

平成 30 年 5 月 15 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06251

研究課題名(和文) サプライチェーンとの相互作用を考慮した交通ネットワークの信頼性解析

研究課題名(英文) TRANSPORT NETWORK RELIABILITY ANALYSIS CONSIDERING INTERACTION WITH SUPPLY CHAIN

研究代表者

山田 忠史 (YAMADA, TADASHI)

京都大学・経営管理大学院・准教授

研究者番号：80268317

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、災害などの不確実性に対する頑健性の大きい、すなわち、信頼性の高いサプライチェーンネットワーク(SCN)や交通ネットワークについて検討した。サプライチェーンと交通には相互作用があるので、双方のネットワークの挙動を考慮したモデルを援用・拡張した。モデルの拡張においては、ネットワークの状態の経時的変化、すなわち、不確実で動的な状態遷移を明示的に考慮した。種々の数値計算を通じて、SCN上の各主体の利潤・余剰、商品や物資の供給量・消費量の変化に基づいて、サプライチェーンの頑健性や交通ネットワークの脆弱性を推定するとともに、信頼性を向上させる方策について考究した。

研究成果の概要(英文)：This study investigates reliable supply chain and transport networks, which have good tolerance and high robustness towards uncertainty brought about by disaster. Network models are developed and utilised, taking into account the performance of both networks, since there are interactions between them. The models are also extended so that the dynamic nature of network conditions can be incorporated, representing the dynamic transition of the network conditions under uncertainty. Numerical tests estimate the robustness of supply chain network and the vulnerability of transport network and explore the measures for expanding their reliability, on the basis of the change in profit and surplus obtained by the economic entities on the networks as well as of that in the amount of supply and demand of products.

研究分野：土木計画学・交通工学

キーワード：サプライチェーン 交通ネットワーク 貨物輸送 頑健性 脆弱性 不確実性 最適化

### 1. 研究開始当初の背景

交通ネットワーク (Transport Network: TN) 上の貨物交通需要の背景には、貨物の発生・集中・分布、すなわち、物流需要が存在し、物流需要には、サプライチェーンネットワーク (Supply Chain Network: SCN) 上での商品や物資の生産・取引・消費が関係する。つまり、商品や物資は、流通的には SCN 上を移動すると同時に、空間的には TN 上を移動する。研究代表者が、i) 科学研究費「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)」および、ii) 科学研究費「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 (基盤研究(C)、平成 24~26 年度)」で明らかにしたように、物流業者の行動を介して、双方のネットワーク上には密接な相互作用が存在する。それゆえ、TN の性能が、SCN 上での商品や物資の供給・消費の安定性や強靱性に多大な影響を及ぼすので、サプライチェーンや物流の観点から TN の性能を評価する必要がある。また、SCN を評価する際には、TN 上の交通状態との相互作用を考慮することが肝要である。

ネットワークの重要な性能評価指標の一つが信頼性である。信頼性は一般に、災害や需要変動に対する耐性・頑健性で評価される。例えば、TN においては、災害時に道路や鉄道が寸断され、港湾や空港が使用不能に陥り、サプライチェーンが途絶ないしは機能低下を生じる。それゆえ、災害がネットワークの耐性・頑健性に及ぼす影響を推定して、事前に強靱化対策を講じることが必要である。災害や需要変動は不確実性を伴うので、TN と SCN の相互作用を考慮したうえで、不確実性に対して頑健性が高い SCN や TN について考究する必要がある。しかし、TN の信頼性研究において、SCN との関連性に言及した研究は存在しない。SCN の途絶リスクについての研究が近年盛んになりつつあるが、TN 上の交通状態を内包した研究は見られない。

SCN の性能や、サプライチェーンや物流の観点から TN の性能を評価する際には、SCN 上での商品の生産・取引・消費や、その背後にある各主体 (原材料業者、製造業者、卸売業者、小売業者、消費市場、物流業者) の行動を考慮する必要がある。交通ネットワーク上の交通状態と SCN 上の各主体の行動の相互関係を記述する手法は、上記 i) と ii) に関連する SCNE (Supply Chain Network Equilibrium) モデルや、SCN と TN 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。

### 2. 研究の目的

時間信頼性や脆弱性をはじめとする既存のネットワークの信頼性評価は、ネットワークの直接的な利用者を対象に、ネットワーク

上で生起する状態変化にのみ着目している。本研究は、TN 上での物資の流動と、その背後にある SCN 上の各主体の行動に着目し、各主体の利潤・余剰や、商品の供給・消費量の変化を考慮する。それに基づいて、TN や SCN の頑健性についての評価を行う。頑健性指標の有用性を検討するために、既存の評価指標を用いた計算結果との比較分析も行う。計算においては、SCNE モデル、SC-T-SNE、都市内配送モデルを使用・構築する。頑健性を評価する際には、SCN や TN 上の状態の動的変化を考慮することが有用と考えられるので、モデルの動的な拡張も試みる。

算定した評価値の妥当性は、使用・構築するモデルの性能に依存するため、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、SCN 上で発生する費用や取引量、および、貨物や旅客の交通量や所要時間に関して、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・商業調査の結果の精査を通じて、現実 (実現値) の把握に努めるとともに、モデルの推定値と調査から得られた実現値との整合性を検証する。さらに、頑健性向上を目的としたモデルを開発し、ネットワークの頑健性向上の観点から、有用な施策を明らかにする。

### 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) 国内外でのヒアリング調査や、SCN や TN に関する研究論文や報告書による文献調査を行うとともに、既存の交通・物流・商業調査も参照することにより、災害時や平常時における、実際の SCN 特性や TN 特性の把握を試みた。それらから得られた結果を、モデルの作成・拡張に援用するだけでなく、作成したモデルの妥当性の検証や、モデルを用いた数値計算・ケーススタディなどの計算に必要なインプットデータとして使用する。
- (2) 既存研究や関連する数理計画手法を参考にして、SCN 上の各主体 (製造業者、卸売業者、小売業者、物流業者、消費市場など) の利潤・余剰や商品の供給・消費量の変化を考慮して、サプライチェーンや物流の観点から、ネットワークの頑健性について分析する。その際、既存のネットワークモデリングの研究成果だけでなく、研究代表者が科学研究費でこれまでに取り組んできた研究から得られた成果も援用する (科学研究費「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)」および、科学研究費「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(基盤研究(C)、平成24~26年度)」。
- (3) SCNの範囲を都市内配送に限定した、行動主体の意思決定モデルを構築する。SCNEと同様の枠組みで、荷主、物流業者、消費者の意思決定を、非線形計画問題に基づくネットワーク均衡モデルの枠組みで定式化する。
  - (4) 作成したモデル、および、使用したモデルについて、その記述の妥当性を確保するために、モデルの推定値と上記(1)の調査などから得られた実現値との整合性を検証する。
  - (5) SCNEやSC-T-SNEモデルを、SCNやTN上の状態の動的遷移を考慮したモデルへと拡張する。動的な状態遷移とは、「平常 被災 復旧 復興」という遷移である。
  - (6) 動的な状態遷移を考慮しない既存のSCNEモデルやSC-T-SNEモデルも併せて用いながら、頑健性に関して比較分析を行う。さらに、ケーススタディを通じて、交通ネットワークの頑健性向上に寄与する方策について考究する。

#### 4. 研究成果

国内外の関係者に対するヒアリング調査や、SCNや交通の研究論文や報告書による文献調査を実施し、既存の交通・物流・商業調査も参照することにより、実際のSCN特性やTN特性を調べた。これら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・拡張した。

- ・ SCN全体の効率性を総余剰(消費者以外の主体の利潤と消費者余剰の総和)で計測し、「不確実性を表す確率変数がいかなる値をとろうとも、総余剰最大の状態からの乖離が小さいSCN」、すなわち、「不確実性に対する頑健性が高いSCN」を導出するモデルを構築した。
- ・ 上述のモデルを、災害時の「平常 被災 復興」のような、TNの状態や、SCNにおける各主体の状態の経時変化、すなわち、不確実で動的な状態遷移を明示的に考慮したモデルへと拡張した。動的な状態遷移に関する不確実性を、マルコフ連鎖を用いて、確率的に表現した。
- ・ 都市内配送に着目し、輸配送量や運賃などを内生的に決定する輸配送ネットワーク均衡モデルを構築した。SCNEモデルに類似の枠組みで、荷主、消費者(消費市場)、物流業者を対象に、それらの分権的な意思決定や行動の相互作用を考慮して定式化した。他のモデルと同じく、ヒアリング調査や文献調査などから得られた現実の数値との整合性を検討することにより、構築したモデルの妥当性と基本的性能を確認した。

「不確実性に対する頑健性が高いSCN」を導出するモデルにおいて、最適解は、不確実性を表現する確率変数を用いて定式化した

SCNEを、期待残差最小化法(ERM法:Expected Residual Minimization method)を用いて求解することで算定できる。ERM法は、確率変数がとる各値での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じたとしても、均衡状態からの乖離が最小になる解」である。このモデル(ケース1)と、記述型の既存の確定論的なSCNEモデル(以下、従来モデルと称する)(ケース0)を、不確実性に対する頑健性の観点から比較することにより、構築したモデルの基本性能を確認するとともに、種々の数値計算を通じて、不確実性下でのSCNの最適状態について基礎的考察を行った。

数値計算は、図1に示すような仮想的なSCNを対象にした。モデルの関数形とパラメータ値に関しては、既存研究を参考にするとともに、ヒアリング調査、文献調査、既存の物流調査などの結果と整合するようにパラメータ値を調整した。

数値計算の一例として、原材料調達に不確実性(原材料調達リスク)がある場合についての結果を示す。ケース0とケース1の総余剰分布を比較した結果が、図2である。算出された総余剰の値域は、ケース0と比較して、ケース1の方が小さい。すなわち、頑健性を考慮したモデル(頑健性に配慮した計画)の方が、従来モデル(頑健性を考慮しない計画)よりも、総余剰の変動が小さく、ばらつきに対して頑健であると考えられる。両ケースにおける頑健性の相違は、総生産量(総取引量)に一因がある。生産量が大きいと、生産費用

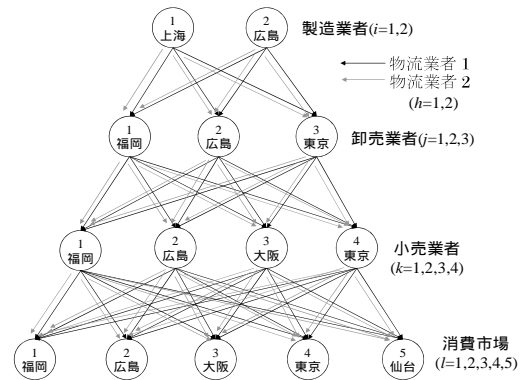


図1 対象とするSCN

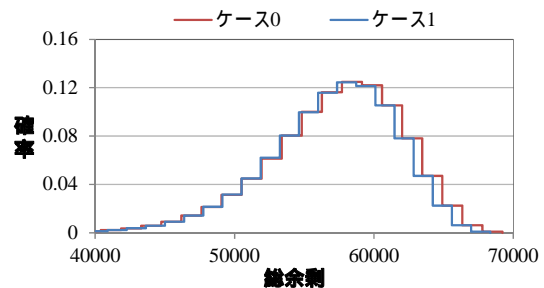


図2 総余剰分布の比較

のばらつきの影響を受けやすい。

追加的な数値計算の結果、ケース0をケース1の結果に近づけるためには、製造業者に課税をするなどして、製造業者の生産費用を上昇させることが有効であった。さらに、不確実性の大きさに変化をつけたケーススタディから、不確実性が大きくなるほど、取引量（生産量）を抑制する方が、頑健性の観点からは有利であることなどを確認した。

動的な状態遷移を考慮したモデルからも、ネットワークの頑健性に関して同様の傾向が見られた。動的な状態遷移を考慮したモデルを用いた数値計算やケーススタディから、被災リスクの小さな企業が生産量を増やすことが、頑健性の観点からは有効であることなどを確認した。

既存のSCNEモデルやSC-T-SNEモデルを下位レベルに持つ均衡制約付き数理計画問題(Mathematical Programs with Equilibrium Constraints: MPEC)の枠組みで、上位レベルにおいて、それらが途絶すれば、SCN上の総余剰低下を最大にするTNリンクの組み合わせを抽出するような数値計算を行った。すなわち、サプライチェーンの観点から、TNの脆弱性評価を実施した。インドネシアのスラウェシ島のTNとココアのSCNを対象として計算を行った結果、輸出港湾や、取引業者（地域集荷商、卸売業者、輸出業者）が集中する地域の道路の途絶が、SCNの効率性に大きく影響を与えることが示された。港湾が途絶しなくとも、港湾への輸送を担う道路が途絶すると、結果的に港湾の機能が停止してしまうことも示された。途絶によって港湾の機能を停止させてしまう可能性のある道路は、災害時を見据えて、強靱にしておくべきとの知見が得られた。

## 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 11 件)

山田忠史、青島一政：不確実性下における複数主体のサプライチェーンネットワークの最適化、土木学会論文集D3(土木計画学)Vo.73、No.5、pp.1\_847-1\_855、2017、査読有。  
doi.org/10.2208/jscejipm.73.1\_847

山田忠史：持続可能な物流・ロジスティクスシステムの構築に向けて、システム制御情報学会誌、Vol.67、pp.19-25、2017、査読無。

大谷篤嗣、山田忠史：不確実性下における複数主体のサプライチェーンネットワークの多期間最適化、土木計画学研究・講演集、Vol.56、CD-ROM、2017、査読無。

山田忠史：サプライチェーンネットワー

クモデリング、土木計画学研究・講演集、Vol.55、CD-ROM、2017、査読無。

山田忠史、福井一彬：運賃と輸配送量を内生化した都市内共同配送モデルの構築と共同配送成立要因の基礎的分析、土木学会論文集D3(土木計画学)Vo.72、No.5、pp.1\_871-1\_877、2016、査読有。  
doi.org/10.2208/jscejipm.72.1\_871

Yamada, T.: Modelling supply chain network equilibrium with the behaviour of multi-tiered material suppliers, Proceedings of 6th T-LOG Conference, CD-ROM, 2016, 査読有。

Taniguchi, E., Thompson, R.G., Yamada, T.: New opportunities and challenges for city logistics, Transportation Research Procedia, Vol.12, pp.5-13, 2016, 査読有。  
doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.004

青島一政、山田忠史：不確実性下における複数主体からなるサプライチェーンネットワークの最適化、土木計画学研究・講演集、Vol.54、pp.1630-1637、2016、査読無。

答島宗史、福井一彬、山田忠史：運賃と輸配送量を内生化した都市内共同配送モデル：共同配送事業者が存在する場合、土木計画学研究・講演集、Vol.54、pp.1644-1647、2016、査読無。

里内俊介、山田忠史、谷口栄一：サプライチェーン指向の交通ネットワークの脆弱性評価：スラウェシ島のココアのサプライチェーンを例に、土木計画学研究・講演集、Vol.52、pp.1345-1348、2015、査読無。

福井一彬、山田忠史：運賃と輸配送量を内生化した共同配送モデル、土木計画学研究・講演集、Vol.52、pp.1362-1368、2015、査読無。

[学会発表](計 4 件)

Yamada, T.: Modelling analysis on factors to successfully implement joint delivery systems in urban areas, The 2016 Joint Seminar of KU-KU on Service and Hospitality Management, Dec.23, 2016 (Kyoto, Japan).

山田忠史：サプライチェーン指向の物流

施策と物流研究、地域政策セミナー、2015年7月4日、TKP 札幌駅カンファレンスセンター（北海道・札幌市）。

Taniguchi, E., Thompson, R.G., Yamada, T.: New opportunities and challenges for city logistics, The 9th International Conference on City Logistics, Jun.17-19, 2015 (Tenerife, Spain).

福井一彬、山田忠史、谷口栄一：運賃と輸配送量を内生化した都市内共同配送分析、平成27年度土木学会関西支部年次学術講演会、2015年5月30日、摂南大学（大阪府・寝屋川市）。

〔その他〕

ホームページ

<https://kyouindb.iimc.kyoto-u.ac.jp/j/jT7oA>

## 6．研究組織

### (1)研究代表者

山田 忠史 (YAMADA TADASHI)

京都大学・経営管理大学院・准教授

研究者番号：80268317