

サプライチェーンネットワークおよび スーパーネットワーク均衡モデルの拡張： 原材料業者の行動と多期間化

前田 晃佑¹・山田 忠史²・横山 大河³・谷口 栄一⁴

¹学生会員 京都大学大学院修士課程 工学研究科都市社会工学専攻
(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
E-mail: k.maeda@kiban.kuciv.kyoto-u.ac.jp

²正会員 京都大学大学院准教授 工学研究科都市社会工学専攻 (同上)
E-mail: t.yamada@kiban.kuciv.kyoto-u.ac.jp

³学生会員 京都大学大学院修士課程 工学研究科都市社会工学専攻 (同上)
E-mail: taiga.y@kiban.kuciv.kyoto-u.ac.jp

⁴フェロー会員 京都大学大学院教授 工学研究科都市社会工学専攻 (同上)
E-mail: taniguchi@kiban.kuciv.kyoto-u.ac.jp

本研究は、サプライチェーンネットワーク上での商品の流動や活動主体の行動を記述するための方法論である。サプライチェーンネットワーク均衡(SCNE)モデル、および、サプライチェーンネットワークと交通ネットワークを統合したスーパーネットワーク均衡(SC-T-SNE)モデルの拡張を試みる。前者については、多階層に渡る部品や資材などの原材料の調達過程に着目し、原材料業者の行動を考慮したSCNEモデルを提案する。後者については、スーパーネットワーク上の動的な環境変化が考慮可能な多期間SC-T-SNEモデルを提案する。これら両モデルについて、既存のSCNEモデルおよびSC-T-SNEモデルとの定式化における相違点を示し、全体の均衡条件やその解法などについて概説する。

Key Words : supply chain network, supernetwork, procurement, multiperiod modeling

1. はじめに

サプライチェーンは、製品の生産から消費に至るまでの、活動主体と商品のネットワーク状の連鎖である。サプライチェーンネットワーク(supply chain network: SCN)上では複数の異なる主体が、商品の生産、取引、さらには、輸配送や保管などの物流を営む。物流はSCN上の営みの一つであるので、物流メカニズムを理解するためには、SCN上での商品の流動特性や活動主体の行動特性を考究する必要がある¹⁾。

SCN上で生じる現象(すなわち、商品の流動や主体の行動)を記述するための方法論として、サプライチェーンネットワーク均衡(supply chain network equilibrium: SCNE)モデルがある。SCNEモデルは、Nagurney *et al.*²⁾によって開発され、多段階の複数主体の分権的な意思決定や主体間の行動の相互作用を考慮したうえで、SCN上の製造業者、小売業者、消費市場(消費者)の行動を記述し、SCN上の商品の取引量(および、生産量)や価格を算定

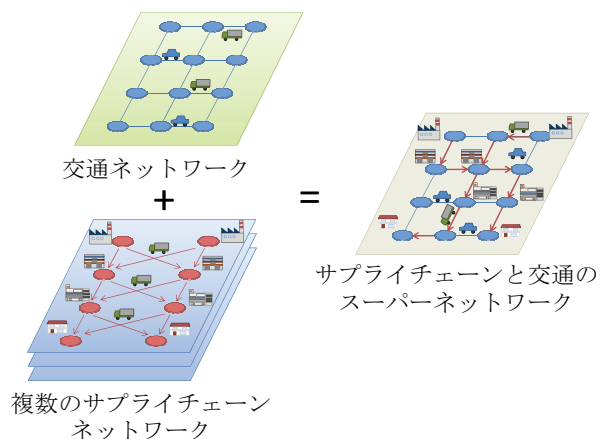


図-1 スーパーネットワーク

する。SCNEモデルは以降、需要の不確実性^{3,4)}、電子商取引^{5,7)}、リバースサプライチェーン^{8,10)}、企業の社会的責任^{11,12)}、生産容量^{13,14)}、物流業者の行動¹⁵⁾、SCN間の競争性^{16,18)}、商物分離¹⁹⁾を考慮したモデルへと拡張されている。Yamada *et al.*²⁰⁾は、物流業者の行動を考慮したSCN

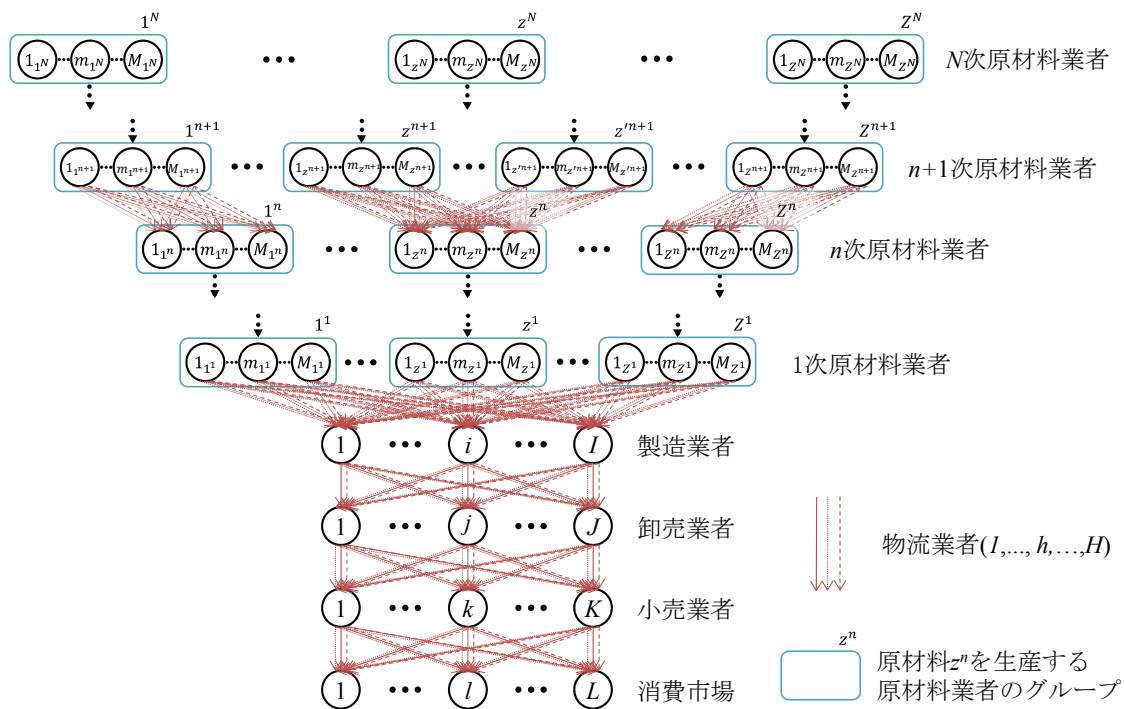


図-2 モデル化の対象とするSCN (単一商品, N 次の原材料)

Eモデル¹⁵⁾を拡張して, SCNと交通ネットワーク (transport network: TN)を統合したスーパーネットワーク (図-1)を対象としたモデル, すなわち, スーパーネットワーク均衡 (supply chain-transport supernetwork equilibrium: SC-T-SNE)モデルを提案している. なお, SCNEモデルは, 図-1において, TNを考慮せず, かつ, 1つのSCNのみを対象にする.

商品の生産における, 部品や資材 (以降, 原材料と称する) の調達過程については, サプライチェーンマネジメント (supply chain management: SCM) という概念が登場した頃²¹⁾から今日に至る²²⁾まで, その重要性が指摘されている. また, 東日本大震災では, 原材料の調達が寸断され, 被災地以外の企業の生産に大きな影響を与えた²³⁾ことから, 事業継続計画 (business continuity plan: BCP)の必要性が再認識されている²⁴⁾. したがって, SCNEモデルにも原材料の調達過程が含まれるのが望ましい.

原材料業者の行動を考慮したSCNEモデル²⁵⁾²⁶⁾のうち, 原材料の調達過程を明示的に考慮しているのは, Yang *et al.*²⁵⁾のみであるが, 生産関数 (原材料と商品の生産量の関係を表した関数) が, 原材料が直接的に商品となるような単純な関数であり, 原材料調達過程の階層性も考慮されていない. 本研究では, 物流業者の行動を考慮したSCNEモデル¹⁵⁾を基にして, 多階層の原材料の調達過程を考慮したモデルへと拡張し, 生産関数にも工夫を加える. また, 原材料業者の目的関数に施設費用や運賃も考慮する.

SCNやTNには動的に変動する要素が含まれる.

SCN上では商品需要や生産能力の変化などが, TNではリンクの新設・改良などが考えられる. SCN上の動的な環境変化が考慮可能なモデルとして, 多期間SCNEモデル¹⁴⁾²⁶⁾²⁷⁾がある. 本研究では, 既存の多期間SCNEモデル¹⁴⁾²⁶⁾と同様に, SC-T-SNEモデルの多期間化を試みる.

2. モデルの概要

SCNEモデル¹⁵⁾¹⁹⁾は, 一つの商品のSCNを対象として, そのSCN上の製造業者, 卸売業者, 小売業者, 消費者 (消費市場), 物流業者の行動を記述する. SC-T-SNEモデルでは, これらに加えて旅客の行動を記述し, 複数の商品のSCNと1つのTNを統合したスーパーネットワークを対象とする. 以降の定式化においては, 既存のSCNEモデル¹⁵⁾¹⁹⁾, および, SC-T-SNEモデル²⁰⁾との相違点のみを取り上げる.

(1) 原材料業者の行動を考慮したSCNEモデル

図-2のように, SCN上には, $\sum_{z^n=1}^{Z^n} M_{z^n}$ 個の異なる n 次 (すなわち, n 階層) ($n=1, \dots, N$)の原材料業者が存在し, 各階層で Z^n 種類の異なる原材料が生産・供給される. 原材料 z^n を生産・供給する原材料業者を m_{z^n} ($m_{z^n}=1, \dots, M_{z^n}$) とする.

I 個の異なる製造業者は1次の原材料 z^1 ($z^1=1, \dots, Z^1$) を基にして, 同一の商品を生産し, J 個の異なる卸売業者に供給する. 卸売業者はその商品を K 個の異なる小売業者に販売し, 最終的に L 個の異なる消費市場

で消費される．すべての原材料，および商品の輸送は H 個の異なる物流業者によって担われる．

なお，図-2 において，リンクは商品の取引及び輸送を表しており，同一ノード間の複数リンクは物流業者を区別したものである．

a) 原材料業者の行動

n 次の原材料 z^n を生産するために， $n+1$ 次の原材料 $z^{n+1} \in \Phi_{z^n}$ を要するものとする．ここに， Φ_{z^n} は原材料 z^n を生産するために必要な原材料 z^{n+1} の集合であり， $\dim \Phi_{z^n} = e_{z^n}$ とする．また，集合 Ψ_{z^n} を， z^n を原材料とする z^{n-1} の集合とする．

n 次の原材料 z^n を扱う原材料業者 m_{z^n} 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．

(i) $n=N$ のとき

$$\text{Max} \sum_{z^{N-1} \in \Psi_{z^N}} \sum_{m_{z^{N-1}}=1}^{M_{z^{N-1}}} \rho_{m_{z^{N-1}} z^N}^{N*} \sum_{h=1}^H w_{hm_{z^{N-1}} m_{z^N}} - f_{m_{z^N}}(W^N) - g_{m_{z^N}}(W^N) - \sum_{z^{N-1} \in \Psi_{z^N}} \sum_{m_{z^{N-1}}=1}^{M_{z^{N-1}}} c_{m_{z^N} m_{z^{N-1}}}(W^N) \quad (1)$$

$$- \sum_{h=1}^H \sum_{z^{N-1} \in \Psi_{z^N}} \sum_{m_{z^{N-1}}=1}^{M_{z^{N-1}}} \rho_{hm_{z^N} m_{z^{N-1}}}^{N*} w_{hm_{z^N} m_{z^{N-1}}} \quad \text{subject to } w_{hm_{z^N} m_{z^{N-1}}} \geq 0 \quad \forall z^{N-1} \in \Psi_{z^N}, h, m_{z^{N-1}} \quad (2)$$

(ii) $N > n > 1$ のとき

$$\text{Max} \sum_{z^{n-1} \in \Psi_{z^n}} \sum_{m_{z^{n-1}}=1}^{M_{z^{n-1}}} \rho_{m_{z^{n-1}} z^n}^{n*} \sum_{h=1}^H w_{hm_{z^{n-1}} m_{z^n}} - f_{m_{z^n}}(W^n) - c_{m_{z^n}}(W^{n+1}, W^n) - g_{m_{z^n}}(W^{n+1}, W^n) - \sum_{z^{n-1} \in \Psi_{z^n}} \sum_{m_{z^{n-1}}=1}^{M_{z^{n-1}}} c_{m_{z^n} m_{z^{n-1}}}(W^n) \quad (3)$$

$$- \sum_{z^{n+1} \in \Phi_{z^n}} \sum_{m_{z^{n+1}}=1}^{M_{z^{n+1}}} \rho_{m_{z^{n+1}} m_{z^n}}^{n+1*} \sum_{h=1}^H w_{hm_{z^{n+1}} m_{z^n}} - \sum_{h=1}^H \sum_{z^{n-1} \in \Psi_{z^n}} \sum_{m_{z^{n-1}}=1}^{M_{z^{n-1}}} \rho_{hm_{z^n} m_{z^{n-1}}}^{n*} w_{hm_{z^n} m_{z^{n-1}}} \quad \text{subject to } \sum_{h=1}^H \sum_{z^{n-1} \in \Psi_{z^n}} \sum_{m_{z^{n-1}}=1}^{M_{z^{n-1}}} w_{hm_{z^n} m_{z^{n-1}}} \leq F_{m_{z^n}}(W_{m_{z^n}}) \quad (4)$$

$$w_{hm_{z^n} m_{z^{n-1}}} \geq 0, w_{hm_{z^{n+1}} m_{z^n}} \geq 0 \quad \forall z^{n-1} \in \Psi_{z^n}, z^{n+1} \in \Phi_{z^n}, h, m_{z^{n-1}}, m_{z^{n+1}} \quad (5)$$

(iii) $n=1$ のとき

$$\text{Max} \sum_{i=1}^I \rho_{m_{z^1} i}^1 \sum_{h=1}^H w_{hm_{z^1} i} - f_{m_{z^1}}(W^1) - c_{m_{z^1}}(W^2, W^1) - g_{m_{z^1}}(W^2, W^1) \quad (6)$$

$$- \sum_{i=1}^I c_{m_{z^1} i}(W^1) - \sum_{z^2 \in \Phi_{z^1}} \sum_{m_{z^2}=1}^{M_{z^2}} \rho_{m_{z^2} m_{z^1}}^{2*} \sum_{h=1}^H w_{hm_{z^2} m_{z^1}} - \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I \rho_{hm_{z^1} i}^1 w_{hm_{z^1} i} \quad \text{subject to } \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I w_{hm_{z^1} i} \leq F_{m_{z^1}}(W_{m_{z^1}}) \quad (7)$$

$$w_{hm_{z^1} i} \geq 0, w_{hm_{z^2} m_{z^1}} \geq 0 \quad \forall \Phi_{z^1}, h, i, m_{z^2} \quad (8)$$

ここに，

$\rho_{m_{z^n} m_{z^{n-1}}}^n$: 原材料業者 m_{z^n} から原材料業者 $m_{z^{n-1}}$ への原材料 z^n の販売価格 ($n=2,3,\dots,N$)

$\rho_{m_{z^1} i}^1$: 原材料業者 m_{z^1} から製造業者 i への原材料 z^1 の販売価格

$w_{hm_{z^n} m_{z^{n-1}}}$: m_{z^n} $m_{z^{n-1}}$ 間での原材料 z^n の物流業者 h の輸送量 (重量) ($n=2,3,\dots,N$)

$w_{m_{z^1} i}$: m_{z^1} i 間の原材料 z^1 の取引量

$W_{m_{z^n}}$: $w_{hm_{z^{n+1}} m_{z^n}}$ を要素とする $e_{z^n} M_{z^{n+1}}$ 次元ベクトル ($n=1,2,\dots,N-1$)

$F_{m_{z^n}}(W_{m_{z^n}})$: 原材料 z^{n+1} (生産要素) の量と原材料 z^n (生産物) の生産量を関連づける生産関数 ($n=1,2,\dots,N-1$)

W^n : $w_{hm_{z^n} m_{z^{n-1}}}$ を要素とする $S^n (= H \sum_{z^n=1}^{Z^n} \sum_{z^{n-1} \in \Psi_{z^n}} M_{z^n} M_{z^{n-1}})$ 次元ベクトル ($n=2,3,\dots,N$)

W^1 : $w_{hm_{z^1} i}$ を要素とする $S^1 (= H \sum_{z^1=1}^{Z^1} M_{z^1} I)$ 次元ベクトル

$f_{m_{z^n}}(W^n)$: 原材料業者 m_{z^n} の生産費用 ($n=1,2,\dots,N$)

$c_{m_{z^n}}(W^{n+1}, W^n)$: 原材料業者 m_{z^n} の保管費用 ($n=1,2,\dots,N-1$)

$g_{m_{z^n}}(W^{n+1}, W^n)$: 原材料業者 m_{z^n} の施設費用 ($n=1,2,\dots,N-1$)

$g_{m_{z^n}}(W^n)$: 原材料業者 m_{z^n} の施設費用

$c_{m_{z^n} m_{z^{n-1}}}(W^n)$: m_{z^n} $m_{z^{n-1}}$ 間の取引費用 ($n=2,3,\dots,N$)

$c_{m_{z^1} i}(W^1)$: m_{z^1} i 間の取引費用

$\rho_{hm_{z^n} m_{z^{n-1}}}^n$: m_{z^n} $m_{z^{n-1}}$ 間の輸送における物流業者 h の運賃 ($n=2,3,\dots,N$)

$\rho_{hm_{z^n} m_{z^{n-1}}}^1$: m_{z^n} i 間の輸送における物流業者 h の運賃

式(4),(7)は，原材料の生産に関する制約条件であり，この式により，上下流の原材料が関連づけられる．本研究では，原材料 z^n (生産物) の生産量と，その原材料 z^{n+1} (生産要素) との関係 (すなわち，式(4),(7)の右辺) を次のように表現する．

$$F_{m_{z^n}}(W_{m_{z^n}}) = \begin{cases} \left\{ \sum_{z^{n+1} \in \Phi_{z^n}} \alpha_{z^{n+1}} \left(\beta_{z^{n+1}} \sum_{h=1}^H \sum_{m_{z^{n+1}}=1}^{M_{z^{n+1}}} w_{hm_{z^{n+1}} m_{z^n}} \right)^{\xi_{z^n}} \right\}^{\frac{1}{\xi_{z^n}}} & \text{if } \sigma_{z^n} > 0 \\ \beta_{z^{n+1}} \sum_{h=1}^H \sum_{m_{z^{n+1}}=1}^{M_{z^{n+1}}} w_{hm_{z^{n+1}} m_{z^n}} & \text{if } \sigma_{z^n} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

ここに，

$\alpha_{z^{n+1}}$: 生産関数の投入割合係数 ($\alpha_{z^{n+1}} \geq 0, \sum_{z^{n+1} \in \Phi_{z^n}} \alpha_{z^{n+1}} = 1$)

$\beta_{z^{n+1}}$: 1 単位の z^{n+1} からの z^n の生産量を表す投入係数 ($\beta_{z^{n+1}} \geq 0$)

ξ_{z^n} : 代替の弾力性に関する係数 ($\xi_{z^n} \leq 1$)

σ_{z^n} : 生産関数 $F_{m_{z^n}}(W_{m_{z^n}})$ の代替弾力性 ($\sigma_{z^n} = 1/(1-\xi_{z^n})$)

式(9)の上段は，原材料 z^n の生産に必要な原材料 z^{n+1} の間に代替性がある場合 (CES 型生産関数) を，下段は代替関係がない場合を，それぞれ表している．

b) 製造業者の行動

製造業者 i の行動は，利潤最大化のもと，以下のように表される．

$$\text{Max} \sum_{j=1}^J \rho_{ij}^* \sum_{h=1}^H q_{hij} - f_i(Q^1) - c_i(W^1, Q^1) - g_i(W^1, Q^1) \quad (10)$$

$$- \sum_{j=1}^J c_{ij}(Q^1) - \sum_{z^1=1}^{M_1} \rho_{m_1, i}^* \sum_{h=1}^H w_{hm_1, i} - \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^J \rho_{hij}^* q_{hij}$$

$$\text{subject to} \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^J q_{hij} \leq F_i(W_i) \quad (11)$$

$$q_{hij} \geq 0, w_{hm_1, i} \geq 0 \quad \forall h, j, m_1, z^1 \quad (12)$$

ここに、

ρ_{ij}^1 : 製造業者 i から卸売業者 j への商品の販売価格

q_{ij} : ij 間での物流業者 h の輸送量 (h, j で識別した商品の生産量に相当する)

Q^1 : q_{hij} を要素とする HJ 次元ベクトル

W_i : $w_{hm_1, i}$ を要素とする $H \times M_1$ 次元ベクトル

$F_i(W_i)$: 原材料 z^1 の量と商品の生産量を関連づける生産関数

ρ_{hij}^1 : ij 間の輸送における物流業者 h の運賃

式(11)は、商品の生産に関する制約条件であり、商品の生産量と原材料 z^1 との関係（すなわち、式(11)の右辺）を式(9)と同様に次のように表現する。

$$F_i(W_i) \begin{cases} = \left\{ \sum_{z^1=1}^{M_1} \alpha_{z^1} \left(\beta_{z^1} \sum_{h=1}^H \sum_{m_1=1}^{M_1} w_{hm_1, i} \right)^\xi \right\}^{\frac{1}{\sigma}} & \text{if } \sigma > 0 \\ = \beta_{z^1} \sum_{h=1}^H \sum_{m_1=1}^{M_1} w_{hm_1, i} & \text{if } \sigma = 0 \end{cases} \quad (13)$$

ここに、

α_{z^1} : 生産関数の投入割合係数 ($\alpha_{z^1} \geq 0, \sum_{z^1 \in \Phi} \alpha_{z^1} = 1$)

β_{z^1} : 1 単位の z^1 からの商品の生産量を表す投入係数 ($\beta_{z^1} \geq 0$)

ξ : 代替の弾力性に関する係数 ($\xi \leq 1$)

σ : 生産関数 $F_i(W_i)$ の代替弾力性 ($\sigma = 1/(1-\xi)$)

c) 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、以下のように表される。

$$\text{Max} \sum_{n=2}^N \sum_{z^n=1}^{M_n} \sum_{z^{n-1} \in \Psi_{z^n}} \sum_{m_{z^n}=1}^{M_{z^n}} \rho_{hm_{z^n}, z^n}^* w_{hm_{z^n}, z^n} + \sum_{z^1=2}^{M_1} \sum_{m_1=1}^{M_1} \rho_{hm_1, z^1}^* w_{hm_1, z^1} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \rho_{hij}^* q_{hij} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \rho_{hjk}^* q_{hjk} \quad (14)$$

$$+ \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \rho_{hkl}^* q_{hkl} - g_h(W^N, W^{N-1}, \dots, W^1, Q^1, Q^2, Q^3) - C_h(W^N, W^{N-1}, \dots, W^1, Q^1, Q^2, Q^3)$$

subject to

$$w_{hm_{z^n}, z^n} \geq 0 \quad n=2, \dots, N, \forall z^n, z^{n-1} \in \Psi_{z^n}, m_{z^n}, m_{z^{n-1}} \quad (15)$$

$$w_{hm_1, z^1} \geq 0 \quad \forall z^1, m_1, i,$$

$$q_{hij} \geq 0 \quad \forall i, j, \quad q_{hjk} \geq 0 \quad \forall j, k, \quad q_{hkl} \geq 0 \quad \forall k, l$$

ここに、

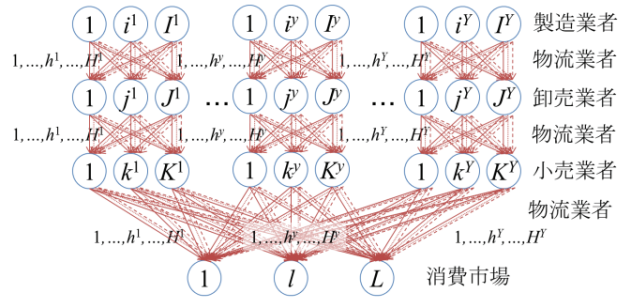


図-3 モデル化の対象とするSCN (Y種類の商品)

$g_h(W^N, W^{N-1}, \dots, W^1, Q^1, Q^2, Q^3)$: 物流業者 h の施設費用

$C_h(W^N, W^{N-1}, \dots, W^1, Q^1, Q^2, Q^3)$: 物流業者 h の運行費用

ρ_{hjk}^2 : jk 間の輸送における物流業者 h の運賃

q_{hjk} : jk 間での物流業者 h の輸送量 (重量)

Q^2 : q_{hjk} を要素とする HJK 次元ベクトル

ρ_{hkl}^3 : kl 間の輸送における物流業者 h の運賃

q_{hkl} : kl 間での物流業者 h の輸送量 (重量)

Q^3 : q_{hkl} を要素とする HKL 次元ベクトル

d) SCN全体の均衡条件

卸売業者、小売業者の行動、および、消費市場の均衡条件は、既存のSCNEモデル^{15),19)}と同様である。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（すなわち、SCN全体の均衡条件）。この均衡条件式を解くことにより、各原材料業者間、原材料業者—製造業者間、製造業者—卸売業者間、卸売業者—小売業者間、小売業者—消費市場間の取引量（および、生産量、輸送量）、消費市場での商品価格などが算定される。使用する関数に適切な仮定を設ければ、これら算定量の一意性を保証することができる。均衡条件式の解法については、Meng *et al.*²⁸⁾の推奨する方法が適用できる。

(2) 多期間SC-T-SNEモデル

SC-T-SNEモデルに着目するので、図-3のように、Y種類の商品のSCNがモデル化の対象となる。すなわち、SCNがTN上にY個存在し、それぞれ異なった商品 y ($y=1, \dots, Y$) を生産・供給する。図-3において、リンクは商品の取引および輸送を表しており、同一ノード間の複数リンクは物流業者を区別したものである。

離散的な時間軸上での対象期間を T とし、対象期間内の各期間を t ($t=1, \dots, T$) とする。商品 y のSCN上には、 I^y 個の異なる製造業者、 J^y 個の異なる卸売業者、 K^y 個の異なる小売業者、 H^y 個の異なる物流業者が存在し、 L 個の異なる消費市場でY種類の商品が消費される。期間 $t-1$ から期間 t の間で、製造業者、卸売業者、小売業者はそれぞれ、前の期間から次の期間に商品（重量単位）の一部を在庫として持ち越すことができる。なお、TN上の交通の発生・集中に関する設

定は、既存の SC-T-SNE モデル²⁰と同様である。

a) 製造業者の行動

商品 y を扱う製造業者 i^y の行動は、期間 T での総利潤の最大化を目的とし、以下のように定式化できる。

$$\text{Max} \sum_{t=1}^T \sum_{j^y=1}^{J^y} \rho_{i^y j^y}^* \sum_{h^y=1}^{H^y} q_{th^y j^y} - \sum_{t=1}^T f_{i^y}(\hat{Q}_t^y) - \sum_{t=1}^T g_{i^y}(\hat{Q}_t^y, O_{t-1}^y) \quad (16)$$

$$- \sum_{t=1}^T s_{i^y}(\hat{Q}_t^y) - \sum_{t=1}^T \sum_{j^y=1}^{J^y} c_{i^y j^y}(\hat{Q}_t^y) - \sum_{t=1}^T \sum_{h^y=1}^{H^y} \sum_{j^y=1}^{J^y} \rho_{i^y j^y}^* q_{th^y j^y}$$

$$\text{subject to} \quad o_{(t-1)i^y} + \hat{q}_{i^y} \geq \sum_{h^y=1}^{H^y} \sum_{j^y=1}^{J^y} q_{th^y j^y} + o_{i^y} \quad (17)$$

$$\hat{q}_{i^y} \leq \pi_{i^y} \quad (18)$$

$$q_{th^y j^y} \geq 0 \quad \forall t, h^y, j^y, \quad \hat{q}_{i^y} \geq 0 \quad \forall t, \quad o_{i^y} \geq 0 \quad \forall t \quad (19)$$

$\rho_{i^y j^y}^*$: 期間 t での製造業者 i^y から卸売業者 j^y への販売価格

$q_{th^y j^y}$: 期間 t における $i^y j^y$ 間での物流業者 h^y の輸送量 (t, h^y, j^y で識別した商品量に相当する)

$f_{i^y}(\hat{Q}_t^y)$: 期間 t での製造業者 i^y の生産費用

\hat{q}_{i^y} : 期間 t での製造業者 i^y の生産量

\hat{Q}_t^y : \hat{q}_{i^y} を要素とする I^y 次元ベクトル

$g_{i^y}(\hat{Q}_t^y, O_{t-1}^y)$: 期間 t での製造業者 i^y の施設費用

o_{i^y} : 製造業者 i^y の期間 t から期間 $t+1$ に持ちこす在庫量 ($o_{0i^y} = 0$)

O_t^y : o_{i^y} を要素とする I^y 次元ベクトル

$s_{i^y}(O_t^y)$: 期間 t での製造業者 i^y の在庫費用

$c_{i^y j^y}(Q_t^y)$: 期間 t での製造業者 i^y と卸売業者 j^y の取引費用

Q_t^y : $q_{th^y j^y}$ を要素とする $H^y J^y$ 次元ベクトル

$\rho_{i^y j^y}^1$: 期間 t での $i^y j^y$ 間の輸送における物流業者 h^y の運賃

π_{i^y} : 期間 t での製造業者 i^y の生産容量

式(17)は、期間 t における、在庫量、生産量、取引量の関係を示したものであり、複数の期間を考慮することにより付加される式である。また、既存の SC-T-SNE モデル²⁰とは異なり、生産容量制約も付加されている (式(18))。

b) 卸売業者の行動

商品 y を扱う卸売業者 j^y の行動は、期間 T での総利潤最大化の目的のもと、以下のように定式化される。

$$\text{Max} \sum_{t=1}^T \sum_{k^y=1}^{K^y} \rho_{j^y k^y}^{2*} \sum_{h^y=1}^{H^y} q_{th^y j^y k^y} - \sum_{t=1}^T c_{j^y}(\hat{Q}_t^y) - \sum_{t=1}^T g_{j^y}(\hat{Q}_t^y, O_{t-1}^y) - \sum_{t=1}^T s_{j^y}(O_t^y) - \sum_{t=1}^T \sum_{k^y=1}^{K^y} c_{j^y k^y}(\hat{Q}_t^y) \quad (20)$$

$$- \sum_{t=1}^T \sum_{h^y=1}^{H^y} \sum_{k^y=1}^{K^y} \rho_{j^y k^y}^{2*} q_{th^y j^y k^y} - \sum_{t=1}^T \sum_{i^y=1}^{I^y} \rho_{i^y j^y}^* q_{th^y i^y j^y}$$

$$\text{subject to} \quad o_{(t-1)j^y} + \sum_{h^y=1}^{H^y} \sum_{i^y=1}^{I^y} q_{th^y i^y j^y} \geq \sum_{h^y=1}^{H^y} \sum_{k^y=1}^{K^y} q_{th^y j^y k^y} + o_{j^y} \quad (21)$$

$$q_{th^y i^y j^y} \geq 0 \quad \forall t, h^y, i^y, \quad q_{th^y j^y k^y} \geq 0 \quad \forall t, h^y, k^y, \quad o_{j^y} \geq 0 \quad \forall t \quad (22)$$

ここに、

$\rho_{j^y k^y}^2$: 期間 t での卸売業者 j^y から小売業者 k^y への販売価格

$q_{th^y j^y k^y}$: 期間 t における $j^y k^y$ 間での物流業者 h^y の輸送量 (t, h^y, k^y で識別した商品の取引量に相当する)

$c_{j^y}(Q_t^y)$: 期間 t での卸売業者 j^y の保管費用

$g_{j^y}(Q_t^y, O_{t-1}^y)$: 期間 t での卸売業者 j^y の施設費用

o_{j^y} : 卸売業者 j^y の期間 t から期間 $t+1$ に持ちこす在庫量 ($o_{0j^y} = 0$)

O_t^y : o_{j^y} を要素とする J^y 次元ベクトル

$s_{j^y}(O_t^y)$: 期間 t での卸売業者 j^y の在庫費用

$c_{j^y k^y}(Q_t^y)$: 期間 t での卸売業者 j^y と小売業者 k^y の取引費用

Q_t^y : $q_{th^y j^y k^y}$ を要素とする $H^y J^y K^y$ 次元ベクトル

$\rho_{j^y k^y}^2$: 期間 t での $j^y k^y$ 間の輸送における物流業者 h^y の運賃

式(21)は、期間 t での在庫量と上下流の取引量との関係を表している。

c) 小売業者の行動

卸売業者と同様に、小売業者 k^y の行動は、以下のように定式化できる。

$$\text{Max} \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^L \rho_{ik^y l}^{3*} \sum_{h^y=1}^{H^y} q_{th^y k^y l} - \sum_{t=1}^T c_{ik^y}(Q_t^y) - \sum_{t=1}^T g_{ik^y}(Q_t^y, O_{t-1}^y) - \sum_{t=1}^T s_{ik^y}(O_t^y) - \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^L c_{ik^y l}(Q_t^y) \quad (23)$$

$$- \sum_{t=1}^T \sum_{h^y=1}^{H^y} \sum_{l=1}^L \rho_{ik^y l}^{3*} q_{th^y k^y l} - \sum_{t=1}^T \sum_{j^y=1}^{J^y} \rho_{j^y k^y}^{2*} \sum_{h^y=1}^{H^y} q_{th^y j^y k^y}$$

$$\text{subject to} \quad o_{(t-1)k^y} + \sum_{h^y=1}^{H^y} \sum_{j^y=1}^{J^y} q_{th^y j^y k^y} \geq \sum_{h^y=1}^{H^y} \sum_{l=1}^L q_{th^y k^y l} + o_{ik^y} \quad (24)$$

$$q_{th^y j^y k^y} \geq 0 \quad \forall t, h^y, j^y, \quad q_{th^y k^y l} \geq 0 \quad \forall t, h^y, l, \quad o_{ik^y} \geq 0 \quad \forall t \quad (25)$$

ここに、

$\rho_{ik^y l}^3$: 期間 t での小売業者 k^y の消費市場 l への販売価格

$q_{th^y k^y l}$: 期間 t における $k^y l$ 間での物流業者 h^y の輸送量 (t, h^y, l で識別した商品の取引量に相当する)

$c_{ik^y}(Q_t^y)$: 期間 t での小売業者 k^y の保管費用

$g_{ik^y}(Q_t^y, O_{t-1}^y)$: 期間 t での小売業者 k^y の施設費用

o_{ik^y} : 小売業者 k^y の期間 t から期間 $t+1$ に持ちこす在庫量 ($o_{0k^y} = 0$)

O_t^y : o_{ik^y} を要素とする K^y 次元ベクトル

$s_{ik^y}(O_t^y)$: 期間 t での小売業者 k^y の在庫費用

$c_{ik^y l}(Q_t^y)$: 期間 t での小売業者 k^y と消費市場 l の取引費用

Q_t^y : $q_{th^y k^y l}$ を要素とする $H^y K^y L$ 次元ベクトル

$\rho_{ik^y l}^3$: 期間 t での $k^y l$ 間の輸送における物流業者 h^y の運賃

d) スーパーネットワーク全体の均衡条件

TN上の経路選択は物流業者と旅客（乗用車交通）が行い、物流業者の意思決定は期間 t に影響されるものとする。このとき、物流業者の最適性条件、および、消費市場や旅客（乗用車交通）の均衡条件は、既存のSC-T-SNEモデル²⁰と同様に表現できる。スーパーネットワーク全体の均衡状態においては、各主体の最適性条件、および、均衡条件が同時に満たされる。この均衡条件式を解くことにより、製造業者—卸売業者間、卸売業者—小売業者間、小売業者—消費市場間の商品取引量（および、生産量、輸送量）、消費市場での商品価格、TN上での経路交通量、経路所要時間などが、各期間について算出される。使用する関数に適当な仮定を設ければ、これら算定量は一意に求まり、Meng *et al.*²⁸の推奨する方法で求解できる。

3. おわりに

本研究では、既存のSCNEモデル、および、SC-T-SNEモデルを拡張し、多階層に渡る原材料業者の行動を考慮したSCNEモデル、および、多期間SC-T-SNEモデルを提案した。これら両モデルについて、既存のSCNEモデルおよびSC-T-SNEモデルとの定式化における相違点を示し、解の定性的性質や解法について簡潔に述べた。

本稿では、両モデルの概略を示したに過ぎない。講演時には、これらのモデルを用いたケーススタディについて説明し、その問題設定や計算結果についても発表する予定である。

参考文献

- 1) 山田忠史：物流・ロジスティクスの眺め方—サプライチェーン指向の必要性—, 交通工学, Vol.41, pp.7-10, 2006.
- 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) Dong, J., Zhang, D. and Nagurney, A.: A supply chain network equilibrium model with random demands, *European Journal of Operational Research*, Vol.156, pp.194-212, 2004.
- 4) 山田忠史, 繁田健, 今井康治, 谷口栄一：在庫費用を考慮したサプライチェーンネットワーク均衡モデル：消費需要の不確実性に伴う物資流動量とネットワーク効率性の変化, 土木学会論文集 D, Vol.66, No.3, pp.359-368, 2010.
- 5) Nagurney, A., Cruz, J., Dong, J. and Zhang, D.: Supply chain networks, electronic commerce, and supply side and demand side risk, *European Journal of Operational Research*, Vol.164, pp.120-142, 2005.
- 6) 田辺建二, 山田忠史, 谷口栄一：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評価に関する基礎的研究, 土木計画学研

- 究・論文集, Vol.25, No.2, pp.431-439, 2008.
- 7) Zhao, L. and Nagurney, A.: A network equilibrium framework for Internet advertising: Models, qualitative analysis, and algorithm, *European Journal of Operational Research*, Vol.187, pp.456-472, 2008.
- 8) Nagurney, A. and Toyasaki, F.: Reverse supply chain management and electronic waste recycling: a multitiered network equilibrium framework for e-cycling, *Transportation Research Part E*, Vol.41, pp.1-28, 2005.
- 9) Hammond, D. and Beullens, P.: Closed-loop supply chain network equilibrium under legislation, *European Journal of Operational Research*, Vol.183, pp.895-908, 2007.
- 10) Yang, G., Wang, Z. and Li, X.: The optimization of the closed-loop supply chain network, *Transportation Research Part E*, Vol.45, pp.16-28, 2009.
- 11) Cruz, J.M.: Dynamics of supply chain networks with corporate social responsibility through integrated environmental decision-making, *European Journal of Operational Research*, Vol.184, pp.1005-1031, 2008.
- 12) Cruz, J.M. and Matsypura, D.: Supply chain networks with corporate social responsibility through integrated environmental decision-making, *International Journal of Production Research*, Vol.47, pp.621-648, 2009.
- 13) Meng, Q., Huang, Y. and Cheu, R.L.: Competitive facility location on decentralized supply chains, *European Journal of Operational Research*, Vol.196, pp.487-499, 2009.
- 14) Hamdouch, Y.: Multi-period supply chain network equilibrium with capacity constraints and purchasing strategies, *Transportation Research Part C*, Vol.19, pp.803-820, 2011.
- 15) 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.
- 16) Nagurney, A.: Supply chain network design under profit maximization and oligopolistic competition, *Transportation Research Part E*, Vol.46, pp.281-294, 2010.
- 17) Rezapour, S. and Farahani, R.Z.: Strategic design of competing centralized supply chain networks for markets with deterministic demand, *Advances in Engineering Software*, pp.810-822, 2010.
- 18) Nagurney, A. & Yu, M.: Sustainable fashion supply chain management under oligopolistic competition and brand differentiation, *International Journal of Production Economics*, Vol.135, pp.532-540, 2012.
- 19) 山田忠史, 中村昂雅, 谷口栄一：商物分離型サプライチェーンネットワーク均衡モデル：異なるネットワーク形態の比較分析, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.67, No.5, pp.I_801-I_811, 2011.
- 20) Yamada, T., Imai, K., Nakamura, T. and Taniguchi, E.: A supply chain-transport supernetwork equilibrium model with the behaviour of freight carriers, *Transportation Research Part E*, Vol.47, pp.887-907, 2011.
- 21) Stevens, G.: Integrating the supply chain, *International Journal of Physical Distribution and Materials Management*, Vol. 19, pp.3-8, 1989.
- 22) 例えば, Handfield, R.B. and Nichols Jr., E.L.: *Introduction to Supply Chain Management* (2nd ed), Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2008.
- 23) 例えば, 長谷川雅行：物流業から見た「災害とロジスティクス」(前編), ロジスティクス・レビュー, Vol.222, 2011.

- 24) 例えば, 長谷川雅行: 物流業から見た「災害とロジスティクス」(後編), ロジスティクス・レビュー, Vol.223, 2011.
- 25) Yang, G., Wang, Z. and Li, X.: The optimization of the closed-loop supply chain network, *Transportation Research Part E*, Vol.45, pp.16-28, 2009.
- 26) Cruz, J.M. and Liu, Z.: Modeling and analysis of the multiperiod effects of social relationship on supply chain networks, *European Journal of Operational Research*, Vol.214, pp.39-52, 2011.
- 27) Daniele, P.: Evolutionary variational inequalities and applications to complex dynamic multi-level models, *Transportation Research Part E*, Vol.46, pp.855-880, 2010.
- 28) Meng, Q., Huang, Y. and Cheu, R.L.: A note on supply chain network equilibrium models, *Transportation Research Part E*, Vol.43, pp.60-71, 2007.