

# 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  
(理工学術院総合理工学研究所 特任研究教授)

## 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

我が国における電力自由化の本格化に伴い、自由な電力需給を目指して、卸売市場から小売市場への展開やスポット市場から需給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需給市場から長期エネルギー需給まで視野に入れた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。

多種多様な目的・意思や資財を持つエネルギー需給に携わるエージェント間で、電力自由化が進展した中で社会厚生 of 最適化を計りつつ経済的・物理的に公平なエネルギー需給を実現するには、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る。本研究ではこの視点からモデルベース電力市場設計理論の構築に取り組んできた。特に、電力システムの物理的制約をゲーム理論的な経済的合理性の枠組みの中で克服することを念頭に置いて研究を推進した。具体的には、昨年度までに、経済学におけるゲーム理論分野の成果であるメカニズムデザイン理論および契約理論を基礎にシステム制御分野との統合を計り、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。その結果、以下に述べるように、経済モデルと物理モデルを統合した新たなエネルギー需給システムの基盤理論体系化に向けた道筋をつけることに成功した。

本年度のエネルギー需給システム構築の理論的成果として、エネルギー需給エージェントが自己利益の最適化を図りつつ、すなわち最適な制御入力を実施しながら、需給システム全体の利益（社会厚生）を確保できる需給システムに導くインセンティブの設計法を与えた。エージェントの物理的ダイナミクスを考慮した需給システムの動的メカニズムを与えることができる点が提案法の特長であり、経済学の契約理論によって設計されるメカニズムとの本質的な違いである。本年度は需給システムの物理モデルを離散時間システムとして扱い、線形システムに対する二次評価の枠組みでインセンティブ関数の設計法を確立し、数値シミュレーションによりその有用性が確認しその成

果を論文として公開している。この理論的基盤に関する研究については、現在、実システムの応答特性を念頭に連続時間システムとしての物理モデルを用いた展開を進め、成果の整理と論文として公開するためのまとめを行っている。上記の需給統合メカニズムの理論的展開に重点を置いた研究に加えて、一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については、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論文としてその結果を公開することができた。この研究で用いた物理モデルは、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ものである。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。

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。本年度は昨年度に引き続き、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、新たな評価指標を導入しながら数値シミュレーションを加えその機能の得失を検討した。プロジェクト開始以来のアグリゲータモデルに関する成果は、英文書籍の一章として公開する予定である。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。本年度も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統合メカニズムに関する研究を進めた。

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幅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、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てきた。現在この成果のまとめと論文化に向けた作業を推進中である。

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。本年度は、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統合的に説明可能な電力需要モデルの構築に取り組み、成果発表に向けて論文化を進めている。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。また、長期エネルギー需給に関する研究として、長期経済モデルによる理論的分析を実施中である。動的ゲームの枠組みで環境問題における多国間の均衡解の分析および2 FLC モデルによる脱炭素と投資の動態分析に取り組んでいる。

### 3. 共同研究者

赤尾健一（社会科学総合学術院・教授）                      和佐泰明（理工学術院・講師）  
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

- ・和佐泰明, 平田研二, 内田健康, "ゲーム理論的トランザクティブ制御に基づく二階層電力調整力市場設計," 計測自動制御学会論文集, vol. 55, no. 6, pp. 401-410, 2019
- ・ Y. Wasa, T. Murao, T. Tanaka, K. Uchida, "Strategic bidding of private information for principal-agent type dynamic LQ networks," Proceedings of 17th European Control Conference, pp. 3383-3389, 2019
- ・ Y. Wasa, K. Uchida, "Optimal Dynamic Incentive and Control Contract among Principal and Agents with Moral Hazard and Long-Term Average Reward," Proceedings of 2019 Asian Control Conference, pp. 31-36, 2019
- ・ Y. Wasa, K. Hirata, K. Uchida, "Optimal agency contract for incentive and control under moral hazard in dynamic electric power networks," IET Smart Grid, vol. 2, no. 4, pp. 594-601, 2019
- ・ Y. Wasa, K. Akao, K. Uchida, "Optimal Dynamic Incentive Contracts between a Principal and Multiple Agents in Controlled Markov Processes: A Constructive Approach," RIEEM Discussion Paper Series No. 2001, Waseda University, 2020
- ・ K. Akao, H. Sakamoto, K. Uchida, Y. Wasa, "International Environmental Agreement as an Equilibrium Choice in a Differential Game," Int. Conference on Public Economic Theory (PET 2019), Strasbourg, France, 2019

### 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、プロジェクト終了時点でのまとめと論文化を行う予定である。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創生を当面の課題として、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、電力市場モデル分析および長期経済モデル分析を進める。