サプライチェーンネットワーク均衡モデルを用いた商物分離の影響分析*
Investigating the Effects of the Separation of Distribution and Transaction of Products using Supply Chain Network Equilibrium Models*

中村昂雅**・山田忠史***・谷口栄一****
By Takamasa NAKAMURA**・Tadashi YAMADA***・Eiichi TANIGUCHI****

１．はじめに

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いる．このような状況下において，SCN 上で生じる現象を的確に捉えること，すなわち，SCN 上での商品の流動や活動主体の行動を記述することは，行政側が物資流動発生メカニズムや物流施策の効果を適切に把握することに寄与するだけでなく，企業側の施策理解にもつながる．

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，たとえば，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]が提案されている．しかし，既存の SCNE モデル（たとえば，文献 1),2)）は商物一体の流通形態のみを取り扱っており，商物分離の流通形態は捨象されている．

そこで，本研究では，商物分離型で上記 5 主体を対象とする SCNE モデル（以下，商物分離型 5 主体 SCNE モデルと称する）を提案し，既存の 5 主体 SCNE モデル（以下，商物一体型 5 主体 SCNE モデルと称する）[1]から得られる結果と比較して，その相違を考察する．また，卸売業者を除く 4 主体から成る商物一体型 SCNE モデル（以下，商物一体型 4 主体 SCNE モデルと称する）の定式化も行い，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．商物分離型5主体SCNEモデル

図-1に示すような，寡占的で単一の流通段階を有する

*キーワーズ：物流計画，物資流動，ｻﾌﾟﾗｲﾁｪｰﾝﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ
**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）

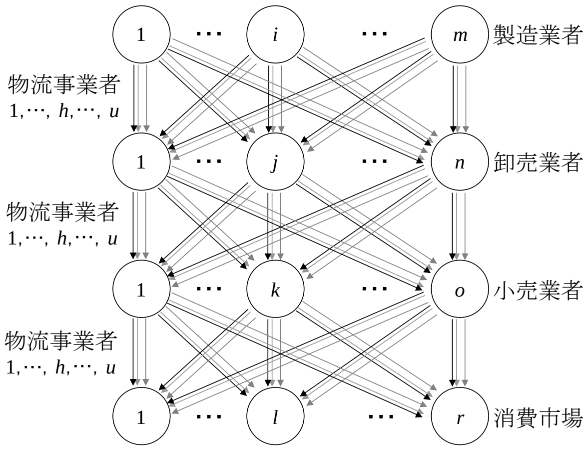

図-1　モデル化の対象とするSCN（商物一体型，5主体）

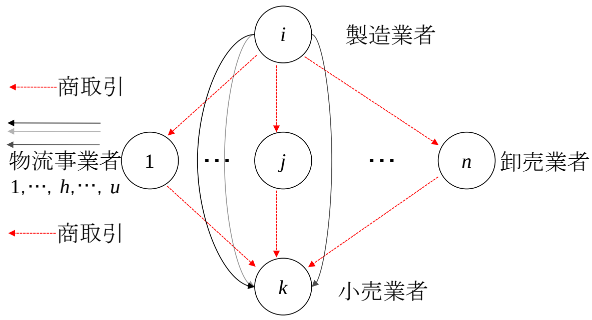

図-2　商物分離の場合（製造iから小売kの例）

SCNを想定し，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．商物分離については，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表現する．例として，図-2において，製造業者iから小売業者kへと商品が流動する場合の商取引と商品の経路を示す．このとき，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．

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

$$\text{subject to} \quad q_{hijk} \geq 0 \ \ \forall h, j, k \tag{2}$$

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^1_{ij} ：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

上式のq_{hijk}は，商品そのものは，物流業者hの輸送を介して，製造業者iから小売業者kへと流通するが，その取引には卸売業者jが関係することを表している．また，上式において, 生産費用には材料費や設備費等が含まれる．取引費用には運賃以外の取引に関わる費用が，施設費用には土地代や施設の維持管理費が含まれる．

生産費用関数，施設費用関数，取引費用関数が連続かつ凸であり，すべての製造業者の最適性条件が同時に成り立つ場合，この問題は以下の変分不等式を満たす$Q^{1*} \in R_+^{umno}$を求める問題と等価である．

$$\sum_{h=1}^{u}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{o}\left[\frac{\partial f_i(Q^{1*})}{\partial q_{hijk}} + \frac{\partial g_i(Q^{1*})}{\partial q_{hijk}} + \frac{\partial c_{ij}(Q^{1*})}{\partial q_{hijk}} - \rho_{ij}^{1*}\right] \times \left[q_{hijk} - q_{hijk}^*\right] \geq 0 \qquad \forall Q^1 \in R_+^{umno} \tag{3}$$

⑵ 卸売業者の行動

卸売業者 j の行動は利潤最大化を目的として，以下のように定式化できる．

$$\underset{q_j}{\mathrm{Max}} \sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{o} \rho_{ijk}^{2*} \sum_{h=1}^{u} q_{hijk} - g_j(Q^1) - \sum_{k=1}^{o} c_{jk}(Q^1) - \sum_{h=1}^{u}\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{o} \rho_{hik}^{5*} q_{hijk} - \sum_{i=1}^{m} \rho_{ij}^{1*} \sum_{k=1}^{o}\sum_{h=1}^{u} q_{hijk} \tag{4}$$

$$\text{subject to} \quad q_{hijk} \geq 0 \ \forall h, i, k \tag{5}$$

ここに,

q_j ：q_{hijk} を要素とする umo 次元ベクトル

ρ^2_{ijk} ：製造業者 i が製造した商品の卸売業者 j から小売業者 k への販売価格

$g_j(Q^1)$ ：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^5_{hik} ：ik 間の輸送における物流業者 h の運賃

である．施設費用関数と取引費用関数が連続かつ凸であり，すべての卸売業者の最適性条件が同時に成り立つ場合，この問題は以下の変分不等式を満たす $Q^{1*} \in R_+^{umno}$ を求める問題と等価である．

$$\sum_{h=1}^{u}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{o}\left[\frac{\partial c_{jk}(Q^{1*})}{\partial q_{hijk}} + \frac{\partial g_j(Q^{1*})}{\partial q_{hijk}} - \rho_{ijk}^{2*} + \rho_{ij}^{1*} + \rho_{hik}^{5*}\right] \times \left[q_{hijk} - q_{hijk}^*\right] \geq 0 \qquad \forall Q^1 \in R_+^{umno} \tag{6}$$

⑶ 小売業者の行動

小売業者kの行動は，利潤最大化を目的として，以下のように定式化できる．

$$\underset{q_j, q_k}{\mathrm{Max}} \ \rho_k^{3*} \sum_{h=1}^{u}\sum_{l=1}^{r} q_{hkl} - c_k(Q^1) - g_k(Q^1) - \sum_{l=1}^{r} c_{kl}(Q^2) - \sum_{h=1}^{u}\sum_{l=1}^{r} \rho_{hkl}^{6*} q_{hkl} - \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} \rho_{ijk}^{2*} \sum_{h=1}^{u} q_{hijk} \tag{7}$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{h=1}^{u}\sum_{l=1}^{r} q_{hkl} \leq \sum_{h=1}^{u}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} q_{hijk} \tag{8}$$

$$q_{hijk} \geq 0 \ \ \forall h, i, j, \ q_{hkl} \geq 0 \ \ \forall h, l \tag{9}$$

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^3_k ：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

$c_{kl}(Q^2)$ ：小売業者 k と消費市場 l の取引費用

ρ^6_{hkl} ：kl 間の輸送における物流業者 h の運賃

である．このとき，保管費用関数，取引費用関数，施設費用関数が連続かつ凸であり，すべての小売業者の最適性条件が同時に成り立つ場合，この問題は以下の変分不等式を満たす$(Q^{1*}, Q^{2*}, \gamma^*) \in R_+^{umno+uop+o}$ を求める問題と等価である．

$$\begin{aligned}
&\sum_{h=1}^{u}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{o}\left[\frac{\partial c_k(Q^{1*})}{\partial q_{hijk}} + \frac{\partial g_k(Q^{1*})}{\partial q_{hijk}} - \gamma_k^* + \rho_{hijk}^{2*}\right] \times \left[q_{hijk} - q_{hijk}^*\right] \\
&+ \sum_{h=1}^{u}\sum_{k=1}^{o}\sum_{l=1}^{r}\left[-\rho_k^{3*} + \frac{\partial c_{kl}(Q^{2*})}{\partial q_{hkl}} + \rho_{hkl}^{6*} + \gamma_k^*\right] \times \left[q_{hkl} - q_{hkl}^*\right] \\
&+ \sum_{k=1}^{o}\left[\sum_{h=1}^{u}\left(\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} q_{hijk}^* - \sum_{l=1}^{r} q_{hkl}^*\right)\right] \times \left[\gamma_k - \gamma_k^*\right] \geq 0 \ \ \forall (Q^1, Q^2, \gamma) \in R_+^{umno+uop+o}
\end{aligned} \tag{10}$$

ここに，γ_kは式(9)についてのラグランジェ乗数であり，γはγ_kを要素とするo次元列ベクトルである．

(4) 消費市場の均衡条件

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．

$$\rho_k^{3*} \begin{cases} = \rho_l^{4*} & \text{if } q_{hkl}^* > 0 \\ \geq \rho_l^{4*} & \text{if } q_{hkl}^* = 0 \end{cases} \tag{11}$$

$$d_l(\rho^{4*}) \begin{cases} = \sum_{h=1}^{u}\sum_{k=1}^{o} q_{hkl}^*, & \text{if } \rho_l^{4*} > 0 \\ \leq \sum_{h=1}^{u}\sum_{k=1}^{o} q_{hkl}^*, & \text{if } \rho_l^{4*} = 0 \end{cases} \tag{12}$$

ここに,

ρ^4_l ：消費市場 l での市場価格

ρ^4 ：ρ^4_l 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

均衡状態において，式(11)と(12)は，全ての消費市場について満たされる必要があり，これら均衡条件は，下式を満たす$(Q^{2*},\rho^{4*})\in R_+^{uor+r}$を求めることに等しい．

$$\sum_{h=1}^{u}\sum_{k=1}^{o}\sum_{l=1}^{r}\left[\rho_k^{3*}-\rho_l^{4*}\right]\times\left[q_{hkl}-q_{hkl}^*\right] \tag{13}$$
$$+\sum_{l=1}^{r}\left[\sum_{h=1}^{u}\sum_{k=1}^{o}q_{hkl}^*-d_l\left(\rho^{4*}\right)\right]\times\left[\rho_l^4-\rho_l^{4*}\right]\geq 0\ \ \forall\left(Q^3,\rho^4\right)\in R_+^{uor+r}$$

⑸ 物流業者の行動

物流業者hの行動は，利潤最大化を目的として，以下のように表す．

$$\underset{q_i,q_j,q_k}{\text{Max}}\ \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{o}\rho_{hik}^{5*}q_{hijk}+\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{o}\rho_{hjk}^{6*}q_{hjk} \tag{14}$$
$$-g_h\left(Q^1,Q^2\right)-w_h\left(Q^1,Q^2\right)$$

subject to

$$q_{hijk}\geq 0\ \forall i,j,k,\quad q_{hkl}\geq 0\ \forall k,l \tag{15}$$

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

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である．

輸送時間の変動を考慮する場合，運行費用は，平均輸送費用と期待遅刻費用の和で表される[1]．

$$w_h\left(Q^1,Q^2\right)=\overline{w}_h\left(Q^1,Q^2\right)+\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{o}E\left(\lambda_{hik}^+\Delta_{hik}^+\right)+\sum_{k=1}^{o}\sum_{l=1}^{r}E\left(\lambda_{hkl}^+\Delta_{hkl}^+\right)$$
$$=\overline{w}_h\left(Q^1,Q^2\right)+\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{o}\lambda_{hik}^+\left(Q^1\right)e_{hik}^+\left(l_{hik}^+\right) \tag{16}$$
$$+\sum_{k=1}^{o}\sum_{l=1}^{r}\lambda_{hkl}^+\left(Q^2\right)e_{hkl}^+\left(l_{hkl}^+\right)$$

$\overline{w}_h\left(Q^1,Q^2\right)$　：物流業者hの平均輸送費用

$E(\bullet)$　：期待遅刻費用

$\lambda^+_{hik},\lambda^+_{hkl}$　：ik,kl間での物流業者hの遅刻費用係数

$\Delta^+_{hik},\Delta^+_{hkl}$　：ik,kl間での物流業者hの遅刻時間

e^+_{hik},e^+_{hkl}　：ik,kl間での物流業者hの期待遅刻時間

l^+_{hik},l^+_{hkl}　：ik,kl間での物流業者hの遅刻限界

なお，遅刻費用係数，および，期待遅刻時間の詳細については，山田ら[1]を参照されたい．

施設費用関数と運行費用関数（すなわち，平均輸送費用関数および遅刻費用係数）が連続かつ凸であり，すべての物流業者の最適性条件が同時に成り立つ場合，以下の変分不等式を満たせばよい．

$$\sum_{h=1}^{u}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{o}\left[\frac{\partial g_h\left(Q^{1*},Q^{2*}\right)}{\partial q_{hijk}}+\frac{\partial w_h\left(Q^{1*},Q^{2*}\right)}{\partial q_{hijk}}-\rho_{hik}^{5*}\right]\times\left[q_{hijk}-q_{hijk}^*\right]$$
$$+\sum_{h=1}^{u}\sum_{k=1}^{o}\sum_{l=1}^{r}\left[\frac{\partial g_h\left(Q^{1*},Q^{2*}\right)}{\partial q_{hkl}}+\frac{\partial w_h\left(Q^{1*},Q^{2*}\right)}{\partial q_{hkl}}-\rho_{hkl}^{6*}\right]\times\left[q_{hkl}-q_{hkl}^*\right]$$
$$\geq 0\qquad \forall\left(Q^1,Q^2\right)\in R_+^{umno+uor} \tag{17}$$

⑹ ネットワーク全体の均衡条件

均衡状態においては，各主体の最適性条件，および，消費市場の均衡条件が同時に満たされる．したがって，SCN全体の均衡条件は，以下のように記述できる．

$$\sum_{h=1}^{u}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{o}\left[\frac{\partial f_i\left(Q^{1*}\right)}{\partial q_{hijk}}+\frac{\partial g_i\left(Q^{1*}\right)}{\partial q_{hijk}}+\frac{\partial c_{ij}\left(Q^{1*}\right)}{\partial q_{hijk}}\right.$$
$$+\frac{\partial g_j\left(Q^{1*}\right)}{\partial q_{hijk}}+\frac{\partial c_{jk}\left(Q^{1*}\right)}{\partial q_{hijk}}+\frac{\partial g_h\left(Q^{1*},Q^{2*}\right)}{\partial q_{hijk}}+\frac{\partial w_h\left(Q^{1*},Q^{2*}\right)}{\partial q_{hijk}}$$
$$\left.+\frac{\partial c_k\left(Q^{1*}\right)}{\partial q_{hijk}}+\frac{\partial g_k\left(Q^{1*}\right)}{\partial q_{hijk}}-\gamma_k^*\right]\times\left[q_{hijk}-q_{hijk}^*\right]$$
$$+\sum_{h=1}^{u}\sum_{k=1}^{o}\sum_{l=1}^{r}\left[\frac{\partial c_{kl}\left(Q^{2*}\right)}{\partial q_{hkl}}+\frac{\partial g_h\left(Q^{1*},Q^{2*}\right)}{\partial q_{hkl}}\right.$$
$$\left.+\frac{\partial w_h\left(Q^{1*},Q^{2*}\right)}{\partial q_{hkl}}+\gamma_k^*-\rho_l^{4*}\right]\times\left[q_{hkl}-q_{hkl}^*\right]$$
$$+\sum_{k=1}^{o}\left[\sum_{h=1}^{u}\left(\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}q_{hijk}^*-\sum_{l=1}^{r}q_{hkl}^*\right)\right]\times\left[\gamma_k-\gamma_k^*\right]$$
$$+\sum_{l=1}^{r}\left[\sum_{h=1}^{u}\sum_{k=1}^{o}q_{hkl}^*-d_l\left(\rho^{4*}\right)\right]\times\left[\rho_l^4-\rho_l^{4*}\right]\geq 0$$
$$\forall\left(Q^1,Q^2,\gamma,\rho^4\right)\in R_+^{umno+uor+o+r} \tag{18}$$

この変分不等式の解の存在については，既存のSCNEモデル[1),2)]と同様の方法で証明することができる．また，既存モデル[1),2)]と同様の関数設定により，解の一意性を保証することができる．解法については，Meng *et al.*[3)]の推奨する方法を用いる．すなわち，i)式(17)の変分不等式問題を，等価な相補性問題に変換し，ii) FB(Fischer-Burmeister)関数を用いて，非負実数値関数を定義し，iii)二乗FB関数を用いて，相補性問題を等価な制約なし非線形最適化問題に置換した後，iv)準ニュートン法を用いて求解する．

SCN 上の商品価格については，γ は式(18)から求解されるので，式(3)より，$q_{hijk}>0$のとき，

$$\rho_{ij}^{1*}=\frac{\partial f_i\left(Q^{1*}\right)}{\partial q_{hijk}}+\frac{\partial g_i\left(Q^{1*}\right)}{\partial q_{hijk}}+\frac{\partial c_{ij}\left(Q^{1*}\right)}{\partial q_{hijk}} \tag{19}$$

となる．また，式(6)より，

$$\rho_{ijk}^{2*}=\frac{\partial c_{jk}\left(Q^{2*}\right)}{\partial q_{hijk}}+\frac{\partial g_j\left(Q^{2*}\right)}{\partial q_{hijk}}+\rho_{ij}^{1*}+\rho_{hik}^{5*} \tag{20}$$

が，式(10)より，$q_{hkl}>0$のとき

$$\rho_k^{3*}=\frac{\partial c_{kl}\left(Q^{3*}\right)}{\partial q_{hkl}}+\rho_{hkl}^{6*}+\gamma_k^* \tag{21}$$

が，それぞれ成り立つ．さらに，同条件下において，式(17)から，

$$\rho_{hik}^{5*}=\frac{\partial g_h\left(Q^{1*},Q^{2*}\right)}{\partial q_{hijk}}+\frac{\partial w_h\left(Q^{1*},Q^{2*}\right)}{\partial q_{hijk}} \tag{22}$$

$$\rho_{hkl}^{6*}=\frac{\partial g_h\left(Q^{1*},Q^{2*}\right)}{\partial q_{hkl}}+\frac{\partial w_h\left(Q^{1*},Q^{2*}\right)}{\partial q_{hkl}} \tag{23}$$

が導出される．

3．商物一体型4主体SCNEモデル

商物分離型との比較計算を行うために，図-3に示すように，5主体から卸売業者を除いた，4主体のSCNEモデルについて定式化を行う．このとき，SCN上には，m個の製造業者，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．

(1) 製造業者の行動

製造業者iの行動は，利潤最大化を目的として，以下のように表される．

$$\operatorname*{Max}_{q'_i} \ \rho^{1*}_{ik}\sum_{h=1}^{u}\sum_{k=1}^{o} q_{hik} - f_i\left(Q^5\right) - g_i\left(Q^5\right) - \sum_{k=1}^{o} c_{ik}\left(Q^5\right) - \sum_{h=1}^{u}\sum_{k=1}^{o}\rho^{5*}_{hik} q_{hik} \tag{24}$$

$$\text{subject to} \quad q_{hik} \geq 0 \ \ \forall h, j \tag{25}$$

ここに，

q_{hik}　：ik間における物流業者hの輸送量
q'_i　：q_{hik}を要素とするuo次元ベクトル
Q^5　：q_{hik}を要素とするumo次元ベクトル
ρ^1_{ik}　：製造業者iから小売業者kへの販売価格
$c_{ik}(Q^5)$　：製造業者iと小売業者kの取引費用
ρ^5_{hik}　：ik間の輸送における物流業者hの運賃

生産費用関数，施設費用関数，取引費用関数が連続かつ凸であり，すべての製造業者の最適性条件が同時に成り立つ場合，この問題は以下の変分不等式を満たす$Q^{5*}\in R_+^{umo}$を求める問題と等価である．

$$\sum_{h=1}^{u}\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{o}\left[\frac{\partial f_i\left(Q^{5*}\right)}{\partial q_{hik}} + \frac{\partial g_i\left(Q^{5*}\right)}{\partial q_{hik}} + \frac{\partial c_{ik}\left(Q^{5*}\right)}{\partial q_{hik}} + \rho^{5*}_{hik} - \rho^{1*}_{ik}\right] \times\left[q_{hik} - q^*_{hik}\right] \geq 0 \qquad \forall Q^5 \in R_+^{umo} \tag{26}$$

(2) 小売業者の行動

小売業者kの行動は，利潤最大化を目的として，以下のように定式化できる．

$$\operatorname*{Max}_{q'_i, q_k} \ \rho^{3*}_{k}\sum_{h=1}^{u}\sum_{l=1}^{r} q_{hkl} - c_k\left(Q^5\right) - g_k\left(Q^5\right) - \sum_{l=1}^{r} c_{kl}\left(Q^2\right) - \sum_{h=1}^{u}\sum_{l=1}^{r}\rho^{6*}_{hkl} q_{hkl} - \sum_{i=1}^{m}\rho^{1*}_{ik}\sum_{h=1}^{u} q_{hik} \tag{27}$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{h=1}^{u}\sum_{l=1}^{r} q_{hkl} \leq \sum_{h=1}^{u}\sum_{i=1}^{m} q_{hik} \tag{28}$$

$$q_{hik} \geq 0 \ \ \forall h, i, \ \ q_{hkl} \geq 0 \ \ \forall h, l \tag{29}$$

保管費用関数，取引費用関数，施設費用関数が連続かつ凸であり，すべての小売業者の最適性条件が同時に成り立つ場合，この問題は以下の変分不等式を満たす$(Q^{5*}, Q^{2*}, \gamma^*)\in R_+^{umo+uor+o}$を求める問題と等価である．

$$\sum_{h=1}^{u}\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{o}\left[\frac{\partial c_k\left(Q^{5*}\right)}{\partial q_{hik}} + \frac{\partial g_k\left(Q^{5*}\right)}{\partial q_{hik}} - \gamma^*_k + \rho^{1*}_{hik}\right]\times\left[q_{hik} - q^*_{hik}\right] + \sum_{h=1}^{u}\sum_{k=1}^{o}\sum_{l=1}^{r}\left[-\rho^{3*}_k + \frac{\partial c_{kl}\left(Q^{2*}\right)}{\partial q_{hkl}} + \rho^{6*}_{hkl} + \gamma^*_k\right]\times\left[q_{hkl} - q^*_{hkl}\right]$$

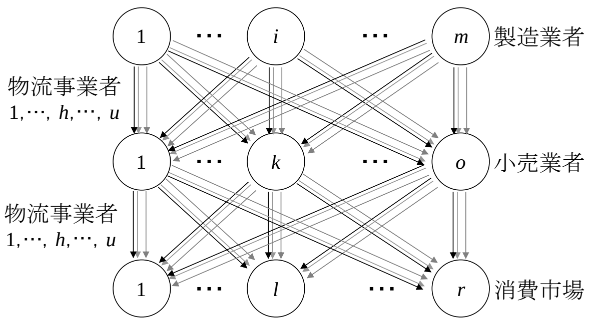

図-3　モデル化の対象とするSCN（商物一体型，4主体）

$$+\sum_{k=1}^{o}\left[\sum_{h=1}^{u}\left(\sum_{i=1}^{m} q^*_{hik} - \sum_{l=1}^{r} q^*_{hkl}\right)\right]\times\left[\gamma_k - \gamma^*_k\right] \geq 0 \ \ \forall\left(Q^5, Q^2, \gamma\right)\in R_+^{uno+uor+o} \tag{30}$$

ここに，γ_kは式(28)についてのラグランジェ乗数であり，γはγ_kを要素とするo次元列ベクトルである．

(3) 消費市場の均衡条件

消費市場の均衡条件は，商物分離型5主体モデルと同様である．

(4) 物流業者の行動

物流業者hの行動は，利潤最大化を目的として，以下のように表す．

$$\operatorname*{Max}_{q'_i, q_k} \ \sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{o}\rho^{5*}_{hik} q_{hik} + \sum_{k=1}^{o}\sum_{l=1}^{r}\rho^{6*}_{hkl} q_{hkl} - g_h\left(Q^5, Q^2\right) - w_h\left(Q^5, Q^2\right) \tag{31}$$

subject to

$$q_{hik} \geq 0 \ \ \forall i, k, \quad q_{hkl} \geq 0 \ \ \forall k, l \tag{32}$$

施設費用関数と運行費用関数が連続かつ凸であり，すべての物流業者の最適性条件が同時に成り立つ場合，以下の変分不等式を満たせばよい．

$$\sum_{h=1}^{u}\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{o}\left[\frac{\partial g_h\left(Q^{5*}, Q^{2*}\right)}{\partial q_{hik}} + \frac{\partial w_h\left(Q^{5*}, Q^{2*}\right)}{\partial q_{hik}} - \rho^{5*}_{hik}\right]\times\left[q_{hik} - q^*_{hik}\right] + \sum_{h=1}^{u}\sum_{k=1}^{o}\sum_{l=1}^{r}\left[\frac{\partial g_h\left(Q^{5*}, Q^{2*}\right)}{\partial q_{hkl}} + \frac{\partial w_h\left(Q^{5*}, Q^{2*}\right)}{\partial q_{hkl}} - \rho^{6*}_{hkl}\right]\times\left[q_{hkl} - q^*_{hkl}\right] \geq 0 \qquad \forall\left(Q^5, Q^2\right)\in R_+^{umo+uor} \tag{33}$$

(5) ネットワーク全体の均衡条件

SCN全体の均衡条件は，以下のように記述できる．

$$\sum_{h=1}^{u}\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{o}\left[\frac{\partial f_i\left(Q^{5*}\right)}{\partial q_{hik}} + \frac{\partial g_i\left(Q^{5*}\right)}{\partial q_{hik}} + \frac{\partial c_{ik}\left(Q^{5*}\right)}{\partial q_{hik}} + \frac{\partial g_h\left(Q^{5*}, Q^{2*}\right)}{\partial q_{hik}} + \frac{\partial w_h\left(Q^{5*}, Q^{2*}\right)}{\partial q_{hik}} + \frac{\partial c_k\left(Q^{5*}\right)}{\partial q_{hik}} + \frac{\partial g_k\left(Q^{5*}\right)}{\partial q_{hik}} - \gamma^*_k\right]\times\left[q_{hik} - q^*_{hik}\right]$$

$$+\sum_{h=1}^{u}\sum_{k=1}^{o}\sum_{l=1}^{r}\left[\frac{\partial c_{kl}\left(Q^{2*}\right)}{\partial q_{hkl}} + \frac{\partial g_h\left(Q^{5*}, Q^{2*}\right)}{\partial q_{hkl}} + \frac{\partial w_h\left(Q^{5*}, Q^{2*}\right)}{\partial q_{hkl}} + \gamma^*_k - \rho^{4*}_l\right]\times\left[q_{hkl} - q^*_{hkl}\right]$$

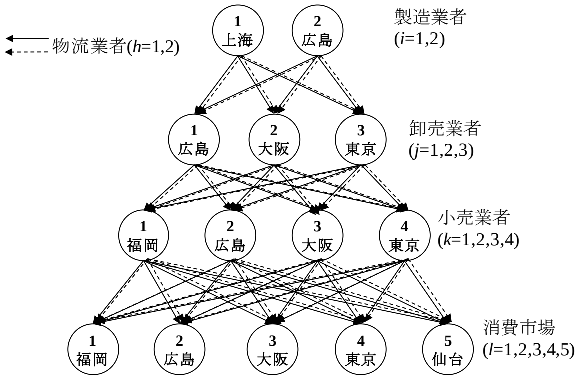

図-4　計算対象とするSCN（商物一体型，5主体）

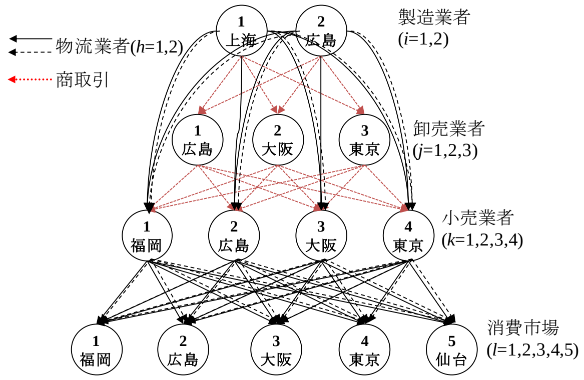

図-6　計算対象とするSCN（商物分離型，5主体）

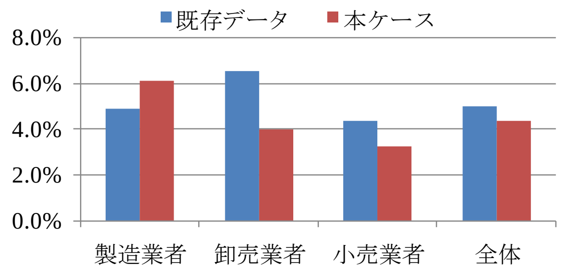

図-5　売上高に占める物流費用の比率

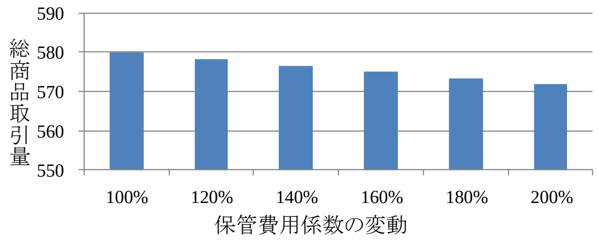

図-7　保管費用係数の変化に伴う商品取引量の変化

$$+\sum_{k=1}^{o}\left[\sum_{h=1}^{u}\left(\sum_{i=1}^{m} q^*_{hik} - \sum_{l=1}^{r} q^*_{hkl}\right)\right]\times\left[\gamma_k-\gamma_k^*\right]$$

$$+\sum_{l=1}^{r}\left[\sum_{h=1}^{u}\sum_{k=1}^{o} q^*_{hkl} - d_l\left(\rho^{4*}\right)\right]\times\left[\rho_l^4-\rho_l^{4*}\right]$$

$$\geq 0 \qquad \forall\left(Q^5, Q^2, \gamma, \rho^4\right)\in R_+^{umo+uor+o+r} \qquad (34)$$

解の存在や一意性，および，解法については，商物分離型5主体モデルと同様である．

４．数値計算例

(1) 問題設定

本研究では仮想的なSCN（図-4）を対象として，ケーススタディを行う．本研究で使用する関数形及びパラメータは既往の研究[1),2)]を参考にして設定した．ただし，問題設定を少しでも現実のSCNに近づけるために，まずは，商物一体型5主体モデルにおいて，既存データ（国内企業の業種別の物流費用[4)]，中国における製造業者（日本企業現地法人）の物流費用[5)]，わが国の物流業者1社へのヒアリング調査結果）を参考にしてパラメータ値を調整した．

計算に際して，輸送時間$\varphi_{hij}(t)$は正規分布$N\left(\bar{t}_{hij}, \sigma_{hij}^2\right)$に従うと仮定し，平均輸送時間$\bar{t}_{hij}$は距離に応じて設定し[1)]，標準偏差$\sigma_{hij}$は高速道路会社のデータを基にして決定した（$jk$間，$kl$間についても同様である）．遅刻限界$l^+_{hij}$については，$l^+_{hij}=\bar{t}_{hij}+2\sigma_{hij}$に設定し，荷主と物流業者の双方が輸送時間分布を認識していると想定し，l^+_{hij}は$\bar{t}_{hij}$に応じて変化すると仮定した．$\alpha_{hij},\alpha_{hjk},\alpha_{hkl},\beta_{hij},\beta_{hjk},\beta_{hkl}$については，輸送時間のデータと陸海の実勢運賃[6)]を勘案して設定した．なお，本研究で使用した具体的な関数形とパラメータ値については紙面の都合上，講演時に示す．

現実との整合性を示す結果として，国内企業の業種別の対売上高物流費用比率[4)]を図-5に示す．なお，物流費用を保管費用と運賃の和とする．各業種とも現実のデータと計算結果がある程度一致している．中国の製造業者（日本企業の現地法人）の対売上高物流費用比率[5)]は3～5%に対して，本研究の推定結果は7%であった．また，本研究では，物流業者の施設費用と運行費用の比が1:13（ヒアリング調査データによると1:11）となった．

以降の計算ケースと区別するために，上記の計算設定をケース0とする．

(2) 商物分離の影響

図-4で示されたSCNを，商物分離型に変更する（図-6）．このとき，必要な関数形やパラメータは，ケース0と同様であるとする（ケース1）．

ケース0に比べて，ケース1では，総商品取引量（すなわち，総生産量，総輸送量）が約10%増加し，市場価格の低下が生じた．その理由として，商物分離により，卸売業者の保管費用の負担が無くなり，かつ，物流業者の配送が一段階少なくなるので，これらの費用や運賃が下流側の価格へ転嫁されなくなったことが考えられる．また，商物分離により，ケース0と比較して，生産者余剰が約11%，消費者余剰が約17%増加し，総余剰も約12%増加した．この結果は，SCN全体が効率化されたことを意

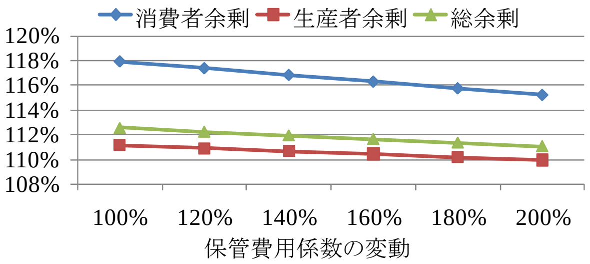

図-8　保管費用係数の変化に伴う余剰の変化

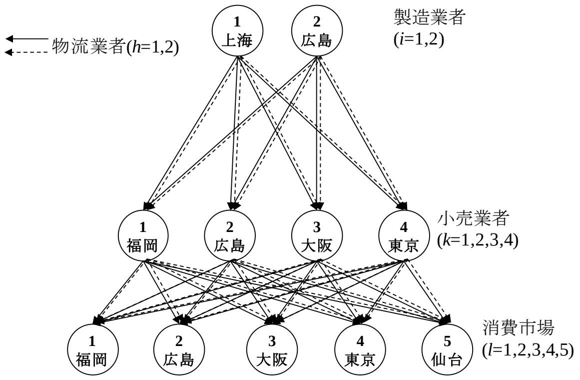

図-9　計算対象とするSCN（商物一体型，4主体）

味する．

つぎに，商物分離により，小売業者の保管費用が増大することを想定して，ケーススタディを行う．小売業者の保管費用の係数を，ケース1を100%とし，120%から200%まで変動させて計算を行う．

結果の一例として，総商品取引量とSCN上での総余剰について，ケース0を100%とした場合の各ケースの計算結果を示す．（図-7および図-8）．図-8から，小売業者の保管費用係数と総余剰は負の相関関係にあることが窺える．なお，係数が約1000%になった場合，ケース0の総余剰を下回ることがわかった．商物分離により保管費用が著しく増大する場合には，商物分離型のSCNが必ずしも効率的ではないと考えられる．

（3）卸売業者が存在しないSCN

図-9に示すSCNを対象に，商物一体型4主体SCNEモデルを用いて計算を行う．このケースは，商物分離型（ケース1）からSCNがいっそう簡略化され，もはや卸売業者が存在しない場合である（ケース2）．ケース0とケース2の結果を比較することにより，SCN上で活動する主体の減少が，SCNに及ぼす影響を分析できる．また，ケース1の結果と比較することにより，卸売業者が商取引にさえ関与しなくなることの影響について考察できる．

ケース2では，総商品取引量がケース1よりも約8%増加し，市場価格も低下した．その要因は，商品の流通に卸売業者が介在しないことで，市場に商品が流通するまでの費用を抑制できることにある．また，図-10に示すよう

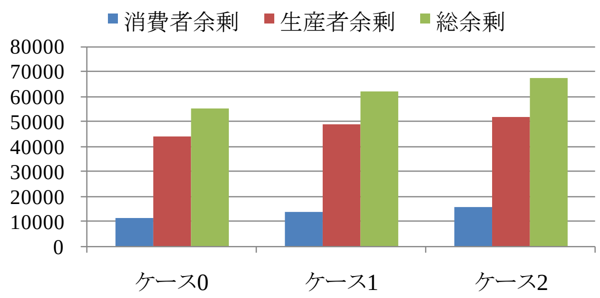

図-10　ケース間の結果比較（余剰）

に，各余剰についても，ケース2はケース0やケース1よりも大きくなっている．

総余剰から，ケース2が最も効率的なSCNであるといえるが，卸売業者の役割，たとえば，多数の製造業者や小売業者を仲介することを考慮すると，卸売業者の無いSCNでは，製造業者の取引相手（小売業者）が減少する可能性もある．したがって，今後はそのような観点からのケーススタディも必要である．

4．おわりに

本研究では，製造業者，卸売業者，小売業者，消費市場，物流業者の5主体で構成されるSCNEモデルについて，商物分離型の流通を考慮しながら，その定式化を提案した．また，卸売業者を除く4主体で構成されるSCNEモデルについても，比較計算のために定式化を行った．これらのモデルを用いて，商物分離がもたらすSCNへの影響について，余剰や総商品流通量などの面から考察した．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．

参考文献

1) 山田忠史，今井康治，谷口栄一：物流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) Nagurney, A., Dong, J. and Zhang, D.: A supply chain network equilibrium model, Transportation Research Part E, Vol.38, pp.281-303, 2002.
3) Meng, Q., Huang, Y. K. and Cheu, R. L.: A note on supply chain network equilibrium models, Transportation Research Part E, Vol.43, pp.60-71, 2007.
4) 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/index.html (2010.7 月現在).
5) 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/toppage/report/bunseki/pdf/h13/h4a1112j007.pdf（2010.7月現在）.
6) 国土交通省国土交通政策研究所：北部九州地域における国際物流のあり方に関する研究，国土交通政策研究 第64号，http://www.mlit.go.jp/pri/houkoku/gaiyou/pdf/kkk64.pdf（2010.7月現在）