

環境負荷物質の排出を考慮した事業所のパフォーマンス評価

中 野 牧 子*

概 要

深刻化する環境問題に対して真摯な対応を迫られる今日においては、企業のパフォーマンスを評価する際に、環境負荷物質の排出量を考慮する必要がある。本研究では、包絡分析法(DEA: Data Envelopment Analysis)において、どのように環境負荷物質が考慮されているのか、近年の研究をふりかえるとともに、その手法を日本の包装容器メーカーの事業所データに適用し、パフォーマンス評価を行うことを目的とする。分析の結果、この企業に関しては、環境負荷物質を考慮して測定したパフォーマンスが、考慮しないパフォーマンスよりもやや高いという結果が得られた。

1. はじめに

包絡分析法(DEA: Data Envelopment Analysis)は、事業所のパフォーマンスを評価する手法として広く用いられている。DEAは、Charnes et al. (1978) 及び Banker et al. (1984) によって開発され、最も効率的な事業所が構成する生産可能性フロンティアをノンパラメトリックに推定し、このフロンティアからの距離に基づいて、他の事業所の効率性を測定する手法である。この手法の利点は、インプットとアウトプットが複数ある生産技術を、技術の関数形を特定することなく表現できる点にある。

多くの場合、生産活動に投入した生産要素と、生産された製品・サービスから事業所のパフォーマンスが評価されている。しかし、事業活動によって生み出されるのは、製品・サービスといった、事業所の利益につながる望ましいもの(以下「グッズ」と呼ぶ)だけではない。環境負荷物質のように、社会にとって望ましくないもの(以下「バズ」と呼ぶ)も発生する。近年、環境問題が厳しさを増す中では、インプットからグッズを生産するパフォーマンスがいかに優れていても、バズを大量に発生させているのではそのような生産方法は望ましいとは言い難い。このため、DEAによるパフォーマンス評価においても、製品・サービスといったグッズとともに、環境負荷物質というバズが結合生産されるケースを考慮する方法が開発されてきた。

本研究では、DEAにおいて、環境負荷物質がどのように扱われてきたのか、近年の研究を振り返るとともに、その手法を日本の包装容器メーカーの事業所データに適用し、パフォーマンス

*名古屋学院大学経済学部 〒456-8612 愛知県名古屋市熱田区熱田西町1-25 nakano@ngu.ac.jp

本研究は、2006年度名古屋学院大学研究奨励金による研究成果である。

評価を行うことを目的とする。

本稿の構成は以下の通りである。第2節で環境負荷物質を考慮したDEAのモデルを振り返る。第3節で包装容器メーカーのパフォーマンス評価を行う。第4節では環境効率性について考察を加える。第5節は結論である。

2. 環境負荷物質を考慮したモデル

DEAは、生産活動のインプット及びアウトプットのデータから効率性を測定する。生産要素であるインプットは、少ないほど良いとされる一方、アウトプットはたくさん生産されるほど良いとされる。しかし、この想定はアウトプットとして環境負荷物質が発生する場合には問題がある。なぜなら環境負荷物質は少ないほど望ましいため、アウトプットの中に、多いほど望ましいものと、少ないほど望ましいものが混在することになるからである。このため、アウトプットの中の、グズとバズを区別するために以下のような方法が提案されてきた。大別すると4つに分類できる。

- ① 非線形のモデルを構築する。
- ② 環境負荷物質に対して弱い処分可能性 (weak disposability) の制約をかける。
- ③ 環境負荷物質をインプットとして扱う。
- ④ 環境負荷物質のデータを変換する。

①は、Färe et al. (1989) によって提案されたものである。目的関数は、所与のインプットと技術的制約のもとで、グズを一樣に Γ 倍拡大し、バズを一樣に $\frac{1}{\Gamma}$ 倍縮小するときの、最大の Γ を求めるものである。このため非線形のモデルになっている。

上記の方法のうち、③は、「少ないほど望ましい」という性質が、バズとインプットで共通であることから、バズをインプットとみなしてDEAのモデルを構築するものである。しかし厳密には、バズはアウトプットとして結合生産されるため、生産プロセスを正確に反映しておらず、あまり望ましくない。

このため、以下では③以外の方法のうち、線形計画法で解くことが可能な②④について詳しく考察する。

2.1 弱い処分可能性の制約をかけるモデル

Färe et al. (1989) は、バズに対して弱い処分可能性の制約をかける手法を提案した。この方法は、その後、Färe et al. (1996), Tyteca (1997), Färe and Grosskopf (2004), Ball et al. (2001) 等でも使用されている。その概要は以下の通りである。

今、インプット $x \in \mathbf{R}_+^N$ からアウトプットとしてグズ $y \in \mathbf{R}_+^M$ とバズ $b \in \mathbf{R}_+^J$ の両者が生産されるケースを考える。 $P(x)$ を生産可能性集合とすると、弱い処分可能性の制約は以下の形で表せる。

if $(y, b) \in P(x)$ and $0 \leq \theta \leq 1$ then $(\theta y, \theta b) \in P(x)$

すなわち、インプット一定のもとで、バズを削減するためには、同じ割合だけグッズも削減することを意味している。これは、環境負荷物質の削減にインプットを費やしたために、その分製品・サービスに投入できるインプットが減少するためとも考えられる¹⁾。

一方、グッズについては強い処分可能性 (strong disposability) の性質が成り立つと考えられる。すなわち

if $(y, b) \in P(x)$ and $y' \leq y$ then $(y', b) \in P(x)$

このように、バズに関しては弱い処分可能性、グッズについては強い処分可能性の性質を持つと想定することで、バズをアウトプットとして捉えながらもグッズと区別することが可能になる。今、 $k=1, \dots, K$ の事業所があるとする。このとき、生産可能性集合は以下のように表せる。

$$P(x) = \{(y, b) : \sum_{k=1}^K z_k y_m^k \geq y_m, \quad m=1, \dots, M, \\ \sum_{k=1}^K z_k b_j^k = b_j, \quad j=1, \dots, J, \\ \sum_{k=1}^K z_k x_n^k \leq x_n, \quad n=1, \dots, N, \\ z_k \geq 0, \quad k=1, \dots, K \quad \}$$
(1)

ただし、 z_k は非負ベクトルである²⁾。

以上のような生産技術のもとで、インプット・グッズ・バズのうち何を所与とし、何を拡大または縮小させることでパフォーマンスを評価するのかによって複数の方法が考えられる³⁾。

2.1.1 インプット指向型 (input orientation)

Färe et al. (1996) は、グッズとバズを所与とし、インプットをどれだけ削減できるかという観点から効率性を測定している⁴⁾。すなわち、事業所 k' の効率性スコアは以下の式から導出さ

1) また、これに付随する性質として、次のものがある。

$$(y, b) \in P(x) \text{ and } b=0 \text{ then } y=0$$

すなわち、環境負荷物質をゼロにできるのは、製品・サービスを生産しない場合である。もし、環境負荷物質をゼロにしながら、製品・サービスを生産できるのであれば、その場合は環境問題が発生していないことを意味する。

2) なお、このモデルは規模に関して収穫一定 (CRS : Constant Returns to Scale) のフロンティアを想定している。

3) 以下は、Li and Cheng (2004) の分類を参考にしている。

4) さらに、バズは考慮しないで測定した効率性と、グッズとバズ双方を考慮した効率性の比率を計算

れる。この ρ が小さい程、インプットを節約できる余地が残されていることになり、現状が非効率であることを意味する。

$$\begin{aligned}
 & \min_{\rho, z} \quad \rho \\
 & \text{s.t.} \quad \sum_{k=1}^K z^k y_m^k \geq y_m^{k'}, \quad m=1, \dots, M, \\
 & \quad \quad \sum_{k=1}^K z^k b_j^k = b_j^{k'}, \quad j=1, \dots, J, \\
 & \quad \quad \sum_{k=1}^K z^k x_n^k \leq \rho x_n^{k'}, \quad n=1, \dots, N, \\
 & \quad \quad z_k \geq 0, \quad k=1, \dots, K
 \end{aligned} \tag{2}$$

2.1.2 バズ指向型 (bads orientation)

Tyteca (1997) は、グッツ及びインプットを所与とし、バズをどれだけ削減できるかという観点から効率性を測定している。この場合、事業所 k' の効率性スコアは以下の式から導出される。この ϕ が小さいほど、バズを削減する余地が残されていることになり、現状が非効率であることを意味する。

$$\begin{aligned}
 & \min_{\phi, z} \quad \phi \\
 & \text{s.t.} \quad \sum_{k=1}^K z^k y_m^k \geq y_m^{k'}, \quad m=1, \dots, M, \\
 & \quad \quad \sum_{k=1}^K z^k b_j^k = \phi b_j^{k'}, \quad j=1, \dots, J, \\
 & \quad \quad \sum_{k=1}^K z^k x_n^k \leq x_n^{k'}, \quad n=1, \dots, N, \\
 & \quad \quad z_k \geq 0, \quad k=1, \dots, K
 \end{aligned} \tag{3}$$

2.1.3 グッツ指向型 (goods orientation)

Li and Cheng (2004) では、インプットとバズを所与とし、グッツをどれだけ増やせるかという観点から効率性を測定することも可能である、としている。この場合、事業所 k' の効率性スコアは以下の式から導出される。この δ が大きいほど、グッツを増やす余地が残されていることになり、現状が非効率であることを意味する。

$$\max_{\delta, z} \quad \delta$$

し、環境パフォーマンスの指標を求めている。この他、Yaisawarng and Klein (1994) はインプットの種類を細かく分類して分析を行っている。

$$\begin{aligned}
 \text{s.t. } & \sum_{k=1}^K z^k y_m^k \geq \delta y_m^{k'}, \quad m=1, \dots, M, \\
 & \sum_{k=1}^K z^k b_j^k = b_j^{k'}, \quad j=1, \dots, J, \\
 & \sum_{k=1}^K z^k x_n^k \leq x_n^{k'}, \quad n=1, \dots, N, \\
 & z_k \geq 0, \quad k=1, \dots, K
 \end{aligned} \tag{4}$$

2.1.4 インプット及びバズ指向型 (input and bads orientation)

Tyteca (1997) は、上記のバズ指向型に加え、所与のグズを生産するためにバズ及びインプットをどれだけ減らせるかという観点から効率性を評価している。これはバズとインプットの同程度の縮小がどこまで可能かを調べるもので、事業所 k' の効率性スコアは以下の式から導出される。

$$\begin{aligned}
 \min_{\eta, z} \quad & \eta \\
 \text{s.t. } & \sum_{k=1}^K z^k y_m^k \geq y_m^{k'}, \quad m=1, \dots, M, \\
 & \sum_{k=1}^K z^k b_j^k = \eta b_j^{k'}, \quad j=1, \dots, J, \\
 & \sum_{k=1}^K z^k x_n^k \leq \eta x_n^{k'}, \quad n=1, \dots, N, \\
 & z_k \geq 0, \quad k=1, \dots, K
 \end{aligned} \tag{5}$$

2.1.5 グズ及びバズ指向型 (goods and bads orientation)

Färe and Grosskopf (2004), Ball et al. (2001) は、所与のインプットのもとで、グズを増やし、バズを減らす余地がどれくらい残っているかという観点から効率性を評価している⁵⁾。事業所 k' の効率性スコアは以下の式から導出される。 β が大きいほど、グズを増やし、バズを減らす余地が残されており、現状が非効率であることを意味する。

$$\begin{aligned}
 \max_{\beta, z} \quad & \beta \\
 \text{s.t. } & \sum_{k=1}^K z^k y_m^k \geq y_m^{k'} + \beta g_{ym}, \quad m=1, \dots, M, \\
 & \sum_{k=1}^K z^k b_j^k = b_j^{k'} - \beta g_{bj}, \quad j=1, \dots, J,
 \end{aligned}$$

5) グズを増やし、バズを減らす非線形な方法としてはFäre et al. (1989) がある。

$$\sum_{k=1}^K z^k x_n^k \leq x_n^{k'}, \quad n=1, \dots, N,$$

$$z_k \geq 0, \quad k=1, \dots, K \quad (6)$$

ここで、 $\mathbf{g}=(\mathbf{g}_y, -\mathbf{g}_b)$ は指向性ベクトル (directional vector) である。

2.2 環境負荷物質の変換

弱い処分可能性の制約をかけずにバズを適切に扱う方法として、Seiford and Zhu (2002) は、変換ベクトル (translation vector) w から、バズを引くことで、バズのデータを変換する方法を提案している。

$$\bar{b}_j = -b_j + w_j \quad \text{ただし, } \bar{b}_j > 0 \quad (7)$$

バズの排出量 b_j が多い事業所ほど、変換後の $\bar{b}_j$ は小さくなる。このため、「少ないほどパフォーマンスが悪い」とされるグズと共通の性質を持つことになる。この $\bar{b}_j$ を用いて、弱い処分可能性の制約をかけずに DEA を行う。

$$\max_{\sigma, z} \quad \sigma$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{k=1}^K z^k y_m^k \geq \sigma y_m^{k'}, \quad m=1, \dots, M,$$

$$\sum_{k=1}^K z^k \bar{b}_j^k \geq \sigma \bar{b}_j^{k'}, \quad j=1, \dots, J,$$

$$\sum_{k=1}^K z^k x_n^k \leq x_n^{k'}, \quad n=1, \dots, N,$$

$$z_k \geq 0, \quad k=1, \dots, K \quad (8)$$

3. 包装容器メーカーのパフォーマンス評価

以上のように、先行研究では環境負荷物質の扱いについて様々な方法が考案されている。ここではそれらの方法を用いて、事業所のパフォーマンス評価を行う。本研究では、環境報告書上で、分析に必要なデータを公開している包装容器メーカーをサンプルとしてとりあげた。

本研究では2004年度の13事業所に関するデータを入手した。インプットは原材料・資本・従業員数、グズは製品、バズは、二酸化炭素排出量、及び廃棄物発生量のデータを利用する。従業員数及び資本は有価証券報告書から、原材料・製品・二酸化炭素・廃棄物に関しては環境報告書より入手した。これらのデータを使って表1のような組み合わせで三つのモデルを推定した。

インプットはすべてのモデルで共通だが、アウトプットは異なる。Goods モデルは、アウトプットとして製品生産量だけを考慮しており、環境負荷物質は扱わないモデルである。一方CO₂モデル及びWaste モデルは製品に加え、二酸化炭素排出量と廃棄物発生量をそれぞれ考慮している。

表1 インプット・アウトプットの組み合わせ

		CO ₂ モデル	Waste モデル	Goods モデル
インプット	従業員数	X	X	X
	資本	X	X	X
	原材料	X	X	X
グッツ	製品	X	X	X
バツズ	二酸化炭素	X		
	廃棄物		X	

以上の三つのモデルに対し、2節で述べた方法をそれぞれ適用する。

表2 指向型の分類

	指向型
(a)	インプット
(b)	バツズ
(c)	グッツ
(d)	インプット及びバツズ
(e)	グッツ及びバツズ
(f)	グッツ及びバツズ (バツズはデータ変換)

以上のモデルをDEAで推定し、効率性スコアを求めた。各モデルの効率性スコアの平均値を表3に示している。なお、表3においてはいずれのモデルにおいてもフロンティア上で操業する効率的な事業所は1の値をとる⁶⁾。

まず、(a)～(f)のモデルにおいて、いずれも環境負荷物質を考慮したモデル(CO₂モデル及びWasteモデル)の方が環境負荷物質を考慮しないモデル(Goodsモデル)よりも、高い効率性を示す結果となっている。この企業では、省エネルギー対策として、使用燃料をより二酸化炭素排出量の少ないLNGに転換したり、コージェネレーション設備を導入したり、燃料効率の向上

6) ただし推定上は、指向型の違いによって、フロンティア上の事業所がとる値は異なる。(a)・(b)・(d)では1、(e)では0の場合に効率적であり、(c)・(f)では大きな値をとるほど非効率である。このため表3には(e)では測定された値を1から引いたものの平均を記載し、(c)・(f)では測定された値の逆数の平均を記載している。

などに努めている。また、廃棄物対策については、分別精度を向上させ、有価物として引き取ってもら量を増加させる等の対策を行っている。これらの対策に一定の効果があるものと考えられる。

表3 効率性スコア平均値

指向型	CO ₂ モデル	Waste モデル	Goods モデル
(a) インプット	0.96	0.92	0.88
(b) バッズ	0.62	0.49	
(c) グッズ	0.97	0.91	
(d) インプット及びバッズ	0.97	0.92	0.88
(e) グッズ及びバッズ	0.88	0.89	0.84
(f) グッズ及びバッズ (バッズはデータ変換)	0.89	0.89	0.88

なお、バッズ指向型においては、他の指向型と比べ効率性が低めにでている。DEAでは最もパフォーマンスの優れた事業所を基準とし、その事業所との乖離が大きいほど非効率と判断される。このため、環境取組に事業所間でかなり違いがあるならば、非効率と判断される事業所も多くなる。この企業に関しては、積極的に上記のような環境対策に取り組んでいるものの、省エネルギーについて先進的な設備の導入を進めている事業所はまだ一部である。また、本研究では廃棄物の「発生量」をデータとして用いているため、廃棄物の発生抑制の観点から効率性を分析していることになる。このため、発生抑制よりも、発生後のリサイクルを重視している事業所については効率性が低くでてしまう。従って、Wasteモデルにおいてパフォーマンスが低いからといって、廃棄物対策全体が劣っているという判断は適切ではない。特にバッズ指向型のWasteモデルは、所与のグッズ及びインプットのもとで発生する廃棄物をどれだけ減らせるかという観点から効率性を測定しているため、リサイクルに重点を置いた対策を行っている場合に、他の指向型と比べ低い数字となっている可能性が高い。

また、その他のモデルとしては、「インプット指向型」「グッズ指向型」及び「インプット及びバッズ指向型」が相対的に近いスコアをとり、「グッズ及びバッズ指向型」及び「グッズ及びバッズ指向型（バッズはデータ変換）」が相対的に近いスコアをとっている。

Li and Cheng (2004) は、企業の財務パフォーマンスに関わる効率性指標と、環境パフォーマンスに関わる効率性指標が混在することを望ましくないとしている。例えば「(e) グッズ及びバッズ指向型」では、グッズを増やすと同時にバッズもそれと同程度に減らすという観点から効率性の測定が行われる。事業所の効率性を総合的に捉える意味では有用な手法であるが、実際に環境負荷の低減や製品の生産効率の改善といった個別の対策を考える場合に、両方の情報が混在してしまうと具体的な対策をたてにくいのではないかと、としている。このためLi and Cheng (2004)

では、特にグッズ指向型とバツズ指向型を区別して扱うことが重要であるとしている。これは「インプット及びバツズ指向型」にもあてはまる。

4. 環境効率性の測定

製品生産に関する効率性と、環境対策の効率性を分離して把握するという観点からは、Färe et al. (1996) で提案されているような、環境効率性指標も重要である。彼らは、インプット・グッズ・バツズの三者を用いて測定した効率性は、インプットとグッズからなる生産活動に関する効率性と、環境負荷物質の低減に関する環境効率性からなると考えた。そこで、環境効率性 Eff_{env} は、インプットとグッズのみから測定した効率性スコア ρ_{market} とインプット・グッズ・バツズの3種類を用いて測定したスコア ρ_{all} の比率として次のように求められると考えた。

$$Eff_{env} = \frac{\rho_{market}}{\rho_{all}} \quad (9)$$

ρ_{all} は2節の(2)式から求めることができる。 ρ_{market} は、バツズのデータは用いず、以下の(10)式で求める。

$$\begin{aligned} \min_{\rho_{market}, z} \quad & \rho_{market} \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{k=1}^K z^k y_m^k \geq y_m^{k'}, \quad m=1, \dots, M, \\ & \sum_{k=1}^K z^k x_n^k \leq \rho_{market} x_n^{k'}, \quad n=1, \dots, N, \\ & z_k \geq 0, \quad k=1, \dots, K \end{aligned} \quad (10)$$

(9) 式に従って、包装容器メーカーの環境効率性を測定した結果が、表4である。また、各事業所の効率性を表したものが表5である。Aは環境効率性スコアが1の事業所、Bは0.9以上1未満の事業所、Cは0.8以上0.9未満の事業所、Dは0.7以上0.8未満の事業所、Eは0.6以上0.7未満の事業所である。13事業所中9の事業所で、同じランクとなっており、省エネルギーが進んでいる事業所ほど廃棄物の発生抑制も進んでいることを意味している。一方、事業所4と事業所6は、Waste モデルについてはBランクであるものの、CO₂ モデルについてはそれぞれEランクとDランクになっている。

表4 環境効率性平均値

CO ₂ モデル	Waste モデル
0.92	0.96

表 5 環境効率性

事業所名	CO ₂ モデル	Waste モデル
1	A	A
2	B	B
3	C	B
4	E	B
5	A	A
6	D	B
7	B	B
8	A	A
9	A	A
10	C	C
11	B	C
12	B	B
13	B	B

5. まとめ

環境問題への取り組みがこれまで以上に求められる今日、事業所のパフォーマンスを評価する際にも、環境負荷物質の排出量を考慮することが重要である。本研究ではDEAを用いたパフォーマンス評価において、環境負荷物質がどのように扱われてきたのか、主要な測定方法をレビューした。環境負荷物質の扱いは大別すると二つある。第一の方法は、環境負荷物質には弱い処分可能性の制約をつける一方、製品や生産要素には強い処分可能性を想定することで、アウトプットの中のグッズとバズを区別するものである。第二の方法は、環境負荷物質のデータを適切に変換することで、弱い処分可能性の制約をかけずにDEAを行う方法である。これらの手法を日本の包装容器メーカーの事業所レベルデータに適用して効率性を測定した。この結果、この企業については、環境負荷物質を考慮して測定したパフォーマンスが、考慮しないパフォーマンスよりもやや高いという結果が得られた。また、二酸化炭素を考慮したモデルと、廃棄物を考慮したモデルでは、両者はほぼ同じか、廃棄物のモデルの方が悪いという結果が得られた。しかし、本研究では、廃棄物の発生量のデータを用いており、発生後マテリアルリサイクルやサーマルリサイクルによって埋立量を減らすといった取り組みを行っている事業所もあることから、この結果だけを見て、廃棄物対策全般が劣っていると判断することは適切ではない。

事業所のパフォーマンスを評価する際には、製品生産活動の効率性や環境取組の効率性等、用途に応じた観点から評価し、今後の対策にフィードバックできるよう、環境負荷物質も分析に組み入れていく必要がある。

〈参考文献〉

- Ball, V. E., Färe, R., Grosskopf, S., Nehring, R., 2001. Productivity of the U. S. agricultural sector: the case of undesirable outputs. In Hulten, C. R., Dean, E. R., Harper, M. J. Eds., *New Developments in Productivity Analysis*, Chicago: University of Chicago, 541–585.
- Banker, R. D., Charnes, A., Cooper, W. W., 1984. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in Data Envelopment Analysis. *Management Science* 30, 1078–1092.
- Charnes, A., Cooper, W. W., Rhodes, E., 1978. Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research* 2, 429–444.
- Färe, R., Grosskopf, S., Lovell, C. A. K., Pasurka, C., 1989. Multilateral productivity comparisons when some outputs are undesirable: a nonparametric approach. *The Review of Economics and Statistics* 71, 90–98.
- Färe, R., Grosskopf, S., Tyteca, D., 1996. An activity analysis model of the environmental performance of firms — application to fossil-fuel-fired electric utilities. *Ecological Economics* 18, 161–175.
- Färe, R., Grosskopf, S., 2004. Modeling undesirable factors in efficiency evaluation: comment. *European Journal of Operational Research*, 157, 242–245.
- Li, Sung-Ko and Cheng, Yuk-Shing, 2004. Technical efficiency versus environmental efficiency: an application to the industrial sector in China. *BRC Papers on China*, Series No. CP 200401.
- Seiford, L. M., Zhu, J., 2002. Modeling undesirable factors in efficiency evaluation. *European Journal of Operational Research* 142, 16–20.
- Tyteca, D., 1997. Linear programming models for measurement of environmental performance of firms — concepts and empirical results. *Journal of Productivity Analysis* 8, 183–197.
- Yaisawarng, S., Klein, J. D., 1994. The effects of sulfur dioxide controls on productivity change in the U. S. electric power industry. *The Review of Economics and Statistics* 76, 447–460.