

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：32702

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04976

研究課題名（和文）価格設定アルゴリズムの公平性評価における数理的手法の理論と応用

研究課題名（英文）Theory and Application of Mathematical Methods in Fairness Assessment of Pricing Algorithms

研究代表者

佐藤 公俊（Sato, Kimitoshi）

神奈川大学・工学部・准教授

研究者番号：60609527

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：企業の持続的な発展および消費者の安全・安心な購買環境を実現するためには、価格決定メカニズムの理論的な理解を深めること、アルゴリズムの質を評価し、担保することが求められる。本研究では、(1)需要の学習を考慮した価格決定アルゴリズム、(2)自動予約アルゴリズムを考慮した価格決定モデル、(3)複数企業による共謀とその持続条件、の3つのテーマを対象に価格決定モデルを構築し、価格変動や社会的厚生について分析を行った。各テーマにおいて内外要因を適切に価格決定モデルに組み込むことで企業と消費者がともに満足する購買環境の実現が達成可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年問題となっている自動売買アルゴリズムによる高頻度の不正アクセスや競争市場におけるアルゴリズム同士の共謀といった市場環境における内外要因がアルゴリズムによって算出された価格に与える影響を明らかにし、社会に発信することで、価格変動に慣れていない消費者の理解が深まることが期待される。消費者の価格変動に対する公平感や納得感の向上が企業および消費者にとって有益であると考え、また、企業の利益だけでなく、消費者の視点を価格決定モデルに取り入れる点は学術的にも新しく、長期的に有用なアルゴリズムを開発するうえで意義があるといえる。

研究成果の概要（英文）：In order to realize sustainable development of firms and a safe and secure purchasing environment for consumers, it is necessary to deepen our theoretical understanding of pricing mechanisms and to evaluate and ensure the quality of algorithms. In this research, we constructed pricing models for three themes: (1) a pricing algorithm considering demand learning, (2) a pricing model considering an automatic reservation algorithm, and (3) collusion among multiple firms and its persistence conditions, and analyzed price fluctuations and social welfare. We showed that it is possible to achieve a purchasing environment in which both firms and consumers are satisfied by appropriately incorporating internal and external factors into the pricing models for each theme.

研究分野：オペレーションズ・リサーチ

キーワード：価格決定 収益管理 在庫管理 確率モデル 消費者行動

1. 研究開始当初の背景

近年のIoT、ビッグデータ、人工知能(AI)などの技術の進展とともに、データの活用が我が国の持続的な経済成長をもたらす重要な鍵であるといえる。企業において、コスト削減の余地が限界まで小さくなるなか、価格付けの重要性がますます高まっている。データを通じて顧客価値を十分に測定し、価格に反映させることで収益最大化を図るダイナミックプライシング(DP: dynamic pricing)と呼ばれる価格付け手法が求められている。すでに幾つかの企業では、独自のアルゴリズムに基づく値付けがなされているが、価格決定プロセスがブラックボックス化されており、透明性の低さから顧客が価格に対して不信感をもつことが問題となっている。不信感の高まりは長期的な企業活動に影響を与えるものと考えられる。

このような社会的背景を踏まえ、企業の持続的な発展および消費者の安全・安心な購買環境を実現するためには、価格決定メカニズムの理論的な理解を深めること、アルゴリズムの質を外部から評価し、担保することが求められる。本研究では、数学的および統計的手法により、価格変動を客観的かつ論理的に説明することで市場の透明性および公平性を保つための仕組みを開発する。これにより企業と消費者がともに満足する購買環境を実現し、DPの長期的な維持・機能を目指す。

2. 研究の目的

- (1) 製品需要に対する内外要因が価格変動にどのような影響を与えるかを明らかにする。内部要因として、需要量を過去の販売データから学習する価格決定アルゴリズムを対象に、必要となる初期パラメータや初期在庫数、販売期間の長さなどについて感度分析を行うことを目的とする。
- (2) 外部要因として、自動で予約・購入処理を実行するプログラムであるインターネットボットの存在を扱う。近年、チケット販売においてボットを用いることで、空き状況や競合価格の検索、不当な予約、大量買い占めによる転売などが行われている。こうしたプログラムによる購入意思のない自動的な買いやキャンセルの頻度が増すことで、企業の在庫量が頻繁に増減し、価格の変更頻度が高まる。また、正規の顧客に対して必要以上の高値が提示される恐れもあり、DPに対する不信感に繋がる原因となるため対策が必要であるといえる。本課題では、ボットを考慮したDPモデルを新たに構築し、ボットの存在が企業収益や消費者余剰、販売価格の変動傾向に与える影響を明らかにする。
- (3) 企業が価格設定システムを外部委託する場合には、市場では競合関係にあったとしても同一のアルゴリズムを用いている可能性があり、この場合も共謀の原因となる。従って、共謀は販売価格の高止まりにつながり、カルテルと同様の状況が生まれることで、消費者に影響が生じるものと予想される。そこで、競争環境下における価格決定モデルを構築し、価格カルテルの発生メカニズムを明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

上述の目的に沿ってテーマ(1)~(3)の研究方法を述べる。

- (1) 価格変動の理解は公平性を議論する上で必要不可欠である。ここでは、需要学習を考慮した価格決定の基礎研究であるBoer and Zwart (2015)のアルゴリズムを用いて、最適価格の変動特性を理解することから始める。具体的には、先行研究では行われていない、学習に必要な初期パラメータや初期在庫数、販売期間の長さなどの内部要因が最適価格に与える影響を分析する。これにより、適切なアルゴリズムを用いた場合の価格変動の特徴を把握することができる。シミュレーションにより仮想的な販売環境を設定し、その環境において異なる価格決定アルゴリズムを用いて価格変動や収益を比較する。
- (2) インターネットボットによる予約は購入を目的としていないため、一定期間後に予約をキャンセルする。このため、価格決定モデルを構築するにあたり、現在の在庫情報だけでなく、過去に予約されたボットの数を状態として記録し、それらをもとに価格を最適化する必要がある。本研究では、古典的なDPモデルを拡張し、過去情報の記録を認めた新たなモデルを確率的動的計画法として定式化する。得られたモデルから最適価格を導出し、その定性的性質を示す。さらに、数値計算によって、ボットが市場に存在する環境下において、提案した価格決定モデルを用いることで、ボットを考慮しないモデルと比べて企業収益や消費者余剰、社会的厚生がどの程度変化するか検証する。
- (3) 競争環境において複数の企業が共謀を持続する場合、その持続が維持されるための条件を明らかにする。本研究では共謀状態の価格から逸脱した価格を設定する企業が現れた場合に、それ以降はすべての企業が競合的な価格を設定するトリガー戦略の下で多期間の価格決定モデルを確率的動的計画法によって定式化する。まず、各企業の在庫制約を考慮しない場合に各企業が提供する製品・サービスの差が共謀の持続に与える影響を分析する。さらに、在庫制約を追加し、各企業の供給量の差と共謀の持続についても分析する。

4. 研究成果

(1) 需要の学習を考慮した価格決定アルゴリズム

パラメトリックな需要関数の学習を考慮した DP のアルゴリズムについて先行研究を調査し、その基礎モデルを用いて DP の価格変動の様子や消費者の不公平感の観点から価格の上限値について感度分析を行った。

収益最大化の対象となる計画期間の初めにのみパラメータの学習を行うパッシブ学習と計画期間内の各期にパラメータの学習を繰り返すアクティブ学習のそれぞれについて販売シミュレーションを行った。その結果、アクティブ学習の方が高い収益を生み出すが、価格変動は大きくなることが示された。図1は計画期間を100回繰り返した場合の販売価格の値動きを示している（実線がパッシブ学習、点線がアクティブ学習を表す）。アクティブ学習は需要パラメータを更新する際に必要となる探索回数が増えるため、価格が頻繁に変動していることがわかる。このため、消費者の不公平感を招く恐れがあるといえる。

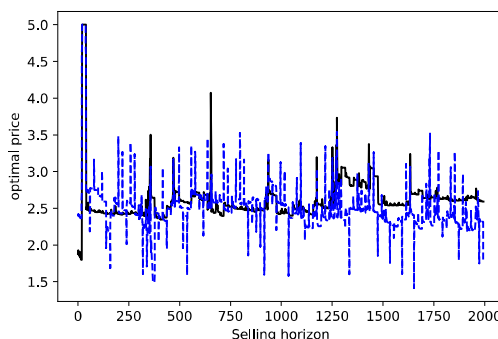


図 1. 販売期間と最適価格の変化

また、顧客の到着データ（例えば、web サイトへのアクセスデータ）が利用できる場合には、パラメータの推定精度が高まるため、パッシブ学習の方が収益改善の点で有効であることを確認した。従って、パッシブ学習による DP は企業と消費者の双方にとって良い方策であるといえる。

(2) 自動予約アルゴリズムを考慮した価格決定

インターネットポットによる仮予約を考慮した DP を定式化し、分析することでポットの増加とともに企業収益と消費者余剰の和である社会的厚生が減少することを確認した。さらに、価格決定者が値付けの際にポットの存在を考慮することで、社会的厚生が改善されることを示した。また、予約から支払いまでの期間が長いほど、期待収益は減少するという結果より、可能な限りこの期間を短縮することがポットによる損失を減らすための対策となる。ポットが考慮されなければ、価格の減少傾向が生じることを確認した。図はポットを考慮しない価格決定アルゴリズムを用いた場合の値動きを示している。時点0が予約開始時点、時点25が販売終了時点であり、実線が販売価格、点線が在庫量を表す。また、黒丸

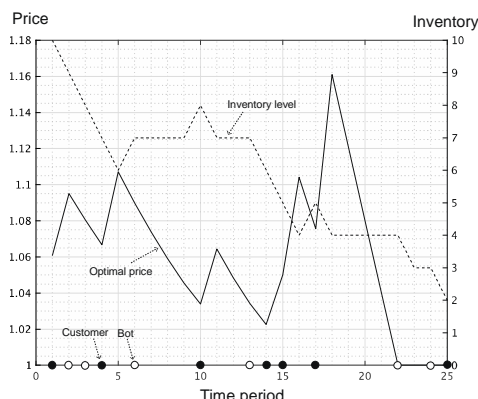


図 2. 最適価格と在庫量の変化

は顧客の購入、白丸はポットの予約を表している。

通常、顧客が商品・サービスを購入すれば、在庫が減少するため価格は上昇する。しかし、ポットによる予約後は価格が減少していることがわかる。これにより、早い時期に購入した顧客が値下がりを知ることによって DP に対する不信感をもつ可能性があるといえる。この減少傾向については、ポットの存在を価格政策に考慮することで解消できることを確認したが、価格の変動の大きさが増加するという欠点があることを示した。

(3) 複数企業による共謀と持続条件

顧客の需要関数を多項ロジットモデルにより与え、共謀からの逸脱を認めた DP モデルを定式化した。在庫制約のない場合、各企業の価格は販売期間を通して一定である。その共謀価格が競合時に各企業が設定する価格の平均値よりも十分高い場合や、同一市場に競合する企業が多い場合に、共謀が生じることを明らかにした。また、在庫制約のある場合には、各企業の初期在庫量に対して潜在顧客数が多い場合、企業の提供する製品間の特性に差がない場合、企業間の在庫量の差が小さい場合においては、共謀が持続しやすいことを明らかにした。

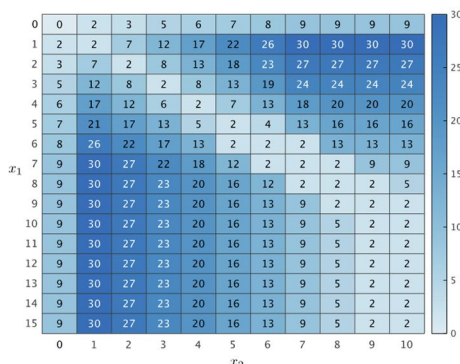


図 3. 在庫量と逸脱時点の関係

図3は市場に2企業が存在するとき、共謀からの逸脱が生じる残存期を表している。例として、企業1と企業2の在庫量が $(x_1, x_2) = (14, 8)$ のとき、残りの販売期間が5期となるまで逸脱は起こらないことがわかる。これより、企業間の在庫量の差が大きい場合には逸脱が早期に起こるため、同調が持続しにくいといえる。また、初期在庫量の少ない企業2の方が企業1よりも早く逸脱することもわかる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 R. Perera and K. Sato	4. 巻 15
2. 論文標題 The Impact of Savings Withdrawals on a Banker's Capital Holdings subject to Basel III Accord	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Annals of Financial Economics Journal	6. 最初と最後の頁 2050006
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1142/S2010495220500062	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 該当する
1. 著者名 K. Sato	4. 巻 20
2. 論文標題 Dynamic pricing with automated purchase-reservation algorithms	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Revenue and Pricing Management	6. 最初と最後の頁 33-41
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1057/s41272-020-00259-x	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 佐藤公俊, 廖星	4. 巻 8
2. 論文標題 二ホンウナギのサプライチェーンに関する研究：資源の持続的利用に向けて	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 神奈川大学アジア・レビュー	6. 最初と最後の頁 32-41
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 -
1. 著者名 R. Perera and K. Sato	4. 巻 62
2. 論文標題 Ensuring Mutual Benefit in a Trans-boundary Industrial Pollution Control Problem	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Computational Economics	6. 最初と最後の頁 91-128
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 該当する

1. 著者名 W. Iton and K. Sato	4. 巻 17
2. 論文標題 Pricing Model for Product Rental Services with Option to Buy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Innovation and Supply Chain Management	6. 最初と最後の頁 61-67
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 高野倉雅人, 佐藤公俊, Ying-Yu Chen, Mohd Helmi Ali	4. 巻 9
2. 論文標題 新型コロナウイルス感染症と消費者の外食行動ー日本, マレーシア, 台湾の比較ー	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 神奈川大学アジア・レビュー	6. 最初と最後の頁 19-31
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 該当する

1. 著者名 佐藤公俊	4. 巻 5月号
2. 論文標題 レベニューマネジメントと需要関数の学習	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本オペレーションズ・リサーチ学会機関紙	6. 最初と最後の頁 261-266
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 -

1. 著者名 澤木勝茂, 佐藤公俊	4. 巻 12
2. 論文標題 感染症のパンデミックをいかに制御するか	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 リアル オプションと戦略	6. 最初と最後の頁 9-14
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23件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 佐藤公俊
2. 発表標題 動的価格決定モデルの基礎と需要関数の学習効果に関する一考察
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会，中部支部シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤公俊
2. 発表標題 需要関数の学習を考慮したダイナミックプライシング
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会，不確実状況下における意思決定とその周辺（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤公俊，八木恭子，澤木勝茂
2. 発表標題 感染症のSIRモデルにおけるロックダウンの最適停止問題について
3. 学会等名 日本リアルオプション学会2021年度研究発表大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小笠原悠，佐藤公俊
2. 発表標題 需要の包含関係に着目した収益管理モデル
3. 学会等名 数理解析研究所研究集会，不確実性環境下における意思決定数理の新展開
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤公俊
2. 発表標題 協調的行動からの逸脱を考慮したダイナミックプライシングについて
3. 学会等名 数理解析研究所研究集会，ファイナンスの数理解析とその応用
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤優，佐藤公俊
2. 発表標題 機械学習によるJリーグのチケット販売枚数の予測とシミュレータ開発
3. 学会等名 日本経営工学会2021年春季研究大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 殷宏梅，佐藤公俊，中島健一
2. 発表標題 クーポン配布を考慮した最適販売政策に関する研究
3. 学会等名 日本経営工学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤公俊
2. 発表標題 二次流通市場を考慮した収益管理モデル
3. 学会等名 日本リアルオプション学会2020年度研究発表大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤公俊
2. 発表標題 需要関数の学習を考慮したダイナミックプライシング
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会不確実状況下における意思決定とその周辺, 第10回研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Yamamoto, Y. Ogasawara, K. Sato
2. 発表標題 Bundled sales strategy for service goods with nested structure: simultaneous determination of price and allocation
3. 学会等名 The 22th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 I. Wang, K. Sato
2. 発表標題 A profit maximization model with rent-to-own contract
3. 学会等名 The 22th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 W. Nugata, K. Sato
2. 発表標題 Dynamic pricing strategy based on market segmentation for hotel room
3. 学会等名 The 22th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Ogasawara, K. Sato
2. 発表標題 Optimal bundling strategy for nested service demand
3. 学会等名 The 22th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 N. Iwaji, K. Sato
2. 発表標題 Optimal Pricing policy in the presence of positive and negative network effects
3. 学会等名 The 22th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 ワンイトン, 佐藤公俊
2. 発表標題 購入選択権付きレンタル契約を考慮した中古品の再販売モデル
3. 学会等名 日本サービス学会第11回国内大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤公俊
2. 発表標題 競合市場における動的価格の同調とその継続条件について
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会2023 春季研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小笠原悠, 佐藤公俊
2. 発表標題 周縁地域のバンドル販売による収益管理
3. 学会等名 第 37回日本観光研究学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤公俊
2. 発表標題 価格設定アルゴリズムによる共謀の持続可能条件について
3. 学会等名 日本リアルオプション学会2022 年度研究発表大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩路菜子, 佐藤公俊
2. 発表標題 正と負のネットワーク効果を考慮した最適価格決定モデル
3. 学会等名 日本経営工学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 リシンカ, 佐藤公俊, 中島健一
2. 発表標題 不確実性を考慮したサプライチェーン強靱化に関する研究
3. 学会等名 日本経営工学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤公俊, 澤木勝茂
2. 発表標題 時間遅れを考慮した感染症の確率的SIRモデルにおけるロックダウンの最適政策について
3. 学会等名 数理解析研究所研究集会, ファイナンスの数理解析とその応用
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤公俊, 八木恭子, 澤木勝茂
2. 発表標題 確率的SIR モデルによるロックダウンの最適停止問題
3. 学会等名 日本経営工学会2022年春季研究大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 ワンイトン, 佐藤公俊
2. 発表標題 レンタル販売サービスを考慮した利益最大化モデル
3. 学会等名 日本経営工学会2022年春季大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 佐藤公俊, 藤江遼, 後藤晃範, 平井裕久	4. 発行年 2021年
2. 出版社 三恵社	5. 総ページ数 120
3. 書名 やさしいデータ分析基礎	

1. 著者名 佐藤公俊, 澤木勝茂	4. 発行年 2020年
2. 出版社 共立出版	5. 総ページ数 374
3. 書名 レベニューマネジメント：収益管理の基礎からダイナミックプライシングまで	

〔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
---------	---------