

サプライチェーンネットワーク均衡モデルを用いた 流通経路特性および都市物流施策の影響に関する基礎的分析*

Investigating the Effects of Urban Logistics Policies and the Characteristics of Distribution Channels 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。また、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全体で評価すべきであり、適確な物流施策を実行するためには、サプライチェーン形態に伴う流通特性を把握する必要がある¹⁾。

本研究では、その第一段階として、サプライチェーンネットワーク均衡(SCNE: Supply Chain Network Equilibrium)モデルを用いて、仮想的なサプライチェーンネットワークを対象として、都市物流施策の影響や流通経路の相違に伴う商品取引量や商品価格の変化に関して基礎的検討を行う。

2. モデルの定式化

本研究では、サプライチェーン上の行動主体が2主体（製造業者、消費市場）の場合、3主体（製造業者、小売業者、消費市場）の場合、4主体（製造業者、卸売業者、小売業者、消費市場）の場合を想定する。その際、既存の2主体と3主体の場合のSCNEモデル²⁾に加えて、本研究では4主体の場合のモデルを提示する。また、製造業者、卸売業者、小売業者については、施設費用を明

*キーワード：物流計画，物資流動
**学生員，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, FAX075-950-3800)

***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, FAX075-950-3800)

****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, FAX075-950-3800)

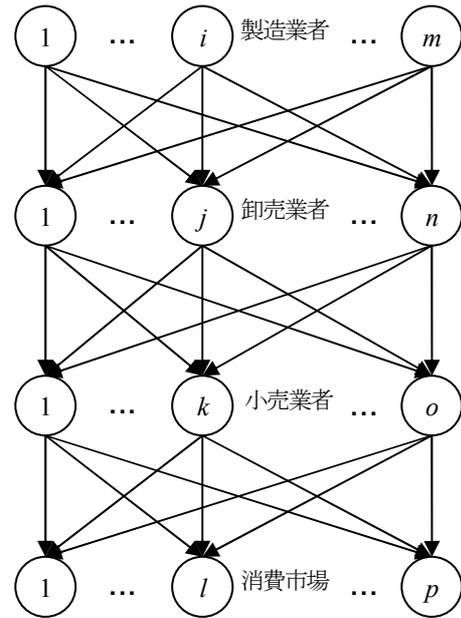


図-1 サプライチェーンネットワーク(4主体の場合)

示的に考慮する。以下では、4主体で構成されるSCNEモデルについて、その定式化を示す。

4主体の場合、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。

(1) 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。

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

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

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^l : 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 間の取引費用関数

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、取引費用には輸送費用が、施設費用には土地代や施設の維持管理費が含まれる。

(2) 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。

$$\text{Maximize } \rho_{2j}^* \sum_{k=1}^o q_{jk} - c_j(Q^1) - g_j(Q^1) - \sum_{i=1}^m \rho_{1ij}^* q_{ij} \quad (3)$$

$$\text{Subject to } \sum_{k=1}^o q_{jk} \leq \sum_{i=1}^m q_{ij}, \quad q_{ij} \geq 0, \quad q_{jk} \geq 0 \quad \forall i, k \quad (4)$$

ここに、

- ρ_{2j} : 卸売業者 j 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
- g_j : 卸売業者 j の施設費用関数

(3) 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。

$$\text{Maximize } \rho_{3k}^* \sum_{l=1}^p q_{kl} - c_k(Q^2) - c_{jk}(Q^2) - g_k(Q^2) - \sum_{j=1}^n \rho_{2j}^* q_{jk} \quad (5)$$

$$\text{Subject to } \sum_{l=1}^p q_{kl} \leq \sum_{j=1}^n q_{jk}, \quad q_{jk} \geq 0, \quad q_{kl} \geq 0 \quad \forall j, l \quad (6)$$

ここに、

- ρ_{3k} : 小売業者 k 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
- Q^2 : q_{kl} を要素とする no 次元列ベクトル
- c_k : 小売業者 k の保管費用関数
- c_{jk} : 卸売業者 j と小売業者 k 間の取引費用関数
- g_k : 小売業者 k の施設費用関数

(4) 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、以下の均衡条件により記述できる。

$$\rho_{3k}^* + c_{kl}(Q^{3*}) \begin{cases} = \rho_{4l}^* & \text{if } q_{kl}^* > 0 \\ \geq \rho_{4l}^* & \text{if } q_{kl}^* = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$d_l(\rho_{4l}^*) \begin{cases} = \sum_{k=1}^o q_{kl}^* & \text{if } \rho_{4l}^* > 0 \\ \leq \sum_{k=1}^o q_{kl}^* & \text{if } \rho_{4l}^* = 0 \end{cases} \quad (8)$$

ここに、

- c_{kl} : 小売業者 k と消費市場 l 間の取引費用関数
- Q^3 : q_{kl} を要素とする op 次元列ベクトル
- ρ_{4l} : 消費市場 l の商品価格
- ρ_4 : ρ_{4l} を要素とする l 次元列ベクトル

d_l : 消費市場 l の需要関数

(5) ネットワーク全体の均衡条件式

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、以下の変分不等式の解と等価になる。

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[\frac{\partial f_i(Q^{1*})}{\partial q_{ij}} + \frac{\partial c_{ij}(Q^{1*})}{\partial q_{ij}} + \frac{\partial c_j(Q^{1*})}{\partial q_{ij}} \right. \\ & \quad \left. + \frac{\partial g_i(Q^{1*})}{\partial q_{ij}} + \frac{\partial g_j(Q^{1*})}{\partial q_{ij}} - \gamma_j^* \right] \times [q_{ij} - q_{ij}^*] \\ & + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^o \left[\frac{\partial c_k(Q^{2*})}{\partial q_{jk}} + \frac{\partial c_{jk}(Q^{2*})}{\partial q_{jk}} \right. \\ & \quad \left. + \frac{\partial g_k(Q^{2*})}{\partial q_{jk}} + \gamma_j^* - \delta_k^* \right] \times [q_{jk} - q_{jk}^*] \\ & + \sum_{k=1}^o \sum_{l=1}^p [c_{kl}(Q^{3*}) + \delta_k^* - \rho_{4l}^*] \times [q_{kl} - q_{kl}^*] \\ & + \sum_{j=1}^n \left[\sum_{i=1}^m q_{ij}^* - \sum_{k=1}^o q_{jk}^* \right] \times [\gamma_j - \gamma_j^*] \\ & + \sum_{k=1}^o \left[\sum_{j=1}^n q_{jk}^* - \sum_{l=1}^p q_{kl}^* \right] \times [\delta_k - \delta_k^*] \\ & + \sum_{l=1}^p \left[\sum_{k=1}^o q_{kl}^* - d_l(\rho_{4l}^*) \right] \times [\rho_{4l} - \rho_{4l}^*] \geq 0, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\forall (Q^{1*}, Q^{2*}, Q^{3*}, \gamma^*, \delta^*, \rho_4^*) \in R_+^{mn+no+op+n+o+p}$$

γ_j と δ_k は、それぞれ式(4)と式(6)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、 δ は δ_k を要素とする o 次元列ベクトルである。式(9)の第1項から第6項までの乗算記号前部の関数群を、それぞれ $F_{ij}, F_{jk}, F_{kl}, F_j, F_k, F_l$ と表し、 $F(X) = (F_{ij}, F_{jk}, F_{kl}, F_j, F_k, F_l)$ $i=1, \dots, m, j=1, \dots, n, k=1, \dots, o, l=1, \dots, p$ と表される関数群のベクトルとする。また、 $X = (Q^1, Q^2, Q^3, \gamma, \delta, \rho_4)$ とする。このとき式(9)は、空間 $R^{mn+no+op+n+o+p}$ の閉凸部分集合 S について、

$$X^* \in S, \langle F(X^*), X - X^* \rangle \geq 0, \quad \forall X \in S \quad (10)$$

を満たすような点 $X^* \in S$ を求める問題となる。

X の要素は全て非負の値をとるので、式(10)は、「 $X^* \geq 0, F(X^*) \geq 0, \langle F(X^*), X^* \rangle = 0$ 」を満たす X^* を求める非線形相補性問題に帰着されるため、非線形方程式 $F(X) = 0$ の解 X^* を求めればよい³⁾。なお、数値解法としては、修正射影法²⁾(modified projection method)を用いることにより、均衡解を算出できる。

3. ケーススタディ

(1) 問題設定

本研究で用いるサプライチェーンネットワークは、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-2の通りである.

(2) 基本ケース (ケース0)

図-2 に示すような4主体で構成されるサプライチェーンネットワークをケース0とする. このとき, 式(11)~(16)に示すように, 種々の関数形は, 既存の研究²⁾を基にして設定した. ただし, 現実問題のサプライチェーンに近づけるために, 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⁴⁾を参考にして, パラメータ値を調整した.

$$f_i = \begin{cases} q_1^2 + q_1q_2 + 2q_1 & \text{if } i=1 \\ 2.5q_2^2 + q_1q_2 + 2q_2 & \text{if } i=2 \end{cases} \quad (11)$$

$$c_{ij} = \begin{cases} 0.5q_{ij}^2 + 2q_{ij} & \text{if } (i,j) = (2,2) \\ 0.5q_{ij}^2 + 3.5q_{ij} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

$$c_{jk} = \begin{cases} 0.5q_{jk}^2 + 2q_{jk} & \text{if } (j,k) = (1,1), (2,2), (3,4) \\ 0.5q_{jk}^2 + 3.5q_{jk} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

$$c_{kl} = \begin{cases} q_{kl} + 3.5 & \text{if } (k,l) = (1,1), (2,2), (3,3), (4,4) \\ q_{kl} + 5 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

$$c_j = 0.5 \left(\sum_{i=1}^2 q_{ij} \right)^2 \quad (15)$$

$$c_k = 0.5 \left(\sum_{j=1}^3 q_{jk} \right)^2 \quad (16)$$

$$g_i = \begin{cases} 6q_i & \text{if } i=1 \\ 12q_i & \text{if } i=2 \end{cases} \quad (17)$$

$$g_j = 12 \sum_{i=1}^2 q_{ij} \quad (18)$$

$$g_k = 12 \sum_{j=1}^3 q_{jk} \quad (19)$$

$$d_l = \begin{cases} 3(1000 - \rho_{4l} - 0.5 \sum_{i=1}^5 \rho_{4i}) & \text{if } l=4 \\ 1000 - \rho_{4l} - 0.5 \sum_{i=1}^5 \rho_{4i} & \text{if } l=3 \\ 0.5(1000 - \rho_{4l} - 0.5 \sum_{i=1}^5 \rho_{4i}) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (20)$$

(3) ケース1: 都市内配送が効率化された場合

基本ケースと比較して, 都市内配送が効率化されて, 取引費用が減少された場合を考える. 具体的には, 既往の都市内配送に関する研究³⁾から, 都市内配送が効率化された場合の効果として, 同一都市内の小売業者と消費市場間の取引費用が基本ケースの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. 取引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, 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

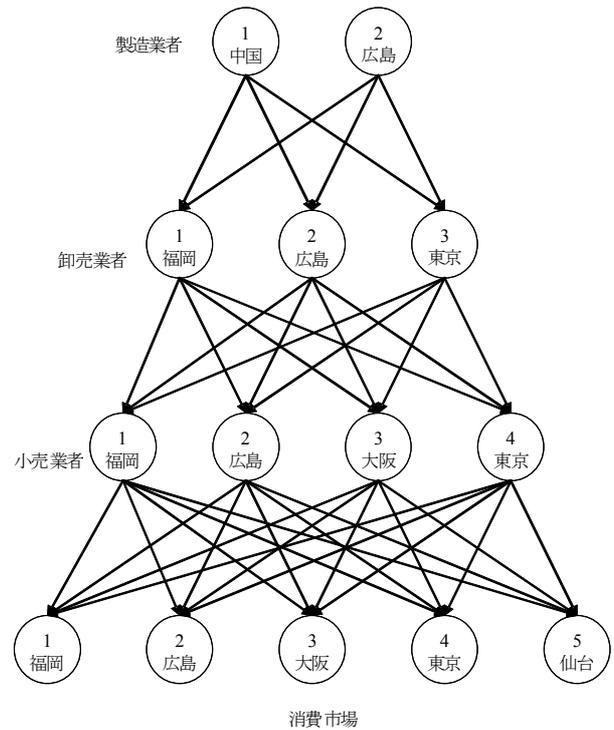


図-2 ケース0のサプライチェーンネットワーク

表-1 ケース0に対するケース1の取引量の変化率

増減率(%)	小売業者				総需要量	
	消費市場	福岡	広島	大阪		東京
福岡		37.2	-16.2	-20.4	-29.6	-0.5
広島		-16.2	37.2	-20.4	-29.6	-0.5
大阪		-10.7	-10.7	29.0	-17.7	0.0
東京		-6.7	-6.7	-7.5	22.7	1.3
仙台		1.3	1.3	-1.9	-10.3	-2.4

から, 小売業者と消費市場が両方とも立地する都市では, 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, 需要量に対する取引費用削減のインパクトが大きいため, 結果として需要量そのものも増加する可能性がある.

(4) ケース2: 貨物車の都市内流入を規制した場合

ケース0のネットワークにおいて, 貨物車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. 規制に伴い, 取引費用が10%増加するものと仮定する.

表-2は, 各リンクの取引量について, 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取引費用の上昇は, 各リンク間の取引量に影響を及ぼすが, 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考えられる.

表-2 ケース0に対するケース2の取引量の変化率

変化率(%)	製造→卸売		卸売→小売			小売→市場				総需要量
着地\発地	中国	広島	福岡	広島	東京	福岡	広島	大阪	東京	
福岡	1.2	-1.9	1.7	2.1	-4.8	3.3	5.6	5.8	-9.6	1.6
広島	1.2	-1.6	2.1	1.7	-4.8	5.6	3.3	5.8	-9.6	1.6
大阪			2.0	2.0	-4.5	3.7	3.7	2.7	-4.2	1.6
東京	-4.1	3.6	-4.1	-4.1	3.1	-6.0	-6.0	-6.0	4.6	-3.0
仙台						4.9	4.9	5.0	-8.3	1.6

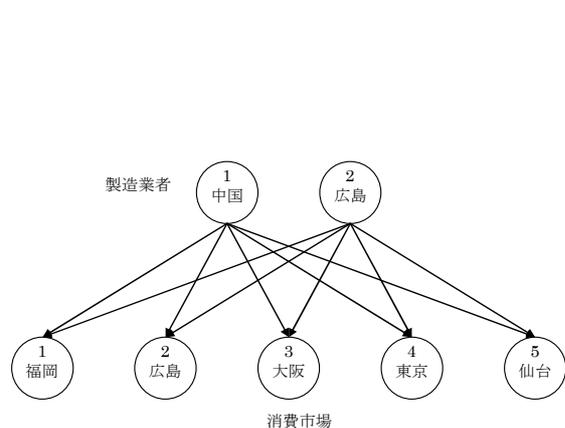


図-3 2主体で構成されるサプライチェーンネットワーク

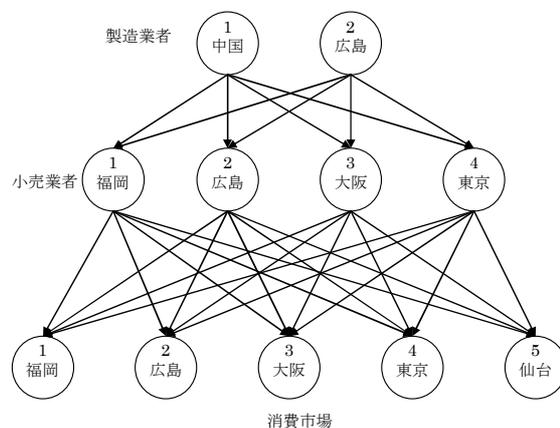


図-4 3主体で構成されるサプライチェーンネットワーク

(5) ケース3：流通経路の比較分析

4主体のネットワーク（ケース0）の結果を、卸売業者を除いた3主体で構成されるネットワーク、および、卸売業者と小売業者を除いた2主体で構成されるネットワークとの結果を比較することにより、流通経路の相違による各主体の利潤、および、市場価格の変化を考察する。

一般的には、ネットワーク上に存在する主体数が少ない方が、消費者は商品を低価格で購入可能で、かつ、消費者以外の主体が得る利潤も増加するので、ネットワーク全体として効率的であるといえる。例えば、最終的に消費者が支払う費用に占める製造業者の利潤の割合は、2主体、3主体、4主体でそれぞれ、42%、32%、26%であった。

しかし、ケース3では、消費者について2主体よりも3主体の方が有利となった。それは、市場価格がそれぞれ、2主体の場合で281.68、3主体の場合で281.35、という結果が算出されたことからいえる。この結果は、本研究での条件設定、すなわち、2主体の場合の保管費用は製造業者2社が負担し、3主体の場合の保管費用は小売業者4社が負担することに依存している。保管費用の関数を2次の単調増加関数と設定しているため、保管を担う主体の1社当たりの取扱量は2主体の方が大きくなるので、関数の性質上、2主体の場合の方が保管費用について、より大きな負担をすることからネットワークの優劣が逆転したものと考えられる。

5. 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、都市物流施策の影響や流通経路の相違に伴う商品取引量や商品価格の変化に関する基礎的検討を行った。

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、サプライチェーンネットワーク全体に影響が及ぶことが示された。また、主体数の相違によるサプライチェーンネットワークの優劣は、一般的には主体数が少ないほど有利であると考えられるが、保管費用や取引費用しだいでは、優劣が逆転する可能性があることも示唆された。

参考文献

- 1) 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.
- 2) A. Nagurney, J. Dong, D. Zhang : A supply chain network equilibrium model, Transportation Research Part E, 38, pp.281-303, 2002.
- 3) 福島雅夫：非対称な変分不等式に対する等価な最適化問題と降下法，日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会アブストラクト集，Vol.1990，pp.220-221，1990.
- 4) 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)。
- 5) 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.