

エネルギー需給ネットワークのモデリングと統合メカニズム

研究代表者 内田 健康
(先進理工学部 電気・情報生命工学科 教授)

1. 研究課題

エネルギー伝送ネットワークと双方向情報伝達ネットワークをインフラとして、ダイナミクスを持つエネルギー需要者及びエネルギー供給者、並びに公益事業体をエージェントとする次世代のエネルギー需給システムを想定する。このエネルギー需給システムにおいて、エネルギー需要者とエネルギー供給者が利己的かつ戦略的に決定する分散制御を束ねて公共の利益に導く最適な統合メカニズム（公益事業体の機能）を構築するために、エネルギー需給ネットワークをモデル化し、同時に統合メカニズムの理論的な基礎を築き、統合メカニズムの設計法を確立することを目指す。

2. 主な研究成果

2016年度から我が国においても電力自由化が本格化し、自由な電力需給のために、卸売市場から小売市場への展開、スポット市場からリアルタイム調整市場への展開が推進されている。一方で再生可能エネルギーの導入が進められており、電力自由化を踏まえながら再生可能エネルギーの不確かさを克服してアンシラリーサービスを実現するリアルタイム調整市場の実現が望まれている。本研究プロジェクトにおいては、ダイナミックな電力システムを前提としたリアルタイムオークションの新たなモデルを提案し、その経済的評価の理論的解析を継続的に実施している。

電力自由化を前提とする多種多様な目的・意思や資財を持つエージェント・ユーティリティ間で経済的・物理的に公平なエネルギー授受を実現するには、合理的・利己的なエネルギー需給を取り扱うことのできるゲーム理論の視点が必要であり、本研究課題でこれまで取り組んでいたメカニズムデザインによるモデルベース電力市場設計理論をより一般化した契約理論に基づく枠組みが必要である。この枠組みを理論的に構築するために、経済分野で長年研究されてきた契約理論をシステム制御分野の知見を基に再解釈し、制御入力を持つダイナミクス制約を考慮した新たなエネルギー需給システムを提案してきた。その結果、従来研究でも行われてきた契約構造の分析だけでなく、最適な契約を導出する構成手法を理論的に構築し、経済モデルと物理モデルを統合したエネルギー需給システムの基盤理論体系の拡張に成功した。

本年度もこの新しいエネルギー需給システムの基盤となる理論体系の整備と確立を遂行しながら、より具体的なエネルギー需給システムへの応用を通して統合メカニズムの設計法の確立に向けた研究展開を行った。一つは、昨年度より継続して研究中のゲーム型のトランスアクティブ制御である。実際の電力システムはマルチタイムスケール制御によって安定化を実現しているため、個々のエージェントに運用状態決定の権利を与える分散型の情報処理・意思決定を各タイムスケールで実現する必要がある。そこで、機器のダイナミクスを考慮した多地域電力網システムの実時間制御を対象に、電力市場からの参照信号を考慮しつつ、負荷周波数制御器設計において物理的運用コストに関する評価関数をエージェント毎に最適化するゲーム構造の問題を定式化しゲーム型制御の設計法を提案した。実際の物理モデルを用いたシミュレーション解析を通してその設計法の効果を

検証した。この成果は論文としてのまとめを終わり近々に公開の予定である。もう一つは、上記の多地域電力網システムの実時間制御を対象に契約理論を基礎とする設計法を提案した。また、東日本系統モデルでの検証を終えた段階にある。契約理論に基づく設計法に関しては、離散時間システムモデルへの展開、さらにリスク回避型モデルでの理論的な確立に成功した。

本研究プロジェクトにおいては、統合メカニズムの構成要素として需要者の市場取引への参加を促すためのアグリゲータのモデル構築にも取り組んでいる。本年度は新たなモデルとして、蓄電装置を備えて戦略的に行動するアグリゲータを検討し、その機能の得失を検討した。また、本研究プロジェクトの理論的成果を実装できる電力市場シミュレータ開発にも取り組んでいる。本年度は昨年度に引き続いて、このシミュレータの機能を前提として、機械学習の知見、行動経済学的知見、システム制御的知見を融合した分析を進めた。

再生可能エネルギーの導入量拡大を前提として、今後の電力・エネルギー市場ではネガワットを含む調整力の確保が課題である。また同時に、蓄電設備容量の拡大も予想される。ネガワットや蓄電量の大規模な取引は従来の電力市場には見られない新たな要素であり、これらの取引規模の拡大が市場パフォーマンスに与える影響について、十分な知見が蓄積されているとはいえない。本研究プロジェクトでは、今後の電力市場を想定した市場モデル分析にも取り組んでいる。この研究課題は、ネガワットや蓄電量取引に加え、アグリゲータといった新たな市場プレーヤも視野にいれ、今後の電力市場設計に資する政策的インプリケーションを得ることを目的としている。昨年度は調整力市場におけるネガワット取引量が、消費者側のエネルギー利用効率と密接な関連を持ち得ることに着目し、理論的分析を推進した。分析の結果、調整力市場におけるネガワットと火力発電の代替的關係を想定した場合、消費者側のエネルギー効率改善はネガワット価格を上昇させ、調整力としての火力発電量の増加をもたらすケースがあることを示した。本年度は、電力市場設計における具体的なインプリケーションを導くために、蓄電を含むモデルへの拡張に取り組んだ。これにより、市場取引の各プレーヤ（消費者、小売事業者、など）にとって節電量（ネガワット）や蓄電量が戦略的にどのような意味をもつのか、また市場全体のパフォーマンスをどのように左右するかを考察し、それと同時に小売価格の内生化に取り組み、エネルギー効率改善が小売価格へ与える効果を含め、市場全体に与える影響について分析を進めた。現在、これらの分析結果の発表に向けて、論文の作業に着手している。

上記研究課題とも関連し、一般消費者の電力需要（節電）行動を行動経済学的な視点から分析する研究も実施している。2017年1月に一般住民200世帯を対象としたラボラトリー経済実験を実施し、一昨年、昨年と実験結果の分析をすすめると同時に、ラボラトリー実験、および関連するフィールド実験結果を整合的に説明可能な電力需要モデルの構築に取り組んでいる。本年度も継続して取り組んだ。本モデルの構築は、スマートメータをはじめとする電力システム設計への貢献も期待できる。現在、本課題の研究成果発表に向けて作業を進めている。

3. 共同研究者

赤尾健一（社会科学総合学術院 教授）	庫川幸秀（理工学術院総合研究所 次席研究員）
和佐泰明（理工学術院総合研究所 次席研究員）	塚本幸辰（理工学術院総合研究所 招聘研究員）
辻 隆男（理工学術院総合研究所 招聘研究員）	澤田英司（理工学術院総合研究所 招聘研究員）

4. 研究業績

4.1 学術論文

- T. Tanaka, Na Li, K. Uchida, On the Relationship between the VCG Mechanism and Market Clearing, Proc. of 2018 American Control Conference, pp.4597- 4603, 2018
- Y. Okajima, K. Hirata, V. Gupta, K. Uchida, Strategic Battery Storage Management of Aggregators in Energy Demand Networks, Proc. of 2nd IEEE Conference on Control Technology and Applications, pp.444-449, 2018
- Nguyen Gia Minh Thao, K. Uchida, K. Kofuji, T. Jintsugawa, C. Nakazawa, An Automatic-Tuning Scheme based on Fuzzy Logic for Active Power Filter in Wind Farms, IEEE Transaction on Control Systems Technology (Vol.16, pp.1-9, 2018)
- 裴 香烈、辻 隆男、大山 力、内田健康：“風力発電を含む電力系統における調整力市場ベースの地点別限界価格による需給制御と混雑管理”，電気学会論文誌 B, Vol 138, No. 8, pp.671-684, 2018
- Hieu Xuan Nguyen, T. Tsuji, T. Oyama, K. Uchida: "Three Phase Unbalance Elimination in Distribution System by Optimal Inverter Dispatch of PCS", IEEE Transactions on Power and Energy, Vol. 139, Issue 1, pp.13-26, 2019
- K. Akao, H. Sakamoto, A Theory of Disasters and Long-run Growth, Journal of Economic Dynamics & Control 95, Issue 10, pp.89 - 109, 2018
- K. Uchida, K. Hirata, Y. Wasa, Incentivizing Market and Control for Ancillary Services in Dynamic Power Grids, In Smart Grid Control: Overview and Research Opportunities, J.Stoustrup et al. Eds., Springer-Verlag, pp.47-58, 2018

4.1 学術論文

- K. Akao, K. Uchida and Y. Wasa, "International Environmental Agreements as an Equilibrium Choice in a Differential Game," 6th World Congress of Environmental and Resource Economists, Gothenburg, Sweden, 26, June, 2018
- E. Sawada and Y. Wasa, "Dynamic Pricing and Consumers' Adaptive Behavior: Energy Demand-supply Balance when Consumers Update Their Lifestyles in the Long-run," 19th Global Conference on Environmental Taxation, Madrid, Spain, 28, September, 2018

5. 研究活動の課題と展望

電力自由化を前提として動的ゲーム理論並びに最適制御理論を基礎とした統合メカニズムの理論については引き続き検討を進める予定である。市場モデルにおける需要者及び供給者の戦略振る舞いを統合して社会厚生を実現する統合メカニズム、ネットワークの不確かさに対処してアンシリリーサービスを実現する統合メカニズムの創生が当面の課題である。メカニズムデザインの方法、契約ベースの方法、アグリゲータのモデルの分析、新たなプライシングの方法、並びにそれらの動的システムへの展開を検討することによって、動的統合メカニズム理論の更なる展開と体系化を目指す。また、経済的評価・分析に重点をおいて、電力市場モデル、および消費者行動モデルについて各種パラメータを推計し、定量的な観点からも政策立案に資する分析の実施を目指す。