

DEA を用いたサプライチェーンにおける 環境視点の改善活動の評価

村田康一*

Evaluating Environmental Kaizen Activity in Supply Chain with DEA

Koichi MURATA*

Keywords: Supply Chain Management, Environmental Kaizen, Data Envelopment Analysis (DEA).

1. はじめに

持続可能な企業活動を実現するために、製品やサービスの生産から消費、また廃棄に至る全体の管理をつかさどるサプライチェーンマネジメント (Supply Chain Management: SCM) では、様々な環境への配慮が行われている。また、その取り組みの顧客や社会への公表は、企業の社会的責任 (Corporate Social Responsibility: CSR) の観点から年々重要となっている。このような状況において、Murata¹⁾は環境視点の改善活動の評価フレームワークを Data Envelopment Analysis (DEA)²⁾⁻⁴⁾により提案している。本稿は、これを用い、株式会社日経リサーチが実施している環境経営度調査のデータから、国内製造業 17 業種の環境視点の改善活動について評価することを目的とする。

本稿は 5 章で構成する。次章 (第 2 章) では、本稿で用いる Murata¹⁾の評価法について説明する。第 3 章では、本稿で評価する環境経営度調査のデータについて説明する。第 4 章では、第 2 章で紹介した方法により、第 3 章で取り上げたデータの分析結果を記述し、第 5 章で結論を述べる。

2. 環境視点の改善活動の評価法

本章では、本稿で用いる Murata¹⁾による方法論について説明する。ここでは、次節 (2.1 節) で説明する評価フレームと、2.2 節で説明する評価フレームの要素である評価システムについて記述する。

2.1 評価フレーム

QCD と略される品質 (Quality)、コスト (Cost)、納期 (Delivery) といった従来の管理指標は、製品やサービスといった生産活動のアウトプットとして顧客から評価される。これに対して、近年重要性が増している環境 (Environmental) という管理指標については、上述に加えて、資材調達から生産、完成品物流、消費、廃棄、リサイクルといった活動、すなわち、顧客が通常目にすることがないサプライチェーンにおける活動が評価対象となる。そのため、企業では、環境報告書の発行や工場見学による現場紹介などを通して、社会に取り組みを公表する必要がある。このような背景から、環境視点の改善活動では、単に成果を出せばよいというわけではなく、その公表活動の評価も重要になる。

QCD のような従来型の改善活動評価は、Fig. 1 に示す評価フレームで行われる。すなわち、フレーム内にある評価システムには、改善プロジェクトの実施結果が入

*日本大学生産工学部マネジメント工学科教授

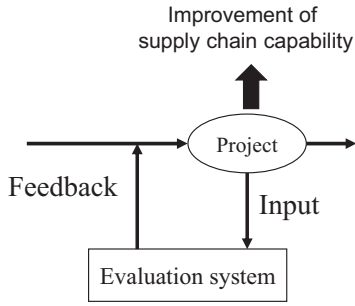


Fig.1 Conventional Kaizen evaluation system

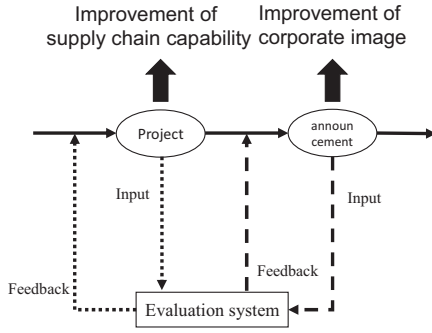


Fig.2 Enviromental Kaizen evaluation system

力され、その評価結果が出力、該当プロジェクトへフィードバックされる。

これに対して、環境視点の改善活動では、Fig. 2のような評価フレームとなる。この中では、改善活動の実施結果に加え、その公表状況についても評価対象とする。これにより、改善活動によるサプライチェーン性能と、公表活動によるCSR性能の両視点からの評価がなされる。

2.2 評価システム

上述の Fig. 2 の評価システムは、以下の2種類のモデルを含んでいる。これらは、線形計画問題におけるDEAを縮退したモデルである。一般にDEAは、評価対象となる事業体の成果（出力）と、そこに至る資源（入力）を比較し、前者が大きく、後者が小さいほど優れていると判定する手法である。2要素、すなわち、入力に対する出力の比率の最大化が目的関数となる。

これに対し、本モデルは、入力もしくは出力の1要素のみを考える。この縮退により、各要素の状況を明らかにする。なお、以下の説明では、事業体を業種、入力を改善プロジェクトの実施状況、出力を改善活動の公表状況とする。

モデル1：改善活動の実施評価モデル

定式化を式(1)から(3)に示す。この中では、各業種が複数の改善プロジェクトを実施している状況を想定する。目的関数値 I_{i_0} は、評価ターゲットとなる業種（事業体） i_0 の改善実施の状況を示す値である。

求解では、複数の改善プロジェクトの実施状況につい

て、業種間で比較し、各業種の値が最大1となる制約下で、業種 i_0 の改善プロジェクト実施が最も評価される値を探索する。

<目的関数>

$$\text{Max} \sum_{j=1}^s I u_j I_{ji_0} (= I_{i_0}) \quad (1)$$

（評価される業種 i_0 の改善実施状況を示す値）

<制約条件>

$$\sum_{j=1}^s I u_j I_{ji} \leq 1 \quad (2)$$

（業種 i の改善実施状況を示す値の制約条件）

$$I u_j \geq 0 \quad (3)$$

（改善プロジェクト j の重みづけ係数の非負条件）

<使用記号>

I_{i_0} ：評価される業種 i_0 の改善実施状況を示す値

I_{ji} ：業種 i の改善プロジェクト j の実施状況を示す値

$I u_j$ ：改善プロジェクト j の重みづけ係数

i ：業種の添字

i_0 ：評価される業種の添字

j ：改善プロジェクトの添字

s ：総改善プロジェクト数

モデル2：改善活動の公表評価モデル

本モデルの定式化を(4)から(6)式に示す。考え方はモデル1と同様であり、モデル1の改善プロジェクトを公表活動に置き換えたものがモデル2となる。

このモデルでは、各業種が複数の公表活動を行っている状況を想定する。目的関数値 D_{i_0} は、評価ターゲットとなる業種 i_0 の公表活動の状況を示す値である。求解では、複数の公表活動について、業種間で比較を行い、各業種の値が最大1となる条件下で、業種 i_0 の公表活動が最も評価される値を探索する。

<目的関数>

$$\text{Max} \sum_{k=1}^t D u_k D_{ki_0} (= D_{i_0}) \quad (4)$$

（評価される業種 i_0 の公表活動状況を示す値）

<制約条件>

$$\sum_{k=1}^t D u_k D_{ki} \leq 1 \quad (5)$$

（業種 i の公表活動状況を示す値の制約条件）

$$D u_k \geq 0 \quad (6)$$

（公表活動 k の重みづけ係数の非負条件）

<使用記号>

D_{i_0} ：評価される業種 i_0 の公表状況を示す値

D_{ki} ：業種 i の公表活動 k の状況を示す値

$D u_k$ ：公表活動 k の重みづけ係数

i : 業種の添字
 i_0 : 評価される業種の添字
 k : 公表活動の添字
 t : 総公表活動数

3. 分析データ

本稿では、株式会社日経リサーチが1997年より実施している環境経営度調査を利用する。この調査では各業種の環境に関する取り組み状況が示されている。本稿ではこのうち、以下に示す製造業17業種の7種類の改善プロジェクトと3種類のCO₂排出量の公表活動に関する2018年のデータを用いる⁵⁾。

<業種>

1) 食品, 2) 繊維, 3) パルプ・紙, 4) 化学, 5) 医薬品, 6) 石油, 7) ゴム, 8) 窯業, 9) 鉄鋼, 10) 非鉄金属および金属製品, 11) 機械・造船, 12) 電気機器, 13) 自動車・自動車部品・その他輸送機器, 14) 精密機器, 15) 印刷, 16) 軽工業, 17) その他製造
※1)～17)の標記は、以下のTable 1～6で利用

<改善プロジェクト>

X1: 輸送手段を変更するモデルシフト
X2: 低燃費車や低公害車へのシフト
X3: ルート変更や物流拠点集約等輸送距離の短縮
X4: 積載効率を高める為の梱包材・包装材の工夫
X5: 他社との共同配送
X6: 省エネルギー運転の推奨などによる燃費向上
X7: その他
※ X1～X7の表記は、以下のTable 1, 4で利用

<公表活動>

Y1: 工場までの輸送, 配送に伴うCO₂排出量の公表
Y2: 工場からの輸送, 配送に伴うCO₂排出量の公表
Y3: 製品廃棄時の輸送, 処理に伴うCO₂排出量の公表
※ Y1～Y3の表記は以下, Table 2, 6で利用

各業種の改善活動と公表活動の状況をTable 1とTable 2にそれぞれ示す。

Table 1は、業種別の環境改善の実施状況を示している。表内の値は、各業種に所属している企業のうち各改善プロジェクトを実施している企業の割合である。

Table 2は、業種別の環境指標の公表状況を示している。表内の値は、各業種に所属している企業のうち各サプライチェーン機能での二酸化炭素排出量を公表している企業の割合である。

Table 1 The state of environmental project implementation (%)

業種	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
1)	85.0	85.0	97.5	90.0	92.5	87.5	35.0
2)	62.5	87.5	87.5	100.0	50.0	87.5	12.5
3)	100.0	85.7	71.4	71.4	71.4	85.7	71.4
4)	88.1	85.1	91.0	80.6	70.1	82.1	23.9
5)	35.0	100.0	55.0	60.0	65.0	95.0	10.0
6)	66.7	100.0	100.0	66.7	100.0	100.0	66.7
7)	75.0	62.5	100.0	87.5	62.5	62.5	25.0
8)	55.6	77.8	77.8	66.7	33.3	77.8	33.3
9)	100.0	85.7	100.0	85.7	71.4	100.0	42.9
10)	81.8	81.8	90.9	86.4	63.6	86.4	45.5
11)	68.2	97.7	90.9	86.4	50.0	88.6	34.1
12)	67.9	92.3	91.0	91.0	67.9	91.0	44.9
13)	88.2	91.2	94.1	91.2	85.3	91.2	50.0
14)	69.2	100.0	84.6	92.3	69.2	100.0	69.2
15)	44.4	100.0	88.9	100.0	77.8	100.0	11.1
16)	87.5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	25.0
17)	100.0	100.0	100.0	100.0	66.7	100.0	0.0

Table 2 The state of disclosure for environmental indicators (%)

業種	Y1	Y2	Y3
1)	74.3	82.4	59.1
2)	57.1	62.5	50.0
3)	87.5	85.0	87.5
4)	81.0	82.0	71.0
5)	88.3	78.1	82.1
6)	100.0	100.0	100.0
7)	59.4	87.5	62.5
8)	75.0	69.4	61.1
9)	75.0	85.0	37.5
10)	75.0	76.5	62.5
11)	78.0	85.7	76.6
12)	74.0	82.4	74.2
13)	75.8	94.4	84.8
14)	79.5	87.5	79.5
15)	68.8	75.0	68.8
16)	90.6	92.9	90.6
17)	75.0	100.0	75.0

4. 分析結果

本章では、2.2節で説明したモデル1とモデル2のそれぞれで、3章のTable 1およびTable 2を分析した結果の説明と考察を行う。

4.1 モデル1による分析結果

Table 3 に 17 業種の目的関数 I_{io} の値を示す。17 業種の平均値は 0.97, 範囲は 0.22 となる。11 業種で I_{io} が 1.0 を示しており, 多くの業種で特徴ある改善プロジェクトを行っていることがわかる。

Table 4 に業種別改善プロジェクト別の重みづけ係数 $I\mu_j$ の一覧を示す。数値が付与されている改善プロジェクトは, 相対的に対象業種において力を入れている取り組みである。表側の 17 業種を, 数値が付与されているプロジェクト数で分類すると, 5 種類のプロジェクトに数値が付与されているのが 2 業種, 以下, 4 種類が 0 業種, 3 種類が 3 業種, 2 種類が 5 業種, 1 種類 7 業種となる。これより, 多くの業種が少数のプロジェクトで特徴を見出していることがわかる。

また表頭の 7 改善プロジェクトを, 数値が付与されて

Table 3 The value of projects' implementation state (I_{io})

1)	2)	3)	4)	5)
0.98	1.00	1.00	0.91	1.00
6)	7)	8)	9)	10)
1.00	1.00	0.78	1.00	0.95
11)	12)	13)	14)	15)
0.98	0.97	1.00	1.00	1.00
16)	17)			
1.00	1.00			

※表側, 表頭の番号は第 3 章を参照

Table 4 A weighting coefficient for each project ($I\mu_j$)

業種	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
1)	4.22×10^{-1}	—	2.21×10^{-1}	3.30×10^{-2}	3.17×10^{-1}	—	2.38×10^{-1}
2)	—	—	—	1.00	—	—	1.94×10^{-16}
3)	—	—	—	—	—	—	1.4
4)	—	—	1.00	—	—	—	—
5)	—	1.00	—	—	—	—	1.11×10^{-16}
6)	—	—	—	—	2.00×10^{-1}	—	1.20
7)	—	—	1.00	—	—	—	—
8)	—	—	1.00	—	—	—	—
9)	1.00	—	—	—	—	—	—
10)	—	—	6.13×10^{-1}	3.23×10^{-1}	—	—	2.58×10^{-1}
11)	—	1.00	3.77×10^{-15}	—	—	—	—
12)	—	—	5.74×10^{-1}	3.61×10^{-1}	—	—	2.62×10^{-1}
13)	2.50×10^{-1}	—	3.50×10^{-1}	2.00×10^{-1}	5.00×10^{-2}	—	4.50×10^{-1}
14)	—	—	2.00×10^{-1}	1.91×10^{-17}	—	—	1.20
15)	—	—	5.55×10^{-16}	1.00	—	—	—
16)	—	—	1.00	—	—	—	—
17)	1.00	—	—	—	—	—	—

※表側, 表頭の番号・記号は第 3 章を参照

いる業種数で分類すると, X1 が 4 業種, X2 が 2 業種, X3 が 11 業種, X4 が 7 業種, X5 が 3 業種, X6 が 0 業種, X7 が 9 業種となる。これより, 「X3: ルート変更や物流拠点集約等輸送距離の短縮」と「X4: 積載効率を高める為の梱包材・包装材の工夫」が業種間で共通した活動であることがわかる。この 2 種類は, サプライチェーンの既存オペレーションの改善となる。従来の改善活動と同様, 現場での取り組みが環境視点でも主流であることがわかる。また, X7: その他も多く業種で数値が付与されている。これより, 各業種で特徴ある取り組みを行っている可能性が読み取れる。

4.2 モデル2による分析結果

Table 5 に 17 業種の目的関数値 D_{io} の値を示す。17 業種の平均値は 0.85, 範囲は 0.38 となる。2 業種のみで D_{io} が 1.0 であることから, 多くの業種で公表活動の取り組みが途上であることがわかる。

Table 6 に業種別公表活動別の重みづけ係数 $D\mu_k$ の一覧を示す。数値の付与されている公表活動は, 相対的に対象業種において力を入れている取り組みであることを示す。表側からみると, 17 業種全てにおいて数値が付与されているプロジェクト数が 1 種類である。また, 表頭からみると, Y1 が 4 業種, Y2 が 13 業種, Y3 が 0 業種で数値が付与される。

Y2 は「工場からの輸送, 配送に伴う CO₂ 排出量の公表」である。サプライチェーンの中でも比較的成熟した動脈物流で, 顧客にも近いプロセスであることから, 多くの業種がこの機能で公表活動に取り組むことは, 企業行動として妥当といえる。

Y1 は「工場までの輸送, 配送に伴う CO₂ 排出量の公表」である。数値が付与されている業種は 3) パルプ・紙, 5) 医薬品, 6) 石油, 8) 窯業である。「工場までの輸送, 配送」(Y1) と「工場からの輸送, 配送」(Y2) を比べると同等もしくは前者の公表活動が進んでいることが共通点として挙げられる。

Table 5 The value of disclosure state (D_{io})

1)	2)	3)	4)	5)
0.82	0.63	0.88	0.82	0.88
6)	7)	8)	9)	10)
1.00	0.88	0.75	0.85	0.76
11)	12)	13)	14)	15)
0.86	0.82	0.94	0.88	0.75
16)	17)			
0.93	1.00			

※表側, 表頭の番号・記号は第 3 章を参照

Table 6 A weighting coefficient for each indicator ($D\mu_k$)

業種	Y1	Y2	Y3
1)	—	1.00×10^{-2}	—
2)	—	1.00×10^{-2}	—
3)	1.00×10^{-2}	—	—
4)	—	1.00×10^{-2}	—
5)	1.00×10^{-2}	—	—
6)	1.00×10^{-2}	—	—
7)	—	1.00×10^{-2}	—
8)	1.00×10^{-2}	—	—
9)	—	1.00×10^{-2}	—
10)	—	1.00×10^{-2}	—
11)	—	1.00×10^{-2}	—
12)	—	1.00×10^{-2}	—
13)	—	1.00×10^{-2}	—
14)	—	1.00×10^{-2}	—
15)	—	1.00×10^{-2}	—
16)	—	1.00×10^{-2}	—
17)	—	1.00×10^{-2}	—

※表側、表頭の番号・記号は第3章を参照

Y3は「製品廃棄時の輸送、処理に伴うCO₂排出量の公表」である。数値が付与される業種は皆無であり、特徴づけるほど活動には至っていないことがわかる。

4.3 両モデルの分析結果からの考察

4.1節、4.2節から、次の5点が環境視点の改善活動に関する課題として整理される。

1点目として、環境視点の改善活動では、その実施に比べて、公表が進んでいないことが業種全体の傾向として挙げられる。環境視点の改善活動では製品やサービスといったアウトプットに加え、そのサプライチェーンでの取り組みが行われる。しかし、それは顧客の日常において直接目に触れることが少ない。あらゆる側面からCSRが求められる中、顧客への積極的な発信は今後ますます重要になる。

2点目として、改善の実施状況について、施策の多様性が少ないことが挙げられる。どのような製品やサービスにおいてもサプライチェーンに関わるプレイヤーやオペレーションは多様である。全体で取り組むことができる俯瞰的な改善戦略デザインが求められる。

3点目として、改善の実施状況について、既存システムの改善レベルの取り組みが主流であることが挙げられる。環境視点の改善活動は、費用対効果の観点からQCDといった管理指標と比べ、利益貢献との関係が表現しづらく、その投資への理由づけが難しい。しかしながら、地球規模での持続可能性が認識される今後は、環境視点の改善が企業評価の価値基準となる。第4次産業

革命といわれるデジタル技術の台頭なども見据えながらの既存サプライチェーンのイノベーションが企業間競争の源泉になる。

4点目として、改善の公表状況について、動脈物流と比べて静脈物流は進んでいないことが業界全体の傾向として挙げられる。自然界における循環体系と比べ、人間の創造した製品サービスのそれは、いまだ発展途上である。動脈と静脈をつかさどる各産業が連携し、全体としての発信が求められる。

5点目として、改善の公表状況について、動脈物流のうち、資材物流は完成品物流と比べて進んでいないことが挙げられる。サプライチェーンの源流に近くなればなるほど、扱う物量は大きくなり、物流も太くなる。そのため1施策の改善インパクトも大きくなる。消費者の日常からは遠い機能であるが、進まない原因を明らかにし、企業や業界の枠を超えたサプライチェーン全体の地球規模への貢献を消費者に理解してもらう発信を期待したい。

5. おわりに

本稿では国内製造業17業種の改善視点の改善活動とその公表活動について、DEAモデルにより評価を行った。その結果、後者について、顧客への理解や地球環境への貢献の観点から、今後更なる取り組みが求められることがわかった。また、両活動に関する製造業全体の傾向の考察を行った。その結果、改善活動については、現場主体の取り組みが行われていること、公表活動については、製品やサービスの消費に近い動脈物流での取り組みが大部分の業種で行われているということがわかった。

今後の課題として、複数年にまたがる分析を行うことによる環境視点の改善活動に関する特性変化の理解や、他改善プロジェクトや他指標の公表活動を取り入れた分析の充実などが挙げられる。

参考文献

- 1) Murata, K.: Analyzing Environmental Continuous Improvement for Sustainable Supply Chain Management: Focusing on its Performance and Information Disclosure, *Sustainability*, 8 (12) (2016), 16 pages, doi:10.3390/su8121256.
- 2) Banker, D. R. Charnes, A., and Cooper, W. W.: Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis. *Management Science*, 30 (1984), 1078-1092.
- 3) Charnes, A. Cooper, W. W. and Lewin, Y. A., and

- Seiford, M. L.: *Data Envelopment Analysis: Theory, Methodology and Applications*, Kluwer Academic Publisher, Boston, MA, USA, (1994).
- 4) Cooper, W. W., Seiford, L. M., Tone, K.: *Data Envelopment Analysis: A Comprehensive Text with Models, Applications, References, and DEA-Solver Software*, Springer: Dordrecht, Netherlands, (1999).
- 5) 日経リサーチ (編), 第 21 回環境経営度調査報告書, (2018).
- (R3 . 1 . 12 受理)

Biographical Sketches of the Authors



Koichi Murata is the head of operations & production management laboratory and a professor at the Department of Industrial Engineering and Management, College of Industrial Technology, Nihon University. He previously worked in industry as an industrial engineer at the flagship factory of Murata Manufacturing Co., Ltd., which is a global leader mainly in the manufacturing of electronic component. His research interests include operations & production management, kaizen, lean management, visual management, technology transfer, knowledge management, sustainable supply chain and others. Dr. Murata takes Advisory Board Member in International conferences, and has published articles in international academic journals such as International Journal of Production Research (IJPR), Sustainability, Journal of the Operations Research Society of Japan, and others. He was interviewed for NHK (Japan broadcasting corporation) and the Associated Press (American news agency) about future society & industry.