

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01565

研究課題名(和文) 独立した経済主体間の協同事業に対する数理およびシミュレーションモデルの構築と応用

研究課題名(英文) Development of mathematical and simulation models for cooperative ventures between independent economic agents and their applications

研究代表者

西崎 一郎 (Nishizaki, Ichiro)

広島大学・先進理工系科学研究科(工)・教授

研究者番号：80231504

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 7,200,000円

研究成果の概要(和文)：配送業者と製造業者のサプライチェーン管理に関する2レベル生産輸送計画問題を取り上げ、製造業者の生産計画情報の不確実性を考慮して、生産計画問題をDEAの観点から定式化し、その妥当性を検証した。さらに、施設開設と物流に関する2段階サプライチェーンモデルを定式化し、不確実な利益を最大化した。サプライチェーンの混乱に対処するため、管理者のリスク態度を考慮したモデルの定式化を提案した。また、複数企業が不確実な資源を共有する多期間線形生産問題における利益の最大化において、プレイヤーのリスク態度を考慮した協力ゲームを定式化し、さらに温室効果ガスの排出量の削減を考慮した2目的協力ゲームとして定式化した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

経団連は民間と官、あるいは企業間の協調の重要性を指摘している。一方、近年の度重なる自然災害を経て、災害に対する事業の持続可能性は喫緊の課題である。このような背景のもと、本研究では関連する組織や企業などの経済主体が独自の戦略に従いながらも、互いに協力することによって、収益を向上させるだけでなく、経済主体の経営基盤の更なる健全化や頑健化を考える。経済主体間での協調的運営をモデル化するが、必ずしも経済主体が完全に協力し、最終的に経済主体を統合することはないと考える。そのため、各経済主体の独自の活動と経済主体の協調的運営を同時に考慮するモデル化とその計算手法をあらたに開発した。

研究成果の概要(英文)：We dealt with a two-level production and transportation planning problem for supply chain management between a distributor and a manufacturer, and formulated the production planning problem from the perspective of DEA, taking into account uncertainty of the manufacturer's production technology information. A two-stage supply chain model for facility opening and transportation was formulated to maximize uncertain profits. In order to deal with disruptions in the supply chain, we proposed a model taking into account the risk attitude of the manager. To maximize the profit in a multiperiod linear production problem in which multiple firms pool their uncertain resources, we formulated a cooperative game taking into account the risk attitudes of players, and furthermore extended it to a two-objective cooperative game for the profit maximization and the reduction of greenhouse gas emissions.

研究分野：社会システム工学

キーワード：サプライチェーン管理 DEA生産問題 不確実性 多目的多期間生産ゲーム

## 1. 研究開始当初の背景

科学技術政策の基本指針として、政府は現在、Society 5.0 を提唱している。さらに経団連は Society 5.0 の実現のために提示したプロジェクトのなかで、民間と官、あるいは企業間の協調の重要性を指摘している。一方、近年の度重なる自然災害を経て、国会でも「エネルギー供給強靱化法」が通過したように、災害に対する事業の持続可能性は喫緊の課題である。このような背景のもと、日本の製造企業は非常時にも各企業の生産活動が継続できるように連携作りに着手しており、サプライチェーンの相互活用や資源の融通などを通じて、非常時でも各企業が生産を継続できる体制を築けるように事業継続計画を強化している。具体的に例えば、ビール大手、日清食品、コンビニ 3 社の商品の共同配送などの物流関連における競合他社の協働の事例が新聞紙上でもしばしば報告されており、企業間の協調や協力の試みの重要性を再認識させている。本研究では関連する組織や企業などの経済主体が独自の戦略に従いながらも、互いに協力することによって、収益を向上させるだけでなく、経済主体の経営基盤の更なる健全化や頑健化をもたらすことができるのかを明らかにすることを試みる。

## 2. 研究の目的

本研究では、互いに競合する経済主体が事業の一部で協力する生産およびサービス形態をモデル化し、部分的な協調的生産活動の可能性や妥当性を数理的な分析およびシミュレーション分析によって明らかにすることを目的とする。数理的な分析に関しては、特に電力システムや生産流通システムのように多くの利害関係者を含む問題を対象とする場合、単一の目的だけでなく、場合によっては複数の互いに競合する目的を同時に考慮した最適化問題として数理モデルを定式化する必要がある。さらに、需要の推定などはさまざまな不確実な事象によって支配され、問題の定式化には確率的な不確実性を考慮しなければならない。すなわち、多目的および確率的な最適化を含む数理モデルを構築し、最終的には現実問題のデータを利用した数値的な分析までを実施する。とくに、複数の経済主体がモデルに含まれるために、他者の情報が必ずしも十分に入手できないことを想定して、観測可能で関連する入出力データを用いた定式化を採用する。複数の経済主体の競合と協力を表現するための不確実性下の二段階モデルにおいては、需要などの不確実なパラメータが確定した第二段階で、不確実性が解消した時のインバランスを経済主体間で協力して解消し、最適行動を取ることを前提に、第一段階で各経済主体は独自に意思決定する。第二段階ではモデルを協力ゲームで定式化する。例えば協同事業による総利益の最大化などを表現する最適化問題から協力ゲームを定義し、問題に応じた適切な解概念を採用し、各経済主体への利益の配分あるいは費用の分担問題を考察する。また、第一段階の非協力ゲームでは関連する経済主体間での均衡点を計算し、均衡点での各経済主体の振る舞いを分析する。これまでの不確実性下の二段階モデルの研究では、概念的あるいは定性的な考察が主体で、均衡点や利得配分の計算方法についての研究は十分ではなく、現実問題への適用はなされていない。本研究では、シナリオベースの定式化を採用した計算方法を新たな開発し、現実問題への適用を試みる。とくに、複数の経済主体がモデルに含まれるために、他者の情報が必ずしも十分に入手できないことを想定して、観測可能で関連する入出力データを用いた定式化を採用する。

## 3. 研究の方法

本研究では、経済主体間の競合と事業連携に関する方法論の開発とともに、生産流通や電力システムにおけるサプライチェーンの分野を対象に開発した方法論を適用する。需要などの確率変数を含む問題に対して、リソースをもつ二段階確率計画を採用すると同時に第二段階で確率変数が実現値を取ったときに、そのインバランスを解消するための経済主体間の協力行動を協力ゲームで記述する。協力ゲームの解から第二段階の各経済主体の利得が確定するので、第一段階での各経済主体の目的関数にこの利得を組み込む。各経済主体の行動はこのような二段階の最適化問題で記述できる。複数の経済主体の二段階最適化問題に関する Nash 均衡を数値的に分析する方法論を開発した。

従来の研究では、経済主体の目的関数は収入の期待値などが用いられていたが、本研究では、各経済主体のリスク態度を考慮すべきであると考え、フラクティルモデルを採用した。数値的に分析可能にするために、確率変数は離散確率変数を採用した。すなわち、多数のシナリオを構成し、シナリオベースのモデルを考え、均衡制約を含む最適化問題の解法を開発した。また、第二段階での協力ゲームの解として、計算量が少なく、適切な経済的解釈が可能な双対最適解を用いたコアに含まれる安定な割当て規則を採用した。さらに、公理的な基礎をもつ Shapley 値も取扱う。とくに、Shapley 値の計算には多くの計算負荷が見込まれるが、ニューラルネットワークを

用いて、サンプリングされたデータから、Shapley 値を推測し、計算負荷を削減する手法を開発した。また、サプライチェーンの問題においては、関連企業への発注をモデル化する場合があるが、他社での生産モデルを定式化する際に、対応する生産技術のパラメータは正確には見積れないことから、観測可能な入出力データを用いた定式化を試みた。

#### 4. 研究成果

主要な成果を論文としてまとめた。その要旨を以下に示す。

- (1) サプライチェーンマネジメントの分野における 2 レベルの生産・流通計画問題に焦点を当て、リーダがフォロワーの製造技術を十分に知らない状況を検討した。このような状況では、製造技術を表すパラメータをフォロワーの生産計画問題の定式化に明示的に使用することはできないので、データ包絡分析 (DEA) の考え方を取り入れ、フォロワーの生産活動から観測された入出力データを使用して製造技術を暗黙的に表現する定式化を提案した。フォロワーが複数の生産設備を持っていると仮定し、観測可能な入出力データの 2 つの可能性を考慮し、対応する 2 つの生産計画問題を定式化した。これらの DEA アプローチの妥当性を明らかにするために、数値例を使用して、従来の技術係数による定式化と比較した。
- (2) 複数の企業が共同で何らかの財を生産する線形生産計画問題を取り扱う Owen (1975) は最適生産計画を得るための線形計画問題を定式化し、これから定義される協力ゲームを通じて、企業の共同利益の配分方式を提示している。しかし、資源の価値は全体提携の線形計画問題の最適双対解、すなわち潜在価格によって測定されるため、全体提携内の余剰資源には価値がなく、プレイヤーは保有する余剰資源に対する報酬を受け取らない。さらに、一部の提携が形成できない場合でも、全体提携のみの線形生産計画問題の最適双対解を使用して計算されるため、Owen 解は変化せず、そのような状況の影響を受けない。これらの困難に対処するため、最大化された利益だけでなく余剰資源の価値も考慮する特性関数を導入して線形生産ゲームの定義を改訂する。改訂された線形生産ゲームには、以下の好ましい性質を持つ解の概念を導入する。(i) すべての提携の資源の潜在価格が、プレイヤーの利得を計算するために使用される。(ii) 一部の提携が形成できない場合、そのような状況は利得に適切に反映される。(iii) 提案された利得ベクトルは、改訂された線形生産ゲームのコアに属する。これらの性質が反映されていることを示すために、数値例を示し、対応する提案された利得ベクトルを計算する。最後に、提案された解概念の公理的な特徴付けを示す。
- (3) 利益最大化とサプライチェーンの混乱への適応性のトレードオフを考慮し、サプライチェーンの構成と配送計画の意思決定について検討した。サプライチェーンの混乱は、設備の事故や災害によって引き起こされる。本研究では、混乱が発生した場合のサプライチェーンの最適な構成と配送計画および混乱が発生していない場合の利益最大化計画における顧客への最適供給量を維持しながら追加設備を開発することを検討した。需要と供給に不確実性が存在すると仮定し、単純リコースをもつ 2 段階モデルを定式化し、第 1 段階でサプライチェーンの構成を決定し、需要と供給が実現した後の第 2 段階で配送を決定する。このようなサプライチェーンの構成と配送に対して、利益最大化とサプライチェーンの混乱への適応性のトレードオフを考慮した意思決定手法を提案した。さまざまな程度の混乱に対する数値実験を行い、提案した意思決定手法の有効性を検証した。
- (4) 線形生産ゲームにおいて利益と温室効果ガス削減の最大化の 2 つの目的をもつ多期間の生産計画を取扱い、さらに各期の資源量に不確実性があると考えられる。そのような多期間確率的線形生産ゲームにおいて、協同事業を行うプレイヤーのリスクに対する態度を考慮するために、フラクティルモデルを採用し、確率変数として表現される利益および温室効果ガス削減量の最大化の 2 目的間のトレードオフを考慮した。2 目的多期間確率的線形生産問題から、多目的協力ゲームを生成し、コアに属するプレイヤーへの利得割当てを提案した。数値例を通じて提案モデルの妥当性と妥当性を示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tomohiro Hayashida, Ichiro Nishizaki, Shinya Sekizaki, Junya Okabe	4. 巻 11
2. 論文標題 DEA approaches for multiperiod two-level production and distribution planning problems	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Mathematics	6. 最初と最後の頁 4492
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/math11214492	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 Ichiro Nishizaki, Tomohiro Hayashida, Shinya Sekizaki, and Kenta Tanaka	4. 巻 31
2. 論文標題 Averaged dual solution for linear production games and its characterization	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Central European Journal of Operations Research	6. 最初と最後の頁 523-555
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10100-022-00820-6	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 Ichiro Nishizaki, Tomohiro Hayashida, Shinya Sekizaki, and Kojiro Furumi	4. 巻 320
2. 論文標題 A two-stage linear production planning model with partial cooperation under stochastic demands	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Annals of Operations Research	6. 最初と最後の頁 293-324
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10479-022-05056-w	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 Ichiro Nishizaki, Tomohiro Hayashida, Shinya Sekizaki, and Naomichi Tani	4. 巻 online
2. 論文標題 Expectation and fractile models for decentralized distribution systems under demand uncertainty and their computational methods	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Operational Research	6. 最初と最後の頁 online
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1504/IJOR.2021.10044002	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 Ichiro Nishizaki, Tomohiro Hayashida, Shinya Sekizaki, and Junya Okabe	4. 巻 300
2. 論文標題 Data envelopment analysis approaches for two-level production and distribution planning problems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 European Journal of Operational Research	6. 最初と最後の頁 255-268
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ejor.2021.07.047	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 -

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Tomohiro Hayashida, Ichiro Nishizaki, Shinya Sekizaki, and Junya Okabe
2. 発表標題 DEA approaches for two-level production and distribution planning problems
3. 学会等名 Proceedings of the 6th International Conference on Information Science and Systems (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shinya Sekizaki, Ichiro Nishizaki, and Tomohiro Hayashida
2. 発表標題 Robust price-based demand response framework for flexibility provision in distribution systems
3. 学会等名 Proceedings of the IEEE PES ISGT Europe 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佃 圭悟, 西崎 一郎, 林田 智弘, 関崎 真也
2. 発表標題 サプライチェーンにおける利益と混乱リスクのトレードオフ分析
3. 学会等名 令和4年度 日本知能情報ファジィ学会中国・四国支部大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 丸尾 英彰, 西崎一郎, 林田 智弘, 関崎 真也
2. 発表標題 確率的線形生産ゲームに対するフラクタイルモデルアプローチ
3. 学会等名 2022年 日本オペレーションズ・リサーチ学会 中国・四国地区 SSOR
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佃 圭悟, 西崎 一郎, 林田 智弘, 関崎 真也
2. 発表標題 不確実な需要を持つサプライチェーンにおけるリスク態度を考慮した利益の最大化: フラクタイルモデルアプローチ
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会 中国・四国地区 SSOR
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hitoshi Yano and Ichiro Nishizaki
2. 発表標題 Interactive decision making for multiobjective bimatrix games with fuzzy payoffs based on possibility measure
3. 学会等名 Proceedings of the 19th World Congress of the International Fuzzy Systems Association (IFSA), the 12th Conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology (EUSFLAT) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hitoshi Yano and Ichiro Nishizaki
2. 発表標題 Multiobjective bimatrix game with fuzzy payoffs and its solution method using necessity measure and weighted tchebycheff norm
3. 学会等名 Proceedings of the 13th International Joint Conference on Computational Intelligence (IJCCI 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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 分担者	林田 智弘  (Hayashida Tomohiro)  (20432685)	広島大学・先進理工系科学研究科(工)・准教授   (15401)	
研究 分担者	関崎 真也  (Sekizaki Shinya)  (70724897)	広島大学・先進理工系科学研究科(工)・助教   (15401)	

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