

CO₂排出量を考慮した生産性の評価 —国内製造業10業種の比較研究—

藤井 秀道¹・馬奈木 俊介²・金子 慎治³

¹非会員 東北大学大学院環境科学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-20)
E-mail:hidemichifujii@gmail.com

²非会員 東北大学大学院環境科学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-20)
E-mail:managi.s@gmail.com

³正会員 広島大学大学院国際協力研究科 (〒739-8529 広島県東広島市鏡山1-5-1)
E-mail:kshinji@hiroshima-u.ac.jp

本研究では国内製造業10業種を対象に、CO₂排出量を考慮した生産性分析を業種別に行い、その分析結果を比較することで、経済効率性を圧迫することなくCO₂排出量の削減を達成している業種を明らかにすることを目的とする。分析結果より、ゴム製品、化学製品、電気機器製品、自動車製造業の4業種で2006年から2008年にかけて、CO₂排出量を考慮した生産性が大幅に改善している。加工組立型では、効率的な企業と非効率的な企業の両方で生産効率性の改善を達成しており、業界全体で効率性改善を達成している。一方で、化学製品製造業や繊維製品製造業では、フロンティアライン上の効率的な企業と非効率的な企業との間の効率性格差が拡大しているため、ボトムアップを促すような試みが重要であると言える。

Key Words : *environmentally sensitive productivity, CO₂ emission, manufacturing sector, Japan*

1. 背景と目的

1997年に地球温暖化防止のための京都会議が開かれ、温室効果ガス(GHG ガス)の一定の削減率を定めた京都議定書が調印された。その後、2005年2月16日にロシアの批准を受け京都議定書が発効し、先進諸国に対しては第1約束期間である2008年から2012年に削減が義務付けられている。しかしながら我が国の温室効果ガス排出量は増加の一途をたどり、京都議定書で定められた削減目標の達成は困難な状況である。ここで、我が国から排出されるGHGガスの約95%を占めるCO₂排出量の変化を考察すると、2008年のCO₂排出量はエネルギー転換部門から6%、産業部門から34%、運輸部門から19%、サービス業から19%、家庭から14%が排出されており、産業部門からの排出量が多い。一方で、1990年から2007年にかけて、産業部門からの排出されるCO₂排出量に大きな変化は見られなかったが、2007年から2008年にかけては9.3%の削減を達成している。この背景には、産業部門での省エネ努力に加えて、リーマンショックに端を発した世界的な景気低迷により、産業部門で生産規模の縮小が

なされた点が挙げられる。また、温室効果ガスの削減を達成する一方で、経済発展及び国際市場での競争力をいかに維持していくかという点も重要であり、持続可能な発展を達成するためには工業セクターの技術進歩が必要不可欠であると言える。

こうした議論はこれまでの先行研究でも盛んに行われてきた。近年でのCO₂排出量を考慮した経済的な技術進歩に関する文献では、世界各国の全セクターを対象としたKumar(2006)¹⁾、Lozano(2008)²⁾、また米国電力セクターを対象としたFare(2007)³⁾、Sueyoshi(2009)⁴⁾、加えて中国鉄鋼業セクターを対象としたWei(2007)⁵⁾、藤井(2008)⁶⁾などが挙げられる。一方で、電力及び鉄鋼業以外の部門についてはこれまでほとんど分析対象となっていない。その理由として、工業セクターから排出されるCO₂排出量は主に発電セクターと鉄鋼業から排出されており、その他の業種においては削減効果のインパクトが小さい点、さらに企業別・業種別にデータサンプルを収集することが難しい点などが挙げられる。しかしながら、製造業においては業種によって原材料投入として使用する化石燃料やエネルギー利用プロセス及び製造工程が異なっており、

CO₂ 排出量削減の取り組み方は様々である。こうした背景を踏まえ、業種によって CO₂ 排出量削減に必要となる費用負担や労力が異なる中で、各業種の企業が経済効率性を圧迫せずに CO₂ 排出量の削減を達成しているかどうかを明らかにすることは、今後日本の製造業が国際競争力を高める上で重要である。

こうした背景を踏まえ本研究では、国内製造業 10 業種を対象に、CO₂ 排出量を考慮した生産性(環境生産性)分析を業種別に行い、その分析結果を比較することで、経済効率性を圧迫することなく CO₂ 排出量の削減を達成している業種を明らかにすることを目的とする。加えて、業種間において生産性の構造が時系列でどのように変化しているかにも着目し、各業種にとって望ましい政策のあり方を提言する。

2. 分析方法

(1) 効率性評価手法

本研究では従来の生産性分析に用いる労働、資本などの投入要素(以下、市場投入財)と売上などの望ましい産出(以下、市場産出財)に加えて、CO₂ 排出量などの望ましくない産出(以下、環境産出財)を用いた生産非効率性の評価が可能である Directional Distance Function (DDF)⁷⁾を適用することで効率性評価を行う。市場投入財 x 、市場産出財 y 、環境産出財 b を用いて生産可能集合 $P(x)$ を次のように定義する。

$$P(x) = \{(y, b) | x \text{ can produce } (y, b)\} \quad (1)$$

生産可能集合 $P(x)$ 内に存在するサンプルの非効率性 $D(x, y, b | g_x, g_y, g_b)$ は、サンプルと効率的な生産を達成しているサンプル群で生成されるフロンティアラインとの距離 β と、非負の方向ベクトル (g_x, g_y, g_b) を用いることによって、次のように定義する。

$$D(x, y, b | g_x, g_y, g_b) = \sup \{\beta | (y + \beta g_y, b - \beta g_b) \in P(x - \beta g_x)\} \quad (2)$$

上記のように $D(x, y, b | g_x, g_y, g_b)$ を定義することで、式(3)が成立する。

$$(y, b) \in P(x) \text{ if and only if } D(x, y, b | g_x, g_y, g_b) \geq 0 \quad (3)$$

また式(2)は Chung et al. (1997)⁷⁾によって次のように定式化される。ここでは k 番目のサンプルについての計算式を示す。

$$\begin{aligned} \bar{D}(x_k^l, y_k^m, b_k^r | g_{x^l}, g_{y^m}, g_{b^r}) &= \text{Maximize } \beta_k \quad (4) \\ \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^N \lambda_i x_i^l &\leq x_k^l + \beta_k g_{x^l} \quad l = 1, \dots, L \quad (5) \end{aligned}$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i y_i^m \geq y_k^m + \beta_k g_{y^m} \quad m = 1, \dots, M \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i b_i^r = b_k^r + \beta_k g_{b^r} \quad r = 1, \dots, R \quad (7)$$

$$\lambda_i \geq 0 \quad (i = 1, \dots, N) \quad (8)$$

x_k^l は $L \times N$ の市場投入財データ行列 X の l 行 k 列番目の要素であり、 y_k^m は $M \times N$ の市場産出財データ行列 Y の m 行 k 列番目の要素である。また b_k^r は $R \times N$ の環境産出財データ行列 B の r 行 k 列番目の要素である。制約式(5)、(6)、(7)の左辺は効率的なサンプルで構成されるフロンティアラインを表しており、 λ_i は非効率なサンプルが参照するフロンティア曲線上の点を一意的に決定するパラメータである。制約式(5)、(6)、(7)の右辺は評価対象となるサンプルを用いている。 β は各サンプルとフロンティアラインとの距離を表しており、制約条件を満たす中での最大の距離が生産非効率性 $D(x, y, b | g_x, g_y, g_b)$ となる。以下、環境産出財 b を考慮した計算式から推計される生産性を環境生産性と呼ぶ。また、環境産出財を考慮せず、式(7)を除いた計算式から推計される生産性を市場生産性と呼ぶ。

(2) 生産性変化の推計

DDF の分析結果を用いて生産性変化を計算する手法として Chambers et al.(1998)⁸⁾によって発展してきた Luenberger productivity indicator (LPI) を利用する。LPI は以下の計算式で定義され、生産性変化の要因を技術変化 (Technological change: TECHCH) と効率性変化 (Efficiency change: EFFCH) に分解することが可能である。

$$LPI_t^{t+1} = TECHCH_t^{t+1} + EFFCH_t^{t+1} \quad (9)$$

$$TECHCH_t^{t+1} = \frac{1}{2} \{ \bar{D}^{t+1}(x_t, y_t, b_t) - \bar{D}^{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1}) \}$$

$$- \frac{1}{2} \{ \bar{D}^t(x_t, y_t, b_t) - \bar{D}^t(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1}) \} \quad (10)$$

$$EFFCH_t^{t+1} = \bar{D}^t(x_t, y_t, b_t) - \bar{D}^{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1}) \quad (11)$$

ここで LPI の説明を、図-1 を用いて行う。図-1 では縦軸に市場産出財 y を、横軸に環境産出財 b をとり、 t 年と $t+1$ 年の二期間を考え、4 つの生産主体 A, B, C, K が生産を行い、A, B, C が効率的と評価されているケースである。この場合、フロンティアラインは A, B, C により形成され、K はフロンティアラインを参照することで、生産非効率性の計測が可能となる。以下、K に焦点を当て LPI の説明を行う。点 O, P は、K から伸ばした方向ベクトルとフロンティアラインとの交点を意味する。式(10)、(11)中の $\bar{D}^t(x_t, y_t, b_t)$ は図-1 中の線分 $|K, O_t|$ の距離であり、この距離が大きいほど K は非効率と評価される。また、 $\bar{D}^{t+1}(x_t, y_t, b_t)$ は $t+1$ 年のフロンティアラインで t 年の生

産を評価した場合の非効率性であり、図-1中の線分 $|K_t O_{t+1}|$ である。

ここで、前述した TECHCH を図-1中の記号を用いて表すと、 $TECHCH = (|K_t O_{t+1}| + |K_{t+1} P_{t+1}| - |K_t O_t| - |K_{t+1} P_{t+1}|) / 2 = (|O_t O_{t+1}| + |P_t P_{t+1}|) / 2$ となり、 K_t と K_{t+1} から観測したフロンティアシフトの算術平均となる。EFFCH は図-1中の $|K_t O_t| - |K_{t+1} P_{t+1}|$ で表され、 $EFFCH > 0$ であれば、 K がフロンティアラインにキャッチアップしていることを意味する。LPI は TECHCH と EFFCH の和であり、フロンティアシフトを考慮した生産効率性変化を意味する。

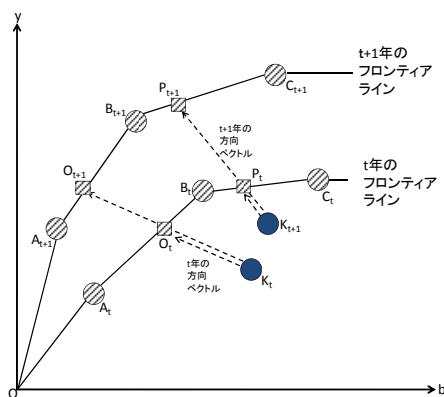


図-1 Luenberger Productivity Indicator の説明

分析に用いる方向ベクトルには、環境生産性分析を行うため、Chambers et al.(1998)⁸⁾を参考にOutput oriented directional vector $(g_o, g_y, g_b) = (0, y, -b)$ を採用した。

環境生産性の変化を考察する上で、その変化が市場生産性の変化によってもたらされたものなのか、環境産出財の排出量変化によるものなのかを明確にする必要がある。従って本研究では、環境産出財の排出量変化が環境生産性に与える寄与度の推計を行う。環境生産性と市場生産性の差を取ることで、環境生産性の変化に環境産出財の変化がどれほど寄与しているかを抽出することが可能である^{9), 10)}。この寄与度の推移を時系列で考察することにより、各業種の企業の環境産出財の変化が環境生産性にどのように寄与しているのかを明らかにする。

3. データ

分析に使用するデータは、市場産出財に売上、環境産出財としてCO₂排出量、市場投入財に資本ストック、労働コスト、原材料コストを用いた。財務データは日経メディアマーケティング社のNEEDSデータベース¹¹⁾から作成した。財務データは2000年価格に基準化して使用する。デフレータには、内閣府から公表されている平成20年度国民経済計算確報内の総資本形成を用いて資本ストック

を基準化、経済活動別総生産を用いて売上を基準化した。さらに総務省統計局が公表している消費者物価指数を用いて労働コストを基準化、卸売物価指数を用いて原材料費の基準化を行った。

CO₂排出量は経済産業省が公表している温室効果ガス排出・算定・報告制度¹²⁾より得た。これら財務データと排出量データをマッチングさせ、企業別のデータセットを作成した。これら企業データを日本標準産業分類で定められた方法に基づき、業種分類を行った。分析対象期間には、CO₂排出量データが利用可能な2006年から2008年であり、分析対象業種は基礎素材型産業であるゴム製品製造業(15社)、パルプ・紙製品製造業(14社)、化学製品製造業(131社)、非鉄金属製造業(58社)、鉄鋼業(41社)、窯業(32社)の6業種と、生活関連型及び加工組立型産業である繊維製品製造業(26社)、一般機械製造業(85社)、電気機器製品製造業(108社)、自動車製造業(62社)の10業種である。分析に使用する企業サンプルは東証一部上場企業であり、大規模企業である。

4. 分析結果

生産性分析の結果を図-2から図-5に、また生産性推移の構造を表すEFFCHとTECHCHの指標の推移を表-1に示す。これらの図表では2006年を基準年(2006年の生産性 = 0)としており、2007年、2008年は生産性変化の累積値の推移を示している。図-2より鉄鋼業を除く基礎素材型産業の5業種で2006年から2008年にかけて環境生産性が上昇しており、特にゴム製品製造業と化学製品製造業で大幅に改善していることが明らかとなった。加えて、図-3よりゴム製品製造業とパルプ・紙製品製造業でCO₂排出量変化のLPIに対する寄与度が上昇していることから、これら二つの業種ではCO₂排出量の変化が環境生産性を大きく押し上げる形で寄与したと言える。一方で、非鉄金属、窯業、紙・パルプ製品製造業では、分析対象期間において大幅な環境生産性の変化は観測されなかった。

鉄鋼業は2007年から2008年にかけて、大幅に環境生産性を悪化させているが、この悪化の要因としてCO₂排出量の変化が影響していることが明らかとなった。こうした結果が得られた背景には鉄鋼業の業種特性が挙げられる。鉄鋼業では規模の生産性が反映されやすい業種であり、大規模で粗鋼を生産することで限界費用や製品当たりのエネルギー消費量を下げることが可能である。従って、鉄鋼業企業にとって、2008年の急激な生産調整に伴う生産規模の縮小は、鉄鋼業企業の財務及び環境パフォーマンスを悪化させたと考えられる。また、財務パフォーマンスについては、鉄鋼業では中・長期での需要予測をもとに設備の増強を行うため、2008年の急激な需要低下が起こった場合には、設備稼働率が低下し資本生産性が悪化する。この資本生産性の悪化も環境生産性を低下させた要

因の一つであると考えられる。実際にデータセットより、鉄鋼業企業の資本当たりの売上高は2007年から2008年にかけて悪化が確認できる。以上より、鉄鋼業の環境生産性が悪化した要因としては、売上に対するCO₂排出量の増加と2008年のリーマンショックによる資本生産性の低下が挙げられる。

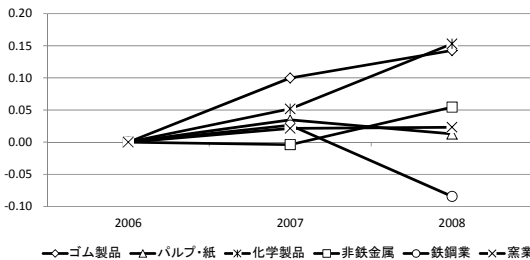


図-2 基礎素材型産業のLPIの推移

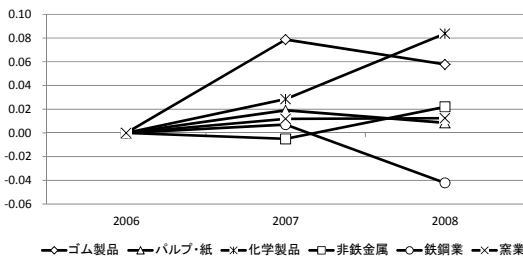


図-3 基礎素材型産業のCO₂排出量変化がLPIに与えた影響

次に生活関連型及び加工組立型産業の分析結果を考察する。図-4より、加工組立型産業では、電気機器製品製造業と自動車製造業が大幅に環境生産性を改善させており、2006年から2008年にかけて環境生産性が10%以上増加している。これは、仮に非効率的な企業がすべて効率的な生産を達成した場合、2006年と同程度の投入財で、2008年には売上を10%上昇させ、CO₂排出量の10%削減を達成していることを意味する。さらに図-5より、CO₂排出量削減分が生産性の改善に大きく寄与していることが分かる。一方で、繊維製品製造業や一般機械機器製造業では、CO₂排出量の変化による生産性への寄与度は小さい。

また、電気機器製品製造業が2006年から環境生産性を改善しているのに対し、自動車製造業は2007年から2008年にかけて環境生産性の改善を達成している。2008年度に売上が落ち込んだにも関わらず自動車製造業で環境生産性が上昇した要因として、労働及び原材料投入の効率化が挙げられる。資本設備に関しては急速な需要変化に対応することが難しく、設備稼働率の低下を避けることは難しい。しかし労働及び原材料投入に関して、自動車製造業各社は即座に対策を講じている。その中でも、期

間従業員や派遣社員などの削減に踏み切り、生産調整に伴う労働生産性の低下を食い止めている。加えて、製造プロセスの効率化によって原材料投入コストの削減を行うとともに、化石燃料消費量の節約によるCO₂排出量の削減も達成している。こうした経営戦略によって、2007年度から2008年度にかけて自動車製造業は環境生産性を上昇させていると推測される。

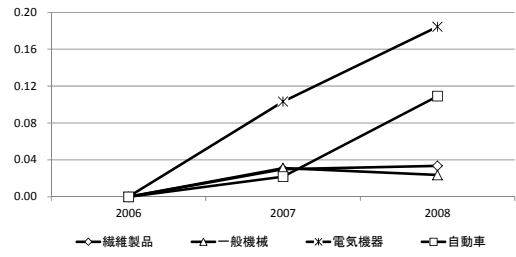


図-4 生活関連・加工組立型産業のLPIの推移

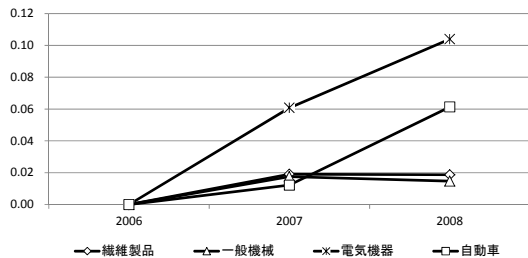


図-5 生活関連・加工組立型産業のCO₂排出量変化がLPIに与えた影響

最後に、各業種における環境生産性の推移の構造について考察する。表-1には、各業種のEFFCHとTECHCHの指標の推移を記載している。これら二つの指標の値によって、環境生産性の推移を、フロンティアシフト(Frontier shift: FS)型、キャッチアップ(Catch up: CU)型、全体的効率改善(Overall Improvement: OI)型に分類した。OI型は2006年度から2008年度にかけてフロンティアライン上の企業の生産効率性は向上したが、同時に非効率的企業の底上げが進んだことにより、業種内格差が大きく変化していない構造である。この構造では、サンプル全体が生産性向上の方向にシフトを達成している。二つ目はFS型であり、フロンティアライン上の企業の生産効率性は向上したが、非効率的企業による底上げが進まず、業種内格差が拡大したケースを指す。三つ目はCU型であり、非効率的企業が生産効率性を改善させ、フロンティア上の効率的な企業との効率性格差を縮小した構造である。

EFFCHとTECHCHの推移から、FS型で環境生産性が推移している業種は、化学製品、繊維製品の2業種であり、CU型は非鉄金属、鉄鋼業の2業種で観測された。また、OI型は、ゴム製品、一般機械、電気機器、自動車製造業

の4業種であり、加工組立型産業では、OI型で環境生産性が推移している結果となった。一方で、パルプ・紙製品業及び窯業では、他の業種と比較して、環境生産性の推移に大きな変化が見られなかった。

表-1 業種別のEFFCHとTECHCHの推移

業種	EFFCH			TECHCH			type
	2006	2007	2008	2006	2007	2008	
ゴム製品	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.10	0.15	OI
パルプ・紙	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	変化なし
化学製品	0.00	-0.01	-0.03	0.00	0.06	0.18	FS
非鉄金属	0.00	0.03	0.04	0.00	-0.04	0.02	CU
鉄鋼業	0.00	-0.02	0.03	0.00	0.05	-0.12	CU
繊維製品	0.00	0.01	-0.03	0.00	0.02	0.07	FS
窯業	0.00	-0.01	0.01	0.00	0.03	0.02	変化なし
一般機械	0.00	-0.04	-0.01	0.00	0.07	0.04	OI
電気機器	0.00	0.04	0.07	0.00	0.06	0.11	OI
自動車	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.11	OI

5. 結論

本研究では、国内製造業企業を対象に、CO₂排出量を考慮した生産性の推移及び、その構造を明らかにした。本研究の結論を下記に記す。

1. ゴム製品、化学製品、電気機器製品、自動車製造業の4業種で2006年から2008年にかけて、CO₂排出量を考慮した生産性が大幅に改善している。
2. 鉄鋼業では2007年から2008年にかけて環境生産性が悪化している。その要因の一つとして売上当たりのCO₂排出量の増加が寄与していることが明らかとなった。
3. 自動車製造業では2008年のリーマンショックによる需要低迷にも関わらず、2007年から2008年にかけて環境生産性を改善させている。その要因には、(1)需要に応じた労働コストの縮減や(2)CO₂排出量の削減を達成が挙げられる。
4. 加工組立型では、効率的な企業と非効率的な企業の両方で生産効率性の改善を達成しており、業界全体で効率性改善を達成している。一方で、化学製品製造業や繊維製品製造業では、フロンティアライン上の効率的な企業と非効率的な企業との間の効率性格差が拡大しているため、ボトムアップを促すような試みが重要であると言える。

謝辞：本研究は、文部科学省の科学研究費補助金基盤研究B、特別研究員奨励費及び環境省の環境経済政策研究の援助のもとに行われた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Kumar, S. (2006) Environmentally sensitive productivity growth: A global analysis using Malmquist-Luenberger index. *Ecological Economics*, 56(2), 280-293.
- 2) Lozano, S. and E. Gutiérrez (2008) Non-parametric frontier approach to modelling the relationships among population, GDP, energy consumption and CO₂ emissions. *Ecological Economics*, 66(4), 687-699.
- 3) Färe, R., S. Grosskopf and C.A. Pasurka (2007) Environmental production functions and environmental directional distance functions. *Energy*, 32(7), 1055-1066.
- 4) Sueyoshi, T., M. Goto and T. Ueno (2010) Performance analysis of US coal-fired power plants by measuring three DEA efficiencies. *Energy Policy*, 38(4), 1675-1688.
- 5) Wei, Y.M., H. Liao and Y. Fan (2007) An empirical analysis of energy efficiency in China's iron and steel sector. *Energy*, 32(12), 2262-2270.
- 6) 藤井 秀道・金子 慎治 (2008) 中国鉄鋼業の二酸化炭素排出削減戦略 - 限界削減費用を考慮した地域別最適戦略 - . 土木学会環境システム研究論文集, 36, 59-67.
- 7) Chung, Y. H., R. Färe and S. Grosskopf (1997) Productivity and undesirable output: A directional distance function approach. *Journal of Environmental Management*, 51: 229-240.
- 8) Chambers, R., Y. Chung and R. Färe (1996) Benefit and distance functions. *Journal of Economic Theory* 70(2), 407-419.
- 9) Kaneko, S., Managi, S., Environmental productivity in China, *Economic Bulletin* 17(2): 1-10, 2004.
- 10) Managi, S. Pradyot, R. J., Productivity and environment in India, *Economic Bulletin* 17(1), 1-14, 2007.
- 11) 日本経済新聞社, NEEDS データベース, 2007.
- 12) 環境省, 温室効果ガス排出量・吸収量データベース <http://www-gio.nies.go.jp/aboutghg/nir/nir-j.html> (2011年7月30日アクセス)

PRODUCTIVITY ANALYSIS CONSIDERING CO₂ EMISSION: EMPIRICAL STUDY FOR TEN INDUSTRIES IN JAPAN

Hidemichi FUJII, Shunsuke MANAGI and Shinji Kaneko

The objective of this study is to clarify productivity change considering CO₂ emission in ten Japanese manufacturing sectors. We apply directional distance function approach and Luenberger productivity indicator to estimate productivity change. Our main findings are (1) Productivity considering CO₂ emission had been improved rapidly from 2006 to 2008 in rubber, chemical, electric product, and transportation equipment industries. (2) Steel industry decreased their productivity from 2007 to 2008 due to increasing CO₂ emission. (3) Processing and assembly industry improved productivity in both efficient and inefficient firms. However, technological efficiency gap between efficient firms and inefficient firms had become larger in chemical and textile industries. This result implies the bottom up approach is effective to improve productivity in chemical and textile industries.