

<論説>

効率フロンティアの推移によるイノベーションの測定

羽田 尚子

1. はじめに

新しい製品やサービス、新しい製造方法、あるいは新しい組織の仕組みや手続きといった変化は、企業・産業の盛衰を左右し、社会や生活のあり様を一新するものである。このような変化は広く「革新（イノベーション）」と呼ばれている。技術的な変化へ焦点を定めると、この種の変化を「これまでに生み出された技術的知識をもとに、研究所や工場において機械設備・原材料・研究開発に従事する人的資本を投入し、新たな技術的知識や新たな製法・製品を生み出し、その結果として企業に高収益と生産性上昇をもたらす一連のプロセス」（若杉・谷地・和田・小和田, 1996）と解釈することができるだろう。イノベーションには、組織がより付加価値の高い製品を製造できるようになり、実質的な生産量が増加するというプロダクトイノベーションと、より少ない投入要素で同量の生産を実現できるようになるというプロセスイノベーションとの二つが含まれており、企業の研究開発活動の市場での影響を検証する際には、これらを明確に区別することもある。しかし、Tirole (1992)が記すように実際にはこれらの境界は不明瞭であるため¹、分析対象の生産性の上昇をもって技術的なイノベーションを計測する方法が一般的にとられている。生産性上昇の定量

¹プロダクトイノベーションとプロセスイノベーションとの境界に関して、Tidd, et al. (2001)は、ある企業にとっての新製品が他企業にとっては新製法となる事例や、プロダクトイノベーションとプロセスイノベーションが混在する事例を紹介している。

分析においては、観測可能なデータをもとに、対象とする産業の生産関数を推定するアプローチや、生産フロンティアを計測するアプローチがある。

生産関数を推定するアプローチは、技術的なイノベーションの定量分析において最も馴染みある手法だが、これにあたっては、生産主体の技術を定めなくてはならない。例えば Griliches and Mairesse(1990), Griliches (1998) では、自社研究開発投資や技術ライセンスを通じて組織に蓄積された技術力と、生産性との関係を検証しているが、この一連の研究においても、資本ストック、労働投入量、および技術蓄積を内生変数とする一次同時な生産技術を仮定している。またこのアプローチでは、すべての企業は常に効率的な生産計画、すなわち効率的な資源配分を実現する技術によってその生産を行うという仮定も置かれている。これゆえ推計された生産関数は、当該産業で最も効率的な生産を実現する「平均的な」生産技術を表すものとなっている。

これに対し生産フロンティアアプローチでは、観測データの中から、現状で実現できうる最も効率的な技術を計測しようとする。このアプローチでは、生産主体間の技術力の差を仮定し、効率的生産を行う主体と、非効率的な主体とが同一産業内に混在していることを許容している。産業内で最も効率的な生産を行う主体で生産フロンティアを構成し、フロンティアからの乖離をもって、非効率性を計測する分析枠組みをもつ。このため生産フロンティアアプローチによる生産性の上昇は、産業全体の技術進歩の影響と、当該主体の非効率性が改善した影響からなる (Grosskopf, 1993)。

技術的イノベーションの推計では、先に触れたように、生産関数アプローチが一般的に用いられているのだが、分析の枠組みによっては生産フロンティアアプローチが有効な場合も多い。生産フロンティアアプローチにより、生産性の分析対象に広がりが生まれたこともまた事実である。例えば、政府管理下にある企業に代表されるような利潤最大化の仮定が妥当でない生産主体や、先験的に生産技術に関して関数形を仮定するのが困難な生産主体であっても、生産フロンティアアプローチを用いることにより、生産性の検証ができるからである。

本稿は、生産フロンティアアプローチの代表的手法である DEA/MI (Data Envelopment Analysis/Malmquist index)分析の平均フロンティアシフト (FS)指数をもって、産業全体の生産性上昇、すなわちイノベーションを計測する方法論を提案するものである。本稿の構成は以下のとおりである。第二章では、生産フロンティアアプローチによる生産性の分析枠組みを確認する。第三章では、本稿で使用する DEA の概要を述べ、DEA 効率フロンティアのもとめ方を解説する。第四章では DEA 時系列分析に用いる DEA/MI 分析、生産性上昇の推移を明示化する累積指数を紹介する。第五章で平均 FS 指数を利用した産業のイノベーションの計測を提案する。第六章で本稿をまとめる。

2. 生産フロンティア分析とその代表的手法

生産フロンティアアプローチは生産関数アプローチと異なり、主体間の生産技術の差異を認め、投入と産出との関係を比較的柔軟に取り扱おうとする。図 1 の例で生産性と効率性を解説する。

生産性は、実際に観測された投入 (入力)に対してどれだけの産出 (出力)が行われたかという、入力に対する出力の比で示される。図 1 には、1 入力 1 出力の *A-F* の 6 企業が描かれている。生産関数アプローチでは、例えば図 1 の回帰直線のように、全体の平均的な傾向をとらえようとする。これに対し、生産フロンティアアプローチでは技術の差異を折り込み、生産主体間の比較により、効率的であるか、非効率であるかを判断しようとする (中島, 2001)。例えば企業 *D* は、入力 *RD* に対して *OR* を出力 (生産)する企業と解釈できる。一方、企業 *B* は同じ出力をするのに、より大きい入力 *RB* を要する非効率な活動を行っている。このような非効率性を折り込むと、企業 *B* の生産性 (*OR/RB*)は、出力 *OR* を実現する最大の生産性 (*OR/RD*)と、同じ出力を実現する最小の入力からの乖離 (*RD/RB*)により構成されている。すなわち生産性は

$$\frac{\text{実際の出力}}{\text{実際の入力}} = \frac{\text{実現可能な最小の入力}}{\text{実際の入力}} \times \frac{\text{実際の出力}}{\text{実現可能な最小の入力}} \quad (1)$$

のように表記される。右辺第二項は、同じ出力を得るために、現状で技術的に

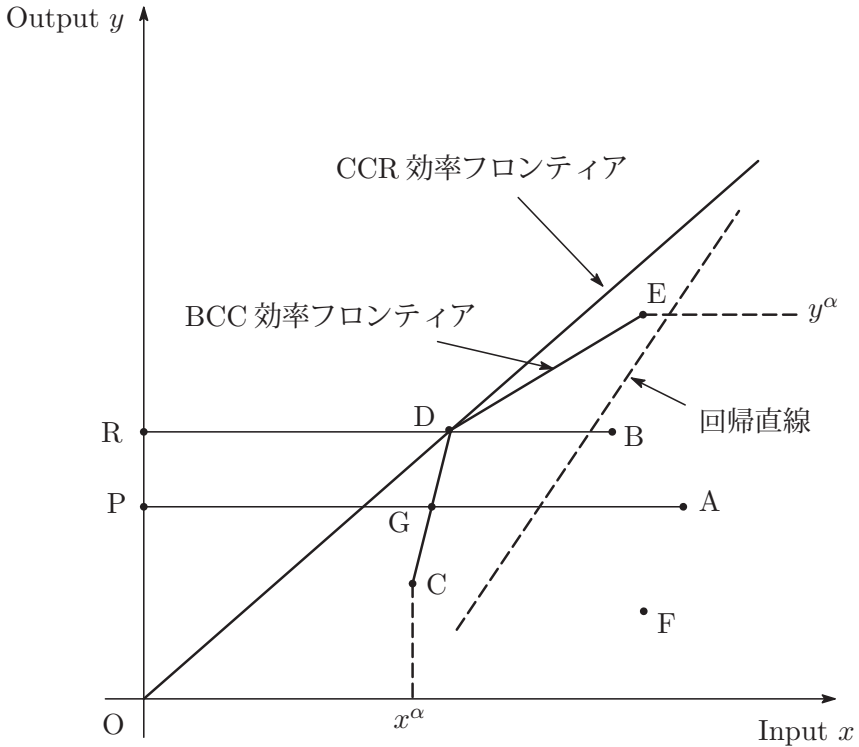


図 1 : DEA 効率と効率フロンティア

実現可能な最大の生産性を表している。これは当該産業で最も効率的な生産技術であり、現状ではこれ以上の効率性が見込めないという意味で「生産フロンティア」と呼ばれている。生産フロンティアは、同じ出力を実現する最小の入力を表しているため、実際の入力が小さくなる程、生産フロンティアへと近づくことができる。従って、右辺第一項は効率性の指標、すなわち（入力で測った）生産フロンティアからの乖離を表している。

生産性の上昇はその異時点間の推移であり、時系列的にみて、より小さい入力により大きい出力が得られた時、生産性の上昇があったとみなされる。(1)をその上昇率に書き換えれば

生産性の上昇＝技術非効率の改善×実現可能な最大効率の推移 (2)

となり、生産フロンティアアプローチでは、当該主体の技術非効率の改善（フロンティアへの接近）と産業全体の技術進歩（生産フロンティアのシフト）によって、生産性の上昇がおけると解釈するのである。

このように生産フロンティアアプローチでは、フロンティアを検出し、そのフロンティアからの乖離で非効率性を評価する分析枠組みをとる。この代表的な分析手法としては、確率フロンティア分析（Stochastic Frontier Analysis: SFA）(Coelli et al., 1998)と、包絡線分析（Data Envelopment Analysis: DEA）(例えば Cooper et al., 2000, 刀根, 1993)がある。

生産フロンティアを用いる点では、SFA および DEA の基本的な考え方は共通しているが、フロンティアの検出方法は異なっている。大きな相違点は、分析手法そのものの違いと、そこから生じる多入出力評価の違いである²。SFA はいわゆるパラメトリックな分析手法であり、生産フロンティアは確率的に変動するものとして推計をする。このため、生産技術に関して特定の関数形を仮定する必要があり、また、非効率性の分布についても、その形状に一定の仮定を置かなくてはならない。これに対し DEA は、生産技術や主体間の非効率性分布に関して先験的な制約を置く必要のないノンパラメトリックな数理計画手法である。SFA のように出力項目を一つに定める必要がないので、多入力、多出力をもつ対象の非効率性をも簡潔に検証することができる。このようなノンパラメトリックな手法ゆえ、生産性の検証に DEA を適用した先行研究は数多く存在する。例えば Färe et al. (1994)は、OECD17 カ国の 1979-1988 年のデータを利用した生産性の国際比較を行い、日本の生産性が他国より総じて高いことを示している。González and Gascón (2004)は、知的財産制度の変更など、競争環境が大きく変化した 1990 年代のスペインを対象に、製薬企業 80 社の個票データを使って生産性の推移を計測している。この分析では企業規模別の

² SFA と DEA の利点と限界は、例えば服部 (1999), Kumbhakar and Lovell (2003) を参照。

検証も行われており、90年代の製薬企業をとりまく環境の変化は、特に小規模企業の生産性に大きく影響していたという結論を得ている。

次章では、DEAの基本的な考え方を解説し、BCC (Banker-Charnes-Cooper) モデルの生産フロンティアを計測する。

3. DEAの生産フロンティア

DEAでは、複数の入出力を持つ分析対象 (Decision-Making Unit: DMU) の相対効率評価を行うことができる。一般的に、入力に対する出力の比をもって効率性を計測するが、入出力が複数になる場合、どのように効率性を評価すべきか、適切な評価指標を考える必要性が生じるはずである。例えば、 m 個の入力 x_{ij} ($i = 1, \dots, m$) と、 t 個の出力 y_{rj} ($r = 1, \dots, t$) を持つ n 個の DMU j ($j = 1, \dots, n$) の効率性を測定しようとする、複数の入出力をそれぞれ単一の仮想入力値と仮想出力値へと変換しなくてはならない。この時、一般的によく用いられるのが、加重和をとる方法である。すなわち

$$\text{efficiency} = \frac{\sum_{r=1}^t u_r y_{rj_0}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij_0}} \quad (3)$$

で与えられるように、入力ベクトルのウエイト v_i と出力ベクトルのウエイト u_r をもとめ、その比率を効率性の測定指標にする。加重和を確定するために、通常効率性の分析では、すべての DMU に共通した固定ウエイトを使用する。しかし入出力ウエイトを固定してしまうと、平均的に入力が少なく、平均的に出力が多い DMU が高く評価されるという問題が生じてしまう。

これに対し DEA は、複数の入出力の各ウエイトを、各 DMU にとって最も有利になるようにモデル内で決定する。評価対象の DMU を DMU j_0 と書くと、すべての DMU j の効率性を 1 以下に抑えながら、DMU j_0 の効率性を最大にするように、入出力ベクトルの各ウエイトを、次のような分数計画問題でもとめる。これにより、DMU j_0 の効率性を評価するのである。

$$\begin{aligned}
 & \text{Maximize} && g_{j_0} = \frac{\sum_{r=1}^t u_r y_{rj_0}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij_0}} \\
 & \text{subject to} && \frac{\sum_{r=1}^t u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \leq 1, \quad j = 1, \dots, n, \\
 & && u_r, v_i \geq 0, \quad r = 1, \dots, t, i = 1, \dots, m.
 \end{aligned} \tag{4}$$

(4)の分数計画問題で得た評価ウエイトを用いることにより、DMU j_0 以外のすべての DMU j の DEA 効率値をもとめていく。すなわち上記分数計画問題を、各 DMU を順に j_0 として n 回解くことにより、各 DMU にとって最も有利になるようなウエイトで、DMU j_0 の相対効率評価を行うことができるのである。(4)の目的関数 g_{j_0} は、当該 DMU が他の DMU j よりも相対的に効率的であると判断される場合には $g_{j_0} = 1$ となる。一方、 $g_{j_0} < 1$ と評価された場合は、当該 DMU にとって最も有利なウエイトで評価をしたとしても、それを上回る DMU が存在していることを意味するので、DMU j_0 は非効率と判断されるのである。すなわち (4)での評価は、各 DMU にとって自身に最も有利なウエイトによる相対評価であり、DEA 効率的と判断される DMU は一つではなく、多数の場合が一般的である。

本稿では、下記の BCC 入力指向包絡形式と呼ばれるモデル (Banker et al., 1984)により、各 DMU の効率性を評価する。具体的には、次のような線形計画問題を解く。

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize} && g_{j_0} = \theta_{BCC} \\
 & \text{subject to} && \sum_{j=1}^n \lambda_j y_j \geq y_{j_0}, \\
 & && \sum_{j=1}^n \lambda_j x_j - \theta_{BCC} x_{j_0} \leq 0, \\
 & && \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1, \\
 & && \lambda_j \geq 0, \quad j = 1, \dots, n, \\
 & && (\theta \text{ unconstrained}).
 \end{aligned} \tag{5}$$

θ_{BCC} および λ_j は、線形計画問題の目的関数である。考え方は (4) の分数計画問題と同じである。すなわち (5) 式を、各 DMU を順に j_0 として n 回解くことにより、各 DMU に最も有利な評価ウエイトで DMU j_0 の効率性を評価するのである。こうして得られた DEA 効率値 ($g_{j_0}(=\theta_{BCC})=1$) の DMU は効率率的、($g_{j_0}(=\theta_{BCC})<1$) の DMU は非効率率的と判定されるのである。

DEA モデルの効率フロンティアは、観測データ内で相対的に最も効率的な DMU を結んだ線分で表される。再び図 1 のモデルデータを使い、BCC モデルの効率フロンティアをもとめてみよう。図 1 の例では、DMU C, D, E が効率率的である。 $x^\alpha CDEy^\alpha$ を結んだ線分の左上側には DMU は存在していない。つまりこの線分上にある点より小さな入力で、より大きな出力を行う DMU は存在せず、これらの点は相対的に最も効率率的である。この状態を DEA 効率率的といい、線分 $x^\alpha CDEy^\alpha$ 上にあることが効率的 DMU の条件になる。そこで、この線分 $x^\alpha CDEy^\alpha$ を最も効率的な境界であるという意味で、DEA 効率フロンティアと呼ぶ。DEA を適用した生産性の分析においては、DEA 効率フロンティアは (DEA 評価で) 最も効率的な生産を表すことになり、生産フロンティアと同概念である。

DEA は、効率フロンティアからの乖離によって非効率性を計測するという分析枠組みをとる。図 1 の DMU A を例に非効率性を解説する。BCC モデルの効率フロンティアは、線分 $x^\alpha CDEy^\alpha$ であるから、出力 OP を実現する最小の入力は、効率フロンティア上 G の入力 PG である。 G は観測されていないが、DMU C と D が観測されているため、 G は存在可能とみなす。DMU A は、 G と同じ出力を出すためには入力 PA を必要とし、入力で計測した場合の DMU A の DEA 効率値は PG/PA である。これは 1 より小であることから、DMU A は非効率と判断されるのである。

尚、(5) の制約式から

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \quad (6)$$

を除いた数理計画問題が、(4)の分数計画問題を包絡形式に書き直した CCR (Charnes-Cooper-Rhodes) 入力指向包絡形式と呼ばれるモデル (Charnes et al., 1978) である。これを分析対象の各 DMU について最適化したものが CCR 入力指向で評価した時の DEA 効率値である。図 1 の例では、CCR モデルの効率フロンティアは、原点と DMU D を結んだ半直線になる。

4. DEA 時系列分析の一手法：DEA/MI 分析

ある主体の生産性の上昇は、異時点間の生産性の推移をもって計測される。DEA の分析枠組みにあてはめると、DEA 効率値の異時点間の推移が生産性の上昇に該当する。DMU の評価時点が変わっても、各年の効率フロンティアが全く変化しないのであれば、当該 DMU の各年の DEA 効率値をもとめ、その変化を計測することによって生産性の上昇を測ることができる。しかし評価の時点が異なれば、各年で最も効率的な DMU も変わるはずであり、各年の効率フロンティアも同様に変化するはずである。このような年毎の効率フロンティアの動きを考慮した DEA 時系列分析として、DEA/MI 分析がある。DEA/MI 分析は、DEA の分析フレームに Malmquist (productivity) index (Malmquist, 1953, Caves et al., 1982) を適用したものであり、年毎の効率フロンティアの推移を考慮した DEA 効率値の二時点間の推移比率をもとめる分析手法である (Färe et al., 1994, Thanassoulis, 2001)。

図 2 を例に、BCC モデルで DMU j_0 の DEA/MI 指数をもとめてみよう。DMU j_0 は、時点 $[\alpha, \beta]$ 間で推移し、 A は時点 α での DMU j_0 の位置、 A' は時点 β での位置である。時点 α の効率フロンティアは $x^\alpha CDEy^\alpha$ 、時点 β の効率フロンティアは $x^\beta C'HD'y^\beta$ である。 $[\alpha, \beta]$ で効率フロンティアは動いているので、DMU j_0 の DEA 効率値の推移は、次のような幾何平均でもとめられる。

$$MI_{j_0}[\alpha, \beta] \equiv \left(\frac{QH/QA'}{PG/PA} \cdot \frac{QJ/QA'}{PI/PA} \right)^{1/2} \quad (7)$$

すなわち、DMU j_0 の DEA 効率値の二時点間の推移比率により、 $[\alpha, \beta]$ の効率の変化を計測している。 $MI > 1$ であれば、DMU j_0 は $[\alpha, \beta]$ で DEA 効率が向上し、 $MI = 1$ であれば変化なし、 $MI < 1$ であれば低下したことを意味している。

また (7) 式は、次のように分解することができる。

$$MI_{j_0}[\alpha, \beta] = \frac{QJ/QA'}{PG/PA} \times \left(\frac{PG}{PI} \cdot \frac{QH}{QJ} \right)^{1/2} . \quad (8)$$

(8) 式の右辺第一項は、各年の効率フロンティアに対する DMU j_0 の DEA 効率値の比であり、DMU j_0 の効率フロンティアからの距離が $[\alpha, \beta]$ で如何に変化したかを示している。第二項は、DMU j_0 から見た $[\alpha, \beta]$ の効率フロンティア

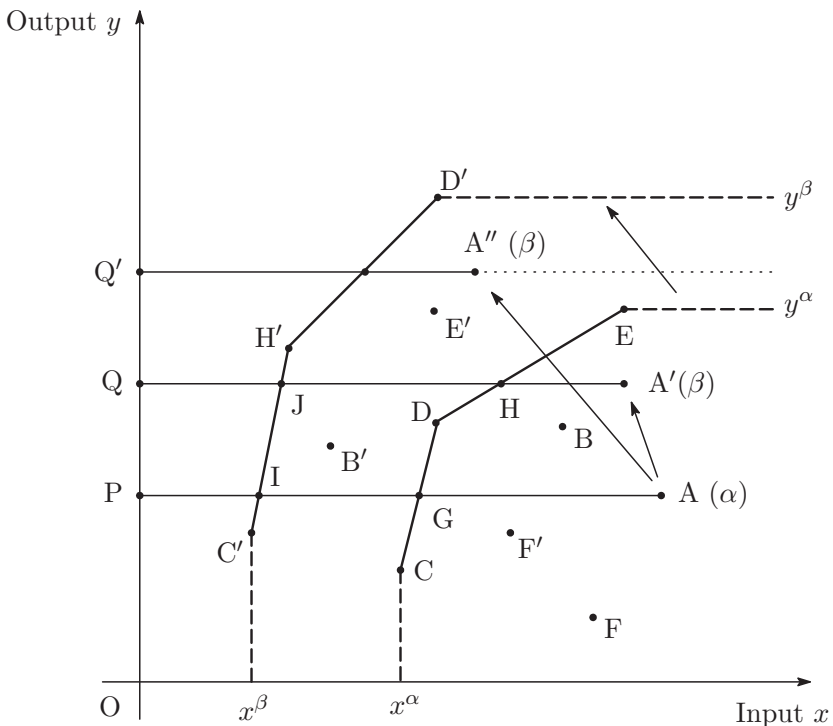


図 2：効率フロンティアシフトを考慮した DEA 効率の推移

アの推移を表すものである。それぞれ catch-up 指数、frontier shift 指数と呼ばれている。catch-up 指数を CU , frontier shift 指数を FS と書けば、 $[\alpha, \beta]$ の DMU j_0 の MI 指数は

$$MI_{j_0}[\alpha, \beta] = \frac{QJ/QA'}{PG/PA} \times \left(\frac{PG}{PI} \cdot \frac{QH}{QJ} \right)^{1/2} \quad (9)$$

$$= CU_{j_0}[\alpha, \beta] \times FS_{j_0}[\alpha, \beta] \quad (10)$$

$$= \frac{QJ/QA'}{PG/PA} \times \left(\frac{PG/PA}{PI/PA} \cdot \frac{QH/QA'}{QJ/QA'} \right)^{1/2}, \quad (11)$$

のように置き換えることができる。 $CU > 1$ であれば、DMU j_0 が $[\alpha, \beta]$ でより効率フロンティアに近づいたことを意味する。 $CU = 1$ なら変化なし、 $CU < 1$ であれば、効率フロンティアから離れたことになる。同様に $FS > 1$ であれば、 j_0 から見た効率フロンティアが、 $[\alpha, \beta]$ で上方向にシフトした（効率がよくなった）ことを意味する。 $FS = 1$ であれば変化なし、 $FS < 1$ であれば、効率フロンティアが下方向にシフトした（効率が悪くなった）ことになる。

図 2 の PI/PA は、 β 時点の BCC フロンティアで測った時点 α の DMU j_0 の効率値 (θ_{BCC}) である。これを $\theta_{BCC}[D^\alpha, F^\beta]$ と表記すると、(11) 式は次のような定式化ができる。

$$MI_{j_0}[\alpha, \beta] = \frac{\theta_{BCC}[D^\beta, F^\beta]}{\theta_{BCC}[D^\alpha, F^\alpha]} \times \left(\frac{\theta_{BCC}[D^\alpha, F^\alpha]}{\theta_{BCC}[D^\alpha, F^\beta]} \cdot \frac{\theta_{BCC}[D^\beta, F^\alpha]}{\theta_{BCC}[D^\beta, F^\beta]} \right)^{1/2} \quad (12)$$

(5) 式で $x_j^\alpha, y_j^\alpha = x_j, y_j$ とすれば、次の線形計画問題を解くことにより、時点 α の $\theta_{BCC}[D^\alpha, F^\alpha]$ をもとめることができる。

$$\begin{aligned} & \text{Minimize} && \theta_{BCC} \\ & \text{subject to} && \sum_{j=1}^n \lambda_j y_j^\alpha \geq y_{j_0}^\alpha, \\ & && \sum_{j=1}^n \lambda_j x_j^\alpha - \theta_{BCC} x_{j_0}^\alpha \leq 0, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \lambda_j &= 1, \\ \lambda_j &\geq 0, \quad j, \dots, n, \\ (\theta &\text{ unconstrained}). \end{aligned}$$

(12)式の $\theta_{BCC} [D^\beta, F^\beta]$ は、(13)の線形計画問題を α を β に置き換えて解けばよい。 $\theta_{BCC} [D^\alpha, F^\beta]$ は

$$\begin{aligned} &\text{Minimize} && \theta_{BCC} \\ &\text{subject to} && \sum_{j=1}^n \lambda_j y_j^\beta \geq y_{j_0}^\alpha, \\ &&& \sum_{j=1}^n \lambda_j x_j^\beta - \theta_{BCC} x_{j_0}^\alpha \leq 0, \\ &&& \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1, \\ &&& \lambda_j \geq 0, \quad j, \dots, n, \\ &&& (\theta \text{ unconstrained}), \end{aligned} \tag{14}$$

の線形計画問題を解くことで得られるが、これは DEA/X (DEA exclusion) モデル (Andersen and Petersen, 1993) と呼ばれるモデルである³。 α と β を入れ替えて (14)式を解けば、 $\theta_{BCC} [D^\beta, F^\alpha]$ もとめることができる。

(9)式を (11)式へと置き換え、(13)、(14)式の線形計画問題に対象データを適用することにより、DMU j_0 の $[\alpha, \beta]$ における MI 指数、CU 指数、FS 指数が計算でき、ここでは各々を $MI_{j_0} [\alpha, \beta]$ 、 $CU_{j_0} [\alpha, \beta]$ 、 $FS_{j_0} [\alpha, \beta]$ と表記する。通常、各指数は対前年で計算するが、本稿のイノベーションの計測では、起点からの生産性の推移の明示化の為、Hashimoto and Haneda (2008)の累積指数を使用する。累積指数は基準とする時点を決め、そこを起点としたある時点まで

³ DEA/X モデルは、相対評価の対象から DMU j_0 (自分自身)を除外する。これにより、 j_0 (自分自身)についてのみ上限が 1 とならない。

の累積変化を測定するものである。具体的には、(10)式の分析対象期間初年度を常に起点 α に、 β を起点から一年毎にずらした二時点間の MI, CU, FS を算出している。

累積推移をみるために、従来は $MI[\alpha, \beta] = MI[\alpha, \alpha+1] \times MI[\alpha+1, \alpha+2] \times \dots \times MI[\alpha+n, \beta]$ の sequential product を用いて計測していたが、それは Färe et al. (1994) の云う circular test, $MI_{j_0}[\alpha, \alpha+1] \times MI_{j_0}[\alpha+1, \alpha+2] = MI_{j_0}[\alpha, \alpha+2]$ を満たさず、正確な累積推移をもとめられない。これを解決するために、Hashimoto and Haneda (2008) の累積指数では、sequential product を使わずに直接計算する方法がとられており、累積推移を正確にもとめることができる。

BCC モデルで MI 指数を計算する際、注意しなければならないのは、各年の効率フロンティアに対する DMU の位置によっては、非有界な解をもつ場合が起こり得ることである。図 2 の A'' を例に解説をする。 A は α 時点の DMU j_0 の位置、 A'' は β 時点での位置である。この例では、 A'' の α 時点の効率フロンティア $x^\alpha CDEy^\alpha$ に対する (14) の解が上記に相当し、これゆえ $[\alpha, \beta]$ の DMU j_0 の MI 指数は計算できない。González and Gascón (2004), Coelli et al. (1998) に、この問題の解決法が紹介されている。すなわち、(14) が非有界な解をもつ DMU を評価対象から除く方法、BCC 出力指向モデルの DEA 効率値で代用する方法、1 で代用する方法である。CCR モデルではこの問題は起こらないので、分析の枠組みに問題がないという前提をクリアできるのであれば、CCR モデルの効率フロンティアで DEA/MI 分析を行うことが好ましいと考える。

5. 平均 FS 指数とイノベーション

生産フロンティアアプローチによる生産性の上昇は (2) のようになり、これを DEA の分析枠組みで表現したものが DEA/MI 指数である。(9)式から読み取れるように、DEA/MI 分析で得られた DMU j_0 の MI_{j_0} 指数および CU_{j_0} 指数は、DMU j_0 の動きを表している。一方 FS_{j_0} 指数は、効率フロンティアの動きを DMU j_0 からみたものである。各年の効率フロンティアは、当該年の最も効

率的な DMU で構成されており、必ずしも j_0 自身が含まれているとは限らない。すなわち効率フロンティアは個々の DMU のものではなく、分析対象全体からなるものと解釈できる。従って、分析対象を任意の産業に属する企業に定めるのであれば、効率フロンティアは産業全体で実現しうる最大の生産性（生産技術）を表すものとなり、そのシフトは、当該産業の生産技術の変化、すなわちイノベーションを表すはずである。このことから、二時点間の DEA 効率値の変化（生産性の上昇）は、キャッチアップ（当該 DMU の非効率の改善）と、効率フロンティアのシフト（産業全体のイノベーション）からなる。

しかし FS_{j_0} は、効率フロンティアの動きを DMU j_0 から見たものであり、その動きの観測点である DMU j_0 が異なれば、FS 指数の数値も各 DMU ごとに異なるはずである。このため本稿では、FS 指数の平均値をもとめる方法論を提唱する。FS 指数の平均（幾何平均）は、効率フロンティアの推移を、当該産業の平均的な企業から見たものと解釈することができる。これゆえ DEA/MI 分析の平均 FS 指数をもって、当該産業のイノベーションを計測できると考える。

平均 FS 指数により産業のイノベーションを計測している先行研究として、Hashimoto and Haneda (2008) がある。この研究は、日本の大手製薬企業 9 社を対象に、1991-2001 年の研究開発効率性の推移を DEA/MI 分析で計測している。ここでの平均 FS 指数は、平均的な企業からみた製薬産業全体のイノベーションを指すものであり、この数値をグラフ化することによって、製薬産業の効率性が、分析対象期間で単調に低下傾向にあったことを明示化している。また、Haneda et al. (2009) では、茨城県の 92 市町村を対象に、1979-2004 年の行政サービスの生産性分析を行っている。茨城県では分析対象期間で 17 回の合併があり、合併をはさんだ行政サービス効率が如何に推移していたか、合併年次を起点とした累積指数による明示化を試みている。また、合併市町村、非合併市町村別の平均 FS 指数により、当該の平均的な市町村から見た行政サービスの生産性推移も計測している。その結果、合併市町村の生産性の低下の方が緩やかであるという結論を得ている。

6. むすび

本稿では、生産フロンティアアプローチによるイノベーションの計測方法を考察した。生産フロンティアアプローチでは、フロンティアを検出し、フロンティアからの乖離で非効率を計測する。フロンティアの検出方法としては、ノンパラメトリックな手法である DEA BCC モデルを紹介した。DEA 効率フロンティアは、分析対象とする産業で相対的に最も効率的な DMU で構成されるものであり、産業全体で実現できる最大の生産性を示すものである。これゆえ DEA 効率フロンティアの推移は、生産性の推移、すなわち当該産業のイノベーションを表すことになり、DEA の枠組みでは、DEA/MI 分析の FS 指数で表現できる。本稿では起点 α を常に定点（分析対象期間初年度）に、 β を起点から 1 年毎にずらした二時点間の $MI[\alpha, \beta]$ 、 $CU[\alpha, \beta]$ 、 $FS[\alpha, \beta]$ を算出し、 $FS[\alpha, \beta]$ の平均値をもって、産業の平均的な生産主体から見たイノベーションを計測する方法論を提唱した。

本稿で紹介した DEA は、生産性分析の代表的な手法である。DEA では、DMU が複数の入力をいかに効率よく複数の出力へ変換しているかをみており、他と比較して少入力で多出力を産出する DMU が相対的に効率的とみなされるのである。しかし数学的には、DEA の入力と出力との間には、生産におけるような有機的な関係があることは必ずしも要求されていない。そこで入力を値が小さいほど望ましい評価項目、出力を値が大きいほど望ましい評価項目に置き換えて考えれば、DEA によりそれらの項目の多次元評価ができるはずである。Hashimoto and Ishikawa (1993) はこのような分析アプローチを「非画一的評価法」と呼び、QOL (Quality of Life) の推移測定 (Hashimoto et al., 2009) や国家の安定性の推移測定 (Tsuneyoshi et al., 2009) に適用している。非画一的評価法は DEA の適用範囲を広げ、様々な分野への適用を可能とする。DEA の適用範囲がさらに広がることを期待し、本稿の結びとしたい。

参考文献

- Andersen, P., Petersen, N.C., 1993. A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis. *Management Science* 39(10), 1261-1264.
- Banker, R. D., Charnes, A., Cooper, W.W., 1984. Some models for estimating technical and scale efficiencies in data envelopment analysis. *Management Science* 30(9), 1978-1092.
- Caves, D. W., Christensen, L. R., Diewert, W. E., 1982. Multilateral comparisons of output, input, and productivity using superlative index numbers. *Economic Journal* 92(365), 73-86.
- Charnes, A., Cooper, W. W., Rhodes, E., 1978. Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research* 2, 429-444.
- Coelli, T., Rao, D. S. P., Battese, G. E., 1998. *An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis*. Kluwer Academic Publisher.
- Cooper, W. W., Seiford, L. M., Tone, K., 2000. *Data Envelopment Analysis: A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software*. Kluwer Academic Publisher.
- Färe, R., Grosskopf, S., Norris, M., Zhang, Z., 1994. Productivity growth, technical progress, and efficiency change in industrialized countries. *American Economic Review* 84(1), 66-83.
- González, E., Gascón, F., 2004. Sources of productivity growth in the Spanish pharmaceutical industry (1994-2000). *Research Policy* 33, 735-745.
- Griliches, Z., Mariesse, J., 1990. *R&D and Productivity Growth: Comparing Japanese and US manufacturing Firms, Productivity Growth in Japan and United States*. University of Chicago Press.
- Griliches, Z., 1998. *R&D and productivity: the Econometric Evidence*. University of Chicago Press.
- Grosskopf, S., 1993. *Efficiency and productivity*. Oxford University Press.
- Kumbhakar, S. S., Lovell, C. A. K., 2003. *Stochastic Frontier Analysis*. Cambridge University Press.
- Haneda, S., Hashimoto, A., Tsuneyoshi, T., 2009. Evaluating administrative efficiency change in the post-merger period: A study on Ibaraki prefecture (1979-2004). *Dept. Social Syst.*

Mgmt Discussion Ppr Ser. 1233, Univ. Tsukuba.

Hashimoto, A., Ishikawa, H., 1993. Using DEA to evaluate the state of society as measured by multiple social indicators. *Socio-Economic Planning Sciences* 27(4), 257-268.

Hashimoto, A., Haneda, S., 2008. Measuring the change in R&D efficiency of the Japanese pharmaceutical industry. *Research Policy* 37(10), 1829-1836.

Hashimoto, A., Sugita, T., and Haneda, S., 2009. Evaluating shifts in Japan's quality-of-life. *Socio-Economic Planning Sciences* 43(4), 263-273.

服部徹, 1999. 確率的フロンティア分析による日米電気事業の生産性比較. 電力中央研究所報告書 Y99014.

Malmquist, S., 1953. Index numbers and indifference surfaces. *Trabajos de Estadistica* 4, 209-242.

中島隆信, 2001. 日本経済の生産性分析. 日本経済新聞社.

Thanassoulis, E., 2001. *Introduction to the Theory and Application of Data Envelopment Analysis: A Foundation Text with Integrated Software*. Kluwer Academic Publisher.

Tidd, J., Bessant, J., Pavitt, K., 2001. *Managing Innovation: Integrating Technological Market and Organizational Change*. John Wiley & Sons Ltd.

Tirole, J., 1992. *The Theory of Industrial Organization*. MIT press.

刀根薫, 1993. 経営効率性の測定と改善: 包絡分析法 DEA による. 日科技連出版社.

Tsuneyoshi, S., Hashimoto, A., Haneda, S., 2009. Quantitative evaluation of nation stability. Dept. Social Syst. Mgmt Discussion Ppr Ser. 1245, Univ. Tsukuba.

若杉隆平・谷地正人・和田義和・小和田文彦, 1996. 技術革新と規模の経済一つの謎. 研究シリーズ 30. 通商産業省商業研究所.