

2C9 生産関数を用いた研究開発の生産性モデルについて

—研究開発生産性の国際比較（日、米、独）—

○米澤 克雄（科学技術政策研究所）

1. はじめに

研究開発活動においてその経年的な動態を捉えるために科学技術指標が重要な役割を持っている。特に国レベルでは経済協力開発機構（OECD）がフラスティ・マニュアルと通称される「科学技術活動測定手法」（1981年原案）を作成することにより「OECD科学技術指標報告」を毎年まとめており、加盟国の研究費、研究員数、特許出願、技術貿易収支、セクター別研究費などを指標化している。しかし、何れの指標においても、研究開発というダイナミックスの入出力関係をマクロにモデル化するには至ってはいない。従来、線形モデルによる統計分析があるが、研究開発という非線形なダイナミックスに一次式で臨み無理があった。

研究開発活動は研究費、研究員を投入し成果として論文、特許、技術輸出等を産出する非線形ブラックボックスと言える。この投入と産出の比を研究開発の生産性と呼ぶ。本論文は研究開発の投入産出関係の表現に新たにR&D生産関数〔米澤1994〕を導入し、R&D生産性の非線形計測モデルを構築し、時系列分析により長期トレンドを抽出、同定、予測する手法の開発を行い、事例として1) 国家レベルにおける日、米、独のR&D生産性の比較、2) 製造業種レベルのR&D生産性の比較を行う。

2. 生産関数と化学平衡のアナロジー

生産関数とは資本と労働のストックとそこから生み出されるフローである生産との関係を記述する関数モデルである。ただし、現実の生産プロセスでは、遊休設備や失業がありストックが全て稼働する訳ではないため、実際の投入量として資本は機械時間、労働は労働時間というフロー量に置き換える慣行があり、実態的には生産関数がフロー間の投入産出関係を記述していると言える〔ソロー1970〕。本論文ではR&D生産性をマクロに計測する目的で基本的なモデルとしてコブ・ダグラス型生産関数（1928年提唱）

$Q = C \cdot K^a \cdot L^b$ （式2-1）を採用し議論を進める。

コブ・ダグラス型生産関数は、表2-1の様に、奇しくも化学平衡式と相似形をなしている〔米澤1994〕。化学の有名な基本法則である「質量作用の法則」（〔原島、1966〕参照）は、1864年にルウエーの化学者が「 $aA + bB \rightleftharpoons cC + dD$ 」とワゲにより発見されたものであり、 K の法則を満足するような理想的な気体の化学反応を支配する。二種（以上）の気体を混ぜると一種（以上）の気体の化合物を生じるような化学反応においては、一方的に全ての気体が化合するわけではなく、他方でその気体化合物が分解して元の気体に戻る逆の反応も同時に進行しており、ある濃度でこれらの気体が均一に混合したところで反応が全体でどちらの方向にも進行しないで平衡する安定な状態が存在する。簡単のため個数を規格化し、ここでは、互いに反応する気体分子 A の a 個と気体分子 B の b 個が気体分子 Q を1個あたり生成する化学反応式 $aA + bB \rightleftharpoons Q$ （式2-2）に限定して考える。質量作用の法則は、「ある時点」における混合理想気体の化学平衡の関係を表し、これらの混合気体が平衡状態にある場合、各々の成分の（モル）濃度 K 、 L 、 Q の間にはある一定の温度と圧力のもとで関係式 $C = Q \cdot K^{-a} \cdot L^{-b}$ （式2-3）が成り立つことを示す。ここで、 C は温度と圧力で決まる「平衡定数」であり、その自然対数値 $\ln C$ は「混合エントロピー」と呼ばれる。これに対し、経済学で用いる生産関数は「ある期間 n 」において投入された資本ストック K と労働ストック L による生産活動の結果を産出量 Q として表すものである。コブ・ダグラス型生産関数は、式が質量作用法則と同一であるものの、このままでは「ある時点」での K 、 L 、 Q の共存を表すという物理的な解釈が難しいが、期間の途中 $t = s$ においては残存（未稼働）の資本 $K(s)$ と労働 $L(s)$ が累積生産高 $Q(s)$ と併存すると考えると「ある時点 s 」でも平衡状態にあると解釈できる。

3. 研究開発の生産関数モデル

研究開発を進める上で研究開発投資がどれ程の研究成果を生み出すか投資のパフォーマンスを計測する手段が重要となる。図3-1の様に、研究開発を非線形ブラックボックスと考えると、その入力には研究開発費 X と研究員数 Y であり、出力 Z は論文件数、特許件数、技術輸出等となる。入力としては、研究開発費を被件費 X と人件費 Y に分けること、理想的には、研究開発費の設備投資分を積み上げて研究資本ストック X を求め研究員数 Y とのペアを入力としてとることが考えられる。以下では、入力 X 及び Y 、出力 Z はこの様な組み合わせの何れにも当てはまるとして進める。

3.1 生産性モデルの定義

本論文では研究開発システムのダイナミクスを記述する関数としてコブ・ダグラス型生産関数 $Z = CX^a \cdot Y^b$ (式3-1) ないし $\ln Z = a \cdot \ln X + b \cdot \ln Y + \ln C$ [自然対数表現] (式3-2) をモデルとして考察する。ここで、正の定数 a 、 b 、 C は過去の観測データ X 、 Y 、 Z を入力とする統計分析から同定する。実際のデータを自然対数値に直して研究開発の投入 X ないし Y に対し産出 Z をプロットしてみると、入出力間にはほぼ完全な直線関係が成立しており、線形関係 $\ln Z = a \cdot \ln X + b \cdot \ln Y + \ln C$ の存在を示唆する。この事実は生産関数モデルを研究開発に適用する実証的な根拠を与える。研究開発活動は a 単位の研究費と b 単位の研究者数の投入により一単位の研究成果を産出する化学反応と考えると、化学平衡式と生産関数の相似性により、R & D 生産性モデルに生産関数を用いる試みは自然な帰結となる。

3.2 投入要素の選択と多重共線性

投入要素として研究費 X には研究者の人件費 Y が含まれていることから、係数 a 、 b 、 c を推定する統計分析にあたり、説明変数の $\ln X$ と $\ln Y$ は互いに相関の高い変数となり推定に悪い影響 (多重共線性) が現れることがありそうにみえるが、対数のメリットが発揮され全く問題とならない。いま $\ln X$ を分解すると $\ln X = \ln(X-Y) + \ln(1+Y/(X-Y))$ であり $\ln Y$ と相関のない成分 $\ln(X-Y)$ と弱い相関の成分 $\ln(1+Y/(X-Y))$ の和となっているので実際上心配がいらぬ。

3.3 投入要素間の代替性

生産関数は代替性を持ち、同一の産出 Z を与える投入要素 X と Y の間に組み合わせが多様にある。例えば、研究プロジェクトを開始する上でトレードオフを行い、自己で設備と研究陣を整え内部で進めるか、あるいは外部に研究を全部ないし一部を委託するか、多様な意志決定のオプションがあり、研究費に占める人件費、設備費、外部委託費の割合を様々に変え得る。

3.4 同次性と研究投資効果

生産関数モデルの長所は産出 Z の要因を投入 X ないし投入 Y の効果に分解するという要因分解が容易である点にある。生産関数は平衡状態や近傍の平衡状態への変化を巧みに記述している [西川、1976]。微分形式で見ると $\Delta Z/Z = a \Delta X/X + b \Delta Y/Y$ (式3-3) の関係があり、 a 、 b の値は投資効果を示す。変化率で見ると $Z_2/Z_1 = (X_2/X_1)^a \cdot (Y_2/Y_1)^b$ (式3-4) の関係があり、 Z の変化率は X 及び Y の変化率の積で相乗効果を示す。また、コブ・ダグラス型の実験生産関数は $(a+b)$ の同次性を持つことから、入力 X と Y が k 倍になると、出力 Z は k の $(a+b)$ 乗倍となる。 $a+b-1$ の値が正、ゼロ、負に応じて、規模に関して収穫が逓増、一定、逓減であると言う。研究者一人当りの研究費 X/Y と産出 Z との相関関係は生産関数により $Z/Y = C \cdot (X/Y)^a \cdot Y^{b+a-1}$ (式3-5) と記述できる。従って、一人当りの研究開発の産出 Z を増加させる戦略としては、 $a+b < 1$ ならば、一人当たり研究費 X/Y を増加させること (一人当たり研究費追加戦略)、 $a+b > 1$ ならば、一人当たり研究費を増加するのみならず、研究者数 Y を増加させること (研究費・研究者数追加戦略) が効果的であることを示唆している。

3.5 生産の収穫飽和性: 研究開発の成長曲線

生産関数の係数 a 、 b 、 $\ln C$ による直行座標系を考えると、取り得る点 $(a, b, \ln C)$ の領域は、軸 $\ln C$ 上の点を頂点とし軸 a 及び軸 b 上の点を結んで作る、三角形の平面内に限られるという幾何学的特性がある。従って、出力 Z が時間の経過と共に飽和して行く収穫飽和型の場合は、ある期間ごとに係数 a 、 b 、 C の値を求めると、時間の経過に伴い、曲線の傾きを表す a 及び b は 1 前後から縮小し次第にゼロに近づき、 z 切片をあらわすエントロピー $\ln C$ は負からゼロ、更に正に増大し $\ln Z$ そのものの値に次第に近づく性質がある。このことから、収穫飽和型である論文、特許、技術輸出の様な研究出力 Z は、線形な投入産出の関係式 $\ln Z = a \cdot \ln X + b \cdot \ln Y + \ln C$ に着目して、図 3-3 の様に、 $\ln Z$ の傾き a 、 b および縦軸の切片 $\ln C$ の値を読むならば、研究開発のライフ・サイクルとして、おおよそ、萌芽期 ($\ln Z$ の傾きが正であるが、切片 $\ln C$ の値が負となる領域)、拡張期 ($\ln Z$ の傾きが正で a と b の和が 1 以上、 $\ln C$ の値が負から正となる部分を含むような領域)、成熟期 ($\ln Z$ の傾きが正で a と b の和が 1/2 以上、 $\ln C$ の値が正で $\ln Z$ 以下となる部分を含むような領域)、飽和期 ($\ln Z$ の傾きが正でゼロに近く a と b の和が 1/2 以下、 $\ln C$ の値が $\ln Z$ 近傍となるような領域) に分類することが考えられる。特に、萌芽期から拡張期は $\ln C$ が負の分だけ余計に投入 ($a \ln X + b \ln Y$) の産出 $\ln Z$ への寄与分が大きくなる特徴がある。この研究活動の飽和性の顕著な実例として、米国の自国内特許登録件数の 30 年間 (1960-1990) にわたる変遷 [図 3-4 参照] が挙げられる。こうした特許登録件数の消長から、拡張期 (1962 年頃まで)、成熟期 (68 年頃まで)、飽和期 (74 年頃まで)、衰退期 (84 年頃まで)、再生期 (レーガン政権のプロ・パテント政策が功を奏し 85 年頃から再生へ向かう) のライフ・サイクルが読み取れる。

3.6 産出の時間遅れ

研究開発において、所与の期間に投入される入力 X ないし Y は、前期までに投入された入力 X 、 Y の中間産出物を来期に向けて継続研究すること、あるいは完成し期内の出力とすること、新たな研究に着手し来期に向けて中間産出物を得ること、もしくは完了し期内の出力とすることの何れかに使われる。期内に産出される出力 Z は、継続研究の成果物、新規研究の成果物からなる。中間産出物は、有形であれ無形であれ、前期から当期に受け継がれ来期に引き渡されるものであり物品に例えれば在庫品（仕掛品）にあたる。他方で、多期間にわたる研究プロジェクトの入出力関係（入力に対する出力の時間遅れ等）を捉えて総合するアプローチはデータ自体が十分に存在せず容易でない。本論文では、研究開発の入出力関係をマクロに把握するクイック・ルック手段として、中間産出物は期首と期末でほぼ同量になると仮定し、期内の出力 Z は全て期内の入力 X 、 Y の成果物であるとみなす立場を生産関数の取り扱いに採用する。

3.7 統計分析のテクニック:時系列分析の採用

非線形モデルの生産関数は対数で展開すると $\ln Z = \ln C + a \ln X + b \ln Y + e$ (式 3-6) の様に線形モデルに転換できる。誤差 e は観測不可能な確率変数であって目的変数 $\ln Z$ の変動のうち説明変数 $\ln X$ 及び $\ln Y$ で説明できない部分を表しており、回帰分析において誤差 e は互いに独立で平均ゼロ、分散 σ^2 の正規分布に従うものと仮定する。 $\ln X$ 、 $\ln Y$ 、 $\ln Z$ の観測値を与えれば、係数 a 、 b が正符号である条件のもとに統計分析で係数 a 、 b 、 $\ln C$ が推定できる。

回帰分析の短所は、時系列データ (X, Y, Z) の発生順序が全くその推定アルゴリズムと無関係でありデータの順序を置換しても結果が変わらない。回帰分析の別の欠陥は求める定数 a 及び b が正であるという生産関数の符号の要求を満足する計算結果が必ずしも得られないことである。

ある期間の投入と産出の関係は n 期間前までの実績に依存し（その確率密度関数が）他の期間とは無関係であると考えると、時系列データ (X, Y, Z) の発生順序は「 n 階のマルコフ確率過程」に他ならない。ところが、回帰分析は前提条件として各期間のデータが正規分布でランダムに発生するものとし、ある期間とその前の期間とは無関係と仮定する。このため、回帰分析は何にでも使える反面、データの発生順序という確率統計的な情報が全く欠落し活かされていない。

本論文ではデータの時系列性を重視する逐次最小自乗推定アプローチ($n=1$)により生産関数モデルの正符号のパラメータを同定する。このアプローチは「時系列分析」と呼ばれ、時系列データの発生順序の確率・統計情報を活用する最適推定法でありカルマン・フィルタを駆使する[広松・浪花、1990]。簡単に言えば、この時系列分析は観測値と推定式の垂直距離を誤差にとり最小化することで回帰分析の弱点を克服する。なお、推定値は不変性を持ち、誤差 e の期待値はゼロであり、推定値 $\ln(Z_{est}(j))$ の平均値と観測値 $\ln(Z_{real}(j))$ の平均値は同一となる性質がある。対数を元に戻すとこの平均値 Z_{mean} は $Z_{real}(j)$ ないし $Z_{est}(j)$ の相乗平均となる。比 $Z_{est}(j)/Z_{real}(j)$ の相乗積は標本期間数 m の増加と共に1に収斂する特性を持つ。

4. 事例研究:国家レベルの国際比較

国家レベルにおける研究開発のアウトプットをマクロに指標化する試みとして、研究開発のアウトプットである論文、特許、及び技術輸出について研究費、研究者数をインプットとしてこれらの生産性を生産関数モデルにより計測する本論文の手法を用いて、以下において日、米、独の国際比較を行い知見の抽出をはかる。さらに、総合指標を考案し考察を加える。なお、インプットの日、米、独の研究費及び研究者数は「科学技術白書」を採用する。以下の時系列分析の決定係数 R^2 は.95級であり、 R & D 生産関数モデルは実績値と推定値とのあてはまりの良さに優れている。

4.1 国際論文

研究論文の発表数はどの範囲の学会誌を取り上げるかで各国の集計が異なり、国際比較となると共通の土俵としてどの学会誌が国際的プレスティジを持つのか評価が難しい。ここでは、こうした指標として国際的に評価の高い米国C H I社の「科学技術指標文献データベース」(1992年)を利用し主要国際誌における各国の論文数の集計データの中から日、米、独の論文発表数を、それらの国の研究開発の論文アウトプットとして、採集した。1975年から1989年の15年間における日、米、独の論文生産性について時系列分析を行った結果、表4-1のように係数 a 、 b 、 c 及び決定係数 R^2 が得られた。式(3-3)から国際論文の生産性について日本は拡張から成熟への過渡期、米国及びドイツは飽和期を示す。係数 a 、 b の値は3.4節から国際論文を増やすには日本は研究費ないし/および研究者数を増加、米国、ドイツは研究者数を増加することが良い。一人当たり生産を高める戦略は日本が一人当たり研究費を増加、米国やドイツもほぼ一人当たり研究費を増加させることが得策となる。和 $a + b$ の値は日本(0.86)が1に近く国際論文の産出はほぼ収穫一定、ドイツ(0.38)、米国(0.39)が1より小さく収穫逨減となる。

4.2 国際特許

特許制度は各国でその制度の適用や運用の実態が微妙に異なるため、特許件数においても各国での出願、登録の単純な集計では比較の役に立たない。例えば、日本の特許庁での申請件数が他国特許庁のその十倍以上と突出しており、特許数で研究開発力をみる目的には客観的な国際比較が容易ではない。国際特許の出願の行為は輸出先での技術、製品などの知的所有権を確保するための企業側の不可欠の防衛手段とする立場をとれば、国際特許は極めて重要であり出願件数で各国の研究開発力を比較することはおよそ合理性がある。本論文では「OECD科学技術指標報告」(1991)に掲載の国際出願特許件数データから日、米、独の国際特許出願件数を得た。1975年から1988年の14年間における日、米、独の国際特許の生産性について時系列分析を行った結果、表4-2のように係数 a 、 b 、 c 及び決定係数 R^2 が得られた。 $\ln D_t^\circ - \ln C_t$ は国際特許の生産性について日本は拡張期、ドイツが拡張から成熟への過渡期、米国は成熟期を示す。和 $a+b$ の値は日本(1.48)が1より大きく国際特許件数が規模に関して収穫逓増となるが、ドイツ(1.16)はほぼ1に近く収穫一定、米国(0.78)が1より小さく収穫逓減となる。係数 a 、 b の値をみると、国際特許を増やすには日本は研究費ないし研究者数、もしくは両方を増やすこと、米国、ドイツも同様な方策が良い。一人当たり生産を高める戦略は日本は一人当り研究費のみならず研究員数も増加、ドイツも同様、米国は一人当り研究費を増加させることが得策となる。

4.3 技術輸出

技術輸出額はその国の科学技術における国際比較優位性を示す重要な指標と考えられる。本論文では科学技術白書(前出)に所収の技術輸出入データから日、米、独の技術輸出額を採取した。ただし、近年件数が増加にある、知スライセスによる技術輸出は金銭の授受がなく未計上である。1975年から1989年の15年間における日、米、独の技術輸出の生産性について時系列分析を行った結果、表4-3の様に係数 a 、 b 、 c 及び決定係数 R^2 が得られた。 $\ln D_t^\circ - \ln C_t$ の値は技術輸出の生産性について日本は拡張期、米国が成熟期、ドイツが拡張期を示す。係数 a 、 b の値をみると、技術輸出を増やすには日本は研究費ないし研究者数、もしくは両方を増やすこと、米国、ドイツも同様な方策が良い。技術輸出の一人当たり生産を高める戦略は日本が一人当り研究費を増加させるのみならず研究者数を増加させること、ドイツも日本と同様であり、米国は一人当り研究費を増加させることが得策となる。和 $a+b$ の値は日本(1.76)、ドイツ(1.37)が1より大きく技術輸出が規模に関して収穫逓増、米国(0.78)は収穫逓減となっている。

4.4 総合指標

上記で得た国際論文、国際特許、技術輸出の係数 a 、 b 、 c の値を用いて、総合指標として相乗平均、特許対論文比、技術輸出対特許比の各々につき a 、 b 、 c を求めるものとする。

相乗平均指標は国際論文 Z_1 、国際特許 Z_2 、技術輸出 Z_3 の生産性の平均像を表し、 $(Z_1 Z_2 Z_3)^{1/3} = (C_1 C_2 C_3)^{1/3} \cdot X^{(a_1+a_2+a_3)/3} \cdot Y^{(b_1+b_2+b_3)/3}$ (式4-1)となる。 $\ln D_t^\circ - \ln C_t$ の値から日本が拡張期、独が拡張期から成熟期へ、米が飽和期にある。係数 a 、 b の値は研究開発の総合的な一人当り産出を高める戦略は日本が一人当り研究費のみならず研究者数を増加させること得策となる。米国及びドイツは一人当り研究費を増加させることが得策となる。日本は和 $a+b$ が1.37と1より大きく規模に関して収穫逓増、ドイツがほぼ収穫一定、米国は収穫逓減となる。

特許対論文比は、国際論文の生産能力に対して国際出願特許の生産能力がどの程度にあるか、論文が特許をどの程度生み出すかを表現する試みの指標であり、 $Z_2/Z_1 = (C_2/C_1) \cdot X^{a_2-a_1} \cdot Y^{b_2-b_1}$ (式4-2)となる。この指標の $\ln C_t$ の係数を読むと日本は拡張期、米国及びドイツも拡張期にある。係数 a 、 b の値は研究者当りの特許対論文比を高める戦略は日本が一人当り研究費を増加、米国及びドイツも一人当り研究費を増加させることが得策となる。

特許対技術輸出比は国際特許を生み出す能力に対し技術輸出を生み出す力がどの程度にあるか、特許が技術輸出にどの程度つながるかを表す試みの指標であり、 $Z_3/Z_2 = (C_3/C_2) \cdot X^{a_3-a_2} \cdot Y^{b_3-b_2}$ (式4-3)となる。 $\ln C_t$ の係数を読むと日本及びドイツは拡張期、米国は拡張から成熟への過渡期にある。係数 a 、 b の値は研究者当りの特許対論文比を高める戦略は日本が一人当り研究費を増加、米国及びドイツも一人当り研究費を増加させることが得策となる。

5. 事例研究:製造業種レベル

製造業種レベルの研究開発の生産性を計測する手段として生産関数モデルを用いることが有効であるかを検討するために素材産業である化学工業と加工組立産業である電気機械工業についての1980年代の技術輸出を取り上げる。1980年から1989年の化学工業、電気機械工業の研究費、研究員数、技術輸出額について総務庁統計局の「科学技術研究調査報告」からデータを採取し、生産関数モデルを用いて係数 a 、 b 、

InCの統計分析を行い表5を得た。

化学工業の研究開発パフォーマンスは、 $\ln C$ をみると拡張期から成熟期への過渡にある。係数 a 、 b の値を読むと、技術輸出を増やすには研究者数を増やすことが良い。一人当りの技術輸出の生産性は一人当り研究費を増やすよりも研究者を増やすことで一層高まることが分かる。和 $a + b$ の値は約1.07と1より大きく化学工業の研究開発は規模に関しやや収穫逓増となっている。

電気機械工業の研究開発パフォーマンスは、 $\ln C$ をみると拡張期にあり、係数 a 、 b を読むと、技術輸出を増加させるには研究費を増加させることが得策となる。一人当りの技術輸出の生産性は研究者を増やすよりも一人当り研究費を増やす方が一層高まることが分かる。和 $a + b$ の値は約0.98と殆ど1に近く電気機械工業の研究開発は規模に関しほぼ収穫一定となっている。

6. R&D生産関数モデルによる将来予測

もし生産関数の様な非線形モデルが用いられないと、研究費と研究者数の特定の組み合わせによる相乗効果が旨く捉えられず、どの様な研究成果が期待し得るか合理的な推定が難しくなる。

R&D生産関数モデルは三つの正の定数 a 、 b 、 c により規定されるが、上述のように過去十数年の実績データに良くあてはまっていた。このことは、研究開発パフォーマンスが、 a 、 b 、 c の値を含めて、何年にもわたる慣性を有することの傍証であり、この係数の値をそのまま用いて、近い将来の予測を行うこと、即ち、研究費と研究者数の特定の組み合わせに対して研究成果が推定できる。ただし、研究成果の成長曲線によれば時間と共に係数 a 、 b 、 c の値は鈍化する傾向があり、現在の a 、 b 、 c 値を使って得られる将来予測は、成果が大きめに出ることは否めず、予測値として上限が得られたと解釈するのが安全である。

6. 1 研究開発の限界生産性の予測

R&D生産関数は、3.4節のとおり、変化率で見ると $Z_2/Z_1 = (X_2/X_1)^a (Y_2/Y_1)^b$ の関係があり、 Z の変化率は X 及び Y の変化率の積で相乗効果を示す。これにより、研究者数（ないし研究費）一定のもとで研究費（ないし研究者数）1単位の増加が研究出力を何単位増加させるか、限界生産性が得られる。これらの積を取れば、研究費、研究者数各1単位の増加が研究出力を何単位増加させるか、相乗効果が得られる。日本のR&D限界生産性(図6-1-1, -2)は、例えば、研究費の増加は研究者数の同程度の増加の場合よりも大きな研究成果の増加をもたらすことを示す。

6. 2 研究者供給不足のインパクト予測

以下において、将来予測の事例研究として、今後二十一年間に予想される慢性的な技術者（研究者）不足の問題を採り上げ、研究開発パフォーマンスへのインパクトを予測する。

わが国では、生産年齢人口の減少と、若者の科学技術離れ現象が進展し、今後、科学技術人材の供給の不足が懸念される。技術者の将来需要予測 [日本技術士会、1994] によれば、技術者総数（1990年で約235万人）は今後も漸増が見込まれるが、新卒技術者数については1997年の15万人をピークに漸減し、2010年にはその2/3の水準まで低下する。低経済成長シナリオでは、今後の経済成長率は1990年代で年2.8%、2000年代で年1.7%と推定すると、2000年には407万人の技術者需要に対して70万人の供給不足が起こり、2010年になると565万人の技術者需要に対して176万人の供給不足が起こる。研究者数（1990年で約48万人）は技術者総数の20%と見積もると、2000年には81万人の研究者需要に対して14万人の供給不足が生じ、2010年には113万人の需要に対して35万人の不足が生じる。更に、高経済成長シナリオでは今後の経済成長率が1990年代で年3.8%、2000年代で年2.7%と推定すると、2000年には498万人の技術者需要に対して160万人の供給不足が起こり、2010年になると834万人の技術者需要に対して445万人の供給不足が起こる。研究者数（1990年で約48万人）は技術者総数の20%と見積もると、2000年には100万人の研究者需要に対して32万人の供給不足が生じ、2010年には167万人の需要に対し89万人の不足が生じる。

経済成長シナリオは、これまで、その動力源である研究開発活動には必要な数の研究者が随時供給されると仮定してきた。上記の様な研究者不足(図6-2-1)を想定した場合、日本の将来の研究生産能力へのインパクトを予測することが重要となる。R&D生産関数モデルがこうした研究者数と研究費の組み合わせによる生産性の予測手段を与える。これを用いて低経済成長シナリオ及び高経済成長シナリオにおける2000年、2010年の研究生産性の予測シミュレーション(図6-2-2, -3, -4, -5)を行い、研究費が自然増で研究者不足のままの場合、研究費は自然増で研究者不足が解消した場合、研究者不足解消時と同水準の研究生産を得るために研究者不足を研究費増加で補った場合について投入産出を比較した。この結果、上記の研究者不足の状況において、研究者が十分に供給された場合と同水準の研究生産を達成するためには、2000年では1990年研究費実績に比べ低経済成長シナリオで約2.4倍、高経済成長シナリオで約3.0倍の研究費投入が必須となる。同様に、2010年にはそれぞれ約5.8倍、約8.9倍の研究費投入が必要となる。

7. まとめ

本論文は研究開発の投入／産出関係の表現にコブ・ダグラス型生産関数 $Z = C X^a Y^b$ を新たに導入し、研究開発の生産性の計量のための非線形モデルを構築した。これにより時系列分析を用いて研究開発の生産性の長期トレンドを抽出、同定し、さらに将来予測する手法の開発を試みた。

R&D生産関数モデルをマクロの国レベルからミクロの業種レベル、企業レベル、研究所レベルへと展開することが考えられるが、こうしたミクロ・レベルのデータ、即ち研究費及び研究員数の投入量、論文、特許、技術収入等の産出量の時系列的なデータは収集が容易でないため本論文ではその検討を割愛せざるを得なかったが、今後、関係方面でのこうした拡張が期待される。

生産関数という非線形モデルは前述のとおり化学平衡とアナロジーを持つことから、逆に社会科学、とりわけ、経済や経営分野の非線形な現象において「入出力関係のゲイミックスが化学平衡とのアナロジーを持つならば生産関数モデルが効力を発揮する」ものと考えられ、そうした分野での応用が大いに期待される。

[引用文献]

OECD (1991) 「OECD 科学技術指標報告」。

科学技術庁 (1993) 「科学技術白書」。

CHI社 (1992年) 「科学技術指標文献データベース」。

総務庁統計局 (1992) 「科学技術研究調査報告」。

ソロー、R. M. (1970) 「資本 成長 技術進歩」(福岡・神谷・川又訳) 竹内書店。

西川 潤 (1976) 「経済発展の理論」日本評論社。

日本技術士会(1994) 「技術者の養成・確保に関する調査II」科学技術庁委託調査報告書。

原島 鮮 (1966) 「熱力学／統計力学」培風館。

広松 毅・浪花貞夫 (1990) 「経済時系列分析」朝倉書店。

米澤 克雄(1994) 「生産関数モデルによる研究開発パフォーマンスの計測について」

科学技術政策研究所第1研究グループ調査研究資料。

表2-1. 生産関数と化学平衡のアナロジー

	生産関数	化学平衡 (質量作用の法則)
式	$Q = C K^a L^b$ a, b, c: 正の定数	化学平衡式 $aA + bB \rightleftharpoons Q$ 平衡定数 $C = Q / K^a L^b$ a, b, c: 正の定数
入力K	資本量 (機械時間で計測)	気体分子Kの濃度
入力L	労働量 (仕事時間で計測)	気体分子Lの濃度
出力Q	生産量	生成気体分子Qの濃度
係数 a:b	資本と労働の分配比	気体分子KとLの結合比
対数 lnC		混合エントロピー

図3-1. 研究開発の生産性モデル

目的: 研究開発パフォーマンスのマクロな計測

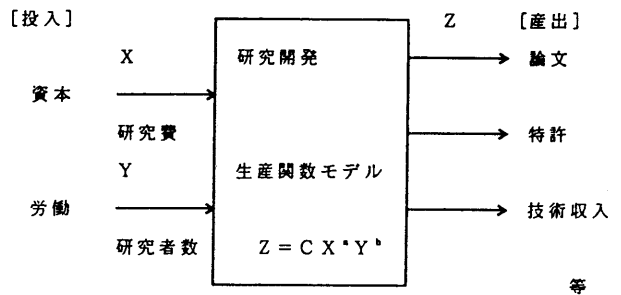


図3-3. 研究開発の成長曲線

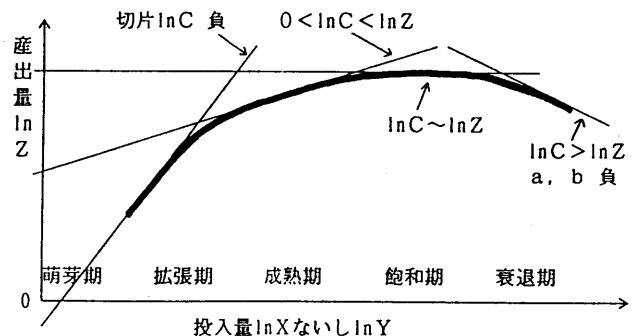


図3-4

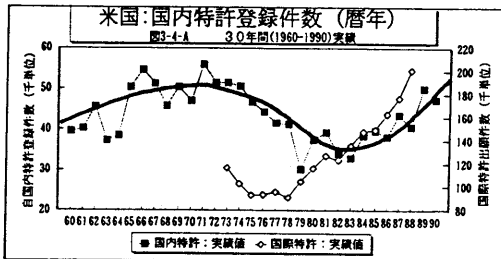


表4-1 国家レベルの生産性係数の国際比較 (国際論文)

生産関数モデル: $\ln Z_t = a \ln X + b \ln Y + \ln C$

	日本	米国	独
a (1σ値)	.393599 (.035857)	.019343 (.017060)	.131741 (.197439)
b	.466375 (.061782)	.372951 (.037463)	.247231 (.193770)
ln C	-1.13270 (.48378)	6.68343 (0.32271)	5.94884 (0.69112)
決定係数	.992	.918	.824

表4-2 国家レベルの生産性係数の国際比較 (国際特許)

生産関数モデル: $\ln Z_t = a \ln X + b \ln Y + \ln C$

	日本	米国	独
a (1σ値)	.698824 (.174239)	.354488 (.164085)	.365620 (.102414)
b	.784232 (.163852)	.430217 (.153214)	.797628 (.127881)
ln C	-6.95935 (.69754)	1.98255 (0.69695)	-1.957570 (.141201)
決定係数	.983	.948	.934

表4-3 国家レベルの生産性係数の国際比較 (技術輸出)

生産関数モデル: $\ln Z_t = a \ln X + b \ln Y + \ln C$

	日本	米国	独
a (1σ値)	.973225 (.124242)	.489640 (.038976)	.731777 (.032874)
b	.790281 (.129034)	.285187 (.047106)	.639810 (.054858)
ln C	-13.9344 (.695504)	-4.669891 (.312818)	-8.2112 (.363997)
決定係数	.975	.949	.974

表5-1 わが国の業種レベルの生産性係数の比較 (技術輸出)

生産関数モデル: $\ln Z_t = a \ln X + b \ln Y + \ln C$

	化学工業	電機機械工業
a (1σ値)	.090113 (.006789)	.891478 (.016071)
b	.982640 (.014455)	.087757 (.025775)
ln C	-1.0903 (.08617)	-3.01656 (.04912)
決定係数	.859	.968

