

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26285050

研究課題名(和文) 財務効率と環境効率を同時に考慮した場合の電力業の生産性計測法とその応用

研究課題名(英文) A new measurement method of productivity and its application in electricity industry with managerial efficiency and environmental efficiency

研究代表者

根本 二郎 (Nemoto, Jiro)

名古屋大学・アジア共創教育研究機構(経済)・教授

研究者番号：20180705

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：わが国の9電気事業者について環境負荷を含むパネルデータを新たに作成し、財務効率と環境効率の双方を考慮したHicks-Moorsteen-Bjurek(HMB)型生産性指数を距離関数モデルによって計測した。HMB生産性指数の要因分解を行い、主たる生産性の決定因は規模要因と効率性要因であること、技術進歩要因は特に規制緩和の進展とともに生産性を上昇させる効果が観察されること、環境負荷要因は定量的には非常に小さいが生産性を上昇させる要因となっていることが明らかとなった。他に、生産性決定要因の一つである効率性要因に注目し、財務要因および環境要因と効率性の関係などを分析した。

研究成果の概要(英文)：A new panel data on 9 Japanese electric utility firms with environmental load was compiled to measure Hicks-Moorsteen-Bjurek (HMB) productivity index taking account of financial and environmental efficiency simultaneously, using the distance function model. We conducted the decomposition analysis of the HMB productivity index. The results are threefold. First, the main determinants of productivity are found to be the scale factor and the efficiency factor. Second, the technical advance factor becomes a contributor to improving productivity as the deregulatory process of electricity market goes on. Third, the positive effects of environmental factor on productivity were detected, though their magnitudes are tremendously small. In addition, focusing on efficiency as a determinant of productivity, we analyzed the relations of efficiency with financial and environmental factors.

研究分野：経済統計

キーワード：生産性指数 財務効率 環境効率 データ包絡分析 確率フロンティア分析 電力業 規制緩和

1. 研究開始当初の背景

(1) 東日本大震災と福島原子力発電事故以降、わが国電力供給システムの設計に関する議論は、原子力を含む電源構成の問題に加え電力市場自由化の問題、温暖化ガス排出などの環境要因の問題が錯綜し、学術的な評価に耐えうる議論が行われてきたかどうかは疑問の余地がある。

(2) 電源構成や電力市場の設計において、電力価格が低くなることを評価基準とする議論がしばしば行われるが、価格は基本的に需給により決まるのであってその高低がそのまま政策のための評価指標にはなり得ない。より本質的な指標は、電力供給の効率性とそれによって決まる生産性である。価格が指標として意味を持つのは、効率性、またしたがって生産性が上がる結果として価格が下がる限りにおいてである。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、財務効率と環境効率の双方を考慮した統合的な生産性指数の計測方法を開発することと、同時にその方法を電力事業者のデータに適用し望ましい電力供給システムについて分析することを目的とする。

(2) また生産性の要因分解の中で決定要因の一つである効率性要因に注目し、財務要因および環境要因と効率性の関係を分析する。特に電気事業の自由化の影響と、日本の場合は東日本大震災による影響について考慮する。また、自由化に関連して消費者サイドの分析も行い、消費者が自由化に満足しているかどうかを分析する。

3. 研究の方法

(1) 効率性を計測するためのモデルとしてトランスログ型ハイパーボリック距離関数を用いる。ハイパーボリック距離関数は複数のインプットと望ましくないアウトプット(環境負荷)を含む複数のアウトプットの間、技術的関係を表現する。所与のインプットの下で実際に産出されている望ましいアウトプットと技術的に生産可能な最大の望ましいアウトプット(生産可能フロンティア)の間の距離、すなわち効率性を与える。

指向性距離関数と効率性が得られれば、生産性指数の計測とその要因分解分析が可能となる。生産性指数として Hicks-Moorsteen-Bjurek 指数(以下、HMB 指数)を採用し、生産性を財務効率要因、環境効率要因、技術進歩要因、規模要因に分解する。ここで効率性とは、与えられたインプットの下で、技術的に可能なすべてのアウトプット量の最大増加倍率を測るのであるが、望ましくないアウトプットについては縮小倍率を測る。これによって、経営面(財務効率)と環境面(環境効率)の問題を同じ生産性の枠内で定量的に比較することが可能となる。

(2) インプット数量ベクトルを  $x = (x_1, x_2, \dots, x_L)$ 、望ましいアウトプット数量ベクトルを  $y = (y_1, y_2, \dots, y_M)$ 、望ましくないアウトプットの数量ベクトルを  $b = (b_1, b_2, \dots, b_N)$  として、生産可能集合を

$$\Omega^t = \{ (x, y, b) \mid x \text{ can produce } (y, b) \}$$

とすれば、ハイパーボリック距離関数は

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

のように定義される。これをトランスログ型で特定化すれば、確率的フロンティア分析(SFA, Stochastic Frontier Analysis)でそのパラメータを推定することができる。その結果に基づき、t 期を基準として t+1 期の生産性を測る HMB 生産性指数は次のように定義される。

$$P_{t+1,t} = \left\{ \frac{Y_{t+1,t}^{t+1}}{X_{t+1,t}^{t+1}} \frac{Y_{t+1,t}^t}{X_{t+1,t}^t} \right\}^{1/2}$$

ただし、 $Y_{t+1,t}^r$  と  $X_{t+1,t}^r$  は r 期の生産可能集合で評価した集計アウトプット指数と集計インプット指数で、まず集計アウトプット指数はハイパーボリック距離関数によって

$$Y_{t+1,t}^r = D_H^r(x_r, y_{t+1}, b_{t+1}) / D_H^r(x_r, y_t, b_t)$$

のように定義される。一方、集計インプット指数はハイパーボリック距離関数と双対なインプット距離関数

$$D_X^r(x, y, b) = \max \left\{ \rho \mid \ln D_H^r(\frac{x}{\rho}, y, b) \leq 0 \right\}$$

に基づいて

$$X_{t+1,t}^r = D_X^r(x_{t+1}, y_r, b_r) / D_X^r(x_t, y_r, b_r)$$

のように定義される。ここではインプット、アウトプットを測る距離関数に望ましくないアウトプットが環境負荷として入っており、環境負荷が増えるとインプット  $X_{t+1,t}^r$  も望ましいアウトプット  $Y_{t+1,t}^r$  も減少するという形で環境負荷を処理するためのコストが考慮されている。

このようにして得られる HMB 生産性指数は望ましくないアウトプットが一定の場合、効率性要因  $E_{t+1,t}$ 、技術進歩要因  $T_{t+1,t}$ 、規模要因  $S_{t+1,t}$  に分解できる。すなわち

$$\ln P_{t+1,t} = \ln E_{t+1,t} + \ln T_{t+1,t} + \ln S_{t+1,t}$$

$$E_{t+1,t} = \frac{D_H^{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1})}{D_H^t(x_t, y_t, b_t)}$$

$$T_{t+1,t} = \left\{ \frac{D_H^t(x_t, y_t, b_t)}{D_H^{t+1}(x_t, y_t, b_t)} \frac{D_H^t(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1})}{D_H^{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1})} \right\}^{1/2}$$

規模要因は残差として計算できるが、次のように(規模弾力性-1)と集計インプット指数の積として表現できる。つまり

$$\ln S_{t+1,t} = \left( \frac{\hat{\varepsilon}_t + \hat{\varepsilon}_{t+1}}{2} - 1 \right) \ln q_{t+1,t}$$

$$q_{t+1,t} = \left( X_{t+1,t}^t X_{t+1,t}^{t+1} \right)^{\frac{1}{2}}$$

である。規模弾力性  $\hat{\varepsilon}_t$  は集計インプットの増加率に対する集計アウトプットの増加率の比であり、 $\hat{\varepsilon}_t > 1$  のとき集計インプットが増加(規模拡大)すれば規模の経済性により平均費用は減少し生産性は上昇する。 $\hat{\varepsilon}_t < 1$  の場合は規模拡大は規模の不経済性により生産性は下落する。 $\hat{\varepsilon}_t = 1$  の場合、規模は生産性に中立的である。

このように規模の生産性に与える効果を規模弾力性のような局所的な情報によって取り込める点が、HMB 生産性指数の他の方法に無い利点である。良く知られている Malmquist 生産性指数による生産性の要因分解では、大域的な情報が必要となる。しかももし平均費用が大域的に単調増加、あるいは単調減少であった場合、規模効果を測ることができない。この点で、HMB 生産性指数を用いる生産性の要因分解分析の方が一般的である。

以上が通常の HMB 生産性指数の要因分解であるが、本研究ではハイパーボリック距離関数に望ましくないアウトプット(環境負荷)  $b$  が入っている。 $b$  の変化による要因を含めると HMB 生産性指数は効率性要因、技術進歩要因、規模要因、環境要因に分解できる。環境要因は、基準時点に比べ環境負荷が増大したとき、その影響を解消するのに必要な処理コスト(インプットの増加または望ましくないアウトプットの減少)が生産性に与える影響を測るものである。

(2) 生産性を決める要因の一つである効率性に注目し、電力事業について効率性を計測する。環境負荷要因を考慮しない通常の経営効率性と環境負荷要因を考慮した環境効率性を計測し経時的に比較する。そのため、望ましくないアウトプットを含む非ラディアルなデータ包絡分析(Data Envelopment Analysis)を用いる。また、効率性と電気事業経営のパフォーマンスとの間の関係を分析するため、パネル回帰分析により効率性と財務指標が企業価値に及ぼす影響を計測する。

(3) 電気事業の自由化は競争を通じて経済全体の資源配分効率を高めることが期待される。競争が機能しているかどうかについて、一つの指標として消費者の電気事業者選択が活発に行われているかどうか、つまり消費者の購入先事業者の切替率を見ることができ、また切替率を決める要因を分析するこ

とは、消費者の自由化に対する満足度を検証することにもつながる。そこで2015年と2016年の二回の消費者調査により得られた49905人の観察値を分析し、

#### 4. 研究成果

(1) 日本の9電力会社の火力発電部門のパネルデータを用いて環境負荷を考慮したトランスログ型ハイパーボリック距離関数を推定し、HMB 生産性指数の要因分解を行った。インプットは資本、労働と燃料、望ましいアウトプットは発電電力量、望ましくないアウトプットは Sox と NOx の総排出量である。分析にあたり、既存の9電力会社のアンバランス・パネルデータを2010年まで延長した。主要なデータとして、火力発電電力量、火力部門従業員数、火力発電認可最大出力、発電用燃料消費実績、SOx 総排出量、NOx 総排出量を含む。データソースとして各社毎年の「環境報告書」の他、電気事業連合会による「電気事業60年の統(<http://www.fepec.or.jp/library/data/60tokei/>)」を用いている。

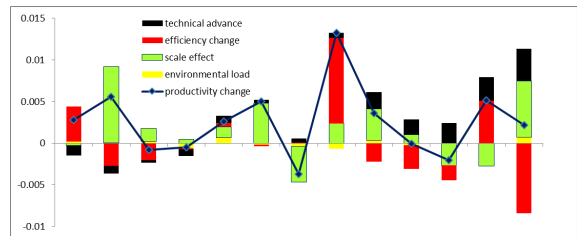


図 1-1 HMB 生産性指数と要因分解  
北海道電力 (1995-2007)

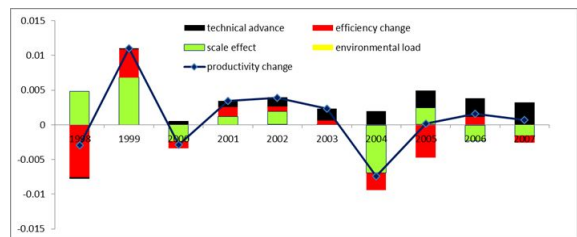


図 1-2 HMB 生産性指数と要因分解  
東京電力 (1998-2007)

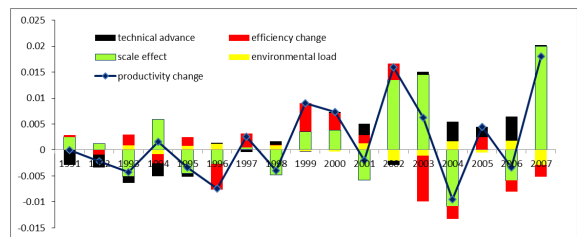


図 1-3 HMB 生産性指数と要因分解  
中部電力 (1991-2007)

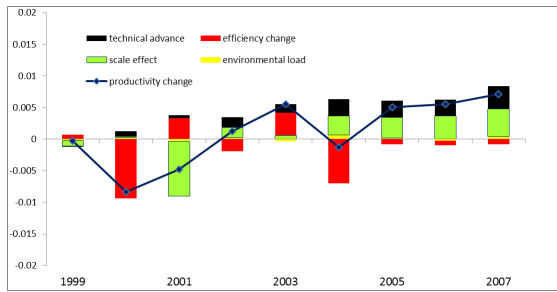


図 1-4 HMB 生産性指数と要因分解  
中国電力 (1999-2007)

図 1-1~1-4 に、北海道電力、東京電力、中部電力、中国電力の HMB 生産性指数とその要因分解の結果を示す。図 1-1~1-4 において折線は HMB 生産性指数、黒ブロックは技術進歩要因、赤ブロックは効率性要因、緑ブロックは規模効果要因、黄ブロックは環境負荷要因である。4 電力について共通の特徴は必ずしも明らかではなく、特に HMB 生産性指数の動向は会社によって異なっている。おおよそ共通に見られることとしては三点を指摘できる。

第一に、技術進歩要因はおよそ 2000 年を境として、それ以前は生産性を引き下げる要因となることが多く、それ以降は生産性を上昇させる要因として働く傾向がある。電力の小売市場自由化は 1999 年から始まっており、自由化の効果が技術進歩要因に反映されている可能性がある。

第二に、生産性に与える影響の大きさの点では、効率性と規模効果が主要な要因といえる。規模弾力性は 1.15 (四国電力) から 1.19 (東京電力) の間で推定されており、規模の経済性が存在する。よって規模要因は規模が拡大 (縮小) するときに生産性に与える影響が正 (負) となる。

第三に、環境要因の生産性に与える影響は非常に小さく、ほとんど検知できない。中部電力の場合 (図 1-3) に黄ブロックをわずかに認めることができる程度である。中部電力では生産性に対し環境要因は微小ながら正の効果を示しており、環境負荷の低減過程で処理コストの低下を通じて生産性が上昇している。このようなことは技術進歩ないし効率性改善とともに起き得る現象である。技術進歩、効率改善はそれ自体が生産性上昇を伴うので、微小な大きさではあるがここに環境対策の二重の配当を見ることができる。

(2) 日本の 9 電力会社の 2003 年から 2015 年までの財務諸表のパネルデータを用い、非ラディアル DEA による財務効率と環境効率の計測を行った。財務効率を計測するため、発電部門のみならず企業全体のアクティビティをモデル化するため、インプットを総資産、総負債、営業費用の 3 種類、望ましいアウトプットを総収入、企業価値、販売電力量の 3 種類とする。また環境効率を計測するため、

C02 排出量を望ましくないアウトプットとして導入する。このモデルで計測した効率性の 9 電力平均の推移を下に示す。

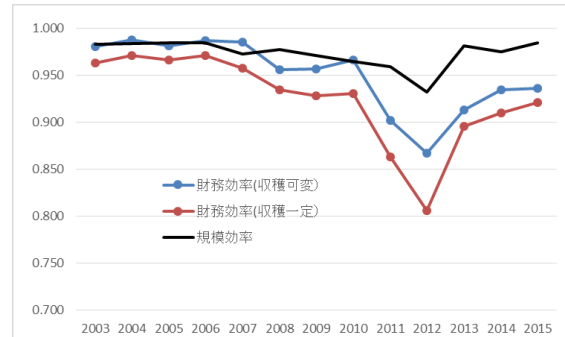


図 2 財務効率性 9 電力平均 (2003-2015)

図 2 は財務効率性の計測値である。財務効率性は 3 種類のインプットと 3 種類のアウトプットの投入産出関係のみをモデル化して計測した効率性で、望ましくないアウトプット (CO2 排出量) の抑制費用を無視している。青線は収穫可変の下で測った財務効率、赤線は収穫一定の下で測った財務効率、黒線は規模の効率性である。財務効率は 2011 年と 2012 年に大きく低下し東日本大震災の影響が明らかである。これは福島第一原発の事故による原発リスクの高まりから、電力会社の企業価値が減損したことが寄与している。財務効率は 2013 年以降回復するが、東日本大震災以前の水準に達していない。一方、規模効率も東日本大震災の影響による低下が認められるが、その後震災前の水準まで回復している。これは震災後に発電電力量が効率規模より大きく低下したものの、震災復興とともに発電量が回復して震災前と同程度に効率的な規模に戻ったことと符合している。

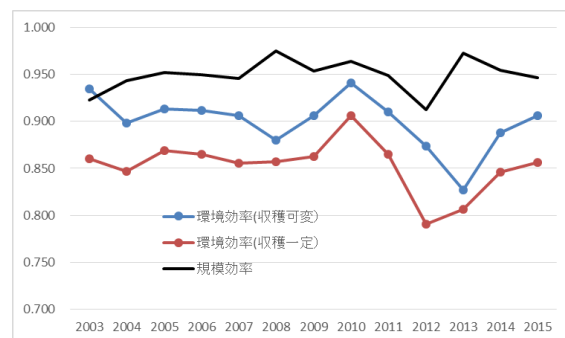


図 3 環境効率性 9 電力平均 (2003-2015)

図 3 は、図 2 を計測したモデルに環境負荷として望ましくないアウトプット (CO2 排出量) を導入し、その抑制費用を考慮したモデルで計測した環境効率性を示す。2011 年、2012 年に効率性が低下する点は財務効率性と同じであるが、その後の回復は財務効率の場合より顕著であり、震災以前の効率性水準に戻っているように見える。

クラスカル-ウォリスの順位検定により

震災前後で効率性水準に差があるかどうかを検定すると、収穫一定の場合と収穫可変の場合の財務効率（図2）のみ有意な差が認められ、収穫一定の場合と収穫可変の場合の環境効率（図3）と財務効率モデルの規模効率（図2）と環境効率モデルの規模効率（図3）は有意な差が無いという結果となった。つまり、震災後の財務効率が震災前よりも有意に低く、他の効率性は震災前後で変化がないということである。このことが示唆するのは、震災後の財務効率の低下が原発停止に伴うCO2排出量増加に対する対策コスト増加の財務面への反映である可能性である。環境効率性では、環境負荷抑制費用は考慮した上で効率性を計測するため、震災前後で水準に変化見られないことは不思議ではない。つまり、環境負荷の抑制に投入する資源（インプットの増加ないしアウトプットの減少）をコントロールすれば、2015年の時点で効率性の水準に震災の影響は残っていないといえる。

また分析期間は電力市場の自由化が進捗した時期でもあるが、自由化の影響と解釈できるような変化は効率性値に認められない。自由化については、2016年から小売市場の前面自由化が始まり2020年までに9電力の垂直アンバンドリングが完了して規制料金が撤廃される予定であるが、2015年の時点ではその影響は未だ現れていないものと見られる。

(3) 効率性と電気事業経営のパフォーマンスとの間の関係をより直接的に分析するため、企業価値を被説明変数とするパネル回帰分析を行った。データはアメリカ、スペイン、香港を中心にサービスを提供している電力大手14社のパネルデータ（2001年-2014年）である。（データソースはS&P Capital IQ）パネル回帰の結果を以下に示す。

$$EV_{it} = f(OE_{it}, FP_{it}) + e_{it}$$

Panel Data Random Effects Model

	Estimated coefficients	z-value
OP	-1.898	-1.69*
FP	27.613	3.57***
Constant	1.737	1.87*
Sigma_u	0.761	
Sigma_e	1.014	
rho	0.360	

Note: Fixed effects model is rejected by Hausman test.  
Superscripts \*, \*\*\* indicate significance at the 10% and 1% level.

被説明変数 EV は企業価値、FP は総資産利益率、OP は効率性値である。OP は非ラディアルDEAモデルによって計測された効率性値で、インプットは従業員数、総資産、営業費用、アウトプットは総収入である。ハウスマン検定で固定効果モデルが棄却されたため、ラン

ダム効果モデルを推定している。効率性値の係数は負で有意水準10%で有意、総資産利益率の係数は正で1%の有意水準で有意である。企業価値は電力会社の将来のキャッシュフロー総額を反映するのに対し、効率性は現在の生産性と密接に係る。両者の間に負の相関があるとすると、これは現在と将来の間の異時点間資源配分に関わる問題である。静的な効率性指標と財務指標の関係を理解するには、動的な要因が本質的であると思われる。

(4) 日本の小売市場全面自由化は2016年4月に実施された。自由化の影響と消費者の自由化に対する満足度を調べるため、2016年4月をはさんで2015年10月と2016年10月の二回、消費者に電力市場自由化と電気の購入先事業者切替えに関する質問票調査（インターネット利用）を実施し、49805名のデータを得た。このうち3641名が自由化後2016年10月までに事業者を切替えていた。切替確率についてロジスティック回帰分析を行ったところ、自由化政策の認知度が高い消費者、自由化前より切替に関心を持っていた消費者、切替の判断基準となる料金低下の閾値が小さい消費者は切替確率が高い一方、リスク回避的な態度の強い消費者、安定供給志向が強い消費者ほど切替確率が低いことがわかった。切替率の高さは、自由化により競争が有効に生じていることを示す指標の一つであるが、この分析で明らかのように切替率は多様な要因に依存する。このため切替率が低いことがそのまま自由化の失敗を意味するわけではない。切替が起きなくとも潜在的競争者の存在が既存事業者の効率を改善しているかもしれないからである。そこで、切替に伴う消費者の満足度を、切替を行ったグループと行わなかったグループの間でdifference-in-differenceにより推定した。5ポイント・スケール（1～5）での満足度に関する質問の回答は、切替を行ったグループでは2016年は2015年に比べ平均1.2ポイント高く、切替を行わなかったグループでは0.3ポイント高かった。この差は有意であり、切替を行ったグループはそうでないグループよりも満足度が高いといえる。このことから、切替率は自由化の成果を測る指標として一定の根拠を持つことがわかる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 16 件)

Mika GOTO, Mohammed ATRIS, and Akihiro OTSUKA, Regional Studies, 査読有, In Press., 2018.

Kong Joo SHIN, and Shunsuke MANAGI, Liberalization of a retail electricity

market: Consumer satisfaction and household switching behavior in Japan, Energy Policy, 査読有, Vol. 110, 675-685.

Mika GOTO, and Toshifumi TAKAHASHI, Operational and Environmental efficiencies of Japanese electric power companies from 2003 to 2015: Influence of market reform and Fukushima nuclear power accident, Mathematical Problems in Engineering, 査読有, Vol. 2017, 2018, 1-15.

Toshiyuki SUEYOSHI, Mika GOTO, World trend in energy: an extension to DEA applied to energy and environment, Journal of Economic Structures, 査読有, Vol. 6, 2017, 1-23.

Tosyuyuki SUEYOSHI, Yan YUAN, and Mika GOTO, A literature study for DEA applied to energy and environment, Energy Economics, 査読有, Vol. 62, 2017, 104-124.

Jo KISHIMOTO, Mika GOTO, and Kotaro INOUE, Do acquisitions by electric utility companies value? Evidence from deregulated markets, Energy Policy, 査読有, Vol. 105, 2017, 212-224.

Toshiyuki SUEYOSHI, and Mika GOTO, Measurement of returns to scale on large photovoltaic power stations in the United States and Germany, Energy Economics, 査読有, Vol. 64, 2017, 306-320.

Jiro NEMOTO, and Hong ZUO, Is informal employment a result of market segmentation? Evidence from Chins, Australian Economic Review, 査読有, Vol. 50, 2017, 309-326.

Tatsuhiko Nakada, Kong Joo SHIN, and Shunsuke MANAGI, The effect of demand response on purchase intention of distributed generation: evidence from Japan, Energy Policy, 査読有, Vol. 94, 2016, 307-316.

Mika GOTO, Combined use of data envelopment analysis and financial measures for corporate value assessment, Global Conference on Business and finance Proceedings, 査読有, Vol. 11, 2016, 268-271.

Mika GOTO, and Toshiyuki SUEYOSHI, Electricity market reform in Japan after Fukushima, Economics of Energy and Environmental Policy, 査読有, Vol. 5, 2016, 15-30.

Toshiyuki SUEYOSHI and Mika GOTO, DEA environmental assessment in time horizon: radial approach for Malmquist index measurement on petroleum companies, Energy Economics, 査読有, Vol. 51, 2015, 329-345.

Toshiyuki SUEYOSHI and Mika GOTO,

Japanese fuel mix strategy after disaster of Fukushima Daiichi nuclear power plant: Lessons from international comparison among industrial nations measured by DEA environmental assessment in time horizon, Energy Economics, 査読有, 2015 Vol. 52, 87-103.

Mika GOTO, and Toshiyuki SUEYOSHI, Electric power market reform in Japan after Fukushima Daiichi nuclear plant disaster: issues and future direction, International Journal of Energy Sector Management, 査読有, Vol. 9, 2015, 336-360.

Mika GOTO, and Toshiyuki SUEYOSHI Environmental assessment for corporate sustainability by resource utilization and technology innovation: DEA radial measurement on Japanese industrial sectors, Energy Economics, 査読有, Vol. 46, 2014, 295-307.

Akihiro OTSUKA, Mika GOTO, and Toshiyuki SUEYOSHI, Cost efficiency of Japanese local governments: Effects of decentralization and regional integration, Regional Studies, Regional Science, 査読有, Vol. 1, 2014, 209-220.

[図書](計 1件)

Toshiyuki SUEYOSHI and Mika GOTO, Environmental Assessment on Energy and Sustainability by Data Envelopment Analysis, John Wiley & Sons Inc., 2018, 720

## 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

後藤 美香 (GOTO Mika)

東京工業大学・環境社会理工学院, 教授  
研究者番号: 50371208

慎 公珠 (SHIN KongJoo)

九州大学・工学研究科・特任講師  
研究者番号: 30757232

中野 牧子 (NAKANO Makiko)

名古屋大学・環境学研究科・准教授  
研究者番号: 00379504

堀江 進也 (HORIE Shinya)

東北大学・環境学研究科・助手  
研究者番号: 50633468