

「分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論及び基盤技術の  
創出と融合展開」

H28 年度  
実績報告書

平成 24 年度採択研究代表者

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
  - ・モデルの拡張
  - ・高速最適化アルゴリズムの改良
  - ・不確かさの考慮

(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

## §2. 研究実施の概要

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:** 依田グループは、今年度は、東急グループ管内の HEMS 導入済み 800 世帯対象に、2015 年度に引き続き、電気料金選択、電力会社選択のフィールド調査を行った。電力全面自由化の前後における、家庭での節電の取組、電気料金メニュー乗換、小売全面自由化後の電力会社選択等の意向変化を調べた。さらに、その中から、200 世帯を抽出し、内田グループの経済グループと協力して、電力消費のピア効果に関するラボ実験を行った。これは経済学の研究上、興味深いフィールド調査とラボ実験の融合研究である。

**(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、消費者行動については、依田グループと協力してラボラトリー経済実験を実施することによって価格以外の情報が節電行動へ与える影響を確認し、また物理グループと共同して、学習によって更新する消費者選好を考慮した経済指標の推移を検証した。市場モデルについては、デカップリング制度が電力価格と電力会社の利潤に与える影響分析、わが国の電気事業を対象として垂直統合の配分効率の計測、またネガワット市場のモデルの価格決定要因と効率性分析を実施した。長期モデルについては、炭素税導入のマクロ経済全体と各種産業への影響を分析するための CGE モデルの構築を推進した。

**(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では、一昨年度に引き続きリアルタイムオークションの設計問題を検討し、タイプパラメータを含むダイナミックモデルとインセンティブ設計との関係を解析することによって、ダイナミクスのタイムスケールを考慮して共有情報の削減を可能とする近似的なメカニズムデザインを提案した。併せて、受動性に基づく新たなメカニズムの提案及び市場支配力を考慮したアグリゲータモデルの提案をおこない、提案手法を評価するための市場シミュレータの構築を開始した。大塚グループでは、各時刻で収集した系統の情報に基づいて電力価格の非線形最適化問題を高速に解き、その価格を需要者と供給者に与えることで需要と供給を調整し、間接的に負荷周波数制御を行うモデル予測制御手法を提案した。飽和特性をもつ非線形需要関数を用いた点、そのパラメータをオンラインで推定する点が特色である。また、最適化計算効率化をめざしたモデル低次元化の基礎理論を展開した。滑川グループでは、昨年度に引き続き、分散最適化アルゴリズム、ネットワーク構造と分散制御、並びに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研究を行った。特に分散的価格決定アルゴリズムに関しては、当初の目的である需要者と供給者の利己的な振る舞いを公共利益へと誘導できることを数値実験によって確認した。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ためのシステム原理とシステム最適化について研究を進めた。システム原理については、ゴシップアルゴリズムによる合意形成、協調モデルとしての部分構造をもつネットワーク、並びに雑音の存在のもとでの高信頼な合意アルゴリズムを検討し、その解析法及び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・管理・操作技術の開発を進めた。また、経済性、プライバシー、公平性を実現する分散

最適化アルゴリズムの高機能化を計った。

**(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:**内田グループでは、再生可能エネルギーの不確かさに対してリスク解析等を進めながら、電力ネットワークにおける安定な需給制御及び周波数制御を実現する市場メカニズムを検討した。また、再生可能エネルギー電源の安定化を図る VPP(Virtual Power Plant)型の制御方式を検討した。大塚グループでは、(3)で述べた価格最適化手法を用いて、再生可能エネルギーの地域消費及び系統分配消費についてシミュレーションによる比較検討を行った。また、再生可能エネルギーの不確かさを考慮した確率モデル予測制御について研究した。藤崎グループでは、再生可能エネルギーの不確かさに対して経済合理性のあるネットワーク構造の解析手法の研究を進めた。

**代表的な原著論文を3報:**

- [1] T. Ida, K. Murakami and M. Tanaka, "Electricity Demand Response in Japan: Experimental Evidence from a Residential Photovoltaic Generation System, " Economics of Energy & Environmental Policy, vol. 5, no. 1, pp. 73-88, 2016.
- [2] T. Murao, K. Hirata and K. Uchida, "An Approximate Dynamic Integration Mechanism for LQ Power Networks with Multi-time Scale Structures," Proceedings of the European Control Conference 2016, pp. 202-209, 2016.
- [3] Nguyen Gia Minh Thao and Kenko Uchida, "A Two-level Control Strategy with Fuzzy Logic for Large-scale Photovoltaic Farms to Support Grid Frequency Regulation," Control Engineering Practice, vol. 59, pp. 77-99, 2017.