サプライチェーンの効率性の測定と最適化のためのモデル*

森田 浩[†]・Joe ZHU[‡]

Models for Characterizing and Measuring Supply Chain Efficiency and Achieving Best Practice*

Hiroshi MORITA[†] and Joe ZHU[‡]

An appropriate performance measurement system is the key to effective supply chain management. Two hurdles are present in measuring the performance of supply chain as a whole. One is the existence of multiple measures that characterize the performance of individual supply chain members. The other is the existence of conflicts between supply chain members with respect to specific measures. As a result, the efficiency of a supply chain cannot be characterized directly by the performance of supply chain members. The current study develops an approach for characterizing and measuring supply chain efficiency and achieving best practice. Models are provided to define the supply chain efficiency and to measure the performance of a supply chain as well as supply chain members. It is shown that a supply chain as a whole has potential to achieve more cost savings and a better performance through coordination and information sharing based upon our linear programming problems.

1. はじめに

サプライチェーンマネジメントは高品質の製品やサービスを低コストで迅速により高い信頼性で提供できる手法として非常に有用である。サプライチェーン全体にある資源を効率的に利用することで、市場競争力のある低価格の製品やサービスを提供することができるからである。これを実現するためにはサプライチェーン全体のパフォーマンスを評価することが必要であり、競争に打ち勝つための重要な情報となる。しかし、従来から企業内に大きなサプライチェーンシステムを持っている企業でも、流通ネットワーク全体にわたるパフォーマンスを評価するシステムは持っていないことが多い[6,9]。

サプライチェーンマネジメントの考え方は、サプライチェーンを構成する個々のメンバーよりもサプライチェーン全体のパフォーマンスを重視している。個々のメン

バーが完全に効率的な方策をもっていたとしても、メンバー間での入出力の相互関係によって非効率的になってしまうこともある。サプライチェーンのパフォーマンスを評価するには、メンバーに関係する複数のパフォーマンスの評価項目を取り扱い、個々のパフォーマンスを統合させる必要がある。

一般にトレードオフにある入出力において最も効率的な関係を定量的に記述することは難しいため、いくつかの同種の活動をしているサプライチェーンで実際に得られた観測値を相対的に比較することで、その入出力関係を表すトレードオフ曲線を求め、それとの差異によって最良のパフォーマンスを実現しているかどうかを評価することを考える。このような相対的効率性を評価する方法にデータ包絡分析法 (DEA) [2,12] がある。DEAでは「入力」に対する「出力」の比によって効率性を表し、与えられたデータから推定された入出力に対するトレードオフ曲線（効率的フロンティアという）を基準にして効率性を評価している。

サプライチェーンにおける個々のメンバーの効率性はこの入出力比によって定義することができるが、このDEAの評価手法をサプライチェーン全体の効率性の評価にそのまま適用することはできない。なぜならいくつかの入出力項目は個々のメンバー間で互に関連してい

* 原稿受付 2002年8月19日

[†] 大阪大学 大学院 情報科学研究科 Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University; Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, JAPAN

[‡] ウースター工芸大学 経営学部 Department of Management, Worcester Polytechnic Institute; Worcester, MA 01609, U.S.A.

Key Words: supply chain, efficiency, best practice, performance, data envelopment analysis.

Fig. 1 Supply chain as an input-output system

るために競合関係が存在し、単純にサプライチェーンの「出力」とか「入力」に分類できないからである。単にサプライチェーンの総コストを最小にしたり総利益を最大にしたりするのはこの競合関係をモデル化することにはならない。サプライチェーンの効率性を測定するにはサプライチェーンとその構成メンバーに対して効率性を測定できるモデルが必要となる。

単一のパフォーマンス尺度を使ってサプライチェーンのパフォーマンスを推定する方法 [3] もあるが、サプライチェーンを最適化するための方策は考えられていない。このほかにサプライチェーンのパフォーマンスを経営面から考察したもの [5] もある。しかし、評価項目の間に存在する競合を考慮したサプライチェーン全体のパフォーマンスが考えられておらず、また個々のメンバーのパフォーマンスの評価がなく、最適化とその他の改善目標が示されていないなどの問題点が挙げられる。

本論文ではサプライチェーン全体のパフォーマンスの効率性と個々のメンバーのパフォーマンスの効率性をそれぞれ測定し、これらの関係を明らかにするとともに、個々のメンバーの評価項目の取るべき最適値を示す手法を提案する。サプライチェーン全体が最適になるためには個々のメンバーが効率的な活動をする必要がある。提案するモデルではメンバーが協力し情報を共有することでさらにコスト削減が達成され、全体としてよりよいパフォーマンスを実現できることが示される。

提案手法では複数存在するパフォーマンスの評価項目に関するいかなる仮定も用いず、効率的なサプライチェーンを構成するときの評価項目の最適値を得ることができる。実際のサプライチェーンにおける観測値から相対的な比較により構成される効率的フロンティアを区分的に線形近似して求めており、典型的な数学モデルや確率モデルで仮定している非現実的な仮定を必要としない。

本論文では、まず 2. でサプライチェーンのパフォーマンスと入出力システムとしてのサプライチェーンについて述べる。そこでは個々のメンバーとともにサプライチェーンの効率性を明らかにし、その測定のためのモデルを示す。3. ではサプライチェーンの効率性と個々のメンバーの効率性の関係を明らかにする。4. で数値例を示し、最後に 5. では今後の方向とともに結論を述べている。

2. 入出力システムとしてのサプライチェーン

サプライヤ、生産者、流通業者、小売業者の四つメンバーから構成されているサプライチェーンの例を Fig. 1 に示す。サプライチェーンマネジメントの一般的な目的はメンバー間の適切な調整によってサプライチェーン全体のコストを最小化することであり [1,4]、そのためにはサプライチェーン全体と個々のメンバーのパフォーマンスをそれぞれ適切に評価する必要がある。パフォーマンスの評価システムとして望まれることは、パフォーマンスを表すために必要な情報を提供し、最適なサプライチェーンを同定することによってサプライチェーンを監視かつ管理し、更なるサプライチェーンの改善の方向を示すことである。

サプライチェーンには、コスト、柔軟性、顧客サービス、時間、品質などいろいろな目的があり、一つの評価基準だけでは交互作用、代替性、トレードオフなどを適切に評価できない。トレードオフの例として、サプライチェーンの総コストと発注から納品までのレスポンス時間を考えてみよう。Fig. 2 は最適なサプライチェーンのパフォーマンスを表す効率的フロンティア曲線とその曲線によって優越される領域を例示している。効率的フロンティア上にある点（たとえば S_1, S_2, S_3 ）は、総コストとレスポンス時間の両方において優れているものが存在しないという意味で優越されない、すなわち効率的で

Fig. 2 Efficient frontier of supply chain performance

あるという。DEAでは効率的フロンティアを区分的な線形関数として同定する。そして、点Sのような非効率的なパフォーマンスは点 S_1 , S_2 , S_3 またはフロンティア上の他の点へ向かう方向に沿って改善することで効率的にさせることができる。

あらゆる管理システムや生産システムは入力を出力へ変換するシステムと見ることができ、その効率性は入力に対する出力の比で定義できる。サプライチェーンシステムもまた原材料や要素を付加価値のある製品やサービスへ変換するものと見ることができ、その効率性も入力と出力を用いて定義することができる。サプライチェーンは個々のメンバーが統合された入出力システムで、各メンバーはコストや資源といった入力を利益や収入といった出力へ変換している。メンバーのパフォーマンスの評価項目はサプライチェーンシステムにおける物や情報の流れに基づいて入力と出力に分類することができる。

各メンバー Δ における入力と出力の集合をそれぞれ I^Δ と R^Δ とし、その観測値を (x_i^Δ, y_r^Δ) , $i \in I^\Delta$, $r \in R^\Delta$ とする。複数のサプライチェーンがあるとき、各メンバーの効率性は、同種のメンバーを相対的に比較するDEA効率性に従って定めることができる。効率的なメンバーが構成するのが効率的フロンティアであり、他のメンバーに優越されないメンバーである。

メンバーの効率性の定義をサプライチェーンの効率性へ適用することはできない。なぜなら、いくつかの評価項目は複数のメンバーに関連しているために、単純にサプライチェーンの「入力」または「出力」に分類することができないからである。サプライチェーンシステムの評価項目は2種類に分けられる。一つは特定のメンバーだけの評価項目でこれらを直接入出力とよぶ。たとえば労務費や製造時間は生産者の直接入力となる。各メンバーの直接入出力はサプライチェーンの入出力と見ることができる。一方、複数のメンバーに共通する間接入出

力もある。たとえば、生産者から小売業者や配送業者へ送られた製品数は生産者にとっては出力になるが、小売業者や配送業者にとっては入力となる。間接入出力は特定のメンバーにとっては入力か出力となるが、サプライチェーンでは単純に入力とか出力にはならない。サプライチェーンマネジメントでは間接入出力の値は互いの利害関係があるため、メンバー間の交渉によって決まるものである[8,11]。

メンバー Δ の直接入力と直接出力の集合をそれぞれ DI^Δ と DR^Δ で表す。間接出力には以下の記号を用いる。

- z_t^{S-M} , $t=1, \dots, T$: サプライヤから生産者へ
- z_m^{M-S} , $m=1, \dots, M$: 生産者からサプライヤへ
- z_f^{M-D} , $f=1, \dots, F$: 生産者から流通業者へ
- z_g^{D-M} , $g=1, \dots, G$: 流通業者から生産者へ
- z_l^{M-R} , $l=1, \dots, L$: 生産者から小売業者へ
- z_q^{R-M} , $q=1, \dots, Q$: 小売業者から生産者へ
- z_e^{D-R} , $e=1, \dots, E$: 流通業者から小売業者へ
- z_n^{R-D} , $n=1, \dots, N$: 小売業者から流通業者へ

間接入力は相対するメンバーの間接出力となるので記号は定義していない。たとえば z_t^{S-M} は、サプライヤにとっては出力で生産者にとっては入力となる。

3. サプライチェーンの効率性

いろいろな評価項目間のトレードオフや関数形がわかっているならば、効率的フロンティアを求めるのに最適化手法を用いることもできるが、そのような情報を完全に得ることは難しい。そこで、サプライチェーン自身の評価と最適化を図るために、他の同様なサプライチェーンと相対的な比較を行う。ここでは、あるサプライチェーンの多期間にわたる観測値またはある時点における同様なサプライチェーンの観測値に基づいて効率的フロンティアを経験的に推定し、最適なサプライチェーンのパフォーマンスを評価することになる。

3.1 サプライチェーンのメンバーの効率性

J 個のサプライチェーンがあり、メンバー Δ は入出力値 x_{ij}^Δ ($i \in I^\Delta$), y_{rj}^Δ ($r \in R^\Delta$), $j=1, \dots, J$ をもつものとする。効率的フロンティアはこれらの J 組の観測値から構成される。 j_o 番目のサプライチェーンにおけるメンバー Δ の入出力の観測値は $(x_{j_o}^\Delta, y_{j_o}^\Delta)$ と表され、その効率性は次の線形計画問題で表されるモデル1によって求められる。

《モデル1》

$$\begin{aligned} \theta_\Delta^* &= \min_{\phi_j^\Delta, \theta_\Delta} \theta_\Delta \\ \text{subject to } & \sum_{j=1}^J \phi_j^\Delta x_{ij}^\Delta \leq \theta_\Delta x_{i j_o}^\Delta, \quad i \in I^\Delta \\ & \sum_{j=1}^J \phi_j^\Delta y_{rj}^\Delta \geq y_{r j_o}^\Delta, \quad r \in R^\Delta \end{aligned} \quad (1)$$

Table 1 Simple numerical example

Supply chain	Supplier			Manufacturer		Efficiency		
	Shipping cost	Labor	Revenue	Material costs	Profit	Supplier	Manufacturer	Overall
A	6	8	3.0	15	0.5	0.682	1	
B	8	3	6.0	12	1	0.545	0.545	
C	10	4	2.0	22	0.333	1	1	

$$\phi_j^\Delta \geq 0, \quad j=1, \dots, J$$

モデル1は複数の評価項目をもつシステムの相対的効率性を測定するためのDEAモデルであり、(2)式に示す入出力比を最大にする重みを決定するための分数計画問題を等価変換して得られる線形計画問題の双対問題となっている。

$$\begin{aligned} \theta_\Delta^* = \max & \sum_{r=1}^s \mu_r y_{ro} / \sum_{i=1}^m v_i x_{io} \\ \text{subject to} & \sum_{r=1}^s \mu_r y_{rj} / \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 1, \quad j=1, \dots, n \\ & v_i \geq 0, \quad i=1, \dots, m, \quad \mu_r \geq 0, \quad r=1, \dots, s \end{aligned} \quad (2)$$

ここで $v_i \geq 0, i=1, \dots, m, \mu_r \geq 0, r=1, \dots, s$ は入出力にかかる重みを表す。 θ_Δ^* は重みつき入出力比であり、効率性尺度として用いられる。DEAモデルでは効率性のフロンティアとそれに囲まれる領域を区分的線形に近似して求めている。

【定理1】 [2,12] $(x_{j_0}^\Delta, y_{j_0}^\Delta)$ が他に優越されないための必要十分条件は、モデル1の最適値が $\theta_\Delta^* = 1$ となることである。

効率性のフロンティアは $\theta_\Delta^* = 1$ となる観測値から構成される。 $\theta_\Delta^* = 1$ のときでも入出力にスラック

$$\begin{aligned} s_i^- &= x_{ij_0}^\Delta - \sum_{j=1}^J \phi_j^\Delta x_{ij}^\Delta, \quad i \in I^\Delta \\ s_r^+ &= \sum_{j=1}^J \phi_j^\Delta y_{rj}^\Delta - y_{rj_0}^\Delta, \quad r \in R^\Delta \end{aligned} \quad (3)$$

が存在することがあり、(3)式の一つでも正のスラックが存在すれば $(x_{j_0}^\Delta, y_{j_0}^\Delta)$ は弱効率性であるという。 $\theta_\Delta^* = 1$ ならば、メンバー Δ は効率性 (弱効率性を含む) であるという。非効率なメンバーに対しては、最適値 $\sum_{j=1}^J \phi_j^\Delta x_{ij}^\Delta$ と $\sum_{j=1}^J \phi_j^\Delta y_{rj}^\Delta$ によって効率性のフロンティア上への射影が求められる。

各メンバーについてモデル1を解くと、それぞれのメンバーの効率性 θ_Δ^* を求めることができる。例としてTable 1に示すサプライヤと生産者からなる三つのサプライチェーンA, B, Cを考える。サプライヤは二つの入力 (輸送コストと労働力) と一つの出力 (生産者へ販売した原材料からの収益) をもち、生産者は一つの入力 (サプライヤの収益である原材料コスト) と一つの出力 (利益) をもつものとする。モデル1を適用すると、B

のサプライヤとCの生産者のみが効率性となる。間接入出力である収益 (原材料コスト) を無視してモデル1を適用すると、Table 1の最右列にあるようにAとCが効率性となる。このように個々のメンバーにモデル1を適用してもサプライチェーンの効率性を表すことにはならない。

次の定理は、モデル1において、一つの評価項目を同時に入力と出力に用いることができないことを示している。

【定理2】 評価項目 z_k を入力と出力に同時に用いた場合、モデル1の最適値はつねに1となる。

(証明) モデル1より、入力に関する制約条件から $\sum_{j=1}^J \phi_j z_{kj} \leq \theta z_{kj_0}$ 、出力に関する制約条件から $\sum_{j=1}^J \phi_j z_{kj} \geq z_{kj_0}$ が得られるので、 $\theta \geq 1$ となる。よって $\theta^* = 1$ となる。 $\square$

3.2 サプライチェーンの効率性

サプライチェーンのパフォーマンスをモデル1で単純に定義することはできない理由をまとめると以下のようになる。第1に間接入出力はメンバーにとっては入力や出力になってもサプライチェーンの入力または出力として単純に扱うことはできない。第2に定理2より、間接入出力を一つの線形計画モデル1でモデル化するとメンバーのパフォーマンスとは関係なくサプライチェーンが効率性であると評価されてしまう。モデル1を使うとすべてのメンバーを効率性にすることはできるけれども、それではサプライチェーンの効率性を測定していることにはならない [10]。第3にモデル1において0でない ϕ_j^Δ は評価対象のメンバーにとってのベンチマークを表しているが、サプライチェーン全体での各メンバーのベンチマークは必ずしもそれと一致しない。第4にモデル1でサプライチェーン全体の効率性を測定するのでは、各メンバーは同じ効率性を有していると仮定されており、効率性の違いを見ることはできない。

そこで、Fig. 1に示した四つのメンバーからなるサプライチェーンを例にして、効率性を測定するためのモデルを提案する。メンバーのパフォーマンスに対する選好度を表すウェイトとして $w_S + w_M + w_D + w_R = 1$ を満たす正のウェイトを与えるが、メンバーに対する選好度に特に違いがなければここでは0.25としておけばよい。各メンバーの評価項目を統合して一つの線形計画問題を作り、 j_0 番目のサプライチェーン全体の相対的な効率性を測定するモデル2を与える。

《モデル2》

$$\Omega^* = \min_{\Omega_i, \lambda_i, \beta_i, \delta_i, \gamma_i, \tilde{z}} w_S \Omega_S + w_M \Omega_M + w_D \Omega_D + w_R \Omega_R \quad (4)$$

subject to

(サプライヤ)

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^J \lambda_j x_{ij}^S &\leq \Omega_S x_{ij_o}^S & i \in DI^S \\ \sum_{j=1}^J \lambda_j y_{rj}^S &\geq y_{rj_o}^S & r \in DR^S \\ \sum_{j=1}^J \lambda_j z_{tj}^{S-M} &\geq \tilde{z}_{tj_o}^{S-M} & t = 1, \dots, T \\ \sum_{j=1}^J \lambda_j z_{mj}^{M-S} &\leq \tilde{z}_{mj_o}^{M-S} & m = 1, \dots, M \\ \lambda_j &\geq 0 & j = 1, \dots, J \end{aligned}$$

(生産者)

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^J \beta_j x_{ij}^M &\leq \Omega_M x_{ij_o}^M & i \in DI^M \\ \sum_{j=1}^J \beta_j y_{rj}^M &\geq y_{rj_o}^M & r \in DR^M \\ \sum_{j=1}^J \beta_j z_{tj}^{S-M} &\leq \tilde{z}_{tj_o}^{S-M} & t = 1, \dots, T \\ \sum_{j=1}^J \beta_j z_{mj}^{M-S} &\geq \tilde{z}_{mj_o}^{M-S} & m = 1, \dots, M \\ \sum_{j=1}^J \beta_j z_{fj}^{M-D} &\geq \tilde{z}_{fj_o}^{M-D} & f = 1, \dots, F \\ \sum_{j=1}^J \beta_j z_{gj}^{D-M} &\leq \tilde{z}_{gj_o}^{D-M} & g = 1, \dots, G \\ \sum_{j=1}^J \beta_j z_{lj}^{M-R} &\geq \tilde{z}_{lj_o}^{M-R} & l = 1, \dots, L \\ \sum_{j=1}^J \beta_j z_{qj}^{R-M} &\leq \tilde{z}_{qj_o}^{R-M} & q = 1, \dots, Q \\ \beta_j &\geq 0 & j = 1, \dots, J \end{aligned}$$

(流通業者)

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^J \delta_j x_{ij}^D &\leq \Omega_D x_{ij_o}^D & i \in DI^D \\ \sum_{j=1}^J \delta_j y_{rj}^D &\geq y_{rj_o}^D & r \in DR^D \\ \sum_{j=1}^J \delta_j z_{fj}^{M-D} &\leq \tilde{z}_{fj_o}^{M-D} & f = 1, \dots, F \\ \sum_{j=1}^J \delta_j z_{gj}^{D-M} &\geq \tilde{z}_{gj_o}^{D-M} & g = 1, \dots, G \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^J \delta_j z_{ej}^{D-R} &\geq \tilde{z}_{ej_o}^{D-R} & e = 1, \dots, E \\ \sum_{j=1}^J \delta_j z_{nj}^{R-D} &\leq \tilde{z}_{nj_o}^{R-D} & n = 1, \dots, N \\ \delta_j &\geq 0 & j = 1, \dots, J \end{aligned}$$

(小売業者)

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^J \gamma_j x_{ij}^R &\leq \Omega_R x_{ij_o}^R & i \in DI^R \\ \sum_{j=1}^J \gamma_j y_{rj}^R &\geq y_{rj_o}^R & r \in DR^R \\ \sum_{j=1}^J \gamma_j z_{lj}^{M-R} &\leq \tilde{z}_{lj_o}^{M-R} & l = 1, \dots, L \\ \sum_{j=1}^J \gamma_j z_{qj}^{R-M} &\geq \tilde{z}_{qj_o}^{R-M} & q = 1, \dots, Q \\ \sum_{j=1}^J \gamma_j z_{ej}^{D-R} &\leq \tilde{z}_{ej_o}^{D-R} & e = 1, \dots, E \\ \sum_{j=1}^J \gamma_j z_{nj}^{R-D} &\geq \tilde{z}_{nj_o}^{R-D} & n = 1, \dots, N \\ \gamma_j &\geq 0 & j = 1, \dots, J \end{aligned}$$

モデル2には他のいろいろな条件を付け加えることもできる。たとえば、生産者から流通業者へ運ばれる製品数 z_f^{M-D} に対して、生産者の生産容量が C_f であれば、制約条件 $\tilde{z}_f^{M-D} \leq C_f$ を付け加えればよい。

【定理3】 $\Omega^* = 1$ ならば、モデル2には最適解 $\lambda_{j_o}^* = \beta_{j_o}^* = \delta_{j_o}^* = \gamma_{j_o}^* = 1$ が存在する。

(証明) $\Omega^* = 1$ であることと $\Omega_S^* = \Omega_M^* = \Omega_D^* = \Omega_R^* = 1$ であることは同値である。また次の解はモデル2の実行可能解となる。

$$\begin{aligned} \lambda_{j_o}^* &= \beta_{j_o}^* = \delta_{j_o}^* = \gamma_{j_o}^* = 1, \\ \Omega_S^* &= \Omega_M^* = \Omega_D^* = \Omega_R^* = 1, \\ \tilde{z}_{tj_o}^{S-M*} &= z_{tj_o}^{S-M}, \tilde{z}_{mj_o}^{M-S*} = z_{mj_o}^{M-S}, \tilde{z}_{fj_o}^{M-D*} = z_{fj_o}^{M-D}, \\ \tilde{z}_{lj_o}^{M-R*} &= z_{lj_o}^{M-R}, \tilde{z}_{qj_o}^{R-M*} = z_{qj_o}^{R-M}, \tilde{z}_{ej_o}^{D-R*} = z_{ej_o}^{D-R} \end{aligned} \quad (5)$$

したがって、モデル2には $\lambda_{j_o}^* = \beta_{j_o}^* = \delta_{j_o}^* = \gamma_{j_o}^* = 1$ となる最適解が存在する。□

【定理4】 θ_Δ をモデル1の最適値とすると、 $\Omega^* = 1$ ならば $\theta_\Delta^* = 1$ である。

(証明) $\Omega^* = 1$ とすると、定理3より、最適解は $\lambda_{j_o}^* = \beta_{j_o}^* = \delta_{j_o}^* = \gamma_{j_o}^* = 1$ となる。ここでモデル1においていくつか $\theta_\Delta^* < 1$ 、たとえば $\theta_S^* < 1$ であると仮定すると、 $\Omega_1^* = 1$ はモデル2において最適解ではない。よってすべて $\theta_\Delta^* = 1$ である。□

定理1と定理4より、 $\Omega^* = 1$ のとき、すべてのメンバーは効率的となることがわかる。また、(6)式の値を入出力にもつサプライチェーンであれば、 $\Omega^* = 1$ となるた

め、定理4よりそのサプライチェーンを構成するすべてのメンバーは効率的となることがわかる。

$$\begin{aligned} \Omega_{\Delta}^* x_{ij_0}^{\Delta} (i \in DI^{\Delta}), \quad y_{rj_0}^{\Delta} (r \in DR^{\Delta}), \\ \tilde{z}_{tj_0}^{S-M*} (t=1, \dots, T), \quad \tilde{z}_{mj_0}^{M-S*} (m=1, \dots, M), \\ \tilde{z}_{fj_0}^{M-D*} (f=1, \dots, F), \quad \tilde{z}_{gj_0}^{D-M*} (g=1, \dots, G), \quad (6) \\ \tilde{z}_{lj_0}^{M-R*} (l=1, \dots, L), \quad \tilde{z}_{qj_0}^{R-M*} (q=1, \dots, Q), \\ \tilde{z}_{ej_0}^{D-R*} (e=1, \dots, E), \quad \tilde{z}_{nj_0}^{R-D*} (n=1, \dots, N) \end{aligned}$$

【定義1】 モデル2の最適値が $\Omega^* = 1$ のとき、サプライチェーンは効率的であるという。

モデル2ではすべての間接入出力は決定変数となっている。各メンバー Δ がモデル2から決められる間接入出力の最適値をとるとき、ほかに優越されないパフォーマンスとなりサプライチェーンが効率的となる。間接入出力の最適値は線形計画問題による最適化を通じてメンバー間での調整がなされているが、サプライチェーンへの入力である直接入力 Ω_{Δ} によって最適な値が与えられる。モデル2はサプライチェーンのパフォーマンスの効率値 Ω^* を与えるだけでなく、すべてのメンバーが効率的となるための間接入出力の最適値も与える。サプライチェーンのパフォーマンスの効率的フロンティアはメンバーの効率的フロンティアの集合によって決まる。さらに系1によると、モデル2はサプライチェーンが最良のパフォーマンスを達成するための方向も示す。

θ_{Δ}^* はメンバーが最良のパフォーマンスを実現しているという仮定のもとでのメンバー Δ の効率性を測定するものである。また、 Ω_{Δ}^* はサプライチェーンが最良のパフォーマンスを実現しているときのメンバー Δ の効率性尺度として用いることができる。

【定義2】 サプライチェーンが最良のパフォーマンスを実現しているとき、各メンバー Δ の効率値を Ω_{Δ}^* とする。

Ω^* は非効率的なサプライチェーンに対するコスト削減効果を表しているとも見こともできる。 Ω^* が小さければ小さいほど、最良のパフォーマンスを実現することでより大きな削減効果が得られる。同様のことは、メンバーが最良のパフォーマンスを実現しているという仮定のもとで、 θ_{Δ}^* についてもいえる。ここで $w_S \theta_S^* + w_M \theta_M^* + w_D \theta_D^* + w_R \theta_R^*$ はすべてのメンバーを結合させることによって得られた入力削減を示す指数を表している。次の定理は、サプライチェーン全体では、よりよいパフォーマンスを期待できることを示している。

【定理5】 $\Omega^* \leq w_S \theta_S^* + w_M \theta_M^* + w_D \theta_D^* + w_R \theta_R^*$

(証明) θ_{Δ}^* はモデル2の実行可能解であることから明らかである。□

4. 数値例

提案したモデルにつぎの数値データを適用して、解析例を示す。

4.1 データとモデル

サプライヤでは、二つの直接入力として労働力と操業コストを、一つの間接出力として収益をとる。この収益は生産者にとっての間接入力となる。

生産者では、サプライヤの収益である間接入力のほかに二つの直接入力として製造コストと生産リードタイムをとる。三つの間接出力として流通業者へ送られた製品数、小売業者へ送られた製品数、流通業者の在庫率をとる。これらは流通業者や小売業者にとっての間接入力となる。流通業者の在庫率は在庫維持費用などに関わっているため、流通業者にとってのコストになるが、在庫率を高くするには生産者から多くの製品が送られてこなければならないので、生産者にとっては収益を意味することになる。したがって、在庫率は流通業者にとっては入力、生産者にとっては出力となる。

流通業者では、生産者からの間接入力のほかに二つの直接入力として在庫コストと流通コストをとり、二つの間接出力として小売業者へ送られる製品数と納期内配送率をとる。

小売業者では、生産者と流通業者からの間接入力のほかに一つの直接入力として注文残数を取り、一つの直接出力として利益をとる。

$J=10$ 種類のサプライチェーンが存在しているものとして、それらの観測値を Table 2 に示す。この中から最良のパフォーマンスをもつ効率的なサプライチェーンを求め、非効率的なサプライチェーンに対しては改善の目標となるベンチマークを与える。

4.2 サプライチェーンの効率性

Table 3 はモデル1と $w_S = w_M = w_D = w_R = 0.25$ としたモデル2に対する効率値を示している。ここでは在庫率と納期内配送率は100[%]以下であるという制約条件を付け加えている。第2列から第5列にはモデル1による各メンバーの効率性を示し、第6列にその平均を示している。モデル2によるサプライチェーンの効率性は第7列以降に示している。第8列から第11列に各メンバーの効率性を示し、第7列にはサプライチェーン全体の効率性を示している。

個々のメンバーは多くのサプライチェーンで効率的となっているが、SC 7が全体として効率的となっており、最良のパフォーマンスをしている。効率値は最良のパフォーマンスを達成するために必要な入力削減量でもある。第6列にあるメンバーの効率値の平均値は第7列のサプライチェーンの効率値 Ω^* より大きい。たとえばSC 5では二つのメンバー（生産者と流通業者）が効率的で、メンバーの効率値の平均は0.929、サプライチェーン全体の効率値は0.795である。これはサプライチェーンシ

Table 2 Data

SC	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Labor	150	140	130	165	170	145	155	175	160	125
Operating cost	130	150	165	170	200	185	135	190	185	190
Revenue	20	21	23	24	27	25	24	30	28	25
Manufacturing cost	125	120	110	150	146	115	105	100	135	120
Manufacturing lead time	3	2	3	4	2	3	2	2	4	3
Fill rate	70 [%]	90 [%]	78 [%]	88 [%]	73 [%]	95 [%]	89 [%]	87 [%]	95 [%]	90 [%]
Distributor inventory cost	90	100	80	70	85	77	78	90	78	68
Distribution cost	300	300	200	400	200	200	100	300	200	100
On-time delivery	96 [%]	95 [%]	97 [%]	89 [%]	99 [%]	89 [%]	93 [%]	88 [%]	99 [%]	83 [%]
Average number of backorder	10	11	13	12.5	14	13.5	12.5	15.5	13.5	13
Retailer profit	31000	22000	30000	23000	32000	24000	35000	37000	32500	35500
Products shipped from distributor to retailer	1800.0	2000.0	2400.0	2300.0	2500.0	2500.0	2000.0	2000.0	2500.0	2300.0
Products shipped from manufacturer to retailer	2000.0	2100.0	2500.0	1900.0	2600.0	2300.0	2200.0	2300.0	2500.0	2500.0
Products shipped from manufacturer to distributor	500.0	300.0	450.0	200.0	300.0	250.0	350.0	450.0	300.0	400.0

Table 3 Efficiency scores

SC	Member Efficiency					Supply Chain Efficiency				
	Supplier	Manufacturer	Distributor	Retailer	Average	Supply Chain	Supplier	Manufacturer	Distributor	Retailer
	θ_S^*	θ_M^*	θ_D^*	θ_R^*		Ω^*	Ω_S^*	Ω_M^*	Ω_D^*	Ω_R^*
1	0.865	1	1	1	0.966	0.933	0.918	0.97	0.844	1
2	0.881	1	0.88	0.673	0.859	0.669	0.6	0.625	0.465	0.714
3	0.964	1	1	0.81	0.944	0.791	0.72	0.747	0.747	0.948
4	0.87	0.856	1	0.754	0.87	0.576	0.518	0.46	0.658	0.667
5	0.895	1	1	0.82	0.929	0.795	0.688	0.768	0.768	0.954
6	0.937	0.999	1	0.673	0.902	0.613	0.529	0.579	0.625	0.717
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	0.811	1	0.953	0.943	1	1	0.77	1
9	0.994	0.904	1	0.856	0.938	0.783	0.696	0.694	0.874	0.868
10	1	0.986	1	1	0.997	0.992	1	0.968	1	1

システムはさらに入力を削減できることを意味している。

4.3 効率的なサプライチェーンになるための目標値とベンチマーク

モデル 2 では非効率的なサプライチェーンが最良のパフォーマンスを実現するための各入出力の最適値が得られるが、Table 4 に九つの非効率的なサプライチェーンに対してそれらが効率的となるための各入出力項目の最適値を示している。たとえば SC 1 では $\Omega_R^* = 1$ より小売業者は効率的なので小売業者に関する入出力を調整する必要はないが、最良のパフォーマンスにするためには、サプライヤ、生産者、流通業者はそれぞれ Ω_S^* , Ω_M^* , Ω_R^* に基づいて直接入力を削減する必要がある。サプライヤと生産者はサプライヤの収益を 6 [%] 増やすために原材料の価格について調整しなければならない。流通業者の在庫率を現在の 70 [%] から 90.95 [%] まで増加させ、生産者から流通業者へ送られる製品を 39 [%] 減少させなければならない。流通業者は生産者が納入する製品数を減

らしても在庫率 90.95 [%] を保つようにしなければならない。

最適値 λ_j^* , β_j^* , δ_j^* , γ_j^* はどのサプライチェーンのメンバーがベンチマークとなるかを表している。Table 5 に 0 でない λ_j^* , β_j^* , δ_j^* , γ_j^* の値を示している。たとえば SC 1 のベンチマークには、 $\lambda_7^* = 0.884$ より SC 7 のサプライヤ、 $\beta_2^* = 1.011$ より SC 2 の生産者、 $\delta_3^* = 0.08$ と $\delta_9^* = 0.893$ より SC 3 と SC 9 の流通業者、 $\gamma_1^* = 1$ より SC 1 の小売業者自身がなっており、これらは効率的であることがわかる。

$\theta_\Delta^* = 1$ のときモデル 1 では $\phi_{j_0}^* = 1$ となるものが必ず存在するが、モデル 2 で対応する $\lambda_{j_0}^*$, $\beta_{j_0}^*$, $\delta_{j_0}^*$, $\gamma_{j_0}^*$ が 1 となることを示すものではない。たとえば SC 5 の生産者は効率的であるが、モデル 2 では $\beta_5^* = 0.768 \neq 1$ となっている。

Table 4 Optimal values for an efficient supply chain performance

SC	1	2	3	4	5	6	8	9	10
Labor	137.7	84	93.6	85.5	116.9	76.7	175	111.3	125
Operating cost	119.4	90	118.8	88.1	137.6	97.9	190	128.7	190
Revenue	21.2	14.3	17.2	14.3	20.7	14.1	30	19.6	25
Manufacturing cost	121.3	74.9	82.2	69	112.2	66.6	100	93.7	116.2
Manufacturing lead time	2.9	1.2	2.2	1.8	1.5	1.7	2	2.8	2.9
Fill rate	90.95 [%]	54.22 [%]	58.27 [%]	49.08 [%]	56.09 [%]	48.54 [%]	87 [%]	66.47 [%]	90 [%]
Distributor inventory cost	75.9	46.5	59.8	46.1	65.3	48.1	69.3	68.2	68
Distribution cost	253	139.5	149.4	263.2	153.7	125	231	174.8	100
On-time delivery	96 [%]	58.46 [%]	72.46 [%]	56.82 [%]	76.07 [%]	58.74 [%]	88 [%]	82.66 [%]	83 [%]
Average number of backorder	10	7.9	12.3	8.3	13.4	9.7	15.5	11.7	13
Retailer profit	31000	22000	30000	23000	32000	24000	37000	32500	35500
Products shipped from distributor to retailer	1800.0	1470.0	1634.0	1417.0	1741.0	1458.0	2000.0	2045.0	2300.0
Products shipped from manufacturer to retailer	2000.0	1383.0	1868.0	1547.0	1998.0	1496.0	2300.0	2130.0	2500.0
Products shipped from manufacturer to distributor	303.0	197.0	336.0	229.0	231.0	265.0	250.0	383.0	421.0

Table 5 Benchmarks

SC	Supplier	Manufacturer	Distributor	Retailer
1	$\lambda_7^* = 0.884$	$\beta_2^* = 1.011$	$\delta_3^* = 0.080$ $\delta_9^* = 0.893$	$\gamma_1^* = 1$
2	$\lambda_7^* = 0.036$ $\lambda_8^* = 0.448$	$\beta_2^* = 0.335$ $\beta_5^* = 0.106$ $\beta_7^* = 0.184$	$\delta_3^* = 0.124$ $\delta_9^* = 0.469$	$\gamma_7^* = 0.629$
3	$\lambda_7^* = 0.039$ $\lambda_{10}^* = 0.317$	$\beta_3^* = 0.747$	$\delta_3^* = 0.747$	$\gamma_7^* = 0.114$ $\gamma_8^* = 0.703$
4	$\lambda_7^* = 0.142$ $\lambda_8^* = 0.363$	$\beta_2^* = 0.033$ $\beta_3^* = 0.591$	$\delta_3^* = 0.361$ $\delta_9^* = 0.220$	$\gamma_7^* = 0.273$ $\gamma_{10}^* = 0.379$
5	$\lambda_8^* = 0.529$ $\lambda_{10}^* = 0.196$	$\beta_5^* = 0.768$	$\delta_3^* = 0.768$	$\gamma_8^* = 0.837$ $\gamma_{10}^* = 0.029$
6	$\lambda_8^* = 0.246$ $\lambda_{10}^* = 0.269$	$\beta_3^* = 0.518$ $\beta_7^* = 0.091$	$\delta_3^* = 0.519$ $\delta_9^* = 0.084$	$\gamma_7^* = 0.171$ $\gamma_8^* = 0.487$
8	$\lambda_8^* = 1$	$\beta_8^* = 1$	$\delta_3^* = 0.242$ $\delta_9^* = 0.672$	$\gamma_8^* = 1$
9	$\lambda_8^* = 0.533$ $\lambda_{10}^* = 0.145$	$\beta_3^* = 0.852$	$\delta_3^* = 0.852$	$\gamma_7^* = 0.598$ $\gamma_{10}^* = 0.326$
10	$\lambda_{10}^* = 1$	$\beta_2^* = 0.076$ $\beta_3^* = 0.498$ $\beta_7^* = 0.498$	$\delta_{10}^* = 1$	$\gamma_{10}^* = 1$

5. 結論と今後の課題

サプライチェーンのパフォーマンスを記述するには複数の評価尺度が必要であり、それらを統合して有効な評価システムを構築しなければならない。本論文ではDEA効率性の概念を用いて、サプライチェーンの効率性とともにメンバーの効率性も測定するためのアプローチを提供している。そして、サプライチェーンの効率性を定義するためのモデルを示し、メンバーが集団としてサプライチェーン全体のパフォーマンスを向上させるための

指針を与えている。提案モデルでは、どのようなサプライチェーンに対しても、最良のパフォーマンスを達成させるための目標とともに、ベンチマークとなるサプライチェーンを示すことができる。モデルでは効率的フロンティア上の一つの目標を示すだけではあるが、多目的意思決定で用いられる対話型手法を使えば、他の目標を見つけることもできる。

提案した方法は実際に得られたデータに基づいて効率的なサプライチェーンのパフォーマンスのフロンティアを推定するものである。メンバー間に存在する競合関係のある実際のデータを使って解析するため、それらを反映した最適値を示している。個々のメンバーで取り決めた値では必ずしもサプライチェーン全体で効率的とはならないが、提案手法ではサプライチェーン全体が効率的となるための最適値が示されている。サプライチェーンの最適構成を考える際、ゲーム理論とモデル2を組み合わせることは今後の課題として興味深いものである。

ここでは確定的な線形計画問題に基づいた解析が行われている。製品や原材料の市場価格は変動しているが、利益や収入といった価格データの代わりに製品数などの数量データを用いることで、その不確実性を回避している。しかし、実際のサプライチェーンは確率的に変動する需要や供給のもとで運用されているため、不確実性を取り扱うにはモデルに確率的な要素を取り入れる必要があり、確率的DEAモデル[7]の適用も今後の課題となる。

謝 辞

この研究は日本学術振興会外国人招へい研究者（短期）事業における共同研究によるものであり、ここに謝意を表する。

参考文献

- [1] T. Altiok and R. Ranjan: Multi-stage, pull-type production/inventory systems; *IIE Transactions*, Vol. 27, pp. 190–200 (1995)
- [2] W. W. Cooper, L. M. Seiford and K. Tone: *Data Envelopment Analysis*, Kluwer Academic Publishers (2000)
- [3] K. L. Cheung and W. H. Hansman: An exact performance evaluation for the supplier in a two-echelon inventory system; *Operations Research*, Vol. 48, pp. 646–653 (2000)
- [4] M. A. Cohen and H. L. Lee: Strategic analysis of integrated production-distribution systems: models and methods; *Operations Research*, Vol. 36, pp. 216–228 (1988)
- [5] L. B. Forker, D. Mendez and J. Hershauer: Total quality management in the supply chain: what is its impact on performance?; *International Journal of Production Research*, Vol. 35, pp. 1681–1702 (1997)
- [6] H. L. Lee and C. Billington: Material management in decentralized supply chains; *Operations Research*, Vol. 41, pp. 835–847 (1993)
- [7] H. Morita and L. M. Seiford: Characteristics on stochastic DEA efficiency – reliability and probability being efficient –; *Journal of Operations Research Society of Japan*, Vol. 42, No. 4, pp. 389–404 (1999)
- [8] M. Parlar and Z. K. Weng: Designing a firm’s coordinated manufacturing and supply decisions with short product life cycles; *Management Science*, Vol. 43, pp. 1329–1344 (1997)
- [9] D. F. Ross: *Competing Through Supply Chain Management*, Kluwer Academic Publishers (1998)
- [10] L. M. Seiford and J. Zhu: Profitability and marketability of the top 55 US commercial banks; *Management Science*, Vol. 45, No. 9, 1270–1288 (1999)
- [11] D. J. Thomas and P. M. Griffin: Coordinated supply chain management; *European Journal of Operational Research*, Vol. 94, pp. 1–15 (1996)
- [12] 刀根：経営効率性の測定と改善，日科技連 (1993)