

令和 2 年 9 月 14 日現在

機関番号：12612
研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）
研究期間：2017～2019
課題番号：16KK0003
研究課題名（和文）不完全情報下における動学ゲームの計量経済学的推定技術の設計・評価（国際共同研究強化）
研究課題名（英文）Econometric Estimation for Dynamic Games with Imperfect Information(Fostering Joint International Research)
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） 10,800,000円
渡航期間： 17ヶ月

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（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。基本メカニズムの1つであるマッチング問題に予算制約を加えた問題に近似アルゴリズムを利用した成果が人工知能分野のトップ会議であるIJCAI2017（採択率25%=137/550）および AAAI2018（採択率25%=933/over 3800）に採択された。さらに実証分析に資するよう制約付きマッチング問題の構造を解明し、新しい表記法を設計した。

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制約付きマッチングは情報科学と経済学において理論と実証の双方において重要な応用例である。例えば、電力の売り手と買い手の予算制約付き安定マッチングや児童と保育園のカップル制約付きマッチング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ができる。本研究では問題の数理構造を明らかにすることを起点に、1) 存在性を保証するためにどのように安定性概念を緩めるか、2) 制約下での最大安定マッチングを求める問題の計算量、3) 実際のデータとの比較に資するよう基底的効用でのモデル化、のそれぞれに成果を上げることができた。

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. An extension of the well-known stable marriage problem, we studied approximate stable matchings with budget constraints and published the results at IJCAI2017 (25% acceptance rate = 137/550) and AAAI2018 (acceptance rate of 25%=933/over 3800). Then we have analyzed the mathematical structure of stable matchings under constraints and developed some novel representation for empirical analysis.

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

1. 研究開始当初の背景

本研究の基課題(基盤研究(B)17H01787)は2016年より日本でも導入された電力市場をモデル化し、最適化を基礎とするメカニズム設計手法を活用し、様々な社会的・技術的制約を同時に満たすことのできる電力市場メカニズムの理論的基盤を構築することを目的とする。近年、東日本大震災などを契機に顕在化した電力不足は深刻であり、災害に強いエネルギー管理システムとして、分散型のエネルギー管理システム(Distributed Energy Management System: DEMS)の重要性が高まっている。DEMSでは、これまで電力の売り手は少数の大規模電源を持つ事業者に限られていたのに対して、今後は多数の小規模電源を持つ事業者/個人に広がり、電力システムの様々な技術的制約を満たすのはますます困難となる。そこで事業者の発電量だけでなく、需要家の消費量を調整する仕組みとして、需要家と事業者がもつ情報を集積し、誰と誰がいくらで取引するかを決定する電力市場メカニズムに着目した。基課題を通じて申請者は、電力市場周辺の状況を調査し、そのメカニズムを理論的に分析し、社会的要請に対応できるよう新しいメカニズムを設計してきた。しかしこれらは、需要家や事業者が取りうる行動集合を限定し、その効用(利得やコスト)を所与としている。このような定性的な理論的分析は、周波数オークションやキーワード連動広告オークションなどの豊富な実践例が示すように、実際の制度設計や改善に十分に役に立つことが知られている。しかし、基課題の成果を社会実装に向けて強力に推進するには、現実的な行動集合や効用を実際のデータから推定し、その有効性を定量的に示す技術が必要であると考えられるようになった。

2. 研究の目的

本研究の目的はデータに最適化や学習といったアルゴリズム技法を駆使して、ゲーム理論的資源配分メカニズム(メカニズム)を設計する理論的基盤を構築することである。電力市場では、電力を誰にどれだけ販売するかに一定の制約を課す必要がある。電力市場では電力量や価格だけでなく、発送電可能な容量や設備配置のネットワーク構造、さらに社会的な要請といった多数の社会的・技術的制約を同時に考慮しなければならない。これに対して、大規模災害時に病院や交通機関などの公共性の高い需要家への電力供給を優先させるといった制約下で誰と誰を取引させるかを決定するマッチングメカニズムが必要となる。例えば、電力需給が逼迫するとき、鉄道や病院といった公共性の高い施設への電力供給は優先されるべきである。このような制約のもとで売り手と買い手を組み合わせようとすると従来の解概念の存在性が保証されなくなる。このため、何らかの形で解概念を弱める必要があるが、うまく弱めるには、社会的によいとされる組み合わせ(マッチング)の構造を明らかにしなければならない。本研究は、スタンフォード大学経済学部のFuhito Kojimaを海外共同研究者として、このような複数プレイヤーが関わる制約付きマッチングを対象に、実際の事例から、プレイヤーの効用や振る舞いをパラメトリックにモデル化し、社会制度やルールの定量的な反実仮想分析のための理論を検討した。

3. 研究の方法

本研究では、電力市場や保育園のマッチングなどの事例を通して、ゲーム理論的資源配分メカニズム(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、以下の2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) 制約付き安定マッチングの構造と特徴づけ
- 2) 基底的効用による制約付きマッチングの表記法

4. 研究成果

マッチング問題とは、研修医と病院をマッチする研修医配属問題をはじめとする枠組みであり、代表的なメカニズムにゲールとシャプレーによるDeferred Acceptance(DA)メカニズムがある。しかし、現実の問題には、マッチング結果に何らかの制約が課せられることがある。例えば、僻地や離島の病院に一定の人数の研修医を配属することを保証する下限制約や都市部の病院に研修医が過度に集中することを防ぐ地域上限制約などがある。このときDAメカニズムでは制約を満たせるとは限らないし、そもそも安定マッチングが存在するとは限らなくなる。そこで、制約に違反することある程度許す、または安定性を近似することで、何らかの近似解を求めるアルゴリズムを設計・評価する。

まず、安定結婚問題の一拡張である予算制約付き近似安定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。これらの成果をもとに以下の成果があがっており、順次トップ国際会議やトップジャーナルへの投稿を準備している。

研究方法の1)に関して、地域上限制約付きマッチングの構造を理解するために、安定マッチングを求める問題を整数計画問題として記述した。ここで安定マッチングの非存在性は知られているので、マッチングの大きさ(マッチ数)に関する近似を検討した。しかし、そもそも安定性を実現する制約だけで実行可能解がなくなることがわかった。次に、安定性概念を弱めて存在性を保証した弱安定マッチングの中でマッチ数を最大化する問題に取り組み、この問題が選好にタイがあるマッチングを求める問題(Stable Matchings with Tie and Incomplete List, SMTI)と等価となることを明らかにした。

制約を満たすために、ある地域の病院への配属を希望する研修医をリジェクトするとき、優先順位の異なる病院間で誰をリジェクトするかを事前に決めることができない。そこで、研修医-病院の代わりに、地域を仮想的なプレイヤーと定義し、研修医-地域のマッチング問題で、地域が研修医の優先順位にタイを持つケースに帰着した。SMTIはNP困難であることから、この地域上限制約付き最大(弱)安定マッチングを求める問題もNP困難となる。また弱安定マッチングを求める既存メカニズムはすべてマッチ数に関する2近似アルゴリズムであることがわかった。さらにメカニズムに、研修医が自身の選好を偽って申告するインセンティブをもたないという性質(耐戦略性)を要求する限りは、2近似を下回らないことを示した。

一方で、SMTIにおける2近似以下のアルゴリズムを地域上限制約付きマッチングに拡張した結果、弱安定マッチングを見つけることは保証できるが、その近似比をバウンドするのは難しく、何らかのパラメータ(地域制約の個別制約に対する厳しさなど)に依存する近似比を考える必要があると予想している。

地域上限制約付き最大安定マッチングの問題の構造を明らかにする過程で、安定マッチングの存在を保証する病院の優先順位の構造が存在する可能性に気がついた。この条件は安定性と(研修医側の)パレート効率性が両立する条件として知られている非周期性と類似している。これに着目して、周期性を修正し、病院の優先順位がこの条件を満たすならば、安定マッチングが存在するという十分条件を証明した。現在、必要条件の証明に取り組んでいる。

最後に、カップル制約付きマッチングを考える。これは研修医配属にエントリしたカップルが同じ地域の病院を希望する問題であり、カップルを同じ病院にマッチさせる、もしくは2つの異なる病院にマッチさせる、1人だけマッチさせるといったようにマッチングのバリエーションが増えるため、よいマッチングが求めるのが難しくなる。厳密にはあるマッチをハイパーエッジで記述して最適なマッチングを求めなければならない。そこで、従来の順序選好の代わりに、効用モデルと協力ゲームの枠組みを用いて準安定マッチングを求めることを考える。この問題はハイパーグラフマッチング問題と呼ばれるが、協力ゲームにおける提携構造形成問題と同じ構造をしており、そこで使われる動的計画法ベースのアルゴリズムの適用を検討している。

さらに関連する成果として、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。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を評価するには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た動学ゲームを設計し、解かなければならない。そこで、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」を対象に、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において、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、その成果が人工知能分野のトップ会議であるAAAI2020(採択率20.6%=1591/7737)に採択された。

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 1件 / うちオープンアクセス 0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 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 Proceedings of the 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 Atsushi Iwasaki, Tadashi Sekiguchi, Shun Yamamoto, and Makoto Yokoo	4. 巻 -
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 34th AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-2020)	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) 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 Yasushi Kawase and Atsushi Iwasaki	4. 巻 -
2. 論文標題 Approximately Stable Matchings with General Constraints	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 18th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-2020)	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) 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 Yasushi Kawase and Atsushi Iwasaki	4. 巻 -
2. 論文標題 Near-feasible stable matchings with budget constraints	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of the 26th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-2017)	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) 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 -

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 浅野 真宏
2. 発表標題 見間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 西野上和真
2. 発表標題 検索結果 ウェブ検索結果 見間違い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0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<https://sites.google.com/site/a2ciwasaki/home>
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>

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
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	小島 武仁 (Kojima Fuhito)	スタンフォード大学・Department of Economics・Professor	