシとして特許出願件数を用いて，1976–1996年の間の日本の製造業を対象に(13)式の関係を検証すると，次に示すように統計的に極めて有意な結果が示され，研究開発投資 r 及び技術ストック T が技術製品の多様性の拡大に支配的である[10]ことが実証される。

$PAT = 33.78\, r^{0.34}\, T^{0.62}$ 　　 $adj.R^2$ 0.992 　　 DW 1.22

(5.41) (5.25) (5.79)

ここに，PAT: 製造業特許出願件数

6) (4)式より， $T_t = \frac{R_{t-m}}{\rho+\theta}$, $T_0 = \frac{R_{1-m}}{\rho+\theta}$ (F5–1)

(F5–1)式より， $T_t = \frac{R_{t-m}}{\rho+\theta} = \frac{R_{t+1-m}}{\rho+\theta}$ となる。

このとき， $t+1-m = t\left(1+\frac{1-m}{t}\right) = t\left(1-\frac{m-1}{t}\right)$ (F5–2)

時間 t がリードタイムmに比較して十分に長い（$t >> m-1$）ものとするならば，$\frac{m-1}{t} \to 0$。

以上より，$t >> m-1$ のとき，$t + 1-m \cong t$

よって，(F5–1) 式は次のように表される。

$$T_t = \frac{R_{t-m}}{\rho+\theta} = \frac{R_{t+1-m}}{\rho+\theta} \cong \frac{R_t}{\rho+\theta} \qquad \therefore T = \frac{R}{\rho+\theta}$$

7) ポントリヤーギンの最大原理については，[1]のほか「意思決定の経済分析」(高橋三雄他, 有斐閣, 1995),「最適決定の理論入門」(笹井均, 学文社, 2000)等を参照。

であり，「最適化意思」を前提とすると，産出の限界生産性（すなわち競争条件下では産出の相対価格に一致する）を示す（詳細については高橋，笹井等に譲るが，**別添Ⅰ**に数理展開のポイントを示す）。

$$H(y,r,\psi)=\ln y+\frac{1-\alpha}{\alpha}((\ln b-\beta_2\ln(\theta+\rho))+(\beta_1+\beta_2)\ln r)+\psi(fy-gr) \quad (17)$$

(17)式を r で偏微分することにより，(18)式が得られる。

$$\frac{\partial H}{\partial r}=\frac{1-\alpha}{\alpha}(\beta_1+\beta_2)\frac{1}{r}-g\psi=0 \quad (18)$$

研究開発の最適投資レベル r^0 は(18)式を満足させる r であり，(19)式のように求められる。

$$r^0=\frac{1-\alpha}{\alpha}\frac{\beta_1+\beta_2}{g\psi} \quad (19)$$

(19) 式に含まれる随伴係数は，次式のバランスで示される（**別添Ⅱ**参照）。

$$\dot{\psi}=\eta\psi-\frac{\partial H}{\partial y}=\eta\psi-\frac{1}{y}-f\psi \quad (20)$$

(10)式と(19)式を統合し，(20)式を変形すると，y と Ψ との変化率に関する次の連立微分方程式が得られる。

$$\frac{\dot{y}}{y}=f-\frac{1-\alpha}{\alpha}(\beta_1+\beta_2)\frac{1}{y\psi} \quad (21)$$

$$\frac{\dot{\psi}}{\psi}=\eta-\frac{1}{y\psi}-f \quad (22)$$

ここで，産出コスト $z=y\Psi$[8] を導入して，(21)，(22)式をまとめると(23)式が得られる。

$$\begin{aligned}\frac{\dot{z}}{z}&=\frac{\dot{y}}{y}+\frac{\dot{\psi}}{\psi}\\&=\left(f-\frac{1-\alpha}{\alpha}\cdot(\beta_1+\beta_2)\cdot\frac{1}{y\psi}\right)+\left(\eta-\frac{1}{y\psi}-f\right)\\&=\eta-\left[\frac{1-\alpha}{\alpha}(\beta_1+\beta_2)+1\right]\cdot\frac{1}{y\psi}\\&=\eta-\left[\frac{1-\alpha}{\alpha}(\beta_1+\beta_2)+1\right]\cdot\frac{1}{z}\end{aligned}$$

$$\dot{z}=\eta z-\left[\frac{1-\alpha}{\alpha}(\beta_1+\beta_2)+1\right] \quad (23)$$

(23)式は産出コストの軌道を示すものであり，その一般安定解は次のように示される（**別添Ⅲ**参照）。

$$z(t)=\frac{1}{\eta}\cdot\left[\frac{1-\alpha}{\alpha}(\beta_1+\beta_2)+1\right] \quad (24)$$

(24)式より，

$$\psi=\frac{z}{y}=\frac{1}{\eta y}\left[\frac{1-\alpha}{\alpha}(\beta_1+\beta_2)+1\right]$$

が得られるので，これを(19)式に代入することにより，r^0 の最適レベルは最終的に次のように示される。

$$\begin{aligned}r^0&=\frac{\eta y}{g}\cdot\frac{1-\alpha}{(1-\alpha)(\beta_1+\beta_2)+\alpha}\\&=\frac{\eta y}{g}\cdot\frac{\frac{1}{\varepsilon}}{\frac{1}{\varepsilon}(\beta_1+\beta_2)+\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}}\\&=\frac{1}{\varepsilon-1+(\beta_1+\beta_2)}\cdot\frac{\eta}{g}y\end{aligned} \quad (25)$$

技術革新製品の多様性拡大に対する支配要因を示す(13)式において，研究開発投資 r とそのストック T の貢献が収穫不変条件下で決定されているときは，$\beta_1+\beta_2=1$ になるので，[9] その場合には，r の最適投資レベルは次のように示される。

$$r=\frac{\eta}{\varepsilon g}y \quad (26)$$

3．研究開発投資最適レベルコア支配要因の計測

(25)，(26)式により研究開発投資の最適レベルを計測するためには，技術革新製品間の代替弾性値 ε 及び技術の割引限界生産性 g の計測が前提となる。

3.1 代替弾性値の計測

3.1.1 最適化問題における代替弾性値

任意の技術製品 x_1, x_2 の間の代替弾性値 ε は次のように定義づけられる。

$$\varepsilon=\frac{\partial\left(\frac{x_1}{x_2}\right)}{\partial\left(\frac{f_2}{f_1}\right)}\cdot\frac{\frac{x_2}{x_1}}{\left(\frac{f_1}{f_2}\right)} \quad \left(f_1=\frac{\partial y}{\partial x_1},\ f_2=\frac{\partial y}{\partial x_2}\right) \quad (27)$$

ただし，y 及び x_1, x_2 は，それぞれ総産出量及び技術製品を示す。

コスト最小化条件下においては，x_1, x_2 の限界生産性 f_1, f_2 はそれぞれの相対価格 $P_1/Py, P_2/Py$ (P_1, P_2, Py は x_1, x_2, y の価格) に一致するので，代替弾性値は次のように表される。

$$\varepsilon=\frac{d\ln\frac{x_2}{x_1}}{d\ln\frac{P_1}{P_2}} \quad (28)$$

8) $z=y\Psi$ において，「利潤最大化に通じる最善の決定」が追求されていることを前提とすると，先述のように産出の相対価格を表すことになるので（**別添Ⅱ**参照），z は産出コストを示すことになる。
9) 脚注5）に示すように，1976–1996 の日本の製造業においては，$\beta_1+\beta_2=0.34+0.62\approx 1$

2.2で見たように，研究開発投資の最適レベル決定の命題は，(11)式の需要関数を核とする効用関数の最大値の追求であり，(12)式に示すように，技術製品間の代替弾性値は需要関数を画するものである。従って，この弾性値が研究開発投資の最適レベルに大きな影響を及ぼすことになる。

3.1.2　代替弾性値計測への新機軸

本研究のねらいは，企業が研究開発投資を行うに当たって，その最適水準の検討に資する実践的な計測手法を開発することである。

生産関数の具体的な形の中で広範に使われているものに，コブ・ダグラス型生産関数(Cobb–Douglas type production function)がある。この生産関数は，新古典派成長モデルにおける生産関数の1）生産要素の限界生産性は正，2）限界生産性は逓減，3）生産関数は規模に関して収穫不変，という3つの仮定を満たし，理論的にも実践的にも優れている。しかし，コブ・ダグラス型生産関数は，生産要素間の代替の弾性値が一定，という制約に縛られる。従って，本分析のように，この制約に縛られない代替関係を分析する場合には，任意の弾性値を取り得る，より一般的な代替関係を前提とした関数であるCES型生産関数(Constant Elasticity of Substitution type production function)[10]を用いる方がより実践的である。

また，開発研究開発投資の最適水準を検討するのに用いた効用関数がCES型関数で構成されている((11)，(12)式参照)ことからも，本研究においては，研究開発投資の最適水準を計測するためのCES型生産関数の導入をねらいに，次の創意に基づき新たな試みを行った。

(i)　需要サイドの分析を均衡条件に基づいて供給サイドから分析。

(ii)　労働・資本・技術の3生産要素を，技術の体化した労働及び資本の2要素に置き換えることにより，2要素間の代替関係として分析。

生産をGDP(付加価値)でとらえる場合，生産要素の代替は労働・資本・技術3者間の代替であるが，技術(T)の労働(L)及び資本(K)に体化した状態を分析する技術体化モデルに依拠すれば，この代替の弾性値は$L(T)$，$K(T)$両者の間の代替弾性値$\varepsilon(K(T), L(T))$として扱うことができる。

3.1.3　技術を体化した労働と資本の代替弾性値の分析

(1) 技術革新製品生産過程における技術の労働・資本への体化メカニズム

技術進歩により，新しい生産技術が生産要素に具体化されることを，技術の体化という。この技術が労働・資本に体化するメカニズムは，**図2**に示すような「技術・資本関係の進化プロセス」としてとらえることができる[4]。

図2に示すメカニズムは，代替弾性値の概念に関する次のような少なからぬ重要な洞察を浮き彫りにする。

(i)　歴史的に見ると，**図2**の左図に示すように，労働，資本及び技術の関係は3つの段階に整理される。すなわち，資本と技術の補完関係の着実な増加，技術の資本への部分的体化及び全面体化である。その結果，技術の多くは資本に体化していくことになる$(K(T))$。

(ii)　同様に，労働についても量から資への代替が進む。これは一定の技術が労働に体化していくことを示唆する。

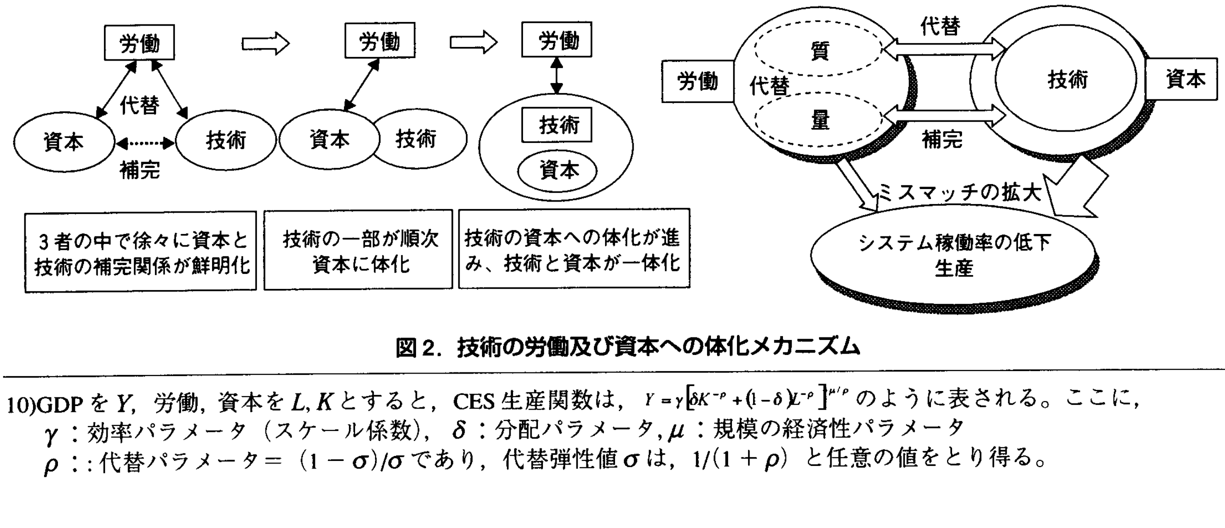

図2. 技術の労働及び資本への体化メカニズム

10)GDPをY，労働，資本をL, Kとすると，CES生産関数は，$Y=\gamma\left[\delta K^{-\rho}+(1-\delta)L^{-\rho}\right]^{\mu/\rho}$のように表される。ここに，
γ：効率パラメータ（スケール係数），δ：分配パラメータ，μ：規模の経済性パラメータ
ρ：:代替パラメータ＝$(1-\sigma)/\sigma$であり，代替弾性値σは，$1/(1+\rho)$と任意の値をとり得る。

(iii) このような代替メカニズムを通じて，資本に体化した労働との補完関係を維持することができ，もって生産システムの効率を維持することができる。

(iv) 技術製品(x_i)の生産は，このシステムの効率に依存いかんによることになる。

(v) システムの効率の程度は，技術の体化した$(K(T))$と労働$(L(T))$との代替弾性値によって計測することができる。

(vi) 需給均衡状況下においては，この弾性値は技術製品間の代替状況を示すものと考えられる。

(vii) 従って，以上の均衡状況下においては，$K(T)$と$L(T)$との代替弾性値は，技術間の代替弾性値の代理変数（プロキシ）として扱うことができる。

(2) 技術体化型生産関数を用いた代替弾性値の計測

1) 技術体化型生産関数の確定

付加価値（GDP）ベースの生産を対象とした技術体化型モデルを考えると，生産関数は(29)式のように表される。

$$V=F(t,L(T),K(T)) \tag{29}$$

ここに，Vは付加価値，tは時間，$L(T)$は技術体化労働，$K(T)$は同資本ストック，Tは技術ストックを示す。

L'，K'を技術未体化[11]の労働，資本とすると，

$$L(T)=L(L',T) \tag{30}$$

$$K(T)=K(K',T) \tag{31}$$

(29)，(30)及び(31)式を時間で微分し，整理すると以下が得られる。

$$\frac{dV}{dt}=\frac{\partial V}{\partial t}+\frac{\partial V}{\partial L}\cdot\frac{\partial L}{\partial L'}\frac{dL'}{dt}+\frac{\partial V}{\partial L}\cdot\frac{\partial L}{\partial T}\cdot\frac{dT}{dt}+\frac{\partial V}{\partial K}\cdot\frac{\partial K}{\partial K'}\cdot\frac{dK'}{dt}+\frac{\partial V}{\partial K}\cdot\frac{\partial K}{\partial T}\cdot\frac{dT}{dt} \tag{32}$$

$$\frac{\Delta V}{V}=\frac{\partial V}{\partial t}/V+\sum\frac{\partial V}{\partial Z}\cdot\frac{Z}{V}\cdot\left(\underbrace{\boxed{\frac{\partial Z}{\partial T}\cdot\frac{T}{Z}\cdot\frac{\Delta T}{T}}}_{\text{(技術貢献)}}+\underbrace{\boxed{\frac{\partial Z}{\partial Z'}\cdot\frac{Z'}{Z}\cdot\frac{\Delta Z'}{Z'}}}_{\text{(非技術貢献)}}\right)$$

$$\Delta V: dV/dt,\ Z: L, K,\ Z': L',\ K' \tag{33}$$

(32)式において，価格に関し競争かつ一次同次の条件下においては，VのZ弾性値

$$\left(\frac{\partial V}{\partial Z}/\frac{V}{Z}\right)$$

はVにおけるZのコストシェア(GZC/GC)によって計測することができる。

2) 技術を体化した労働と資本の代替弾性値の計測

$K(T)$と$L(T)$との間の代替弾性値は，次のように定義される。

$$\varepsilon=\frac{d\ln\dfrac{K(K',T)}{L(L',T)}}{d\ln\dfrac{P_l}{P_k}} \tag{34}$$

(34)式は，(35)式のように展開される。

$$\varepsilon=-\frac{\partial\ln K(K',T)}{\partial\ln K'}\varepsilon_k+\frac{\partial\ln K(K',T)}{\partial\ln T}\frac{d\ln T}{d\ln\dfrac{P_l}{P_k}}-\frac{\partial\ln L(L',T)}{\partial\ln L'}\varepsilon_l-\frac{\partial\ln L(L',T)}{\partial\ln T}\frac{d\ln T}{d\ln\dfrac{P_l}{P_k}} \tag{35}$$

ここに，

$$\varepsilon_k=\frac{d\ln K'}{d\ln P_k} \qquad (K'\text{の価格}(P_k)\text{弾性値}) \tag{36}$$

$$\varepsilon_l=\frac{d\ln L'}{d\ln P_l} \qquad (L'\text{の価格}(P_l)\text{弾性値}) \tag{37}$$

$$\ln\frac{P_l(T)}{P_k(T)}=h+i\ln T \tag{38}$$

$$\frac{d\ln T}{d\ln\dfrac{P_l(T)}{P_k(T)}}=\frac{1}{i} \tag{39}$$

技術(T)の他の生産要素(Z)との割合(T/Z)の支配式は，

$$\frac{\partial\ln K(K',T)}{\partial\ln T}=1-\frac{b_{k1}+b_{k2}b'_{k4}}{1-b_{k2}} \tag{40}$$

$$\frac{\partial\ln L(L',T)}{\partial\ln T}=1-\frac{b_{l1}+b_{l2}b'_{l4}}{1-b_{l2}} \tag{41}$$

のように表される（**別添IV**参照）。

(39)～(41)を(35)式に代入することにより，技術を体化した労働$(L(T))$と資本$(K(T))$の代替弾性値εは，次式によって計測することができる。

$$\varepsilon=-\frac{\partial\ln K(K',T)}{\partial\ln K'}\varepsilon_k-\frac{\partial\ln L(L',T)}{\partial\ln L'}\varepsilon_l+\left(\frac{b_{l1}+b_{l2}b'_{l4}}{1-b_{l2}}-\frac{b_{k1}+b_{k2}b'_{k4}}{1-b_{k2}}\right)\frac{1}{i} \tag{42}$$

3) 実証分析

(i) 相関分析結果（日本の製造業 1975-1996）

実際のデータに基づいて実証分析を行うために，別添IVの(A4−1)式，(A4−2)式を生産要素ごとに書き下

11)「技術未体化」とは，特定の比較対象時期に比べての体化量の変化を含意する相対概念を示す。

し，さらに(38)式を加えた以下の方程式について回帰分析を行った。

$(A4-1-a)$式：$\ln(T/L) = a_{l0} + b_{l1}\ln T + b_{l2}\ln(P_k/P_t)$

$(A4-1-b)$式：$\ln(T/K) = a_{k0} + b_{k1}\ln T + b_{k2}\ln(P_k/P_t)$

$(A4-4-a)$式：$\ln(GLC/GTC) = b'_{l3} + b'_{l4}\ln T$

$(A4-4-b)$式：$\ln(GCC/GTC) = b'_{k3} + b'_{k4}\ln T$

(38)式：$\ln(P_l(T)/Pk(T)) = h + i\ln T$

回帰分析の結果は，以下の総括する通りである。

	adj. R^2	DW
$\ln(T/L) = -10.774 + 0.832\ln T$ (-42.22) (33.59) $+0.133D_1\ln(P_l/P_t)$ (2.08) $+0.288D_2\ln(P_l/P_t)$ (3.08) $+0.291D_3\ln(P_l/P_t)$ (9.01)	0.999	1.04
$\ln(T/K) = -9.011 + 0.500\ln T$ (-12.58) (4.70) $+0.573D_1\ln(P_k/P_t)$ (5.58) $+0.584D_2\ln(P_k/P_t)$ (5.59) $+0.579D_3\ln(P_k/P_t)$ (5.26) $+0.075D_{75.83.87.94}$ (3.82)	0.836	1.42
$\ln(GLC/GTC) = 11.523$ (11.49) $-0.897D_1\ln T - 0.896D_2\ln T$ (-8.97) (-9.36) $-0.874D_3\ln T$ (-9.44) $+0.124D_{77.78.94.96}$ (3.14)	0.940	1.52

	adj. R^2	DW
$\ln(GCC/GTC) = 10.160 - 0.797D1\ln T$ (12.50) (-9.85) $-0.792D_2\ln T - 0.787D_3\ln T$ (-10.21) (-10.48) $+0.087D_{77.79.80}$ (2.35)	0.964	1.87
$\ln(P_l(T)/P_k(T)) = -3.653$ (-8.88) $+0.798D_1\ln T + 0.794D_2\ln T$ (19.43) (20.23) $+0.812D_3\ln T - 0.164D_{91.92}$ (21.48) (-6.76)	0.994	2.28

ここに，

D_1 : 1975–86 = 1, 他の期間 = 0;

D_2 : 1987–90 = 1, 他の期間 = 0;

D_3 : 1991–96 = 1, 他の期間 = 0;

$D_{75.83.87.94}$: 1975, 83, 87, 94 = 1, 他の期間 = 0;

$D_{77.78.94.96}$: 1977, 78, 94, 96 = 1, 他の期間 = 0;

$D_{77.79.80}$: 1977, 79, 80 = 1, 他の期間 = 0;

$D_{91.92}$: 1991, 92 = 1, 他の期間 = 0 .[12)]

代表的な相関係数は**表1**に集約する通りである。

表1に集約した相関係数を（40），（41）式にあてはめると，技術（T）の労働（L）及び資本（K）の弾性値が得られる。結果は**表2**に示す通りである。

（A4–9）式から次式が得られる。

$$\frac{\partial \ln Z}{\partial \ln Z'} = \left(\frac{\Delta Z}{Z} - \frac{\partial \ln Z}{\partial \ln T}\cdot\frac{\Delta T}{T}\right) / \frac{\Delta Z'}{Z'} \qquad (43)$$

$(\partial lnZ)/(\partial lnT)$は，表2に示す通りであるので，[13)] (43)式にこの値及び$\Delta Z/Z$, $\Delta T/T$, $\Delta Z'/Z'$の時系列データをあてはめると，技術体化，非体化生産要素間の代替弾性値$(\partial lnZ)/(\partial lnZ')$の時系列データが得られる。

結果は**表3**に示す通りである。

(36)及び(37)式を用いた相関分析により，**表4**に示すように1975－1996年の間の日本の製造業を対象にε_k及びε_1を計測した。

表1．相関係数総括

	b_{l1}	b_{l2}	b_{k1}	b_{k2}	b'_{l4}	b'_{k4}	i
1975-86	0.832	0.133	0.500	0.573	−0.897	−0.797	0.798
1987-90	0.832	0.288	0.500	0.584	−0.896	−0.792	0.794
1991-96	0.832	0.291	0.500	0.579	−0.874	−0.787	0.812

表2．技術の労働，資本との代替弾性値

	$\frac{\partial \ln L(L',T)}{\partial \ln L} = 1-\left(\frac{b_{l1}}{1-b_{l2}}+b_{l4}\right)$	$\frac{\partial \ln K(K',T)}{\partial \ln T} = 1-\left(\frac{b_{k1}}{1-b_{k2}}+b'_{k4}\right)$
1975-86	0.180	0.899
1987-90	0.194	0.910
1991-96	0.185	0.895

表3．技術体化，非体化生産要素間の代替弾性値

	$(\partial \ln L)/(\partial \ln L')$	$(\partial \ln K)/(\partial \ln K')$
1975-86	0.865	-0.244
1987-90	0.982	0.081
1991-96	0.567	0.412[a)]

a)1991年のバブル経済崩壊に伴う異常変動値を除くために、1992、1993年の値は、2年移動平均値を採用した。

12) 相関分析結果は，1975-1986 (第一次石油ショック後からバブル経済突入以前の期間)，1987-1990 (バブル経済期間)及び1991-1996 (バブル崩壊後の期間) の3期間に分けて，集約整理した。D_1，D_2及びD_3はこれら期間の構造的な違いを表す係数ダミーを示し，その他のダミーは特異な経済構造を示した年についての定数ダミーを示す。いずれも日本の製造業の実際の経済環境に照らして，ダミーの意味及び必要性を検証済みである。

13) データ構築及び各データのソースは**別添Ⅵ**参照。

$$\ln L' = 12.66 + 0.14 D_l \ln P_l \qquad adj.\ R^2 = 0.793 \quad DW = 1.66$$
$$(260.60)\ (5.07)$$
$$+ 0.13 D_2 \ln Pl + 0.22 D_3 \ln P_l$$
$$(3.84)\ (5.28)$$
$$+ 0.11 D_{91.92}$$
$$(6.54)$$

$$\ln K' = 22.05 + 0.93 D_l \ln P_k + 0.84 D_2 \ln P_k$$
$$(10.12)\ (2.63)\ (2.37)$$
$$+ 0.80 D_3 \ln P_k + 0.28 D_{84.85.86.96} \qquad 0.887 \quad 1.20$$
$$(2.31)\ (4.20)$$

ここに,

D_l: 1975–86 = 1, 他の期間 = 0;

D_2: 1987–90 = 1, 他の期間 = 0;

D_3: 1991–96 = 1, 他の期間 = 0;

$D_{84.85.86.96}$: 1984, 85, 86, 96 = 1, 他の期間 = 0;

$D_{91.92}$: 1991 and 92 = 1, 他の期間 = 0 (脚注14参照).

計測したε_l及びε_kを(42)式に導入することにより,**表5**に示すように$K(K',T)$と$L(L',T)$との間の代替弾性値を計測した。

(ii) 代替弾性値の変化とその意味合い

以上の一連の分析を通じて,**表6**に示すように$K(T)$と$L(T)$との代替弾性値及びその支配要因を明らかにした。

表6を見ると,代替弾性値は主として資本の価格弾性値の低下によって,低下傾向を続けていることがわかる。1990–1996年の間の弾性値の1991年に起こったバブル経済崩壊後の研究開発活動の停滞に伴い,技術の資本に体化する技術ストックそのものの増加が停滞したことに起因するものと考えられる。また,$K(T)$の$L(T)$への代替のソースたる技術の資本,労働への体化の停滞も,看過できない一因であることがわかる。

表4. 価格弾性値の計測結果

	$\varepsilon_l = \dfrac{d\ln L'}{d\ln P_l}$	$\varepsilon_k = \dfrac{d\ln K'}{d\ln P_k}$
1975-86	0.14	0.93
1987-90	0.13	0.84
1991-96	0.22	0.80

表5. 資本と労働の代替弾性値計測結果

	$\varepsilon = -\dfrac{\partial \ln K(K',T)}{\partial \ln K'}\varepsilon_k - \dfrac{\partial \ln L(L',T)}{\partial \ln L'}\varepsilon_l + \left(\dfrac{b_{l1}+b_{l2}b'_{l4}}{1-b_{l2}} - \dfrac{b_{k1}+b_{k2}b'_{k4}}{1-b_{k2}}\right)\dfrac{1}{i}$
1975-86	1.007=-(-0.244)*0.93-0.865*0.14+(0.899-0.180)/0.798 \<0.227\> \<-0.121\> \<0.901\>
1987-90	0.706=-0.081*0.84-0.982*0.13+(0.910-0.194)/0.794 \<-0.068\> \<-0.128\> \<0.902\>
1991-96	0.420=-0.412*0.80-0.567*0.22+(0.895-0.185)/0.812 \<-0.330\> \<-0.125\> \<0.874\>

3.2 技術の割引限界生産性の計測

技術の割引限界生産性gは,投入要素の1部を研究開発に割くことによる生産の減少分から,その研究開発投資によって築かれた技術ストックの生産への貢献分を引いた生産性であるので,付加価値ベースの生産における技術の割引限界生産性は,2.1のアプローチに従って,次のように求められる。

まず,この場合の生産関数は次のように表される。

$$V = G(t, \bar{L}, \bar{K}, T) \tag{44}$$

$$\bar{L} = L - L_T,\quad \bar{K} = K - K_T \tag{45}$$

$$T = T(L_T, K_T, M_T, E_T) \tag{46}$$

$$L_T = L_T(T),\quad K_T = K_T(T) \tag{47}$$

(47)式を念頭に,(44)式を時間で微分すると,次式が得られる。

$$\frac{\dot{V}}{V} = \frac{\partial V}{\partial t}/V + \sum_{l,k}\frac{\partial V}{\partial \bar{X}}\cdot\frac{\bar{X}}{V}\cdot\frac{\dot{\bar{X}}}{\bar{X}} + \frac{\partial V}{\partial T}\cdot\frac{T}{V}\cdot\frac{\dot{T}}{T}$$

$$X : L, K;\ X_T : L_T, K_T \tag{48}$$

さらに,$\dot{\bar{X}}$を(49)式のように定義すると,(48)式は(50)式のように変形できる。

$$\dot{\bar{X}} = \dot{X} - \dot{X}_T = \dot{X} - \frac{\partial X_T}{\partial T}\cdot\dot{T} \tag{49}$$

$$\frac{\dot{V}}{V} = \left(\frac{\partial V}{\partial t}/V + \sum_{l,k}\frac{\partial V}{\partial \bar{X}}\cdot\frac{\bar{X}}{V}\cdot\frac{\dot{X}}{\bar{X}}\right)$$
$$-\left(\sum_{l,k}\frac{\partial V}{\partial \bar{X}}\cdot\frac{\partial X_T}{\partial T}\cdot\frac{\dot{T}}{V} - \frac{\partial V}{\partial T}\cdot\frac{T}{V}\cdot\frac{\dot{T}}{T}\right)$$
$$= \left(\frac{\partial V}{\partial t}/V + \sum_{l,k}\frac{\partial V}{\partial \bar{X}}\cdot\frac{\dot{X}}{V}\right) - \left(\sum_{l,k}\frac{\partial V}{\partial \bar{X}}\cdot\frac{\partial X_T}{\partial T} - \frac{\partial V}{\partial T}\right)\cdot\frac{\dot{T}}{V} \tag{50}$$

(50)式より,付加価値ベースの研究開発投資の動態プロセスは,次式で表される。

$$\frac{\dot{V}}{V} = f - (p - q)\cdot\frac{\dot{T}}{V} \tag{51}$$

ただし,

$$f = \frac{\partial V}{\partial t}/V + \sum_{l,k}\frac{\partial V}{\partial \bar{X}}\cdot\frac{\dot{X}}{V} \tag{52}$$

$$p = \sum_{l,k}\frac{\partial V}{\partial \bar{X}}\cdot\frac{\partial X_T}{\partial T},\quad q = \frac{\partial V}{\partial T} \tag{53}$$

表6. 資本と労働の代替弾性値計測結果と支配要因

	ε	支配要因		
		資本の価格弾性値[a]	労働の価格弾性値[b]	資本・労働に体化した技術[c]
1975-86	1.007	0.227	-0.121	0.901
1987-90	0.706	-0.068	-0.128	0.902
1991-96	0.420	-0.329	-0.125	0.874

a 資本の価格弾性値の影響: $-\dfrac{\partial \ln K(K',T)}{\partial \ln K'}\ \dfrac{d\ln K'}{d\ln P_k}$

b 労働の価格弾性値の影響: $-\dfrac{\partial \ln L(L',T)}{\partial \ln L'}\ \dfrac{d\ln L'}{d\ln P_l}$

c 資本・労働に体化した技術の影響: $-\dfrac{\partial \ln K(K',T)}{\partial \ln T}\ \dfrac{d\ln T}{d\ln \frac{P_l}{P_k}} - \dfrac{\partial \ln L(L',T)}{\partial \ln T}\ \dfrac{d\ln T}{d\ln \frac{P_l}{P_k}}$

以上より，技術の割引限界生産性gは，

$$g = p - q \tag{54}$$

によって示される。

(54)式のp, qは，技術のサービス価格及び研究開発投資の価格指数を用いて計測することができる(具体的な計測方法については，**別添V**参照)。

4. 計測結果とその評価

4.1 研究開発投資最適レベル

最適研究開発投資モデル[5]は，研究開発投資（r）と生産（V;ここでは付加価値ベースの生産を取り上げた)との最適関係は，次式で表されることを示している。

$$r = \frac{\eta}{\varepsilon g} V \tag{26}$$ [14)]

ここにεは代替弾性値，ηは現在価値割引率を，gは技術の割引限界生産性を示す。(26)式は最適研究開発投資rは生産Vの増加に応じ$(\eta/(\varepsilon g))$の割合で増加することを示している。従って，最適研究開発強度は次式で示される。

$$\frac{r}{V} = \frac{\eta}{\varepsilon g} \tag{55}$$

(55)式は，最適研究開発強度は，代替弾性値ε, 現在価値割引率η及び技術の割引限界生産性gの関数であり，ε及びgの減少，ηの増加に応じ増大することを示す。

4.2 総合現在価値割引率の計測

従来，現在価値割引率としては，専ら平均金利が用いられてきた。これは，投資の評価が投資家の収益性のみの視点で検討されてきたために，調達された資金を当該投資へ当てることへの有利性を示すことによる。しかし，研究開発投資が消費者や株主に大きなインパクトを与えるようになるにつれ，単に投資家だけの評価視点ではなく，市場を通じた消費者・株主等の評価も入れる必要がある。

このような観点のもと，近年，現在価値割引率を計測するに当たって，加重平均資本コストを用いる方法が提唱されている。これは，資本コストが資金の出し手を満足させるために，最低限必要な投資プロジェクトの税引き前収益率のことであることから，企業の平均資本コストは負債と株主資本のコストの加重平均で決定されるとの論理を基本とするものである。さらに，総合的な評価の視点に立脚すれば，以上に加え企業の経営の安定性をも勘案する必要がある。

本研究では以上の考えに基づいて，次のような「総合現在価値割引率」を構築する。

$$\eta = r_1\omega_1 + \frac{r_2\omega_2}{(1-Tax)} + r_3\omega_3 \tag{56}$$

η :新加重平均資本コスト法による総合割引率

r_1 :全国銀行貸出約定平均金利

r_2 :実質配当率(＝配当金額／(資本金＋資本準備金))

r_3 :リスクフリーレート(＝国債利回り)

Tax:法人税率

ϖ_1: 有利子負債シェア

ϖ_2:: 総資本シェア

ϖ_3:: 資本準備金

ここで，(56)式の第1項は企業の財務状況等を表し，投資運用のみから当該投資の有利性を示す。第2項は企業に対する実際の市場の評価を示し，企業の技術力の評価を表す。そして第3項はリスクフリーである国債利回りへの企業の投資状況を示し，企業の経営に対する安定志向の度合を表す。

このように，総合現在価値割引率は，供給サイドのみではなく，需要サイドの総合的な市場評価を反映して決定されている。

4.3 日本の製造業主要業種における研究開発投資レベルの実証分析とその評価

表7は，3.1節で計測した代替弾性値を(28)式に当てはめて，日本の製造業主要業種(製造業平均，食料品，化学，電気機械)の過去20年にわたる研究開発強度(付加価値当たり研究開発費)の推移を計測し，最適研究開発強度と比較して評価したものである。評価は，

① 第一次エネルギー危機後，第二次エネルギー危機前までの1975–1978,

② 第二次エネルギー危機後から国際石油価格の下落開始前1979–1982,

③ 国際石油価格 下落開始からバブル経済前の1983–1986,

④ バブル経済期間中の1987–1990及び

⑤ バブル経済崩壊後の1991–1996

の5期間に分けて行った。計測においては，1990年基準実質値に加え，名目最適研究開発強度も算出した。

図3は，表7をもとに日本の製造業主要業種の

14) 第2章参照。

表7. 日本の製造業主要業種の最適研究開発強度と実績値との比較（1975-1996）

				1975–78	1979–82	1983–86	1987–90	1991–96
		η	(%)	7.46	7.47	6.32	5.85	4.40
製造業平均		ε		1.01	1.01	1.01	0.71	0.42
		g		1.05	1.23	1.23	1.20	1.42
	[実質]	$(R/V)_{opt.}$	(%)	7.01	6.00	5.09	6.86	7.37
		$(R/V)_{act.}$	(%)	4.36	4.72	5.90	6.77	6.91
	[名目]	$(R/V)_{opt.}$	(%)	5.41	5.27	4.68	6.60	7.67
		$(R/V)_{act.(n)}$	(%)	3.36	4.15	5.43	6.50	7.19
食料品		ε		0.691	0.691	0.691	0.594	0.406
		g		2.41	2.55	2.31	1.90	2.13
	[実質]	$(R/V)_{opt}$	(%)	4.48	4.24	3.96	5.17	5.08
		$(R/V)_{act.}$	(%)	0.75	0.84	1.09	1.67	1.64
	[名目]	$(R/V)_{opt.}$	(%)	5.06	5.09	4.20	4.97	4.83
		$(R/V)_{act.}$	(%)	0.85	1.01	1.16	1.60	1.56
化学		ε		1.31	1.31	1.31	1.12	0.63
		g		0.34	0.51	0.63	0.67	0.87
	[実質]	$(R/V)_{opt}$	(%)	16.76	11.17	7.73	7.85	7.97
		$(R/V)_{act.}$	(%)	18.28	15.78	15.14	15.26	14.14
	[名目]	$(R/V)_{opt.}$	(%)	8.16	7.14	6.31	7.71	8.94
		$(R/V)_{act.}$	(%)	8.96	10.10	12.41	13.89	15.84
電気機械		ε		1.69	1.69	1.69	1.65	0.57
		g		0.18	0.27	0.30	0.42	0.81
	[実質]	$(R/V)_{opt.}$	(%)	24.80	16.11	12.32	8.40	9.61
		$(R/V)_{act.}$	(%)	33.93	23.70	20.59	17.35	12.95
	[名目]	$(R/V)_{opt.}$	(%)	6.82	7.34	7.73	7.38	12.71
		$(R/V)_{act.}$	(%)	9.50	10.9	12.97	15.27	17.09

a 1975–1986年の3期間は、他の2つの期間に比べて相対的に同質性が高いので、代替弾性値の計測は可能な限り長い期間の分析を基本とする（Griffin and Gregory, 1976）[9]との観点に立って、3.1節の計測に用いた3期間統合分析結果を採用した。

b 現在価値割引率は平均金利（全国銀行貸出約定平均金利）を用いた。

c 技術の付加価値ベース割引限界生産性は、3.2節の方法に依拠して計測した。

1975–1996年の機関の最適研究開発強度及びその実績値を比較したものである。

これを見ると，次のことがうかがえる。

(i) 名目ベースの研究開発強度の実績値の推移を見ると，製造業平均で一貫して顕著な上昇を続けていることがうかがわれる。これは，化学及び電気機械等のハイテク業種の研究開発強度の顕著な上昇に負うものである。食料品も1990年までは，テンポは緩やかなるも，増加傾向を続けたが，1991年以降，若干の減少傾向を示している。

(ii) 以上の結果，化学及び電気機械の高研究開発強度業種と，食料品に見られる低研究開発強度業種の研究開発強度のレベルの違いが顕著にうかがわれる。

(iii) 化学及び電気機械の高研究開発強度業種は，一貫して最適レベルを上回る研究開発強度を維持しているが，それと好対照に食料品は，最適レベルをはるかに下回る研究開発強度レベルにとどまっている。これは，

(a) 化学及び電気機械といった業種においては，利益最大化を求める投資の選択・決定が最重要課題であること

(b) 高研究開発強度業種においては，研究開発投資が収益最大化に決定的役割を果たしているのに対し，低研究開発強度業種においては，生産投資の方が重要な役割を果たしていること

を示唆するものである。

(iv) 化学，電気機械の2大高研究開発強度業種における研究開発強度の強さは，イノベーション製品を持続的に生み出すために必要不可欠な部分と同時に，厳しい企業間競争の中で競争相手を牽制したり，顧客に対しハイテクイメージを植え付けさせたりする上で必要な，高研究開発強度業種に固有の「疑似研究開発強度」部分も包括するものと思われる。

(v) しかし，研究開発最適強度を上回る割合は，研究開発強度と経済成長の間の悪循環化による1991年のバブル崩壊以降，劇的に減少してきている。

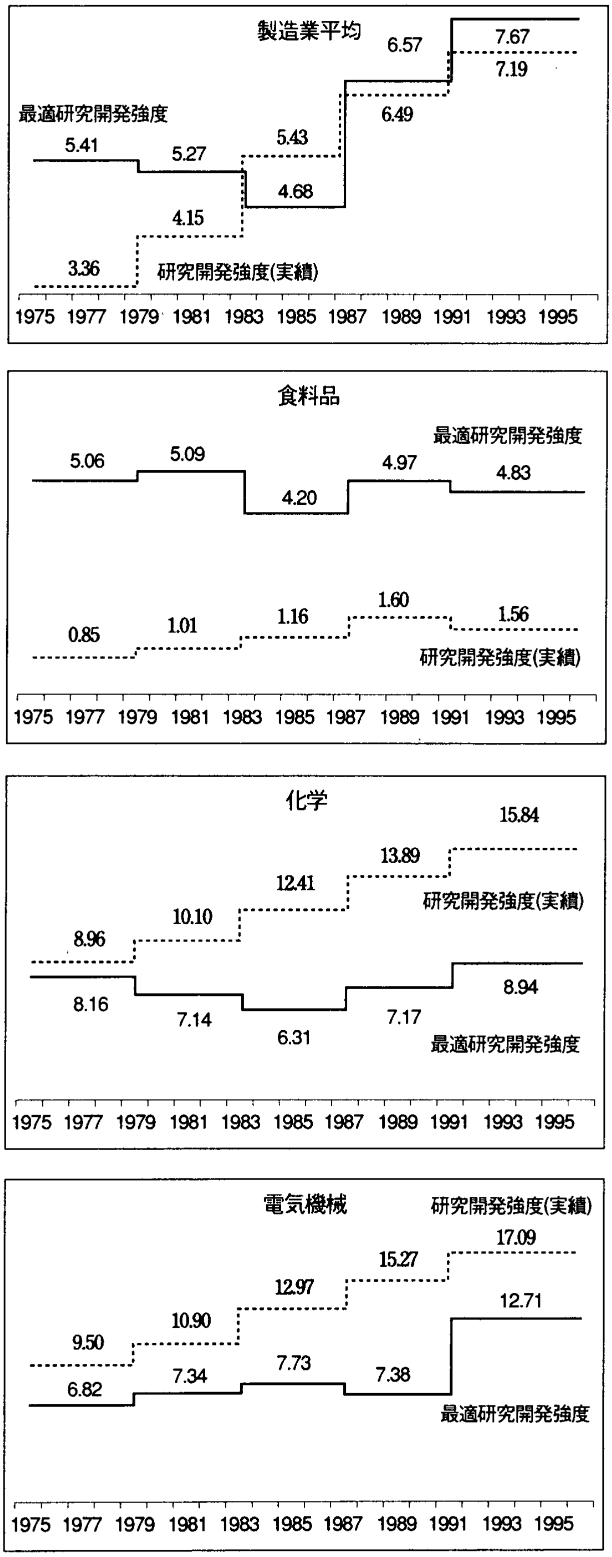

図3．日本の製造業主要業種の最適研究開発強度と実績値との比較（1975-1996）：（名目）：%

この研究開発投資実質値の減少の構造を分析するために，**図4**は，製造業主要業種の最適研究開発強度実績値の最適強度に対する割合の推移を示したものである。

これを見ると，次のことがうかがえる。

(vi) 1987年までは，製造業主要業種すべてにおいて，研究開発強度の最適値を上回る割合が着実に増加している。

(vii) しかし1987年以降，この割合は，製造業平均及び化学において減少に転換し，一方，電気機械においては1990年まで増加を続けた。しかし，電気機械もまた1991年以降，劇的に減少に転化している。

(viii) 食料品の場合は，研究開発強度実績値は，最適強度よりはるかに下ではあるが，それに対する割合そのものは着実に増加し続け，1987年以降もそれ以前と同じ水準を保持している。

以上の分析は，研究開発投資と経済成長との間の悪循環化といった仮説的見解を立証するものである。

5．考　察

メガコンペティションの高まりとともに，政策あるいは企業経営戦略決定者にとって研究開発投資の最適レベルの決定がますます重要な課題となってきている。

このような問題に対し，かねてから成長理論や資源の最適配分理論等に立脚して研究開発投資の最適レベル決定のための多くの先駆的研究が重ねられてきたが，未だに実践的導入の域には達していない。

本研究は，ポントリヤーギンの提唱した最適化理論に触発された，研究開発の最適投資レベル決定のための理論的・実証的検討を行うことをねらいとして，技術体化型生産関数という新しい発想に立脚して新たな実践的なモデルを開発した。さらに1975–1996年の20年間の日本の製造業の実際のデータを当てはめて，技術の資本への体化の減少に伴う代替弾性値低下の趨勢を明らかにするとともに，今日の日本経済の深刻な構

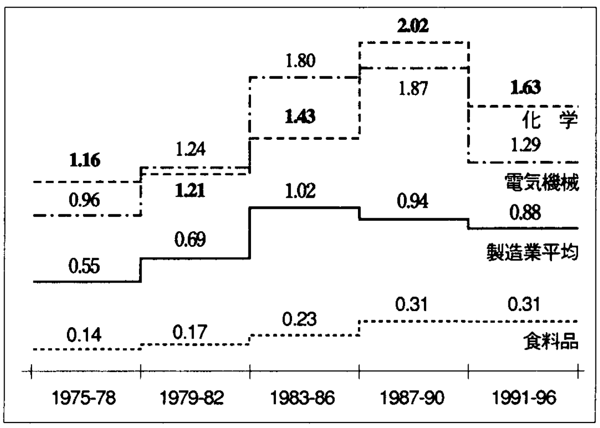

図4．製造業主要業種の研究開発強度実績値の最適強度に対する割合の推移：（1975-1996）

造を明確に示した。すなわち，製造業全体について見ると，バブル経済及びその崩壊の過程を通じ，研究開発強度の最適レベルは，より高いレベルが求められるように至り，このレベルは，実際の研究開発強度レベルを上回り，実際のレベルが最適レベルより低位という逆転現象を示すに至った。この逆転現象は，今日の日本の製造業を悩ましている悪循環の根源である。

さらに，これを化学や電気機械の高研究開発強度産業及び食料品に代表される低研究開発強度産業を対象に分析すると，食料品は，最適レベルをはるかに下回る研究開発強度レベルにとどまっているのに対して，化学及び電気機械の高研究開発強度業種は，一貫して最適レベルを上回る研究開発強度を維持しているが，研究開発最適強度を上回る割合は，研究開発強度と経済成長の間の悪循環化による1991年のバブル崩壊以降，劇的に減少してきていることが明らかとなり，研究開発投資と経済成長との間の悪循環化といった仮説的見解を立証することができた。

以上の分析を通じ，本研究は産業が最適研究開発投資レベルを判断したり，予測したりする上で実践性に富んだ方法であることが示された。従って，本分析は政策あるいは企業戦略決定者に適正な研究開発レベル決定する上での重要な分析，判断手段を提供するものである。

今後，さらに継続的に発展されるべき点としては，次の諸点があげられる。

(i) 需給均衡時を前提に展開した技術製品間の代替弾性値を供給面の生産要素間の代替弾性値を用いて計測することの有効範囲の更なる理論的，数学的検証，

(ii) 代替弾性値の計測変動の影響についての感度分析，

(iii) 研究開発，技術ストック等と生産量との間の関数構造確定のための更なる実証分析，

(iv) 代替弾性値，研究開発強度及び技術の限界生産性の間の相互関係の動態ビヘービアの見きわめ。

別添 I ポントリヤーギンの最大原理の基本的な考え

この原理は，動的制約条件下での目的関数の最適値（最大あるいは最小値）を導出するものであり，次のように，本件のような企業の意思決定に適用される。

企業の意思決定は，利潤の最大化を追求するものとし，この利潤はアウトプットの水準 (y) と意思決定の水準 (r) に依存するものと考える。従って，企業は現時点で保有する情報をもとに，y 及び r によってもたらされる利潤を推測しつつ最善の決定を選択し続けることになる。

従って，$0 \sim \bar{t}$ の期間の時間 $t\,(0<t<\bar{t})$ において，t 期の利潤 π は $y(t)$ 及び $r(t)$ に依存し，$\pi(y(t), r(t))$ で示され，企業は，t 時点で保有する情報 $y(t), r(t)$ をもとに，期間内の π の累積値を最大化させるように $y(t)$ を変化させていくことになる。すなわち，企業は利潤最大化をねらいにで表される情報をもとに，$y(t)$ の変化 $dy(t)/dt$ を調節していくことになる。

従って，この場合の目的関数及び制約条件は次のように示される。

最大化　累積利潤：

$$U=\int_0^{\bar{t}} e^{-\eta t}\pi\big(y(t), r(t)\big)dt+e^{-\eta\bar{t}}G\big(y(\bar{t})\big) \qquad \text{(A1–1)}$$

制約条件

$$\frac{dy(t)}{dt}=f\big(y(t), r(t)\big),\ y(0)=y_0 \qquad \text{(A1–2)}$$

ここで，$G(y)$ は産出の残存価値であり，長期間後には，産出に伴う利潤は0となるので，$\bar{t}\rightarrow\infty$ においては，$G(y(\bar{t}))\rightarrow 0$ となる。

現在時刻 t において生産が y であるとき，$t+\Delta t$ 時点の利潤は t 時点の価値に $e^{-\eta\Delta t}$ で割引かれる。従って，(A1–1) 式の最適値の決定は次式に書き改められる。

$$U(y,t)=\max_r\left[e^{-\eta t}\int_t^{t+\Delta t}\pi\big(y(t), r(t)\big)dt\right.$$
$$\left.+e^{-\eta\Delta t}U\big(y(t+\Delta t), t+\Delta t\big)\right] \qquad \text{(A1–3)}$$

$e^{-\eta\Delta t}=1-\eta\Delta t$ と近似すると，(A1–3) 式から次の式が得られる。

$$U(y,t)=\max_r(1-\eta\Delta t)\left\{\pi(y,r)\Delta t+U(y,t)\right.$$
$$\left.+U_y(y,t)\cdot\frac{dy(t)}{dt}\Delta t+U_t(y,t)\Delta t\right] \qquad \text{(A1–4)}$$

$\Delta t<<1$ として（A1–4）式を整理すると，

$$0=\max\left[\pi(y,r)\Delta t+U_y(y,t)\cdot\frac{dy(t)}{dt}\Delta t\right.$$
$$\left.+U_t(y,t)\Delta t-\eta U(y,t)\Delta t\right] \qquad \text{(A1–5)}$$

(A1–5) 式を Δt で割ると，次式が得られる。

$$-U_t(y,t)=\max\left[\pi(y,r)+U_y(y,t)\cdot f(y,r)-\eta U(y,t)\right] \quad \text{(A1–6)}$$

ここで，$\partial y/\partial t=f(y,t)$とする。

この(A1–6)式が，現在価値への割引を組み込んだ最適化問題であり，この式はHamilton－Jacobi－Bellman(HJB)方程式という。

次に，

$$\psi=U_y(y,t) \quad \text{(A1–7)}$$

となる係数Ψ(これを「随伴係数」といい，その経済的含意は**別添Ⅱ**参照）を用いて，利潤$\pi(y,r)$と制約条件(y,r)を統合した次の関数$H(y,r,\Psi)$を構築する(これをハミルトン関数と呼ぶ)。

$$H(y,r,\psi)=\pi(y,r)+\psi f(y,r) \quad \text{(A1–8)}$$

ポントリヤーギンの最大原理は，(A1–8)式において「$y^*(t)$, $\Psi^*(t)$が決定問題の最適解であるための必要条件は任意の$r(t)$に対して次式が成立する」ことと主張する。

$$H\left(y^*(t),r^*(t),\psi^*(t)\right)\geq H\left(y^*(t),r(t),\psi^*(t)\right) \quad \text{(A1–9)}$$

$$\frac{dy(t)}{dt}=H_\psi\left(y^*(t),r^*(t),\psi^*(t)\right)=f\left(y^*(t),r^*(t)\right),\quad y^*(0)=y_0 \quad \text{(A1–10)}$$

$$\frac{d\psi^*(t)}{dt}=-H_y\left(y^*(t),r^*(t),\psi^*(t)\right),\quad \psi^*(\bar{t})=G_y\left(y^*(\bar{t})\right) \quad \text{(A1–11)}$$

ここで，$H_y=\partial H/\partial y$，$H_\psi=\partial H/\partial\psi$，$G_y=\partial G/\partial y$である。

以上の条件は，$H(y,r)=-U_t(y,r)$であるので，[15] 以上に示した「最適解であるための必要条件」は，(A1–6)式のHamilton–Jacobi–Bellman(HJB)方程式において$y^*(t)$,$\Psi^*(t)$が決定問題の最適解であるための条件と一致する。

別添Ⅱ　ハミルトン関数における随伴係数のバランス式の導出

(17)式のハミルトン関数における随伴係数Ψのバランス式$\dot{\Psi}=\eta\Psi-\partial H/\partial y$は次のようにして求められる。この導出法は，企業家の投資行動は，投資(本分析の場合，研究開発投資r)，産出y及びそれらを通じた利潤Wが時間tの関数$\Phi(t,r,y,W)$の軌道を形成し，企業は「アウトプットyと意思決定rの関係及びその決定によってもたらされる利潤Wを推測した上で，現時点で保有する情報をもとに，利潤最大化に通じる最善の決定を選択する」との考えを基本とするものである。

ここで，(17)式のハミルトン関数

$$H(y,r,\psi)=\ln y+\frac{1-\alpha}{\alpha}((\ln b-\beta_2\ln(\theta+\rho)) +(\beta_1+\beta_2)\ln r)+\psi(fy-gr) \quad (17)$$

は，t時点における所与の産出$y(t)$及び産出の潜在価格$\Psi(t)$のもとでの，研究開発投資$r(t)$による効用の増加分を表している。つまり，(17)式の右辺第1項及び第2項は需要の現在価値を示し，第3項は研究開発投資に伴って減耗した産出の貨幣評価額を示すので，(17)式は投資行動に伴う純収入に等しくなる。

よって，Φの軌道関数は，W及び(17)式のハミルトン関数を用いて，次のように表される。

$$\phi(t,r,y,W)=\frac{\partial W}{\partial t}+H(y,r,\psi)=0 \quad \text{(A2–1)}$$

ここに産出の潜在価格を示す随伴係数（Ψは，利潤最大化軌道を選択することを前提とするので，

$$\psi=\frac{\partial W}{\partial y} \quad \text{(A2–2)}$$

で表される。

企業の最大投資軌道は(A2–1)式において，

$$\frac{\partial\phi}{\partial y}=\frac{\partial\phi}{\partial r}=0$$

を満たすy, rの関係を導出することにより求められる。

(A2–1)式をyで偏微分すると，次式が導かれる。

$$\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial W}{\partial t}\right)+\frac{\partial H}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial W}{\partial y}\right)+\frac{\partial H}{\partial y}=\frac{\partial\psi}{\partial t}+\frac{\partial H}{\partial y}=0 \quad \text{(A2–3)}$$

---

15) $\psi=U_y(y,t)$であるから，

$$\frac{d\psi}{dt}=\frac{d}{dt}U_y=\frac{d}{dt}\cdot\frac{dU}{dy}=\frac{d}{dy}\cdot\frac{dU}{dt}$$
$$=\frac{d}{dy}\cdot U_t$$

(A1-6)式より，$-U_t(y,t)=\max\left[\pi(y,r)+U_y(y,t)\cdot f(y,r)\right]$であるから，

$$U_t(y^*,t)=-\max_r\left[\pi(y,r)+U_y(y,t)\cdot f(y,r)\right]$$
$$=-\left[\pi(y^*,r^*)+\psi^*\cdot f(y^*,r^*)\right]$$
$$=-H(y^*,r^*,\psi^*)$$

以上より，$\frac{d\psi}{dt}=\frac{d}{dy}\cdot U_t=\frac{d}{dy}(-H)=-H_y$

また，(10)式より，

$$\dot{y} = fy - gr \qquad \text{(A2–4)}$$

(A2–4)式の制約のもとで，次の２つのハミルトン関数 H_1，H_2 を最大化する最適解を求める。

$$H_1(y,r,\psi_1) = \ln y + \frac{1-\alpha}{\alpha}\ln r + \psi_1(fy - gr) \qquad \text{(A2–5)}$$

$$H_2(y,r,\psi_2) = e^{-\eta(s-t)}(\ln y + \frac{1-\alpha}{\alpha}(\ln b - \beta_2\ln(\theta+\rho))$$
$$+ (\beta_1+\beta_2)\ln r)) + \psi_2(fy - gr) \qquad \text{(A2–6)}$$

最適軌道上では，

$\frac{\partial H_1}{\partial y} = \frac{\partial H_2}{\partial y} = 0$ 及び $\frac{\partial H_1}{\partial r} = \frac{\partial H_2}{\partial r} = 0$ の条件を満たす。従って，

$$\frac{\partial H_1}{\partial y} = \frac{1}{y} + f\psi_1 = 0 \qquad \text{(A2–7)}$$

$$\frac{\partial H_2}{\partial y} = e^{-\eta(s-t)}\frac{1}{y} + f\psi_2 = 0 \qquad \text{(A2–8)}$$

$$\frac{\partial H_1}{\partial r} = \frac{1-\alpha}{\alpha}\cdot\frac{1}{r} - g\psi_1 = 0 \qquad \text{(A2–9)}$$

$$\frac{\partial H_2}{\partial r} = e^{-\eta(s-t)}\left[\frac{1-\alpha}{\alpha}\cdot\frac{1}{r}\right] + f\psi_2 = 0 \qquad \text{(A2–10)}$$

(A2–7)，(A2–8)式より，

$$\psi_2 = e^{-\eta(s-t)}\psi_1 \qquad \text{(A2–11)}$$

(A2–9)，(A2–10)式より，

$$r = \frac{1-\alpha}{\alpha}\cdot\frac{1}{g\psi_1} = \frac{1-\alpha}{\alpha}e^{-\eta(s-t)}\frac{1}{\psi_2} \qquad \text{(A2–12)}$$

ここで，(A 2–8)式は，(A2–11)式を用いて，

$$\frac{\partial H_2}{\partial y} = e^{-\eta(s-t)}\frac{1}{y} + f\psi_2 = e^{-\eta(s-t)}\left(\frac{1}{y} + f\psi_1\right)$$
$$= e^{-\eta(s-t)}\frac{\partial H_1}{\partial y} \qquad \text{(A2–13)}$$

y が(A2–3)式の最適軌道にあるとすると，**別添Ⅰ**の(A1–11)式及び(A2–11)式より，

$$\frac{\partial H_2}{\partial y} = -\frac{\partial \psi_2}{\partial t}$$
$$= -\left[-\eta e^{-\eta(s-t)}\psi_1 + e^{-\eta(s-t)}\dot{\psi}_1\right] \qquad \text{(A2–14)}$$ [16)]

(A2–13)，(A2–14)式より，

$$\frac{\partial H_1}{\partial y} = \eta\psi_1 - \dot{\psi}_1$$

$$\therefore\ \dot{\psi}_1 = \eta\psi_1 - \frac{\partial H_1}{\partial y} \qquad \text{(A2–15)}$$

(A2–7)，(A2–15)式より，

$$\dot{\psi}_1 = \eta\psi_1 - \frac{1}{y} - f\psi_1$$

$$\therefore\ \dot{\psi} = \eta\psi - \frac{1}{y} - f\psi$$

別添Ⅲ　$z = y\psi$ の一般安定解の導出

(19)式が安定解を持つには，$z = y\Psi$ が安定解を持つことが必要である。そこで，次式によって表される微分方程式 z の一般安定解を次の手順に従って導出する。

$$\dot{z} = \eta z - \left[\frac{1-\alpha}{\alpha}(\beta_1+\beta_2)+1\right]$$
$$= \eta z - B \qquad B = \left[\frac{1-\alpha}{\alpha}(\beta_1+\beta_2)+1\right]$$
$$\text{(24)}$$

A3-1　$z = y\psi$ の一般解の導出

Cauchy の微分方程式の解法に従って(24)式の解 z を次の二段階に分けて求める。

1) 最初に，$\dot{z} = \eta z$ として扱うと，

$$\frac{\dot{z}}{z} = \eta \qquad \int\frac{\dot{z}}{z}dz = \int\eta dt$$

$$\ln|z| = \rho t + C$$

$|z| = e^{\gamma t} + D' = e^{\gamma t} + e^C = De^{\gamma t}$　ここに D は係数を表す。

2) 次に D を時間の関数として，$z = D(t)e^{\gamma t}$ と扱うと，

$$\dot{z} = \dot{D}e^{\eta t} + D\eta e^{\eta t} = \eta De^{\rho t} - B$$

$$\therefore \eta De^{\rho t} = -B \qquad \dot{D} = -B\cdot e^{-\eta t}$$

$$D(t) = \int -B\cdot e^{-\eta t}dt = \frac{B}{\eta}\cdot e^{-\eta t} + C$$

$$\therefore z = \left(\frac{B}{\eta}\cdot e^{-\eta t} + C\right)\cdot e^{\eta t} = \frac{B}{\eta} + C\cdot e^{\eta t} \qquad \text{(A3–1)}$$

この解は，(24)式の一般解である。

A3-2　$z = y\psi$ の一般安定解の導出

次に，一般解(A3–1)式の安定解を求める。

t の時点における産出のコスト $Z(t)$ の現在価値は $e^{-\gamma t}z(t)$ で示されるが，将来的には，そのコストは０となる。すなわち，

$$\lim_{t\to\infty} e^{-\rho t}z(t) = 0 \qquad \text{(A3–2)}$$

の条件を満たす必要がある(Transversality condition)。ここで，(A3–1)式より，

$$e^{-\eta t}\cdot z = \frac{B}{\eta}\cdot e^{-\eta t} + C \qquad \text{(A3–3)}$$

16) 効用関数(16)式は時間 s の積分であることに注意。

$t\to\infty$ のとき，$e^{-\gamma t}\to 0$ であるので，(A3–2)式を満たすには，$C=0$ でなければならない。

以上より，z の一般安定解は，

$$z(t)=\frac{B}{\eta}=\frac{1}{\eta}\cdot\left[\frac{1-\alpha}{\alpha}(\beta_1+\beta_2)+1\right]$$

と求められる。

別添Ⅳ　技術の生産要素（技術体化，非体化）代替弾性値の計測

技術(T)の他の生産要素(Z)の代替は，相対価格(P_z/P_t)のみならず技術それ自体の変化にも影響される(Yeung and Roe, 1978) [6]ので，技術(T)の他の生産要素(Z)とは割合(T/Z)の支配式は次のように表される。

$$\ln\frac{T}{Z}=a_{z0}+b_{z1}\ln T+b_{z2}\ln\frac{P_z}{P_t} \qquad \text{(A4–1)}$$

(A4–1)式の右辺に第2項（Tの影響）を入れるのは，技術の等生産曲線上昇加速効果を勘案するためである。

(A4–1)式は次のように展開される。

$$\ln\frac{T}{Z}=a_{z0}+b_{z1}\ln T+b_{z2}\ln\frac{GZC}{GTC}\cdot\frac{T}{Z}$$

$$\ln\frac{T}{Z}=\frac{a_{z0}}{1-b_{z2}}+\frac{b_{z1}}{1-b_{z2}}\ln T+\frac{b_{z2}}{1-b_{z2}}\ln\frac{GZC}{GTC} \qquad \text{(A4–2)}$$

成長会計理論[1]に則り，次の関係が想定される。

$$\ln\frac{P_z}{P_t}=b_{z3}+b_{z4}\ln T \qquad \text{(A4–3)}$$

$$\left(\therefore \frac{\Delta P_z}{P_z}-\frac{\Delta P_t}{P_t}=b_{z4}\frac{\Delta T}{T}\right)$$

(A4–2)式を用い，(A4–3)式は次のように変換される。

$$\ln\frac{GZC}{GTC}=b_{z3}'+b_{z4}'\ln T \qquad \text{(A4–4)}$$

(A4–4)式を(A4–2)式に代入すると，

$$\ln\frac{T}{Z}=\frac{a_{z0}+b_{z2}b'_{z3}}{1-b_{z2}}+\frac{b_{z1}+b_{z2}b'_{z4}}{1-b_{z2}}\ln T \qquad \text{(A4–5)}$$

(A4–5)式をTで偏微分することにより，次式が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial T}\ln\frac{T}{Z}=\frac{1}{T}\frac{b_{z1}+b_{z2}b'_{z4}}{1-b_{z2}} \qquad \text{(A4–6)}$$

ここで，

$$\frac{\partial Z}{\partial T}\cdot\frac{T}{Z}=1-T\frac{\partial}{\partial T}\ln\frac{T}{Z}$$

のように展開され，この右辺を(A4–6)式で置き換えると次式が得られる。

$$\frac{\partial Z}{\partial T}\cdot\frac{T}{Z}=1-\frac{b_{z1}+b_{z2}b'_{z4}}{1-b_{z2}} \qquad \text{(A4–7)}$$

(A4–7)式はTのZ弾性値を示す。

次式で示されるように，(34)，(35)式はZ'のZ弾性値を計測するために使われる。

$$\frac{dZ}{dt}=\frac{\partial Z}{\partial Z'}\cdot\frac{dZ'}{dt}+\frac{\partial Z}{\partial T}\cdot\frac{dT}{dt} \qquad \text{(A4–8)}$$

(A4–8)式から次式が得られる。

$$\frac{\Delta Z}{Z}=\frac{\partial\ln Z}{\partial\ln Z'}\cdot\frac{\Delta Z'}{Z'}+\frac{\partial\ln Z}{\partial\ln T}\cdot\frac{\Delta T}{T} \qquad \text{(A4–9)}$$

(A4–9)式に，Z'，Z及びTの時系列データを当てはめることにより，$(\partial \ln Z)/(\partial \ln Z')$の時系列推移を計測することができる。

別添Ⅴ　技術の割引限界生産性の計測方法

技術の割引限界生産性は（54）式により求めることになるが，このうち$q=\dfrac{\partial V}{\partial T}$（技術の限界生産性）は「技術のサービス価格と研究開発投資内部収益率の同時計測」(Watanabe, 1995) [7]によって計測できる。

従って，以下にpの計測方法について述べる。

Pは生産要素の限界生産性

$$\left(\frac{\partial V}{\partial \overline{X}}\right)$$

及び技術の研究開発投資要素誘発限界生産性

$$\left(\frac{\partial X_T}{\partial T}\right)$$

で構成されるが，そのそれぞれの構成要素は，

(i) X_TとTとの間に$X_T=X_T8(T)$ような逆関数関係が存在し，かつ全要素が一次同次で，一定のコスト制約下において生産化の最大を追求し，

(ii) すべての要素価格が競争的に決定される，

との条件下において，次の価格比を求めることによって計測することが出来る。

生産要素の限界生産性，

$$\frac{\partial V}{\partial \overline{X}}=\frac{P_{\overline{X}}}{P_V} \qquad (\overline{X}\text{の相対価格}) \qquad \text{(A5–1)}$$

技術の研究開発投資要素誘発限界生産性，

$$\frac{\partial X_T}{\partial T}=\frac{P_T}{P_{XT}} \qquad (\text{次節参照}) \qquad \text{(A5–2)}$$

ただし，P_V，$P_{\overline{X}}$，P_T及びP_{XT}は，それぞれ生産（付加価値）V及び生産要素$\overline{X}$，T，X_Tの価格を表す。この具体的計測方法は次の通り。

A5-1 技術の研究開発投資構成要素誘発限界生産性の計測

(1) 特定条件下での行動原理

(47)式で示すような逆関数が次のように存在するとする(脚注2参照)。

$$X_T = X_T(T) \qquad \text{(A5–3)}$$

(A5–3)式に対応し，次のようなコスト関数が存在する。

$$C_{XT} = C(X_T, P_T) \qquad \text{(A5–4)}$$

それぞれの要素価格 P_{XT} 及び P_T が競争的に決定されている場合，(A5–3)，(A5–4)式は次式を用いて統合的に表すことが出来る。

$$W = X_T + \Gamma\left[C_{XT} - C(X_T, P_T)\right] \qquad \text{(A5–5)}$$

ここに，Γ はラグランジュ乗数を示し，これを用いることにより，(A5–4)式のコスト制約のもとでの(A5–3)式の最大化は，(A5–5)式の最大値を求めることによって得られる。

従って，

$$\frac{\partial W}{\partial X_T} = \frac{\partial W}{\partial T} = \frac{\partial W}{\partial \Gamma} = 0 \qquad \text{(A5–6)}$$

(A5–3)式が一次同次である場合には，(A5–4)式のコスト関数は次式のように表される。

$$C_{XT} = P_{XT} X_T = P_T T \qquad \text{(A5–7)}$$

(A5–7)式を用いて，(A5–6)式を展開すると次の式が得られる。

$$\frac{\partial W}{\partial X_T} = 1 - \Gamma \frac{\partial C}{\partial X_T} = 1 - \Gamma P_{XT} = 0$$

$$\therefore \Gamma = \frac{1}{P_{XT}}$$

$$\frac{\partial W}{\partial T} = \frac{\partial X_T}{\partial T} - \Gamma \frac{\partial C}{\partial T} = \frac{\partial X_T}{\partial T} - \Gamma P_T = 0$$

$$\therefore \frac{\partial X_T}{\partial T} = \Gamma P_T = \frac{P_T}{P_{XT}}$$

よって，前節で総括した条件のもとに，技術の研究開発投資構成要素誘発限界生産性

$$\left(\frac{\partial X_T}{\partial T}\right)$$

は，(A5–2)式で示したように T 及び X_T の要素価格の比で表すことができる。

$$\frac{\partial X_T}{\partial T} = \frac{P_T}{P_{XT}} \qquad \text{(A5–2)}$$

(2) サービス価格の計測

$X_T(=L_T, K_T, M_T, E_T)$ の T 限界生産性が期間安定である場合には，技術のサービス価格指数 D_T は次式で示される [7,8]。

$$D_T = (1 - gs)(Rls \cdot Dl + Rms \cdot Dm + Res \cdot De) + Rks \cdot Pstc \qquad \text{(A5–8)}^{17)}$$

Pstc は，技術のサービス価格のうち資本ストックに係るものであり，次の式で表される。

$$Pstc = \frac{Dk(\bar{r} + \rho)(1 - gs)}{(1 - ct)} \qquad \text{(A5–9)}$$

$$\because \frac{Dk(1 - gs)}{(1 - ct)} = \int_0^\infty Pstc \cdot e^{-(\bar{r}+\rho)} dt = \frac{Pstc}{(\bar{r} + \rho)}$$

ここに，*Rls*，*Rks*，*Rms* 及び *Res* は，それぞれ研究開発投資のうち労働，資本、原材料及びエネルギーに係るコストのシェアを示し，*Dl*，*Dk*，*Dm* 及び *De* はそれぞれ賃金，資本デフレーター及び原材料，エネルギー財の卸売物価指数を示す。*gs* 及び *ct* は，産業の研究開発投資のうちの政府支援割合及び法人税率を示す。$\bar{r}$ 及び ρ は研究開発投資内部収益率及び技術の陳腐化を示す。

---

17) $y = F(t, (X - X_T), T) \qquad X = L, K, M, E \qquad$ (F16-a)

$T = T(X_T) \qquad$ (F16-b)

生産関数が一次同次であることを前提に，(F16-a)，(F16-b) 式に対応するコスト関数は次のように示される。

$GC = \sum(GXC - GTCx) + GTC \qquad$ (F16-a')

$GTC = \sum GTCx \qquad$ (F16-b')

ここに *GC*: 総コスト; *GXC*: *X* のコスト; *GTC*: 技術のコスト; *GTCx*: X_T のコスト

$P_T T = \sum P_{XT} X_T \qquad$ (F16-b'')

ただし，P_T，P_{XT} はそれぞれ T 及び X_T の価格。

価格指数 D_T 及び D_{XT} (初期値 =1)を用いれば，P_T 及び P_{XT} は次のように示される。

$P_T = D_T \cdot P_{T0},\ P_{XT} = D_{XT} \cdot P_{XT0}$

P_{T0}，P_{XT0} は T 及び X_T の初期価格を示す。

従って，

$$D_T = \sum D_{XT} \cdot \frac{X_T}{T} \cdot \frac{P_{XT0}}{P_{T0}} = \sum D_{XT} \cdot \frac{GTCx}{GTC} \cdot \left(\frac{P_{XT0}}{P_{T0}} \cdot \frac{P_T}{P_{XT}}\right)$$

T 及び X_T のサービス価格が競争的に決定され，T を形成する X_T の限界生産性が安定的であることを前提とすると，次の関係式が得られる。

$$\left[\frac{\partial T}{\partial X_T} = \frac{P_{XT}}{P_T}\right] = \left[\frac{\partial T_0}{\partial X_{T0}} = \frac{P_{XT0}}{P_{T0}}\right]$$

$$\therefore D_T = \sum D_{XT} \cdot \frac{GTCx}{GTC} = \sum D_{XT} \cdot R_{XT} \qquad \left(R_{XT} = \frac{GTCx}{GTC}\right)$$

(3)　技術の研究開発投資構成要素誘発限界生産性（$\frac{\partial X_T}{\partial T}$）の計測

先に述べた前提条件の下に，T 及び X の初期値を P_{T0} 及び P_{XT0} とすると，

$$\frac{\partial X_T}{\partial T}$$

は(A5–10)，(A5–11)式によって求められる。

$$\frac{\partial L_T}{\partial T}=\frac{P_T}{P_{LT}}=\frac{D_T}{D_{LT}}\cdot\left(\frac{P_{T0}}{P_{LT0}}\right) \qquad \text{(A5–10)}$$

$$\frac{\partial K_T}{\partial T}=\frac{P_T}{P_{KT}}=\frac{D_T}{D_{KT}}\cdot\left(\frac{P_{T0}}{P_{KT0}}\right) \qquad \text{(A5–11)}$$

A5-2　技術の割引限界生産性の計測

V，X，T 及び X_T のそれぞれの価格に対応する価格指数 D_V，D_X，D_T 及び D_{XT}（初期値=1）を用いると，

$$p=\sum_{L.K}\frac{\partial V}{\partial X}\cdot\frac{\partial X_T}{\partial T}=\sum\left(\frac{D_X\cdot P_{X0}}{D_V\cdot P_{V0}}\right)\cdot\left(\frac{D_T\cdot P_{T0}}{D_{XT}\cdot P_{XT0}}\right)=$$

$$\sum\left(\frac{D_X}{D_V}\cdot\frac{D_T}{D_{XT}}\right)\cdot\left(\frac{P_{X0}}{P_{V0}}\frac{P_{T0}}{P_{XT0}}\right) \qquad \text{(A5–12)}$$

技術ストック T を形成し、生産要素同様，労働，資本，原材料，エネルギーの要素からなる研究開発投資の構成要素（$X_T=L_T, K_T, M_T, E_T$）は，初期段階において，生産要素一般と同様の限界生産性を示すものとすると，

$$\left[\frac{\partial T_0}{\partial X_{T0}}=\frac{P_{XT0}}{P_{T0}}\right]=\left[\frac{\partial y_0}{\partial X_0}=\frac{P_{X0}}{P_{y0}}\right]=\frac{P_{X0}}{p_{V0}}\cdot\frac{P_{V0}}{Py0} \qquad \text{(A5–13)}$$

(A5–13)式を(A5–12)式に代入し，

$$p=\sum\frac{D_X}{D_V}\cdot\frac{D_T}{D_{XT}} \qquad \text{(A5–14)}$$

従って，以上の前提をもとに，p は各要素の価格指数を用いて表すことができる。

別添Ⅵ データ構築・データソース[18]

Y	生産	S1
V	付加価値	S1
L	労働力	S1, S2
K	資本ストック	S3, S4
M	原材料	S1, S5, S6, S7
E	エネルギー	S7
T	技術ストック	脚注5を参照
R	研究開発投資	S8
L_T	技術ストックの労働要素	S8, S9
K_T	同資本要素	S8, S10
M_T	同原材料要素	S8, S11
E_T	同エネルギー要素	S11
GC	総コスト	S1
GLC	労働コスト	S1, S12
GCC	資本コスト	S1
GMC	原材料コスト	S1
GEC	エネルギーコスト	S5
GTC	技術コスト	S8
$GTCl$	研究開発投資のうちの労働要素	S8
$GTCk$	同資本要素	S8, S11
$GTCm$	同原材料要素	S8, S11
$GTCe$	同エネルギー要素	S11
ρ	技術の陳腐化率	S11
m	研究開発から商業化までのタイムラグ	S11
η	平均銀行金利（国内銀行貸出約定平均金利）	S13

S1	国民経済計算年報（経済企画庁，年報）
S2	毎月勤労統計要覧（労働省，年報）
S3	民間企業資本ストック（経済企画庁，年報）
S4	鉱工業指数総覧（通商産業省，年報）
S5	工業統計表（通商産業省，年報）
S6	経済統計年報（日本銀行，年報）
S7	総合エネルギー統計（資源エネルギー庁，年報）
S8	科学技術研究調査報告（総務庁統計局，年報）
S9	基礎的・先導的科学技術の推進のための研究人材に関する調査研究（未来工学研究所，東京，1990）
S10	法人税施行令（減価償却資産の耐用年数等に関する省令，通商産業省，1965, 1989）
S11	研究産業振興のための調査研究報告書（機械振興協会経済研究所，東京，1990）
S12	個人企業経済調査季報（総務庁統計局，年報）
S13	経済白書（経済企画庁，年報）

18) データ構築の詳細は，Watanabe (1992, 1995) [2, 3] 参照。

参考文献

[1] L. Pontryagin, V. Boltyankii, R. Gamkrelidze and E. Mishchenko, **The Mathematical Theory of Optimal Processes**, Interscience, 1962.

[2] A. Tarasyev and C. Watanabe, Optimal Dynamics of Innovation in Models of Economic Growth, **Journal of Optimal Theory and Applications, 108**, 175-203 (2000).

[3] A. K. Dixit and J. E. Stiglitz, "Monopolistic Competition and Optimum Product Diversity," **The American Economic Review, 67**, 297-308 (1977).

[4] C. Watanabe and B. Zhu, System Options for Sustainable Techno-Metabolism, -An Ecological Assessment of Japan's Industrial Technology System, **International Conference on Industrial Ecology and Sustainability** (1999).

[5] A. Tarasyev and C. Watanabe, Optimal Control of R&D Investment in a Techno-Metabolic System, **IIASA Interim Report, IR-99-01** (1999).

[6] C. Watanabe, K. Wakabayashi and T. Miyazawa, Industrial Dynamism and the Creation of a 'Virtuous Cycle' between R&D, Market Growth and Price Reduction: The Case of PV Development in Japan, **Technovation, 20** (2000) in print.

[7] C. Watanabe, Trends in the Substitution of Production Factors to Technology: Empirical Analysis of the Inducing Impact of the Energy Crisis on Japanese Industrial Technology, **Research Policy, 21**, 481-505 (1992).

[8] C. Watanabe, The Feedback Loop between Technology and Economic Development: An Examination of Japanese Industry, **Technological Forecasting and Social Change, 49**, 127-145 (1995).

[9] J. M. Griffin and P. R. Gregory, An Intercountry Translog Model of Energy Substitution Responses, **American Economic Review, 66**, 845-857 (1976).

[10] Z. Griliches, R&D and Productivity: **The Economic Evidence,** The University of Chicago Press (1998).

[11] K. J. Arrow, H. B. Chenery, B. S. Minhas and R. M. Solow, "Capital Labor Substitution and Economics Efficiency," **The Review of Economics and Statistics 43**, 225-250 (1961).

[12] A. H. Barnett, K. Reutter and H. Thompson, "Electricity Substitution: Some Local Industrial Evidence," **Energy Economics, 20**, 411-419 (1998).

[13] K. P. Chang, "Capital-Energy Substitution and the Multi-level CES Production Function," **Energy Economics, 10**, 22-26 (1994).

[14] Charles River Associates and DRI/McGraw-Hill, Appendix C: The Substitution/Complementarity Issue, in: Economic Impacts of Carbon Taxes: Detailed Result, **EPRI TR-104430-V2** (1994).

[15] E. F. Denison, **The Sources of Economic Growth in the US and the Alternatives before Us, Committee for Economic Development**, Library of Congress (1962).

[16] D. W. Jorgenson and Z. Griliches, The Explanation on Productivity Change, **Review of Economic Studies, 34** (2), (1967).

[17] C. Kemfert, Estimated Substitution Elasticities of a Nested CES Production Function Approach for Germany, **Energy Economics, 20**, 249-264 (1998).

[18] M. Prywes, A Nested CES Approach to Captital-Energy Substitution, **Energy Economics, 1** (1986) 22-28.

[19] R. Sergey, Qualitative Identity of Real and Synthetic Data via Dynamical Model of Optimal Growth, **IIASA Interim Report, IR-99-046** (1999).

[20] A. Tarasyev and C. Watanabe, Optimal Dynamics of Innovation in Models of Economic Growth, **Journal of Optimal Theory and Applications, 108**, 175-203 (2000).

[21] C. Watanabe, "The Interaction between Technology and Economy: National Strategies for Constrained Economic Environments," **IIASA Working Paper, WP-95-16** (1995).

[22] C. Watanabe and K. Wakabayashi, The Perspective of Techno-Metabolism and Its Insight into National Strategies, **Research Evaluation, 6** (1996) 69-76.

[23] P. Yeung and T. L. Roe, **A CES Test of Induced Technical Change: Japan, in: H., Binswanger, V. Ruttan et. al., ed., Induced Innovation: Technology, Institutions, and Development**, John Hopkins University Press, 243-260 (1978).