

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

平成 24 年度採択研究代表者

|                 |
|-----------------|
| H29 年度<br>実績報告書 |
|-----------------|

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 研究代表者: 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
  - ・オンライン同定
  - ・確率モデル予測制御
  - ・高速最適化アルゴリズムの改良と拡張

(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：** 依田グループは昨年度に引き続き HEMS 社会実装化社会実験を実施した。2017 年度の概要として、第一に、東急グループの多摩田園都市での省エネプロジェクトを活用し、電力全面自由化前後の住民の省エネ意識の向上、省エネ行動の変容を促した。第二に、フィールド調査参加者の中から、ラボ実験参加者を募り、地域住民のピア効果が節電行動に与える作用を調べるラボ実験を、内田グループの経済グループと協力して実施し、フィールド実験とラボ実験の融合実験結果の分析を開始した。

**(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。2017 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、まず依田グループとの共同実験結果を分析した。次に消費者への適切な情報の与え方の検討、並びに消費者行動モデルを用いたシミュレーション分析に取り組んだ。電力市場については、ネガワット取引量とエネルギー利用効率の関係を理論的に分析した。世代間衡平と動学的効率性を満足させるエネルギー需給システムに関する動学的 CGE 分析については、基本的な取り組みの方針が固まり準備を開始した。

**(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、これまでに提案したメカニズムデザインに基づく動的統合メカニズムをインセンティブ設計という観点で纏め体系化を図った。また、提案手法の検証と提示を目的として 2016 年度より開始したシミュレータ構築を充実させながら、新たにビルエネルギーシミュレータ EnergyPlus 上で実時間制御・最適化を実行するシミュレータを構築した。さらに、私的情報とインセンティブ・契約設計の観点に基づく新たな動的統合メカニズムやアグリゲータの新たな設計指標の提案を行った。大塚グループは、再生可能エネルギーや需給の不確かさを考慮した最適実時間価格決定法として、非線形確率モデル予測制御アプローチを検討した。モンテカルロ近似による実現では、再生可能エネルギーの確率の変動と電力価格との新たな関係を見出し、併せて需要者モデルにのみ非線形性がある場合に大幅な高速化ができることを示した。本アプローチは、未来に入手可能な情報も考慮した場合は効率的な最適化を可能とすること、また電力価格が離散的な値しかとらない場合でも有効であることも示した。滑川グループは、分散最適化アルゴリズム、ネットワーク構造と分散制御、及び最適経済負荷配分と分散的電力価格決定アルゴリズムについて検討した。特に、三つ目の課題に関しては、需要者の個人情報秘匿性保持と高い柔軟性の需給調整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手法を考案した。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、協調モデルとしての部分構造をもつネットワーク、雑音や時間遅れ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。また、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・操作技術を開発した。次に、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や多目的最適化を検討した。

(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：内田グループでは、再生可能エネルギーの出力変動による需給のインバランスを市場による需給調整力で補償しアンシラリーサービスを実現する(特に周波数を適正化する)統合メカニズムを検討している。本年度は特に、需給バランス、容量制約、並びに二次調整力余力を制約とした三次調整力の最適運用方法を提案した。併せて、調整力市場のオークション方式の差異を評価するために運用制御シミュレーションを実施した。また、供給側のアグリゲータ(VPP など)構築と需要側のアグリゲータ構築のための予測手法及び制御手法を開発した。大塚グループは、(3)の記述と重複するが、確率モデルを用いて、予測の不確かさを考慮した制約条件の扱い方や未来に得られる情報も考慮した保守性の低い電力価格最適化手法を研究した。藤崎グループは、送電系統において再生可能エネルギーに対応する不確かな発電機が大量導入された場合のロバストな発電計画を与える確率的アルゴリズムを開発した。

#### 代表的な原著論文3報：

- [1] K. Ito, T. Ida and M. Tanaka, “Moral Suasion and Economic Incentives: Field Experimental Evidence from Energy Demand”, *American Economic Journal: Economic Policy*, Vol. 10, No. 1, pp. 240-267, 2018.
- [2] T. Murao, K. Hirata, Y. Okajima and K. Uchida, “Real-time Pricing for LQG Power Networks with Independent Types: A Dynamic Mechanism Design Approach”, *European Journal of Control*, Vol. 39, pp. 95-105, 2018.
- [3] Y. Okawa and T. Namerikawa, “Distributed Optimal Power Management via Negawatt Trading in Real-Time Electricity Market”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 8, No. 6, pp. 3009–3019, 2017.