

サプライチェーンネットワークのモデリング

山田 忠史

正会員 京都大学経営管理大学院 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C-1)

E-mail: yamada.tadashi.2x@kyoto-u.ac.jp

サプライチェーンネットワーク(SCN)は、生産から消費に至るまでの、活動主体と商品の連鎖を示したネットワークである。本論文では、複数主体（製造業者、卸売業者、小売業者、消費市場（消費者）、物流業者）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、多段階の SCN 全体で生じる現象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モデルを中心に、その発展型である i) SCN と交通ネットワークを包含したスーパーネットワーク均衡モデル、ii) 原材料の調達過程を考慮したモデルを概説する。また、その応用型である iii) SCN を考慮した交通ネットワークの離散型最適化、iv)期待残差最小化法を用いた不確実性下での SCN 最適設計モデルについても紹介する。

Key Words: multi-tiered supply chain, network equilibrium, optimization, PSO

1. サプライチェーン

サプライチェーンは、生産から消費に至るまでの、多段階に渡る商品や物資の一連の流れ、および、それに関わる主体の連鎖である。サプライチェーン上では、調達、生産、販売、消費（ときに、廃棄やリサイクルも含む）に関わる複数の主体が、上流から下流へと、ときに下流からリサイクルやリユースの形で上流へと結合して、ネットワークを構成する。このようなネットワークのことを、サプライチェーンネットワーク (supply chain network: SCN) と呼ぶ。

SCN を最適に、あるいは、効率的に形成することが、サプライチェーンマネジメント (supply chain management: SCM) である。20 世紀初頭に、Shaw¹⁾が、物流（物的流通）の重要性を述べて以降、1950 年代に物流の概念がロジスティクスへと発展し、1982 年に Oliver and Webber²⁾が SCM を定義した。SCM はその後、全体最適化の強調を経て、企業の重要な長期的戦略の一つ³⁾となっている。つまり、物流がロジスティクスへ、ロジスティクスが SCM へと拡張・発展してきた。それに伴い、貨物交通のモデリングも、トリップベース (trip-based, vehicle-based, truck-based, および、tour-chaining, tour-based, tour-chaining も含む) や貨物ベース (commodity-based) のモデルから、ロジスティクスネットワークベース (logistics-network-based) やサプライチェーンネットワークベース (supply chain-network-based) のモデルへと進化しつつあり⁴⁾、その取り組み事例も増えつつある^{4b)}。

サプライチェーンに関する研究は、生産、流通、交通、マーケティングなど、多くの学問領域において行われてきた。しかし、サプライチェーンに関連するモデリング研究の大半は、SCN 上の単一主体（単一の企業、あるいは、企業体）の意思決定、すなわち、生産、在庫、施設配置、スケジューリング、輸配送に関する最適化である^{5a)}。一方で、複数主体（複数の企業、あるいは、企業体）が活動する SCN 全体で生じる現象を包括的に記述するための方法論の研究については、ほとんど行われていない。SCN 全体の挙動、すなわち、SCN 上の商品取引量（および、生産量）や商品価格などを記述するための手法として、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 モデルの役割は、多段階の SCN 全体で生じる現象を記述して、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である。このことは、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。

2. サプライチェーンネットワーク均衡

(1) 既往の研究と基本モデル

SCNE モデルは、Nagurney *et al.*⁶⁾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）や価格などが算定される。SCNE モデルは以降、需要の不確実性⁹⁾¹²⁾、電子商取引¹³⁾¹⁵⁾、商物分離¹⁶⁾、リバーサブプライチェーン¹²⁾¹⁷⁾²⁰⁾、企業の社会的責任²¹⁾²²⁾、生産容量²³⁾²⁴⁾、原材料業者の行動¹²⁾¹⁹⁾²⁰⁾²⁵⁾²⁶⁾、SCN 間の競合性¹¹⁾²⁷⁾³¹⁾、多期間化²⁴⁾²⁵⁾³²⁾³⁴⁾、MPEC への拡張²³⁾³⁵⁾³⁷⁾、物流業者の行動³⁷⁾⁴⁰⁾、金融リスク⁴¹⁾、交通ネットワークモデルとの統合³⁷⁾³⁹⁾、アウトソーシング¹¹⁾⁴²⁾、複数商品³¹⁾³⁶⁾³⁹⁾を考慮したモデルへと拡張されてきている。

図-1は、単一商品の場合におけるモデル化の対象となるSCN の例である³⁹⁾。寡占的で単一の流通段階を有するSCNを想定し、製造業者、卸売業者、小売業者、消費者（消費市場）、物流業者の5主体がSCN上で行動する。各主体には複数の業者、すなわち、 I 個の製造業者、 J 個の卸売業者、 K 個の小売業者、 L 個の消費市場、 H 個の物流業者が存在する。流通段階の各層において業者は競争的であるとする。図-1のリンクは、商品の取引および輸送を表す。輸送は物流業者に担われるので、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。

SCNEモデルにおいて、5主体の行動は、製造業者、卸売業者、小売業者、物流業者については利潤最大化で、消費市場については価格と購入量の均衡条件で表される（定式化の詳細、解の定性的性質や解法については、文献16)や38)を参照されたい）。製造業者の利潤は、卸売業者への商品の売上から、生産費用、取引費用、施設費用、運賃を減じたものである。卸売業者の利潤は、小売り業者への商品の売上から、保管費用、取引費用、施設費用、運賃、製造業者からの商品購入費用を減ずることによって求まる。同様に、消費市場への商品の売上から、保管費用、取引費用、施設費用、運賃、卸売業者からの商品購入費用を減ずれば、小売業者の利潤が求められる。物流業者の利潤は、商品の輸送の売上から、施設費用と運行費用を減じたものになる。

SCN全体の均衡条件は、個々の主体の最適性条件（消費市場は均衡条件）が同時に成立することである。SCN全体の均衡条件におけるベクトル値関数を F 、決定

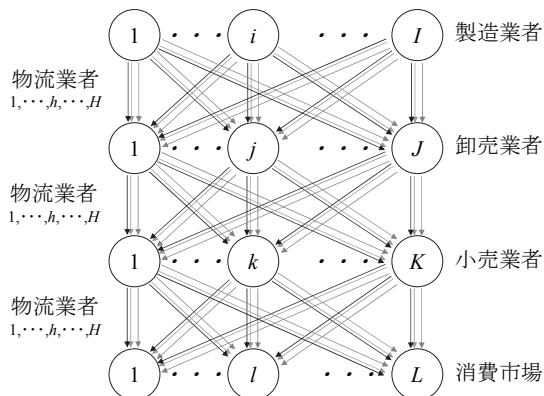


図-1 モデル化の対象とするSCN（単一商品、5主体）

変数のベクトルを Z 、実行可能空間を K とすると、SCN全体の均衡条件は、

$$F(Z^*) \times [Z - Z^*] \geq 0, \quad \forall Z \in K \quad (1)$$

と表される。ここに、“ $*$ ”は均衡解を意味する。

$Z = (Q^1, Q^2, Q^3, \gamma, \delta, \rho^4)$ である。 Q^1 は q_{hij} を要素とする HJL 次元ベクトルであり、 q_{hij} は物流業者 h が輸送する ij 間の商品取引量である。 Q^2 は q_{hjk} を要素とする HJK 次元ベクトルであり、 q_{hjk} は物流業者 h が輸送する jk 間の商品取引量である。同様に、 Q^3 は q_{hkl} を要素とする HKL 次元ベクトルであり、 q_{hkl} は物流業者 h が輸送する kl 間の商品取引量である。 γ と δ は、卸売業者と小売業者のそれぞれの制約条件に伴うラグランジェ乗数であり、 γ は J 次元列ベクトル、 δ は K 次元列ベクトルである。 ρ^4 は ρ_l^4 を要素とする L 次元ベクトルであり、 ρ_l^4 は消費市場 l での商品の市場価格を表す。各主体間の取引価格や運賃は、決定変数が求まった後に導出される。

(2) 複数商品とスーパーネットワーク

複数の商品を対象とする場合、SCNは図-2のように表すことができる。 Y 種類の商品のサプライチェーンが、各々ネットワーク構造を有する（すなわち、 Y 個のSCNが存在する）。各SCNは商品 y ($y=1, \dots, Y$) を供給し、商品 y のSCN上には、 I^y 個の製造業者、 J^y 個の卸売業者、 K^y 個の小売業者、 H^y 個の物流業者が存在し、 L 個の消費市場

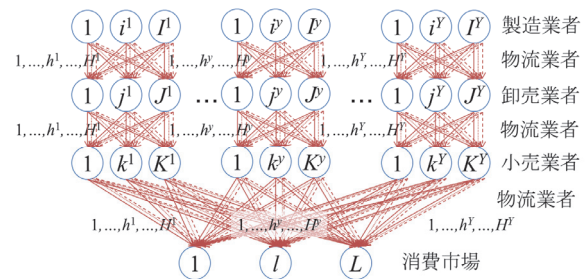


図-2 モデル化の対象とするSCN（複数商品、5主体）

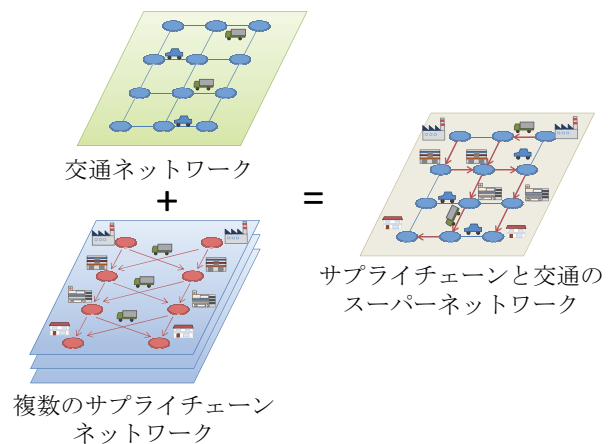


図-3 サプライチェーンと交通のスーパーネットワーク

でY種類の商品が消費される． P, J, K, H は商品ごとに異なる業者とし，それぞれが独立して意思決定を行うものとする．いずれのSCNも，複数層からなる単一の流通段階を有しており，流通段階の各層において業者は競争的であるとする．

商品の移動そのものは交通ネットワーク (transport network: TN)上で行われるので，SCNとTNには相互作用が生じる可能性があり，SCN上の各主体の行動とTN上の交通状態が相互に影響しあうことがある．特に，複数商品を対象とする場合には，TN上で明示的に表現される貨物交通量が大きくなるので，その可能性が高まる．SCNとTNの相互作用を考慮した，SCNEモデルの拡張モデルが，SC-T-SNE(supply chain-transport supernetwork equilibrium: SC-T-SNE)モデル³⁹⁾ (マルチモーダルTNを扱ったモデルはSC-MT-SNEモデル³⁷⁾) である．このモデルは，SCNとTNを統合したスーパーネットワーク (図-3) 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モデルである．SC-T-SNEモデルは，物流業者の行動記述を介して，道路ネットワーク上の交通状態がSCN上の各主体の行動に及ぼす影響，および，その逆を検討可能とする．旅客の行動は需要変動型利用者均衡に従うと仮定し，物流業者の利潤が，TN上の旅客交通の交通量にも影響される．旅客の経路所要時間には，貨物の経路交通量が影響を及ぼす．逆に，SCN上の商品の取引量（生産量，輸送量）には，旅客の交通量が影響を及ぼす．これにより，双方のネットワークの相互影響が表現される．スーパーネットワーク全体の均衡条件は，式(1)と同様に表現されるが，SC-T-SNEの場合，決定変数ベクトルZは $Z = (Q^1, Q^2, Q^3, \tilde{Q}^1, \tilde{Q}^2, \tilde{Q}^3, \gamma, \delta, \rho^4, X, c_{rs})$ となる．ここに， $\tilde{Q}^1$ は $q_{h^y i^y j^y}^{p^1 y}$ を要素とする $\tilde{S}^1 (= \sum_{y=1}^Y (H^y I^y J^y e^{1 y}))$ 次元ベクトル ($e^{1 y}$ は $p^{1 y}$ の次元) であり， $q_{h^y i^y j^y}^{p^1 y}$ は物流業者 h^y がTN上の経路 $p^{1 y}$ を通して輸送する $i^y j^y$ 間の商品取引量である． $\tilde{Q}^2$ は $q_{h^y j^y k^y}^{p^2 y}$ を要素とする $\tilde{S}^2 (= \sum_{y=1}^Y (H^y J^y K^y e^{2 y}))$ 次元ベクトル ($e^{2 y}$ は $p^{2 y}$ の次元) であり， $q_{h^y j^y k^y}^{p^2 y}$ は物流業者 h^y がTN上の経路 $p^{2 y}$ を通して輸送する $j^y k^y$ 間の商品取引量である． $\tilde{Q}^3$ は $q_{h^y k^y l^y}^{p^3 y}$ を要素とする $\tilde{S}^3 (= \sum_{y=1}^Y (H^y K^y L^y e^{3 y}))$ 次元ベクトル ($e^{3 y}$ は $p^{3 y}$ の次元) であり， $q_{h^y k^y l^y}^{p^3 y}$ は物流業者 h^y がTN上の経路 $p^{3 y}$ を通して輸送する $k^y l^y$ 間の商品取引量である． X は $x_{rs}^{p_{rs}}$ を要素とする $e^r e^s e^5$ 次元ベクトル ($e^r e^s e^5$ はそれぞれ，起点，終点，ODペア rs 間の経路 p_{rs} の次元) であり， $x_{rs}^{p_{rs}}$ は rs 間の経路 p_{rs} の交通量である．また， c_{rs} は rs 間の旅客の移動費用である．なお，SC-T-SNEモデルが考慮する相互作用は，SCN上の商品とTN上の旅客がそれぞれ異なる目的でTNを利用する際に発生する相互作用であり，SCN上の商品を購買する旅客流との相互作用は扱われていない．

(3) 原材料業者の行動の考慮

東日本大震災では，SCN上の原材料（本論文では，製品（最終財）と対比させるために，部品，資材や半製品（中間財）などを含む広義の原料と材料を原材料と称する）の調達リンクが寸断され，被災地以外の企業の生産にも大きな影響を与えた．複雑なSCNを介する震災の影響の大きさは，これまで十分に把握されておらず，事業継続計画(business continuity plan: BCP)の必要性が再認識されている．これらのことから，原材料の調達過程も視野に入れて，平常時や災害時のSCMを検討することが，今後いつそう盛んになるものと考えられる．そのためには，SCN上での原材料や製品の流動，および，活動主体の行動を包括的に記述する手法が必要である．

製品のみを対象としたSCNEモデルを拡張することにより，原材料と製品の双方を考慮したモデル化が可能である²⁰⁾．具体的には，図-1（あるいは，図-2）のSCNにおいて，製造業者より上流に複数階層の原材料業者のネットワークを付加する．原材料業者の行動を考慮したSCN全体の均衡条件は，式(1)と同様に書くことができるが，決定変数ベクトルZの中に，前述の商品取引量やラグランジュ乗数に加えて，物流業者 h が輸送する各層の原材料業者間での各次原材料の取引量，物流業者 h が輸送する一次原材料業者と製造業者間の一次原材料の取引量，および，各次原材料業者の制約条件に伴うラグランジュ乗数が含まれる．さらに，原材料業者の行動を考慮したSCNEモデルでは，上流から下流への原材料の変形，および，原材料から製品への変形を考慮するために，生産関数（CES関数）が用いられる．

3. SCNEを活用した最適化

(1) ネットワーク設計モデル

SCNE の拡張研究の中には，SCN 上で生じる現象をSCNE モデルで記述し，その制約下で意思決定者の目的を最適化する研究も見られる²³⁾³⁵⁾³⁷⁾．いずれの研究も，均衡制約付き数理計画問題(mathematical programmes with equilibrium constraints: MPEC)を採用し，上位レベルが組み合わせ最適化，下位レベルがSCNEに相当する．下位レベルがパラメータ付きの変分不等式になることから，上位レベルの解法には，近似解法が用いられている．

制約条件にSC-T-SNEを採用すれば，TN上で生じる現象を明示的に考慮することもできる．例えば，SCNとTNに相互作用が生じる場合を想定し，図-4に示すような枠組みで，TNの離散最適化が可能である³⁶⁾³⁷⁾．上位レベルを最適なリンクの組み合わせを決定する問題とし，下位レベルにSC-MT-SNE（あるいは，SC-T-SNE）を組み込んだ問題は，離散型ネットワーク設計問題(discrete network design problem: DNDP)の一種に相当し，

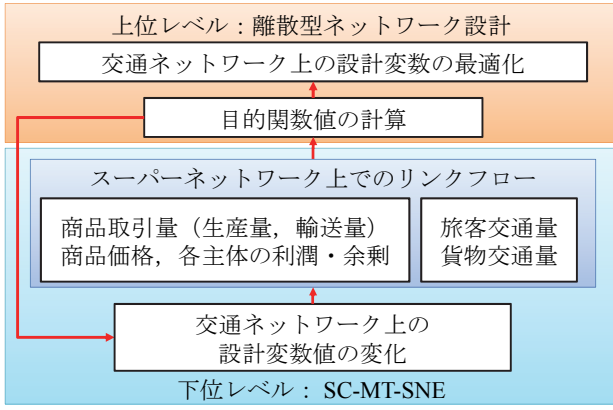


図-4 MPECモデルの全体構造

SCN 上の現象とマルチモーダル TN 上での交通状態の相互作用を考慮した上で、TN を最適に設計することに寄与する。

DNDP の場合には、上位レベルの目的関数には、例えば、TN 上のリンクの新設・改良が SCN にもたらす効果などが考えられる。一方、災害時を見据えた場合、SCN 上の活動を継続させる上で重要なリンクを事前に抽出しておき、災害に対して強靱であるように、何らかの対策を講じておくことが望ましい。SCN 指向の TN の強靱化に供するために、TN 上のリンクの途絶が SCN の余剰低下を最大にするようなリンクの抽出も可能である。この場合は、SCN の観点から見た、TN の脆弱性解析⁴³⁾⁴⁴⁾やネットワーク停止問題(network interdiction problem: NIP)⁴⁵⁾の一種に相当する。

図-4に示すような構造のとき、 u をTN上の設計変数ベクトル（リンクの組み合わせ）とすると、この問題は、以下のように定式化される。

$$\text{Max}_u P(u, Z^*) \quad (2)$$

$$\text{subject to } F(u, Z^*) \times [Z - Z^*] \geq 0, \quad \forall u, Z \in K \quad (3)$$

上位問題の近似解法には、メタヒューリスティクスが使われることが増えてきている。筆者らの研究³⁶⁾³⁷⁾⁴⁶⁾でも、遺伝的局所探索法(genetic local search: GLS)を適用したり、確率的離散型粒子群最適化法(cooperative version of modified probability-based discrete binary particle swarm optimisation: CMPBPSPSO)を開発してきた。

粒子群最適化法(図-5)は、鳥、魚、昆虫などの採餌行動にヒントを得た手法であり、各個体が単純なルール、すなわち、自らの速度ベクトルを基にして最適点を探す一方で、ある個体が良解に辿り着いたときに、社会認識として、群れ全体がそれに倣う事ができる(自己組織化, self-organization)。それにより、群れとしても最適点を探索する(群知能, swarm intelligence)。各個体と群れとが相互に影響しあいながらより良い解にたどり着く。各個体の行動を命令する集中制御構造は存在しないが、個

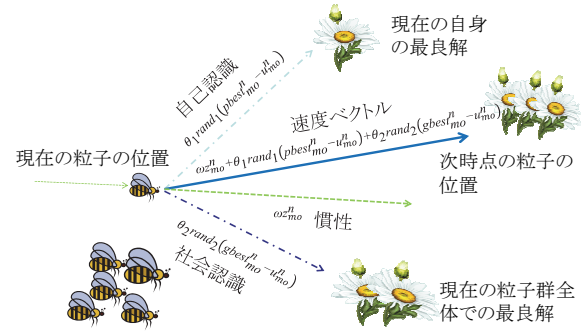


図-5 粒子群最適化法(PSO)

体間の局所相互作用が、ときに群れの高度な振る舞いを創発する。図-5 に示すように、粒子群最適化法は、ネットワークを陽に扱うものではないが、自己組織化、群知能、創発などの複雑システムとしての特性は、ネットワーク科学に相通ずるものがある。

(2) 不確実性下での最適化

生産費用、保管費用、輸送費用などに不確実性があるとき、それらのばらつきを表す確率変数ベクトルを ω とすると、式(1)の最適性条件は、以下ようになる。

$$F(X^*, \omega) \times [X - X^*] \geq 0, \quad \forall X \in K \quad (4)$$

X が非負であるので、式(4)は以下の確率的相補性問題に変換できる。

$$F(X^*, \omega) \geq 0, X^* \geq 0, F(X^*, \omega) X^{*T} = 0 \quad (5)$$

この問題に対して、NCP 関数は、

$$\phi_n(F_n(X^*, \omega), X_n^*) = 0 \Leftrightarrow \quad (6)$$

$$F_n(X^*, \omega) \geq 0, X_n^* \geq 0, F_n(X^*, \omega) X_n^{*T} = 0$$

であるから、min 関数、

$$\phi_n(F_n(X^*, \omega), X_n^*) = \min(F_n(X^*, \omega), X_n^*) \quad (7)$$

を用いれば、式(5)は次の連立方程式にて等価に表すことができる。

$$\Phi(X^*, \omega) := \begin{bmatrix} \phi_1(F_1(X^*, \omega), X_1^*) \\ \vdots \\ \phi_n(F_n(X^*, \omega), X_n^*) \\ \vdots \\ \phi_N(F_N(X^*, \omega), X_N^*) \end{bmatrix} = 0 \quad (8)$$

確率的相補性問題において、全ての ω に対して式(8)を満たす解 X^* 、すなわち、SCN 全体の均衡解は、一般に存在しない。

確率的相補性問題の解法として、期待残差最小化(Expected Residual Minimization: ERM)法が提案されている。ERM 法は式(8)の期待残差を最小にするような X を求める解法であり、

$$\text{Min}_X E[\|\Phi(X, \omega)\|^2] \quad (9)$$

$$\text{subject to } X \in K \quad (10)$$

と表せる。ERM 法は、均衡状態との残差を最小化するので、得られた解は、「確率変数のどの値が生起したとしても、均衡状態からの乖離が最小になる解」である。よって、ERM 法で求まる解は、式(4)が満足されるものではないので、各主体の独立な意思決定の基で到達する解ではない。換言すれば、主体間の協力や何らかの外力がなければ、ERM 法による解が表す状態には到達しない。したがって、ERM 法を用いて求解することは、SCN 上で生じる現象を記述するのではなく、SCN の最適状態を示すことになる。

SCNE モデルでは、SCN 全体の均衡条件式は、SCN 上の総余剰最大化問題の最適性条件と同じである。よって、均衡状態において総余剰が最大となるため、均衡状態からの乖離が最小であれば、総余剰最大の状態からの乖離が最小ということになる。ERM 法により得られた解は、「確率変数のどの値が生起したとしても、総余剰最大の状態からの乖離が最小」であり、「総余剰の観点から不確実性に対して最も頑健な SCN」であると解釈できる。

謝辞：本研究の一部は JSPS 科研費 15K06251 の助成を受けたものである。

参考文献

- Shaw, A.W. : Some problems in market distribution, *The Quarterly Journal of Economics* (August), pp.703-765, 1912.
- Oliver, R.K. and Webber, M.D.: Supply chain management - Logistics catches up with strategy -, In M. Christopher Ed., *Logistics: The Strategic Issues*, Chapman & Hall, UK, 1982.
- Mentzer, J., de Witt, W., Keebler, J., Min, S., Nix, N. and Smith, C.: Defining supply chain management, *Journal of Business Logistics*, Vol.22(2), pp.1-25, 2001.
- Tavasszy, L.A., Ruijgrok, K. and Davydenko, I.: Incorporating logistics in freight transport demand models: State-of-the-art and research opportunities, *Transport Reviews*, Vol.32(2), pp.203-219, 2012.
- Chow, J.Y.J., Yang, C.H. and Regan, A.C.: State-of-the-art of freight forecast modeling: Lessons learned and the road ahead, *Transportation*, Vol.37, pp.1011-1030, 2010.
- 久保幹雄：ロジスティクス工学，朝倉書店，2001.
- Almeder, C., Preusser, M. and Hartl, R.F.: Simulation and optimization of supply chains: alternative or complementary approaches?, *OR Spectrum*, pp.1-25, 2008.
- Nagurney, A., Dong, J. and Zhang, D.: A supply chain network equilibrium model, *Transportation Research Part E*, Vol.38, pp.281-303, 2002.
- 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.
- 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.
- Liu, Z. and Nagurney, A.: Supply chain networks with global outsourcing and quick-response production under demand and cost uncertainty, *Annals of Operations Research*, Vol.208, pp.251-289, 2013.
- Qiang, Q., Ke, K., Anderson, T. and Dong, J.: The closed-loop supply chain network with competition, distribution channel investment, and uncertainties, *Omega*, Vol.41(2), 186-194, 2013.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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)*，Vo.67，No.5，pp.1_801-1_811，2011.
- 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.
- Hammond, D. and Beullens, P.: Closed-loop supply chain network equilibrium under legislation, *European Journal of Operational Research*, Vol.183, pp.895-908, 2007.
- 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.
- Toyasaki, F., Daniele P. and Wakolbinger, T.: A variational inequality formulation of equilibrium models for end-of-life products with nonlinear constraints, *European Journal of Operational Research*, Vol.236, pp.340-350, 2014.
- 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.
- 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.
- 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.
- Hamdouch, Y.: Multi-period supply chain network equilibrium with capacity constraints and purchasing strategies, *Transportation Research Part C*, Vol.19, pp.803-820, 2011.

- 25) 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.
- 26) 山田 忠史, 里内 俊介: 多階層の原材料の調達過程を考慮したサプライチェーンネットワーク均衡モデル, *土木学会論文集 D3 (土木計画学)*, Vol.71, No.2, pp.57-69, 2015.
- 27) Nagurney, A.: Supply chain network design under profit maximization and oligopolistic competition, *Transportation Research Part E*, Vol.46, pp.281-294, 2010.
- 28) 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.
- 29) Nagurney, A. and Yu, M.: Sustainable fashion supply chain management under oligopolistic competition and brand differentiation, *International Journal of Production Economics*, Vol.135, pp.532-540, 2012.
- 30) Miao, S., Ding, S. and Teng, C.: Optimization of manufacturing supply chain under across-chain competition, *Information Technology Journal*, Vol.12, pp.742-748, 2013.
- 31) Nagurney, A., Yu, M. and Floden, J.: Supply chain network sustainability under competition and frequencies of activities from production to distribution, *Computational Management Science*, Vol.10, pp.397-422, 2013.
- 32) Daniele, P.: Evolutionary variational inequalities and applications to complex dynamic multi-level models, *Transportation Research Part E*, Vol.46, pp.855-880, 2010.
- 33) Liu, Z. and Nagurney, A.: Multiperiod competitive supply chain networks with inventorying and a transportation network equilibrium reformulation, *Optimization and Engineering*, Vol.13(3), pp.471-503, 2012.
- 34) Yang, P., Qin, J., and Zhou, W.: Multi-commodity flow and multi-period equilibrium model of supply chain network with postponement strategy, *Journal of Networks*, Vol.8(2), pp.389-396, 2013.
- 35) Chiou, S.W.: A non-smooth optimization model for a two-tiered supply chain network, *Information Sciences*, Vol.177, pp.5754- 5762, 2007.
- 36) 山田忠史, 中村昂雅, 横山大河, 谷口栄一: サプライチェーンを考慮した交通ネットワークの離散型最適化: 最適設計と脆弱性評価, *土木学会論文集 D3 (土木計画学)*, Vol.68, No.4, pp.272-284, 2012.
- 37) Yamada, T. and Febri, Z.: Freight transport network design using particle swarm optimisation in supply chain-transport supernetwork equilibrium, *Transportation Research Part E*, Vol.75, pp.164-187, 2015.
- 38) 山田忠史, 今井康治: 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.
- 39) 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.
- 40) Nagurney, A., Saberi, S., Shukla, S. and Floden, J.: Supply chain network competition in price and quality with multiple manufacturers and freight service providers, *Transportation Research Part E*, Vol.77, pp.248-267, 2015.
- 41) Liu, Z. and Cruz, J.M.: Supply chain networks with corporate financial risks and trade credits under economic uncertainty, *International Journal of Production Economics*, Vol.137, pp.55-67, 2012.
- 42) Nagurney, A., Li, D. and Nagurney, L.S.: Pharmaceutical supply chain networks with outsourcing under price and quality competition, *International Transactions in Operations Research*, Vol.20, pp.859-888, 2013.
- 43) 倉内文孝, 宇野伸宏, 嶋本寛, 山崎浩気: 交通ネットワークサービスの信頼性解析に関する研究動向, *土木計画学研究・講演集*, Vol.35, CD-ROM, 2007.
- 44) Murray, A.T., Matisziw, T.C. and Grubescic, T.H.: A methodological overview of network vulnerability analysis, *Growth and Change*, Vol.39, pp.573-592, 2008.
- 45) Israeli, E. and Wood, R.K.: Shortest-path network interdiction, *Networks*, Vol.40, pp.97-111, 2002.

MODELLING SUPPLY CHAIN NETWORKS

Tadashi YAMADA