

第IV部門 サプライチェーンネットワークの強靱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

京都大学工学部 学生員 ○村上 裕樹
 京都大学大学院工学研究科 正会員 Qureshi Ali Gul

京都大学経営管理大学院 正会員 山田 忠史

1. 研究目的

地震等の自然災害が頻発するわが国では、経済活動や生活の継続性の観点から、災害がサプライチェーンネットワーク (supply chain network: SCN) に与える影響を考究することが重要である。その際、サプライチェーンは交通ネットワーク (transport network: TN) に支えられており、災害は TN の寸断や途絶をもたらすので、TN と SCN の相互作用を考慮する必要がある。それゆえ、災害に対して SCN が強靱であるためには、それを支える TN も強靱である必要がある。本研究では、災害による TN の途絶が SCN に与える影響に着目し、強靱性の観点から、SCN と TN の相互作用を考慮したうえで、TN 上の被災リンクの復旧順序の最適化手法を提案する。また、その手法を用いた数値計算を通じて、強靱化に有用な要因について基礎的考察を行う。

2. 計算手法の概要

本研究では、最適な復旧順序を求解するにあたり、図1に示す MPEC (mathematical programs with equilibrium constraints) の枠組みでモデル化を行った。下位問題においては、SC-MT-SNE (supply chain-multi modal transport supernetwork equilibrium)¹⁾を採用し、災害の不確実性と被災からの復旧過程を考慮するために、期待多期間モデルへと拡張した。SC-MT-SNE は、多段階 SCN 上の複数主体 (原材料業者、製造業者、卸売業者、小売業者、物流業者、消費市場) の分権的な意思決定や主体間の行動の相互作用、ならびに、TN と SCN の相互作用を考慮したうえで、SCN や TN 上の各主体の行動を記述する手法である。本研究では、計画対象期間を離散化したうえで多期間化を図り、各期間における地震の生起確率の期待値を包含したモデルへと改良した。

上位問題は、TN 上の被災リンクの復旧順序を最適化する組み合わせ最適化問題である。目的関数は、強靱度の最大化であり、強靱度は「被災を想定した場合の SCN

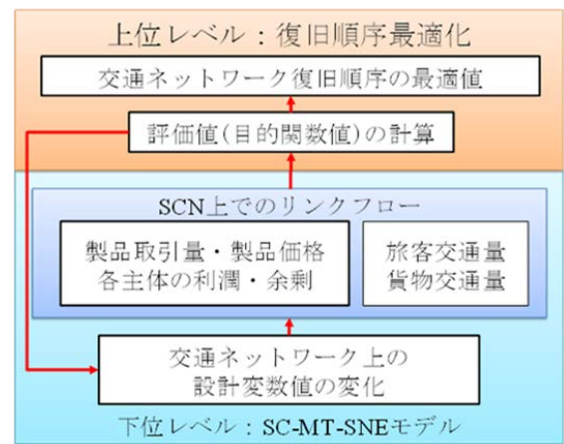


図1 復旧順序最適化問題の構造

の総余剰」を「被災していない場合の SCN の総余剰」で除した値と定義した。総余剰は、SCN 上の各主体の利潤と、消費市場の余剰の総和である。上位問題の求解方法については、被災リンクが少数の場合には、列挙法を使用することが可能である。しかし、対象となる被災リンク数が増加するにつれて、指数関数的に組み合わせ数が増加するので、本研究では、メタヒューリスティクス的一种である粒子群最適化法 (particle swarm optimization: PSO) に基づく求解方法を開発した。Febri ら²⁾の研究成果を踏まえて、修正型確率的離散二値粒子群最適化法(modified probability based discrete binary particle swarm optimization: MPBPSO)に、慣性項の線形減少の操作を加えた MPBPSO-IWA (MPBPSO-inertia weight approach)を開発し、仮想ネットワークを用いた比較性能評価を行って、解の精度と計算時間の観点から、その有効性を確認した。

3. 数値計算

上述の計算手法を用いて、図2に示すような、SCN と TN の双方を包含した仮想的なスーパーネットワークを対象として、基礎的な数値計算を実施した。原材料業者4社、製造業者3社、卸売業者2社、小売業者2社、消

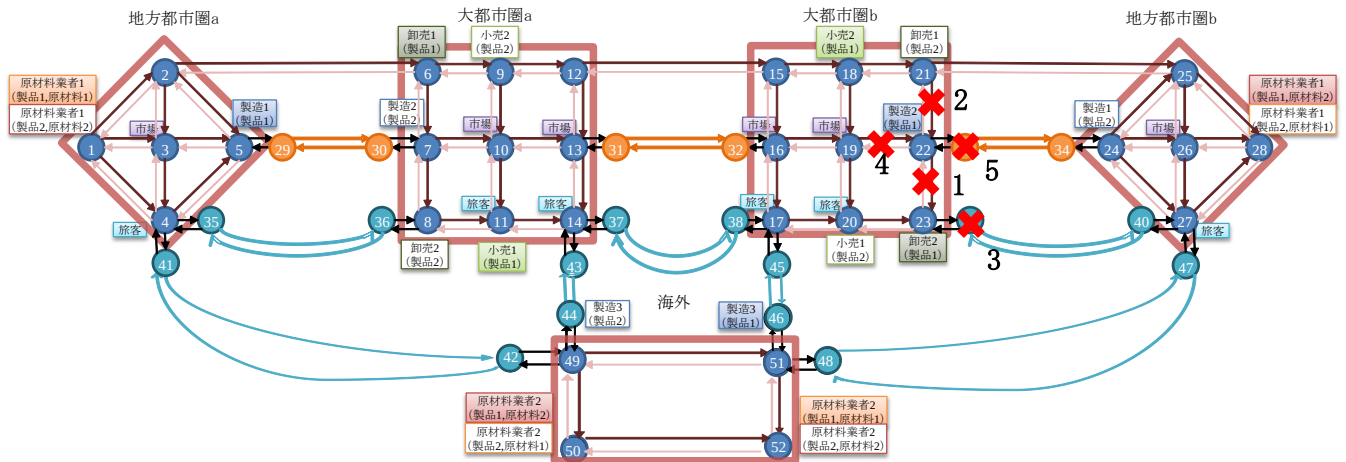


図 2 計算対象とするサプライチェーンと交通のスーパーネットワーク

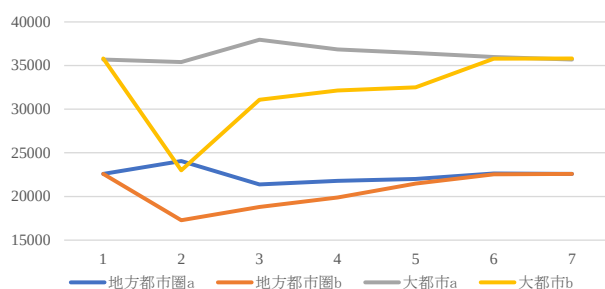


図 3 総余剰の経時的変化（地域別）

費市場 6 つ，物流業者 1 社からなる 2 品目の SCN を設定し，2 つの大都市圏と地方都市圏，ならびに，海外を結ぶ TN を想定した．計画期間は 2 年間（2 か月×12 期間）と仮定し，被災リンクについては，図 2 の×点の位置に設定した．わが国の実際の地震発生履歴を考慮して，被災確率は BPR 分布に従うものとし，30 年間で 70% の被災確率であると推定した．

最適な復旧順序は，図 2 の通りとなった（×点の横の数値）．まず，大都市圏 b の製造業者のアクセス機能を回復させるために，製造業者（ノード 22）と卸売業者（ノード 23）を結ぶリンクが復旧している．つぎに，道路リンク（ノード 21～22 間）を復旧させることでノード 21～23 間が開通し，リンク被災の影響により発生した大都市圏 b の上下方向リンクの混雑が解消される．その後，港湾，道路リンク（ノード 19～22 間），鉄道の順で復旧している．この一連の復旧順序は，各リンクにおける貨物輸送量の降べきの順に対応している

このときの総余剰変化を図 3 に示す．大都市圏 b と地方都市圏 b の総余剰が，大きく減少していることが確認できる．大都市圏 b が被災していることを想定しているため，大都市圏 b に加えて，主に大都市圏 b 向けに原材

料・製品を製造している地方都市圏 b も，被災の影響を受けたものと考えられる．このように被災地域以外にも影響が及ぶことが確認できた．

4. おわりに

本研究では，地震などの自然災害が，SCN の性能に影響を及ぼすこと，および，SCN と TN には相互作用が生じることに着目し，SCN の強靱度に基づいて，TN 上の被災リンクの復旧順序を最適化する手法を提案した．期待多期間 SC-MT-SNE を下位問題とし，上位問題を組合せ最適化問題とする MPEC の枠組みで，手法を構築した．上位問題の解法には，既存の PSO を改良した新たな手法を提案した．仮想ネットワークを用いた計算結果から，貨物輸送量に対応してリンクを復旧させることが，強靱な復旧方法であることが確認できた．また，被災地域以外にも利潤や余剰の低下等の影響が波及することが確認でき，広範なエリアを対象に SCN への影響を検討することの有効性が示唆された．今後は，実際のネットワークを含む，より多様な数値計算を行って，影響要因を分析する必要がある．

参考文献

- 1) 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分散型最適化：最適設計と脆弱性評価，土木学会論文集 D3，Vol67，No.5，pp. I_801- I_811，2011．
- 2) Yamada, T., Febri, Z.: Freight transport network design using particle swarm optimization in supply chain-transport supernetwork equilibrium, Transportation Research Part E. Logistics and Transportation Review, Vol 75, pp.164-187, 2015.