

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2023

課題番号：19K15243

研究課題名（和文）データドリブン最適化に基づくマス・カスタマイゼーション生産方式の設計

研究課題名（英文）A Design of a Mass Customization Production System Based on Data-Driven Optimization

研究代表者

大森 峻一（Ohmori, Shunichi）

早稲田大学・理工学術院・准教授

研究者番号：30649348

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：顧客ニーズの多様化に対応するため、多くの製造業では、規模の経済を活かしつつ、消費者個々の好みに個別対応する「マス・カスタマイゼーション」への変革が重要課題である。この二律背反の要求を満たすには、市場・販売データに基づく需要シナリオ作成、需要の不確実性に対して頑健なサプライチェーン設計を、迅速かつ統合的に意思決定する必要がある。本研究では、市場・販売・生産のデータを組織横断的に活用することで、の統合的に意思決定する科学的手法の開発を目的とする。「データドリブン最適化」という新たなモデル化を用いた手法を提案し、有効性を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

迅速な意思決定が求められる昨今において、市場データから多様な顧客ニーズをいち早く理解し、顧客・製品特性に合わせた最適なサプライチェーン設計を行うことは、マス・カスタマイゼーションの実現に向けて強力な意思決定支援ツールとなる。また、上記の目的実現のために、ノンパラメトリック推定と分布的ロバスト最適化を融合した新しい先進的な手法を適用した。SC設計のみならず、大規模データを活用した予測・最適化を統合した意思決定全般への展開が期待できる。また、実企業との共同研究を通じて実データを用いた検証を行った。実証的に研究を評価できたことは社会実装を進める上でも意義が大きい。

研究成果の概要（英文）：To respond to the diversification of customer needs in recent years, many manufacturing industries face the critical challenge of transforming to "mass customization," which combines the economies of scale with personalized responses to individual consumer preferences. To meet these seemingly contradictory demands, it is necessary to make rapid and integrated decisions involving (1) creating demand scenarios based on market and sales data and (2) designing a supply chain robust against demand uncertainties. However, this is not easy due to the need for inter-organizational collaboration.

This study aims to develop a scientific method for integrated decision-making on (1) and (2) by leveraging market, sales, and production data across organizational boundaries. Specifically, we propose a new methodology using a model called "data-driven optimization" and demonstrate its effectiveness.

研究分野：サプライチェーンマネジメント

キーワード：サプライチェーンマネジメント 分布的ロバスト最適化

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

顧客ニーズの多様化は過去にないスピードで加速しており、この変化に対応できない企業は、顧客から選ばれるブランドになることは難しい。このような市場環境の変化に対応するためのサプライチェーン(Supply Chain, 以下 SC) の理想像として、規模の経済を活かしつつ、消費者個々の好みに個別対応する「マス・カスタマイゼーション」への変革が、最重要課題となっている。市場変化の激しい昨今では、変化する顧客ニーズを正確に把握しなければ、誤ったサプライチェーンを設計する恐れがある。このため、個別対応と規模の経済という二律背反の要求を実現するには、事実・データに基づいた意思決定の仕組みを確立する必要がある。近年ではデータ収集技術の発達により、情報インフラは整いつつあり、より統合的な意思決定の期待が高まっている。しかし、どの様にデータを活用し、科学的・定量的に意思決定に結び付けるかは十分に明らかになっていない。したがって、マス・カスタマイゼーションを実現するための科学的方法の構築が望まれている。これまでの人依存のアプローチから脱却し、科学的分析に基づいて、マス・カスタマイゼーションを実現するには、以下の課題を解決する必要がある。

### 【課題 1】市場・販売データに基づく需要シナリオ作成方法の確立

本研究では、市場の動向、需要への影響因子と考えられる外部データを「市場データ」、過去の販売量の時系列的な内部データを「販売データ」と定義する。個別対応のためには、市場・販売データに基づき顧客の購買行動を把握したうえで、需要に影響する因子を定量化し、不確実性の範囲も考慮しながら、正確な需要シナリオを作成することが必要である。

一方で、時には数千点以上になる製品全ての需要動向を常日頃から深く分析し、仮説を立て、検証を行うことは現実的に難しい。また、市場変化が速いため、分析・意思決定に多くの時間を割くことができない。このため、予測の自動化・高度化が必要である。

### 【課題 2】需要の不確実性に対して頑健なサプライチェーン設計方法の確立

近年の SC は、多段階から構成される大規模なシステムである。いつ、どこで生産し在庫すべきか、どの様な経路や手段で運ぶか、という無数の選択肢が存在する。また、規模の経済を活かすためには、プロセスの共通化が必要である。生産・輸配送・在庫保管は、複数製品をまとめることでコストダウンできる。したがって、製品個々の意思決定ではなく、どの部分を共通化すべきかを、無数の選択肢の中から全体最適を検討する必要がある。

上記の課題を解決するために、本研究では「データドリブン最適化」という新しい最適化モデリングの枠組み[5]に着目する。これは、データから確率分布を仮定せずに、頑健な意思決定を行うことができる方法である。単に予測を独立に行い、予測値を最適化の入力情報とするよりも、頑健な意思決定ができることが理論的に示されている。この方法により、市場・販売データから、需要シナリオの生成・シナリオ毎の SC 最適化を統合的に扱う枠組みが構築でき、上記課題 1、2 を解決する手段として期待できる。しかし、これまで応用事例がほとんどないため、実用性に関して十分な検証がされていない。

以上より、『「データドリブン最適化」という科学的手法を用いてマス・カスタマイゼーションを実現することができるか』が、本課題の核心をなす学術的な「問い」である。

## 2. 研究の目的

本研究では、マス・カスタマイゼーション実現への意思決定支援ツールとして、市場・販売・生産のデータを組織横断的に活用したサプライチェーン構成最適化手法の開発を目的とする。具体的には、市場・販売データに基づく需要シナリオ作成、需要の不確実性に頑健なサプライチェーン設計、を、迅速かつ統合的に意思決定する手法を開発する。

迅速な意思決定が求められる昨今において、市場データから多様な顧客ニーズをいち早く理解し、顧客・製品特性に合わせた最適なサプライチェーン設計を行うことは、マス・カスタマイゼーションの実現に向けて非常に強力な意思決定支援ツールとなる。この様に、マス・カスタマイゼーションに着目し、従来独立に取り組みされていた課題を統合することで、規模の経済と・個別対応というの二律背反の要求実現に挑戦する点が、本研究の第一の独自性である。

上記の目的実現のために、本研究では「データドリブン最適化」という新しい最適化モデリングの枠組みを用いて解決を図る。中でも、Bertsimas らが近年提案した“Predictive Prescription” [5]、という、機械学習・分布的ロバスト最適化を組合せた手法の適用を検討する。理論的有効性は示されているものの、応用事例が少なく、未知の部分が多い本手法の有効性が検証できれば、SC 設計のみならず、大規模データを活用した予測・最適化を統合した意思決定全般への展開可能性が格段にあがることになる。この様に、先進的技法の有効性を検証し、OR 分野の学術的発展に挑戦することが本研究の第二の独自性である。

また、申請者は、これまで企業と多くの共同研究を行ってきた。本研究課題においても、企業との共同研究を通じて実データを用いた検証を徹底的に行う。この様に実問題に対して研究成果を適用し、実証的に評価を行う点が本研究の第三の独自性である。

### 3. 研究の方法

本研究では、データドリブン最適化という新たなモデリングを適用することで、マス・カスタマイゼーション生産方式設計の方法を確立する。マス・カスタマイゼーション生産方式設計とは、上記課題 1、2 で挙げた以下 2 つを指す。

#### 市場・販売データに基づく需要シナリオ作成方法の確立

予測アルゴリズムについては、意思決定の自動化という観点から、分析者がモデル式を仮定する必要がなく、データだけから推定可能なノンパラメトリック回帰の1つである $k$ 近傍法を用いた。 $k$ 近傍法は、最もシンプルなアルゴリズムの1つであり、特徴空間における最も近い $k$ 個のトレーニングデータ( $k$ 近傍)の平均を取り、推定や判別を行う方法である。 $k$ 近傍を予測に用いる場合、通常は $k$ 近傍内のデータの平均値を用いる。しかしながら、本研究で提案する統合するフレームワークにおいては、一値を予測するのではなく、予測される範囲が導出できれば十分である。従って、 $k$ 近傍内のデータを加工せずに「予測値集合」として、最適化モデルの入力値として用いる方法を提案する。

#### 需要の不確実性に対して頑健な SC 設計方法の確立

最適化アルゴリズムについては、データの予測誤差を考慮し、かつ、大規模データに対しても、現実的な時間で計算可能にするため、近年、最適化分野で新たなパラダイムとして着目されている分布ロバスト最適化(**Distributionally Robust Optimization**)を用いた手法である。この方法は、確率分布が、データから類推される「曖昧集合」の中に含まれることを仮定する。この仮定の下で期待値の最悪値が最小となる意思決定を導く。本研究では、この曖昧集合の類推に、 $k$ 近傍により得られた予測値集合を経験分布関数とみなして、そこからの乖離が少なくなる様な確率分布の範囲を定義する方法を提案した。この問題も凸計画問題に帰着でき、理論上は効率的に解けることが示されている。

予備的な実験として、ランダムに生成した確率線形計画問題の問題例に適用した結果、個別に適用したアルゴリズムより良い結果を得ることが出来た。しかしながら、予備的な数値実験の結果、計算負荷が高く、扱えるデータ規模が限られていることが判明した。このため、データセットを小規模に分解し、分散最適化を行うアルゴリズムを開発し、この問題を克服した。

### 4. 研究成果

実企業との共同研究から、実データを用いて生産計画問題、在庫管理問題への適用を行った。1例として、アパレル企業の **Quick Response** の事例に適用を行った。**Quick Response** は、販売開始時の需要を見て市場について学び、短いリードタイムで供給する戦略であり、ファストファッションのコア戦略である。提案したアルゴリズムは、ノンパラメトリックな手法を用いているため、確率分布を仮定する必要がない。また、**DRO** を用いているため、予測誤差に対して、ロバストな決定を導くことができる。数値実験では、アパレル産業のデータに適用を行い、提案技法が従来の代替的なアプローチよりも、高い利益を導くことがわかった。また、計画生産の量、計画生産のコスト比、マークダウン価格に対する感度分析を行い、**QR cost** が安い程、**Late-season Price** が高いほど、計画生産の量が少ないほど、**Supply Chain** は **Responsive** になる、という知見を求めた。

研究の研究者・成果を様々な企業に周知する活動を行った。その結果、多くの企業がこの手法に強い興味を示した。企業からのフィードバックを受け、新たに以下の課題が浮上した。

需要側のデータの活用強化:顧客の購買行動や市場の動向をより詳細に把握し、需要予測の精度をさらに向上させるために、需要側のデータを一層活用する必要がある。特に、テキストなどの非構造データを用いてより正確な需要シナリオを作成する方法が求められる。

供給側のデータの活用強化:サプライチェーン全体の効率性を高めるためには、供給側のデータをより積極的に利用することが重要である。近年は、生産・輸送・在庫の各段階でのデータを統合するだけでなく、**Tier2** 以降のサプライチェーンまで含めて、データ取得が可能になりつつある。これらのデータを用いることで、サプライチェーン上の供給・途絶に対する予測精度を高めて、コスト削減や在庫削減を実現しつつ、需要の変動にも柔軟に対応できる供給体制を構築することが可能である。

本研究の成果は、より効果的で効率的なサプライチェーン設計を可能にし、顧客価値創造を通じて産業競争力の強化に大きく貢献できると考えられる。

## 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 2件）

1. 著者名 Shunichi OHMORI	4. 巻 9462080
2. 論文標題 Consensus Distributionally Robust Optimization with Phi-Divergence	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 92204-92213
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2021.3091432	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 Shunichi OHMORI	4. 巻 9
2. 論文標題 A predictive prescription using minimum volume k-nearest neighbor enclosing ellipsoid and robust optimization	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Mathematics	6. 最初と最後の頁 1-16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/math9020119	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 Shunichi Ohmori	4. 巻 2
2. 論文標題 The impact of location of 3D printers and robots on the supply chain	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Uncertain Supply Chain Management	6. 最初と最後の頁 489-500
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5267/j.uscm.2021.1.002	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 Shunichi Ohmori, Kazuho Yoshimoto	4. 巻 13
2. 論文標題 A robust optimization for multi-period lost sales inventory control problem	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Operations and Supply Chain Management	6. 最初と最後の頁 375-381
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.31387/oscm0430277	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 Shunichi Ohmori, Kazuho Yoshimoto	4. 巻 11
2. 論文標題 Performance evaluation for distributionally robust optimization with uncertain binary entries	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Optimization and Control: Theories and Applications	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11121/ijocta.01.2021.00911	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6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Natsuki Kikumoto, Shunichi Ohmori
2. 発表標題 Supply chain fragility analysis considering transportation disruptions
3. 学会等名 The Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shinya Yamada, Shunichi Ohmori
2. 発表標題 Supply chain network design to reduce clothing waste in the apparel industry
3. 学会等名 The Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shunichi Ohmori
2. 発表標題 A Data-driven Robust Decision Making for the Quick Response in the Fast Fashion
3. 学会等名 The 26th International Conference on Production Research (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shunichi Ohmori
2. 発表標題 Consensus Distributionally Robust Optimization
3. 学会等名 INFORMS Annual Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shunichi Ohmori, Kazuho Yoshimoto
2. 発表標題 roduction planning under uncertainty via distributionally robust optimization
3. 学会等名 INFORMS Annual Conference 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shunichi Ohmori, Kazuho Yoshimoto
2. 発表標題 A multi-echelon inventory control using distributionally robust optimization
3. 学会等名 International Conference of Industrial Technology and Management 2020
4. 発表年 2020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
---------------------------	-----------------------	----

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