輸送時間の変動がサプライチェーンネットワークに及ぼす影響に関する基礎的分析*

Investigating the Influence of the Variability of Travel Times on Supply Chain Networks*

今井康治**・山田忠史***・谷口栄一****・繁田健*****

By Koji IMAI**・Tadashi YAMADA***・Eiichi TANIGUCHI****・Ken SHIGETA*****

1．はじめに

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，サプライチェーンネットワーク(Supply Chain Network: SCN)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する必要がある．

本研究では，物流施策の中でも，特に貨物交通施策がSCNにもたらす影響を分析するために，既存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[1)]を物流事業者の行動を考慮したモデルへと拡張し，輸送時間の短縮やその信頼性向上が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

(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．

$$\text{Max} \ \sum_{j=1}^{n} \rho_{ij}^{1*} \sum_{h=1}^{u} q_{hij} - f_i\left(Q^1\right) - g_i\left(Q^1\right) - \sum_{j=1}^{n} c_{ij}\left(Q^1\right) - \sum_{h=1}^{u} \sum_{j=1}^{n} \rho_{hij}^{5*} q_{hij} \tag{1}$$

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

ここに,

ρ^1_{ij}　：製造業者 i から卸売業者 j への販売価格

q_{hij}　：ij 間における物流事業者 h の輸送量

Q^1　：q_{hij} を要素とする umn 次元ベクトル

$f_i(Q^1)$　：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

ρ^5_{hij}　：ij 間における物流事業者 h の運賃

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れば，最適性条件は以下の変分不等式を満たすことである．

$$\sum_{h=1}^{u}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\left[\frac{\partial f_i\left(Q^{1*}\right)}{\partial q_{hij}} + \frac{\partial g_i\left(Q^{1*}\right)}{\partial q_{hij}} + \frac{\partial c_{ij}\left(Q^{1*}\right)}{\partial q_{hij}} + \rho_{hij}^{5*} - \rho_{ij}^{1*}\right] \times \left[q_{hij} - q_{hij}^*\right] \geq 0 \qquad \forall Q^1 \in R_+^{umn} \tag{3}$$

(2) 卸売業者の行動

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．

$$\text{Max} \ \rho_j^{2*} \sum_{k=1}^{o} \sum_{h=1}^{u} q_{hjk} - c_j\left(Q^1\right) - g_j\left(Q^1\right) - \sum_{j=1}^{n} c_{jk}\left(Q^2\right) - \sum_{h=1}^{u}\sum_{j=1}^{n} \rho_{hjk}^{6*} q_{hjk} - \sum_{i=1}^{m} \rho_{ij}^{1*} \sum_{h=1}^{u} q_{hij} \tag{4}$$

$$\text{subject to} \ \sum_{h=1}^{u}\sum_{k=1}^{o} q_{hjk} \leq \sum_{h=1}^{u}\sum_{i=1}^{m} q_{hij} \tag{5}$$

$$q_{hij} \geq 0 \ \forall h, i, \quad q_{hjk} \geq 0 \ \forall h, k \tag{6}$$

ここに,

ρ^2_j　：卸売業者 j から小売業者への販売価格

q_{hjk}　：jk 間における物流事業者 h の輸送量

Q^2　：q_{hjk} を要素とする uno 次元ベクトル

$c_j(Q^1)$　：卸売業者 j の保管費用

$g_j(Q^1)$　：卸売業者 j の施設費用

$c_{jk}(Q^2)$　：卸売業者 j と小売業者 k の取引費用

ρ^6_{hjk}　：jk 間における物流事業者 h の運賃

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る．

$$\begin{aligned}&\sum_{h=1}^{u}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\left[\frac{\partial c_j\left(Q^{1*}\right)}{\partial q_{hij}} + \frac{\partial g_j\left(Q^{1*}\right)}{\partial q_{hij}} + \rho_{ij}^{1*} - \gamma_j^*\right] \times \left[q_{hij} - q_{hij}^*\right] \\ &+ \sum_{h=1}^{u}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{o}\left[-\rho_j^{2*} + \frac{\partial c_{jk}\left(Q^{2*}\right)}{\partial q_{hjk}} + \rho_{hjk}^{6*} + \gamma_j^*\right] \times \left[q_{hjk} - q_{hjk}^*\right] \\ &+ \sum_{j=1}^{n}\left[\sum_{h=1}^{u}\left(\sum_{i=1}^{m} q_{hij}^* - \sum_{k=1}^{o} q_{hjk}^*\right)\right] \times \left[\gamma_j - \gamma_j^*\right] \geq 0 \ \forall\left(Q^1, Q^2, \gamma\right) \in R_+^{umn+uno+n}\end{aligned} \tag{7}$$

---

*キーワーズ：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）

*****非会員，京都大学工学部
（京都市西京区京都大学桂C1，
TEL075-383-3231，FAX075-950-3800）

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

⑶ 小売業者の行動

小売業者kの行動は，卸売業者と同様に，利潤最大化のもと，以下のように定式化できる．

$$\text{Max} \ \rho_k^{3*}\sum_{l=1}^{p}\sum_{h=1}^{u}q_{hkl} - c_k\left(Q^2\right) - g_k\left(Q^2\right) - \sum_{l=1}^{p}c_{kl}\left(Q^3\right) - \sum_{h=1}^{u}\sum_{l=1}^{p}\rho_{hkl}^{7*}q_{hkl} - \sum_{j=1}^{n}\left(\rho_j^{2*}\sum_{h=1}^{u}q_{hjk}\right) \tag{8}$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{h=1}^{u}\sum_{l=1}^{p}q_{hkl} \le \sum_{h=1}^{u}\sum_{j=1}^{n}q_{hjk} \tag{9}$$

$$q_{hjk} \ge 0 \ \ \forall h,j, \qquad q_{hkl} \ge 0 \ \ \forall h,l \tag{10}$$

ここに，

ρ^3_k ：小売業者kの販売価格

q_{hkl} ：kl間における物流事業者hの輸送量

Q^3 ：q_{hkl}を要素とするuop次元ベクトル

$c_k(Q^2)$ ：小売業者kの保管費用

$g_k(Q^2)$ ：小売業者kの施設費用

$c_{kl}(Q^3)$ ：小売業者kと消費市場lの取引費用

ρ^7_{hkl} ：kl間における物流事業者hの運賃

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れば，最適性条件は下記の変分不等式を満足することである．

$$\begin{aligned}
&\sum_{h=1}^{u}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{o}\left[\frac{\partial c_k\left(Q^{2*}\right)}{\partial q_{hjk}} + \frac{\partial g_k\left(Q^{2*}\right)}{\partial q_{hjk}} + \rho_j^{2*} - \delta_k^*\right]\times\left[q_{hjk} - q_{hjk}^*\right] \\
&+\sum_{h=1}^{u}\sum_{k=1}^{o}\sum_{l=1}^{p}\left[-\rho_k^{3*} + \frac{\partial c_{kl}\left(Q^{3*}\right)}{\partial q_{hkl}} + \rho_{hkl}^{7*} + \delta_k^*\right]\times\left[q_{hkl} - q_{hkl}^*\right] \\
&+\sum_{k=1}^{o}\left[\sum_{h=1}^{u}\left(\sum_{j=1}^{n}q_{hjk}^* - \sum_{l=1}^{p}q_{hkl}^*\right)\right]\times\left[\delta_k - \delta_k^*\right] \ge 0 \\
&\qquad\qquad\qquad \forall\left(Q^2, Q^3, \delta\right) \in R_+^{uno+uop+o}
\end{aligned} \tag{11}$$

ここに，δ_kは式()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．

⑷ 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する．

$$\rho_k^{3*}\begin{cases} = \rho_l^{4*} & \text{if } q_{hkl}^* > 0 \\ \ge \rho_l^{4*} & \text{if } q_{hkl}^* = 0 \end{cases} \tag{12}$$

$$d_l\left(\rho^{4*}\right)\begin{cases} = \sum_{h=1}^{u}\sum_{k=1}^{o}q_{hkl}^*, & \text{if } \rho_l^{4*} > 0 \\ \le \sum_{h=1}^{u}\sum_{k=1}^{o}q_{hkl}^*, & \text{if } \rho_l^{4*} = 0 \end{cases} \tag{13}$$

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p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(12)と(13)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$(Q^{3*},\rho^{4*})\in R_+^{uop+p}$を求めることに等しい．

$$\begin{aligned}
&\sum_{h=1}^{u}\sum_{k=1}^{o}\sum_{l=1}^{p}\left[\rho_k^{3*} - \rho_l^{4*}\right]\times\left[q_{hkl} - q_{hkl}^*\right] \\
&+\sum_{l=1}^{p}\left[\sum_{h=1}^{u}\sum_{k=1}^{o}q_{hkl}^* - d_l\left(\rho^{4*}\right)\right]\times\left[\rho_l^4 - \rho_l^{4*}\right] \ge 0 \\
&\qquad\qquad\qquad \forall\left(Q^3, \rho^4\right) \in R_+^{uop+p}
\end{aligned} \tag{14}$$

⑸ 物流事業者の行動

物流事業者hの行動は，利潤最大化を目的関数として，以下のように表す．

$$\text{Max} \ \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\rho_{hij}^{5*}q_{hij} + \sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{o}\rho_{hjk}^{6*}q_{hjk} + \sum_{k=1}^{o}\sum_{l=1}^{p}\rho_{hkl}^{7*}q_{hkl} - g_h\left(Q^1, Q^2, Q^3\right) - w_h\left(Q^1, Q^2, Q^3\right) \tag{15}$$

$$\text{subject to} \quad q_{hij} \ge 0 \ \forall i,j, \quad q_{hjk} \ge 0 \ \forall j,k, \quad q_{hkl} \ge 0 \ \forall k,l \tag{16}$$

ここに，

$g_h(Q^1,Q^2,Q^3)$ ：物流事業者hの施設費用

$w_h(Q^1,Q^2,Q^3)$ ：物流事業者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$\bar{w}_h(Q^1,Q^2,Q^3)$と期待遅刻費用の和で表すものとする．ij間の輸送時間t_{hij}が確率分布$\varphi_{hij}(t)$に従うと仮定した場合，遅刻限界l^+_{hij}に対して，時刻t（ただし，$t \ge l^+_{hij}$）に到着した場合の遅刻時間は$\Delta^+_{hij} = t - l^+_{hij}$と表される．したがって，遅刻時間の期待値は，以下のように求められる．

$$e_{hij}^+\left(l_{hij}^+\right) \equiv E\left(\Delta_{hij}^+\right) = \int_{l_{hij}^+}^{\infty}\left(t - l_{hij}^+\right)\phi_{hij}(t)dt \tag{17}$$

このとき，期待遅刻費用は，遅刻ペナルティ係数$\lambda^+_{hij}(Q^1)$を用いて，

$$E\left(\lambda_{hij}^+\Delta_{hij}^+\right) = \lambda_{hij}^+\left(Q^1\right)e_{hij}^+\left(l_{hij}^+\right) \tag{18}$$

と記述される．l^+_{hij}を外生的に決定すれば，期待遅刻費用はQ^1のみの関数となる．

期待遅刻費用については，jk間やkl間についても，同様に記述できるので，物流事業者hの運行費用は，以下のようになる．

$$\begin{aligned}
w_h\left(Q^1, Q^2, Q^3\right) &= \overline{w}_h\left(Q^1, Q^2, Q^3\right) + E\left(\lambda_{hij}^+\Delta_{hij}^+\right) \\
&+ E\left(\lambda_{hjk}^+\Delta_{hjk}^+\right) + E\left(\lambda_{hkl}^+\Delta_{hkl}^+\right)
\end{aligned} \tag{19}$$

施設費用関数と運行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である．

$$\begin{aligned}
&\sum_{h=1}^{u}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\left[\frac{\partial g_h\left(Q^{1*}, Q^{2*}, Q^{3*}\right)}{\partial q_{hij}} + \frac{\partial w_h\left(Q^{1*}, Q^{2*}, Q^{3*}\right)}{\partial q_{hij}} - \rho_{hij}^{5*}\right] \\
&\times\left[q_{hij} - q_{hij}^*\right] + \sum_{h=1}^{u}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{o}\left[\frac{\partial g_h\left(Q^{1*}, Q^{2*}, Q^{3*}\right)}{\partial q_{hjk}} - \rho_{hjk}^{6*}\right.
\end{aligned}$$

$$
+\frac{\partial w_h\left(Q^{1*},Q^{2*},Q^{3*}\right)}{\partial q_{hjk}}\Bigg]\times\left[q_{hjk}-q_{hjk}^{*}\right]+\sum_{h=1}^{u}\sum_{k=1}^{o}\sum_{l=1}^{p}\Bigg[-\rho_{hkl}^{7*}
$$

$$
+\frac{\partial g_h\left(Q^{1*},Q^{2*},Q^{3*}\right)}{\partial q_{hkl}}+\frac{\partial w_h\left(Q^{1*},Q^{2*},Q^{3*}\right)}{\partial q_{hkl}}\Bigg] \tag{20}
$$

$$
\times\left[q_{hkl}-q_{hkl}^{*}\right]\geq 0 \qquad \forall\left(Q^{1},Q^{2},Q^{3}\right)\in R_{+}^{umn+uno+uop}
$$

(6) 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，サプライチェーンネットワーク全体の均衡条件は，以下のように記述できる．

$$
\sum_{h=1}^{u}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\Bigg[\frac{\partial f_i\left(Q^{1*}\right)}{\partial q_{hij}}+\frac{\partial g_i\left(Q^{1*}\right)}{\partial q_{hij}}+\frac{\partial c_{ij}\left(Q^{1*}\right)}{\partial q_{hij}}+\frac{\partial c_j\left(Q^{1*}\right)}{\partial q_{hij}}+\frac{\partial g_j\left(Q^{1*}\right)}{\partial q_{hij}}-\gamma_j^{*}
$$

$$
+\frac{\partial g_h\left(Q^{1*},Q^{2*},Q^{3*}\right)}{\partial q_{hij}}+\frac{\partial w_h\left(Q^{1*},Q^{2*},Q^{3*}\right)}{\partial q_{hij}}\Bigg]\times\left[q_{hij}-q_{hij}^{*}\right]
$$

$$
+\sum_{h=1}^{u}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{o}\Bigg[\frac{\partial c_k\left(Q^{2*}\right)}{\partial q_{hjk}}+\frac{\partial g_k\left(Q^{2*}\right)}{\partial q_{hjk}}+\frac{\partial c_{jk}\left(Q^{2*}\right)}{\partial q_{hjk}}-\delta_k^{*}+\gamma_j^{*}
$$

$$
+\frac{\partial g_h\left(Q^{1*},Q^{2*},Q^{3*}\right)}{\partial q_{hjk}}+\frac{\partial w_h\left(Q^{1*},Q^{2*},Q^{3*}\right)}{\partial q_{hjk}}\Bigg]\times\left[q_{hjk}-q_{hjk}^{*}\right]
$$

$$
+\sum_{h=1}^{u}\sum_{k=1}^{o}\sum_{l=1}^{p}\Bigg[\frac{\partial c_{kl}\left(Q^{3*}\right)}{\partial q_{hkl}}+\frac{\partial g_h\left(Q^{1*},Q^{2*},Q^{3*}\right)}{\partial q_{hkl}}+\frac{\partial w_h\left(Q^{1*},Q^{2*},Q^{3*}\right)}{\partial q_{hkl}}
$$

$$
+\delta_k^{*}-\rho_l^{4*}\Bigg]\times\left[q_{hkl}-q_{hkl}^{*}\right]+\sum_{j=1}^{n}\left[\sum_{h=1}^{u}\left(\sum_{i=1}^{m}q_{hij}^{*}-\sum_{k=1}^{o}q_{hjk}^{*}\right)\right]\times\left[\gamma_j-\gamma_j^{*}\right]
$$

$$
+\sum_{k=1}^{o}\left[\sum_{h=1}^{u}\left(\sum_{j=1}^{n}q_{hjk}^{*}-\sum_{l=1}^{p}q_{hkl}^{*}\right)\right]\times\left[\delta_k-\delta_k^{*}\right]+\sum_{l=1}^{p}\left[\sum_{h=1}^{u}\sum_{k=1}^{o}q_{hkl}^{*}-d_l\left(\rho^{4*}\right)\right] \tag{21}
$$

$$
\times\left[\rho_l^{4}-\rho_l^{4*}\right]\geq 0 \qquad \forall\left(Q^{1},Q^{2},Q^{3},\gamma,\delta,\rho^{4}\right)\in R_{+}^{umn+uno+uop+n+o+p}
$$

この変分不等式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)]の推奨する方法を用いる．すなわち式(21)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

(1) 問題設定

本研究では仮想的なSCN（図-1）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)]を参考にして設定した．ただし，現実のSCNに近づけるために，既存データ（国内企業の業種別の物流費用，中国における製造業者（日本企業現地法人）の物流費用，わが国の物流事業者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．

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，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，$l_{hij}^{+}=\bar{t}_{hij}+2\sigma_{hij}$に設定した．$\alpha_{hij},\alpha_{hjk},\alpha_{hkl},,\beta_{hij},\beta_{hjk},\beta_{hkl}$について

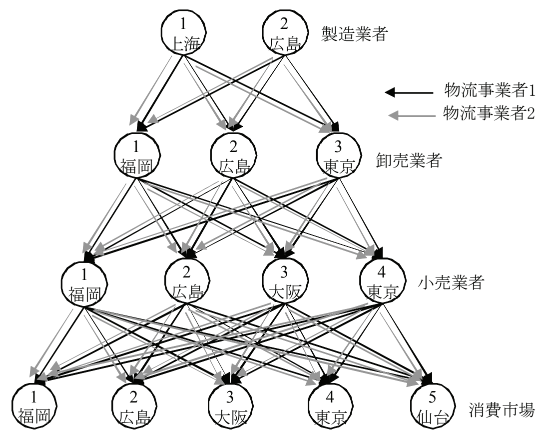

図-1 計算対象とするSCN

は，輸送時間のデータと陸海の実勢運賃の相違を勘案して設定した．

本研究で使用した関数形とパラメータ値は下記の通りである．

$$
f_1=96\left(\sum_{h=1}^{2}\sum_{j=1}^{3}q_{h1j}\right)+0.5\left(\sum_{h=1}^{2}\sum_{j=1}^{3}q_{h1j}\right)\left(\sum_{h=1}^{2}\sum_{j=1}^{3}q_{h2j}\right)
$$

$$
f_2=120\left(\sum_{h=1}^{2}\sum_{j=1}^{3}q_{h2j}\right)+0.5\left(\sum_{h=1}^{2}\sum_{j=1}^{3}q_{h1j}\right)\left(\sum_{h=1}^{2}\sum_{j=1}^{3}q_{h2j}\right) \tag{22}
$$

$$
c_j=4.5\left(\sum_{h=1}^{2}\sum_{i=1}^{2}q_{hij}\right)^{1.1} \quad c_k=3\left(\sum_{h=1}^{2}\sum_{j=1}^{3}q_{hjk}\right)^{1.1} \tag{23}
$$

$$
c_{ij}=5\left(\sum_{h=1}^{2}q_{hij}\right) \quad c_{jk}=5\left(\sum_{h=1}^{2}q_{hjk}\right) \quad c_{kl}=5\left(\sum_{h=1}^{2}q_{hkl}\right) \tag{24}
$$

$$
g_i=15\sum_{h=1}^{2}\sum_{j=1}^{3}q_{hij} \quad if \quad i=1 \quad ; \quad =20\sum_{h=1}^{2}\sum_{j=1}^{3}q_{hij} \quad if \quad i=2 \tag{25}
$$

$$
g_j=20\sum_{h=1}^{2}\sum_{i=1}^{2}q_{hij} \quad g_k=20\sum_{h=1}^{2}\sum_{j=1}^{3}q_{hjk} \tag{26}
$$

$$
g_h=0.5\left(\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{3}q_{hij}+\sum_{j=1}^{3}\sum_{k=1}^{4}q_{hjk}+\sum_{k=1}^{4}\sum_{l=1}^{5}q_{hkl}\right) \tag{27}
$$

$$
\begin{aligned}
\overline{w}_h=&\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{3}\left(\beta_{hij}q_{hij}^{2}+\alpha_{hij}q_{h1j}\right)\\
&+\sum_{j=1}^{3}\sum_{k=1}^{4}\left(\beta_{hjk}q_{hjk}^{2}+\alpha_{hjk}q_{hjk}\right)\\
&+\sum_{k=1}^{4}\sum_{l=1}^{5}\left(\beta_{hkl}q_{hkl}^{2}+\alpha_{hkl}q_{hkl}\right)
\end{aligned} \tag{28}
$$

$$
\sigma_{hij}=0.05\bar{t}_{hij} \tag{29}
$$

$$
\lambda_{hij}^{+}(Q)=50q_{hij} \tag{30}
$$

$$
d_l=\begin{cases}
3\left(1000-\rho_{4l}-0.5\sum_{l=1}^{5}\rho_{4l}\right) & if \quad l=4\\
1000-\rho_{4l}-0.5\sum_{l=1}^{5}\rho_{4l} & if \quad l=3\\
0.5\left(1000-\rho_{4l}-0.5\sum_{l=1}^{5}\rho_{4l}\right) & otherwise
\end{cases} \tag{31}
$$

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に関する結果を図-2に示す．なお，物流費用を保管費用と運賃の和としている．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

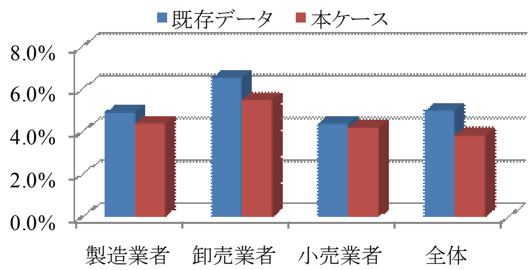

図-2　売上高に占める物流費用の比率

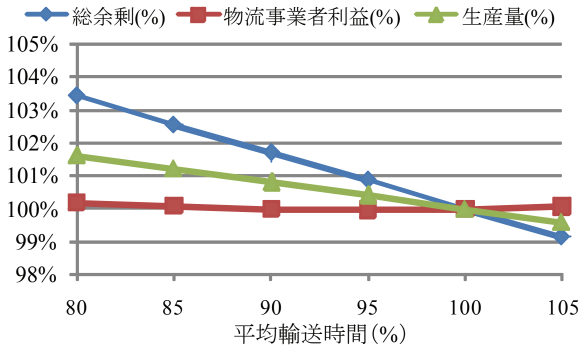

図-3　平均輸送時間の変動に伴う，総余剰，物流事業者の利益，総生産量の変化

費用比率は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，物流事業者の施設費用と運行費用の比が1:10（ヒアリング調査データによると1:11）となった．

(2) 輸送の高速性の影響

日本国内の輸送ネットワークの整備・改良により，平均輸送時間が変化した場合を想定する．日本国内における平均輸送時間と平均輸送費用の第2項の係数の値について，基本ケースを100%とし，その値を基本ケースの80%から105%まで変動させて計算を行った．

結果の一例として図-3に，SCN上での総余剰，物流事業者の利益，製造業者の総生産量に関して，基本ケースの平均輸送時間を100%とした場合の各ケースの計算結果を示す．なお，総余剰は生産者と消費者の余剰の総和である．

輸送時間の短縮により，SCN上での総余剰および生産量が増加している．輸送時間の短縮による物流事業者の平均輸送費用の低下は，運賃抑制を通じて商品の価格が安くなることにつながる．その結果，より多くの商品が生産され，低価格な商品がより多く購入されることから消費者余剰が増加し，総余剰も増加する．

一方，物流事業者については，生産量の増加に伴い，輸送量は増大するが，運賃が低下するために，売上を伸ばすことができず，利益がほとんど変化しない．また，運賃の低下は，都市内輸送の減少と都市間輸送の増加をもたらし，基本ケースでは行われなかった一部のOD間でも輸送が生じている部分がある．最も影響が大きいの

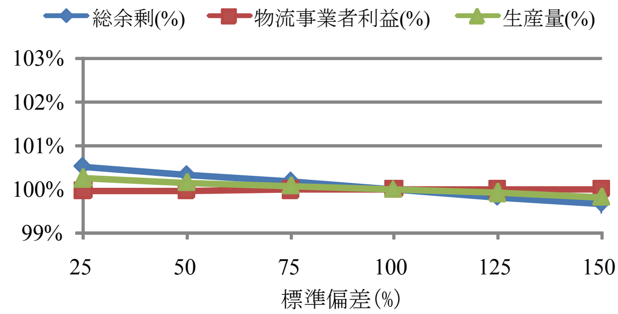

図-4　輸送時間の標準偏差の変動に伴う，総余剰，物流事業者の利益，生産量の変化

は，広島の小売業者と福岡の消費市場間であり，基本ケースでは当該OD間の購入割合は5%程度であったが，平均輸送時間が基本ケースの80%に変化した場合，購入割合は14%まで上昇した．

(3) 輸送時間の信頼性の影響

次に，国内の輸送ネットワークの整備・改良により，輸送時間分布の標準偏差が変化した場合を想定する．日本国内の輸送時間分布の標準偏差について，基本ケースを100%とし，その値を基本ケースの25%から150%まで変動させて計算を行った．

図-4に，SCN上での総余剰，物流事業者の利益，製造業者の総生産量に関して，基本ケースの標準偏差を100%とした場合の各ケースの計算結果を示す．標準偏差が小さくなること，すなわち，輸送時間の信頼性の向上により，SCN上での総余剰が増大し，生産量も増加している．物流事業者の利益は変化しないが，これは，輸送時間の信頼性向上により，期待遅刻費用が抑制され，運賃が低廉になるからである．全体的な傾向は，輸送時間が向上した場合と同様であるが，信頼性の向上に伴う変化の程度は小さい．

4．おわりに

本研究では，物流事業者の行動および輸送時間の変動性を考慮したSCNEモデルを定式化した．このモデルを用いて，輸送時間やその信頼性の変化がもたらすSCNへの影響について，余剰や生産量などの面から考察した．その結果，輸送の高速化や輸送時間の信頼性の向上は，SCN全体の効率化（総余剰の増加）につながることが確認された．

参考文献

1) Nagurney, A., Dong, J. and Zhang, D.: A supply chain network equilibrium model, Transportation Research Part E, 38, pp.281-303, 2002.
2) Meng, Q., Huang, Y. K. and Cheu, R. L.: A note on supply chain network equilibrium models, Transportation Research Part E, 43, pp.60-71, 2007.