

令和 2 年 7 月 9 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01787

研究課題名(和文) ゲーム理論的資源配分メカニズムの定量的評価基盤の構築

研究課題名(英文) Toward a quantitative theory for evaluating game-theoretic resource allocation mechanisms

研究代表者

岩崎 敦 (Iwasaki, Atsushi)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：30380679

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はゲーム理論的資源配分メカニズムを、最適化や学習といったアルゴリズム技法を駆使して、定量的に分析する理論的基盤を構築することを目的とする。とくにデータ分析に資する動学ゲームを開発し、多市場接触における非自明な協力的均衡戦略の特徴づけに成功した。この成果は人工知能分野のトップ会議AAAI2020に採択された(採択率20.6%=1591/7737)。さらに派生研究として、安定結婚問題の一拡張である予算制約付きマッチングに近似アルゴリズムを利用した成果がIJCAI2017(採択率25%=137/550)およびAAAI2018(採択率25%=933/over 3800)に採択された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で主たる対象とした、多市場接触は経済学における理論と実証の双方において重要な応用例の1つである。本研究ではとくに「多市場接触は談合を促進するか？」という問いに対して、世界で初めて非自明な協力戦略を特定し、その特徴付けを与えることに成功した。この成果は、多市場接触の実証に有用な企業の振る舞いのモデルとなることが期待される。一方で、予算制約付き近似安定マッチングでは、現実的な要請にもとづく制約の下で、人や資源をどのように組み合わせるのが望ましいかの規範を与えることに成功しており、例えば、児童と保育園のマッチングの現実と理想を比較する上で重要な成果といえる。

研究成果の概要(英文)：This research aims to establish a theoretical basis for quantitative analysis using algorithmic/optimization techniques so that a game-theoretic resource allocation mechanism (hereinafter referred to as the "mechanism") is developed. In particular, we have developed a parametric notion of dynamic games to contribute to data analysis. We have successfully characterized non-trivial cooperative/collusive equilibrium strategies in multimarket contacts. The results were accepted by the AAAI 2020, the leading conference in the field of artificial intelligence (acceptance rate of 20.6% = 1591/7737). As a further extension of the stable marriage problem, we studied approximate stable matchings with budget constraints. The results are accepted at IJCAI2017 (25% acceptance rate = 137/550) and AAAI2018 (acceptance rate of 25%=933/over 3800).

研究分野：ゲーム理論・マルチエージェント

キーワード：メカニズム設計 ゲーム理論 最適化 計量経済学

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ゲーム理論は、複数のプレイヤーがお互いの利害が異なる戦略的状况を分析する学際的な分野であり、経済学だけでなく、計算機科学や生物学、社会学と諸分野に影響を与えている。もともとはプレイヤーの振る舞いやそれらが関わる制度や慣習を定性的に分析する学問であったが、この20年あまりの間に、ゲーム理論は現実の課題を解決する仕組みを設計する学問として急速に発展しており、オークションやマッチングに代表されるゲーム理論的資源配分メカニズムが社会に大きな影響を与えている。

例えば、アメリカ連邦通信委員会に端を発する周波数オークションは年に数千億から数兆円もの国庫収入をもたらし、キーワード広告オークションは Google の利益のほとんどを稼ぎ出している。一方で、安定結婚問題として知られるマッチングは、研修医や司法修習生の配属決定や学校選択制、そして移植するための臓器の交換にまで利用されている。さらに、都市や空港などの人が集まる場所での警備計画策定にもゲーム理論が実践されている。こうした豊富な実践例の進展とともに、ゲーム理論は課題解決型の工学的な研究分野となりつつある。

こうした成功の裏で研究者には、企業や政府の担当者を説得するために多大な労力がかかっている。例えば、そんなおもちゃみたいなモデルが役に立つのか？ 実際の人間はそれほど合理的に意思決定をするのか？ といった疑問に研究者は説得的に答えなければならぬ。これには、ゲーム理論が与える定性的な分析が過去に役立った事例を挙げるだけでは不十分であり、何らかの定量的評価を示すことが望ましい。しかし、まだ運用されていないメカニズムを定量的に評価するための理論的基盤は極めて脆弱である。これを可能にする課題の1つとして、本研究はゲームの均衡計算アルゴリズムに着目する。既存の制度や技術のもとで観測されるデータから、プレイヤーの利得や振る舞いのパラメータを推定するには、大規模なゲームの均衡を繰り返し計算しなければならない。しかしその計算量は膨大で、これまでは規模をかなり限定した状況しか分析できていなかった。

2. 研究の目的

「1. 研究開始当初の背景」で述べた問題意識のもと、本研究ではまず、具体的な事例からデータを収集し、どんなパラメータを推定するかを識別し、そのパラメトリックモデルを構築する。例えば、2つの航空会社が同時に複数の路線で競争している多市場接触で、どんな情報をもとに談合(価格統制)が行われている/いないのかをデータをもとに検討し、企業の利得や行動を決めるパラメータをどう扱うべきか明らかにする。

次に、データに即した規模のゲームの均衡を計算するアルゴリズムを設計する。均衡計算のアルゴリズムは一般には不動点計算アルゴリズムと等価であり、シンプルなゲームのクラス、例えば2人ゲーム、では多項式時間アルゴリズムが知られている。しかし、これは完全情報下で1回限りプレイされる静的ゲームを対象としている。現実のデータは不確実な環境下で繰り返しプレイされる動学ゲームとなっていることが多い。もちろん、このようなゲームの均衡の計算量は膨大であるため、最適化や学習のアルゴリズムの技法から、近似的な解を計算するアルゴリズムを設計する。

上記を通じて、個々の事例にとどまらない共通の技術基盤を抽出・体系化し、メカニズムを定量的に評価した上で、反実仮想分析や社会実装への課題抽出を支援するための基盤を構築することを目指す。

3. 研究の方法

本研究では、多市場接触などの事例を通して、ゲーム理論的資源配分メカニズム(以下、メカニズム)を、データにもとづいて事前に評価するための技術と方法論を構築する。具体的には、計算機科学およびマイクロ経済学の専門家からなる文理融合型グループを組織し、以下の3つの項目を相互にフィードバックさせながら研究を推進した。

- 1) 不確実な環境下における多市場接触下の均衡(戦略)の構造と特徴づけ
- 2) 不確実な環境下における動学ゲームの均衡計算アルゴリズム
- 3) 制約付きマッチングメカニズムの制度設計とその実証技術の検討

4. 研究成果

まず、1) 不完全観測下の多市場接触では、それぞれのプレイヤーが相手の行動に関する情報(シグナル)を私的に観測するため、どんな振る舞いが均衡として実現するかはほとんど知られていない。しかし、これを明らかにすることが、不確実な環境における動学ゲームの均衡計算にとって重要である。これに対して、すでいくつかの非自明な戦略とその均衡条件を明らかにしていたが、さらに今年度は戦略の構造と実現する均衡利得の関係を明確にした。

来年度はこの成果を経済学分野のトップジャーナルに投稿を目指す。また、Mitsuru Igami 氏を中心としたセミナーによって、実証分析に必要な技術を研究チームで共有できた。今後、警備計画策定やキーワード広告オークションといった事例に展開していく予定である。しかし、現実的な規模のゲームの均衡を計算するには、不動点アルゴリズムの計算量が問題になる。これに対応するために、近似アルゴリズムの技術を調査した。そこから派生した結果として、予算制約付き近似安定マッチングがある。これは安定結婚問題の拡張であり、従来は個々人がマッチできる数にしか制約がなかった問題に、何らかの社会的 / 技術的な要請からくる制約を外生的に与えたものである。このとき、通常の意味での安定マッチングの存在を保証できなくなるため、何らかの意味で準安定なマッチングが必要となる。これに近似アルゴリズムを利用した研究が IJCAI (採択率 25%=137/550) および AAAI (採択率 25%=933/over 3800) に採択された。

研究実績の概要で述べた動学ゲームの均衡計算アルゴリズムでは、後悔最小化アルゴリズムが簡単なゲームであれば不完全観測状況に適用できることを確認した。これを本研究が目的とする警備計画策定やキーワード広告オークションといったネット市場における実証分析へ適用できるように拡張を進めている。一方で昨年度の成果である不完全観測下における多市場接触は計算機科学と経済学の学際領域トップの国際会議である ACM Conference on Economics and Computation に投稿している。

メカニズムの定量的評価基盤については、様々な反実仮想分析技術、例えばオンライン取引における需要推定や評判システムの評価に用いられる技術を調査した。ここでは、売り手や買い手、政府といったプレイヤーの振る舞いの構造をパラメトリックに表現し、実際のデータから推定したパラメータを用いて反実仮想分析を行う。プレイヤーの振る舞いを構造化するには時間の経過を伴う動学ゲームを設計し、解く必要がある。本チームでは、相手の行動を見間違えるというごく自然な仮定(不完全観測)における振る舞いのモデルの動学ゲーム理論的分析手法を開発した。具体的には、複数の路線で競争する航空会社のように、プレイヤーが複数のゲーム(市場)を同時にプレイする「多市場接触」下において、どのような振る舞いが均衡として実現するかを明らかにした。不完全観測下の多市場接触では、どんな振る舞いが均衡として実現するかはほとんど知られていなかった。これに対して客員研究員である関口格(京都大学)と横尾真(九州大学)と共同して、世界で初めて非自明な振る舞いのクラスの特徴付けに成功し、その成果が AAAI 2020 に採択された。

制約付きマッチングでは、従来の制約なしマッチングと整数計画問題の関係を確認した上で、制約付きマッチングのための整数計画問題を構築した。その線形計画問題への緩和とあわせて実際にいくつかの問題を解き、どのようなマッチングが出力されるかを確認した。その結果、得られた(乱択)解から、厳密に成約を満たす解を導く方法の検討を開始した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計20件（うち査読付論文 18件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 Ueda Suguru, Iwasaki Atsushi, Conitzer Vincent, Ohta Naoki, Sakurai Yuko, Yokoo Makoto	4. 巻 32
2. 論文標題 Coalition structure generation in cooperative games with compact representations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Autonomous Agents and Multi-Agent Systems	6. 最初と最後の頁 503 ~ 533
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1007/s10458-018-9386-z	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 該当する

1. 著者名 Kawase Yasushi, Iwasaki Atsushi	4. 巻 -
2. 論文標題 Approximately Stable Matchings With Budget Constraints	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Thirty-Second AAAI Conference on Artificial Intelligence	6. 最初と最後の頁 1113-1120
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 Oyama Daisuke, Takenawa Tomoyuki	4. 巻 76
2. 論文標題 On the (non-)differentiability of the optimal value function when the optimal solution is unique	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Mathematical Economics	6. 最初と最後の頁 21 ~ 32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.jmateco.2018.02.004	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 WATANABE Ryo, KOMIYAMA Junpei, NAKAMURA Atsuyoshi, KUDO Mineichi	4. 巻 E101.A
2. 論文標題 UCB-SC: A Fast Variant of KL-UCB-SC for Budgeted Multi-Armed Bandit Problem	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 662 ~ 667
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1587/transfun.E101.A.662	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 Koniya Junpei, Takeda Akiko, Honda Junya, Shimano Hajime	4. 巻 -
2. 論文標題 Nonconvex Optimization for Regression with Fairness Constraints	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 35th International Conference on Machine Learning	6. 最初と最後の頁 2742-2751
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 Oyama Daisuke, Takenawa Tomoyuki	4. 巻 n/a
2. 論文標題 On the (non-)differentiability of the optimal value function when the optimal solution is unique	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Mathematical Economics	6. 最初と最後の頁 To appear
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmateco.2018.02.004	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 Kawase Yasushi, Iwasaki Atsushi	4. 巻 n/a
2. 論文標題 Near-Feasible Stable Matchings with Budget Constraints	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IJCAI	6. 最初と最後の頁 242-248
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.24963/ijcai.2017/35	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 Ryoji Kurata, Naoto Hamada, Atsushi Iwasaki, Makoto Yokoo	4. 巻 58
2. 論文標題 Controlled School Choice with Soft Bounds and Overlapping Types	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Artificial Intelligence Research	6. 最初と最後の頁 158-184
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1613/jair.5297	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 Takabe Satoshi, Maehara Takanori, Hukushima Koji	4. 巻 97
2. 論文標題 Typical approximation performance for maximum coverage problem	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 n/a
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevE.97.022138	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 Alsuhaibani Mohammed, Bollegala Danushka, Maehara Takanori, Kawarabayashi Ken-ichi	4. 巻 13
2. 論文標題 Jointly learning word embeddings using a corpus and a knowledge base	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 n/a
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1371/journal.pone.0193094	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 Maehara Takanori, Marumo Naoki, Murota Kazuo	4. 巻 169
2. 論文標題 Continuous Relaxation for Discrete DC Programming	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Mathematical Programming	6. 最初と最後の頁 211-219
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1007/978-3-319-18161-5_16	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 Takayuki Osogami, Rudy Raymond, Akshay Goel, Tomoyuki Shirai, and Takanori Maehara	4. 巻 n/a
2. 論文標題 Dynamic determinantal point processes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AAAI	6. 最初と最後の頁 n/a
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 Maehara Takanori, Yamaguchi Yutaro	4. 巻 182
2. 論文標題 Stochastic packing integer programs with few queries	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Mathematical Programming	6. 最初と最後の頁 141 ~ 174
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1007/s10107-019-01388-x	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 So Nakashima and Takanori Maehara	4. 巻 n/a
2. 論文標題 Optimization from Non-Uniform Samples	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 NIPS 2017 workshop on Discrete Structures in Machine Learning	6. 最初と最後の頁 n/a
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Masaaki Imaizumi, Takanori Maehara, and Kohei Hayashi	4. 巻 n/a
2. 論文標題 On Tensor Train Rank Minimization: Statistical Efficiency and Scalable Algorithm	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 NIPS	6. 最初と最後の頁 n/a
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Maehara Takanori, Suzuki Hirofumi, Ishihata Masakazu	4. 巻 n/a
2. 論文標題 Exact Computation of Influence Spread by Binary Decision Diagrams	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 WWW	6. 最初と最後の頁 n/a
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1145/3038912.3052567	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 Koniya Junpei, Ishihata Masakazu, Arimura Hiroki, Nishibayashi Takashi, Minato Shin-ichi	4. 巻 n/a
2. 論文標題 Statistical Emerging Pattern Mining with Multiple Testing Correction	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 KDD	6. 最初と最後の頁 n/a
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1145/3097983.3098137	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 J. Koniya, J. Honda, and A. Takeda	4. 巻 n/a
2. 論文標題 Position-based Multiple-play Multi-armed Bandit Problem with Unknown Position Bias	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 NIPS	6. 最初と最後の頁 n/a
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 安田 洋祐	4. 巻 65(1)
2. 論文標題 5つの「なぜ？」でわかるノーベル経済学賞	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 一橋ビジネスレビュー	6. 最初と最後の頁 86-99
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 Iwasaki Atsushi, Sekiguchi Tadashi, Yamamoto Shun, Yokoo Makoto	4. 巻 34
2. 論文標題 Repeated Multimarket Contact with Private Monitoring: A Belief-Free Approach	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence	6. 最初と最後の頁 2038 ~ 2045
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1609/aaai.v34i02.5576	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6件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 浅野 真宏
2. 発表標題 見聞違いのある繰り返しゲームにおける戦略のダイナミクス
3. 学会等名 日本OR学会秋季研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前島 萌
2. 発表標題 地域上限制約付きマッチングの効率性改善に関する研究
3. 学会等名 日本OR学会秋季研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Junpei Komiyama
2. 発表標題 Multi-armed Bandit Problems: Formulations and Applications
3. 学会等名 Summer Workshop on Economic Theory (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takanori Maehara
2. 発表標題 巨大ネットワーク解析の算法：グラフ極限 (Graphons) とその周辺
3. 学会等名 Summer Workshop on Economic Theory (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 前原 貴憲
2. 発表標題 ネット広告に対する予算配分問題とその周辺
3. 学会等名 ゲーム理論ワークショップ(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 西野上和真
2. 発表標題 見間違え付き繰り返しゲームにおける協力的均衡とダイナミクス
3. 学会等名 日本OR学会秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 安田洋祐(監訳): ティモシー・ハバード, ハリー・パーシュ	4. 発行年 2017年
2. 出版社 NTT出版	5. 総ページ数 280
3. 書名 入門 オークション: 市場をデザインする経済学	

1. 著者名 安田洋祐(監訳): スティーヴン・レヴィット, オースタン・グールズビー, チャド・サイヴァーソン	4. 発行年 2017年
2. 出版社 東洋経済新報社	5. 総ページ数 581
3. 書名 レヴィット ミクロ経済学 基礎編	

1. 著者名 安田洋祐 (監訳) : スティーヴン・レヴィット, オースタン・グールズピー, チャド・サイヴァーソン	4. 発行年 2017年
2. 出版社 東洋経済新報社	5. 総ページ数 636
3. 書名 レヴィット ミクロ経済学 発展編	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Computational Incentive Science https://sites.google.com/site/a2ciwasaki/home yyasuda's website https://sites.google.com/site/yosukeyasuda/jp Daisuke Oyama's Homepage http://www.oyama.e.u-tokyo.ac.jp/ 小宮山 純平 (Junpei Komiyama), Ph.D. http://www.tkl.iis.u-tokyo.ac.jp/~jkomiyama/index_jp.html インセンティブサイエンスの算法セミナー https://sites.google.com/site/a2ciwasaki/home/cis-seminars</p>
--

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	尾山 大輔 (Oyama Daisuke) (00436742)	東京大学・大学院経済学研究科(経済学部)・教授 (12601)	
研究分担者	小宮山 純平 (Komiyama Junpei) (20780042)	東京大学・生産技術研究所・助教 (12601)	
研究分担者	安田 洋祐 (Yasuda Yohsuke) (70463966)	大阪大学・経済学研究科・准教授 (14401)	

6. 研究組織（つづき）

	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	前原 貴憲 (Maehara Takanori) (20751407)	国立研究開発法人理化学研究所・革新知能統合研究センター・ユニットリーダー (82401)	