

令和 3 年 5 月 14 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04389

研究課題名（和文）強靱な物流を実現するための交通とサプライチェーンの動的スーパーネットワーク解析

研究課題名（英文）A DYNAMIC APPROACH TO INVESTIGATE RESILIENT SUPPLY CHAIN-TRANSPORT SUPERNETWORK

研究代表者

山田 忠史（YAMADA, Tadashi）

京都大学・経営管理研究部・教授

研究者番号：80268317

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、物流強靱化の観点から、交通とサプライチェーンからなるスーパーネットワークの強靱性を評価し、強靱性の向上に資する方策を考究するものである。そのために、災害への耐性や被災からの回復力に基づくネットワークの強靱度算定手法を提案し、交通とサプライチェーンの双方を明示的に考慮した動的なスーパーネットワーク解析手法の開発を試みた。さらに、開発した解析手法を内包したネットワークの最適設計モデルを構築し、モデルに組み込む高精度で高速な近似最適化手法を開発するとともに、災害時の交通ネットワークの最適な復旧策について、物流強靱化の観点から検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震などの災害時においては、サプライチェーンの確保による国民生活の維持と経済活動の持続が重要となる。それゆえ、災害への耐性に優れ、被災からの回復力を保持する強靱な物流と、それを支える交通ネットワークやサプライチェーンネットワークの形成が肝要である。本研究は、その一助となるものであり、ネットワークの強靱性の定義や強靱度算定手法、さらには、それらを用いて、マルチモーダルなスーパーネットワークを評価する手法を提案する。これらの手法、ならびに、それらを用いてネットワークを最適設計することは、行政側の有用な物流強靱化策の企画につながり、企業側の施策理解や事業継続計画の策定に寄与する。

研究成果の概要（英文）：This study investigates resilient supply chain-transport supernetworks, which can facilitate more resilient freight transport and supply chain networks to be established. Degree of network resilience was defined on the basis of robustness against and recovery from disasters. Dynamic supernetwork models were then developed, taking into account the degree of network resilience. An optimal network design model was also developed with such models being incorporated, as well as with heuristic solution procedures deriving high-quality solutions within reasonable computational time being proposed. It was indicated, through the numerical experiments utilizing the models developed, how to optimally recover a transport network from disasters in terms of the supernetwork resilience.

研究分野：交通工学、物流計画

キーワード：サプライチェーン 強靱性 不確実性 最適化 多期間モデル

### 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や阪神・淡路大震災からも明らかなように、災害時には、道路や鉄道などの輸送路が寸断され、港湾や空港などの交通結節点が機能不全に陥り、生産拠点や物流拠点も被災する。災害時においては、緊急物資輸送による国民生活の維持と、サプライチェーンの確保による経済活動の持続が重要となるので、災害への耐性に優れ（被災前）被災からの回復力を保持する（被災後）強靱な物流と、それを支える交通ネットワーク(Transport Network: TN)やサプライチェーンネットワーク(Supply Chain Network: SCN)が不可欠である。しかしながら、ネットワークの強靱性の定義や強靱度算定手法は、まだ確立されていない。それゆえ、強靱性を明確に定義し、強靱度の算定方法を開発する必要がある。

物資や商品は、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。TN 上の貨物交通需要の背景には、物資や商品の発生・集中・分布、すなわち、物流需要が存在し、物流需要には、SCN 上での物資や商品の生産・取引・消費が関係する。それゆえ、物流は TN と SCN の双方に影響を受けるので、物流を記述・分析する際には、TN と SCN が同時に考慮されるべきである。異なる複数のネットワークを重ね合わせたネットワークはスーパーネットワーク（例えば、Nagurney & Dong, 2002）と呼ばれる。被災前後を包含した指標である強靱度を対象とし、TN と SCN を同時に考慮するためには、スーパーネットワーク指向の動的な解析手法の開発が肝要である。しかしながら、スーパーネットワーク上で行動する多様な主体の意思決定のモデル化、および、大規模スーパーネットワークの特性値の算定に関する研究は、国内外において、まだその緒についたばかりである。さらに、TN と SCN を明示的に同時に考慮したスーパーネットワークに注目した解析手法は、今後の展開が期待される新しいアプローチである（例えば、Tavasszy et al., 2012）。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、物流の観点から交通とサプライチェーンからなるスーパーネットワークの強靱性を評価し、強靱性の向上に資する方策を考究することである。そのために、災害への耐性や被災からの回復力に基づいて強靱性を定義し、ネットワークの強靱度算定手法を開発する。また、それらの手法を用いて、マルチモーダルな TN や SCN から構成されるスーパーネットワークを評価する。ネットワークの強靱性の定義、ならびに、それに基づく強靱度の算定手法については、これまで確立されてはいない。さらに、物流の観点から、TN や SCN の強靱性を評価する研究も、これまで行われていない。

強靱度は被災前後を包含した指標であり、物流は TN と SCN の相互作用に影響を受けるので、TN と SCN を同時に考慮するスーパーネットワーク指向の動的な解析手法が必要である。本研究では、スーパーネットワーク上で行動する複数主体の意思決定を詳細にモデル化し、そのモデルから算出される TN の諸量（経路所要時間、リンク交通量、OD 交通量など）や SCN の諸量（物資や商品の取引量、輸送量、価格、拠点立地など）を動的に定量化し、それら諸量を基にして強靱度を算定する。さらに、動的解析手法を内包したネットワークの最適設計モデルを構築し、物流強靱化に寄与する方策について考究する。最適設計モデルが、大規模な組み合わせ最適化問題となり、厳密解の求解が困難なことから、高精度で高速の近似最適化手法も開発する。

本研究から得られる成果は、行政側の物流強靱化に有効な方策の定量的な把握につながり、企業側の施策理解や事業継続計画(Business Continuity Plan: BCP)の策定に寄与する。それにより、安全・安心な国民生活の確保に貢献し、生産拠点の海外移転の抑制にもつながり、経済の安定や成長の一助となるものと考えられる。

### 3. 研究の方法

代表的な物資や商品に着目して、SCN 特性、すなわち、SCN の形態と諸量（取引量、輸送量、価格、拠点立地など）や、それらの災害による動的な変化などについて、国内外の企業に対してヒアリング調査を行う。これらの調査結果に、TN や SCN 関連の文献からの知見を併せて、強靱性を定義するとともに、強靱度算定方法を提示する。さらに、それらの調査結果に、既存の交通・物流調査の結果を考慮することにより、実際の TN 特性や SCN 特性を詳細に把握し、数値計算に必要となるインプットデータを作成する。強靱度算定手法の開発においては、頑健性（災害への耐性）、時間的回復力（被災からの回復の早さ）、性能的回復力（被災からの回復の程度）を総合的に加味する。

スーパーネットワーク上での製造業者、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などの行動を動的に記述し、災害に対する TN や SCN の状態遷移の不確実性を動的かつ確率的に考慮して、TN や SCN の諸量を導出し、それら諸量を基にして、強靱度を算定す

る。強靱度を基にした多期間最適化モデルの構築・拡張、すなわち、動的なスーパーネットワーク解析手法の開発を試みる。実際あるいは仮想のネットワークを対象に数値解析を行うことにより、ネットワークの強靱性を評価する。また、構築した手法の妥当性については、先述の調査結果と解析から得られた推定値との整合性などから検証する。

さらに、動的なスーパーネットワーク解析手法を内包したネットワークの最適設計モデルを開発する。このモデルは、強靱性の向上に資する方策に関連する大規模な組み合わせ最適化問題であり、厳密解の求解が困難である。それゆえ、文献調査などを基にして、メタヒューリスティクスなどの有力な最適化手法を精査し、既存手法よりも高精度で高速に求解可能な近似最適化手法を開発する。このモデルを用いて、数値計算を実行し、強靱な物流を実現するうえで有力な方策について考究する。

#### 4. 研究成果

地震などの災害を想定した不確実性下での SCN に注目し、既往文献や企業へのヒアリング調査結果などを基にして、ネットワークの強靱性を新たに定義した。その強靱性に基づいて、SCN の強靱度を定量化した。本研究では、強靱性を「外乱に対して頑健性を有し、外乱がもたらす変化に対して、性能的、および、時間的に回復力を持ち合わせること」と定義し、図1のように、頑健性（災害への耐性）、時間的回復力（被災からの回復の早さ）、性能的回復力（被災からの回復の程度）の関数となることを示した。それゆえ、強靱性の大きさは、図1の曲線下部の傍線部の面積の大きさに帰着できる。サプライチェーンを対象にした場合、この曲線は総余剰（サプライチェーン上の各主体の利潤と消費市場の余剰の総和）と考えることができる。

強靱度については、「災害発生リスクの下で、サプライチェーンが最大性能にどれだけ近い性能を発揮できるのか」という観点から、以下のように定義した。

強靱度 = 【被災リスクを考慮して、対象期間全体に渡って計画し、ある期間で災害が生じることを想定して、計画期間全体での総余剰を求めたもの】 ÷ 【被災リスクを考慮して、対象期間全体に渡って計画するが、災害が生じない場合において、計画期間全体での総余剰を求めたもの】

上式における分子は、例えば、総余剰に着目した不確実性下における多期間最適化の結果を援用することが可能である。分母については、被災リスクを考慮しないで計画した場合には、「災害が起こる前に得られた総余剰が、その後も得られ続ける（＝災害が起こらない）場合」とすることもできる。

既存のサプライチェーンネットワーク均衡(supply chain network equilibrium: SCNE)モデルを援用して、SCN の経時的な状態変化を確率変数として表現することにより、不確実性下における SCN の多期間最適化の基礎的な定式化と解法を示した。多期間最適化から得られる最適解は、どの期間において確率変数のどの値が生じたとしても、「総余剰最大の状態からの乖離が最小」、すなわち、「強靱性が最大の状態からの乖離が最小」な SCN である。図2のような多期間ネットワークを用いて、多期間最適化に関する数値計算、すなわち、不確実性がもたらす費用のばらつきによって、強靱度が変動することに注目し、最適化モデルを用いた場合と既存の記述型 SCNE モデルを用いた場合を比較した結果、本研究において定義した強靱度の観点から、最適化モデルの有用性を確認した。

本研究では、代表的な物資や商品に着目して、SCN 特性、すなわち、SCN の形態と諸量（取引量、輸送量、価格、拠点立地など）や、それらの災害による動的な変化などについて、ヒアリング調査を行った。これらの調査結果に、TN や SCN 関連の文献からの知見を併せて、さらには、既存の交通・物流調査の結果を考慮することにより、数値計算に必要となるインプットデータ、ならびに、提案した手法の有用性を確認するための比較対象データを作成した。

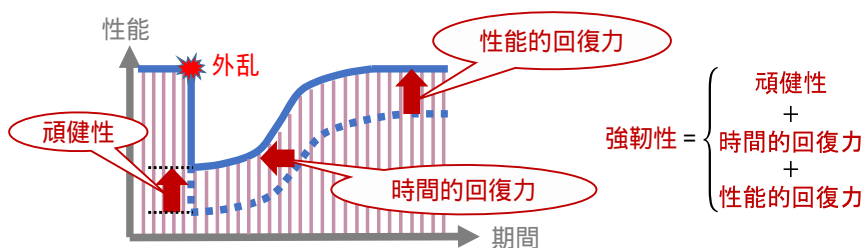


図1 強靱性の考え方

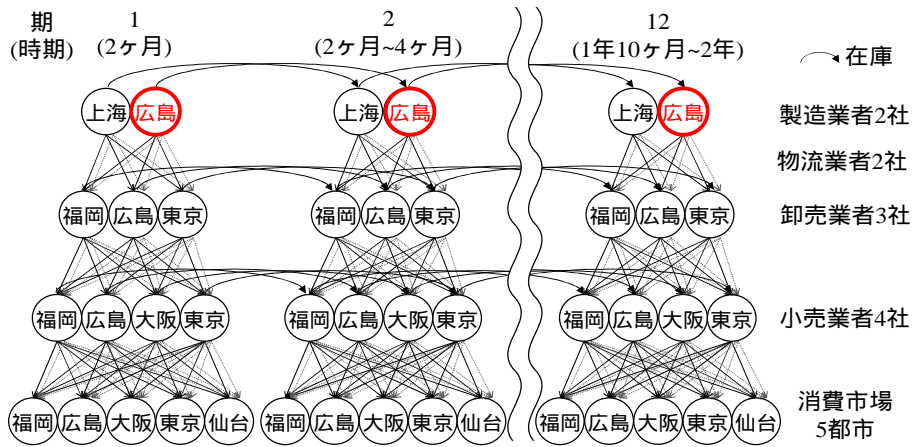


図2 対象とするSCN

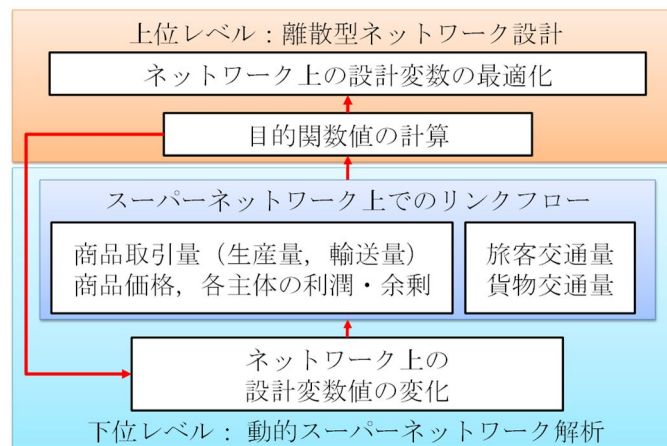


図3 最適設計モデルの構造

上記を要約すれば、動的なスーパーネットワーク解析手法の開発に努めたことになる。多期間最適化においては、災害発生に伴うSCNの経時的な状態変化に関する確率変数の取扱い方に応じて、平均値モデルを確立するとともに、期待残差最小化モデル(ERMモデル)の適用も試みた。その結果、いずれの手法においても、強靱度の向上に寄与することが確認された。また、商品の消費需要の不確実性を考慮した手法の開発や、配車配送フェーズの高度化にも取り組み、スーパーネットワークの解析手法の精緻化を図った。

動的なスーパーネットワーク解析手法を内包したネットワークの最適設計モデルを開発した。最適設計モデルは、図3のような、MPEC (mathematical programs with equilibrium constraints)構造である。上位問題が、最適設計に相当し、物流や交通の改善方策の検討に関連する。下位問題が、動的スーパーネットワーク解析に相当する。上位問題は、大規模な組み合わせ最適化問題であり、厳密解の求解が困難である。それゆえ、文献調査などを基にして、改良型の粒子群最適化法を開発・適用した。数値計算を実行し、開発した手法の有用性を確認するとともに、交通ネットワークの最適な復旧策について基礎的知見を示した。

<引用文献>

Nagurney, A., Dong, J.: Supernetworks - Decision-making for the Information Age -, Edward Elgar Publishing, Cheltenham, UK, 2002.

Tavasszy, L.A., Ruijgrok, K., 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.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yamada, T.	4. 巻 Vol.17(1)
2. 論文標題 Supply chain-transport supernetwork equilibrium under uncertain product demands	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Operations Research	6. 最初と最後の頁 1-26
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.6886/ IJOR.202003_17(1).0001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Wu, Y., Qureshi, A.G., Yamada, T.	4. 巻 Vol.1
2. 論文標題 A multi-allocation hub location routing problem	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of 8th International Conference on Transportation and Logistics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 山田忠史	4. 巻 Vol.55(2)
2. 論文標題 国内外の物流研究の最前線	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 交通工学	6. 最初と最後の頁 29-32
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 村上裕樹, 山田忠史, Qureshi Ali Gul	4. 巻 Vol.1
2. 論文標題 サプライチェーンネットワークの強靭性を考慮した交通ネットワークの最適復旧順序に関する基礎的研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 2021年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集	6. 最初と最後の頁 IV-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Lai, Y., Schmocker, JD., Yamada, T.	4. 巻 Vol.1
2. 論文標題 Marginal increasing pricing to mitigate the negative impacts of autonomous vehicles	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 9th International Symposium on Travel Demand Management	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 西田壮汰, 山田忠史, Schmocker Jan-Dirk, 尾方竜登	4. 巻 Vol.1
2. 論文標題 有効な物流施策の実施に向けた都市圏物資流動調査結果の比較分析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 2019年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集	6. 最初と最後の頁 IV-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 大谷篤嗣, 山田忠史, 青島一政	4. 巻 Vol.56
2. 論文標題 不確実性下におけるサプライチェーンネットワークの多期間最適化と強靱性解析	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木計画学研究・講演集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 山田忠史	4. 巻 Vol.61
2. 論文標題 貨物交通研究の方向性と課題	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 高速道路と自動車	6. 最初と最後の頁 15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Leonardi, J., Yamada, T.	4. 巻 Vol.1
2. 論文標題 Can routing systems surpass the routing knowledge of an experienced driver in urban deliveries?	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 City Logistics 1: New Opportunities and Challenges	6. 最初と最後の頁 381-400
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/9781119425519.ch20	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 Yamada, T.
2. 発表標題 Possible future directions in optimization
3. 学会等名 Invited talk in Department of Industrial & Information Management, National Cheng Kung University, Taiwan (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yamada, T.
2. 発表標題 Urban freight initiatives & freight network development
3. 学会等名 Invited talk in JICA Technical Seminar "Urban Logistics", Guatemala (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yamada, T.
2. 発表標題 Optimisation modelling for freight transport and logistics
3. 学会等名 Invited Talk in Department of Industrial & Information Management, National Cheng Kung University, Taiwan (招待講演)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

京都大学教育研究活動データベース  
<https://kyouindb.iimc.kyoto-u.ac.jp/j/jT7oA>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
英国	ウェストミンスター大学			