

第IV部門

商物分離を考慮したサプライチェーンネットワーク均衡分析

京都大学工学部 学生員 ○中村 昂雅
 京都大学大学院工学研究科 正会員 山田 忠史
 京都大学大学院工学研究科 フェロー 谷口 栄一

1. 研究の背景と目的

消費者ニーズの多様化や国際的な販売競争の激化に伴い、サプライチェーンネットワーク(SCN:Supply Chain Network)の効率的な形成が求められており、商物分離や電子商取引に見られるように、流通システムが多様化している。

多段階の SCN 全体で生じる現象を記述するための方法論として、5 主体（製造業者、卸売業者、小売業者、消費市場、物流業者）の意思決定から構成されるサプライチェーンネットワーク均衡 (SCNE: Supply Chain Network Equilibrium)モデル¹⁾があり、行政側の物資流動メカニズムや物流施策効果の把握、および、企業側の施策理解に貢献することが期待されている。

本研究では、商物分離型 5 主体 SCNE モデルを提案し、商物一体型 SCNE モデル¹⁾から得られる結果と比較することにより、商物分離が SCN に及ぼす影響について基礎的検討を行う。

2. モデルの定式化

SCN 上に m 個の製造業者、 n 個の卸売業者、 o 個の小売業者、 r 個の消費市場、 u 個の物流業者が存在すると仮定する。本研究では、製造業者から卸売業者、および、卸売業者から小売業者における、商取引と商品の空間的移動を分離することにより、商物分離を表現する。卸売業者は保管費用を負担しないものとし、物流業者は、製造業者から小売業者に商品を輸送し、その運賃は卸売業者が負担するものとする。

製造業者 i の行動は、利潤最大化を目的として以下のように表される。

$$\text{Max}_{q_i} \sum_{j=1}^n \rho_{ij}^{1*} \sum_{h=1}^u \sum_{k=1}^o q_{hijk} - f_i(Q^1) - g_i(Q^1) - \sum_{j=1}^n c_{ij}(Q^1) \quad (1)$$

$$\text{s.t. } q_{hijk} \geq 0 \quad \forall h, j, k \quad (2)$$

ここに、

- q_{hijk} : ijk 間における物流業者 h の輸送量
- q_i : q_{hijk} を要素とする uno 次元ベクトル
- Q^1 : q_{hijk} を要素とする $umno$ 次元ベクトル
- ρ_{ij}^{1*} : 製造業者 i から卸売業者 j への販売価格
- $f_i(Q^1)$: 製造業者 i の生産費用
- $g_i(Q^1)$: 製造業者 i の施設費用

$c_{ij}(Q^1)$: 製造業者 i と卸売業者 j の取引費用である。生産費用には材料費や設備費などが、取引費用には運賃以外の取引に関わる費用が、施設費用には土地取得費用や施設維持管理費が、それぞれ含まれる。

卸売業者 j の行動は、利潤最大化を目的として以下のように表される。

$$\text{Max}_{q_j} \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^o \rho_{ijk}^{2*} \sum_{h=1}^u q_{hijk} - g_j(Q^1) - \sum_{k=1}^o c_{jk}(Q^1) \quad (3)$$

$$- \sum_{h=1}^u \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^o \rho_{hik}^{5*} q_{hijk} - \sum_{i=1}^m \rho_{ij}^{1*} \sum_{k=1}^o \sum_{h=1}^u q_{hijk} \quad (4)$$

$$\text{s.t. } q_{hijk} \geq 0 \quad \forall h, i, k$$

ここに、

- q_j : q_{hijk} を要素とする umo 次元ベクトル
- ρ_{ijk}^{2*} : 卸売業者 j の販売価格
- $g_j(Q^1)$: 卸売業者 j の施設費用
- $c_{jk}(Q^1)$: 卸売業者 j と小売業者 k の取引費用
- ρ_{hik}^{5*} : ik 間の輸送における物流業者 h の運賃である。

同様に、小売業者 k の行動は、

$$\text{Max}_{q_k, q_{kl}} \rho_k^{3*} \sum_{h=1}^u \sum_{l=1}^r q_{hkl} - c_k(Q^1) - g_k(Q^1) - \sum_{l=1}^r c_{kl}(Q^2) \quad (5)$$

$$- \sum_{h=1}^u \sum_{l=1}^r \rho_{hkl}^{6*} q_{hkl} - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \rho_{ijk}^{2*} \sum_{h=1}^u q_{hijk} \quad (6)$$

$$\text{s.t. } \sum_{h=1}^u \sum_{l=1}^r q_{hkl} \leq \sum_{h=1}^u \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n q_{hijk} \quad (6)$$

$$q_{hijk} \geq 0 \quad \forall h, i, j, k, q_{hkl} \geq 0 \quad \forall h, l$$

と表すことができる。ここに、

- q_{hkl} : kl 間における物流業者 h の輸送量
- q_k : q_{hkl} を要素とする ur 次元ベクトル
- Q^2 : q_{hkl} を要素とする uor 次元ベクトル
- ρ_k^{3*} : 小売業者 k の販売価格
- $c_k(Q^1)$: 小売業者 k の保管費用
- $g_k(Q^1)$: 小売業者 k の施設費用
- $c_{kl}(Q^2)$: 卸売業者 k と小売業者 l の取引費用
- ρ_{hkl}^{6*} : kl 間の輸送における物流業者 h の運賃である。

また、需要関数が連続であるとし、消費市場 l では以下の均衡条件（相補性条件）が成立すると仮定する。

$$\rho_k^{3*} \begin{cases} = \rho_i^{4*} & \text{if } q_{hkl}^* > 0 \\ \geq \rho_i^{4*} & \text{if } q_{hkl}^* = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$d_l(\rho^{4*}) \begin{cases} = \sum_{h=1}^u \sum_{k=1}^o q_{hkl}^* & \text{if } \rho_l^{4*} > 0 \\ \leq \sum_{h=1}^u \sum_{k=1}^o q_{hkl}^* & \text{if } \rho_l^{4*} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

ここに、

- ρ_l^4 : 消費市場 l での市場価格
 - ρ^4 : ρ_l^4 を要素とする r 次元ベクトル
 - $d_l(\rho^4)$: 消費市場 l の需要関数
- である。

最後に、物流業者 h の行動は、利潤最大化を目的として以下のように表される。

$$\text{Max}_{q_i, q_j, q_k} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^o \rho_{hik}^{5*} q_{hijk} + \sum_{k=1}^o \sum_{l=1}^r \rho_{hkl}^{6*} q_{hkl} - g_h(Q^1, Q^2) - w_h(Q^1, Q^2) \quad (9)$$

$$\text{s.t. } q_{hijk} \geq 0 \forall i, j, k, q_{hkl} \geq 0 \forall k, l \quad (10)$$

ここに、

$g_h(Q^1, Q^2)$: 物流業者 h の施設費用

$w_h(Q^1, Q^2)$: 物流業者 h の運行費用

である。なお、施設費用は施設の整備・維持管理などに要する費用であり、運行費用は輸送手段の運行に要する費用及び、輸送手段の固定費用も含む。期待遅刻費用を考慮する場合¹⁾、運行費用は、平均運行費用 $\bar{w}_h(Q^1, Q^2)$ と期待遅刻費用の和で表される。例えば、 ik 間の輸送時間 t_{hik} が確率分布 $\varphi_{hik}(t)$ に従うと仮定し、遅刻限界 l_{hik}^+ に対して、時刻 t (ただし、 $t \geq l_{hik}^+$) に到着した場合の遅刻時間は $\Delta_{hik}^+ = t - l_{hik}^+$ と表される。したがって、遅刻時間の期待値は、

$$e_{hik}^+(l_{hik}^+) \equiv E(\Delta_{hik}^+) = \int_{l_{hik}^+}^{\infty} (t - l_{hik}^+) \varphi_{hik}(t) dt \quad (11)$$

と表される。このとき、 ik 間の期待遅刻費用は、遅刻ペナルティ係数 $\lambda_{hik}^+(Q^1)$ を用いて、以下ようになる。

$$E(\lambda_{hik}^+ \Delta_{hik}^+) = \lambda_{hik}^+(Q^1) e_{hik}^+(l_{hik}^+) \quad (12)$$

kl 間の期待遅刻費用についても、同様に記述できる。

SCN 全体の均衡条件は、 $(Q^1, Q^2, \gamma, \rho^4) \in R_+^{ummo+uor+o+r}$ を決定変数とする下記の変分不等式の解と等価である。

$$\begin{aligned} & \sum_{h=1}^u \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^o \left[\frac{\partial f_i(Q^{1*})}{\partial q_{hijk}} + \frac{\partial g_i(Q^{1*})}{\partial q_{hijk}} + \frac{\partial c_{ij}(Q^{1*})}{\partial q_{hijk}} \right. \\ & + \frac{\partial g_j(Q^{1*})}{\partial q_{hijk}} + \frac{\partial c_{jk}(Q^{1*})}{\partial q_{hijk}} + \frac{\partial g_h(Q^{1*}, Q^{2*})}{\partial q_{hijk}} + \frac{\partial w_h(Q^{1*}, Q^{2*})}{\partial q_{hijk}} \\ & \left. + \frac{\partial c_k(Q^{1*})}{\partial q_{hijk}} + \frac{\partial g_k(Q^{1*})}{\partial q_{hijk}} - \gamma_k^* \right] \times [q_{hijk} - q_{hijk}^*] \\ & + \sum_{h=1}^u \sum_{k=1}^o \sum_{l=1}^r \left[\frac{\partial c_{kl}(Q^{2*})}{\partial q_{hkl}} + \frac{\partial g_h(Q^{1*}, Q^{2*})}{\partial q_{hkl}} \right. \\ & \left. + \frac{\partial w_h(Q^{1*}, Q^{2*})}{\partial q_{hkl}} + \gamma_k^* - \rho_l^{4*} \right] \times [q_{hkl} - q_{hkl}^*] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + \sum_{k=1}^o \left[\sum_{h=1}^u \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n q_{hijk}^* - \sum_{l=1}^r q_{hkl}^* \right) \right] \times [\gamma_k - \gamma_k^*] \\ & + \sum_{l=1}^r \left[\sum_{h=1}^u \sum_{k=1}^o q_{hkl}^* - d_l(\rho^{4*}) \right] \times [\rho_l^4 - \rho_l^{4*}] \geq 0 \\ & \forall (Q^1, Q^2, \gamma, \rho^4) \in R_+^{ummo+uor+o+r} \quad (13) \end{aligned}$$

この変分不等式問題の解の存在と一意性については、山田ら¹⁾と同様の方法で証明することができる。また、解法については、Meng *et al.*²⁾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。

3. ケーススタディの概要

ケーススタディとして、図1に示すようなSCNを対象に比較を行い、商物分離が、生産量、取引量、価格、余剰などへ及ぼす影響について考察した。その結果、商物分離型の取引を行うことにより、商品の供給者と消費者双方に有利になることが示唆された。なお、紙面の都合上、ケーススタディの詳細は講演時に示す。

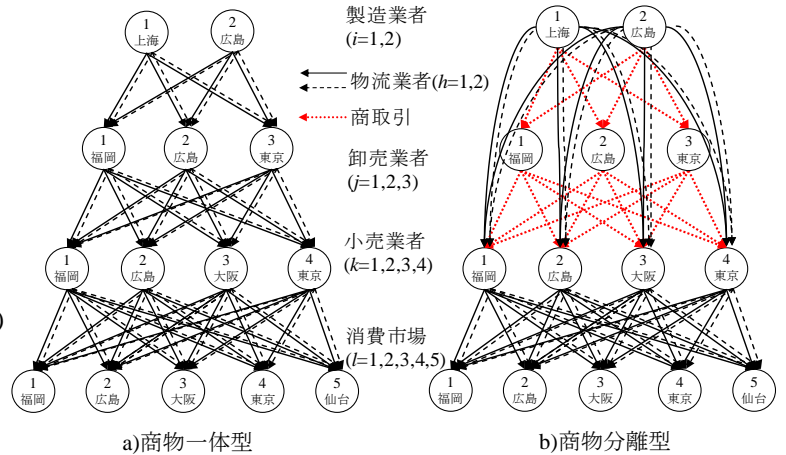


図1 計算対象とするサプライチェーンネットワーク

4. まとめ

本研究では、製造業者、卸売業者、小売業者、消費市場、物流業者で構成されるSCNEモデルについて、商物分離型の流通を考慮しながら、その定式化を行った。講演時には、ケーススタディの問題設定、使用した関数形やパラメータ値、得られた結果の要因分析などについても詳述する予定である。

参考文献

- 1) 山田忠史, 今井康治, 谷口栄一: 物流事業者の行動を考慮したサプライチェーンネットワーク均衡分析, 土木学会論文集 D, Vol.65/No.2, pp.163-174, 2009.
- 2) Meng, Q., Huang, Y. K. and R. L. Cheu: A note on supply chain network equilibrium models, Transportation Research Part E, 43, pp.60-71, 2007.