

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20530179

研究課題名(和文)

効率性分析の応用による環境負荷要因を考慮した経済成果指標の開発

研究課題名(英文)

An application of efficiency analysis to index of economic performance with environmental load factors

研究代表者：

根本 二郎(NEMOTO JIRO)

名古屋大学・経済学研究科・教授

研究者番号：20180705

研究成果の概要(和文)：本研究では全要素生産性の計測において、環境負荷要因を考慮する方法について研究した。このため、環境負荷要因の排出を望ましくないアウトプットとみなし、所与のインプットの下で生産可能な望ましいアウトプットと抑制可能な望ましくないアウトプットの間の技術的関係をモデル化した。このモデルを用いれば、環境負荷要因の存在を考慮した Hicks-Moorsteen-Bjurek 生産性指数を計測できる。こうした方法の有用性を示すため、わが国電気事業のデータによる実証研究を行い、環境負荷を調整した全要素生産性と SO₂、CO₂ のシャドー価格を計測した。本研究で開発した方法はまた、環境負荷要因が存在する場合の規模の経済性、範囲の経済性の検証にも応用することができる。

研究成果の概要(英文)：This study explores the method which allows the presence of environmental load factors in measuring the total factor productivity. For this end, treating environmental load factors as undesirable outputs, we model the technological relationship between producible desirable outputs and controllable undesirable outputs given inputs. This model is then utilized to measure the Hicks-Moorsteen-Bjurek productivity index extended by environmental load factors. The proposed procedure is applied to analyzing real data on the Japanese electric utility firms and the total factor productivity with environmental load factors and the shadow values of SO₂ and CO₂ are measured. This procedure is also applicable to testing scale and scope economies when environmental load factors exist.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
総計	1,900,000	570,000	2,470,000

研究分野：応用計量経済学

科研費の分科・細目：経済統計学

キーワード：全要素生産性、効率性、生産性指数、環境負荷要因、距離関数

1. 研究開始当初の背景

(1) 生産性は基本的にインプットから生産されるアウトプットの量によって測られる。しかし比較的最近まで、副産物として排出される環境負荷物質について考慮されること

はなかった。所与のインプットの下で得られるアウトプットが同じでも、環境負荷物質の排出量に違いがある場合は、生産性を同じと考えることはできない。排出量の削減にはコストがかかることを考慮すれば、排出量が多

いほど生産性はその分だけ低く評価されるべきである。これを行うための方法として、環境負荷要因を望ましくないアウトプットとみなして拡張された生産可能フロンティアが、良く知られるようになってきている。ただしその応用はデータ包絡分析 (DEA) による効率性分析にほぼ限られており、環境負荷の削減費用を考慮することで変形した生産フロンティアまでの距離を測ることで効率性の分析が行われている。しかし環境負荷の影響は効率性だけでなく技術進歩や規模効果にも及ぶはずであり、それらへの影響を総合して全要素生産性の水準にはんえいされる。したがって、全要素生産性の計測において環境負荷要因を調整することが重要であるはずだが、この方面の研究は進んでいない。

(2) 一方、生産性分析においては内外ともに Malmquist 生産性指数を用いた研究が盛んに行われている。Malmquist 生産性指数は計算が比較的容易であることから多用されているが、少なくとも理論的には、平均費用に極小点が存在しない場合、つまり大域的に収穫逓増あるいは逓減の場合には規模効果を計測できないという難点がある。これに対して、本研究の研究代表者らの以前の研究 [Nemoto and Goto (2005), *J. of Japanese Int. Economies* 19, 617-634.] で提案された Hicks-Moorsteen-Bjurek 生産性指数は生産技術の性質にかかわらず適用可能であり、その定義も Malmquist アウトプット指数の Malmquist インプット指数に対する比率という直観的に理解の容易な形式である。環境負荷要因による全要素生産性の拡張を試みるのであれば、Hicks-Moorsteen-Bjurek 指数の利用を広く提案することに十分な理由がある。

(3) CO₂ や SO₂ などの環境負荷物質については、環境税の課税や排出権の取引によって排出量を効率的に抑制することが、各国において政策の選択肢として検討され、一部は採用・実施されている。こうした制度の設計、あるいはその効果の評価にあたっては、環境負荷のシャドー価格 (排出の削減にかかる限界費用) を知ることが非常に重要である。環境負荷要因を考慮した生産性の計測のためには、望ましくないアウトプットを含む生産可能フロンティアを推定することが必要であるが、ひとたび生産可能フロンティアが得られれば望ましくないアウトプットのシャドー価格を計測することは可能である。シャドー価格の計測は、ごく最近の研究において試みられるようになってきているが、わが国の生産者を対象として行われた研究は報告されていない。

(4) 以上の環境負荷要因を考慮した生産性分析の方法はまた、規模の経済性、範囲の経済性の新しい検証方法を提供する可能性を有する。規模の経済性、範囲の経済性の分析については、市場競争になじまない公共財供給産業 (典型的な例としては教育) において、資本コストのような費用データの信頼性が大きな問題となっている。最近、わが国において大学の経営問題が懸案となっていることから、大学の範囲の経済性のテストがしばしば行われているが、資本コストのデータ作成に困難がある。環境負荷要因として望ましくないアウトプットを導入する距離関数の方法は、費用データを一切用いずインプットとアウトプットの数量データのみから規模の経済性、範囲の経済性をテストする方法に応用できる。

2. 研究の目的

本研究の目的は以下の三点に集約される。

(1) 環境負荷要因を望ましくないアウトプットとした場合の生産可能集合のパラメトリックな表現としてハイパーボリックな距離関数を採用し、これに基づいて Hicks-Moorsteen-Bjurek 生産性指数による環境生産性指数を定義する。同時に環境負荷要因のシャドー価格の計測方法を示す。

(2) ハイパーボリック距離関数から、規模の経済性、範囲の経済性をテストする方法を開発する。

(3) (1) について、わが国 9 電気事業者の実データを用いて実証研究を行い、本研究で提案する一連の方法の有用性を示す。また (2) について、私立大学のデータによる実証研究を行う。

3. 研究の方法

(1) ハイパーボリック距離関数

環境負荷要因を考慮した生産可能フロンティアをハイパーボリック距離関数によって定式化する。ハイパーボリック距離関数は 2009 年に Cuesta, Lovell and Zofio, *Ecol. Econ.* 68, 2232-2242. によって導入された。本研究で採用する生産可能フロンティアについては、基本的に彼らの方法を踏襲する。

時点 t において、望ましいアウトプットを y^t 、望ましくないアウトプットを b^t 、インプットを x^t とする。時点 t で技術的に可能なすべての (x^t, y^t, b^t) からなる集合を生産可能集合 Ω^t とする。 Ω^t は望ましくないアウトプットを減らすのにかかるコストを反映して次の三条件を満たす。

- i) $(x, y, b) \in \Omega^t$ ならば
 $(\bar{x}, y, b) \in \Omega^t$ for $\bar{x} \geq x$

- ii) $(x, y, b) \in \Omega^t$ ならば
 $(x, \bar{y}, b) \in \Omega^t$ for $\bar{y} \leq y$
 iii) $(x, y, b) \in \Omega^t$ ならば
 $(x, y, \bar{b}) \in \Omega^t$ for $\bar{b} \geq b$

ハイパーボリック距離関数は次のように定義される。

$$D_H^t(x, y, b) = \min \left\{ \delta \mid (x, y/\delta, b\delta) \in \Omega^t \right\} \quad (1)$$

D_H^t は x の非増加関数、 y の非減少関数、 b の非増加関数で、 (y, b) に関して (1, -1) 次の almost homogeneous 関数である。定義より $(x, y, b) \in \Omega^t$ ならば $D_H^t \leq 1$ 、そうでないならば $D_H^t > 1$ である。

本研究では、 $\ln D_H^t$ をトランスログ型で特定化してパラメータを推定する。推定に使用するデータは当然 Ω^t の要素だから、 D_H^t はその近傍で $D_H^t \leq 1$ である。よって、計量モデルとしては

$$\ln D_H^t = u - v, \quad v > 0 \quad (2)$$

のように定式化する。ここで、 $u \sim N(0, \sigma_u^2)$ 、 $v \sim N(0, \sigma_v^2)$ である。(2) は標準的な確率フロンティアモデルとなり、 D_H^t のパラメータは最尤法によって推定される。

(2) Hicks-Moorsteen-Bjurek エコ生産性指数

Hicks-Moorsteen-Bjurek 生産性指数の定義に用いられている距離関数をハイパーボリック距離関数に置き換えて、環境負荷要因を考慮したエコ生産性指数を作る。Hicks-Moorsteen-Bjurek 生産性指数は Malmquist アウトプット指数と Malmquist インプット指数の比である。

環境負荷要因を考慮した Malmquist アウトプット指数は、ハイパーボリック距離関数を用いて次のように定義する。時点 t を基準時点、 $t+1$ 時点と比較時点として

$$M_{Hy}^{t+1,t} = \left\{ \frac{D_H^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}) D_H^t(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})}{D_H^{t+1}(x^t, y^t, b^t) D_H^t(x^t, y^t, b^t)} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

である。環境要因を考慮した Malmquist インプット指数を定義するには、望ましくないアウトプットを含む生産可能集合に基づくインプット距離関数を用いる。すなわち

$$d_H^t(x, y, b) = \max \left\{ \delta \mid (x/\delta, y, b) \in \Omega^t \right\} \quad (3)$$

を用いて

$$M_{Hx}^{t+1,t} = \left\{ \frac{d_H^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}) d_H^t(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})}{d_H^{t+1}(x^t, y^t, b^t) d_H^t(x^t, y^t, b^t)} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

が Malmquist インプット指数となる。結局、Hicks-Moorsteen-Bjurek エコ生産性指数は

$$\Theta^{t+1,t} = M_y^{t+1,t} / M_x^{t+1,t} \quad (4)$$

のようになる。これを計測するためには D_H^t のパラメータ推定値から d_H^t の値を導出することが必要である。それには d_H^t の定義(3)と

$$\Omega^t = \left\{ (x, y, b) \mid D_H^t(x, y, b) \leq 1 \right\} \quad (5)$$

であることから、

$$\ln D_H^t(x/d_H^t, y, b) = 0 \quad (6)$$

を解いて d_H^t を求めることができる。 $\ln D_H^t$ がトランスログ型の場合、(6) は $\ln d_H^t$ に関する 2 次方程式となるので、その解の小さくない方が $\ln d_H^t$ の値である。

(3) 環境負荷要因のシャドー価格

いま r 番目の望ましいアウトプットを y_r 、 s 番目の望ましくないアウトプットを b_s とする。 y_r の b_s に対する限界転率率はハイパーボリック距離関数によって

$$MRT = - \frac{\partial \ln D_H^t / \partial \ln b_s}{\partial \ln D_H^t / \partial \ln y_r} \frac{y_r}{b_s} \quad (7)$$

で与えられる。費用最小化条件を用いれば b_s のシャドー価格を q_s とすると

$$q_s = -p_r \frac{\partial \ln D_H^t / \partial \ln b_s}{\partial \ln D_H^t / \partial \ln y_r} \frac{y_r}{b_s} \quad (8)$$

である。

(4) 規模の経済性と範囲の経済性

規模の経済性の指標は通常は費用関数によって定義される。望ましいアウトプット y の価格ベクトルを p として、費用関数が $C(p, y)$ である時

$$R_{SCALE} = (i' \nabla_{\ln y} \ln C(p, y))^{-1} \quad (9)$$

が 1 より大きければ規模の経済性が存在し、1 より小さければ規模の不経済性が存在する。ただし、 $i = (1, 1, \dots, 1)'$ である。(9)式を評価するには費用のデータが必要であるが、双対性を利用してインプット・ベースに変換したハイパーボリック距離関数 d_H^t から次のように R_{SCALE} を求めることができる。

$$R_{SCALE} = -(i' \nabla_{\ln y} \ln d_H^t)^{-1} \quad (10)$$

式(10)を用いる場合、費用データは不要である。

範囲の経済性は、 i 番目のアウトプット y_i を単独で生産する場合のアウトプット・ベクトルを $y_{(i)} = (0, \dots, y_i, \dots, 0)$ とし

$$G_{SCOPE} = \sum_{i=1}^n C(p, y_{(i)}) - C(p, y) \quad (11)$$

により判定する。 G_{SCOPE} が正ならば範囲の経済性が存在し、負ならば範囲の非経済性が存在する。範囲の経済性を費用データによらずに判定するためには、次の費用関数と距離関数の間の双対的性質が重要である。

生産可能集合 Ω^t が正則条件を満たすなら、任意の $x > 0, y > 0$ に対して p^* が存在し

$$d_H^t(x, y) = \frac{p^{*'} x}{C(p^*, y)} \quad (12)$$

が成立する。

ここで x について d_H^t が微分可能であれば $\nabla_x d_H^t = p^*/C(p^*, y)$ であることがわかる。よって、

$$p^* = \nabla_x d_H^t(x_{(i)}, y) C(p^*, y_{(i)}) \quad (13)$$

となるような $x_{(i)}$ を求めれば

$$G_{SCOPE} = \sum_{i=1}^n C(p^*, y_{(i)}) - C(p^*, y) \\ = \sum_{i=1}^n \frac{p^{*'} x_{(i)}}{d_H^t(x_{(i)}, y_{(i)})} - \frac{p^{*'} x}{d_H^t(x, y)} \quad (14)$$

を評価して範囲の経済性を判定できる。ここで、配分非効率が存在しなければ p^* は観察される価格 p に等しく、また生産技術が input homothetic であれば $x_{(i)} = x$ となって(14)は簡略化できる。

4. 研究成果

(1) 9 電気事業者のエコ生産性の計測

わが国の 9 電気事業者の火力発電部門のデータを用いて Hicks-Moorsteen-Bjurek エコ生産性指数を計測した。データ期間は最長で 1990-2007 年度であるが、環境負荷要因の排出量データの利用可能性によりアンバランスド・パネルとなっている。環境負荷要因は SO_2 または CO_2 とし二通りのモデルを適用した。 SO_2 と CO_2 の排出量は各電気事業者の環境評価報告書の各年版から取った。その他のデータは有価証券報告書の中の電気事業費用明細によった。望ましいアウトプットは発電電力量、インプットは資本ストック、労働、燃料である。資本ストックは、有価証券報告書の固定資産期中増減明細表中の設備増減額を電気機器分野の企業物価指数によりデフレートしたのを用い、恒久棚卸法により作成した。観察値の総数は 106 である。

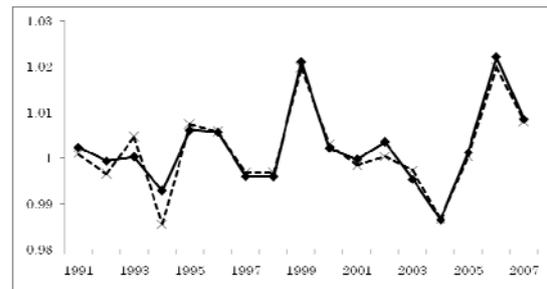
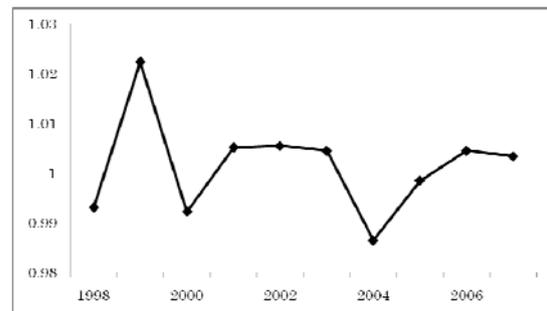


図1 Hicks-Moorsteen-Bjurek エコ生産性指数
中部電力 環境負荷要因は CO_2

図1では、環境負荷要因が CO_2 の場合の中部



電力火力発電部門のエコ生産性変化率を実線で示している。破線はCO₂が変化しなかったとした場合に生じたであろう生産性変化である。たとえば1994年に破線が実線の下にあることは、1993年から1994年にかけてCO₂排出量が減少したことを意味する。1993年を除き全般的に破線は実線の下にあり、CO₂排出量が減少傾向にあることを示している。

図2 Hicks-Moorsteen-Bjurek エコ生産性指数
東北電力 環境負荷要因はSO₂

図2は環境負荷要因がSO₂の場合の東北電力のエコ生産性変化率を示す。SO₂が一定の場合の生産性変化は、ほとんど実線と重なるため省略した。このことは、1998年以降ほとんどSO₂の排出量が一定であることを意味する。

生産性が1999年に上昇し2004年に下落し、それ以後上昇することは図1と図2で共通している。これは生産性変化が需要の動向と共変動していることを示すためと見られる。

(2) 環境負荷要因のシャドー価格

(1)で用いたのと同じハイパーボリック距離関数の推定値から、各電気事業者の2005年におけるCO₂とSO₂のシャドー価格を計測した。それぞれ電気価格に対する限界代替率を利用して求めたが、電気価格はkwhあたり8円を想定した。

表1 環境負荷要因のシャドー価格
(2005年)

	SO ₂ (¥/t)	CO ₂ (¥/t-C)
北海道	137258	—
東北	101467	442
東京	—	512
中部	414858	1221
北陸	312105	1678
関西	748470	—
中国	213878	—
四国	236453	614
九州	268947	—

* SO₂の東京電力、CO₂の北海道電力、関西電力、中国電力、九州電力はハイパーボリック距離関数が符号条件を満たさないためシャドー価格を求められない。

表1において、SO₂のシャドー価格は事業者により10万1467円/t(東北電力)から74万8470円/t(関西電力)の範囲にある。事業者間にはかなり格差があることから、もし排

出権市場が設定されれば事業者間で取引の成立する可能性がある。シャドー価格の水準をアメリカの先行研究と比較すると、\$5321/t [Cuesta, Lovell and Zofio, *Ecol. Econ.* 68, 2009, 2232-2242.] あるいは\$1545/t [Färe, Grosskopf, Noh and Weber, *J. of Economet.* 126, 2005, 469-492.] である。円ドル為替レートで換算して、比較可能な範囲であると見ることができる。

CO₂のシャドー価格は442円/t-C(東北電力)から1678円/t-C(北陸電力)である。環境省「環境税の具体案」(2008年)では2400円/t-Cが炭素税率として想定されており、ここで計測されたシャドー価格より高い。したがって、もしこの税率で炭素税が導入されれば、電気事業者にはCO₂排出削減のインセンティブが働くであろう。

(3) 規模の経済性と範囲の経済性

わが国の私立大学について距離関数を用いて規模の経済性と範囲の経済性を検証した。範囲の経済性を距離関数によってテストして先行研究は内外に見当たらず、本研究が最初の試みであるといえる。アウトプットは学部教育、大学院教育、研究の三種とし、それぞれ学部学生数、大学院学生数、外部研究費の獲得件数とする。インプットは職員数、教員数、資本ストックとし、資本ストックは有形固定資産残高で測る。データは私立大学白書の第7次(1999年)と第8次(2004年)から取り、観察値の総数は218である。

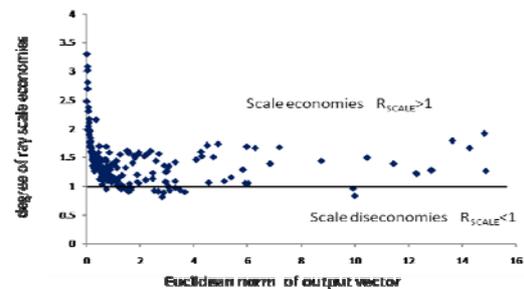


図3 私立大学の規模の経済性指標
(横軸はアウトプット・ベクトルのユークリッド・ノルム)

図3は規模の経済性の指標 R_{SCALE} をアウトプット・ベクトルの大きさに対してプロットしたものである。ほとんどすべてのプロットが $R_{SCALE} = 1$ の線より上にあり、私立大学は広い範囲で規模の経済性を有しているといえる。特に小規模な大学は非常に大きな規模の経済性を有しており、経営的な観点からは合併などによる規模拡大が推奨され得る。

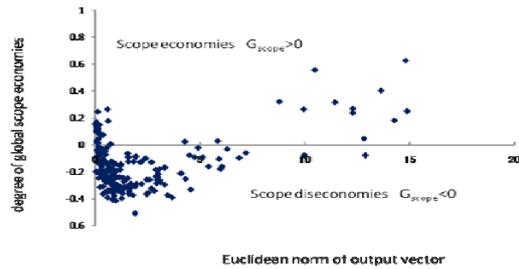


図4 私立大学の範囲の経済性指標
(横軸はアウトプット・ベクトルのユークリッド・ノルム)

図4は範囲の経済性指標 G_{SCOPE} をアウトプット・ベクトルの大きさに対してプロットしたものである。大部分の私立大学において $G_{SCOPE} < 0$ であり、範囲の経済性が存在しないことが示されている。このことの私立大学経営に対するインプリケーションは機能分化の促進であり、規模の経済性の存在とあわせて解釈するならば、機能を集中させつつ大学間連携ないし統合を進めることであると考えられる。ただし、規模の大きいいくつかの大学では範囲の経済性が認められる。したがって、いくつかの大規模大学は総合大学として存続することが効率的である。また逆に、ごく規模の小さい領域においても範囲の経済性が一部存在しており、これらの大学にはどのような形態でも規模を大きくすることが求められる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

① Nemoto, Jiro and Noriko Furumatsu, “A New Testing Procedure for Scope Economies Using the Input Distance Function,” *Empirical Economics Letters* 9(12), Dec. 2010, 1099-1107. 査読有

② Liu, Zhicen, Joel Koerwer, Jiro Nemoto, and Hidefumi Imura “Physical Energy Cost Serves as the “Invisible Hand” Governing Economic Valuation: Direct Evidence from Biogeochemical Data and the U.S. Metal Market,” *Ecological Economics* 67, Issue 1, Aug.

2008, 104-108. 査読有

[学会発表] (計4件)

① Nemoto, Jiro and Akiko Okamura, “The Effects of Deregulation Policy on Fuel Productivity of Steam Generation in Japan,” Asian-Pacific Productivity Conference 2010, Academia Sinica, Taiwan, 23.Jul. 2010.

② Nemoto, Jiro and Noriko Furumatsu, “Cost Structure and Efficiency of Japanese Private Universities Revisited,” XI European Workshop on Efficiency and Productivity Analysis, University of Pisa, Pisa, 26.June, 2009.

③ Nemoto, Jiro and Mika Goto, “Economic Stagnation and Productivity Slowdown in Japan”, Asian-Pacific Productivity Conference 2008, Academia Sinica, Taiwan, 18.Jul. 2008.

④ Nemoto, Jiro and Mika Goto, “Economic Stagnation and Productivity Slowdown in Japan”, North American Productivity Workshop V, New York University, New York City, 27.Jun. 2008.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

根本 二郎 (NEMOTO JIRO)

名古屋大学・大学院経済学研究科・教授
研究者番号：20180705

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし