

第IV部門

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モデル

京都大学工学部 学生員 ○今井 康治
 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生産・販売競争の激化に伴い、サプライチェーンの効率的な形成が求められている。一方で、交通問題、環境問題などの観点から、効果的な物流施策の実施が急務であり、的確な物流施策を実施するためには、物流施策がサプライチェーン全般に及ぼす影響を把握しておく必要がある。

本研究では、そのようなサプライチェーン分析に寄与するモデルとして、サプライチェーンネットワーク均衡 (SCNE: Supply Chain Network Equilibrium) モデル¹⁾に着目し、より広範な物流施策分析を可能とするために、物流事業者の行動を考慮したモデルへと拡張する。

2. モデルの定式化

ネットワーク上に 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、 u 個の物流事業者が存在すると仮定する。このとき、製造業者 i の行動は、利潤最大化行動として以下のように表される。

$$\text{Maximize } \sum_{j=1}^n \rho_{ij}^{1*} \sum_{h=1}^u q_{h,ij} - f_i(Q^1) - g_i(Q^1) - \sum_{j=1}^n c_{ij}(Q^1) - \sum_{h=1}^u \sum_{j=1}^n \rho_{h,ij}^{5*} q_{h,ij} \quad (1)$$

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

ここに、

ρ_{ij}^1 : 製造業者 i から卸売業者 j への販売価格

$q_{h,ij}$: ij 間における物流事業者 h の輸送量

Q^1 : $q_{h,ij}$ を要素とする mnu 次元ベクトル

f_i : 製造業者 i の生産費用関数

g_i : 製造業者 i の施設費用関数

c_{ij} : 製造業者 i と卸売業者 j の取引費用関数

$\rho_{h,ij}^5$: ij 間における物流事業者 h の運賃

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。

次に、卸売業者 i の行動は、利潤最大化行動として以下のように表される。

$$\text{Maximize } \rho_j^{2*} \sum_{k=1}^o \sum_{h=1}^u q_{h,jk} - c_j(Q^2) - g_j(Q^2) - \sum_{i=1}^n \rho_{ij}^{2*} \sum_{h=1}^u q_{h,ij} \quad (3)$$

$$\text{subject to } \sum_{h=1}^u \sum_{k=1}^o q_{h,jk} \leq \sum_{h=1}^u \sum_{i=1}^n q_{h,ij}, \quad (4)$$

$$q_{h,ij} \geq 0 \quad \forall i, h, \quad q_{h,jk} \geq 0 \quad \forall k, h$$

ここに、

ρ_j^2 : 卸売業者 j の販売価格

$q_{h,jk}$: jk 間における物流事業者 h の輸送量

Q^2 : $q_{h,jk}$ を要素とする nou 次元ベクトル

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

である。同様に、小売業者 i の行動は、

$$\text{Maximize } \rho_k^{3*} \sum_{l=1}^p \sum_{h=1}^u q_{h,kl} - c_k(Q^3) - g_k(Q^3) - \sum_{j=1}^n c_{jk}(Q^3) - \sum_{h=1}^u \sum_{j=1}^n \rho_{h,jk}^{6*} q_{h,jk} - \sum_{j=1}^n \left(\rho_j^{2*} \sum_{h=1}^u q_{h,ij} \right) \quad (5)$$

$$\text{subject to } \sum_{h=1}^u \sum_{l=1}^p q_{h,kl} \leq \sum_{h=1}^u \sum_{j=1}^n q_{h,jk}, \quad (6)$$

$$q_{h,jk} \geq 0 \quad \forall h, j, \quad q_{h,kl} \geq 0, \quad \forall l, h$$

と表すことができる。ここに、

ρ_k^3 : 小売業者 k の販売価格

$q_{h,kl}$: kl 間における物流事業者 h の輸送量

Q^3 : $q_{h,kl}$ を要素とする opu 次元ベクトル

c_k : 小売業者 k の保管費用関数

g_k : 小売業者 k の施設費用関数

c_{jk} : 卸売業者 j と小売業者 k の取引費用関数

$\rho_{h,jk}^6$: jk 間における物流事業者 h の運賃

である。また、市場 l の消費者の行動は、以下の均衡条件で記述できる。

$$\rho_k^{3*} + c_{kl}(Q^{3*}) + \rho_{h,kl}^{7*} \begin{cases} = \rho_l^{4*} & \text{if } q_{h,kl}^{*} > 0 \\ > \rho_l^{4*} & \text{if } q_{h,kl}^{*} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

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

ここに、

ρ_{4l}^4 : 消費市場 l における消費者の支払意思額

ρ^4 : ρ_{4l}^4 を要素とする p 次元ベクトル

c_{kl} : 小売業者 k と消費市場 l の取引費用関数

$\rho_{h,kl}^7$: kl 間における物流事業者 h の運賃

$d_k(\rho^4)$: 消費市場 l の需要関数

である．最後に，物流事業者 h の行動は，以下のように表される．

$$\text{Maximize } \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \rho_{h,ij}^{5*} q_{h,ij} + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^o \rho_{h,jk}^{6*} q_{h,jk} \quad (9)$$

$$+ \sum_{k=1}^o \sum_{l=1}^p \rho_{h,kl}^{7*} q_{h,kl} - g_h(Q^1, Q^2, Q^3) - w_h(Q^1, Q^2, Q^3) \\ \text{subject to} \\ q_{h,ij} \geq 0 \quad \forall i, j, \quad q_{h,jk} \geq 0 \quad \forall j, k, \quad q_{h,kl} \geq 0 \quad \forall k, l \quad (10)$$

ここに，

$g_h(Q^1, Q^2, Q^3)$: 物流事業者 h の固定費用関数

$w_h(Q^1, Q^2, Q^3)$: 物流事業者 h の輸送費用関数

である．なお，固定費用は施設の整備・維持管理などに要する費用であり，輸送費用は輸送手段の運行に要する費用である．輸送時間の変動を考慮する場合，輸送費用関数は，平均輸送費用 $w_h(Q^1, Q^2, Q^3)$ と期待遅刻費用の和で表される．例えば， ij 間の輸送時間 $t_{h,ij}$ が確率分布 $\phi_{h,ij}(t)$ に従うと仮定した場合，遅刻限界 $l_{h,ij}^+$ に対して，時刻 t (ただし， $t \geq l_{h,ij}^+$) に到着した場合の遅刻時間は $\Delta_{h,ij}^+ = t - l_{h,ij}^+$ と表される．したがって，遅刻時間の期待値は，

$$e_{h,ij}^+(l_{h,ij}^+) \equiv E(\Delta_{h,ij}^+) = \int_{l_{h,ij}^+}^{\infty} (t - l_{h,ij}^+) \phi_{h,ij}(t) dt \quad (11)$$

と表される．このとき，期待遅刻費用は，遅刻ペナルティ係数 $\lambda_{h,ij}^+(Q^1)$ を用いて，

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

と記述される．期待遅刻費用については， jk 間や kl 間についても，同様に記述できる．

このとき，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である．

$$\sum_{h=1}^u \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[\frac{\partial f_i(Q^*)}{\partial q_{h,ij}} + \frac{\partial g_i(Q^*)}{\partial q_{h,ij}} + \frac{\partial \alpha_j(Q^*)}{\partial q_{h,ij}} + \frac{\partial \gamma_j(Q^*)}{\partial q_{h,ij}} + \frac{\partial \delta_j(Q^*)}{\partial q_{h,ij}} \right] \times [q_{h,ij} - q_{h,ij}^*] \\ + \sum_{h=1}^u \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^o \left[\frac{\partial c_k(Q^*)}{\partial q_{h,jk}} + \frac{\partial g_k(Q^*)}{\partial q_{h,jk}} + \frac{\partial \alpha_j(Q^*)}{\partial q_{h,jk}} - \delta_k^* \right] \times [q_{h,jk} - q_{h,jk}^*] \\ + \sum_{h=1}^u \sum_{k=1}^o \sum_{l=1}^p \left[\frac{\partial c_{kl}(Q^*)}{\partial q_{h,kl}} + \frac{\partial g_{kl}(Q^*)}{\partial q_{h,kl}} + \frac{\partial \alpha_k(Q^*)}{\partial q_{h,kl}} + \delta_k^* - \rho_{4l}^* \right] \times [q_{h,kl} - q_{h,kl}^*] \\ + \sum_{j=1}^n \left[\sum_{h=1}^u \left(\sum_{i=1}^m q_{h,ij}^* - \sum_{k=1}^o q_{h,jk}^* \right) \right] \times [\gamma_j - \gamma_j^*]$$

$$+ \sum_{l=1}^o \left[\sum_{h=1}^u \left(\sum_{j=1}^n q_{h,jk}^* - \sum_{l=1}^p q_{h,kl}^* \right) \right] \times [\delta_k - \delta_k^*] \\ + \sum_{l=1}^p \left[\sum_{h=1}^u \sum_{k=1}^o q_{h,kl}^* - d_l(\rho^{4*}) \right] \times [\rho_l^4 - \rho_l^{4*}] \geq 0 \\ \forall (Q^1, Q^2, Q^3, \gamma, \delta, \rho_4) \in R_+^{mnu+nou+opu+n+o+p} \quad (13)$$

この変分不等式問題の解の存在と一意性については，Nagurney *et al.*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

ケーススタディの一つとして，図1に示すようなサプライチェーンネットワークを対象に，輸送時間の信頼性向上が，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，輸送時間の変動が小さくなると，供給者・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．

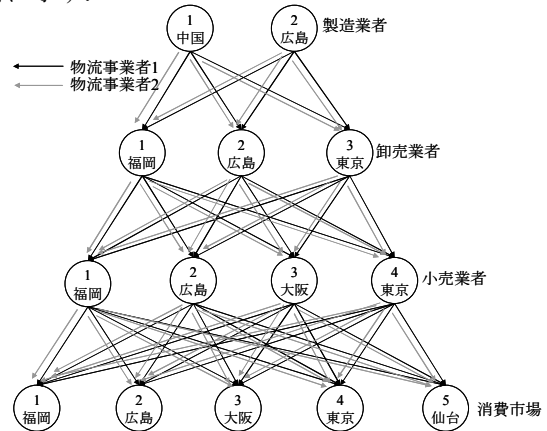


図1 計算対象とするサプライチェーンネットワーク

4. まとめ

本研究では，物流事業者の行動を考慮した SCNE モデルについて，輸送時間の変動性を考慮しながら，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) Nagurney, A., Dong, J. and D. Zhang: A supply chain network equilibrium model, *Transportation Research Part E*, 38, pp.281-303, 2002.
- 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.