

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「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」
研究課題「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」

研究終了報告書

研究期間 2015年4月～2020年3月

研究代表者：内田 健康
(早稲田大学理工学術院、
特任研究教授)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

我が国の電力システム改革の一環としてエネルギー取引の完全自由化が 2016 年から開始された。自由化の波が広がる中で、もう一つの変化として、今後再生可能エネルギー利用の大幅な拡大が予想されている。電力システム改革の目的である経済効率性、厚生最大性、並びに信頼性をもつエネルギー需給システム - 経済システムであると同時に物理システムでもある - を実現するために、これまでにない仕組みをもった需給システムが必要となる。そこで本研究チームは、次世代のエネルギー需給システムのあるべき姿を明らかにし、その姿を実現するための基礎となる理論を創出するとともに、経済実験による実証や社会実験による実装化を踏まえた提言を行うことを目標とした。エネルギー需給システムは環境システム、経済システム及び物理システムの複合システムであり、そのあるべき姿の追求には異分野の融合研究が不可欠である。本研究は今までに例を見ない経済グループ(行動経済、環境経済)及び物理グループ(電力システム、システム制御、情報工学)の研究者・技術者を結集させた異分野融合型研究である。本研究ではこのような異分野融合を可能にするために、専門分野の概念・知見に対して分野を横断するモデルという「共通言語」をもちいて融合させることによって、来るべき将来のエネルギー需給システムの新たな仕組み - メカニズムと呼ぶ - の創生を目指してきた。研究課題名「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」は本研究の目標とねらいを端的に表したものである。

内田チームでは本研究の目標を次の四つの研究課題に分割し、それぞれの研究を遂行することによって研究全体の目標達成を目指した。四つの研究課題とは、**課題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**、**課題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**、**課題3:需要者と供給者の利己的・戦略的な意思決定・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、経済的効率性の評価、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**、**課題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**である。本研究チームは、依田、内田、大塚、滑川、藤崎グループの五つのグループから構成され、課題1、2については主に依田、内田グループが、課題3、4については主に内田、大塚、滑川、藤崎グループが担当して研究を遂行した。研究成果の全体概要を四つの課題に沿って述べる。課題1および課題2(消費者行動)については、エネルギー消費における省エネルギー行動に繋がる DR (Demand Response) 評価のために、フィールド実験、ラボラトリー実験、並びに両者を融合した新しい実験を実施し、エネルギー消費行動を行動経済学の視点から明らかにした。省エネルギー促進策の指針となる成果である。課題2のエネルギー市場については、市場における制度・政策、その他の電気事業規制の経済的効果の理論・実証分析を実施し、さらに物理モデルと経済モデルの融合し、契約理論を応用した市場モデルを構築した。これらは自由化市場と政策のあり方を検討する基盤となる成果である。課題2・課題4の長期経済モデルについては、長期プロジェクトにおける割引率のあり方や代替エネルギーの普及とエネルギー需給・経済への影響に関して理論・実証両面から分析し、温暖化政策下での中・長期エネルギー需給及び投資行動・計画の基礎となる知見を得た。投資行動とエネルギー需給・経済の長期動態解析については、現在、研究継続中である。課題3・課題4については、エネルギー需給に関わる戦略的ステークホルダーを統合する多くの新たな需給モデルおよび動的メカニズムを考案した。インセンティブ・契約、高速性、分散性、高信頼性、並びに再生可能エネルギーの変動への耐性を備えたメカニズム構築を四つのグループで分担した。自由化達成を前提とした次世代需給システムに対する統合メカニズムの設計・実装の基盤となる成果である。メカニズムの追求とともに、その性能を比較・評価する場としてのマーケットシミュレータを構築した。以上、当初の計画の全ての目標を達成するとともに、新たな方向への研究展開により計画にはなかった成果を挙げることもできた。

(2) 顕著な成果

< 優れた基礎研究としての成果 >

1. エネルギー需給の3タイムスケール経済モデル

概要：経済学の視点からエネルギー需給システムを短期(日)、中期(年)、長期(30年以上)の三つのタイムスケールでモデル化し、そのモデルに基づく分析を通してエネルギー需給のあるべき姿を明らかにした研究である。三つのタイムスケールの様々なモデルを提案して、それらのモデルを統合してエネルギー需給を幅広いタイムスケールから分析することによって、従来の研究からは得られないエネルギー需給の姿をモデル化することが可能となった。経済・物理連携の成果である。

2. インセンティブ設計に基づく統合メカニズム

概要：エネルギー需給のメカニズムは、エージェント(需要者、供給者)に対する制約条件、並びに目的関数のモデルが与えられれば、最適化問題(厚生最大化)の解として得られる。しかし自由化環境下では、各エージェントはこの最適解に沿って行動するとは限らない。他のエージェントが最適解に従わないならば、最適解以外に自身の利益を増やす(戦略的)解があるからである。本研究では、この自由化にともなう統合メカニズムの問題を解決するために、プリンシパル(市場管理者)から動的エージェントに与えるインセンティブの設計法を確立した。経済・物理連携の成果である。

3. 合意形成による市場を介さない統合メカニズム

概要：多数のエージェントからなるエネルギー需給システムの統合メカニズムは市場(清算)原理に基づいている。本研究は、隣接エージェント間の局所的な情報交換によるマルチエージェントシステムの合意形成理論に基づく統合メカニズムの可能性、すなわち市場清算を用いない統合メカニズムの可能性を明らかにした。需給システムのネットワーク構造や局所的な情報交換を調整することによって合意形成の性質(収束速度や耐雑音性など)を変えることができる。新たなエネルギー需給システムの構築に向けた先進的な成果である。

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

1. 社会実装化を見据えたデマンドレスポンスの行動経済学的研究

概要：物理グループでは、リアルタイムプライシングや需給調整モデルのシステム最適化を研究対象としているが、実際の人間には行動経済学的バイアスを持ち、システム最適化の社会実装化は容易ではない。そのため、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を主題として、依田グループは、(株)竹中工務店、(株)東急電鉄、(株)マイボイス、北九州市、早稲田大学経済実験室(内田・経済グループ)等との産官学連携を積極的に推進し、電力全面自由化の前後で社会実証事業を展開した。

2. 実装を視野に入れたエネルギー需給モデルの新展開

概要：今後のエネルギー需給システムの実装を想定すると、様々な形態の需給モデルさらには様々な実装制約に対応できる需給モデルが必要である。本研究チームでは、モデル予測制御の高速解法に基づいて高速な市場清算を可能とする非線形モデル予測型需給モデル、市場参加を断続的可能とするPlug & Play型市場に基づく需給モデル、さらには市場管理者が蓄電設備を用いてネガワット取引を可能とする市場に基づく需給システムを開発した。

3. 代替エネルギー導入効果分析と環境評価のための長期経済モデル

概要：再生可能エネルギーを含む代替エネルギーの普及とエネルギー需給・経済への影響に関して長期経済モデルを用いた分析を行い、温暖化政策下での中・長期エネルギー需給及

び投資行動・計画の基礎を与えた研究である。さらに、再生可能エネルギー普及および炭素削減に対する技術投資や設備投資の効果について長期モデルを構築し、動態分析研究を継続中である。再生可能エネルギー普及および脱炭素など環境経済の課題解決には、長期経済モデルからのアプローチが不可欠である。

< 代表的な論文 >

論文 1 (6-1)①-A7

T. Ida, N. Motegi, and Y. Ushifusa, “Behavioral Study of Personalized Automated Demand Response in Workplaces”, Energy Policy, vol.1, 32, 1009-1016, 2019

2014年7月、竹中工務店本社をフィールドとして、従業員約200人のタスクライトを自動制御するオートデマンドレスポンスの実証実験を行った。本論文における研究成果として3点が得られた。第一に、節電参加率は、節電参加がデフォルトで、参加できない場合に辞退するオプトアウト型が高い。第二に、節電参加時の節電効果は、節電に参加したら報酬を支給する成果報酬型が大きい。第三に、グループ全体では、オプトアウト型・成果報酬型の節電効果が大きい。

論文 2 (6-1)①-B65

Y. Wasa, K. Hirata and K. Uchida, “Optimal Agency Contract for Incentive and Control under Moral Hazard in Dynamic Electric Power Networks”, IET Smart Grid, 2019 (online published, 10.1049/iet-stg.2018.0256)

本論文では、エネルギー需給・動的ネットワークにおける戦略的エージェントの振る舞いをネットワーク全体の利益へと導く統合メカニズムを追求し、予算均衡性を考慮できる包括的なメカニズムを導くことに成功した。この結果は予算均衡性を保証するインセンティブ設計への一般化も可能である。さらに、このメカニズムはエージェントの戦略的な行動(決定や制御)を厚生最大化へ誘導する、すなわち、モラルハザードの問題を克服できる。この結果は、動的エネルギーネットワークにおいて世界初の成果であり、物理と経済の連携研究による成果である。

論文 3 (6-1)①-D26

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.

蓄電設備の充放電を考慮した分散型電力需給管理手法を提案した論文である。提案法は、各地域に設置された大型蓄電設備を市場管理者が利用することによってネガワット取引を可能とし、その結果、当日に生じた発電不足および発電超過いずれの場合に対しても電力需給調整を可能にしている。また、市場管理者と電力市場参加者である各地域の電力需要家がインセンティブ価格を介して情報交換を行うことによって、当日市場における電力需給調整を分散的に達成する分散型電力市場アルゴリズムで実現している。

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

① 内田グループ

研究代表者:内田 健康 (早稲田大学理工学術院 特任研究教授)

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

② 依田グループ

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)

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

③ 大塚グループ

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)

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

主たる共同研究者:滑川 徹 (慶応義塾大学理工学部 教授)

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
- 最適経済負荷配分と分散的電力価格決定

⑤ 藤崎グループ

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)

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) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

内田チームでは積極的に国内外の研究者や産業界との連携に取り組んでいる。以下に、国際強化支援策の支援を受けた国際連携を中心にネットワーク形成状況を述べる。

依田グループでは産業界との連携を積極的に推進している。本研究課題遂行の中で合計 5 件の産官学連携プロジェクトを運営したが、主な研究パートナーは(株)竹中工務店(オフィスにおける

自動デマンドレスポンスのフィールド実験で共同実施)、(株)マイボイス(全面自由化前後の家庭電力消費の選好変化の全国パネル調査で共同実施)、(株)東急電鉄(東急田園都市線の電気料金プランのフィールド実験で共同実施)、(株)東急電鉄・早稲田大学経済実験室(東急田園都市線の節電フィールド調査・ラボ実験融合で共同実施)、北九州市・北九州市立大学(北九州市城野地区ゼロカーボン地帯の省エネアドバイス事業で共同実施)である。また、海外研究者の訪問・共同研究を積極的にホストしてきた。主な受け入れ研究者は、Matthew Rabin 教授(Harvard University)、Shuang Zhang 助教授(University of Colorado at Boulder)、Eric J. Johnson 教授(Columbia University)、Elke U. Weber 教授(Princeton University)、Andreas Ziegler 教授(Universität Kassel)、Heike Wetzels 博士(Universität Kassel)、Elke Groh 博士(Universität Kassel)、David S Rapson 准教授(University of California at Davis)、HJames B Bushnell 教授(University of California at Davis)である。

内田グループは国際強化支援策の支援を受けて NSF 支援の研究者グループ、Annaswamy 博士(MIT)、Gupta 教授(ノートルダム大学)、Kuh 教授(ハワイ大学)、Li 准教授(ハーバード大学)、Hespanha 教授(カリフォルニア大学サンタバーバラ校)、Khargonekar 教授(カリフォルニア大学アーバイン校)と国際共同研究を進めている。過去 3 回の内田チームでの国際ワークショップ(WS)および CREST 全体の WS を通して議論を深めた。現在、和佐講師は Annaswamy 博士と配電システムのモデリングと市場メカニズムについて共同研究を行い、共同論文投稿に至った。また Khargonekar 教授とは学習に基づく市場メカニズムの分析について、共同論文執筆のめどが立った。Kuh 教授とは市場シミュレータ構築に向けたデータ解析に関する共同研究に取り組んでいる。平田教授は Hespanha 教授と価格提示による分散型需給調整市場運用方策に関する共同研究を行い、国際共著論文を発行した。また、Gupta 教授と岡島助教(大塚グループ)は共にアグリゲータの設計と経済的評価の研究を推進し、2 編の国際共著論文を完成させた。畑中准教授は 10 か月の長期滞在での議論を踏まえて、Li 准教授とエネルギー管理システムおよび分散エネルギー管理のための分散最適化アルゴリズムの開発について共同研究を実施し、4 編の共著論文を完了した。田中崇資助教(テキサス大学オースティン校)は、Gupta 教授とモデル予測制御におけるメカニズムデザインに関する共著論文を発表し、Li 准教授とは、市場メカニズムとメカニズムデザインの研究に関する共著論文を発表した。なお、内田グループと NSF 研究者グループとの研究連携には、滑川グループとの連携も含まれている。内田経済グループでは樽井教授が中心となってハワイ大学の ERO (Economic Research Organization)において共同 WS を開催し連携を深めると共に、経済モデルのシミュレータへの組み込みに関して和佐講師及び Kuh 教授との研究連携を実施している。ドイツとの国際連携として、CREST 全体のハイデルベルグ国際合同 WS を契機に、シュトゥットガルト大学の Sawodny 教授と EMS 領域における制御問題の研究連携を開始し、国際強化支援策の支援を受けて東京・シュトゥットガルト・横浜で WS を開催した。この連携も滑川グループと共同して実施した。内田チームでは再生可能エネルギー発電ファームから供給される電力の質を高める VPP(Virtual Power Plant)設計にも取り組んでいる。この具体的な例として風力発電ファームにおける課題について、Thao 研究員(現在豊田工業大学)が中心となって富士電機と共同研究を進め国際論文誌に採録された。

大塚グループでは、非線形モデル予測制御の計算高速化に対する一つのアプローチとして、最適化計算に用いる数学モデルの低次元化に着目し、河野准教授(広島大)が Jacquelin Scherpen 教授(フローリンゲン大)と共同研究を行った。相互に複数回の訪問を行い、計 13 編の国際共著論文を発表した。

滑川グループでは、NSF 支援研究者及び RCN 支援研究者グループとの研究連携を実施している。(1)NSF 支援研究者との連携:滑川グループでは、統合メカニズムの分散最適化を狙って、経済負荷配分と電力価格決定の分散最適化アルゴリズムの開発を目指している。この方向と課題に関して研究連携予定の NSF 側研究者である Qu 教授との研究連携を実施している。Qu 教授は FEEDER Center (米国エネルギー省の大型研究プロジェクト)の研究統括兼ディレクターを務め、スマートグリッドとその経済的な問題に関して包括的かつ先駆的に研究を推進している。NSF 支援研究者との連携としては、内田グループとの共同研究も推進している。具体的には、経済及び物理の融合視点から再生可能エネルギーに対する統合メカニズム及び制御方策の構築に三者で進

めている。この連携を通して、内田チームの課題解決に向けて貢献すると共に、国際共同論文の執筆を予定している。(2)RCN 支援研究者グループとの連携:サイバーフィジカルシステムと電力ネットワークの分散管理システムの構築に関する研究を推進している Eliassen 教授(オスロ大学)及び物理的なアプローチによる蓄電池の高性能化を目指している Sartori 准教授(オスロ大学)のグループと、再生可能エネルギーの将来的な大量導入とバッテリーの充放電計画の向上に向けた管理・制御に関する研究連携を実施している。

藤崎グループでは、Fabrizio Dabbene 博士らの研究グループ(CNR IEIT・トリノ工科大学(イタリア))とのエネルギー管理システムのための協調制御に関する研究交流および共同研究を実施している。