

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2023

課題番号：18K11179

研究課題名(和文) サプライチェーンネットワークにおいて生じる均衡問題の分析

研究課題名(英文) Analysis of equilibrium problems arising within supply chain networks

研究代表者

成島 康史 (Narushima, Yasushi)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・教授

研究者番号：70453842

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：サプライチェーンマネジメント(以下、SCM)は、現在の経営科学分野において中心的な研究課題である。サプライチェーンネットワーク(以下、SCN)において、全体最適化を目指すための数理モデルは古くから研究されているが、競争的なSCNに対する研究は、その重要さと比較して、まだ研究が進んでいない。本研究では、特に「不確実性を含むSCNにおける均衡問題」、「サービスを考慮したSCNにおける均衡問題」、「複雑な構造や制約を持つSCNにおける均衡問題」、を中心にSCNにおける競争的な状況を均衡問題として定式化し、数理的な解析や数値実験を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

SCNにおける数理モデルの研究は古くからあるが、ネットワークの複雑化やIoT技術の活用による構造の変化によって、新たなモデルの構築が必要となっている。上述した3つの研究課題(SCNの不確実性、サービス、複雑化)は、現在、通常の(SCNの全体最適化としての)数理モデルの研究は盛んであるものの、競争的なSCNの研究は、それほど多くなく、本研究によって得られた知見は、より良いサプライチェーンの構築や既存のサプライチェーンのボトルネックの解消などに貢献することが期待できる。

研究成果の概要(英文)：Supply Chain Management (hereafter referred to as SCM) is a central research topic in the current field of management science. Mathematical models aiming for overall optimization in Supply Chain Networks (hereafter referred to as SCN) have been studied for a long time, but research on competitive SCNs has not advanced as much as its importance would suggest. In this study, we focus on formulating competitive situations in SCNs as equilibrium problems, particularly addressing "equilibrium problems in SCNs with uncertainties," "equilibrium problems in SCNs considering service," and "equilibrium problems in SCNs with complex structures and constraints".

研究分野：オペレーションズ・リサーチ

キーワード：サプライチェーン 均衡問題 変分不等式問題 相補性問題

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

サプライチェーンマネジメント(以下,SCM)は,研究開始当初も現在も経営科学分野において中心的な研究課題の一つである.特に,研究開始当初は,サプライチェーンのグローバル化,IoT技術の発達,環境への配慮などの様々な要因に伴ってサプライチェーンネットワーク(SCN)の複雑化や高度化が顕著となってきた.また,サプライチェーンがグローバル化・複雑化するに伴って,サプライチェーンの継続可能性やリスクマネジメントも重要視されるようになってきた.一方で,日本におけるSCMは欧米に比べて遅れているといわれている.その要因の一つとして,日本は欧米に比べて消費者に商品が届くまで多数の仲介卸業者を経由することが多く,さらにその仲介業者のほとんどは規模が小さいという,日本の流通構造の体質を挙げられていた.そのようなSCNでは競合的な状況が起こりやすく,その競合状態は全体最適を目指すSCMの阻害要因となっている.

SCNにおける全体コストの最小化などの数理モデルは,SCMにおいて重要な役割を果たすだけでなく,上述の理由からさらなる発展が期待されていたが,それに加えて,競合的なSCNを分析するモデルの発展も重要であった.

2. 研究の目的

上述の背景から,競合的なSCNを中心に,SCNに対する数理モデルを構築し,その性質やボトルネックなどを調べるのが本研究の目的である.特に本研究では,「SCNの複雑化」,「リスクマネジメント」といったキーワードの着目し,以下の項目に着目した.

(1) 不確実性を含むSCNにおける均衡問題の分析

近年,SCNにおけるリスクマネジメントが注目されている.SCNにおけるリスクマネジメントの概念自体は新しいものではないが,特に日本では東日本大震災を機に事業継続計画(BCP)の一つとして,強く意識されるようになった.通常,数理モデルにおいてはリスクを不確実性として取り扱う.従来の最適化モデルにおいても重要な不確実性を考慮したモデルは存在するが,その多くは需要に関する不確実性であり,しかも,正規分布を仮定したものが多く(例えば,安全在庫モデルなど).したがって,東日本大震災の時のように需要の分布が変化した場合などには,このようなモデルでは必ずしも対応できるとは限らない.さらに,グローバルなSCNを考えた場合は,燃料や原材料の変動などを考慮する必要がある.また,競合的なSCNを考えた場合には,ほかの(意思決定)主体の戦略に関する不確実性なども考慮する必要があるため,それらの不確実性に対して考慮することで,リスクに対して頑健なSCNの性質を分析するための数理モデルを構築する.

(2) 複雑な構造や制約を持つSCNにおける均衡問題の分析

上述したように,社会の高度化に伴い,SCNの構造などは複雑化・高度化している.組み立て産業の例として,トヨタ自動車を考えると,1次~3次サプライヤーは国内外を含めて2000社を超える.一方,製造後の流通ネットワークを考えると,アマゾンなどのネットによる販売チャネルが拡大しており,こちらも複雑化が進んでいる.また,燃料のサプライチェーンを考えると,カーボンニュートラルへ向けたバイオ燃料の活用が進められており,従来燃料とバイオ燃料の混在した複雑なネットワークとなる.これらのような複雑なSCNに対して分析を行う数理モデルを構築する.

(3) サービスを考慮した SCN における均衡問題の分析

現在、IoT 技術の発達によって、無線タグなどの接続機器を持つスマート製品(以下、スマート製品)が実用化されつつある。スマート製品により、製品の使用状況を把握することで、顧客のニーズに合致した付加価値やサービスの提供が可能となり、一部の製造業者は「モノ」を売る業種から「価値」を売る業種へとシフトチェンジを行っている。例えば、GE の航空事業部門は、センサーを搭載した飛行機のエンジンを生産し、航空データをもとに顧客(航空会社)に対して、使用燃料のコストを減らすような航空指導を行うサービスを行っている。このようなシフトチェンジに伴い、SCN の構造や SCN を構成する各主体同士の関係なども変化しており、品物だけではなくサービスを考慮した SCN のモデルを考える必要がある。

3. 研究の方法

上記3つの研究対象に対して、SCN に対する数理モデルを構築し、数理的な分析や数値実験によって、対象となる SCN の性質などを分析した。競合的な SCN では各主体が自身の利得を最大にする(またはコストを最小にする)ように意思決定を行う。このような数理モデルは、通常、変分不等式問題(Variational Inequality Problem, VIP)や非線形相補性問題(Nonlinear Complementarity Problem, NCP)へと定式化が可能であることが多い。したがって、まずは、競合状態を均衡問題として定式化し、それを VIP や NCP へと再定式化することで、均衡問題の数理的な構造の解析や数値実験による SCN の特徴の分析を試みた。一方で不確実性を考慮する場合や、複雑な SCN を考える場合は、通常の VIP や NCP に定式化できるとは限らないため、複雑な領域上の VIP や NCP、または準変分不等式問題や均衡制約付き均衡問題などへの定式化も考慮に入れて定式化を進めた。また、競合的な SCN に対するモデルの構築の前段階として、通常の(競合的ではない)SCN の数理モデルに対する研究や、より一般のネットワーク上の最適化問題・均衡問題に対する数理モデルについても検討した。他方、VIP や NCP は、通常は微分不可能な項を含む最適化問題や非線形方程式系に再定式化することで数値的に解を計算する必要がある。そのため、微分不可能な項を含む最適化問題や非線形方程式系を効率的に解くための数値計算アルゴリズムの開発も実施した。

4. 研究成果

(1) 不確実性を含む SCN における均衡問題の分析

製造業者、小売、市場からなる3層の SCN において、各プレイヤーが他のプレイヤーの正確な情報が得られない状況において、最悪のケースを想定して行動選択を行うモデル(ロバスト SCN 均衡モデル)を提案した。定式化された各プレイヤーの解く最適化問題の最適性条件を考えることで、2次錐上の変分不等式問題へと再定式化し、その均衡点の存在性や唯一性を議論した。また、その変分不等式問題を数値的に求解可能な2次錐相補性問題へと変換することで数値実験を実施した。数値実験ではほかのプレイヤーの情報の精度が悪くなるにつれ、サプライチェーン全体の効率性が低下することを確認した。さらに、上記のモデルを市場における需要が不確実である状況へ拡張した。

(2) 複雑な構造や制約を持つ SCN における均衡問題の分析

航空業界ではバイオ由来の持続可能な燃料(SAF, Sustainable aviation fuel)の活用が注目されている。SAF を利用する際には従来の化石燃料と混合する必要があるため、その SCN は複雑になる。よってそのような構造を考慮した SCN 均衡モデルを提案した。さらに、数値実験を行い、SAF の活用促進のためには、SAF の製造・流通過程でどのような改善を行うべきか、とい

う側面から分析を行った。

SCN 均衡モデルはプレイヤーの意思決定に順番のない、戦略型のモデルであった。しかしながら、意思決定に順番のある展開型のモデルも重要である。しかしながら、そのようなモデルは求解が困難であるため、数値的に求解するためのアルゴリズムを開発した。具体的には、マルチリーダー・ワンフォロワーゲームに対して、最適値関数に基づく内点法を提案した。

(3) サービスを考慮した SCN における均衡問題の分析

製造業者、小売、市場からなる 3 層の SCN において、小売業者決定するサービスの品質によって、市場での製品の需要が変化するような SCNE 均衡モデルを提案した。さらに、それを変分不等式問題へと再定式化し、均衡解の存在性の条件を解析した。さらに、数値実験を行い、サービスの品質と小売業者の利益の関係について考察した。

(4) 本研究から派生した研究

上述の通り、本研究では数値実験において、微分不可能な項を含む非線形方程式系や最適化問題を解く必要がある。そのような問題を効率的に解くための求解アルゴリズムの提案や、既存手法の改良などを行った。

不確実性を持つ SCN 均衡モデルにおいて、様々なロバスト性を検討した。その際に、分布的ロバスト最適化に着目し、それ自体の研究も実施した。分布的ロバスト最適化に基づくロバスト SCN 均衡モデルはまだ検討等途中であるが、分布的ロバスト最適化に基づく経路選択問題やポートフォリオ最適化問題に対するモデルを提案した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yasushi Narushima, Shummin Nakayama	4. 巻 19
2. 論文標題 A proximal quasi-Newton method based on memoryless modified symmetric rank-one formula	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Industrial and Management Optimization	6. 最初と最後の頁 4095 ~ 4111
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3934/jimo.2022123	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 Narushima Yasushi, Nakayama Shummin, Takemura Masashi, Yabe Hiroshi	4. 巻 197
2. 論文標題 Memoryless Quasi-Newton Methods Based on the Spectral-Scaling Broyden Family for Riemannian Optimization	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Optimization Theory and Applications	6. 最初と最後の頁 639 ~ 664
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10957-023-02183-7	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 Y. Narushima and T. Hirano	4. 巻 -
2. 論文標題 Some robust supply chain network equilibrium models	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of International Conference on Nonlinear Analysis and Convex Analysis-International Conference on Optimization: Techniques and Applications	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 S. Nakayama and Y. Narushima	4. 巻 -
2. 論文標題 Global convergence of a proximal memoryless symmetric rank one method for minimizing composite functions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of International Conference on Nonlinear Analysis and Convex Analysis-International Conference on Optimization: Techniques and Applications	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 Hirano Tatsuya, Narushima Yasushi	4. 巻 53
2. 論文標題 Robust Supply Chain Network Equilibrium Model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Transportation Science	6. 最初と最後の頁 1196 ~ 1212
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1287/trsc.2018.0843	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 Nakayama Shummin, Yasushi Narushima and Hiroshi Yabe	4. 巻 15
2. 論文標題 Memoryless quasi-Newton methods based on spectral-scaling Broyden family for unconstrained optimization	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Industrial & Management Optimization	6. 最初と最後の頁 1773 ~ 1793
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3934/jimo.2018122	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 成島康史 平野達也	4. 巻 2069
2. 論文標題 需要の不確実性を考慮したロバストサプライチェーン均衡モデル	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 京都数理解析 研究所講究録	6. 最初と最後の頁 207 ~ 218
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 -

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Yasushi Narushima and Shoma Uda
2. 発表標題 Biofuels supply chain network equilibrium model in the aviation industry
3. 学会等名 The 7th Asian Conference of Management Science and Applications (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yasushi Narushima, Shumin Nakayama, and Hiroshi Yabe
2. 発表標題 Nonmonotone proximal structured quasi-Newton methods based on the Broyden family
3. 学会等名 The Third Pacific Optimisation Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yasushi Narushima, Antoine J.V. Vades, and Hiroshi Ben
2. 発表標題 Newton-type proximal gradient method for multi-objective optimization with composite D.C. functions
3. 学会等名 10th International Congress on Industrial and Applied Mathematics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木勸智, 李在沿, 中町優希, 丹野淳, 菊地卓郎, 松本行真, 成島康史
2. 発表標題 セルベースモデルを用いた最適津波避難経路について-いわき市江名地区の事例-
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会2024年春季研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 山本聖真, 矢部博, 成島康史
2. 発表標題 二段階最適化問題に対する最適値関数を用いた内点法
3. 学会等名 日本応用数学会第20回研究部会連合発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 宇田翔馬, 成島康史
2. 発表標題 航空業界における持続可能な航空燃料を考慮したサプライチェーンネットワーク均衡モデル
3. 学会等名 日本経営工学会秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中山舜民, 成島康史, 矢部博
2. 発表標題 構造化Broyden公式族に基づいたニュートン型近接勾配法
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会2023年秋季研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 成島康, Vades, Antoine, 辺 浩
2. 発表標題 Global convergence of a Newton-type proximal gradient method for multi-objective optimization with composite D.C. functions
3. 学会等名 日本応用数理学会2022年度年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 赤沼陽太郎, 成島康史
2. 発表標題 CVaRレシオ最大化に基づく分布的ロバストポートフォリオ選択問題について
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会2022年秋季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 成島康史
2. 発表標題 サービス品質を考慮したサプライチェーン均衡モデルについて
3. 学会等名 日本経営工学会秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 土屋佑太, 成島康史
2. 発表標題 分布的ロバスト最適化に基づく安全な経路選択問題について
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会2023年春季研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yasushi Narushima
2. 発表標題 Some robust supply chain network equilibrium models
3. 学会等名 International Conference on Nonlinear Analysis and Convex Analysis-International Conference on Optimization: Techniques and Applications (NACA-ICOTA2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shummin Nakayama and Yasushi Narushima
2. 発表標題 Global convergence of a proximal memoryless symmetric rank one method for minimizing composite functions
3. 学会等名 International Conference on Nonlinear Analysis and Convex Analysis-International Conference on Optimization: Techniques and Applications (NACA-ICOTA2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中山舜民, 成島康史
2. 発表標題 メモリーレス対称ランクワン法に基づいたニュートン型近接勾配法の大域的収束性について
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会2019年秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasushi Narushima and Tatsuya Hirano
2. 発表標題 Robust supply chain network equilibrium model with random demands
3. 学会等名 23th International Symposium of Mathematical Programming (ISMP2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shummin Nakayama, Yasushi Narushima and Hiroshi Yabe
2. 発表標題 Inexact proximal memoryless spectral- scaling MBFGS method
3. 学会等名 23th International Symposium of Mathematical Programming (ISMP2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中山舜民 成島康史 矢部博
2. 発表標題 メモリーレスBroyden 公式族に基づいた非厳密Newton 型近接勾配法
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会2019 年春季研究発表会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

慶應義塾研究者情報データベース
https://k-ris.keio.ac.jp/html/100014909_ja.html

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
研究協力者	矢部 博 (Yabe Hiroshi) (90158056)	東京理科大学・データサイエンスセンター・教授 (32660)	
研究協力者	中山 舜民 (Nakayama Shummin) (90847196)	電気通信大学・-パワードエネルギー・システム研究センター・助教 (12612)	

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
---------	---------