

令和元年6月24日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H02971

研究課題名(和文) ゲーム理論アプローチによる動的再構成可能なサプライチェーンの最適化基盤構築

研究課題名(英文) Game Theoretical Approach for Development of Optimization Methods for Dynamic Reconfigurable Supply Chains

研究代表者

西 竜志 (NISHI, TATSUSHI)

大阪大学・基礎工学研究科・准教授

研究者番号：10335581

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,300,000円

研究成果の概要(和文)：グローバルサプライチェーンにおける意思決定主体間の主従関係や契約、取引先および生産計画を需要状況やリスク等に応じて動的に組み変えることができる動的再構成可能なサプライチェーンの最適化手法を開発した。各プレイヤーの協力関係や非協力関係を考慮したゲーム理論アプローチに基づく最適化手法を開発し、最適化アルゴリズムの性能評価を行うとともに、パラメータ変化に対するサプライチェーンの適応性や非対称情報下での最適化性能の評価を行った。生産システム、サプライチェーン、システム最適化の研究者がモデルを共有し、性能評価を行うことで最適化手法を体系化し、ゲーム理論アプローチによる最適化基盤を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は、環境変化に柔軟に対応できる動的サプライチェーンを実現するためのゲーム理論アプローチを用いた最適化手法を構成する基本アルゴリズムの基盤となり、ゲーム理論アプローチによる新しい最適化手法の有効性を実データにより示したという点で大きな意義を持つ。また、動的サプライチェーンを最適化するために有用なゲーム理論アプローチにおける多階層最適化などの様々な最適化手法を構築した点で当分野の学術的進展に大きく貢献したといえる。

研究成果の概要(英文)：We develop dynamically reconfigurable supply chain optimization methods that can dynamically change its software relationships among contractors, customers, and production plans in global supply chains to deal with uncertainty, risks, and unforeseen changes. The optimization methods based on game theoretical approach that takes into consideration the cooperative relationships and non-cooperative relationships of supply chain players are developed. The performance of the algorithm is evaluated under several parameter changes and under asymmetric information. Researchers of production systems, supply chains, and systems optimization shared common models, and the optimization methods are organized systematically by performing performance evaluation to build the foundation of optimization methods by game theoretical approach.

研究分野：システム最適化

キーワード：サプライチェーン ゲーム理論 最適化 生産システム シュタッケルベルグ均衡 通信サプライチェーン 多階層最適化 動的ゲーム

1. 研究開始当初の背景

グローバルサプライチェーンの進展とともに、サプライチェーン(SC)のメンバは、国内外の複数企業に広がり、受注から調達、生産、配送の全体最適化を SC 全体として実現することが求められる。従来、SC 最適化には、SC 全体を 1 つの最適化問題として記述し、解を得るという方法論が一般的であった。しかしながら、グローバル SC では、複数企業間の利害関係や契約関係を考慮した、ゲーム理論的アプローチによる計画手法の確立が急務となっている。ゲーム理論的アプローチを用いた SC 最適化では、企業間の提携関係、不確定性、リスクを踏まえて、複数の最適化問題の均衡解を定義し、均衡解を効率良く得る最適化アルゴリズムの開発が必要である。

従来研究では、SC の構成、すなわち、SC のメンバ、主従関係、契約条件は既知、または制約条件と仮定してきた。SC の構成とは、生産する製品品目やサプライヤ、販売者との主従関係、契約、取引状況(ハードウェア部分ではなく、ソフトウェア構成部分)を表す。近年、情報システムの普及や企業間系列の解体により、各企業は取引先を自由に選択できるようになってきた。特定の取引先企業のみと取引を行う従来の固定的な SC に対して、取引先を契約ごとに変更できる柔軟な SC を動的サプライチェーンと呼ぶ。現実のグローバル SC では、気候変動による需要の変化、新規製品の投入、信用リスクや為替の変動、災害リスクなどの不確実性に対し、できる限り必要なリソース量を少なくして、変化に柔軟に対応できる再構成可能な SC 構成の構築が求められる。

SC 構成の決定問題においては、各企業の利益最大化やメンバ間の主従関係、協力・非協力関係を考慮して、Win-Win 関係となるための交渉や取引に関わる意思決定を行うために、国内外の研究では、SC メンバの個々の最適化問題をモデル化し、メンバ間の相互作用によって全体の意思決定を行うというゲーム理論による解析が行われている。これらの研究の多くは、解析可能な数理モデルを対象とした分析が主であり、効率的に均衡解を得るためのアルゴリズムに関する研究は少ない。SC を構成するメンバ数が増加すると均衡解の計算量が指数関数的に増加する(NP 困難)。現実の SC では、解が関数として陽に表現できる場合は少なく、実用的時間で均衡解の最適解、または近似解を得る効率良い最適化アルゴリズムの開発が求められる。一方、ゲーム理論による SC の解析の多くは単一期間を対象としており、動的状況での SC の解析手法は確立していない。

2. 研究の目的

本研究では、動的 SC 再構成問題のモデル化とゲーム理論アプローチによる最適化アルゴリズムの体系化することで最適化基盤を構築することを目的とする。SC 計画問題を多期間問題に拡張し、複数企業間の均衡解を動的 SC 構成問題と定義し、高性能な計算機資源を用いて解を得るためのシステム最適化技法の方法論を確立する。これにより、グローバル SC を想定して、新製品投入時の急峻な動的需要に対する動的 SC の最適構成法、災害等により物流拠点が遮断された場合のグローバル SC 構成の最適復帰方法、将来に均衡価格となる各企業の価格付け問題、企業の長期 CSR への投資活動を協力して行う際のリーダ決定問題などを解決する方法論を提供する。国内外のグローバル企業が、研究成果を SC 構成の将来予測や災害対応に利用できるようにする。機械生産工学、サプライチェーン、システム最適化の研究者や分野の異なる海外研究者が協力し、動的 SC 最適化の研究基盤を構築することを目的とする。

3. 研究の方法

以下の方法，および手順による研究を進めた．

- 1) 静的サプライチェーン構成問題のモデル化とアルゴリズムの検討
 - 1-1. サプライチェーン構成問題のモデリングとシミュレーション
サプライヤ，生産者，販売者から構成されるグローバル SC における取引の決定，複数生産拠点での生産計画と配送問題，生産計画とレイアウト計画問題などにおける入出力情報を明確化し，SC 構成問題のモデル化のシミュレーションソフトウェアを構築した．
 - 1-2. サプライチェーン構成問題の最適化アルゴリズムの検討
SC 構成問題を非協力ゲーム理論，または協力ゲーム理論に基づいて最適化問題を記述し，最適化アルゴリズムを検討した．
 - 1-3. 均衡解を全体最適解に近づけるための方法論の検討
均衡解を全体最適解に近づける条件を明らかにし，メンバー間に必要な契約関係を検討した．

- 2) 動的サプライチェーン構成問題のシミュレーションと最適化手法の検討
 - 2-1. 動的サプライチェーンのモデリング
多期間の動的 SC の構成問題を考え，時間とともに変化する価格等のパラメータ変動を想定した動的 SC 構成問題のモデル化を行った．
 - 2-2. 動的ゲームによる解析と最適化アルゴリズムの検討
最適応答関数が陽に記述できる場合とそうでない場合に分類し，完全情報下で，均衡解を定義し，動的な条件下で均衡解を得るための最適化アルゴリズムを検討した．
 - 2-3. 均衡解を全体最適解に近づけるための方法論の検討
均衡解は全体最適解とならない場合に，均衡解を全体最適解に近づけるための条件を明らかにし，SC のメンバー間に必要な契約やメカニズムを検討した．

- 3) 非対称情報下における動的サプライチェーン構成問題のモデル化と解法
 - 3-1. 情報の非対称が存在する動的サプライチェーン構成問題のモデル化
品質情報などに情報の非対称性が存在する場合の動的 SC 最適化のモデル化を行った．
 - 3-2. 不足情報の推定方法と最適化アルゴリズムの検討
非対称性が存在する問題に対し，利用可能な情報から不足している情報を推定する方法を検討する．得られた推定値を用いて，均衡解を得るためのアルゴリズムを検討した．

- 4) ゲーム理論的アプローチによる動的サプライチェーン最適化の実問題への応用
 - 4-1. 拠点配置と生産計画の統合最適化問題への適用
現実のグローバル SC を対象として，各地域の需要を満たすための部品調達拠点，生産拠点，販売拠点の選択と各拠点での生産計画の調整の最適化問題への適用を行った．
 - 4-2. 配送計画と複数拠点生産計画の統合最適化問題への適用
生産拠点での生産計画と資材調達，販売における配送計画の同時最適化問題へ適用した．

4-3. 遠隔通信サービスサプライチェーンの設計問題の適用

複数のサービスプロバイダと通信インフラプロバイダ間での価格調整と契約決定の同時最適化問題を多期間モデルへ拡張し、動的需要を想定した上での動的 SC の構成法を検討した。

4. 研究成果

得られた研究結果の概要は以下である。

- 1) 複数企業のサプライチェーンを調査し、制約条件と目的関数を抽出した。グローバルサプライチェーンを対象として、構成するメンバー間の主従関係の入替えを可能とするサプライチェーン構成の最適化問題の定義と最適化アルゴリズムの開発を行った。単一生産者と単一販売者から構成されるサプライチェーンを対象とした多期間生産計画問題において、Stackelberg 均衡解を導出し、均衡解が全体最適となる数量割引契約を導出した。下位の応答関数が陽に表現できない場合の Stackelberg 均衡解を効率良く得るための最適化アルゴリズムを開発した。多期間生産計画問題において、期間の途中で主従関係を入れ替えることにより、全体として、より望ましい解が存在することを明らかにした。
- 2) ネットワーク外部性を考慮した通信サプライチェーンを対象としたゲーム理論モデルを構築し、通信プロバイダとサービスプロバイダの価格付け問題に対する非協力ゲーム理論における Nash 均衡解、Stackelberg 解を導出した。協力ゲーム理論における Nash 交渉解を定義し、協力ゲーム理論の解が非協力ゲーム理論の解よりも優れていることを示した。
- 3) 不確定需要を考慮した場合、Stackelberg 均衡解を得る際に均衡解が整数変数を含む非凸計画問題として定式化されることを明らかにした。この問題に対する 厳密解法と近似解法を提案し、それらの最適化アルゴリズムの有効性を確認した。供給にリスクのある生産者と販売者から構成される 2 階層サプライチェーンにおいて、需要の不確実性を考慮した場合における主従関係構造の変化に対する総利益の影響を明らかにした。
- 4) 2 階層サプライチェーンにおいて、企業の社会的責任(CSR)活動への投資を考慮したサプライチェーン計画モデルを構築した。最適な CSR 投資を決定するための 2 階層最適化モデルに対するラ グランジュ緩和を用いた最適化技法を構築し 2 者間の契約について検討した。その結果、2 部料金計画契約が両者の意思決定を調整する上で最も効果的であることを明らかにした。
- 5) 不確定需要を考慮した多期間生産計画問題に対して、従来の 2 階層あるいは 3 階層構造などのさまざまな主従関係構造の下で均衡解を効率良く求めることができる近似解法を提案し、その有用性を確認した。ゲーム理論アプローチによる多期間サプライチェーン構成問題の基本的解法として、開発した基本アルゴリズムの開発は大きな意義を持つ。
- 6) 供給にリスクのある生産者と販売者から構成される 3 階層サプライチェーンにおいて、ゲーム理論アプローチを用いて、需要の不確実性を考慮した場合における 主従関係構造の変化に対する総利益の影響を明らかにした。供給リスクを有する現実のサプライチェーンにおいてゲーム理論アプローチによる解析の有用性を示した点で大きな意義を持つ。
- 7) 配送計画と拠点配置計画問題において、配送事業者による中間拠点配置問題と顧客による配送手段決定問題の 2 レベルで構成される多期間最大被覆拠点配置計画問題を構成し、Benders 分解法に基づく新たな効率解法を提案した。製品の部品構成と生産計画の同時最適化を可能とする製品構成とサプライチェーン構成の同時最適化モデルを開発した。ゲー

ム理論アプローチによる Stackelberg 均衡解を用いることにより，より効率よく合理的な解を導出できることが示された。

以上の一連の研究成果は，環境変化に柔軟に対応できる動的サプライチェーンを実現するためのゲーム理論アプローチを用いた最適化手法を構成する基本アルゴリズムの基盤となり，ゲーム理論アプローチによる新しい最適化手法の有効性を実データにより示したという点で大きな意義を持つ。また，動的サプライチェーンを最適化するために有用なゲーム理論アプローチにおける多階層最適化などの様々な最適化手法を構築した点で当分野の学術的進展に大きく貢献したといえる。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 9 件)

- 1) Roghayeh Alizadeh, Tatsushi Nishi, Dynamic p+q Maximal Hub Location Problem for Freight Transportation Planning with Regional Markets, Advance in Mechanical Engineering, Vol. 11, No. 2, pp. 1-13, 査読有, 2019.
- 2) Tatsushi Nishi, Soh Sakurai, Dynamic Reconfiguration of Leadership in Multi-Period Supply Chain Planning, Procedia CIRP, pp. 515-519, 査読有, 2018.
- 3) Takuya Tsuboi, Tatsushi Nishi, Guoqing Zhang, Analysis of Leadership Structures for Two-Echelon Supply Chains Involving Multiple Risky Suppliers, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, JAMDSM0070, 査読有, 2018.
- 4) Tatsushi Nishi, Soh Sakurai, Effects of Reconfigurations for Multi-Period Production Planning under Demand Uncertainty, Procedia CIRP, Vol. 63, pp. 260-264, 査読有, 2017.
- 5) Okihiro Yoshida, Tatsushi Nishi, Optimization of Multi-Period Bilevel Supply Chain Planning for Single Supplier and Single Retailer under Demand Uncertainty, Transaction of the Institute of Systems, Information and Control Engineers, Vol. 30, pp. 73-80, 査読有, 2017.
- 6) Tatsushi Nishi, Okihiro Yoshida, Optimization of Multi-period Bilevel Supply Chains under Demand Uncertainty, Procedia CIRP, Vol. 41, pp. 508-513, 査読有, 2016.
- 7) Tsubasa Doi, Tatsushi Nishi, Application of Two-Phase Decomposition Algorithm to Practical Airline Crew Rostering Problem, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing, JAMDSM0036, 査読有, 2016.
- 8) Jun Wu, Xu Chui, Tatsushi Nishi, Jian Li, Game Theoretic Approach for Coordination of Telecommunication Supply Chain under Network Externality, International Journal of Innovative Computing, Information and Control, Vol. 12, No. 3, pp. 915-927, 査読有, 2016.
- 9) Sisi Yin, Tatsushi Nishi, Guoqing Zhang, A Game Theoretic Model for Coordination of Single Manufacturer and Multiple Suppliers with Quality Variations under Uncertain Demands, International Journal of Systems Science: Operations & Logistics, Vol. 3, No. 2, pp. 79-91, 査読有, 2016.

〔学会発表〕(計 22 件)

- 1) Alizadeh Roghayeh, Tatsushi Nishi, Mixed-Integer Bi-Level Dynamic Hub Location Problem for Freight Transportation, International Symposium on Flexible Automation 2018, 査読有, 2018.
- 2) 櫻井創, 西竜志, 二つの生産者と販売者を有するサプライチェーンにおける主従関係構造の解析, 生産システム部門研究発表講演会 2018, 2018.
- 3) 櫻井創, 西竜志, 生産者の参入・撤退を考慮した動的な主従関係入れ替え可能な多期間生産計画問題, スケジューリングシンポジウム 2017, 2017.
- 4) 坪井拓哉, 西竜志, 乾口雅弘, 納入が不確実なサプライヤを伴うサプライチェーンのリーダシップ構造の解析, 第 61 回システム制御情報学会研究発表講演会, 2017.
- 5) 青山拓弥, 西竜志, 市場影響を考慮した 2 階層サプライチェーン計画問題のモデル化と解法, 日本機械学会生産システム部門講演会 2017, 2017.
- 6) 櫻井創, 西竜志, 動的な主従関係入れ替えを考慮した多期間生産計画問題, 日本機械学会生産システム部門講演会 2017, 2017.
- 7) Soh Sakurai, Tatsushi Nishi, Game Theoretic Analysis of Supply Chain Configurations, Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management 2016, 査読有, 2016.

- 8) 青山拓弥, 西竜志, 市場への影響を考慮したサプライチェーン計画問題のモデル化と解法, スケジューリングシンポジウム 2016, 2016.
- 9) 佐々木大輝, 西竜志, 動的バース割当問題に対する組合せオークションアルゴリズム, スケジューリングシンポジウム 2016, 2016.
- 10) 櫻井創, 西竜志, 乾口雅弘, ゲーム理論アプローチによるサプライチェーン構成の解析, 第 60 回システム制御情報学会研究発表講演会, 2016.
- 11) 西竜志, 大倉達也, マスヒューリスティクスによるスケジューリング問題の解法, 第 60 回システム制御情報学会研究発表講演会, 2016.
- 12) 西竜志, 谷水義隆, 貝原俊也, ゲーム理論アプローチによるサプライチェーン最適化のモデル, 日本機械学会生産システム部門講演会 2016, 2016.
- 13) Okihiro Yoshida, Tatsushi Nishi, Replacement of Leader-Follower Relation in Multi-Period Supply Chain Planning under Demand Uncertainty, Proceedings of International Symposium on Flexible Automation 2016, pp. 1016-1020, 査読有, 2016.
- 14) Jiali Zhu, Toshiya Kaihara, Nobutada Fujii, Daisuke Kokuryo, Extended EOQ Model Considering Recycle, Repair and Reuse in Reverse Supply Chain with Two Types of Demand Fluctuation, Proceedings of International Symposium on Flexible Automation 2016, pp. 153-160, 査読有, 2016.
- 15) Okihiro Yoshida, Tatsushi Nishi, A solution algorithm for leader-follower multi-period supply chain under demand uncertainty, Proceedings of International Symposium on Scheduling 2015, 査読有, 2015.
- 16) Daiki Sasaki, Tatsushi Nishi, Combinatorial auction algorithm with price-adjustment mechanism for airline crew scheduling problems, Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management 2015, 査読有, 2015.
- 17) Takuya Aoyama, Tatsushi Nishi, A solution procedure based on Lagrangian relaxation for supply chain planning problem with CSR investment, Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management 2015, 査読有, 2015.
- 18) 青山拓弥, 西竜志, 乾口雅弘, CSR 投資を考慮したサプライチェーン計画問題のラグランジュ緩和による解法, 第 59 回システム制御情報学会講演会, 2015.
- 19) 佐々木大輝, 西竜志, 乾口雅弘, 価格調整メカニズムを用いた組合せオークションアルゴリズムによる航空乗務員スケジューリング, 第 59 回システム制御情報学会講演会, 2015.
- 20) 吉田興広, 西竜志, 不確定需要下における生産者と販売者の多期間非線形 2 レベル計画問題に対する解法の検討, 第 58 回自動制御連合講演会, 2015.
- 21) 青山拓弥, 西竜志, 乾口雅弘, CSR 投資を考慮した不確定需要下におけるサプライチェーン計画問題のモデル化と解法, スケジューリングシンポジウム 2015, 2015.
- 22) 佐々木大輝, 西竜志, 乾口雅弘, ラグランジュ緩和を用いた組合せオークションアルゴリズムによる航空乗務員運用計画問題能力解法 - 勝者決定問題の近似解法 -, 第 58 回自動制御連合講演会, 2015.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者: 西 竜志 NISHI TATSUSHI
大阪大学 基礎工学研究科 准教授 10335581

(2) 研究分担者
研究分担者氏名: 谷水 義隆 TANIMIZU YOSHITAKA
大阪府立大学 工学研究科 教授 60275279

(2) 研究協力者
研究協力者氏名: 貝原 俊也 KAIHARA TOSHIYA
神戸大学 システム情報学研究科 教授 70289114