

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560639

研究課題名(和文) 緊急物資や商品の頑健で強靱なサプライチェーン形成のためのスーパーネットワーク解析

研究課題名(英文) SUPERNETWORK MODELLING FOR DEVELOPING ROBUST AND RELIABLE SUPPLY CHAIN NETWORKS

## 研究代表者

山田 忠史 (YAMADA, Tadashi)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80268317

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：災害に対して強靱なサプライチェーンネットワーク(SCN)を形成するためには、頑健な交通ネットワークの設計が肝要である。そのためには、これらの異なるネットワーク上で生起する状態を同時に分析できる、スーパーネットワーク指向の手法開発が必要である。本研究は、原材料業者の意思決定を考慮し、マルチモーダルな交通ネットワークを対象とし、SCNや交通ネットワークの時系列的状態変化を明示した、サプライチェーンネットワーク均衡モデル、および、スーパーネットワーク均衡モデルを開発した。また、それらモデルを制約条件とする均衡制約付き最適化モデルを開発し、SCNへの影響が大きい交通ネットワークの途絶箇所を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This study develops supply chain network equilibrium and supply chain-transport supernetwork equilibrium models for investigating resilient transport networks, which help develop robust and reliable supply chain networks. The models can take into account the behaviour of raw material suppliers, multimodal transport network, and dynamic change of conditions in the supernetwork. An optimisation model, within which these equilibrium models are incorporated, is also formulated on the basis of mathematical programming with equilibrium constraints. Numerical tests with these models reveal the critical transport links that significantly influence supply chain performance if disrupted.

研究分野：工学

キーワード：サプライチェーン 交通ネットワーク スーパーネットワーク 均衡制約付き最適化 多期間 脆弱性

### 1. 研究開始当初の背景

甚大な被害をもたらした東日本大震災からも明らかのように、災害時には、道路や鉄道が寸断され、港湾や空港が使用不能に陥り、生産拠点や流通拠点自体も被災するために、商品や物資のサプライチェーンが途絶ないしは機能低下を生じる。商品や物資は、流通的にはサプライチェーンネットワーク (Supply Chain Network: SCN) 上を移動すると同時に、空間的には交通ネットワーク上を移動する。研究代表者が科学研究費補助金「サプライチェーン特性を考慮した貨物輸送ネットワーク解析」(若手研究(B)、平成18~20年度)で明らかにしたように、双方のネットワーク上には密接な相互作用が存在するので、脆弱性を抑制したサプライチェーンを形成するためには、災害による機能低下が小さく、機能が一時的に低下しても回復性に優れたSCNの形成と、それを支える交通ネットワークの設計が肝要である。そのためには、複数の異なるネットワーク上で生起する状態を同時に分析できる、スーパーネットワーク指向の手法開発が必要である。

既往の研究において、SCNとの関連性に言及した交通ネットワークの評価は行われておらず、交通ネットワーク上の交通状態を内包したSCNの途絶リスク研究も見られない。交通ネットワーク上の交通状態とSCN上の各主体の行動(製造業者、卸売業者、小売業者、消費市場、物流業者)の相互関係を記述できる手法は、研究代表者が科学研究費補助金「物流の理解深化と物流施策評価のためのサプライチェーンネットワーク解析」(基盤研究(C)、平成21~23年度)を通じて開発した、SCN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 (Supply Chain-Transport Supernetwork Equilibrium: SC-T-SNE) モデルにおいて他に無い。しかしながら、既存のSC-T-SNEモデルは、平常時の定常状態のみを対象とし、生産以降のSCNのみに着目し、道路ネットワークの利用を前提としているので、一般性が十分ではない。また、SCNへの影響を明示的に考慮したうえで、交通ネットワークの脆弱性や信頼性を検討できるような手法も、これまで開発されていない。

### 2. 研究の目的

SC-T-SNEモデルやSCNE (Supply Chain Network Equilibrium) モデルは、製造業者、卸売業者、小売業者、消費者、物流業者などの行動を記述する手法である。特に、SC-T-SNEモデルは、サプライチェーンと交通の双方を考慮したスーパーネットワーク全体の挙動、すなわち、SCN上の商品や物資の取引量(および、生産量、輸送量)や価格、および、交通ネットワーク上の経路所要時間、リンク交通量、OD交通量などを同時に算定できる。本研究では、原材料業者の意思決定を考慮し、道路交通以外の船舶や鉄道を含むマルチモーダルな交通ネットワークを対象と

し、SCNや交通ネットワークの時系列的状態変化を明示したモデルへと、SC-T-SNEやSCNEを拡張し、手法の一般性を向上させるとともに、SCNや交通ネットワークの復旧・復興過程の記述を目指す。後者については、両ネットワークの「平常 被災 復旧 復興」の動的な状態遷移を明示する。また、SCNへの影響を明示的に考慮したうえで、交通ネットワークの脆弱性や信頼性を検討できるような手法の開発にも努める。

上述の分析を行うためには、SC-T-SNEモデルやSC-T-SNEモデルに使用する関数形やパラメータ、および、モデルから得られた推定値が、現実と整合している必要がある。本研究では、現実のSCNの形態、および、SCN上で発生する費用や商品取引量に関して、国内外の企業へのヒアリング調査、既存の文献や交通・物流調査の結果の精査を通じて、平常時と災害時の現実(実現値)の把握に努めるとともに、実現値とモデルの推定値との整合性を検証する。

SCNへの影響を考慮した交通ネットワークの脆弱性解消に関する知見を得るために、SCN上で生じる現象(SCNEモデル)やサプライチェーンと交通のスーパーネットワーク上で生じる現象(SC-T-SNEモデル)の記述を制約条件とし、交通ネットワークの途絶箇所、ないしは、交通や物流に関する施策の実施の有無や程度を決定するような、均衡制約付き最適化モデルを開発する。

### 3. 研究の方法

上述の目的を遂行するために、以下のような方法を用いた。

- (1) 国内外の企業へのヒアリング調査、国内外の既存の交通・物流調査の結果、関連する文献の精査に基づいて、実際のSCN特性や交通ネットワーク特性を把握する。具体的には、ネットワークの形状、商品や物資の取引量、費用、事業継続計画、交通量、所要時間などを確認する。これらのデータは、構築したモデルの妥当性検証や、モデルを用いたケーススタディに利用する。
- (2) 科学研究費補助金「物流の理解深化と物流施策評価のためのサプライチェーンネットワーク解析(基盤研究(C)、平成21~23年度)」を通じて構築したSC-T-SNEモデルやSCNEモデルを、原材料業者の行動を考慮するモデルへ、さらには、道路以外の船舶や鉄道の利用も考慮可能なマルチモーダルなモデルへと拡張する。
- (3) 被災の影響、および、被災からの回復力を検討するために、動的な環境変化や状態遷移が考慮可能な多期間型のSCNEモデルやSC-T-SNEモデルを開発する。これにより、「平常 被災 復旧 復興」のサイクルが考慮されるとともに、SCNおよび交通ネットワーク上の状

- 態の時系列的変化が算定可能となる。
- (4) 実際の SCN や交通ネットワークでの実現値と構築したモデルから得られた推定値との整合性を検討し、設定困難な関数形やパラメータ値のモデル内調整も視野に入れながら、記述モデルとしての性能を検証する。モデルの開発や性能検証に際しては、企業へのヒアリング調査や、SCN や交通ネットワークについて調査・研究した文献、および、これまでに実施されてきた交通・物流調査の結果も利用する。
  - (5) SC-T-SNE や SCNE を制約条件とし、交通ネットワークの途絶箇所、ないしは、物流や交通に関する施策実施の有無や実施の程度を決定するような、均衡制約付き最適化モデルを開発する。このモデルは、計算負荷の大きい離散的な組み合わせ最適化問題となることから、効率的な解法、すなわち、解の精度に優れていて、かつ、計算時間を抑制できるような近似解法も提案する。
  - (6) 構築した均衡制約付き最適化モデルを用いてケーススタディを行い、交通ネットワークの脆弱性について、SCN への影響の観点から知見を得る。

#### 4. 研究成果

はじめに、企業へのヒアリング調査、既存の調査結果や関連文献の精査に基づいて、実際の SCN 特性や交通ネットワーク特性を調べた。これらの調査結果や既存文献から得られた知見を利用して、以下のような数理モデルを構築した。

- ・ 製造業者、卸売業者、小売業者、消費者、物流業者、原材料業者の行動を記述する SCNE モデル (すなわち、SCNE モデル)
- ・ SCN や交通ネットワークの時系列的状態変化が考慮可能な多期間型の SCNE モデル (すなわち、多期間 SCNE モデル)
- ・ 時系列的状態変化が考慮可能で、製造業者、卸売業者、小売業者、消費者、物流業者、交通ネットワーク利用者の行動を記述する多期間型の SC-T-SNE モデル (すなわち、多期間 SC-T-SNE モデル)
- ・ 道路以外の船舶や鉄道の利用も考慮したマルチモーダル交通ネットワークを内包した SC-T-SNE モデル (すなわち、拡張型 SC-T-SNE モデル)
- ・ 原材料業者の行動を考慮し、マルチモーダル交通ネットワークを包含した多期間 SC-T-SNE モデル (すなわち、拡張型多期間 SC-T-SNE モデル)。

いずれのモデルについても、ネットワーク上で行動する各主体の意思決定を均衡モデルの枠組みで表現し、SCN 全体、もしくは、スーパーネットワーク全体の均衡条件が、有限次元の変分不等式問題で定式化できることを示し、解の定性的性質 (解の存在と一意性) や解法を明示した。また、コンピュータ

を用いた数値計算により、実際の SCN や交通ネットワークでの実現値とモデルから得られた推定値との整合性を確認し、構築したモデルの記述モデルとしての基礎的性能を検証した。業種別の対売上高物流費用、道路ネットワーク上の貨物車混入率、輸送トンキロ、輸送人キロなどについて、実際のサプライチェーンや交通ネットワークでの実現値と、モデルから得られた推定値を比較し、モデルの良好な再現性を確認した。

さらに、SCN への影響を考慮した交通ネットワークの脆弱性に関する知見を得るために、以下のモデルも構築した。

- ・ SC-T-SNE や SCNE を制約条件とし、上位レベルで、交通ネットワークの途絶箇所、ないしは、交通ネットワークの改良に関する最適な求解を行う、均衡制約付き最適化モデル (すなわち、MPEC 型モデル)
- MPEC 型モデルは、計算負荷の大きい組み合わせ最適化問題となることから、効率的な解法、すなわち、解の精度に優れていて、かつ、計算時間を抑制できるような近似解法の開発にも取り組んだ。具体的には、協調操作を組み込んだ、改良型の粒子群最適化法を開発・適用することにより、高速で高精度な求解を可能とした。

開発したモデルを用いたケーススタディの1つとして、図1のようなスーパーネットワークを対象に、製造業者の被災による生産容量の減少、および、復旧に伴う生産容量の回復が、SCN に及ぼす影響を明らかにするとともに、多期間モデルを用いることの効果を検証した。期間は4期間であり、第一期が平常 ( $t=1$ )、第二期が被災 ( $t=2$ )、第三期が復旧 ( $t=3$ )、第四期が復興 ( $t=4$ ) である。製造業者の生産容量は、被災時が平常時の  $1/3$  に、復旧時には  $2/3$  になると仮定した。単期間 SC-T-SNE モデルを用いて、被災が SCN 上の商品取引量に及ぼす影響を示した結果が、図2である。商品取引量は、生産容量の変化に応じて、増減している。このとき、SCN 上の総余剰 (各主体の利潤と市場の消費者余剰の総和) も、商品取引量と同傾向の変動を示した。

図2には、多期間 SC-T-SNE モデルを用いた場合の結果も示されている。多期間モデルでは、第一期において、被災時に備えて生産量の一部を在庫として保持するため、単期間

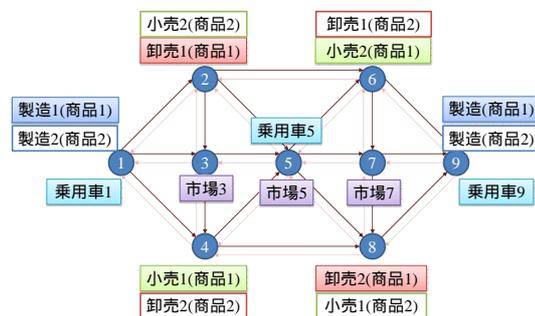


図1 対象とするスーパーネットワーク

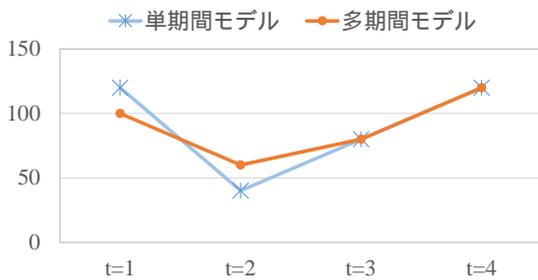


図2 商品取引量の変化の比較

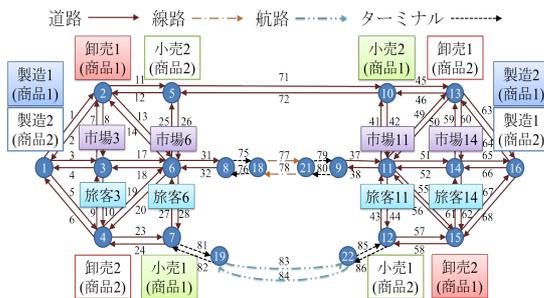


図3 対象とするマルチモーダルスーパーネットワーク

モデルの結果と比較して、第一期での商品取引量は小さいが、第二期では大きくなる。これにより、単期間モデルでは、第二期で総余剰が大きく低減するが、多期間モデルでは、むしろ増加した。その結果、多期間モデルの方が、期間全体での総余剰が大きくなったことから、多期間型モデルを使用することの有用性が示された。

災害時を見据えた場合には、SCN 上の活動を継続させる上で重要な交通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。そこで、拡張型 SC-T-SNE を内包した MPEC 型モデルを用いて、図3のマルチモーダルスーパーネットワークを対象として、マルチモーダル交通ネットワークの脆弱性分析を行った。具体的には、途絶により SCN の総余剰低下を最大にするような箇所（1箇所あたり上下線併せて2リンク）の抽出を行った。途絶箇所は2箇所とする。

その結果、リンク(23,24)と(27,28)、もしくは、(43,44)と(57,58)が途絶した場合、SCN の総余剰低下が最大になった。リンク(23,24)と(27,28)の2箇所が途絶する場合に着目すると、商品1の卸売業者1から小売業者1への商品取引量が激減した。これらの業者は、同一の都市圏内に存在しているにもかかわらず、途絶により、都市圏間の輸送を利用しなければ、商品取引が行えないので、卸売業者1は、異なる都市圏の小売業者2と取引を行うようになるからである。2番目の最適解は、リンク(1,2)と(3,4)、もしくは、(63,64)と(65,66)が途絶した場合であった。これらの箇所は、SCN 上の流通経路の上流部

に相当する。リンク(1,2)と(3,4)が途絶する場合に注目すると、商品1の製造業者1から卸売業者1への商品取引量が減少した。当該リンクの途絶により、利用可能な輸送経路が限定されることで、交通混雑が生じ、結果として輸送運賃が上昇するためである。ネットワーク形状に依存するものの、これらの結果から、交通混雑や流通経路の減少が、SCN の観点からの交通ネットワークの脆弱性を支配する要因であることが示唆された。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

(雑誌論文)(計 10 件)

山田忠史, 里内俊介, 谷口栄一: 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, 査読有.  
doi.org/10.2208/jscejipm.71.57

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, 査読有.  
doi:10.1016/j.tre.2015.01.001

Febri, Z., Yamada, T., Taniguchi, E.: Designing Cocoa transport networks using a supply chain network equilibrium model with the behaviour of freight carriers, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.70, No.5, pp.1\_709-1\_722, 2014, 査読有.  
doi.org/10.2208/jscejipm.70.1\_709

Febri, Z., Yamada, T., Taniguchi, E.: Freight transport network design and interdiction with supply chain network equilibrium constraints for cocoa transport in Sulawesi, Proceedings of 5th T-LOG Conference, CD-ROM, 2014, 査読有.

尾上和希, 山田忠史, 谷口栄一: 原材料の調達過程を考慮したサプライチェーンと交通のスーパーネットワーク分析: モデル化と基礎的な数値計算, 土木計画学研究・講演集, Vol.50, CD-ROM, 2014, 査読無.

Taniguchi, E., Thompson, R.G., Yamada, T.: Recent trends and innovations in modelling city logistics, Procedia - Social and Behavioral Sciences, Vol.125, pp.4-14, 2014, 査読有.

doi:10.1016/j.sbspro.2014.01.1451

Febri, Z., Yamada, T., Taniguchi, E.: Designing freight transport network using cooperative particle swarm optimisation in supply chain-transport supernetworks, Proceedings of the 10th International Conference of Eastern Asia Society for Transport Studies, CD-ROM, 2013, 査読有.

Febri, Z., Yamada, T., Taniguchi, E.: Transport network design for enhancing the efficiency of supply chain networks, Proceedings of 4th T-LOG Conference, CD-ROM, 2012, 査読有.

前田晃佑、山田忠史、横山大河、谷口栄一：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、土木計画学研究・講演集、Vol.46、CD-ROM, 2012、査読無。  
[http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00039/201211\\_no46/pdf/144.pdf](http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00039/201211_no46/pdf/144.pdf)

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) Vo.68, No.4, pp.272-284, 2012、査読有。  
doi.org/10.2208/jscejipm.68.272

[学会発表](計 4 件)

Yamada, T.: Supply chain and freight transport: A supernetwork approach, Invited Talk in National Chiao Tung University, May.26, 2014, (Hsinchu, Taiwan).

山田忠史：ネットワーク均衡モデルを用いたサプライチェーン上の被災の影響分析、平成 26 年度土木学会関西支部年次学術講演会、2014 年 5 月 31 日、大阪産業大学 (大阪府・大東市)。

山田忠史：サプライチェーンと交通を考慮した多期間スーパーネットワーク均衡モデル、平成 24 年度土木学会関西支部年次学術講演会、2012 年 6 月 9 日、神戸市立工業高等専門学校 (兵庫県・神戸市)。

Yamada, T.: Designing supply chain-transport supernetworks within the framework of MPEC, 5th International Workshop on Freight Transportation and Logistics, May.21, 2012, (Mykonos,

Greece).

[図書](計 2 件)

Yamada, T.: Network design for freight transport and supply chain in Urban Transportation and Logistics - Health, Safety, and Security Concerns, Taniguchi, E., Thompson, R.G. & Fwa, T.F. (Eds), pp.167-188, CRC Press, 2013.

Taniguchi, E., Thompson, R.G., Yamada, T.: Concepts and visions for urban transport and logistics relating to human security in Urban Transportation and Logistics - Health, Safety, and Security Concerns, Taniguchi, E., Thompson, R.G. & Fwa, T.F. (Eds), pp.1-30, CRC Press, 2013.

[その他]

ホームページ  
<https://kyouindb.iimc.kyoto-u.ac.jp/j/jT7oA>

第 9 回米谷佐佐木賞研究部門受賞  
サプライチェーンネットワークとの相互作用を考慮した貨物交通ネットワークの最適設計、2013 年 11 月。  
<http://www.issr-kyoto.or.jp/event/fund/result/no09/prizer01/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 忠史 (YAMADA TADASHI)  
京都大学・工学研究科・准教授  
研究者番号：80268317