サプライチェーンネットワーク均衡モデルを用いた 流通ネットワーク特性および都市物流施策の影響評価に関する基礎的研究*

Evaluating the Effects of Urban Logistics Policies and the Characteristics of Distribution Networks using Supply Chain Network Equilibrium Models*

田辺建二**・山田忠史***・谷口栄一****

By Kenji TANABE**・Tadashi YAMADA***・Eiichi TANIGUCHI****

1. はじめに

消費ニーズの多様化や国際的な販売競争の激化に伴い、サプライチェーン形成の効率化が顕著にみられる。サプライチェーンマネジメント（SCM: Supply Chain Management）の進展によって、ロジスティクスに関する意思決定が、サプライチェーン全体で行われるようになってきている¹⁾。一方、都市内、都市間、国際の各領域において、物流施策の実施が検討されているが、物流はサプライチェーン上の各過程で営まれるので、物流施策による影響は施策実施領域だけでなく、サプライチェーン上の各所に波及する可能性がある。したがって、物流施策の効果はサプライチェーンネットワーク（SCN: Supply Chain Network）全体で評価すべきであり、適切な物流施策を実行するためにはサプライチェーン上の流通特性を詳細に把握する必要がある²⁾。

サプライチェーンに関する研究はSCNの最適化に関するものが多く、Geoffrion and Graves³⁾によるロジスティクス・ネットワーク設計の研究に始まり、最近では、Nishi *et al.*⁴⁾による多段階にわたる生産過程の最適化や、相浦ら⁵⁾のサプライチェーン設計モデルの提案、また、菊地ら⁶⁾のSCMによる在庫削減の定量的評価が見られる。Tan⁸⁾は最適なサプライチェーンを構築するために、予定システムおよび計画システムの改善の必要性を示唆している。Almeder *et al.*⁹⁾はサプライチェーンの最適化シミュレーションを行っている。Kogan and Herbon¹⁰⁾は販促活動に伴う顧客の感受性について分析している。実証的な研究としては、Chow *et al.*¹¹⁾が米国や台湾の効率的なSCMについて調査をしている。Ketikidis *et al.*¹²⁾は南東ヨーロッパのロジスティクスやSCMと情報技術利用について述べている。

サプライチェーン上の流通特性を分析した研究も活発になってきており、Dumrongsiri *et al.*¹³⁾はサプライチェーン

上の小売業者の有無について、流通段階の相違を考察している。Choi *et al.*¹⁴⁾は流通経路の形成について研究している。Villegas and Ouenniche¹⁵⁾は、多国籍企業のサプライチェーンにおける移転価格の形成過程について研究をしている。Yao *et al.*¹⁶⁾は情報操作による商品価格の形成について考察している。三部ら¹⁷⁾は物資の発地から着地までの道筋を明らかにするために、流通チャネルを分析している。物流施策の効果を評価する研究に関しては、細谷ら¹⁸⁾の事例がある。

しかし、SCN全体の挙動、すなわち、SCN上の商品取引量、商品価格、ネットワーク構成などを記述するための方法論の研究は、これまでほとんど行われていない。この観点からの研究として、Nagurney *et al.*¹⁹⁾が構築した製造業者、小売業者、消費市場の3主体で構成される場合のサプライチェーンネットワーク均衡（SCNE: Supply Chain Network Equilibrium）モデルが挙げられる。このモデルは以降、消費市場において需要が確率的（ランダム）に変動する場合²⁰⁾、物理的な取引と電子商取引が混在するSCNの場合²¹⁾等へと拡張されている。

本研究では、製造業者と小売業者の間に卸売業者を仲介させた4主体で構成されるSCNEモデルを構築する。さらに、その4主体のSCN上での流通段階を多様化した場合のSCNEモデルを示す。それらのモデルを用いて、空間を考慮した仮想的なSCNを対象として、都市物流施策の影響や流通ネットワーク（流通経路および流通段階）特性の相違に伴う商品取引量、商品価格、余剰の変化などに関して基礎的考察を行う。

2. モデルの定式化

本研究では、以降のケーススタディにおいて、各主体の空間的立地点を考慮する。したがって、既往研究では明示されていない施設費用の項を設定し、地価等の相違の影響を検討できるようにする。

本研究ではまず、図-1に示すように、サプライチェーンの川上から川下に順に取引される場合の（すなわち、単一段階の場合）のSCNEモデル（以下、単一段階モデルと称す）について、その定式化を示す。次に、図-2に示すように、各主体間を結ぶ全てのリンクを考慮した場合（すなわち、複数段階の場合）のSCNEモデル（以下、

*キーワード：物流計画

**学生員，工学，京都大学大学院工学研究科
(京都市西京区京都大学桂 C1, TEL075-383-3231,
E-mail: k-tanabe@kiban.kuciv.kyoto-u.ac.jp)

***正会員，工博，京都大学大学院工学研究科
(京都市西京区京都大学桂 C1, TEL075-383-3230,
E-mail: tyamada@kiban.kuciv.kyoto-u.ac.jp)

****フェロー，工博，京都大学大学院工学研究科
(京都市西京区京都大学桂 C1, TEL075-383-3229,
E-mail: taniguchi@kiban.kuciv.kyoto-u.ac.jp)

図-1 単一段階SCN

図-2 複数段階SCN

複数段階モデルと称す) について定式化を示す。なお、わが国の店着価格制という取引形態を考慮して、各主体間の輸送費用は販売側 (SCNの上流側の主体) が負担し、その費用が販売価格に影響するものとする。

(1) 単一段階モデル (4主体) の定式化

図-1に示すように、ネットワーク上には、 m 個の製造業者、 n 個の卸売業者、 o 個の小売業者、 p 個の消費市場が存在すると仮定する。

a) 製造業者の行動

製造業者 i の行動は、利潤最大化を目的関数として、以下のように表される。なお、式中の*は均衡解を表す。

$$\text{Maximize } \sum_{j=1}^n \rho_{ij}^* q_{ij} - f_i(Q^1) - c_{ij}(Q^1) - g_i(Q^1) \quad (1)$$

$$\text{Subject to } q_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \quad (2)$$

ここに、

ρ_{ij} : 製造業者 i から卸売業者 j への販売価格

q_{ij} : 製造業者 i と卸売業者 j 間の商品取引量

Q^1 : q_{ij} を要素とする mn 次元列ベクトル

f_i : 製造業者 i の生産費用関数

c_{ij} : 製造業者 i と卸売業者 j 間の輸送費用関数

g_i : 製造業者 i の施設費用関数

なお、生産費用には材料費や設備費等が含まれる。また、施設費用には土地代や施設の維持管理費が含まれる。生産費用関数、輸送費用関数、施設費用関数が連続かつ凸であれば、最適性条件は以下の変分不等式を満たすこと、すなわち、下式を満たす $Q^1 \in R_+^{mn}$ を求めればよい。

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[\frac{\partial f_i(Q^1)}{\partial q_{ij}} + \frac{\partial c_{ij}(Q^1)}{\partial q_{ij}} + \frac{\partial g_i(Q^1)}{\partial q_{ij}} - \rho_{ij}^* \right] \times [q_{ij} - q_{ij}^*] \geq 0 \quad \forall Q^1 \in R_+^{mn} \quad (3)$$

b) 卸売業者の行動

次に、卸売業者 j の行動は利潤最大化を目的関数として、以下のように定式化できる。

$$\text{Maximize } \sum_{k=1}^o \rho_{jk}^* q_{jk} - c_j(Q^1) - c_{jk}(Q^2) - g_j(Q^1) - \sum_{i=1}^m \rho_{ij}^* q_{ij} \quad (4)$$

$$\text{Subject to } \sum_{k=1}^o q_{jk} \leq \sum_{i=1}^m q_{ij} \quad \forall j, q_{ij} \geq 0, q_{jk} \geq 0 \quad \forall i, j, k \quad (5)$$

ここに、

ρ_{jk} : 卸売業者 j から小売業者 k への販売価格

q_{jk} : 卸売業者 j と小売業者 k 間の商品取引量

c_j : 卸売業者 j の保管費用関数

c_{jk} : 卸売業者 j と小売業者 k 間の輸送費用関数

g_j : 卸売業者 j の施設費用関数

保管費用関数、輸送費用関数、施設費用関数が連続かつ凸であれば、最適性条件は以下の変分不等式を満足することであり、次式を満たす $(Q^1, Q^2, \gamma) \in R_+^{mn+no+n}$ を求めればよい。

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[\frac{\partial c_j(Q^1)}{\partial q_{ij}} + \frac{\partial g_j(Q^1)}{\partial q_{ij}} + \rho_{ij}^* - \gamma_j^* \right] \times [q_{ij} - q_{ij}^*] \\ & + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^o \left[-\rho_{jk}^* + \frac{\partial c_{jk}(Q^2)}{\partial q_{jk}} + \gamma_j^* \right] \times [q_{jk} - q_{jk}^*] \\ & + \sum_{j=1}^n \left[\sum_{i=1}^m q_{ij} - \sum_{k=1}^o q_{jk} \right] \times [\gamma_j - \gamma_j^*] \geq 0 \\ & \forall (Q^1, Q^2, \gamma) \in R_+^{mn+no+n} \end{aligned} \quad (6)$$

ここに、 γ_j は式(5)についてのラグランジュ乗数であり、 γ は γ_j を要素とする n 次元列ベクトルである。また、 Q^2 は q_{jk} を要素とする no 次元列ベクトルである。

c) 小売業者の行動

小売業者 k の行動は、卸売業者と同様に以下のように定式化できる。

$$\text{Maximize } \sum_{l=1}^p \rho_{3kl} q_{kl} - c_k(Q^2) - c_{kl}(Q^3) - g_k(Q^2) - \sum_{j=1}^n \rho_{2jk} q_{jk} \quad (7)$$

$$\text{Subject to } \sum_{l=1}^p q_{kl} \leq \sum_{j=1}^n q_{jk} \quad \forall k, q_{jk} \geq 0, q_{kl} \geq 0 \quad \forall j, k, l \quad (8)$$

ここに、

ρ_{3kl} : 小売業者 k から消費市場 l への販売価格

q_{kl} : 小売業者 k と消費市場 l 間の商品取引量

c_k : 小売業者 k の保管費用関数

c_{kl} : 小売業者 k と消費市場 l 間の輸送費用関数

g_k : 小売業者 k の施設費用関数

保管費用関数、輸送費用関数、施設費用関数が連続かつ凸であれば、最適性条件は式(9)の変分不等式を満足することであり、式(9)を満たす $(Q^2, Q^3, \delta^*) \in R_+^{no+op+o}$ を求めればよい。

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^o \left[\frac{\partial c_k(Q^2)}{\partial q_{jk}} + \frac{\partial g_k(Q^2)}{\partial q_{jk}} + \rho_{2jk} - \delta_k^* \right] \times [q_{jk} - q_{jk}^*] + \sum_{k=1}^o \sum_{l=1}^p \left[-\rho_{3kl} + \frac{\partial c_{kl}(Q^3)}{\partial q_{kl}} + \delta_k^* \right] \times [q_{kl} - q_{kl}^*] \quad (9)$$

$$+ \sum_{k=1}^o \left[\sum_{j=1}^n q_{jk}^* - \sum_{l=1}^p q_{kl}^* \right] \times [\delta_k - \delta_k^*] \geq 0$$

$$\forall (Q^2, Q^3, \delta) \in R_+^{no+op+o}$$

ここに、 δ_k^* は式(8)についてのラグランジェ乗数であり、 δ は δ_k を要素とする o 次元列ベクトルである。また、 Q^3 は q_{kl} を要素とする op 次元列ベクトルである。

d) 消費市場における消費者の行動

消費市場 l における消費者の行動は、需要関数が連続であるとの仮定の下、以下の均衡条件により記述できる。

$$\rho_{3kl} \begin{cases} = \rho_{4l} & \text{if } q_{kl}^* > 0 \\ \geq \rho_{4l} & \text{if } q_{kl}^* = 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$d_l(\rho_{4l}) \begin{cases} = \sum_{k=1}^o q_{kl}^* & \text{if } \rho_{4l}^* > 0 \\ \leq \sum_{k=1}^o q_{kl}^* & \text{if } \rho_{4l}^* = 0 \end{cases} \quad (11)$$

ここに、

ρ_{4l} : 消費市場 l の消費者価格

ρ_4 : ρ_{4l} を要素とする p 次元列ベクトル

d_l : 消費市場 l の需要関数

均衡状態において、式(10)と(11)は、全ての消費市場について満たされる必要があり、式(12)を満たす $(Q^2, \rho_4^*) \in R_+^{op+p}$ を求めればよい。

$$\sum_{k=1}^o \sum_{l=1}^p [\rho_{3kl} - \rho_{4l}^*] \times [q_{jk} - q_{jk}^*] + \sum_{l=1}^p \left[\sum_{k=1}^o q_{kl}^* - d_l(\rho_{4l}^*) \right] \times [\rho_{4l} - \rho_{4l}^*] \geq 0 \quad (12)$$

$$\forall (Q^3, \rho_4) \in R_+^{op+p}$$

e) ネットワーク全体の均衡条件

各主体が以上のように行動するとき、ネットワーク全体の均衡条件は、式(3),(6),(9),(12)より、以下の変分不等式(13)の解と等価になる。

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[\frac{\partial f_i(Q^*)}{\partial q_{ij}} + \frac{\partial c_{ij}(Q^*)}{\partial q_{ij}} + \frac{\partial c_i(Q^*)}{\partial q_{ij}} \right] \times [q_{ij} - q_{ij}^*] + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^o \left[\frac{\partial c_k(Q^2)}{\partial q_{jk}} + \frac{\partial g_k(Q^2)}{\partial q_{jk}} + \gamma_j^* - \delta_k^* \right] \times [q_{jk} - q_{jk}^*] + \sum_{k=1}^o \sum_{l=1}^p \left[\frac{\partial c_{kl}(Q^3)}{\partial q_{kl}} + \delta_k^* - \rho_{4l}^* \right] \times [q_{kl} - q_{kl}^*] + \sum_{j=1}^n \left[\sum_{l=1}^p q_{jl}^* - \sum_{k=1}^o q_{jk}^* \right] \times [\gamma_j - \gamma_j^*] + \sum_{k=1}^o \left[\sum_{j=1}^n q_{jk}^* - \sum_{l=1}^p q_{kl}^* \right] \times [\delta_k - \delta_k^*] + \sum_{l=1}^p \left[\sum_{k=1}^o q_{kl}^* - d_l(\rho_{4l}^*) \right] \times [\rho_{4l} - \rho_{4l}^*] \geq 0 \quad (13)$$

$$\forall (Q^*, Q^2, Q^3, \gamma^*, \delta^*, \rho_4^*) \in R_+^{mn+no+op+n+o+p}$$

式(13)に示された変分不等式の解の存在については、Nagurney *et al.*¹⁹⁾の定理2と全く同様に証明可能である。また、解の一意性についても、Nagurney *et al.*¹⁹⁾の定理3と全く同様に証明できる。このとき、 f_i は加法関数かつ凸関数、 $c_{ij}, c_{jk}, c_{kl}, c_j, c_k, g_k, g_l$ は凸関数、 d_l は単調減少関数である必要がある。

式(13)の解法については、Meng *et al.*²²⁾が推奨する方法を用いる。すなわち、式(13)の変分不等式問題を等価な非線形相補性問題へ、さらには、等価な制約なし最小化問題へと変換し、準ニュートン法により求解する。

(2) 複数段階モデル (4主体) の定式化

複数段階モデルの定式化については、単一段階モデルと異なる点について、要点のみ記述する。

a) 製造業者の行動

製造業者 i の行動は、以下のように表される。

$$\text{Maximize } \sum_{j=1}^n \rho_{ij} q_{ij} + \sum_{k=1}^o \rho_{4ik} q_{ik} + \sum_{l=1}^p \rho_{6il} q_{il} - f_i(Q, Q^2, Q^3) \quad (14)$$

$$- \sum_{j=1}^n c_{ij}(Q) - \sum_{k=1}^o c_{ik}(Q^2) - \sum_{l=1}^p c_{il}(Q^3) - g_i(Q, Q^2, Q^3)$$

$$\text{Subject to } q_{ij} \geq 0, q_{ik} \geq 0, q_{il} \geq 0 \quad \forall i, j, k, l \quad (15)$$

ここに、

ρ_{4ik} : 製造業者 i から小売業者 k への販売価格

ρ_{6il} : 製造業者 i から消費市場 l への販売価格

q_{ik} : 製造業者 i と小売業者 k 間の商品取引量

q_{il} : 製造業者 i と消費市場 l 間の商品取引量

Q^2 : q_{ik} を要素とする mo 次元列ベクトル

Q^3 : q_{il} を要素とする mp 次元列ベクトル

c_{ik} : 製造業者 i と小売業者 k 間の輸送費用関数
 c_{il} : 製造業者 i と消費市場 l 間の輸送費用関数

b) 卸売業者の行動

卸売業者 j の行動は、以下のように定式化できる。

$$\text{Maximize } \sum_{k=1}^o \dot{p}_{2jk} q_{jk} + \sum_{l=1}^p \dot{p}_{3jl} q_{jl} - c_j(Q) - \sum_{k=1}^o c_{jk}(Q^2) \quad (16)$$

$$\text{Subject to } \begin{aligned} & -\sum_{l=1}^p c_{jl}(Q^5) - g_j(Q) - \sum_{l=1}^m \dot{p}_{4jl} q_{jl} \\ & \sum_{k=1}^o q_{jk} + \sum_{l=1}^p q_{jl} \leq \sum_{l=1}^m q_{jl} \quad \forall j \\ & q_{ij} \geq 0, \quad q_{jk} \geq 0, \quad q_{jl} \geq 0 \quad \forall i, j, k, l \end{aligned} \quad (17)$$

ここに、

p_{5jl} : 卸売業者 j から消費市場 l への販売価格
 q_{jl} : 卸売業者 j と消費市場 l 間の商品取引量
 Q^5 : q_{jl} を要素とする np 次元列ベクトル
 c_{jl} : 卸売業者 j と消費市場 l 間の輸送費用関数

c) 小売業者の行動

小売業者 k の行動は、以下のように定式化できる。

$$\text{Maximize } \sum_{l=1}^p \dot{p}_{3kl} q_{kl} - c_k(Q^2, Q^4) - \sum_{l=1}^m c_{kl}(Q^3) \quad (18)$$

$$\text{Subject to } \begin{aligned} & -g_k(Q^2, Q^4) - \sum_{j=1}^n \dot{p}_{2jk} q_{jk} - \sum_{l=1}^m \dot{p}_{4lk} q_{lk} \\ & \sum_{l=1}^p q_{kl} \leq \sum_{j=1}^n q_{jk} + \sum_{l=1}^m q_{lk} \quad \forall k \\ & q_{jk} \geq 0, \quad q_{kl} \geq 0, \quad q_{lk} \geq 0 \quad \forall i, j, k, l \end{aligned} \quad (19)$$

d) 消費市場における消費者の行動

消費市場 l における消費者の行動は、以下のように記述できる。

$$\dot{p}_{3kl} \begin{cases} = \dot{p}_{7l} & \text{if } q_{kl} > 0 \\ \geq \dot{p}_{7l} & \text{if } q_{kl} = 0 \end{cases} \quad (20)$$

$$\dot{p}_{5jl} \begin{cases} = \dot{p}_{7l} & \text{if } q_{jl} > 0 \\ \geq \dot{p}_{7l} & \text{if } q_{jl} = 0 \end{cases} \quad (21)$$

$$\dot{p}_{6il} \begin{cases} = \dot{p}_{7l} & \text{if } q_{il} > 0 \\ \geq \dot{p}_{7l} & \text{if } q_{il} = 0 \end{cases} \quad (22)$$

$$d_l(\dot{p}_{7l}) \begin{cases} = \sum_{k=1}^o \dot{q}_{kl} + \sum_{j=1}^n \dot{q}_{jl} + \sum_{l=1}^m \dot{q}_{il} & \text{if } \dot{p}_{7l} > 0 \\ \leq \sum_{k=1}^o \dot{q}_{kl} + \sum_{j=1}^n \dot{q}_{jl} + \sum_{l=1}^m \dot{q}_{il} & \text{if } \dot{p}_{7l} = 0 \end{cases} \quad (23)$$

ここに、

p_{7l} : 消費市場 l の消費者価格
 p_7 : p_{7l} を要素とする p 次元列ベクトル

e) ネットワーク全体の均衡条件

各主体が以上のように行動するとき、ネットワーク全体の均衡条件は以下の変分不等式(24)の解と等価になる。式(24)に示された変分不等式の解の存在と一意性、および、解法については、単一段階モデルと同様に証明、および、求解が可能である。

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[\frac{\partial f_i(Q^*, Q^{**}, Q^{6*})}{\partial q_{ij}} + \frac{\partial c_j(Q^*)}{\partial q_{ij}} \right] \times [q_{ij} - q_{ij}^*] \\ & + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^o \left[\frac{\partial c_k(Q^{**}, Q^{**})}{\partial q_{jk}} + \frac{\partial c_{jk}(Q^{**})}{\partial q_{jk}} \right] \times [q_{jk} - q_{jk}^*] \\ & + \sum_{k=1}^o \sum_{l=1}^p \left[\frac{\partial c_{kl}(Q^{3*})}{\partial q_{kl}} + \delta_k^* - \dot{p}_{7l} \right] \times [q_{kl} - q_{kl}^*] \\ & + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^o \left[\frac{\partial f_i(Q^*, Q^{**}, Q^{6*})}{\partial q_{ik}} + \frac{\partial c_k(Q^{**}, Q^{**})}{\partial q_{ik}} + \frac{\partial c_{ik}(Q^{**})}{\partial q_{ik}} \right] \times [q_{ik} - q_{ik}^*] \\ & + \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^p \left[\frac{\partial c_{jl}(Q^{5*})}{\partial q_{jl}} + \gamma_j^* - \dot{p}_{7l} \right] \times [q_{jl} - q_{jl}^*] \\ & + \sum_{i=1}^m \sum_{l=1}^p \left[\frac{\partial f_i(Q^*, Q^{**}, Q^{6*})}{\partial q_{il}} + \frac{\partial c_{il}(Q^{6*})}{\partial q_{il}} \right] \times [q_{il} - q_{il}^*] \\ & + \sum_{j=1}^n \left[\sum_{l=1}^p \dot{q}_{jl} - \sum_{k=1}^o \dot{q}_{jk} - \sum_{l=1}^m \dot{q}_{jl} \right] \times [\gamma_j - \gamma_j^*] \\ & + \sum_{k=1}^o \left[\sum_{j=1}^n \dot{q}_{jk} + \sum_{l=1}^p \dot{q}_{kl} - \sum_{l=1}^m \dot{q}_{kl} \right] \times [\delta_k - \delta_k^*] \\ & + \sum_{l=1}^p \left[\sum_{k=1}^o \dot{q}_{kl} + \sum_{j=1}^n \dot{q}_{jl} \right] \times [\dot{p}_{7l} - \dot{p}_{7l}^*] \geq 0 \\ & \forall (Q^1, Q^2, Q^3, Q^4, Q^5, Q^6, \gamma, \delta, \dot{p}_7) \in R_+^{mn+no+op+mo+np+mp+n+o+p} \end{aligned} \quad (24)$$

3. ケーススタディ

本研究で用いるSCNは、仮想的なネットワークであり、主体数がそれぞれ、製造業者2社、卸売業者3社、小売業者4社、消費市場5箇所とする。その空間的配置は図3の通りである。

ケース0は、基本ケースであり、他のケースと比較するために設定したものである。ケース1は、ケース0において、配車配送計画システムの導入^{23),24)}などにより、都市内配送が効率化された場合を想定している。ケース2

は、ケース0において都市内流入規制が実施された場合である。ケース3は、ケース0と比較して、流通段階の相違に伴う商品取引量や商品価格などの変化を調べるために設けられた計算ケースである。なお、ケース0～2については単一段階モデルを、ケース3については複数段階モデルを使用する。

(1) ケース0：基本ケース

図-3に示すような4主体で構成されるSCNをケース0とする。本研究が計算対象とする広域的なSCNでは、生産費用等の費用関数に規模の経済性が働く可能性がある。しかし、本モデルでは、解の一意性を保証するために、費用関数が凸性を有する必要がある。したがって、規模の不経済性が生じる関数ではあるが、既存の文献¹⁹⁾を参考にして式(25)～(34)に示すような関数形を設定した。ただし、問題設定を実際のサプライチェーンに近づけるために、業種大分類別の売上高物流コスト比率²⁵⁾と中国における日本企業の現地法人および国内法人の売上高に占める生産費用の割合²⁶⁾を参考にして、パラメータ値を調整した。

$$f_i = \begin{cases} q_i^2 + 2q_1 + q_1q_2 & \text{if } i=1 \\ 2.5q_2^2 + 2q_2 + q_1q_2 & \text{if } i=2 \end{cases} \quad (25)$$

$$c_{ij} = \begin{cases} 0.4q_{ij}^2 + q_{ij} & \text{if } (i,j) = (2,2) \\ 0.4q_{ij}^2 + 2.5q_{ij} & \text{if } (i,j) = \{(2,1), (2,3)\} \\ 0.3q_{ij}^2 + 4q_{ij} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (26)$$

$$c_{jk} = \begin{cases} 0.4q_{jk}^2 + q_{jk} & \text{if } (j,k) = \{(1,1), (2,2), (3,4)\} \\ 0.4q_{jk}^2 + 2.5q_{jk} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (27)$$

$$c_{kl} = \begin{cases} 0.4q_{kl}^2 + q_{kl} & \text{if } (k,l) = \{(1,1), (2,2), (3,3), (4,4)\} \\ 0.4q_{kl}^2 + 2.5q_{kl} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (28)$$

図-3 計算対象とするSCN

$$c_j = 0.3 \left(\sum_{i=1}^2 q_{ij} \right)^2 \quad (29)$$

$$c_k = 0.3 \left(\sum_{j=1}^3 q_{jk} \right)^2 \quad (30)$$

$$g_i = \begin{cases} 6q_i & \text{if } i=1 \\ 12q_i & \text{if } i=2 \end{cases} \quad (31)$$

$$g_j = 12 \sum_{i=1}^2 q_{ij} \quad (32)$$

$$g_k = 12 \sum_{j=1}^3 q_{jk} \quad (33)$$

$$d_l = \begin{cases} 3(1000 - \rho_{4l} - 0.5 \sum_{i=1}^5 \rho_{4i}) & \text{if } l=4 \\ 1000 - \rho_{4l} - 0.5 \sum_{i=1}^5 \rho_{4i} & \text{if } l=3 \\ 0.5(1000 - \rho_{4l} - 0.5 \sum_{i=1}^5 \rho_{4i}) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (34)$$

ここで、式(25)の右辺第1項と第2項は、製造業者自身の生産量に依存する内部生産費用を表し、第3項は資源確保等の他の製造業者もしくは生産施設の生産量に影響される費用を表す。また、式(26)～(28)の右辺第1項は取引量に依存する費用を表し、第2項は取引を行う主体間の空間的距離に依存する費用を表す。式(34)については、市場間の競合性を反映させるために¹⁹⁾、当該地域および他地域の消費者価格の減少関数とした。

各主体の売上高に占める物流コストの比率について、ケース0の計算結果と実際のデータ²⁵⁾を比較した結果が、図-4である。図-4において、保管費用と輸送費用の和を物流コストと定義している。この結果、一部に過ぎないが、本研究の設定について、少なくともこの指標に関しては、現実との整合性を確保したと言える。

なお、ケース0も含めて、本研究でのケーススタディにおける各主体の施設費用は、総費用に対して3～5%程度であった。

(2) ケース1：都市内配送が効率化された場合

ケース0と比較して、都市内配送が効率化されて、輸送費用が減少する場合を想定する。既往の都市内配車配送計画に関する研究²³⁾から、都市内配送が効率化された場合の効果として、同一都市内に存在する小売業者と消費市場間の輸送費用のみ、基本ケースの20%減になるように設定した。

ケース1の計算結果の一例として、各都市内および都

図-4 売上高に占める物流コストの比率

表-1 ケース0に対するケース1の取引量の増減率

増減率(%)		市場				
		福岡	広島	大阪	東京	仙台
小売業者	福岡	25.4	-10.1	-7.6	-5.4	2.2
	広島	-10.1	25.4	-7.6	-5.4	2.2
	大阪	-14.4	-14.4	21.3	-6.3	-0.9
	東京	-24.5	-24.5	-14.9	18.3	-10.0
	需要量	-0.6	-0.6	-0.2	1.1	-1.7

表-2 ケース0およびケース1の需要量、消費者価格

需要量	福岡	広島	大阪	東京	仙台	合計
ケース0	11.15	11.15	20.44	46.00	10.98	99.72
ケース1	11.09	11.09	20.41	46.48	10.80	99.86
消費者価格	福岡	広島	大阪	東京	仙台	
ケース0	278.03	278.03	279.89	285.00	278.37	
ケース1	278.09	278.09	279.85	284.77	278.67	

市間の小売業者と消費市場間の商品取引量について、ケース0に対するケース1の増減を表-1に示す。輸送費用が削減された全てのリンク（表-1の網掛部）において、取引量がケース0よりも大きく増加している。このとき、表-2に示した通り、商品需要量の総和や最終的な商品価格には大きな変化が生じなかったことから、小売業者と消費市場の双方が立地する都市では、都市内配送が効率化された場合、他の都市からの輸送を都市内配送に転換するものと考えられる。また、東京のような大消費地では、需要量に対する輸送費用削減のインパクトが大きいので、結果として商品需要量そのものも増加する可能性がある。一方、仙台に流入するリンクは、配送が非効率になったわけではないが、需要量が減少している。このことは、生産費用の関数形に規模の経済性が働かないことから、輸送費用の減少が総生産量の大幅な増大に繋がらないこと、および、需要関数に市場間の競合性が作用することに起因するものと考えられる。

(3) ケース2：貨物の都市内流入を規制した場合

ケース0において、貨物に対して他の都市から東京への流入が規制された場合を想定する。このとき、規制に伴い、輸送する貨物量1単位あたりに定額が課金されるものとする。課金額は、ケース0において小売業者-消費市場間の輸送費用が約10%増加する値であることを考慮して、限界輸送費用を1単位増加させる。以下に、課金前後の限界輸送費用関数を示す。

ケース0

$$\frac{\partial c_{ij}}{\partial q_{ij}} = \begin{cases} 0.6q_{ij} + 4 & \text{if } (i, j) = (1, 3) \\ 0.8q_{ij} + 2.5 & \text{if } (i, j) = (2, 3) \end{cases} \quad (35)$$

$$\frac{\partial c_{jk}}{\partial q_{jk}} = 0.8q_{jk} + 2.5 \quad \text{if } (j, k) = \{(1, 4), (2, 4)\} \quad (36)$$

$$\frac{\partial c_{kl}}{\partial q_{kl}} = 0.8q_{kl} + 2.5 \quad \text{if } (k, l) = \{(1, 4), (2, 4), (3, 4)\} \quad (37)$$

ケース2

表-3 ケース0に対するケース2の取引量、需要量、消費者価格の増減率

増減率(%)		卸売業者				
製造-卸売間	中国	0.21	0.21	-1.21		
	広島	1.12	0.93	-3.13		
	需要量					
増減率(%)		小売業者				
卸売-小売間	福岡	1.82	2.27	2.14	-5.13	
	広島	2.23	1.80	2.10	-5.04	
	東京	-3.94	-3.94	-3.71	3.97	
増減率(%)		消費市場				
小売-市場間	福岡	7.23	2.35	1.76	-4.60	4.04
	広島	2.35	7.23	1.76	-4.60	4.04
	大阪	2.45	2.45	5.15	-4.64	4.19
	東京	-12.20	-12.20	-5.55	5.04	-8.27
	需要量	1.16	1.16	1.16	-1.90	0.97
消費者価格		-0.06	-0.06	-0.05	0.14	-0.04

図-5 各主体の余剰の比較

$$\frac{\partial c_{ij}}{\partial q_{ij}} = \begin{cases} 0.6q_{ij} + 5 & \text{if } (i, j) = (1, 3) \\ 0.8q_{ij} + 3.5 & \text{if } (i, j) = (2, 3) \end{cases} \quad (38)$$

$$\frac{\partial c_{jk}}{\partial q_{jk}} = 0.8q_{jk} + 3.5 \quad \text{if } (j, k) = \{(1, 4), (2, 4)\} \quad (39)$$

$$\frac{\partial c_{kl}}{\partial q_{kl}} = 0.8q_{kl} + 3.5 \quad \text{if } (k, l) = \{(1, 4), (2, 4), (3, 4)\} \quad (40)$$

表-3は、各リンクの商品取引量について、ケース0に対するケース2の増減を示したものである。他の都市から東京への取引量が減少し、東京の都市内取引量が増加している。それに伴い、東京から他の都市への取引量が減少する傾向にあることがわかる。この結果においても、需要量の総和や最終的な商品価格には大きな変化が見られなかったことから、都市内流入規制に伴う輸送費用の上昇は、上昇率が本ケースにて仮定した程度であれば、各リンク間の取引量には影響を及ぼすものの、生産費用の規模の不経済性も相まって、ネットワーク全体の総取引量に対しては、さほど影響しないものと推察される。

つぎに、各主体の余剰を求めることにより、SCNの効率性を考察する。ケース0～ケース2について、各主体の

余剰を求めた結果が図-5である。ケース1では、ケース0に対して総余剰が微増しており、一方、ケース2では総余剰が微減していることがわかる。このことから、都市内配送の効率化は、供給側にとって有益であるといえるが、流入規制による課金は、SCNの効率性を低下させる可能性があるものと考えられる。

(4) ケース3：複数の流通段階を考慮した場合

現実的には、商品のSCNは複数の流通段階を有しているものと想像される。そこで、ケース0のネットワークにおいて、製造業者—小売業者間の新たな流通経路を加えたSCNを設定し、そのような「中抜き」リンクにおいては、Eコマースによって取引がなされていると仮定する（図-6）。このとき、小売業者について、製造業者—小売業者間の流通経路で購入した量の全購入量に対する比率をBtoBのEコマース利用率と定義する。本研究では、実際のデータ²⁷⁾に基づき、Eコマース利用率が約13%になるときのSCNを推定する。ケース3では、輸送費用関数以外の関数はケース0と同様とし、以下の関数のみ新たに設定する。

$$c_{ik} = \begin{cases} \alpha(0.4q_{ik}^2 + q_{ik}) & \text{if } (i,k) = (2,2) \\ \alpha(0.4q_{ik}^2 + 2.5q_{ik}) & \text{if } (i,k) = \{(2,1), (2,3), (2,4)\} \\ \alpha(0.3q_{ik}^2 + 4q_{ik}) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (41)$$

ここに、 α は正値をとる変数とする。

図-7に α の値を変動させたときの小売業者全体におけるEコマース利用率を示す。また、 $\alpha=12$ のときの小売業者と各主体間の商品取引量を表4に示す。

図-7および表4より、 $\alpha=12$ のとき、このネットワークでは、Eコマース利用率が現実と同程度になることがわかる。図-7より、 α が大きくなり、輸送費用が増加するに従って、Eコマースの利用率が減少する傾向が見られる。

α の変化に伴う、各主体の余剰の内訳を図-8に示す。輸送費用が増加するに従い、ネットワーク全体の総余剰は減少しているが、卸売業者の余剰は増加していることがわかる。製造業者—小売業者間の輸送費用の増加により、卸売業者を仲介する流通経路の効率性が相対的に上昇した結果、卸売業者の取扱量が増加したためと考えられる。また、 $\alpha=12$ のときの結果をケース0と比較すると、ネットワーク全体の総余剰が増加していることがわかる。この結果には、流通経路が増加することによる規模の不経済性の緩和、ネットワーク全体を流通する商品量の増加、および、流通段階の簡略化に伴う小売業者の仕入れ価格（すなわち、卸売業者から小売業者への販売価格）の減少が影響している。

なお、一般に、製造業者が多数存在する場合、小売業者にとって卸売業者は、取引を効率化する役割を果たす。

図-6 複数の流通段階を考慮したSCN

図-7 製造-小売間の輸送費用増加に伴うEコマース利用率の変化

表-4 小売業者の商品取引量とEコマース利用率（ $\alpha=12$ のとき）

取引量	福岡	広島	大阪	東京	全体
発地					
製造業者	2.66	4.45	2.75	2.55	12.41
卸売業者	22.74	21.41	22.19	22.82	89.16
合計	25.40	25.86	24.93	25.37	101.57
Eコマース利用率	10.5%	17.2%	11.0%	10.1%	12.2%

図-8 製造-小売間の輸送費用増加に伴う各主体の余剰の変化

ただし、本ケースにおいては、製造業者を少数に設定したために、そのような役割が薄れて、流通段階における中抜き効果が大きく顕れたものと考えられる。

また、現実には、小売業者が製造業者と電子商取引を行った場合、製品そのものは卸売業者の倉庫から配送されることも考えられる。したがって、本ケースから得られた知見は、商取引と同じリンク上で物流も行われている場合に限定されるものである。商物分離が行われるケースについては、今後検討する必要がある。

4. おわりに

本研究では、施設費用を明示的に考慮した、4主体で構成されるSCNEモデルを定式化し、そのモデルを用いて、都市内配送の効率化および都市圏への流入規制などの都市物流施策による影響について検討した。また、複数の流通段階の利用が可能なSCNEモデルを用いて、流通段階の相違に伴う商品取引量や商品価格などの変化に関する基礎的検討を行った。その際、SCN全体の効率性を評価する指標として、各主体の余剰を用いた。

その結果、都市物流施策の影響は、施策が実施された当該都市のみならず、SCN全体に影響が及ぶことが確認された。また、都市内配送の効率化は、特に供給側にとって効果的であり、流入規制は、SCNの効率性を低下させる可能性が示唆された。ただし、都市内における交通問題の観点から見れば、都市内配送の効率化は貨物車台数の増加に、流入規制は貨物車台数の抑制に繋がる。また、複数の流通段階が存在する場合、SCN全体の効率性を向上できることがわかった。

ただし、本研究から得られた知見によって、サプライチェーン上の現象記述や物流施策分析がすべて網羅されたわけではなく、あくまで基礎的検討を行ったに過ぎない。今後は、物流事業者の行動、商物分離の特性や規模の不経済の抑制などを考慮して、モデルを精緻化する必要がある。特に、費用関数の規模の不経済性については、今後十分な検討が必要である。なお、密集した都市内で完結するSCNが対象であれば、規模の不経済性が働く可能性が高いので、モデルの適用範囲も今後の検討課題となる。また、結果の現実性を高めるために、関数形やパラメータ値についても、さらなる検討が必要である。

参考文献

- 1) 経済産業省HP：企業活動におけるIT活用事例，<http://www.meti.go.jp/report/tshaku/h13/xls/13221001.doc>，(2008.2月現在)
- 2) 山田忠史：ロジスティクス，小林潔司・朝倉康夫・山崎朗編著，これからの都市・地域政策－「実験型都市」が未来を創る－第Ⅱ部第8章，中央経済社，pp.163-189，2005.
- 3) Geoffrion, A.M.: Better distribution planning with computer models, *Harvard Business Review*, pp92-99, 1976.
- 4) Geoffrion, A.M. and Graves, G.: Multicommodity distribution system design by Benders' decomposition, *Management Science*, 5, pp822-844, 1974.
- 5) Nishi, T., Konishi, M. and Hasebe, S.: An autonomous decentralized supply chain planning system for multi-stage production processes, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 16, pp259-275, 2005.
- 6) 相浦宣徳，中島啓之，唐澤豊，谷口栄一：量的・時間的フレキシビリティを考慮したサプライチェーン設計モデルに関する研究，第28回土木計画学研究発表会・講演集，CD-ROM，2003.
- 7) 菊地竜也，石黒一彦，稲村肇，石倉智樹：SCMによる建設プロジェクト在庫削減効果の検討，土木計画学研究・論文集，Vol.18，pp395-402，2001.
- 8) Tan, W.: Integration of process planning and scheduling – a review, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 11, pp51-63, 2000.
- 9) Almeder, C., Preusser, M. and Hartl, R.F.: Simulation and optimization of supply chains: alternative or complementary approaches?, *OR Spectrum*, pp1-25, 2008.
- 10) Kogan, K. and Herbon, A.: A supply chain under limited-time promotion: The effect of customer sensitivity, *European Journal of Operational Research*, 188, pp273-292, 2008.
- 11) Chow, W.S., Madu, C.N., Kuei, C.H., Lu, M.H., Lin, C. and Tseng, H.: Supply chain management in the US and Taiwan: An empirical study, *Omega*, 36, pp665-679, 2008.
- 12) Ketikidis, P.H., Koh, S.C.L., Dimitriadis, N., Gunasekaran A. and Kehajova, M.: The use of information systems for logistics and supply chain management in South East Europe: Current status and future direction, *Omega*, 36, pp592-599, 2008.
- 13) Dumrongsiri, A., Fan, M., Jain, A. and Moinsadeh, K.: A supply chain model with direct and retail channels, *European Journal of Operational Research*, 187, pp691-718, 2008.
- 14) Choi, T.M., Li, D., Yan, H. and Chiu, C.H.: Channel coordination in supply chains with agents having mean-variance objectives, *Omega*, 36, pp565-576, 2008.
- 15) Villegas, F. and Ouenniche, J.: A general unconstrained model for transfer pricing in multinational supply chains, *European Journal of Operational Research*, 187, pp829-856, 2008.
- 16) Yao, D.Q., Yue, X. and Liu, J.: Vertical cost information sharing in a supply chain with value-adding retailers, *Omega*, 36, pp838-851, 2008.
- 17) 三部貴義，岩尾詠一朗，苦瀬博仁：物資流動調査のデータにもとづく物流チャネルの設定方法と物流施設計画への利用の可能性，第34回土木計画学研究発表会・講演集，CD-ROM，2006.
- 18) 細谷涼子，佐野可寸志，加藤浩徳，家田仁，福田敦：企業行動構造を明示的に考慮した大都市圏物流施策評価モデルの構築，土木計画学研究・論文集，Vol.20，pp759-770，2003.
- 19) Nagurney, A., Dong, J. and Zhang, D.: A supply chain network equilibrium model, *Transportation Research Part E*, 38, pp281-303, 2002.
- 20) Dong, J., Zhang, D. and Nagurney, A.: A supply chain network equilibrium model with random demands, *European Journal of Operational Research*, 156, pp194-212, 2004.
- 21) Nagurney, A., Cruz, J., Dong, J. and Zhang, D.: Supply chain networks, electronic commerce, and supply side and demand side risk, *European Journal of Operational Research*, 164, pp120-142, 2005.
- 22) Meng, Q., Huang, Y. K. and Cheu, R. L.: A note on supply chain network equilibrium models, *Transportation Research Part E*, 43, pp60-71, 2007.

- 23) 谷口栄一, 山田忠史, 細川貴志: 都市内集配送トラックの配車配送計画の高度化・共同化による道路交通への影響分析, 土木学会論文集, No.625, IV-44, pp.149-159, 1999.
- 24) 谷口栄一, 山田忠史, 柿本恭志: 所要時間の不確実性を考慮した都市内集配トラックの確率論的配車配送計画, 土木学会論文集, No.674, IV-51, pp.49-61, 2001.
- 25) 社団法人日本ロジスティクスシステム協会: 2006年度物流コスト調査報告書(概要) <http://www.logistics.or.jp/search/chart/cost/pdf/cost06.pdf>. (2008.2月現在).
- 26) 経済産業省HP: 中国における我が国企業の現地法人および国内法人の売上高に占める主要コストの推移, <http://www.meti.go.jp/statistics/kaiseki/13-3/h4a1112j007.pdf>. (2007.6月現在)
- 27) 経済産業省HP: 「平成17年度電子商取引に関する市場調査」の結果公表について, <http://www.meti.go.jp/press/20060626003/kekkakouhyou-set.pdf>. (2008.2月現在)

サプライチェーンネットワーク均衡モデルを用いた流通ネットワーク特性および都市物流施策の影響評価に関する基礎的研究*

田辺建二**・山田忠史***・谷口栄一****

商品のサプライチェーン全体で生じる現象を記述するモデルとして、サプライチェーンネットワーク均衡(SCNE)モデルに注目し、製造業者・卸売業者・小売業者・消費市場の4主体で構成されるSCNEモデルの定式化を示し、モデルの性能の妥当性を検討した。モデルを用いて、仮想ネットワークに対して、都市内配送効率化や流入規制などの物流施策の効果を比較分析した。また、複数の流通段階の利用が可能なSCNEモデルを用いて、複数の流通段階をもつサプライチェーンネットワークの特性について、輸送費用やEコマースとの関係の観点から基礎的な評価検討を行った。その結果、物流施策の影響は施策実施箇所のみならず、SCN全体に波及する可能性が示唆された。

Evaluating the Effects of Urban Logistics Policies and the Characteristics of Distribution Networks using Supply Chain Network Equilibrium Models*

By Kenji TANABE**・Tadashi YAMADA***・Eiichi TANIGUCHI****

This paper focuses on supply chain network equilibrium modeling and formulates the case of four agents, including manufacturers, wholesalers, retailers and consumers. The performance of the model was firstly investigated, and then the effects of urban logistics policies, such as advanced vehicle routing and scheduling systems and access restrictions to cities, was explored using a hypothetical supply chain network. The characteristics of distribution networks were also investigated using the supply chain network equilibrium model that can take into account multiple channels. Results showed that the implementation of urban logistics policies might influence whole supply chain network.