

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2022

課題番号：17K12980

研究課題名（和文）サービス提供者を加味した待ち行列ゲームによる混雑緩和策の評価：理論・実験分析

研究課題名（英文）Game theoretical approach to congestion reduction by queueing games: theoretical and experimental analysis

研究代表者

福田 恵美子 (Fukuda, Emiko)

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：50546059

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：客が戦略的にサービス窓口への到着時刻を選択できるような待ち行列ゲームについて、理論、実験の両面から研究をおこなった。

まず、従来連続モデルとして扱われていた待ち行列ゲームについて、サービス時間を一般化した離散モデルを構築し分析した。次に、理論結果を検証する実験室実験をおこない、実際には均衡より分散して到着することや、サービス時間分布による平均待ち時間の変化は概ね理論結果通りだが、到着方法の違いは平均待ち時間に影響を与えないことがわかった。最後に、限定合理性を取り入れたさまざまな学習過程を用いたシミュレーションを実施し、理論結果の検証および実験結果との比較をおこなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

実験室実験での成果から、対称ナッシュ均衡での予測よりも客の到着が分散して、低い平均待ち時間が実現されることが示唆された。この結果等を踏まえた計算機実験（シミュレーション）の結果から、客が参照する情報や学習方法の違いにより、均衡よりも開店時刻への集中が緩和されたり、平均待ち時間が少なくなったりすることがわかった。本研究の成果は、客への情報の提示の仕方を工夫することで、客が自発的に混雑のピークを緩和する行動を取るよう誘導できることを示唆している。これは、サービス窓口に過剰な負担を強いることなく、また客にも行動を強制することなく混雑解消できるシステムの提案につながる点で、大きな社会的意義を持つ。

研究成果の概要（英文）：We conducted both theoretical and experimental studies on queueing games in which customers strategically choose their arrival time at the service window.

First, we constructed and analyzed theoretically a discrete time model with general service time distribution for queueing games, which had previously been treated as a continuous one. Next, laboratory experiments were conducted to examine the theoretical results, and it was found that the actual observed arrival distribution is more dispersed than the equilibrium and that the average waiting time varies with the service time distribution as in the theoretical results, but the difference in population of customers has less effect on the average waiting time. Finally, we conducted simulations using various learning processes taking into account bounded rationality to examine the theoretical results and compare them with the experimental results.

研究分野：社会科学・複合領域（社会・安全システム科学）

キーワード：ゲーム理論 待ち行列 社会厚生 実験室実験 シミュレーション 限定合理性

研究課題名：

## サービス提供者を加味した待ち行列ゲームによる混雑緩和策の評価：理論・実験分析

### 1. 研究開始当初の背景

当初、2020年に予定されていた東京五輪では、競技場および周辺施設の混雑が予想されていた。混雑緩和の方法として、入場制限、サービス窓口の増設、サービス時間の短縮化といったものが考えられるが、いずれもサービス提供者側に負担を強いるものである。また、オフピークを避けた利用を呼びかけるといったアプローチもその実効性は定かではなく、サービス提供者側に過剰な負担を強いずに効率的に混雑を緩和する方法についての研究は少なかった。

ゲーム理論の分野では、古くからボトルネックゲームなど客の到着分布が内生的に決定されるモデルにより混雑分析がおこなわれていた。さらに、Rapoport et al. (2004)などのように実験による理論検証もおこなわれていたが、従来のゲームモデルは利用客数やサービス時間が定数であり、現実には即したものとは言い難かった。一方、伝統的な待ち行列理論では利用客数やサービス時間については不確実性が考慮されているが、施設利用客の到着分布は外生的に与えられており利用客が戦略的に行動する状況を分析できなかった。

Hassin and Haviv (2003)やHassin and Kleiner (2011)では、客の到着分布やサービス時間に不確実性を持たせつつ、サービス提供時間が制限されている（開店時刻・閉店時刻が定まっている）施設について、利用客が自らの高揚を最大化するように振る舞うというゲーム理論の様相を取り入れた待ち行列ゲームを考案した。彼らはこのゲームのナッシュ均衡を求めることで混雑状況の分析をしたが、2010年代前半までそのほとんどが連続モデルによる分析であった。また、社会厚生が最大となる状態が導出困難なモデルについては対称ナッシュ均衡における利用客の利得でしかシステムを評価しておらず、かつ実験による理論検証はおこなわれていなかった。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、不確実性を取り入れた現実に近い混雑状況を分析できる待ち行列ゲーム理論について、モデルを一般化および精緻化するとともに、理論結果を実験により検証し、より実効性の高い混雑緩和の提言をすることである。

理論研究では、以下の2つのことに軸を置いて理論拡張をする。1つめは、サービス時間等を一般化したゲームを構築し、その均衡を求めるアルゴリズムを開発することである。2つめは、待ち行列ゲームの離散化である。連続モデルによる理論予測に対して、離散値でしか測ることのできない実験で理論検証をすることは問題を孕んでいると指摘されているが（Otsubo and Rapoport, 2008）、前述の通り、2010年代前半において待ち行列ゲームの分析はほとんど連続モデルで進められてきた。そこでまず本研究では、離散モデルの構築とそこでの求解アルゴリズムを確立することを目的とする。

実験による理論検証では、実験室実験、フィールド実験の二側面から理論結果を検証する。これは、理論モデルにおける均衡が現実に観察されるか検証することで、理論の精緻化や、新しい視点を獲得することを目的としている。特に、実験室実験の先行研究では、利用客数、サービス時間を一定にした実験しかおこなわれていない。本研究では、不確実性がある状況において被験者がどう振る舞うかを分析するため、離散化・一般化された待ち行列ゲームを対象とした実験をする。さらに、乗客数カウンターを用いて、実際のサービスシステムにおける利用客の到着パターンを観測し、現実社会に見られる、サービス時間に対する情報の偏り等、統制できない様々な要素により、理論結果と比較してどのような差異が生じているかを観察する。

### 3. 研究の方法

#### 3.1 理論モデルの拡張

Hassin and Kleiner (2011)などで提案されている待ち行列ゲームについて、到着時間帯（戦略）を離散化したモデルを構築した。客全体の数はポアソン分布に従うこととし、単一窓口、待ちスペースは容量が無限大で一列と仮定したが、これまで連続体として与えられていた受付期間を離散化し、複数の時間帯の中から各客は到着時刻を選択し戦略とするモデルにした。さらに、これまでサービス時間が一定あるいは指数分布に従う場合のみ扱われていたが、今回、サービス時間分布を一般の分布へと拡張した。

2020年度以降は客の到着方式の一般化、特に定数への拡張を試みた。これは、新型コロナウイルスワクチンの大規模接種会場でも用いられた予約方法である時間帯予約システムを取り入れた待ち行列ゲームの礎となるモデルであり、時間帯予約システムを取り入れた待ち行列ゲームについては、令和4年度から関連する研究課題(22K11927)により研究が進められている。

また、待ち行列ゲームにおいては従来、対称ナッシュ均衡をもとめることで混雑状態の評価をしているが、それに対して客の限定合理性を加味した質的応答均衡の導出をおこなった。

### 3.2 実験室実験

離散時間単一窓口待ち行列ゲームについて、2019年12月に理論検証のための実験を実施した。本実験では、2種類の到着方式（ポアソン分布に従う到着および定数到着）、2種類のサービス時間分布（サービス時間一定および幾何分布）の組み合わせで、合計4処理を80名の被験者に対して実施した。到着方式を被験者間要因、サービス時間分布を被験者内要因とし、各セッション2処理をそれぞれ約30ラウンドで構成した。各ラウンドにおいて、1グループ平均4~5人にグループ分けされ、どの時刻にサービス窓口に向かうかを選択してもらい、窓口への到着分布が理論結果とどのように異なるか等を分析した。なお、参加人数がポアソン到着となる処理については、事前に乱数を発生させ、参加回数が均等になるようにランダムマッチさせたものを採用した。本来のポアソン分布による到着との差を確かめるため、ポアソン分布と本実験で使用した分布のそれぞれに従う1320個ずつの乱数に対して2標本コルモゴロフ-スミルノフ検定（K-S検定）をおこなった。この結果  $p > 0.05$  となり、分布が同じという仮説は棄却されなかったため、ポアソン分布に近似できるとして実験に使用した。

### 3.3 計算機実験

当初、実験室実験およびフィールド実験により理論検証を実施する予定だったが、新型コロナウイルス感染症の影響により、研究課題遂行3年目より実験室実験の実施が困難となった。また、理論研究を遂行するに当たり、シミュレーションによる解の実現性を検証した。この時の知見より、本課題において、計算機実験（シミュレーション）により理論検証を実施することとした。

特に、理論研究の一環として数値計算により質的応答均衡の導出を試みたことに関連して、質的応答均衡で導入している限定合理的な振る舞いをするエージェントを想定したシミュレーションをおこない被験者実験の結果等との比較をすることで、より現実への幅広い予測ができると考えられる。2022年度に実施した計算機実験では、具体的には、参照情報（自身の待ち時間履歴あるいは他者の到着分布の履歴）、行動規範（最適反応、あるいは限定合理性を取り入れた行動選択）の異なる学習過程を用いたシミュレーションをそれぞれ実施して結果を比較することで、客の学習方法の違いが結果にどのような差異をもたらすかを明らかにした。

## 4. 研究成果

### 4.1 理論研究からの成果

離散時間単一窓口待ち行列ゲームについて、対称混合戦略ナッシュ均衡を導出するアルゴリズムを提案し、実際にサービス時間が定数の場合、幾何分布に従う場合、混合幾何分布に従う場合について数値計算をおこなった。この結果、これまで連続モデルで得られていた、サービス時間そのものやサービス時間のばらつきが増加するとナッシュ均衡での期待待ち時間が増加する傾向が離散モデルでも確認された。また、開店時刻に客の到着が集中する傾向は連続モデルと一致するが、離散化の程度によって開店から一定時間経過後に到着する客数にばらつきが生じることも確認できた。

また、客の到着方式を定数とした、定数到着待ち行列ゲームにおけるナッシュ均衡を導出した。この結果、客の到着がポアソン分布に従う従来の待ち行列ゲームのナッシュ均衡よりも、後述する実験結果に近い到着時刻分布が得られた。また、限定合理性を導入した対称な質的応答均衡を導出したところ、こちらも従来の待ち行列ゲームのナッシュ均衡よりも、実験結果に近い到着時刻分布が得られた。このことから、客が到着客数への複雑な予想ができていない、あるいは客の行動様式がそもそも完全合理的ではないといった、プレイヤーに関する限定合理性をモデルに取り入れることで、現実社会において起こる結果に近い予測が立てられることが示唆される。

### 4.2 実験室実験からの成果

処理ごとに到着分布を理論予測と比較したところ、実験で得られた到着分布は対称ナッシュ均衡に見られる開店時刻に比較的多くの人数が到着する傾向は見られたものの、より分散して到着しており、ラウンドを重ねても均衡に収束しないことがわかった。また、理論と同様、サービス時間は幾何分布に従うほうが平均待ち時間が大きくなる一方、到着方法の違いは平均待ち時間に影響を与えないことがわかった。

さらに、被験者の行動がどの情報に影響されているかを分析したところ、直前の待ち時間とこれまで到着した時刻のうち待ち時間が少なかった時刻を選択して到着する最適行動を取る頻度と、直前の待ち時間との間に負の相関があることがわかった。また、モデルの不確

実性が高いほうが、最適行動をする頻度が高まる傾向にあった。

なお、2019年に実施した実験では上述のような示唆に富んだ結果を得ることができたが、研究成果としてまとめるにはより多くの観測数が必要である。2020年以降、追実験を実施する予定だったが、新型コロナウイルス感染症の影響でその後同じ環境で実験を実施する機会に恵まれなかった。コロナ禍を経たことで、人々のリスク態度等も変化している可能性があるため、今後改めて実験を実施し、上記の結果の頑健性を検証しつつ研究成果をまとめる必要がある。

#### 4.3 計算機実験からの成果

理論研究の成果としてまとめた Sakuma et al. (2020)において対称ナッシュ均衡を導出する数値計算アルゴリズムを開発したが、同時に、エージェントが学習を通して均衡を達成できるかどうかを検証するエージェントシミュレーションを実施した。ここでは、シミュレーションの結果として均衡に近い分布を得ることができるが、均衡に収束するとは断言できないことがわかった。

上述の結果や実験室実験の結果等を踏まえたさまざまな設定によるシミュレーション結果の違いを分析したところ、客の学習方法の違いが結果に顕著な差異をもたらすことがわかった。具体的には、自己の過去の行動とそのときの利得を参照する強化学習の結果が最も対称ナッシュ均衡に近い分布となるが、概して均衡結果よりも開店時刻への集中が緩和されており、平均待ち時間も少なくなった。さらには、クールノー学習や過去の到着分布から学習する場合のほうが、全体的に客が分散して到着することで混雑が緩和された。

また、客の到着頻度やサービス処理速度等、サービス側の性質を表すパラメータの影響を受けやすい学習過程があることもわかった。今後、より詳細な設定・比較検証をすることで、効果的な情報提示により混雑低減をする仕組みを提案できると考えられる。

#### 参考文献

Hassin, R., & Kleiner, Y. (2011). Equilibrium and optimal arrival patterns to a server with opening and closing times. *IIE Transactions*, 43, 164–175. doi:10.1080/07408171003792449.

Hassin, R., & Haviv, M. (2003). *To Queue or Not to Queue: Equilibrium Behavior in Queuing Systems*. Kluwer Academic Publishers, Boston. doi: 10.1007/978-1-4615-0359-0

Otsubo, H., & Rapoport, A. (2008). Vickrey's model of traffic congestion discretized. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42, 873–889. doi: 10.1016/j.trb. 20 08.04.0 02 .

Rapoport, A., Stein, W. E., Parco, J. E., & Seale, D. A. (2004). Equilibrium play in single-server queues with endogenously determined arrival times. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 55, 67–91.

Sakuma, Y., Masuyama, H., & Fukuda, E. (2020). A discrete-time single-server Poisson queueing game: Equilibria simulated by an agent-based model. *European Journal of Operational Research*, 283, 253–264.

小竹亮平, 2020, 離散時間単一窓口待ち行列ゲームの実験分析, 2020年度学士特定課題研究, 東京工業大学.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Sakuma Yutaka, Masuyama Hiroyuki, Fukuda Emiko	4. 巻 283
2. 論文標題 A discrete-time single-server Poisson queueing game: Equilibria simulated by an agent-based model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 European Journal of Operational Research	6. 最初と最後の頁 253 ~ 264
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ejor.2019.11.003	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 Sakai Kazuki, Hohzaki Ryusuke, Fukuda Emiko, Sakuma Yutaka	4. 巻 268
2. 論文標題 Risk evaluation and games in mine warfare considering shipcounter effects	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 European Journal of Operational Research	6. 最初と最後の頁 300 ~ 313
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ejor.2018.01.030	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

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yutaka Sakuma, Hiroyuki Masuyama, Emiko Fukuda
2. 発表標題 An equilibrium arrival-time distribution for a discrete-time single-server queue with acceptance period and general service time distribution
3. 学会等名 The 21th Conference of the International Federation of Operational Research Societies (国際学会)
4. 発表年 2017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
---------	---------