

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26280081

研究課題名(和文)最適化にもとづく電力市場メカニズム設計のための理論的基盤の構築

研究課題名(英文) Developing a theory of mechanism design for electricity markets based on optimization

研究代表者

岩崎 敦 (Iwasaki, Atsushi)

電気通信大学・情報理工学(系)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) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は電力市場をモデル化し、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の構築を目的とする。まず、短期的な現物電力と長期的な先物電力の2つの異なる市場を組み合わせた「容量市場」を理解するために、不完全観測下の多市場接触を解析し、非自明な均衡戦略の設計に成功した。次に、パラメトリック表現を用いたメカニズム設計手法から、予算制約を持つ参加者にとって効率的なメカニズムの設計に成功した。最後に、公共性の高い買手に優先的に電力を割り当てるといった社会的な制約を扱う制約付きマッチングメカニズムを開発し、人工知能分野トップのジャーナル/国際会議で発表した。

研究成果の概要(英文)：This research project aims to develop a theory of mechanism (rule or protocol) design for electricity markets that satisfies a variety of social or technical constraints simultaneously. First, in order to understand the "capacity market" that combines two different markets of short-term in-kind electric power and long-term futures electric power, we analyzed multi-market contact under imperfect observation and designed a non-trivial equilibrium strategy. Next, we succeeded in designing an efficient mechanism for agents facing budget constraints via a parametric expression. Finally, we developed a matching mechanism dealing with social constraints such as allocating electricity preferentially to buyers with high publicity, and presented at the journal and international conferences of the top of artificial intelligence field.

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 電力市場

1. 研究開始当初の背景

大規模災害による電源の喪失などの社会状況の変化に対する要請や、再生可能エネルギー発電や蓄電池などの分散型電源の増加により、従来のエネルギー管理システムのままでは、電力の需給バランスを効率的に維持することが困難となりつつある。例えば、東日本大震災に起因する電力不足の問題も深刻であり、災害対策のためのエネルギー管理システムや災害に強いエネルギーインフラの構築が強く望まれている。このため、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 (文献[1])。これまで電力の売り手が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、DEMS では多数の小規模電源を持つ事業者/個人に広がることを想定している。このような状況下では電力システムにおける様々な技術的制約を満たすのは非常に困難となるため、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が重要となる。これには、事業者が電力価格を調整し、需要家に消費電力量を一時的に削減するように協力を促すデマンドレスポンス (Demand Response: DR) などが知られている。

DR を実現する有効な手段の一つとして、その需要と供給に合わせて最適な電力価格を決定する市場メカニズム、いわゆる電力市場メカニズムが注目を集めている。電力市場メカニズムとは、多数の事業者および需要家からの情報、例えば事業者の可能発電量と売値や、需要家の希望電力使用量と買値を集積し、誰と誰がいくらで取引するかを決定するルール/アルゴリズムのことをいう。このような参加者に社会的影響を与えるメカニズムの設計方法に関する研究はメカニズムデザインと呼ばれ、ゲーム理論/ミクロ経済学の一分野として活発な研究が行われている。

メカニズムデザインに関する著名な研究成果として、1996年にノーベル経済学賞を受賞した Vickrey による第二価格入札 (Vickrey-Clarke-Groves メカニズム) に関する研究がある。第二価格入札とは、例えば、ある商品やサービス (財) に関して、10万円、7万円の入札があった場合、最も高い10万の入札をした入札者が勝者となるが、その際に支払う金額を二番目に高い7万とするものである。この入札メカニズムを用いた場合、各参加者は自分が支払う意思のある上限の金額を入札すれば、すなわち正直に行動すれば自分の利益を最大化できる。第二価格入札は、理論的に優れた性質を持つにも関わらず広く用いられるには至らなかった。

ところが、近年、検索エンジンでのキーワード広告において第二価格入札が用いられるようになり、今や第二価格入札は世界中でも

っとも頻繁に実行されている入札方式となっている (文献[2])。このように、ソフトウェア/エージェントが主要な構成要素となりうるメカニズムにおいては、理論的な頑健性が極めて重要となる。これはあるメカニズムにおいて全ての参加者が正直に行動することが均衡になる、つまり一人だけ嘘をついても得をしないようにメカニズムを設計することを意味する。例えば、家庭のスマートメーターが HEMS 内の消費電力量を調整するだけでなく、自動的に必要な電力を取引するエージェントなどを搭載するようになれば、キーワード広告とよく似た状況に近い将来実現しうると考えられる。したがって、適切なメカニズムを導入しなければ、市場が極めて不安定になる恐れがある。

しかしながら現状では、ミクロ経済学/ゲーム理論分野における電力市場の研究はまだまだ抽象的なモデルにとどまっており、DEMS の一部としての電力市場メカニズムの理論的基盤は極めて脆弱である。例えば、電気自動車のバッテリーなどを利用した蓄電技術にもとづいたあるコミュニティ内の電力取引では、従来よりも多くの社会的・技術的制約を同時に考慮しなければならない。このため、仮にモデルが構築できても、その適切なメカニズムを手動で設計するのは極めて困難となる。

[1] 合田忠弘, 諸住哲(監修), 「スマートグリッド教科書」, インプレスジャパン, 2011.

[2] B. Edelman, M. Ostrovsky, and M. Schwarz, Internet Advertising and the Generalized Second Price Auction: Selling Billions of Dollars Worth of Keywords, American Economic Review, 97, 242-259, 2007

2. 研究の目的

背景で問題点を解決するには、DEMS におけ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。そこで、電力市場の特性とその計算実行可能性を考慮したメカニズムを設計することで、電力市場メカニズムを設計する理論的基盤を構築することを目指す。一方で、災害などの社会状況の変化に合わせてメカニズムを対応させるための負荷調整機能を考慮するために、メカニズム設計の問題自体を最適化問題に帰着して、複雑な制約条件を満たしたまま、変化する状況に対応できるメカニズムを設計する。

3. 研究の方法

本研究では、電力市場を取り巻く状況を調査しつつ、その結果に合わせて、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) 不完全観測下の多市場接触のモデルの解析

電力市場は消費者の電力需要を最小の費用で満たす方法を提供するが、通常の財と異なる特徴として、短期と長期の効率性がある。短期の効率性とは既存の電源を最小費用で運用することをいい、長期の効率性とは複数種類の電源を組み合わせた適切な発電「容量」への投資を実現することをいう。電力はその供給量を増やすには膨大な設備投資と時間を必要とするため、長期的に電源容量を安定して供給するための新規投資を促す機能が必要となる。そこでアメリカでは短期的な現物電力と長期的な先物電力の取引を組み合わせた「容量市場」を用いており、Cramton らが文献[3]などで分析している。こうした2つの異なる市場を組み合わせた容量市場を理解するために、不完全観測下の多市場接触のモデル化と解析を進めた。

(2) パラメトリック表現を用いたメカニズムの設計手法の構築

メカニズムは参加者の入札などの入力に対して、勝者などを出力する関数として考える。社会的・技術的制約を満たすメカニズムの候補の集合を多項式の集合として表現(パラメトリック表現)する。これにより、各メカニズムは、多項式集合のパラメータ(係数など)によって表現され、様々な制約条件を満たすメカニズムの集合は多項式集合のパラメータの実行可能領域と等価になる。最初は抽象的なモデルにおけるパラメトリック表現を検討する。

(3) 制約付きマッチングメカニズムの開発

電力の売買は、複数の売手と買手が個別にマッチされるダブルオークション方式をとることが多い。病院や交通機関といった公共性の高い買手に優先的に電力を割り当てるといった社会的な制約を考慮したダブルオークション方式を考えるには、制約を満たすことを前提としたマッチングメカニズムを開発した。

4. 研究成果

本研究では、電力市場を取り巻く状況を調査し、関連するメカニズム設計の研究を進めた。

まず(1)では、プレイヤーが複数のゲーム(市場)をプレイする「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理論的に明らかにした。とくに、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)を私的に観測する不完全私的観測下において、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は、電力市場における談合の有無を検証する際に重要となる。

その結果、多市場接触における非自明な均衡戦略を発見し、その均衡条件の構築に成功した。この戦略は協力状態と処罰状態の2状態からなる戦略で、2つの状態を観測したシグナルの数に関して非線形的に遷移すること、および処罰状態で全ての市場(ゲーム)で相手を処罰するのではなく、一部の市場でのみ処罰することを特徴とする。さらにこの戦略は、1市場下で高い均衡利得を実現するとよく知られている戦略(文献[4]によるしゅっ返し戦略の変形)より高い1市場あたりの均衡利得を実現している。これは私的観測下においては世界初の結果となった。

この成果は複数の人工知能分野の国際会議ランキングにおけるトップ国際会議の1つである AAMAS にショートペーパーとして採択された(採択率 268/550, 48.7%, 雑誌論文(5))。さらに、アルゴリズムゲーム理論分野で著名なシンポジウムである Symposium on Algorithmic Game Theory (SAGT, 採択率約 45%=28/62, 学会発表(8))に採択された。また、関連する内容を最適化分野で著名な RAMP シンポジウムの招待講演で発表した。

次に(2)では、複数の目的を考慮するメカニズム設計を支援するために、市場に参加する主体が電力を必要としていても予算制約に直面する状況を対象にした。本手法を使うことでいくつか条件を満たす場合は、もっとも高い社会的余剰を達成する新しいメカニズムを発見するに至った。さらにこのメカニズムの発見にいたった方法としてパラメトリックメカニズムデザインを提案した論文が、マルチエージェント分野で最難関の国際会議である Autonomous Agents and Multi-agent Systems (AAMAS) にポスター発表として採択された(採択率 314/670, 46.8%, 雑誌論文(12))。

また、自由な取引の電力市場では、より安い電力が調達できる地域の電力を使うようにして、電気代が高い地域の電力の使用を控えるといったことが起こりうる。そこでグループで節約した電力費用の適切な配分決定を計算し、支援する手法を提案した。この成果は人工知能分野でトップの国際論文誌である Artificial Intelligence Journal (5-year impact factor 3.044) に採録された(雑誌論文(10))。

最後に(3)では、まず金銭のやり取りがないケースを検討した。1つはマッチング問題における下限制約を解決するメカニズムが、計算機科学とミクロ経済学の境界領域の研究を扱う新しい国際論文誌として両分野から注目されている ACM Transactions on Economics and Computation に採録された(雑誌論文(9))。次に地域上下限制約を解

決するメカニズムが人工知能分野のトップジャーナルである Artificial Intelligence (Impact factor 3.371) に採択された(雑誌論文(4))。また、これに関連する内容を経営情報学会秋季大会にて、分担者安田とともに企画セッションを行った(学会発表(12,13))。以上の成果をもとに、金銭のやり取りがあるケースにおける制約つきマッチングメカニズムを開発した。この成果は人工知能分野のトップカンファレンスである International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI, 採択率約25%=137/550)に採択された(雑誌論文(2))。

[3] P. Cramton, A. Ockenfels and S. Stoft, Capacity Market Fundamentals, Economics of Energy & Environmental Policy, 2(2), 2013.

[4] J. C. Ely, J. Välimäki, A Robust Folk Theorem for the Prisoner's Dilemma, Journal of Economic Theory, 102(1), 84-105, 2002.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計20件)

- (1) "Controlled School Choice with Soft Bounds and Overlapping Types," Ryoji Kurata, Naoto Hamada, Atsushi Iwasaki and Makoto Yokoo, Journal of Artificial Intelligence Research, 58, 153-184, 2017, 査読有.
- (2) "Near-feasible stable matchings with budget constraints," Yasushi Kawase and Atsushi Iwasaki, the proceedings of the 26th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-2017), to appear, 査読有.
- (3) "Achieving Sustainable Cooperation in Generalized Prisoner's Dilemma with Observation Errors," Fuuki Shigenaka, Tadashi Sekiguchi, Atsushi Iwasaki, and Makoto Yokoo, the proceedings of the 31th AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-2017), 677-683, 査読有.
- (4) "Strategyproof matching with regional minimum and maximum quotas," Masahiro Goto, Atsushi Iwasaki, Yujiro Kawasaki, Ryoji Kurata, Yosuke Yasuda, Makoto Yokoo, Artificial Intelligence, 235, 40-57, 2016, 査読有.
- (5) "Repeated multimarket contact with observation errors," Atsushi Iwasaki, Tadashi Sekiguchi, Shun Yamamoto, and Makoto Yokoo, the proceedings of the 9th International Symposium on Algorithmic Game Theory (SAGT-2016),

344-345, 査読有.

- (6) "Simplifying Urban Network Security Games with Cut-Based Graph Contraction," Hiroaki Iwashita, Kotaro Ohori, Hirokazu Anai, and Atsushi Iwasaki, the proceedings of the 15th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-2016), 205-213, 査読有.
- (7) "社会ゲームにおけるナッシュ均衡の安定性:ポテンシャル・ゲームと完全予見動学," 尾山大輔, 計測と制御, 55(4), 362-367, 2016, 査読無.
- (8) "Comment on "Asian Participation and Performance at the Olympic games", "Yosuke Yasuda, Asian Economic Policy Review, 11(1), pp.93-94, 2016, 査読無.
- (9) "Strategyproof Matching with Minimum Quotas," Daniel Fragiadakis, Atsushi Iwasaki, Peter Troyan, Suguru Ueda, Makoto Yokoo, Transactions on Economics and Computation, 4(1), Article 6, 2015, 査読有.
- (10) "Finding core for coalition structure utilizing dual solution," Atsushi Iwasaki, Suguru Ueda, Naoyuki Hashimoto, Makoto Yokoo, Artificial Intelligence, 222, 49-66, 2015, 査読有.
- (11) "Controlled School Choice with Soft Bounds and Overlapping Types," Ryoji Kurata, Masahiro Goto, Atsushi Iwasaki, Makoto Yokoo, the proceedings of the 29th AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-2015), 951-957, 査読有.
- (12) "Parametric Mechanism Design via Quantifier Elimination," Atsushi Iwasaki, Etsushi Fujita, Taiki Todo, Hidenao Iwane, Hirokazu Anai, Mingyu Guo, and Makoto Yokoo, the proceedings of the 14th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-2015), 1885-1886, 2015, 査読有.
- (13) "Improving Fairness in Nonwasteful Matching with Hierarchical Regional Minimum Quotas," Masahiro Goto, Ryoji Kurata, Naoto Hamada, Atsushi Iwasaki, and Makoto Yokoo, the proceedings of the 14th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-2015), 1887-1888, 2015, 査読有.
- (14) "Expanding "Choice" in School Choice," Atila Abdulkadiroglu, Yeon-Koo Che, Yosuke Yasuda, American Economic Journal: Microeconomics,

- 7(1), 1-42, 2015, 査読有.
- (15) "Sampling Best Response Dynamics and Deterministic Equilibrium Selection," Daisuke Oyama, William H. Sandholm, and Olivier Tercieux, *Theoretical Economics*, 10(1), 243-281, 2015, 査読有.
- (16) "Contagion and Uninvadability in Local Interaction Games: The Bilingual Game and General Supermodular Games," Daisuke Oyama and Satoru Takahashi, *Journal of Economic Theory*, 157, 100-127, 2015, 査読有.
- (17) "VCG-equivalent in Expectationメカニズム:公開型組合せオークションメカニズム構築のための一般的なフレームワーク",藤田悦誌,岩崎敦,東藤大樹,横尾真,コンピュータソフトウェア, 156-167, 2014, 査読有.
- (18) "地域制約の下での戦略的操作不可能なマッチングメカニズム",橋本直幸,後藤誠大,上田俊,岩崎敦,安田洋祐,横尾真,電子情報通信学会論文誌, J97-D(8), 1336-1346, 2014, 査読有.
- (19) "Strategy-proof matching with regional minimum quotas," Masahiro Goto, Naoyuki Hashimoto, Atsushi Iwasaki, Yujiro Kawasaki, Suguru Ueda, Yosuke Yasuda, Makoto Yokoo, the proceedings of the 13th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-2014), 1225-1232, 査読有.
- (20) 学校選択問題のマッチング理論分析,安田洋祐,現代経済学の潮流 2014, 1, 95-122, 2014, 査読有.
- [学会発表](計 20 件)
- (1) "Near-feasible stable matchings with budget constraints," Atsushi Iwasaki, the 26th International Joint Conference on Artificial Intelligence, 2017 年 8 月 23 日, Melbourne (Australia).
- (2) "Achieving Sustainable Cooperation in Generalized Prisoner's Dilemma with Observation Errors," Atsushi Iwasaki, the 31th AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-2017), 2017 年 2 月 6 日, San Fransisco (USA).
- (3) "Equitable Market Design," Yosuke Yasuda, Market Design Workshop, 2016 年 3 月 18 日, 大阪大学社会経済研究所 (大阪府吹田市).
- (4) "Mean-Field Approximation of Forward-Looking Population Dynamics," Daisuke Oyama, ゲーム理論ワークショップ 2016, 2016 年 3 月 7 日, 東京大学 (東京都).
- (5) "Mean Field Approximation of Forward-Looking Population Dynamics," Daisuke Oyama, Time, Uncertainties and Strategies III, 2016 年 12 月 16 日, Paris (France).
- (6) "A Simple Economics of Inequality: Market Design Approach," 安田洋祐, Global Congress of Knowledge Economy, 2016 年 11 月 11 日, 青島 (中国).
- (7) "A Simple Economics of Inequality: Market Design Approach," 安田洋祐, 第 20 回実験社会科学カンファレンス, 2016 年 10 月 30 日, 同志社大学(京都府京都市)(招待講演).
- (8) "Repeated multimarket contact with observation errors," Atsushi Iwasaki, the 9th International Symposium on Algorithmic Game Theory, 2016 年 9 月 21 日, Liverpool (U.K.).
- (9) "研究とメディア活動を両立するための3つのコツ," 安田洋祐, 日本経済学会秋季大会, 2016 年 9 月 11 日, 早稲田大学 (東京都)(招待講演).
- (10) "Reformulation of Nash Equilibrium with an Application to Interchangeability," 安田洋祐, 第 31 回 EEA-ESEM, 2016 年 8 月 23 日, Geneva (Switzerland).
- (11) "スポーツに潜む戦略的思考," 安田洋祐, 大阪大学社会経済研究所・第 13 回行動経済学研究センターシンポジウム「スポーツの経済学」, 2016 年 8 月 17 日, 大阪大学中之島センター (大阪府大阪市)(招待講演).
- (12) "マッチングメカニズムの戦略的側面とその展開",岩崎敦,経営情報学会 2015 年秋季全国研究発表会, 2015 年 11 月 29 日, 沖縄コンベンションセンター (沖縄県宜野湾市).
- (13) "マーケットデザイン入門:情報を活かした社会・制度の仕組み作り," 安田洋祐, 経営情報学会 2015 年秋季全国研究発表会, 2015 年 11 月 29 日, 沖縄コンベンションセンター (沖縄県宜野湾市).
- (14) "How is cooperation/collusion sustained in repeated multimarket contact with observation errors?," Shun Yamamoto, AAAI Fall Symposium 2015 on Sequential Decision Making for Intelligent Agents, 2015 年 11 月 13 日, Washington D.C. (USA).
- (15) "最適化と繰り返しゲーム:動的環境における意思決定," 岩崎敦, 第 27 回 RAMP シンポジウム, 2015 年 10 月 16 日, 静岡大学浜松キャンパス(静岡県浜松市)(招待講演).
- (16) "Reformulation of Nash Equilibrium and an Application to Interchangeability," Yosuke Yasuda, Summer Workshop of Economic Theory,

2015年8月4日,小樽商科大学(北海道小樽市)。

- (17) “Economics of the Rich and the Poor,” Yosuke Yasuda, IGDP Workshop, 2015年6月5日, Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona (Spain) **(招待講演)**。
- (18) “Can local caution restore global tacit collusion?: Repeated multimarket contact with observation errors,” Atsushi Iwasaki, AAAI Spring Symposium 2015 on Applied Computational Game Theory, 2015年3月23日, Palo Alto (USA)。
- (19) “ゲーム理論的マッチングメカニズムとその応用,” 岩崎敦, 第152回アルゴリズム研究会, 2015年3月3日, 電気通信大学(東京都調布市) **(招待講演)**。
- (20) “マッチングとその応用,” 岩崎敦, OR学会第2回ORセミナー『技術者のためのゲーム理論の基礎』, 2014年12月6日, 株式会社構造計画研究所本書新館(東京都) **(招待講演)**。

〔その他〕

岩崎敦:

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

尾山大輔:

<http://www.oyama.e.u-tokyo.ac.jp/>

安田洋祐:

<https://sites.google.com/site/yosukeyasuda/jp>

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

尾山 大輔 (OYAMA DAISUKE)

東京大学・大学院経済学研究科・准教授
研究者番号: 00436742

安田 洋祐 (YASUDA YOSUKE)

大阪大学・大学院経済学研究科・准教授
研究者番号: 70463966

(3) 連携研究者

穴井 宏和 (ANAI HIROKAZU)

九州大学・マス・フォア・インダストリ研究所・訪問教授

研究者番号: 20417520

(4) 研究協力者

山本駿 (SHUN YAMAMOTO)

九州大学大学院システム情報科学研究
院・博士前期課程
研究者番号: なし