

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「エネルギー需給ネットワークにおける  
エージェントの戦略的行動を公共利益に統合する  
最適化メカニズム」

## 研究終了報告書

研究期間 平成24年10月～平成27年3月

研究代表者:内田 健康  
(早稲田大学 理工学術院、教授)

## § 1 研究実施の概要

### (1) 実施概要

全研究期間を通して研究課題を、課題1:モデル構築、課題2:変動と不確かさ、課題3:分散制御設計、課題4:統合メカニズム検討、課題5:高速最適化計算、という五つに分けて研究を進めた。これらの課題を三つの研究グループ(統合メカニズムグループ、分散制御グループ、実時間最適化グループ)で分担し、一方で月1回のペースで三チーム合同の報告・検討会を行いチーム内での議論展開と情報共有を計りながら研究を実施した。特に研究期間前半では、チームに参加する異分野のメンバーが基礎的な知見を共有するために、各分野の基本的文献のサーベイ・講義会、並びに国内外の研究者とのセミナー及び共同ワークショップを開催した。以下に、課題毎に研究実施の概要を記す。

#### 〈モデル構築〉

エネルギー需給ネットワークを解析・設計するためには、環境、社会・経済、並びに物理という分野の異なるディシプリンを共役するモデルの構築が不可欠である。この課題についてはチーム全体で、システム規模や分解能、並びにシステムのダイナミクスに留意したモデル化、ユーティリティ(公益事業体、独立系統運用機構)及びエージェント(需要者、供給者)の数理モデル化、マルチエージェントネットワークとしてのモデル化、エージェント個々の効用及び公共の利益の定式化に取り組んだ。効用評価・利益評価の定式化には逆問題からのアプローチも検討した。特に、エネルギー価格によって動的マルチエージェントネットワークを制御するモデルを提案し、その妥当性を検証した。経済の視点からは、ネットワークのダイナミクスを長期的・政策、市場、並びに需要者行動の3レベルのタイムスケールで階層化したモデルを検討し、理論的分析を行った。需要者行動モデルに関しては、理論的分析に加えて経済実験を実施し、行動分析並びに理論モデル検証を行った。

#### 〈変動と不確かさ〉

エネルギー需給ネットワークにおける変動や不確かさを、エージェント間の競争的關係(すなわち不完全情報環境)に由来するものと環境変動に起因するものに分けて検討した。エージェント間の競争的關係に由来する不確かさの場合には、非協力ゲームモデルに確率的モデルを加えたエネルギー需給モデルを提案し、このモデルに基づくネットワークの統合メカニズム構築によって不確かさを克服する方式を確立した。再生可能エネルギーの変動に代表される環境変動に起因する不確かさに対しては、物理システム変動の分布を仮定する確率的モデルに基づく対処法、並びに変動の確率分布を限定しない機会制約に基づく対処法を検討した。本研究課題は、統合メカニズムグループが中心となり全体を主導する形で実施した。

#### 〈分散制御設計〉

電力システムの周波数制御問題や需給平準化問題などの具体的なモデルに対する分散制御設計、並びに一般的な Linear-Quadratic-Gaussian (LQG) モデルに対する分散制御設計を検討した。利己的に振舞うエージェントと社会の利益を追求するユーティリティからなる動的ネットワークに対して、まずユーティリティによるプライシングを前提に、最適プライシング及び環境の変動と不確かさを考慮した制御の分散型構成法を提案した。次に、ユーティリティによるプライシングを前提としない枠組みで分散制御設計法を検討した。また、次世代電力ネットワーク構築を念頭に、分散的モニタリング手法や再生可能エネルギー発電システム単体の分散インテリジェント制御を試みた。本研究課題は、分散制御グループが中心となり全体を主導する形で実施した。

#### 〈統合メカニズム検討〉

市場メカニズム及びプライシングを基礎とする統合メカニズムに焦点を絞った。エネルギー需

給システムのタイムスケールで階層化したモデルに対して、スポットプライシングによって統合可能な層、動的モデルを必要とするリアルタイムプライシングに基づく層に分けて検討した。それぞれの階層において、完全情報環境における最適化ベースのプライシングを用いた統合化、不完全情報環境(エージェントの戦略的振る舞いを許す環境)におけるLQGモデルに対してメカニズムデザインを併用する統合化の方法を提案した。また、マルチエージェントモデルを用いた電力プライシング手法の検討や合意形成の基礎研究も行った。本研究課題は、統合メカニズムグループが中心となり全体を主導する形で実施した。

#### 〈高速最適化計算〉

まず、価格を提示するユーティリティーとエージェントからなる動的需給モデルに対して負荷周波数最適制御計算を実施し、モデルの大規模化に対しても実時間最適化が可能であることを示した。より良い応答を実時間最適化によって実現するために、モデルに組み込むべき要素と評価関数に組み込むべきコストを調整する方法を検討し、逆問題に基づく方法を提案した。また、最適化の対象となる非線形システムの構造を実時間最適化に適した形へ変換するための基礎研究を行った。電力システムにおける電力取引に焦点を絞った研究として、過渡安定解析技術の並列化を用いた電力取引量の上限に対する新しい高速算定法を提案した。本研究課題は、実時間最適化グループが中心となり全体を主導する形で実施した。

## (2) 顕著な成果

### 〈優れた基礎研究としての成果〉

#### 1. LQG 電力需給ネットワークに対する動的統合メカニズムの設計

概要:需要と供給に基づいて動的に価格が変動するような次世代のエネルギー需給ネットワークシステムを想定し、利己的かつ戦略的に動く需要者及び供給者が、価格を決める系統運用者に対して嘘の報告をせずに真の報告をすることが自身の利益の最大化につながる動的統合メカニズムの構築を行った<sup>A1-11), A1-14), A1-25)</sup>。提案したメカニズムは、LQG 制御問題で表し、メカニズムデザイン理論を用いることで、分散的な意思決定による公共利得の最大化、(ペイジアン) 誘因両立性、個人合理性または予算均衡性という特性を有している。

#### 2. リアルタイムプライシングによる最適運用状態への誘導と安定性

概要:自身の利得を追求する動的なエージェントと公共の利得実現を目指すユーティリティーの相互作用により運用されるネットワークを想定し、このネットワークを公共利得を達成する最適な運用状態へと導くためのユーティリティーによる実時間価格策定方策を提案している<sup>A1-19)</sup>。価格提示を利用した多くの関連研究とは異なり、提案手法は、エージェントの動特性を陽に考慮した上で、価格提示により運用される閉ループシステムの安定性までを議論することができている。また、電力ネットワークにおける需要・供給バランスの実現などに提案手法を適用し、その有効性を検証することもできている。

#### 3. 電力需給ネットワークの階層分散制御

概要:大規模電力ネットワークに対して、状態と入力に関する重複情報を用いた分散階層制御法を提案した<sup>B1-10)</sup>。分散型電源を含む複数エリアが連結した電力ネットワークの系統周波数制御問題に対して、提案手法を適用し、分散階層制御器を設計した。更には数値シミュレーションにより、分散階層制御器がシステムを安定化でき、周波数変動が所望の領域に抑えられていることを示した。この成果は韓国で開催された ICCAS 2014 で発表され、Outstanding paper award を受賞した<sup>B51-2)</sup>。

### 〈科学技術イノベーションに大きく寄与する成果〉

### 1. 経済モデルと物理モデルを統合した実時間最適化によるリアルタイムプライシングのアルゴリズム検証

概要: 需要家と供給家の行動を非線形な効用関数と費用関数でモデル化し, 各地域の需給差が発電機の非線形動揺方程式へ影響を及ぼす電力ネットワークに対して, 電力価格を提示する独立系統運用機構 (ISO) による需給バランスと負荷周波数変動の非線形最適制御問題を定式化した. 数値シミュレーションによって, 非線形最適制御問題が実時間で解けることとリアルタイムプライシングの有効性を示した<sup>C1-14)</sup>. 非線形モデルや複雑な評価関数をそのまま扱うことができるため, 拡張性が非常に高い成果である.

### 2. 並列計算技術の適用による電力システムの同期過渡安定度解析の高速化手法

概要: 電力システムの安定運用維持に必要な過渡安定度解析の高速化を目的として, Waveform Relaxation Method に基づく並列計算技術の適用を検討した. 特に日本の 60Hz 系統で生じる低減衰長周期動揺モードの解析を主眼として, 固有ベクトル解析に基づいた系統分割手法を開発した<sup>A1-28)</sup>. 先行研究における系統分割手法では, 主にネットワークのトポロジーが考慮されていたが, 本研究では発電機の長周期にわたるダイナミクスを予見して最適化を試みたものであり, 並列計算技術の性能を一層向上させる重要な知見を導出したものである.

### 3. 電力産業における新旧事業者間の技術格差と配分効率を考慮した最適垂直構造

概要: 電力産業における既存企業(従来の自然独占企業)と新規参入企業間の発電技術格差を考慮したうえで, 発送電分離が社会厚生を高める(もしくは低下させる)ための理論的条件を明らかにした<sup>A1-18)</sup>. 当該分野において産業の垂直的構造が産業全体の生産効率に与える効果を明示的に考慮した先行研究はわずかしかない. 本研究は先行研究で想定されていない市場構造および規制の枠組みを対象として分析を拡張することで, 発送電分離の是非に関する政策議論に対して理論的知見を追加するものと考えられる.

## §2 研究実施体制

### (1) 研究チームの体制について

#### ① 「統合メカニズム」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
内田 健康	早稲田大学 理工学術院	教授	H24.10～
赤尾 健一	早稲田大学 社会科学総合学術院	教授	H24.10～
辻 隆男	横浜国立大学 大学院工学研究院	准教授	H24.10～
塚本 幸辰	三菱電機	次長	H24.10～
平田 研二	長岡技術科学大学 機械系	准教授	H24.10～
村尾 俊幸	早稲田大学 理工学術院	次席研究員	H25.4～
松川 勇	武蔵大学 経済学部	教授	H26.4～
島瀬 和志	神戸大学 経済学研究科	研究員	H24.10～
阪本 浩章	早稲田大学 社会科学総合学術院	PD 研究員	H26.4～
澤田 英司	早稲田大学 理工学術院	招聘研究員	H25.4～
小島 康弘	三菱電機	課長	H26.4～
谷本 昌弘	同上	課長	H25.4～
広瀬 公一	同上	専任	H24.10～
馬奈木 俊介	東北大学 大学院環境科学研究科	教授	H24.10～
田中 健太	武蔵大学 経済学部	専任講師	H24.10～
王 明輝	早稲田大学 大学院先進理工学研究科	D2～D3	H24.10～H26.3
河又 啓	横浜国立大学 大学院工学府	D1～D3	H24.10～
小出 明	同上	D1～D2	H25.4～
裴 香烈	同上	D1	H26.4～
Norhafiz Bin Salim	同上	D1	H26.10～
庫川 幸秀	東京工業大学 大学院社会理工学研究科	D3	H25.4～H25.9
庫川 幸秀	早稲田大学 理工学術院	研究助手	H25.10～
岡島 佑介	早稲田大学 大学院先進理工学研究科	M2, D1～D2	H24.10～
岡田 悠太郎	長岡技術科学大学 大学院工学研究科	M1～M2	H24.10～H26.3
石井 貴弥	同上	M2	H26.4～
馬場 弦起	早稲田大学 大学院先進理工学研究科	M1～M2	H24.10～H26.3
山下 望	同上	M2	H25.4～H26.3
平林 勇介	同上	M1	H25.4～H26.3
岡本 守正	同上	M1	H25.4～H26.3
鶴殿 和輝	同上	M1	H26.4～

押切 律之	同上	M1	H26.4～H26.9
姫島 貞枝	早稲田大学 理工学術院	研究補助員	H24.11～

研究項目

- ・エネルギー需給ネットワークのモデリング
- ・エネルギー需給ネットワークに対する統合メカニズム

② 「分散制御」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
滑川 徹	慶應義塾大学 理工学部	教授	H24.10～
栗城 康弘	慶應義塾大学 大学院理工学研究科	D1～D3	H24.10～
大川 佳寛	同上	D1～D2	H26.4～
猪狩 俊介	同上	M1～2	H25.4～
井山 仁志	同上	M1～2	H25.4～
小嶋 昂明	同上	M1～2	H25.4～
佐藤 隆太郎	同上	M1～2	H25.4～
増井 健治	同上	M1～2	H25.4～
大久保 徳雄	同上	M1～2	H24.10～H25.3
末廣 友晴	同上	M1～2	H24.10～H25.3
藤田 佑樹	同上	M1～2	H24.10～H25.3
細田 康彦	同上	M1～2	H24.10～H25.3
前田 雅志	同上	M1～2	H24.10～H25.3
宮野 雄基	同上	M1～2	H24.10～H25.3

研究項目

- ・分散制御アルゴリズムの開発
- ・分散制御系設計に関する調査と解析

③ 「実時間最適化」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
大塚 敏之	京都大学 情報学研究科	教授	H24.10～
加嶋 健司	同上	准教授	H24.10～
橋本 智昭	大阪大学 基礎工学研究科	助教	H24.10～
河野 佑	京都大学 情報学研究科	特定研究員	H25.10～
Tahir Fatima	大阪大学 基礎工学研究科	D2～D3	H24.10～H.26.3
湯野 剛史	同上	D1～D3	H24.10～
Jaiwat Pathompong	同上	D1～D3	H24.10～

研究項目

- ・統合メカニズム構築のための実時間最適化
- ・問題設定の特徴を利用した解析・計算方法

## (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

下記の国外の研究者と連携して研究を行った。

### •Joao Pedro Hespanha 教授 (University of California, Santa Barbara)

UCSB Hespanha 教授は、ハイブリッド制御、分散制御に関する世界的に活躍する気鋭の研究者である。平田氏はHespanha教授の元に3ヶ月間滞在し、「リアルタイムプライシングによる最適運用状態への誘導と安定性」に関する共同研究を実施し、現在も継続して共同で研究を行っている。

### •Frédéric Magoules 教授 (Ecole Centrale Paris)

パリ中央工科大学 Magoules 教授は、並列計算技術を含む数値解析分野において世界的に活躍する研究者である。辻氏は Magoules 教授の元に半年間滞在し、「Waveform Relaxation Method による並列計算技術の電力システム解析への応用」に関する共同研究を実施し、現在も継続して共同で研究を行っている。

### •田中 崇資 博士 (Massachusetts Institute of Technology)

MIT 田中博士は、最適化、分散制御に関する世界的にも活躍する新進気鋭の若手研究者である。村尾氏、内田氏、滑川氏と田中博士は「On the Certainty Equivalence Property of Linear-Quadratic N-Player Team Optimal Stochastic Control」に関する共同研究を実施している。

## § 3 研究実施内容及び成果

### 3.1 エネルギー需給システムのモデリングと動的統合メカニズムの理論構築(早稲田大学「統合メカニズム」グループ)

#### (1)研究実施内容及び成果

本グループの研究内容は、物理的な視点に重きを置いた研究と経済的な視点に重きを置いた研究の2つに分類することができる。本節では物理的な視点に重きを置いた研究成果を記し、次節で経済的な視点に重きを置いた研究成果を記すことにする。物理的な視点に重きを置いた研究成果としては下記の4つの研究成果が挙げられる。

#### [1] 電力需給ネットワークに対する動的統合メカニズムの設計

価格を利用したエネルギー需要、供給ネットワークの制御では、価格策定に必要な各時刻でのエージェントの動作状態が報告される必要がある。しかしながら、提示する情報により価格が決定されることを知るエージェントには、作為的な偽り情報の提示により、自身の利得のみを向上させる誘因が生じる。利己的なエージェントによる価格操作の問題に対し、経済学の分野を中心に発展しているメカニズムデザイン理論の考えに着目したエネルギー需要、供給ネットワークのための社会システムのデザインを提案している<sup>A31-2</sup>。これにより、作為的な情報操作が利益を生まない社会システムのデザインが可能であることを明らかにした。またこの成果を、予測モデルを利用した制御系との融合<sup>A1-6, A1-22</sup>、再生可能エネルギーの導入を想定した確率的外乱の考慮<sup>A1-11</sup>、エージェントの選好、パラメータの不確かさに起因する特性変動の考慮<sup>A1-14</sup>、予算均衡性を達成する新たなメカニズムの提案<sup>A1-25, A32-11</sup>などへと展開することに成功した。さらに、一連の研究で目指した真の情報の報告を促す制御系を、各エージェントとユーティリティー間の交渉を許容する、より実用的な

制御系へと発展させるには、エージェントによる利己的な情報報告に関する考察が不可欠となるとの観点から、最適な利己的な情報報告を特徴づけることにも成功している<sup>A32-31</sup>。

## [2] リアルタイムプライシングによる最適運用状態への誘導と安定性

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のもとで、エネルギーの需要と供給のバランス成立を達成する統合化された解を実現する、という観点に立ち、価格提示を利用し統合化された解への誘導を実現する動的ネットワークの運用法を提案した<sup>A1-19, A2-3</sup>。とくにここでは、(エージェントの動特性) + (エージェントによる分散最適化) に対する (実時間価格策定方策) を提案することができている。また、構成される閉ループシステムの理論的な安定性までを考察することができている。提案する運用システムは、(動的なエージェントのネットワーク) + (エージェントによる分散最適化) + (実時間価格策定方策) により構成される閉ループシステムとなる。そこで各分散最適化の勾配に着目した安定性の解析を議論し、実時間価格提示と分散最適化により運用される閉ループシステムが安定であること、したがって最適な運用状態への誘導が理論的にも可能であることを明らかにしている。

実時間価格策定方策の適用により、その有効性を検証する研究も進めることができている。電力送電システムの需要・供給バランス実現は、各発電機の分散最適化により、需要要求を満たす最適な電力潮流状態を実現する問題である。送電システムのモデルとして広く利用されている New England 39 バステストシステムへの提案運用法の適用では、実時間価格策定方策と各発電機による分散最適化により、最適な電力潮流状態が実現されることが確認できている。また、風力発電を想定した再生可能エネルギーを考慮した問題では、周波数変動の抑制が可能であることも併せて確認することができている<sup>A32-19</sup>。

太陽光発電の導入では、電力逆潮流により生じる系統接続点での電圧上昇が懸念されている。提案する実時間価格提示と各インバータによる有効電力、無効電力出力量の分散決定により、この電圧上昇を抑制する運用が可能であることも確認することができている [石井, 平田, 大堀, 服部, 太田, “価格提示を利用した配電系統電圧の分散制御に関する考察”, 第 57 回 自動制御連合講演会 論文集, pp. 1861-1865, 2014; 阿久津, 平田, 大堀, 服部, 太田, 価格提示による大規模太陽光発電インバータ群の負荷分散制御, 第 57 回 自動制御連合講演会 論文集, pp. 1866-1869, 2014]. とくに配電システムを想定した家庭毎の分散最適化, およびメガソーラ発電を想定した複数インバータに対する負荷分散問題の双方において, 提案する運用法の有効性が検証されている。なお本研究は FS を通じて, 本研究領域太田チームとの共同研究として実施されたものである。

各家庭に備えられる EV/PHEV の蓄電池は, コミュニティー内の電力貯蔵設備として, 今後その重要性が増してくるものと期待されている。一方で車載型の蓄電池は, 電力配電システムへの接続と離脱といった特徴を有する。系統への接続と離脱を考慮した上で, 需要予測にもとづいた電力供給量に蓄電池への充電 (需要) 量を一致させることは, コミュニティーが備えるべき重要な運用機能と考えられる。蓄電池の充電量管理方策への提案運用法の適用では, 実時間価格提示と各家庭の充電器による分散最適化により, 実時間での需要・供給バランスの達成を実現することができている<sup>A33-1</sup>。とくに提案手法では, 蓄電池の系統への接続、離脱に柔軟に対応できること, 充電完了時間といった各蓄電池が持つ個別の制約条件を考慮した運用も可能であること, 太陽光発電を想定した再生可能エネルギー源による不確かなエネルギー流入の影響も抑制できること, などを確認することができている。なお本研究は, 本研究領域鈴木チームとの共同研究として実施されたものである。

提案運用法の実用性検証へ向けたこれらの研究に加え, 理論的な面においても, マイクログリッドを想定した価格策定方策の高速化<sup>A32-13</sup>, 大規模なネットワークで問題となる通信遅延を考慮した場合の価格策定方策の提案<sup>A32-14</sup>などへと展開することができている。

## [3] 電力システムの安定運用維持のための解析手法, プライシング手法

停電を生じずに電力システムの安定運用を維持するためには, 不確実な需給バランス



の変動や事故発生の下で、同期安定度、電圧安定性、送電線の熱容量制約などの技術的制約が満足される必要がある。一般に上記の各種制約に関わる解析には大きな計算負荷を要するため、より効率的な解析手法を検討する必要がある。また安定運用維持に関わる各種運用には実質的な費用の発生を伴うが、直接的なエネルギーの取引では無いため、その価格付けが難しい問題がある。以上の背景の下、本項目では各種安定度に関わる解析手法、ならびにアンシラリーサービスに対するプライシング手法の検討を実施した。

まず解析手法としては、同期過渡安定度の高速化を目的として、Waveform Relaxation Method に基づいた並列計算技術の検討を実施した。西日本における 60Hz の電力システムでは、事故発生時に低減衰長周期動揺モードが生じる可能性があり、この安定性の解析が重要性の高い課題である。したがって比較的長時間にわたる解析が必要となるが、その大まかな挙動は固有値解析の結果から予見できることに着目し、固有ベクトルに基づいた系統分割手法を提案した<sup>A1-28</sup>。また、Waveform Relaxation Method は空間的に分割された各部分問題を個別に並列計算として求解し、その結果を部分問題間で引き渡しながら収束させるものであるが、その収束性を向上させるために、解析の初期値を効率的に生成する手法についても検討した<sup>A1-23</sup>。

次にプライシング手法として、配電システムの電圧維持に要する無効電力のプライシング手法について検討を実施した。太陽光発電の大量導入に伴い配電系統において逆潮流が発生すると、配電線末端側で大きな電圧上昇が発生し、これを適切に抑制する手法が求められる。PCS の無効電力制御により電圧制御が可能であるが、太陽光発電所有者の制御協力を得るには、適切なインセンティブを与える必要があるため、本検討課題では無効電力のプライシングを行うことで、系統運用者が必要な無効電力を調達する枠組みを提案したものである。特に、電圧管理に要する費用は本来は太陽光発電の設置者が負担すべきものであると考え、電源の系統連系に伴う接続料金を設定すると共に、これにより得られた源資を電圧制御への貢献度に応じて配分するメカニズムを、オンラインをベースとした方法として開発した<sup>A32-9</sup>。また、この検討を支える土台として、限られた計測情報から系統運用者が PCS の制御状態を把握するための状態推定手法の検討も実施した<sup>A1-13, A32-5</sup>。上記は電圧－無効電力制御体系に関するプライシング手法であるが、これと合わせてマイクログリッドのような小規模電力系統における需給管理手法についても検討を実施した。具体的には、モバイルエージェント技術を用いて需給管理に関わる情報を小規模系統内に循環させることで、分散型電源所有者と需要家間の相対取引を促進するメカニズムを開発した<sup>A1-5, A32-8</sup>。

#### [4] 需給システム統合のための合意理論、インテリジェント制御、分散制御

上記の研究にあわせて、次世代電力ネットワーク構築を念頭に、再生可能エネルギー発電システム単体のインテリジェント制御を試みた<sup>A1-16, A-27</sup>。さらに、合意形成の基礎研究として、単純なマルチエージェントの数理モデルを用いた研究<sup>A1-10, A1-29</sup>、また分散型の情報処理を念頭においたモデル予測制御<sup>A32-30</sup>に関する研究も実施することができている。

### 3.2 エネルギー需給システムの経済モデル(早稲田大学「統合メカニズム」グループ)

#### (1) 研究実施内容及び成果

本グループの経済的な視点に重きを置いた研究成果として下記の 3 つの研究成果が挙げられる。

#### [1] 経済実験を用いたダイナミックプライシングに関する研究

今後、社会に適応される可能性の高い、小売電力のリアルタイムプライシング制度を評価するため、経済実験(ラボラトリー実験)モデルを構築し、実際の現実的制約の制度への影響を分析した<sup>A32-25, A32-28</sup>。とくに今回の研究では停電制約が見えることによる人々の電力消費行動の変化と、その変化によるリアルタイムプライシング制度に対する影響について

経済実験を実施し、分析を行った。実験の結果、日々の停電制約の変化(電力の供給量の上限変化)を消費者に情報として提供することにより、消費者は電力消費量を抑制する効果があることが分かった。また不確実な停電制約の影響以上に社会に協力しようとする選好が高い人ほど消費量を抑制することがわかり、人々の行動変化を考慮した制度、システム設計の必要性がより明らかになった。

#### [2] 電力産業における新旧事業者間の技術格差と配分効率を考慮した最適垂直構造

本研究では発電部門の寡占市場において既存企業が参入企業より限界費用の点で効率的である場合に、発送電分離が社会厚生を高める(もしくは低下させる)ための理論的条件を明らかにした<sup>A1-18), A31-10)</sup>。寡占市場である発電部門と自然独占が維持されている送電部門が垂直関係にある場合、発送電分離は競争を促進し寡占による過少供給の非効率を緩和するかもしれないが、必ずしも経済厚生を高めるとは限らない。なぜなら、競争の促進と同時に発電部門における規模のメリットを損ない、産業全体における生産効率を低下させる可能性があるからである。本研究では、このような競争促進と発電効率のトレードオフに着目したうえで、政策当局がアクセスチャージを最適な水準に設定するセカンドベストにおける社会厚生を垂直分離と垂直統合で比較した。また、送電部門の収支制約を考慮する場合の影響についても検証した。はじめに送電部門の収支制約がなく、参入企業数が固定されているケースについて分析した結果、参入企業数の閾値が存在して、参入企業数が少ない場合は垂直分離が、多い場合は垂直統合が、高い社会厚生を実現することを示した。この結果は、参入企業数が少なく過少供給の非効率が大い場合は競争による小売価格低下の効果が大きい垂直分離が社会厚生上望ましく、参入企業数が十分多く過少供給の非効率が小さい場合は高い生産効率を実現可能な垂直統合が、社会厚生上望ましいことを意味している。本研究ではさらに送電部門の収支制約を考慮するケースについて、参入企業数が固定されているケースと参入・退出が自由なケースについて分析し、いずれの場合も垂直統合の方が高い社会厚生を実現することを示した。これは送電部門の収支制約により政策当局がアクセスチャージを低く設定できなくなることで、垂直分離による競争促進の効果が限定的になった結果である。

#### [3] FIT 制度と RPS 制度のセカンドベストにおける効率性の比較

主要な再生可能エネルギー普及制度である FIT(固定価格買取)制度と RPS(再生可能エネルギー利用割合基準)制度について、それぞれの制度下で政策当局が政策変数を最適水準に定めるセカンドベストの状況で実現する社会厚生の水準を比較し、いずれかの制度が他方より効率的になるための理論的条件を明らかにした<sup>A2-5), A2-6), A32-15), A32-26)</sup>。再生可能エネルギー事業者が競争的フリンジであり、非再生可能エネルギー事業者が小売市場と再生可能エネルギー市場でそれぞれ売手独占、買手独占的に行動する独占企業である状況を想定した理論モデルを用いて分析をした。ここで、独占企業の主要な発電方式は火力発電であり、発電に伴い外部費用が発生するのに対し、再生可能エネルギー事業者は発電時に外部費用を発生させない。セカンドベストの社会厚生を比較した場合の効率性は、FIT 制度が買手独占の歪みを補正する効果と、RPS 制度が外部費用の一部を内部化する効果のトレードオフの結果決まる。本研究では限界外部費用の水準が低い場合は FIT 制度が、高い場合は RPS 制度が、より高い社会厚生を実現することを示した。ただし、再生可能エネルギーの発電費用が十分低い場合は、限界外部費用の水準に依存せず、つねに FIT 制度が高い社会厚生を実現する。本研究ではさらに、RPS 制度に初期配分ルールを組み合わせることで独占企業の買手独占による歪みを補正し、ファーストベストを実現できるような制度的枠組みを提示した。

### 3.3 分散制御と統合メカニズム(慶應義塾大学「分散制御」グループ)

#### (1) 研究実施内容及び成果

本グループでは下記の 4 つの研究を実施した。

#### [1] 分散制御による電力網の系統周波数制御

本研究では分散型電源を導入した電力ネットワークに対して、直線探索付き反復勾配法に基づく系統周波数制御を提案した<sup>B1-1)</sup>。ネットワーク構造を有する大規模システムを各サブシステムの結合系として状態遷移式で表現し、状態と制御入力を考慮した評価関数を最小化する制御問題を定式化した。この制御問題に対して最適制御を計算する際に、直線探索を付加した反復勾配法に基づく系統周波数制御を提案した。この提案制御則は他システムの内部情報を必要としない分散的な制御を達成する上、最適なステップ幅を毎時刻計算しているため、従来の制御則に比べて良好な制御性能の達成が期待できる。更にはエネルギー/情報結合構造の変化に対してもフレキシブルに適応する事が可能である。直線探索を行う際のステップ幅は Armijo と Wolfe の規準の両方を満足しているため、収束性を保証する事ができる。風力発電、蓄電池群、ヒートポンプ群等の分散型電源を導入した電力ネットワークの負荷周波数制御(LFC)に対して提案制御則を適用し、従来制御則に対し評価関数の低減化や周波数変動の抑制など制御性能の向上が達成されていることをシミュレーションで示した。

#### [2] 電力市場における最適価格設定法と需給制御

本研究では、発電量平準化を目的として蓄電システムを導入した電力市場において、需給バランスを満たす最適な電力価格が、各電力市場参加者の自己利益最大化に基づいて分散的に決定されるような電力価格決定アルゴリズムを提案した<sup>B1-3)</sup>。市場参加者として、バッテリーを所有する需要家、バッテリーを所有する供給者、大容量の電力貯蔵装置を所有し、各時刻の電力価格を基にして任意に充放電を行うことで利益を得るアキュムレータ(Accumulator)の 3 プレイヤーと電力市場の計 4 種類のプレイヤーを想定した。また需要家の効用から供給者の発電コスト及び各市場参加者が所有する蓄電システムに関する費用を引いた値を社会全体の利益とし、これを最大化させるような最適化問題を考えた。前述の市場以外の 3 プレイヤーはそれぞれ、与えられた電力価格に応じて自身の利益最大化に基づいて自身の行動を利己的に決定する。それゆえ、市場が解くべき問題は、利己的に行動する各市場参加者に対し、電力の需給バランスを満たし、かつ社会全体の利益を最大化させる電力消費・発電・充放電を行わせるような最適な電力価格を決定することとなる。そしてこれはもとの最適化問題の双対問題として表現することができ、本研究ではこの問題を最急降下法を利用して解くことで分散的に電力価格が決定されるアルゴリズムを提案した。また、このアルゴリズムによって反復的に求められる電力価格の安定性を、リアプノフの安定定理により証明した。その後、アキュムレータとバッテリーの導入により、導入前に比べ利益が増大することを確認した。最後に数値シミュレーションによる提案法の有効性を検証し、提案法によって決定された電力価格によって、電力需給の一致及び発電量平準化を達成し、更に従来の蓄電システムを導入しない場合の結果と比べ、提案法により社会全体の利益増加を示した。

#### [3] 電力ネットワークにおける分散的モニタリング

サイバー攻撃やシステム故障の検出・診断などのモニタリングを目的に、本研究では故障評価行列という、システムの異常具合を表す一種の指標を用いた電力システムの異常検出・診断手法を提案した<sup>B1-4)</sup>。この故障評価行列は、電力システムにカルマンフィルタを用いて得た状態推定値や誤差共分散によって構築されており、システムに異常が与えられると即座にその異常の大きさを自身の対角要素に反映する性質を持つ。この故障評価行列はシステムの状態・出力の双方に対してそれぞれ個別に与えられているため、それぞれの異常を独立的に検出・診断する事が可能である。そこで本手法ではこの故障評価行列の対角和に対して閾値を設け、閾値内ならば正常、そうでなければ異常であると診断した。この閾値は、出力故障評価行列では定数としているが、状態故障評価行列では診断遅延

時間を短縮するために動的に決定した。最後に、提案法の有効性を数値シミュレーションにて検証した。

#### [4] リアルタイムプライシングによる電力網の系統周波数制御

本研究では、双対分解とゲーム理論に基づくリアルタイムプライシング手法を提案し、電力網の系統周波数制御への応用を検討した<sup>B1-2)</sup>。電力系統においては、需給のアンバランスが電力品質の低下を引き起こすため、需要側と供給側両方が協調していることが望ましいが、それぞれの振る舞いが、協調的になされるとは限らず、利己的になされることを想定し、ゲーム理論を考慮することで、利己的な振る舞いを系統全体にとって望ましい振る舞いへと誘導することを提案した。従来のゲーム理論を考慮したプライシング手法において議論されなかった、制約を考慮した最適化問題を、双対分解を考慮することによって、ゲーム問題として分散化し、社会全体の公共利益の達成がプライシングによって可能であることを証明した。そして、電力網の系統周波数制御問題に、提案プライシング手法を適用したシミュレーションにより、当初の目的である利己的な振る舞いを公共利益へと誘導する試みが達成できることを確認した。

### 3. 4 統合メカニズム構築のための実時間最適化(京都大学「実時間最適化」グループ)

#### (1) 研究実施内容及び成果

本グループでは下記の3つの研究を実施した。

#### [1] 非線形最適制御問題としてのリアルタイムプライシング定式化と性能・計算量の評価

本研究では、統合メカニズムの実時間最適化に適した問題設定とアルゴリズムとともに評価・調整方法を検討した<sup>C1-14)</sup>。まず、実時間最適化の初期検討として、簡単なモデルに対する小規模な問題を定式化し、数値シミュレーションを行った。具体的には、複数地域のそれぞれを代表する需要家と供給家のモデルを設定し、それらに対して電力価格を提示する独立系統運用機構(ISO)による需給バランスと負荷周波数変動の制御を考えた。今後、モデルが大幅に複雑化・大規模化したとしても、実時間最適化の実現可能性は十分にあることが分かった。その後、需要家を中心とした人間行動モデルの検討とともに、タイムスケールに適した電力ネットワークモデルの見直しも進めた。経済と物理双方の観点から妥当なモデルが構築でき、さらにその実時間最適化も十分に可能であることが検証できた。

#### [2] 確率的不確かさと評価関数調整に対する実用的アプローチ

並行して、統合メカニズムの問題設定において実用上重要な、確率的不確かさの扱いと評価関数の調整方法を検討した。不確かさの扱いに関しては、いわゆる大偏差型不等式を用いることで、外乱の確率分布によらず機会制約を確定的制約条件に変換する手法を提案した<sup>C1-10)</sup>。さらに、モデル予測制御に提案手法を適用した際の閉ループ安定性も示した。評価関数の調整方法に関しては、目標状態近傍での線形近似モデルに対して、ILQ設計法と呼ばれる逆最適性に基づく評価関数調整方法を適用し、その結果から元の非線形システムに対する評価関数を構築する、という調整方法を提案した<sup>C1-6), C1-12)</sup>。数値例を通じて、制御出力の応答の速さと制御入力の大きさとのトレードオフが本手法で見通しよく行えることを示した。

#### [3] 代数的手法・数式処理技術を活用した革新的アプローチ

さらに、システムや評価関数の構造にまで踏み込んで問題設定に関する知見を得るために、可換環や非可換環を応用した非線形システムの解析と制御に関する基礎検討も行った。可換環の応用に関しては、可到達性の解析<sup>C1-8)</sup>や状態フィードバック制御設計<sup>C1-15)</sup>のほか、最適制御を陰関数表示するという新しい手法<sup>C1-20)</sup>が得られた。これは、実時間最適化において従来の数値解析手法を補完する枠組みに発展する可能性がある。非可換

環を応用した非線形システム解析については、線形システムにおける伝達関数や固有値を非線形システムへ拡張する試み<sup>C1-1)</sup>や、可観測性判別条件の提案<sup>C1-5)</sup>を行った。

## § 4 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 14 件、国際(欧文)誌 50 件)

[H24 年度]

### ■論文詳細情報(国内)

#### ●B1-1

加藤太一郎, 祓川悠, 滑川徹, “直線探索付き反復勾配法を用いた分散制御による電力ネットワークの系統周波数制御”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 49, No. 2, pp. 222-228, 2013 (DOI:10.9746/sicetr.49.222)

### ■論文詳細情報(国際)

#### ●A1-1

Takao Tsuji, “A Study on Power Supply Reliability of Microgrid with Renewable Energy Considering Dynamic Behavior”, Proc. of the 9th France-Japan & 7th Europe-Asia Congress on and Research and Education in Mechatronics, pp. 377-383, 2012 (DOI:10.1109/MECATRONICS.2012.6451036)

#### ●A1-2

MingHui Wang, Kenko Uchida, “Consensus Problem in Multi-Agent Systems with Communication Channel Constraint on Signal Amplitude”, The SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 6, No. 1, pp. 7-13, 2013 (DOI:10.9746/jcmsi.6.7)

#### ●A1-3

Ken-Ichi Akao, Tapan Mitra and Gerhard Sorger, “Some Rationalizability Results for Dynamic Games”, International Journal of Economic Theory, Vol. 8, No. 4, pp. 361-379, 2012 (DOI:10.1111/j.1742-7363.2012.00195.x)

#### ●A1-4

Ken-Ichi Akao and Gerhard Sorger, “On the Sustainability of a Common Property Resource: An Implication from Dynamic Game Theory”, Institute for Research in Contemporary Political and Economic Affairs Working Paper Series 1201, Waseda University, No. 1201, pp. 1-15, 2012 (DOI:NA)

[H25 年度]

### ■論文詳細情報(国内)

#### ●A1-5

河又啓, 辻隆男, 大山力, “再生可能エネルギーを含むマイクログリッドにおける自律分散型電力取引支援システムの検討”, 電気学会論文誌 C, Vol. 133, No. 9, pp. 1670-1679, 2013 (DOI:10.1541/ieejc.133.1670)

#### ●A1-6

岡島佑介, 平田研二, 内田健康, “不確かな情報環境における LQ エネルギー需要ネットワークの VCG メカニズムによる統合”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 49, No. 12, pp. 1186-1195, 2013 (DOI:10.9746/sicetr.49.1186)

#### ●B1-2

大久保徳雄, 佐藤隆太郎, 滑川徹, “双対分解とゲーム理論に基づくリアルタイムプライシングによる電力網の系統周波数制御”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 49, No. 10, pp. 961-968, 2013 (DOI:10.9746/sicetr.49.961)

#### ●B1-3

宮野雄基, 滑川徹, “蓄電システムを含めた電力市場における最適価格設定法と需給制御”, 電

気学会論文誌 C, Vol. 133, No. 10, pp. 1855-1863, 2013 (DOI:10.1541/ieejc.133.1855)

●B1-4

藤田佑樹, 大川佳寛, 滑川徹, “状態故障評価行列を用いた電力ネットワークにおけるサイバー攻撃・故障の診断”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 49, No. 12, pp. 1131-1138, 2013 (DOI:10.9746/sicetr.49.1131)

●C1-1

河野佑, 大塚敏之, “有理型非線形時変システムに対する伝達関数行列の代数的性質”, システム制御情報学会論文誌, Vol. 26, No. 6, pp. 185-192, 2013 (DOI:10.5687/iscie.26.185)

■論文詳細情報(国際)

●A1-7

Yutaka Tsubota, Genki Baba, Kenko Uchida, Toru Jintsugawa and Yosuke Nakanishi, “Reference Governor for Output Smoothing of Renewable Energy Generation”, Proc. of the 9th Asian Control Conference, 2013 (DOI:10.1109/ASCC.2013.6606055)

●A1-8

Nguyen Gia Minh Thao and Kenko Uchida, “Control the Photovoltaic Grid-Connected System Using Fuzzy Logic and Backstepping Approach”, Proc. of the 9th Asian Control Conference, 2013 (DOI:10.1109/ASCC.2013.6606123)

●A1-9

Hyangryul Bae, Takao Tsuji and Tsutomu Oyama, “A Study on Inverter Control of Distributed Generators in Small-Scale Power Systems in Emergency”, Proc. of the International Conference on Electrical Engineering, FP-0610, 2013 (DOI:NA)

●A1-10

MingHui Wang and Kenko Uchida, “Interval Consensus Problem in Multi-Agent Systems with Time-Delay”, Proc. of the 32nd Chinese Control Conference, pp. 7204-7209, 2013 (DOI:NA)

●A1-11

Yusuke Okajima, Toshiyuki Murao, Kenji Hirata and Kenko Uchida, “Real Time Pricing and Pivot Mechanism for LQG Power Networks”, Proc. of the 2013 IEEE Multi-conference on Systems and Control, pp. 495-500, 2013 (DOI:10.1109/CCA.2013.6662819)

●A1-12

Truc Pham-Dinh, Hai Nguyen-Thanh, Kenko Uchida and Nguyen Gia Minh Thao, “Comparison between Modifications of SFOC and DPC in Control of Grid-Connected Doubly Fed Induction Generator under Unbalanced Voltage Dip”, Proc. of the SICE Annual Conference 2013, pp. 2581-2588, 2013 (DOI:NA)

●A1-13

Akira Koide, Takao Tsuji, Tsutomu Oyama and Frédéric Magoulès, “A State Estimation Method for Reactive Power Control by DGs in Distribution Systems Based on Pseudo Inverse Matrix”, Proc. of the CIGRE SC C6 COLLOQUIM - Distribution Systems and Dispersed Generation, S1-7, 2013 (DOI:NA)

●A1-14

Yusuke Okajima, Toshiyuki Murao, Kenji Hirata and Kenko Uchida, “A Dynamic Mechanism for LQG Power Networks with Random Type Parameters and Pricing Delay”, Proc. of the 52nd IEEE Conference on Decision and Control, pp. 2384-2390, 2013 (DOI:10.1109/CDC.2013.6760237)

●A1-15

MingHui Wang and Kenko Uchida, “Interval Consensus Problem of Multi-Agent Systems in Accordance with Switching Protocol”, International Journal of Systems Science, Online Publication, 2014 (DOI:10.1080/00207721.2014.901581)

●A1-16

Nguyen Gia Minh Thao, Kenko Uchida and Nam Nguyen-Quang, “An Improved Incremental

Conductance–Maximum Power Point Tracking Algorithm Based on Fuzzy Logic for Photovoltaic Systems”, *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, Vol. 7, No. 2, pp. 122–131, 2014 (DOI:10.9746/jcmsi.7.122)

●A1-17

Ken-Ichi Akao and Shunsuke Managi, “A Tradable Permit System in an Intertemporal Economy”, *Environmental and Resource Economics*, Vol. 55, No. 3, pp. 309–336, 2013 (DOI:10.1007/s10640-012-9628-5)

●A1-18

Yukihide Kurakawa, “The Optimal Vertical Structure in the Electricity Industry When the Incumbent Has a Cost Advantage”, *Energy Policy*, Vol. 63, pp. 622–627, 2013 (DOI:10.1016/j.enpol.2013.08.083)

●B1-5

Yuki Fujita, Toru Namerikawa and Kenko Uchida, “Cyber Attack Detection and Faults Diagnosis in Power Networks by Using State Fault Diagnosis Matrix”, *Proc. of the 12th European Control Conference*, pp. 398–403, 2013 (DOI:NA)

●B1-6

Yuki Miyano and Toru Namerikawa, “Optimal Pricing Algorithm Based on Steepest Descent Method for Electricity Market with Battery and Accumulator”, *Proc. of the 2013 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications*, pp. 73–76, 2013 (DOI:NA)

●B1-7

Christian Fogelberg and Toru Namerikawa, “Distributed Model Predictive Control of Load Frequency of Power Network”, *Proc. of the SICE Annual Conference 2013*, pp. 2604–2609, 2013 (DOI:NA)

●C1-2

Kenji Kashima and Reijiro Kawai, “On Weak Approximation of Stochastic Differential Equations Through Hard Bounds by Mathematical Programming”, *SIAM Journal on Scientific Computing*, Vol. 35, No. 1, pp. A1–A21, 2013 (DOI:10.1137/110841497)

●C1-3

Yu Kawano and Toshiyuki Ohtsuka, “Observability at an initial state for polynomial systems”, *Automatica*, Vol. 49, No. 5, pp. 1126–1136, 2013 (DOI:10.1016/j.automatica.2013.01.020)

●C1-4

Yu Kawano and Toshiyuki Ohtsuka, “Sufficiency of a Necessary Condition for Local Observability of Discrete–Time Polynomial Systems”, *Proc. of the 12th European Control Conference*, pp. 1722–1727, 2013 (DOI:NA)

●C1-5

Yu Kawano and Toshiyuki Ohtsuka, “Observability Analysis of Nonlinear Systems Using Pseudo–Linear Transformation”, *Proc. of the 9th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems*, pp. 606–611, 2013 (DOI:NA)

●C1-6

Fatima Tahir and Toshiyuki Ohtsuka, “Tuning of Performance Index in Nonlinear Model Predictive Control by the Inverse Linear Quadratic Regulator Design Method”, *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, Vol. 6, No. 6, pp. 387–395, 2013 (DOI:10.9746/jcmsi.6.387)

●C1-7

Jun Marutani and Toshiyuki Ohtsuka, “A Real–Time Algorithm for Nonlinear Infinite Horizon Optimal Control by Time Axis Transformation Method”, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, Vol. 23, No. 17, pp. 1955–1971, 2013 (DOI: 10.1002/rnc.2863)

●C1-8

Yu Kawano and Toshiyuki Ohtsuka, “Simple Sufficient Conditions for Reachability of

Discrete-Time Polynomial Systems”, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 58, No. 12, pp. 3203-3206, 2013 (DOI:10.1016/j.automat.2013.01.020)

●C1-9

Fatima Tahir, Toshiyuki Ohtsuka and Tielong Shen, “Tuning of Nonlinear Model Predictive Controller for the Speed Control of Spark Ignition Engines”, Proc. of the 2013 CACS International Automatic Control Conference, Paper ID #1007, 2013 (DOI:NA)

●C1-10

Tomoaki Hashimoto, “Probabilistic Constrained Model Predictive Control for Linear Discrete-time Systems with Additive Stochastic Disturbances”, Proc. of the 52nd IEEE Conference on Decision and Control, pp. 6434-6439, 2013 (DOI:10.1109/CDC.2013.6760907)

[H26 年度]

■論文詳細情報(国内)

●B1-8

向井達哉, 猪狩俊介, 滑川 徹, “バッテリー特性を考慮したスマートグリッドの最適エネルギーマネジメント”, 電気学会論文誌 C, Vol. 134, No. 12, pp. 1862-1868, 2014 (DOI:10.1541/ieej.134.1862)

●C1-11

河野佑, 大塚敏之, “離散時間非線形無限評価区間最適制御問題の代数関数解”, 計測自動制御学会論文誌, Vol. 50, No. 7, pp. 556-558, 2014 (DOI:10.9746/sicetr.50.556)

●C1-12

Fatima Tahir, Toshiyuki Ohtsuka, “Tuning of Nonlinear Model Predictive Controller for Parameter-Dependent Systems and its Application to the Speed Control of Spark Ignition Engines”, システム制御情報学会論文誌, Vol. 27, No. 8, pp. 333-342, 2014 (DOI:10.5687/iscie.27.333)

●C1-13

加嶋健司, 井上大輔, “ネットワーク化制御系における確率雑音の白色化効果と非再現性の同時活用”, 計測自動制御学会論文誌, Vol. 50, No. 10, pp. 712-720, 2014 (DOI:10.9746/sicetr.50.712)

●C1-14

亀本大貴, 橋本智昭, 加嶋健司, 大塚敏之, “モデル予測制御に基づいた実時間価格制度による電力系統の負荷周波数制御”, システム制御情報学会論文誌, Vol. 27, No. 10, pp. 405-411, 2014 (DOI:10.5687/iscie.27.405)

●C1-15

Tsuyoshi Yuno, Toshiyuki Ohtsuka, “Lie Derivative Inclusion for a Class of Polynomial State Feedback Control”, システム制御情報学会論文誌, Vol. 23, No. 11, pp. 423-433, 2014 (DOI:10.5687/iscie.27.423)

●C1-16

Tsuyoshi Yuno, Toshiyuki Ohtsuka, “Lie Derivative Inclusion with Polynomial Output Feedback”, システム制御情報学会論文誌, Vol. 28, No. 1, pp. 22-31, 2015 (DOI:NA)

■論文詳細情報(国際)

●A1-19

Kenji Hirata, Joao Pedro Hespanha and Kenko Uchida, “Real-time Pricing Leading to Optimal Operation under Distributed Decision Makings”, Proc. of the 2014 American Control Conference, pp. 1925-1932, 2014 (DOI:10.1109/ACC.2014.6858655)

●A1-20

Hyang-Ryul Bae, Takao Tsuji and Tsutomu Oyama, “Adaptive Inverter Control Scheme for Flexible Power Supply in Small-scale Power Systems in Emergency”, Proc. of the International Conference on Electrical Engineering 2014, Paper ID PSS&R-1288, 2014 (DOI:NA)



●A1-21

Truc Pham-Dinh, Hai Nguyen-Thanh, Kenko Uchida and Nguyen Gia Minh Tao, “Modified Controls for Grid-Connected Wind-Turbine Doubly Fed Induction Generator under Unbalanced Voltage Dip for Torque Stability and Reduction of Current Harmonic”, Proc. of the SICE Annual Conference 2014, pp. 1493-1500, 2014 (DOI:10.1109/SICE.2014.6935281)

●A1-22

Yusuke Okajima, Toshiyuki Murao, Kenji Hirata and Kenko Uchida, “Integration Mechanisms for LQ Energy Day-ahead Market Based on Demand Response”, Proc. of the 2014 IEEE Multi-conference on Systems and Control, pp. 1-8, 2014 (DOI:10.1109/CCA.2014.6981320)

●A1-23

Takao Tsuji, Frédéric Magoulès, Takaonori Sakamoto, Tsutomu Oyama and Kenko Uchida, “Global Initialization Technique in Waveform Relaxation Method for Transient Stability of a Japanese Power System”, Proc. of the 5th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies European 2014 Conference, Paper ID ISGTEU-0596, 2014 (DOI:NA)

●A1-24

Nguyen Gia Minh Tao, Kenko Uchida, Kentaro Kofuji, Toru Jintsugawa and Chikashi Nakazawa, “A Comprehensive Analysis Study about Harmonic Resonance in Megawatt Grid-Connected Wind Farms”, Proc. of the 2014 International Conference on Renewable Energy Research and Applications, pp. 387-394, 2014 (DOI:10.1109/ICRERA.2014.7016415)

●A1-25

Toshiyuki Murao, Yusuke Okajima, Kenji Hirata and Kenko Uchida, “Dynamic Balanced Integration Mechanism for LQG Power Networks with Independent Types”, Proc. of the 53rd IEEE Conference on Decision and Control, pp. 1395-1402, 2014 (DOI:10.1109/CDC.2014.7039597)

●A1-26

Nguyen Gia Minh Tao and Kenko Uchida, “A Control Strategy based on Fuzzy Logic for Three-phase Grid-connected Photovoltaic System with Supporting Grid-Frequency Regulation”, Proc. of the 3rd International Conference on Intelligent and Automation Systems, Paper ID S0009, 2015 (DOI:NA)

●A1-27

Nguyen Gia Minh Thao and Kenko Uchida, “Active and Reactive Power Control Techniques based on Feedback Linearization and Fuzzy Logic for Three-phase Grid-connected Photovoltaic Inverters”, Asian Journal of Control, Vol. 17, No. 5, 2015 (to appear) (DOI:10.1002/asjc.998)

●A1-28

Takao Tsuji, Frédéric Magoulès, Kenko Uchida and Tsutomu Oyama, “A Partitioning Technique for a Waveform Relaxation Method Using Eigenvectors in the Transient Stability Analysis of Power Systems”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 30, 2015 (to appear)

●A1-29

MingHui Wang and Kenko Uchida, “Interval Consensus Problem of Multi-agent Systems in accordance with Switching Protocol”, International Journal of Systems Science, Vol 46, 2015 (to appear) (DOI:10.1080/00207721.2014.901581)

●A1-30

Ken-Ichi Akao, “Preference Constraint for Sustainable Development”, Environmental Economics and Policy Studies, Vol. 16, No. 4, pp. 343-358, 2014 (DOI:10.1007/s10018-012-0053-3)

●B1-9

Yoshihiro Okawa and Toru Namerikawa, “Dynamic Pricing Considering Constraints of Power Grids”, Proc. of the SICE Annual Conference 2014, pp. 1484-1489, 2014 (DOI:10.1109/SICE.2014.6935280)

●B1-10

Tomoharu Suehiro and Toru Namerikawa, “Hierarchical Control of Power Networks by using

Overlapping Information”, Proc. of the 14th International Conference on Control, Automation and Systems, pp. 1140–1145, 2014 (DOI:NA)

●B1-11

Toru Namerikawa and Yasuhiko Hosoda, “ $H^\infty$  Filter-Based Short-Term Electric Load Prediction Considering Characteristics of Load Curve”, Electronics and Communications in Japan, Vol. 97, No. 12, pp. 1–10, 2014 (DOI:10.1002/ecj.11558)

●C1-17

Kenji Kashima and Daisuke Inoue, “Stationary Performance Evaluation of Control Systems with Random Dither Quantization”, Proc. of the 13th European Control Conference, pp. 1625–1630, 2014 (DOI:10.1109/ECC.2014.6862294)

●C1-18

Tsuyoshi Yuno and Toshiyuki Ohtsuka, “Realization of a Vector Field via State Feedback for Polynomial Dynamical Systems”, Proc. of the 13th European Control Conference, pp. 2454–2459, 2014 (DOI:10.1109/ECC.2014.6862184)

●C1-19

Miroslav Halás, Yu Kawano, Claude H. Moog and Toshiyuki Ohtsuka, “Realization of a Nonlinear System in the Feedforward Form: A Polynomial Approach”, Proc. of the 19th IFAC World Congress, pp. 9480–9485, 2014 (DOI:NA)

●C1-20

Toshiyuki Ohtsuka, “A Recursive Elimination Method for Finite-Horizon Optimal Control Problems of Discrete-Time Rational Systems”, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 59, No. 11, pp. 3081–3086, 2014 (DOI: 10.1109/TAC.2014.2321231)

●C1-21

Tomoaki Hashimoto, “Receding Horizon Control for a Class of Discrete-Time Nonlinear Implicit Systems”, Proc. of the 53rd IEEE Conference on Decision and Control, pp. 5089–5094, 2014 (DOI:10.1109/CDC.2014.7040184)

●C1-22

Yu Kawano and Ülle Kotta, “On Integrability of Observable Space for Discrete-Time Polynomial Control Systems”, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 60, No. 7, 2015 (to appear)

●C1-23

Toshiyuki Ohtsuka, “A Recursive Substitution Method for a Class of Nonlinear Optimal Control Problems”, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 8, 2015 (to appear)

(2)その他の著作物(総説、書籍など)

[H24 年度]

■著作物(総説、解説、著書)詳細情報(国内)

●A2-1

馬奈木俊介, 環境と効率の経済分析—包括的生産性アプローチによる最適水準の推計, 日本経済新聞出版社, 2013

●B2-1

滑川徹, マルチエージェントシステムにおけるダイナミクスと合意協調制御, 計測と制御, Vol. 52, No. 3, pp. 264–270, 2013

[H25 年度]

■著作物(総説、解説、著書)詳細情報(国内)

●A2-2

内田健康, エネルギーマネジメントシステム:環境, 社会・経済システム, 物理システムのイン

テグレーション, 計測と制御, Vol. 53, No. 1, pp. 2-5, 2014

●A2-3

平田研二, 内田健康, 価格提示を利用した最適運用状態への誘導, 計測と制御, Vol. 53, No. 1, pp. 18-23, 2014

●A2-4

馬奈木俊介 編著, 環境・エネルギー・資源戦略, 日本評論社, 2013

●A2-5

日引聡, 庫川幸秀, 再生可能エネルギー普及促進策の経済分析: 固定価格買取 (FIT) 制度と再生可能エネルギー利用割合基準 (RPS) 制度の比較分析, 馬奈木俊介編著, 環境・エネルギー・資源戦略, 日本評論社, 第 6 章, pp. 119-134, 2013

●A2-6

日引聡, 庫川幸秀, 再生可能エネルギー普及促進策の経済分析～固定価格買取 (FIT) 制度と再生可能エネルギー利用割合基準 (RPS) 制度のどちらが望ましいか? ～, 経済産業研究所 ディスカッション・ペーパー, Paper ID 13-J-070, 2013

●B2-2

滑川徹, 電力市場における最適価格設定法と需給制御, 計測と制御, Vol. 53, No. 1, pp. 12-17, 2014

●C2-1

大塚敏之, 河野佑, 代数幾何と可換環論を応用した非線形システムの解析, システム/制御/情報, Vol. 57, No. 6, pp. 230-235, 2013

[H26 年度]

■著作物(総説、解説、著書)詳細情報(国内)

●C2-2

大塚敏之 編著, 実時間最適化による制御の実応用, コロナ社, 2015

(3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議 20 件、国際会議 11 件)

(主要な国際会議への招待講演の前に\*を付記してください)

[H24 年度]

■招待講演詳細情報(国際)

●B31-1

Toru Namerikawa, Real-Time Pricing and its Application to Load Frequency Control of Power Networks, Seminar Series: 2013a Winter, Center for Control, Dynamical-Systems, and Computation, UC Santa Barbara, USA, Jan. 14, 2013

[H25 年度]

■招待講演詳細情報(国内)

●A31-1

平田研二, 価格を利用した分散システムの最適運用状態への誘導に関する考察, 電力変換制御分野セミナー, 京都, 2013 年 6 月 13 日

●A31-2

平田研二, 分散型エネルギー需要・供給ネットワークにおける分散化・統合化とメカニズムデザイン, 京都大学大学院情報学研究科第 15 回情報学シンポジウム 最適化と情報学, 京都, 2013 年 12 月 26 日

●A31-3

村尾俊幸, LQG 電力需要・供給ネットワークに対する動的統合メカニズムの設計, SICE 制御

部門 社会基盤システムにおける分散意思決定のためのシステム制御調査研究会 第 3 回講演会, 長岡, 2014 年 1 月 23 日

●A31-4

平田研二, 価格提示を利用した電力需給ネットワークの制御について, SICE 制御部門 社会基盤システムにおける分散意思決定のためのシステム制御調査研究会 第 3 回講演会, 長岡, 2014 年 1 月 23 日

●A31-5

澤田英司, 不完全競争市場での企業行動と価格決定, 第 1 回制御部門マルチシンポジウム スマートな社会基盤システムの構築へ向けてー分野融合による新展開ー, 東京, 2014 年 3 月 7 日

●A31-6

平田研二, 価格提示による最適運用状態への誘導, モビリティグループセミナー, 名古屋, 2014 年 3 月 10 日

●B31-2

滑川徹, 電力市場における最適価格設定問題へのシステム制御アプローチ, 日本オペレーションズリサーチ学会 Research Association of Mathematical Programming 2013 (第 25 回 RAMP シンポジウム), 鹿児島, 2013 年 10 月 30 日

●C31-1

大塚敏之, 非線形モデル予測制御における実時間最適化と数式処理, Maple Techno Forum 2013 Tokyo 基調講演, 東京, 2013 年 6 月 4 日

●C31-2

橋本智昭, モデル予測制御: 物理システムからのアプローチ, 計測自動制御学会 関西支部 物理と情報をつなぐ次世代システム制御研究会, チュートリアル講演, 大阪, 2013 年 8 月 10 日

●C31-3

大塚敏之, 実時間最適化による非線形システムのフィードバック制御, 京都大学大学院情報学研究科第 15 回情報学シンポジウム 最適化と情報学, 京都, 2013 年 12 月 26 日

■招待講演詳細情報(国際)

●\*A31-7

Kenji Hirata and Kenko Uchida, A Dynamic Mechanism Design Approach to Systems Decentralization and Integration, Cooperative Distributed Control for Energy Management Systems: New Frameworks and Research Directions, Pre-Conference Workshop, The 52nd IEEE Conference on Decision and Control, Florence, Italy, Dec. 9, 2013

●B31-3

Toru Namerikawa, Real-Time Pricing and Load Frequency Control of Power Networks, Smart Grid and Energy Saving Technology, Tutorial, SICE Annual Conference, Nagoya, Sep. 14, 2013

●\*B31-4

Toru Namerikawa, Distributed Dynamic Pricing for Power Grids, Cooperative Distributed Control for Energy Management Systems: New Frameworks and Research Directions, Pre-Conference Workshop, The 52nd IEEE Conference on Decision and Control, Florence, Italy, Dec. 9, 2013

●B31-5

Toru Namerikawa, Real-Time Pricing and Load Frequency Control of Power Networks, The Control and Dynamical Systems (CDS), California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA, Mar. 10, 2014

●C31-4

Toshiyuki Ohtsuka, Nonlinear Model Predictive Control: Concepts, Algorithms and

Applications, Symposium: Reinforcement Learning for High-Dimensional Systems based on Stochastic State Estimation, Neuro2013, Kyoto, Jun. 22, 2013

●\*C31-5

Toshiyuki Ohtsuka, Kenji Kashima, and Tomoaki Hashimoto, Real-Time Optimization for Integration Mechanism, Cooperative Distributed Control for Energy Management Systems: New Frameworks and Research Directions, Pre-Conference Workshop, The 52nd IEEE Conference on Decision and Control, Florence, Italy, Dec. 9, 2013

[H26 年度]

■招待講演詳細情報(国内)

●A31-8

内田健康, 電力ネットワークに対するリアルタイムオークションメカニズム, 平成 26 年電気学会電力・エネルギー部門大会 座談会 科学技術振興機構・CREST の中間成果報告会: 2020 年に向けた多様性を考慮した次世代型 EMS の研究・開発, 京都, 2014 年 9 月 11 日

●A31-9

村尾俊幸, 平田研二, 内田健康, LQG 電力需給ネットワークに対するリアルタイムプライシング手法の提案ー動的メカニズムデザインアプローチ, SICE 産業応用部門 2014 年度大会, 東京, 2014 年 11 月 12 日

●A31-10

庫川幸秀, 小西秀樹, 電力産業における新旧事業者間の技術格差と配分効率を考慮した最適垂直構造, SICE 産業応用部門 2014 年度大会, 東京, 2014 年 11 月 12 日

●A31-11

辻隆男, 再生可能エネルギーの普及と電力システムの制御技術, 第 2 回制御部門マルチシンポジウム システム構築と制御技術チュートリアル, 東京, 2015 年 3 月 5 日

●A31-12

赤尾健一, 経済動学モデルについて: 競争均衡モデルと微分ゲームモデルの紹介, 第 2 回制御部門マルチシンポジウム システム構築と制御技術チュートリアル, 東京, 2015 年 3 月 5 日

●B31-6

滑川徹, 電力市場における需給制御と最適価格設定, 信州大学計測制御セミナー, 長野, 2014 年 10 月 21 日

●B31-7

滑川徹, 制御理論とパワーネットワーク, エネルギー経済, SICE 産業応用部門 2014 年度大会, 東京, 2014 年 11 月 12 日

●B31-8

滑川徹, エネルギーネットワークの分散協調制御, 第 2 回制御部門マルチシンポジウム 2015 年パイオニア技術賞受賞記念講演, 東京, 2015 年 3 月 6 日

●C31-6

大塚敏之, 非線形システムの伝達関数表現に対する代数的アプローチ, 第 58 回システム制御情報学会研究発表講演会 チュートリアル講演, 京都, 2014 年 5 月 23 日

●C31-7

大塚敏之, 非線形最適制御問題の代数的解法, 第 2 回制御部門マルチシンポジウム 木村賞受賞記念講演, 東京, 2015 年 3 月 7 日

■招待講演詳細情報(国際)

●B31-9

Toru Namerikawa, Distributed Real-Time Pricing and Stabilization in Power Grids, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, Netherlands, Oct. 13, 2014

●B31-10

Toru Namerikawa, Distributed Real-Time Pricing and Stabilization in Power Grids, University of Groningen, Groningen, Netherlands, Oct. 14, 2014

●C31-8

Toshiyuki Ohtsuka, Real-Time Optimization Algorithm for Nonlinear Model Predictive Control, Plenary Talk, The 5th International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes (ADCONIP 2014), Hiroshima, May 29, 2014

●C31-9

Toshiyuki Ohtsuka, Mathematical Tools in Systems and Control Theory, Keynote Speech, Kobe Computing Week Workshop, The 39th International Symposium on Symbolic and Algebraic Computation (ISSAC 2014), Kobe, Jul. 21, 2014

② 口頭発表 (国内会議 50 件、国際会議 4 件)

[H24 年度]

■口頭講演詳細情報(国内)

●A32-1

岡島佑介, 平田研二, 内田健康, エネルギー需要ネットワークの最適化と不確かな情報に基づく統合メカニズム, 第 55 回自動制御連合講演会, 京都, 2012 年 11 月 18 日

●A32-2

平田研二, 岡田悠太郎, 内田健康, 価格提示による最適運用状態への誘導に関する考察, 第 55 回自動制御連合講演会, 京都, 2012 年 11 月 18 日

●A32-3

岡島佑介, 平田研二, 内田健康, 分散型 LQ 需給ネットワークの Pivot メカニズムによる統合, 第 13 回計測自動制御学会制御部門大会, 福岡, 2013 年 3 月 6 日

●A32-4

平田研二, 岡田悠太郎, 内田健康, 価格提示による最適運用状態への誘導と安定性に関する考察, 第 13 回計測自動制御学会制御部門大会, 福岡, 2013 年 3 月 8 日

●A32-5

小出明, 辻隆男, 大山力, 内田健康, 配電損失を考慮した分散型電源の無効電力出力推定手法の検討, 第 13 回計測自動制御学会制御部門大会, 福岡, 2013 年 3 月 8 日

●B32-1

片山正昭, 阪口啓, 植田譲, 竹中栄晶, 武田朗子, 西宏章, 永原正章, 畑中健志, 滑川徹, エネルギー管理システム構築に向けた学理融合展開—学界の境界を越えて—, 第 55 回自動制御連合講演会, 京都, 2012 年 11 月 17 日

●B32-2

祓川悠, 滑川徹, 交流電力網モデルによる制約を考慮した動的な電力価格決定, 第 55 回自動制御連合講演会, 京都, 2012 年 11 月 17 日

●B32-3

末廣友晴, 滑川徹, 重複情報を用いた電力ネットワークの分散階層制御, 第 55 回自動制御連合講演会, 京都, 2012 年 11 月 18 日

●B32-4

大久保徳雄, 佐藤隆太郎, 滑川徹, ゲーム理論に基づく個人合理性を考慮したリアルタイムプライシングによる電力網の系統周波数制御, 第 13 回計測自動制御学会制御部門大会, 福岡, 2013 年 3 月 8 日

■口頭講演詳細情報(国際)

●A32-6

Ken-Ichi Akao and Gerhard Sorger, On the sustainability of a common property resource: An implication from dynamic game theory, The 3rd Congress of the Association of East Asian

[H25 年度]

■口頭講演詳細情報(国内)

●A32-7

裴香烈, 辻隆男, 大山力, 非常時の小規模自立系統におけるインバータ連系分散型電源の制御パラメータの検討, 平成 25 年 電気学会電力技術電力系統技術合同研究会, 福岡, 2013 年 9 月 11 日

●A32-8

河又啓, 辻隆男, 大山力, 内田健康, ローカル系統の電力取引における分散型アプローチの有効性の検討, 平成 25 年 電気学会電力技術電力系統技術合同研究会, 福岡, 2013 年 9 月 13 日

●A32-9

向佑樹, 小出明, 辻隆男, 大山力, 内田健康, 配電系統の電圧制御問題におけるリアルタイム性を考慮した無効電力プライシング手法の検討, 平成 25 年 電気学会電力技術電力系統技術合同研究会, 福岡, 2013 年 9 月 13 日

●A32-10

山下望, 岡島佑介, 村尾俊幸, 内田健康, LQ エネルギー需要ネットワークに対する購入電力容量制限付きモデル予測型プライシング, 第 56 回自動制御連合講演会, 新潟, 2013 年 11 月 17 日

●A32-11

岡島佑介, 村尾俊幸, 平田研二, 内田健康, 不確かな情報環境における LQ エネルギー需要ネットワークの予算均衡型メカニズムによる統合, 第 56 回自動制御連合講演会, 新潟, 2013 年 11 月 17 日

●A32-12

平田研二, 内田健康, 価格提示による最適運用状態への誘導, 第 1 回制御部門マルチシンポジウム, 東京, 2014 年 3 月 6 日

●A32-13

岡田悠太郎, 平田研二, 内田健康, 価格提示による最適運用状態への誘導と行列不等式による安定性条件, 第 1 回制御部門マルチシンポジウム, 東京, 2014 年 3 月 6 日

●A32-14

馬場玄起, 平田研二, 村尾俊幸, 内田健康, 価格決定におけるむだ時間を考慮した最適運用状態への誘導に関する考察, 第 1 回制御部門マルチシンポジウム, 東京, 2014 年 3 月 6 日

●A32-15

日引聡, 庫川幸秀, FIT 制度と RPS 制度の社会厚生分析, 環境経済・政策学会 2013 年大会, 神戸, 2013 年 9 月 21 日

●B32-5

大川佳寛, 滑川徹, 電力網制約を考慮した分散的な動的電力価格決定メカニズムの構築, 第 56 回自動制御連合講演会, 新潟, 2013 年 11 月 17 日

●B32-6

井山仁志, 滑川徹, ゲインスケジューリングモデル予測制御によるハイブリッド電気自動車の燃費最適化, 第 56 回自動制御連合講演会, 新潟, 2013 年 11 月 17 日

●B32-7

入田隆, 滑川徹, 分散検知カルマンフィルタを用いた電力網の故障診断, 第 1 回制御部門マルチシンポジウム, 東京, 2014 年 3 月 6 日

●B32-8

大川佳寛, 滑川徹, 電力需給バランスと電圧位相差情報に基づく分散的な動的電力価格決定, 第 1 回制御部門マルチシンポジウム, 東京, 2014 年 3 月 6 日

●B32-9

池上裕人, 滑川徹, 再生可能エネルギーを考慮した電力市場における最適価格設計方法, 第1回制御部門マルチシンポジウム, 東京, 2014年3月6日

●C32-1

亀本大貴, 橋本智昭, 加嶋健司, 大塚敏之, 非線形モデル予測制御に基づいた変動料金制による電力系統の負荷周波数制御, 第57回システム制御情報学会研究発表講演会, 神戸, 2013年5月16日

●C32-2

河野佑, 大塚敏之, 離散時間多項式システムの可到達性: 多項式写像の性質を用いた解析, 第57回システム制御情報学会研究発表講演会, 神戸, 2013年5月16日

●C32-3

河野佑, 大塚敏之, 固有値を用いた非線形システムの可観測性解析, 第56回自動制御連合講演会, 新潟, 2013年11月16日

●C32-4

松永奈美, 石塚真一, 大塚敏之, 数式処理ツールによる非線形モデル予測制御の設計・シミュレーション環境の構築, 第56回自動制御連合講演会, 新潟, 2013年11月16日

●C32-5

大塚敏之, 実時間最適化による非線形システムの制御と推定, 第1回制御部門マルチシンポジウム, 東京, 2014年3月6日

●C32-6

河野佑, 大塚敏之, 非線形左固有値を用いた可到達性の判別条件, 第1回制御部門マルチシンポジウム, 東京, 2014年3月7日

●C32-7

湯野剛史, 大塚敏之, 多項式システムにおけるLie微分包含式の解法と応用, 第1回制御部門マルチシンポジウム, 東京, 2014年3月7日

■口頭講演詳細情報(国際)

●A32-16

Eiji Sawada, Electricity System Reform, Retail Electricity Competition and Social Welfare Improvement in Japan, The 4th Congress of the East Asian Association of Environmental and Resource Economics, Busan, Republic of Korea, Feb. 13, 2014

[H26年度]

■口頭講演詳細情報(国内)

●A32-17

岡島佑介, 村尾俊幸, 平田研二, 内田健康, 不確かな情報環境におけるLQエネルギー需要ネットワークのInterim誘因とEx Post誘因, 第58回システム制御情報学会研究発表講演会, 京都, 2014年5月22日

●A32-18

T. Murao, K. Hirata and K. Uchida, A Dynamic Mechanism for LQG Power Networks with Random Type Parameters, 環境経済・政策学会2014年大会, 東京, 2014年9月14日

●A32-19

平田研二, 内田健康, 価格提示と分散最適化による最適潮流状態への誘導, 電子情報通信学会非線形問題研究会, 新潟, 2014年11月7日

●A32-20

笹尾洋介, 村尾俊幸, 平田研二, 内田健康, 室温の相互干渉が生じる建物の空調システムに対する通信型モデル予測制御の適用, 第57回自動制御連合講演会, 群馬, 2014年11月11日

●A32-21



御山恵未, 岡島佑介, 村尾俊幸, 平田研二, 内田健康, LQ エネルギー需要ネットワークにおける戦略的 Bidding, 第 57 回自動制御連合講演会, 群馬, 2014 年 11 月 12 日

●A32-22

平田研二, 上地大河, 実時間価格提示による分散型充放電管理方策に関する考察, 第 2 回制御部門マルチシンポジウム, 東京, 2015 年 3 月 5 日

●A32-23

御山恵未, 岡島佑介, 村尾俊幸, 平田研二, 内田健康, LQ エネルギー需要ネットワークにおける戦略的 Bidding のための最適化手法, 第 2 回制御部門マルチシンポジウム, 東京, 2015 年 3 月 6 日

●A32-24

松井駿, 村尾俊幸, 平田研二, 内田健康, LQG 電力需給ネットワークに対する動的出力統合メカニズムの設計, 第 2 回制御部門マルチシンポジウム, 東京, 2015 年 3 月 6 日

●A32-25

田中健太, 庫川幸秀, 澤田英司, 赤尾健一, 馬奈木俊介, 経済実験によるリアルタイムプライシング制度の検証, 環境経済・政策学会 2014 年大会, 東京, 2014 年 9 月 14 日

●A32-26

日引聡, 庫川幸秀, 再生可能エネルギー普及促進策の経済分析～固定価格買取 (FIT) 制度と再生可能エネルギー利用割合基準 (RPS) 制度のどちらが望ましいか? ～, 日本経済学会 2014 年度秋期大会, 福岡, 2014 年 10 月 11 日

●B32-10

井山仁志, 滑川徹, ゲインスケジューリングモデル予測制御による HEV の燃費最適, 自動車技術会春季大会, 横浜, 2014 年 5 月 21 日

●B32-11

増井健治, 滑川徹,  $H_{\infty}$  制御によるマイクログリッドの需給制御, 第 58 回システム制御情報学会研究発表講演会, 京都, 2014 年 5 月 22 日

●B32-12

滑川徹, 電力市場における需給制御と最適価格設定問題, 環境経済・政策学会 2014 年大会, 東京, 2014 年 9 月 14 日

●B32-13

佐藤隆太郎, 滑川徹, 耐戦略性と個人合理性を考慮した直接負荷制御による系統周波数制御, 第 57 回自動制御連合講演会, 群馬, 2014 年 11 月 10 日

●B32-14

大川佳寛, 滑川徹, 電力市場参加者の行動不確かさを考慮した  $H_{\infty}$  制御に基づく動的電力価格決定, 第 57 回自動制御連合講演会, 群馬, 2014 年 11 月 10 日

●B32-15

猪狩俊介, 滑川徹, 太陽光発電出力の不確定性を考慮した MPC による最適エネルギーマネジメント, 第 57 回自動制御連合講演会, 群馬, 2014 年 11 月 10 日

●B32-16

大川佳寛, 滑川徹, マルチタイムスケール動的電力価格に基づく地域別電力需給管理, 第 2 回制御部門マルチシンポジウム, 東京, 2015 年 3 月 6 日

●C32-8

亀本大貴, 橋本智昭, 加嶋健司, 大塚敏之, 実時間価格制度による電力系統の負荷周波数制御—非線形モデル予測制御アプローチ—, 環境経済・政策学会 2014 年大会, 東京, 2014 年 9 月 14 日

●C32-9

河野佑, 大塚敏之, 非線形固有ベクトルの可到達性・可観測性解析への応用, 第 2 回制御部門マルチシンポジウム, 東京, 2015 年 3 月 5 日

●C32-10

富山幸一郎, 河野佑, 橋本智昭, 大塚敏之, モデル予測制御に基づいたリアルタイムプラ

イシングによる再生可能エネルギーを含む電力系統の負荷周波数制御, 第 2 回制御部門  
マルチシンポジウム, 東京, 2015 年 3 月 6 日,

■口頭講演詳細情報(国際)

●A32-27

Takao Tsuji, Kei Kawamata, Tsutomu Oyama and Kenko Uchida, Transient Stability Analysis in Japanese Power System considering Wind Turbines, The 13th Wind Integration Workshop, Berlin, Germany, Nov. 13, 2014

●A32-28

Kenta Tanaka, Yukihide Kurakawa, Eiji Sawada, Ken-Ichi Akao and Shunsuke Managi, Experimental Study of Consumer Behavior under the Risk of Electric Outage, The 11th International Conference, Western Economic Association, Wellington, New Zealand, Jan. 10, 2015

③ ポスター発表 (国内会議 4 件、国際会議 2 件)

[H25 年度]

■ポスター発表詳細情報(国内)

●B33-1

猪狩俊介, 滑川徹, 関東地区における PV システム導入問題と電力配分問題, 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2013, 大津, 2013 年 11 月 19 日

●B33-2

佐藤隆太郎, 滑川徹, モデル予測制御を利用したリアルタイムプライシングによる電力需給制御, 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2013, 大津, 2013 年 11 月 19 日

[H26 年度]

■ポスター発表詳細情報(国内)

●A33-1

平田研二, 上地大河, 価格提示による分散型充放電管理方策の実現に関する考察, 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2014, 岡山, 2014 年 11 月 23 日

●B33-3

増井健治, 滑川徹, 発電機の応答速度を考慮した静的  $H_{\infty}$  制御に基づくマイクログリッドの負荷周波数制御, 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2014, 岡山, 2014 年 11 月 23 日

■ポスター発表詳細情報(国際)

●A33-2

Norhafiz Bin Salim, Takao Tsuji, Tsutomu Oyama and Kenko Uchida, Optimal Operation and Planning using FACTS Devices in Power Systems with PV Generation, The 4th Solar Integration Workshop, Berlin, Germany, Nov. 10, 2014

●A33-3

Hyang-Ryul Bae, Takao Tsuji, Tsutomu Oyama and Kenko Uchida, Supply and Demand Balance Control of Power Systems with Wind Power Integration Based on Multi-Agent System, The 13th Wind Integration Workshop, Berlin, Germany, Nov. 11, 2014

(4)知財出願

①国内出願

なし

②海外出願

なし

③その他の知的財産権

なし

(5)受賞・報道等

① 賞(顕著な受賞の前に\*を付記してください)

[H25 年度]

●\*B51-1

計測自動制御学会 制御部門 パイオニア技術賞, 滑川徹, 2014 年 3 月 6 日

●C51-1

システム制御情報学会 論文賞, 大塚敏之, 2013 年 5 月 16 日

●C51-2

計測自動制御学会 論文賞, 橋本智昭, 大塚敏之, 2013 年 9 月 16 日

●C51-3

計測自動制御学会 制御部門研究賞(木村賞), 大塚敏之, 2014 年 3 月 6 日

[H26 年度]

●\*B51-2

ICCAS 2014 Outstanding paper award, Suehiro Tomoharu and Toru Namerikawa, "Hierarchical Control of Power Networks by using Overlapping Information", Oct. 24, 2014

② マスコミ(新聞・TV等)報道

なし

③ その他

なし

(6)成果展開事例

①実用化に向けての展開

なし

②社会還元的な展開活動

・計測自動制御学会誌へ解説記事の寄稿

2014 年 1 月号の計測自動制御学会誌 計測と制御にて組まれた特集「大規模エネルギーマネージメントシステムを支える省エネソリューション」へ総論および解説記事を寄稿した。

・CDC2013 Workshop での発表

2013 年 12 月 9 日にイタリアのフィレンツェで開かれた The 52nd IEEE Conference on Decision and Control の Workshop 「New Frameworks and Research Directions, Pre-Conference Workshop」にて発表を行った。

・平成 26 年電気学会電力・エネルギー部門大会内の座談会での発表

2014 年 9 月 11 日に京都で開かれた平成 26 年電気学会電力・エネルギー部門大会内の座談会「科学技術振興機構・CREST の中間成果報告会: 2020 年に向けた多様性を考慮した次世代型

EMS の研究・開発」にてパネリストとして参加した。

・第 13 回制御部門大会でのチュートリアル講演会の開催

2013 年 3 月 8 日に福岡で開かれた第 13 回制御部門大会にて「次世代エネルギー需要・供給ネットワークシステムの構築へ向けて一分野融合による新展開」と題したチュートリアル講演会を企画し、約 30 名の観客を集めた。

・第 1 回制御部門マルチシンポジウムでのチュートリアル講演会の開催

2014 年 3 月 7 日に東京で開かれた第 1 回制御部門マルチシンポジウムにて「スマートな社会基盤システムの構築へ向けて一分野融合による新展開」と題したチュートリアル講演会を企画し、約 50 名の観客を集めた。

・環境経済・政策学会 2014 年大会での企画セッションの開催

2014 年 9 月 14 日に東京で開かれた環境経済・政策学会 2014 年大会にて「エネルギー需給ネットワークにおけるエージェントの戦略的行動を公共利益に統合する最適化メカニズム」と題した企画セッションを開催し、約 35 名の観客を集めた。

## § 5 研究期間中の活動

### 主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

年月日	名称	場所	参加人数	概要
[H24 年度]				
2012 年 10 月 15 日	第 1 回チームミーティング(非公開)	早稲田大学 西早稲田キャンパス	8 人	キックオフミーティング
2012 年 10 月 21 日	松川勇氏(武蔵大)セミナー	早稲田大学 西早稲田キャンパス	8 人	電力のデマンドレスポンスの計測
2012 年 11 月 13 日	第 2 回チームミーティング(非公開)	大阪大学 豊中キャンパス	8 人	進捗報告と経済/市場モデル検討
2012 年 12 月 25 日	第 3 回チームミーティング(非公開)	早稲田大学 西早稲田キャンパス	8 人	進捗報告と電力系統モデル検討
2013 年 1 月 20 日	庫川幸秀氏(東工大)セミナー	早稲田大学 早稲田キャンパス	12 名	発送電分離の経済分析
2013 年 1 月 21 日	第 4 回チームミーティング(非公開)	慶応義塾大学 日吉キャンパス	8 名	進捗報告と最適化に関する討論
2013 年 1 月 31 日	依田高典氏(京大)セミナー	早稲田大学 早稲田キャンパス	8 名	How Do Consumers Respond to Dynamic Pricing? Experimental Evidence of Variable Critical Peak
2013 年 2 月 21 日	第 5 回チームミーティング(非公開)	早稲田大学 シルマンホ	9 名	進捗報告と発送電分離に関する討論

		ール		
2013年 3月8日	第13回 SICE 制御部門 大会チュートリアル講演 会 共同企画	アクロス福 岡	30名	次世代エネルギー需要・供 給ネットワークシステムの構 築へ向けて一分野融合によ る新展開
2013年 3月27日	チームワークショップ (非公開)	早稲田大学 西早稲田キ ャンパス	8名	価格による統合メカニズムの 討論
[H25年度]				
2013年 4月17日	坂井豊貴氏(慶大)セミ ナー(公開)及び第1回 チームミーティング(非 公開)	早稲田大学 西早稲田キ ャンパス	23人	オークション分析入門及び 実際/進捗報告
2013年 5月9日	第2回チームミーティ ング(非公開)	早稲田大学 西早稲田キ ャンパス	14人	電力システムに対するシミュ レーションの計算手法及び分 散化/進捗報告
2013年 6月19日	武田朗子氏(東大)セミ ナー(公開)及び第3回 チームミーティング(非 公開)	早稲田大学 西早稲田キ ャンパス	13人	EMS モデルの最適化手法 及びタイムスケール/進捗報 告
2013年 7月26日	サイトビジットプログラム 及び第4回チームミー ティング(非公開)	早稲田大学 西早稲田キ ャンパス	15人	統合メカニズム Gr, 分散制 御 Gr 及び実時間最適化 Gr 進捗報告
2013年 8月22-23日	第5回チームミーティ ング(非公開)	伊豆高原 五景館	16人	環境・エネルギー市場のモ デリング, 欧米の電力自由 化状況と展望, 電力システ ムの制御技術
2013年 8月28日	薄良彦氏(京大)セミナ ー	長岡技術科 学大学	18人	電力システム-超入門
2013年 9月25日	FS 第1フェーズキック オフミーティング(非公開)	早稲田大学 西早稲田キ ャンパス	6人	キックオフミーティング
2013年 9月25日	第6回チームミーティ ング(非公開)	早稲田大学 西早稲田キ ャンパス	12人	統合メカニズム Gr 進捗報告
2013年 10月18日	第7回チームミーティ ング(非公開)	京 都 大 学 吉田キャン パス	11人	統合メカニズム Gr 及び実時 間最適化 Gr 進捗報告
2013年 11月12日	伊藤公一朗氏(Boston Univ. School of Management) セミナー (公開)及び第8回チ ームミーティング(非公開)	慶應義塾大 学 日吉キ ャンパス	30人	スマートメーターを使用した 日本での電力価格実証実 験及び地球温暖化問題と化 石燃料の最適利用問題/進 捗報告
2013年 12月27日	FS 第1フェーズ中間報 告会及び第9回チ ームミーティング(非公開)	早稲田大学 西早稲田キ ャンパス	26人	デマンドレスポンスモデル, 次世代送配電モデル, オ ークション制度モデル, 電力需 給システムモデル
2014年	樽井礼氏(Univ. of	慶應義塾大	23人	電力市場における需要応答

1月30日	Hawaii at Manoa)セミナー(公開)及び第10回チームミーティング(非公開)	学 日吉キャンパス		を考慮した凸包価格設定及び分散制御 Gr 進捗報告
2014年 3月7日	第1回SICE制御部門マルチシンポジウムチュートリアル講演会 共同企画	電気通信大学	50人	スマートな社会基盤のシステムの構築へ向けて一分野融合による新展開
2014年 3月17日	Hyungbo Shim氏(Seoul National Univ.)セミナー	慶應義塾大学 矢上キャンパス	30人	学術国際交流
2014年 3月25日	第11回チームミーティング(非公開)	早稲田大学 西早稲田キャンパス	20人	非線形離散時間最適制御問題の代数的解法及び FIT 制度とRPS 制度の社会厚生 の比較/進捗報告
2014年 3月25日	FS 第1フェーズ最終報告会(非公開)	早稲田大学 西早稲田キャンパス	28人	長期的モデル, オークション モデル, デマンドレスポンス の行動経済学と実験及び需要 (電力)機器モデル
2014年 3月26日	Duarte Antunes 氏 (Eindhoven Univ. of Technology)セミナー	慶應義塾大 学 矢上キ ャンパス	19人	学術国際交流
[H26年度]				
2014年 4月22日	チームミーティング(非 公開)	京 都 大 学 吉田キャン パス	19人	電力取引を考慮したデマン ドレスポンス及びパリ中央工 科大学滞在研究報告および 辻チーム研究報告/進捗報 告
2014年 5月30日	内田滑川グループミー ティング(非公開)	早稲田大学 西早稲田キ ャンパス	7人	FS および最強チームに向け て取り組む課題に関する議 論
2014年 5月30日	大塚グループミーティ ング(非公開)	京 都 大 学 吉田キャン パス	4人	需要家・供給家のモデル化 に関する議論
2014年 6月10日	グループミーティング (非公開)	京 都 大 学 吉田キャン パス	9人	FS 第2フェーズキックオフ ミーティングに関する議論
2014年 6月17日	FS 第2フェーズキック オフミーティング(非公開)	早稲田大学 西早稲田キ ャンパス	22人	FS 全体概要, 各グループ実 施内容, 最強チームでの目 標と研究内容, 及び予算
2014年 7月22日	内田滑川グループミー ティング(非公開)	慶應義塾大 学 日吉キ ャンパス	10人	最強チームに向けた研究計 画の整理, サブグループご とのターゲット(アウトプ ット), スケジュール(前半, 中 間, 後半)などに関する議論
2014年 7月30日	大塚グループミーティ ング(非公開)	京 都 大 学 吉田キャン パス	4人	再生可能エネルギーおよび 経済行動を考慮した問題設 定に関する議論

2014年 8月5日	FS第2フェーズ中間報告会(非公開)	早稲田大学 西早稲田キャンパス	23人	デマンドレスポンスに着目した実証実験結果, 価格提示を利用した PCS 群の負荷分散制御, リスク管理型統合メカニズム, 各 Gr の課題, ターゲット, 研究体制, 計画・スケジュール
2014年 9月14日	環境経済・政策学会 2014年大会 セッション 企画	法政大学 多摩キャンパス	35人	エネルギー需給ネットワークにおけるエージェントの戦略的行動を公共利益に統合する最適化メカニズム
2014年 9月17日	FS第2フェーズ最終報告会(非公開)	早稲田大学 西早稲田キャンパス	26人	内田経済 Gr, 滑川 Gr, 大塚 Gr 報告, FS 全体まとめ
2014年 9月22日	草薙真一氏(兵庫県立大)セミナー(非公開)	早稲田大学 早稲田キャンパス	10人	分散型エネルギー供給システムとシェールガスの法律問題ー米国の例から得られる日本への示唆ー
2014年 10月2日	大塚グループミーティング(非公開)	京都大学 吉田キャンパス	7人	タイムスケールを考慮した電力ネットワークモデルに関する議論
2014年 10月18日	グループミーティング(非公開)	市ヶ谷	8人	研究の取りまとめに関する議論/進捗報告
2014年 11月28日	チームミーティング(非公開)	慶應義塾大学 日吉キャンパス	18人	経済実験によるリアルタイムプライシング制度の検証, 送電事業者の戦略的行動を考慮した再生可能エネルギー普及促進制度の効果及び不確かな情報環境における制約付きエネルギー需要ネットワークの AGV メカニズムによる統合/進捗報告

## §6 最後に

本研究では, 次世代エネルギー需給管理システムの構築を目的として, 環境, 社会・経済, 物理という多次元かつ横断的な視点から, 再生可能エネルギー導入に伴う自然環境の変動と需要者及び供給者のダイナミクスが存在を前提に, 戦略的に自己利益を追求する需要者及び供給者の分散型意思決定・制御とそれを統合して公益性を確保する統合メカニズムの理論及び設計法の確立を目指した. 2.5年間の研究遂行によって, §3で述べたように, また§4の研究発表リストで示したように, 当初の目標を達成した多くの成果を得ることができた. これらの成果は, 統合メカニズムの理論及び設計法の体系化までには至っていないが, その骨組みを形成する結果であり, 今後の更なる研究展開及び体系化のための基盤を与えるものである.

§1(2)において, 顕著な成果として記した六つの代表的な成果に対して, 各成果の意義に触れておきたい. 「LQG 電力需給ネットワークに対する動的統合メカニズムの設計」は, ユーティリティー及びエージェントのダイナミクスを陽に考慮した動的市場メカニズムの解析・設計ができる新しい

電力ネットワークモデルを与えたもので、今後の動的統合メカニズムの実現及び研究展開の基礎となる成果である。「リアルタイムプライシングによる最適運用状態への誘導と安定性」は、需給の差のみでネットワーク全体の統合を実現するアルゴリズムを提案しており、そのアルゴリズムは単純さと一般性から様々なシステムへの適用可能性を持っている。既に、CREST-EMS 内の他チームのシステム構築の中で採用されている。「電力需給ネットワークの階層分散制御」は重複情報を用いた新しい分散型系統周波数制御法を提案したもので、国際会議 ICCAS2014 の Outstanding Paper Award を獲得した優れた成果である。「経済モデルと物理モデルを統合した実時間最適化によるリアルタイムプライシングのアルゴリズム検証」は、今後想定される大規模需給ネットワークに対するプライシングのための最適制御計算が、実時間で可能であることを初めて示した研究である。「並列計算技術の適用による電力システムの同期過渡安定度解析の高速化手法」は、電力ネットワークの運用状態に上乗せできる電力取引量上限の高速算定を可能にする並列計算法を提案したもので、上記 2 番目の「リアルタイムプライシングによる最適運用状態への誘導と安定性」の成果と共に本チームの国際連携の成果である。「電力産業における新旧事業者間の技術格差と配分効率を考慮した最適垂直構造」は、実施予定の発送電分離に関する政策議論に対して、新しい理論的知見を提供する成果である。

本研究の成果を踏まえた今後の研究展開では、次の二つの研究を相互に連携させながら実施することが重要となる。一つはエネルギー経済の理論及びモデルの構築であり、もう一つは統合メカニズム理論及び設計アルゴリズムの完備化・体系化である。前者は、消費者の行動モデル、公益を担保する自由市場モデル、並びに長期的需給モデルの 3 レベルタイムスケール分類の経済モデルの構築である。後者は、リアルタイムオークションの理論と経済効率性、ロバスト統合メカニズム、再生可能エネルギーの不確かさを克服する市場メカニズム、ネットワーク構造と統合メカニズムの分散化、さらに需給バランスの高速最適化及び適応 MPC 等の課題を含んでいる。これらの研究課題については、本チームが参加する最強チームにおいて取り組む予定である。

本チームの研究構想の原点は、エネルギー需給システムは環境、社会・経済システム、並びに物理システムの複合システムであるという認識である。そのため関連異分野の融合展開が本研究の推進には不可欠であったが、一方で研究推進の原動力でもあった。本チームには、環境経済、エネルギー経済、電力システム、制御等の分野から研究者・技術者が参加した。チームミーティングでは、自身のこれまでの専門でない内容を専門家の前で報告し、一方で自身の専門分野の内容に関して全く新しい視点からの報告を聞くというスリングな経験をするようになった。このような緊張感のある異分野融合の研究遂行によって、チームメンバー自身の研究また共同研究を深化・展開させ本チームの研究成果に繋げることができた。経済分野の研究者が制御関連学会でチュートリアル講演をし、制御分野の研究者が環境・経済関連学会の企画セッションで発表をするといった学会レベルの異分野交流を実施することもできた。このような異分野研究連携の経験と実績は最強チームの研究展開におけるプラットフォームとなるはずである。

