

内田 健康

早稲田大学理工学術院
教授

エネルギー需給システム構築のための経済モデルと物理モデルの融合に基づく設計
理論及び実証・実装・提言

§1. 研究成果の概要

研究全体を四つの研究項目に分類して本年度の研究実施の概要を記す。

(1) **人間行動を考慮したエネルギー消費モデルの構築と、そのモデルに基づくエネルギー需給バランスの分析と最適化、並びに ADR (Automated Demand Response) 促進策:** 依田グループでは 2018 年度は以下のように HEMS 社会実装化社会実験を実施した。第一に、横浜市・東急田園都市沿線の HEMS 導入済み 800 世帯対象に、電気料金選択、電力会社選択のフィールド調査を継続し、また、同地域の HEMS 導入済み 200 世帯対象に、内田グループの経済グループと協力して、調査・ラボ実験融合研究を実施した。二編の学術論文として公開予定である。第二に、北九州市「城野ゼロ・カーボン先進街区」における環境配慮型の街作りのフィールド調査を行った。内田グループの経済グループはフィリピンマニラ郊外で実施してきた社会実験の分析を行った。

(2) **消費者行動、エネルギー市場、並びに長期エネルギー政策のエネルギー経済モデルの構築と分析:** 内田グループの経済グループが主に担当した。2018 年度は以下の課題に取り組んだ。消費者のエネルギー消費行動に関しては、依田グループと共同して実施した融合実験結果の分析を進めた。また、ランダム化フィールド実験から得られたデータを用いた電力需要の節電行動の分析を行った。理論モデルの分析では、市場の競争促進政策の評価と経済分析、調整力市場におけるエネルギー効率のネガワット取引への影響分析を行った。長期エネルギー政策に関しては動学的なモデルに基づく研究を推進した。

(3) **需要者と供給者の利己的な意思決定・制御を束ねて公共の利益を確保する動的統合メカニズムの設計理論、経済効率性の評価、並びに分散型アルゴリズム/高速アルゴリズム/信頼性向上とエネルギーサービス:** 内田グループの物理グループは、これまで取り組んでいたメカニ

ムデザインに基づく動的統合メカニズムをより一般化して、契約理論の枠組みでインセンティブ設計という観点から新たな展開を図った。また、提案手法の評価と提示を目的としたシミュレータ及びビルエネルギーシミュレータを充実させた。さらに、蓄電装置を組み込んだアグリゲータの新たな設計法を提案した。大塚グループは、電力価格に対する需要の反応の不確かさ及び再生可能エネルギー供給の不確かさを考慮したリアルタイムプライシングを実現するために、不確かさを考慮した非線形モデル予測制御を研究した。需要の不確かさについては粒子フィルタによる価格弾力性のオンライン推定を適用し、再生可能エネルギーの変動については機会制約を用いた。昨年度までのモンテカルロ近似は計算量が大きかったが、2018年度は電力システムの特徴を利用して確定的な最適化問題に帰着させこの欠点を克服した。さらに未来情報を考慮した最適化も確定的な最適化問題で近似できることを示した。その結果、周波数変動の抑制と制約条件の満足の双方において、従来手法より優れた制御を得た。滑川グループでは、分散的価格決定に関して、需要家の個人情報に関する秘匿性保持と需給調整費用最小化を市場取引に基づいて分散的に達成するインセンティブ価格設計法を考案した。柔軟性の高い電力需給調整法であること、双対分解により、需要家の個人情報に関する秘匿性保持と需給調整費用最小化の両方の特徴を備えた最適電力需給調整法となっている点が特長である。藤崎グループでは、エネルギーサービスの品質を保証するシステム原理として、合意・非合意を形成するオピニオンダイナミクス、雑音のもとでの高信頼な合意アルゴリズムについて、解析手法を構築した。さらに、高付加価値サービスの実現を支えるエネルギーデータの収集技術を開発した。また、システム最適化として、経済性、プライバシー、公平性を実現するミニマックス最適化についてさらなる高機能化を検討した。

(4) 再生可能エネルギーに対する経済及び物理の融合視点からの統合メカニズム及び制御方策：内田グループは、2018年度は風力発電を含む電力システムを対象として調整力市場ベースの需給制御の研究を行った。また、供給側アグリゲータの出力の質を高める電力フィルタの適応ゲイン則の新しい設計法を提案した。大塚グループの非線形モデル予測制御に基づくリアルタイムプライシングの成果は再生可能エネルギーを対象とするが、(3)に記したので重複を避けここでは再記しない。藤崎グループは、ウィンドファームにおいて、各タービンにおける風況の相互干渉が、故障につながる力をタービンのブレードへ与えることに着目し、指定された発電量は確保しつつ、各タービンにかかる負荷が可能な限り小さくなるような運用計画並びに制御手法を考案した。

【代表的な原著論文】

- [1] I. Matsukawa, “Information Acquisition and Residential Electricity Consumption: Evidence from a Field Experiment”, *Resource and Energy Economics*, Vol. 53, pp. 1-19, 2018.
- [2] Y. Okawa, K. Muto, and T. Namerikawa, “Passivity-based Stability Analysis of Electricity Market Trading with Dynamic Pricing”, *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, Vol. 11, No. 5, pp. 390-398, 2018.
- [3] E. Capello, T. Wada, E. Punta, and Y. Fujisaki, “Minimax Optimization of Fatigue Loads in a Wind Farm and Its Realization via Sliding Mode Controller of Wind Turbines”, *Proc. of IEEE Conference on Control Technology and Applications*, pp. 430-435, 2018.

§2. 研究実施体制

(1)「依田」グループ

- ① 主たる共同研究者:依田 高典 (京都大学大学院経済学研究科 教授)
- ② 研究項目
 - ・スマートグリッドの社会実装化を見据えたエネルギー消費のデマンド・レスポンスの行動経済学的研究

(2)「内田」グループ

- ① 研究代表者:内田 健康 (早稲田大学理工学術院 教授)
- ② 研究項目
 - ・3タイムスケールエネルギー経済モデルの構築と分析
 - ・動的統合メカニズム理論の構築と評価
 - ・再生可能エネルギーに対するリスク管理型統合メカニズム

(3)「大塚」グループ

- ① 主たる共同研究者:大塚 敏之 (京都大学大学院情報学研究科 教授)
- ② 研究項目
 - ・不確かさへの対応
 - ・再生可能エネルギーへの対応
 - ・実時間・高速アルゴリズム

(4)「滑川」グループ

- ① 主たる共同研究者:滑川 徹 (慶應義塾大学理工学部 教授)
- ② 研究項目
 - ・分散最適化アルゴリズムの開発
 - ・ネットワーク構造と分散制御に関する研究
 - ・最適経済負荷配分と分散的電力価格決定アルゴリズムの開発

(5)「藤崎」グループ

- ① 主たる共同研究者:藤崎 泰正 (大阪大学大学院情報科学研究科 教授)
- ② 研究項目
 - ・合意形成・協調・高信頼性のためのシステム原理
 - ・経済性・プライバシー・公平性を実現するシステム最適化