

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「電力需要の約 75%を自然エネルギーによっ
て賄うことを可能とする分散ロバスト最適制御」

研究終了報告書

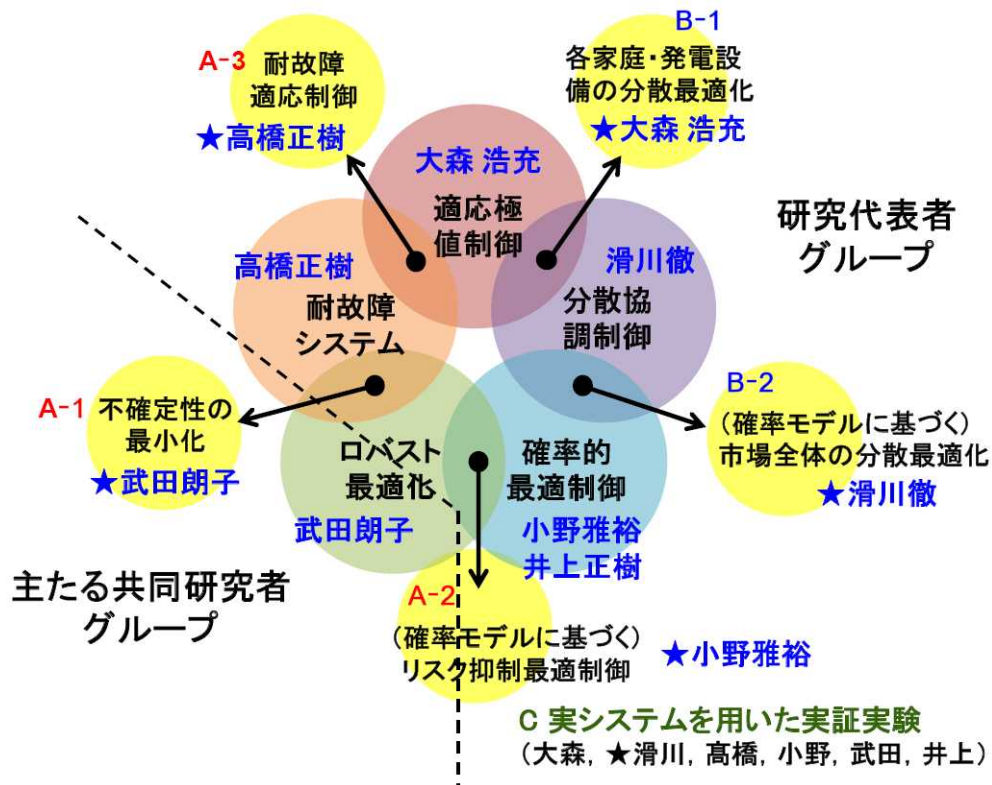
研究期間 平成24年10月～平成27年3月

研究代表者:大森 浩充
(慶應義塾大学 理工学部、教授)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

研究代表者グループの研究目的は、電力需要の約 75%を自然エネルギーによって賄うことを可能とする分散ロバスト最適制御を確立することである。このためには、(A)確率モデルに基づいた制約条件つき最適制御と(B)大規模分散最適制御の両アルゴリズムの開発が必要不可欠である。この両アルゴリズム開発に必要な要素技術の研究を実施し、(A)の研究として、確率モデルに基づいた制約条件つき最適制御アルゴリズムを、(B)の研究として、大規模分散最適制御アルゴリズムを、それぞれ開発した。また、実験システムを用いた実証実験のための準備を完了し、アルゴリズムを実装する準備を整えた。研究の初段階では、(A)確率モデルに基づいた制約条件つき最適制御アルゴリズムを開発するため、(A-1)不確定性の最小化、(A-2)リスク抑制最適制御、(A-3)耐故障適応制御の3項目の研究を継続実施した。さらに、(B)大規模分散最適制御アルゴリズムを開発するため、(B-1)各主体の分散最適化、(B-2)市場全体の分散最適化の2項目の研究を継続実施した。また、(A)の研究として、確率モデルに基づいた制約条件つき最適制御アルゴリズムを、(B)の研究として、大規模分散最適制御アルゴリズムを、それぞれ開発し。さらに、(C)実験システムを用いた実証実験を行った。



主たる共同研究者グループ（東大 Gr.）の研究課題は、「不確定性最小化とリスク抑制のための制約条件つき最適制御アルゴリズム」の開発であり、主たる共同研究者グループでは、(A-1)不確定性を最小化するための最適設備投資計画と (A-2) (A-1)で最小化された需給の不確定性を所与として、制約条件が破られるリスクを定量的に抑制する最適制御アルゴリズムを開発した。主たる共同研究者グループ（東大 Gr.）では、不確定性最小化とリスク抑制のための制約条件つき最適制御アルゴリズムの開発を行った。具体的には、(A-1)不確定性を最小化するための最適設備投資計画問題の最適解を求めるアルゴリズムを開発した。また、(A-2) (A-1)で最小化され

た需給の不確定性を所与として、制約条件が破られるリスクを定量的に抑制する最適制御アルゴリズムを開発した。「最悪ケース」を想定できないために、停電などのリスクをゼロとすることは一般的に不可能であるが、確率モデルに基づいた最適化を行えば、リスクに上限を設けることが可能である。

さらに本チームはFS第2フェーズに応募し、採択されている。2つのFS連携グループ（FS東海大学グループとFS東工大グループ）が存在する。以上のことを総合すると、具体的には下記の研究を行い、対外発表し融合研究を行った。

- (F1) 電力ネットワークの分散階層制御法
- (F2) 電力潮流を考慮した分散的な動的電力価格決定
- (F3) 基幹系統故障時の供給不足と余剰電力を考慮した太陽光発電と電力貯蔵装置の最適配置
- (F4) 機械学習法に基づく太陽光発電量予測モデル
- (F5) ロバスト最適化法による不確定性の最小化
- (F6) リスク抑制型電力網制御と分散型電力網制御の融合
- (F7) 閉ループ型リスク抑制型電力潮流制御
- (F8) 大規模分散制御のための適応合意形成アルゴリズム利用とネットワーク故障診断のための適応的アプローチ
- (F9) 再生可能エネルギーの大量導入時に考慮すべき気象変動・変化に関する研究（FS 東海大グループ）
- (F10) 制御通信シミュレータの適用検討（FS 東工大グループ）

グループ名	研究代表者又は主たる共同研究者	所属機関・部署・役職名	CREST における所属チーム名
慶應義塾大学グループ	大森 浩充 (研究代表者)	慶應義塾大学・理工学部・教授	大森チーム
東京大学グループ	武田 朗子 (主たる共同研究者)	東京大学大学院・情報理工学系研究科・准教授	大森チーム
FS東海大学Gr. (FS連携グループ)	渡邊 武志 (主たる共同研究者)	東海大学・特定研究員	中島チーム
FS東京工業大学Gr. (FS連携グループ)	小野 功 (主たる共同研究者)	東京工業大学大学院・知能システム科学専攻・准教授	石井チーム

(2) 顕著な成果

(CREST 研究で得られた最も顕著な成果を<優れた基礎研究としての成果>と<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>各々3点まで挙げ、それぞれについて200字程度で説明してください。研究成果の科学技術上のインパクトや国内外の類似研究の研究動向・状況に対する位置づけについても説明してください。成果は論文、特許、試作品、展示などが挙げられます。)

<優れた基礎研究としての成果>

(先導的・独創的であり国際的に高く評価され、今後の科学技術に大きなインパクトを与える成果など)

1. 閉ループ型リスク抑制型電力潮流制御

概要：開発したリスク抑制型電力潮流制御手法は、統計的に得られた自然エネルギー発電量および電力需要量の確率分布を元に、事前に各バスにおける蓄電設備の充放電量を決めておく、閉ループ型の制御であった。これを現時刻における需給バランスを考慮してリアルタイムで決定する、閉ループ型の制御に拡張し、効率の大幅な改善を可能にした。また、既存研究に過去に開発した risk allocation approach を組み合わせることで、取るリスクの量において妥協することなく、より効率のよい電力網の運用が可能となることがわかった。

2. 電力ネットワークの分散階層制御法.

概要：大規模な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。この手法は従来の手法では考慮していなかったサブシステムの関係性や通信途絶などの異常を考え、よりスマートグリッドへの適用を重点に置いたものである。本研究で提案する分散階層制御器は、3つの段階を経て設計される。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。

3. 基幹系統故障時の供給不足と余剰電力を考慮した太陽光発電と電力貯蔵装置の最適配置

概要：確率的評価指標のひとつである Expected Energy Not Supplied (EENS) と Expected Energy Not Used (EENU) を用いる。これらの指標を制約条件として組み込み、PV, ESS の最適配置・容量決定問題として定式化した。IEEE Reliability Test System を用いた検証によって本研究の提案により、耐故障の指標である EENS, EENU に対して与えた制約を満たす PV, ESS の配置・容量の決定が可能であることを確認した。

<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

(新産業の創出への手掛かりなど出口を見据えた基礎研究から、企業化開発の手前までを含め、科学技術イノベーションに大きく貢献する成果など)

1. 機械学習法に基づく太陽光発電量予測モデル

概要：再生可能エネルギー導入量の増加に伴い、円滑な電力運用を行うために高い精度での太陽光発電量の予測が必要とされている。従来は、主に、ARCH を始めとする時系列モデルが用いられていたが、ヒストリカルデータが豊富に得られるようになった現在、機械学習法と組み合わせることにより、より高い予測精度を持つモデルを構築できるようになった。時系列モデルのパラメータをサポートベクター回帰(SVR)によって学習するハイブリッド手法を提案した。その結果、最小二乗法でパラメータを求める通常の時系列モデルや時系列を考慮しないSVRに比べ、予測精度が高いことが数値実験を通して示された。

2. 再生可能エネルギーの大量導入時に考慮すべき気象変動・変化に関する研究

概要：これまで行われていない Sample entropy を用いた日射量データの解析に関する、気象分野と制御分野の異分野共同体制で行った研究である。本研究で得られた主な成果は、Sample entropy が日射量の急激な変化を表す性質を持つことが分かった Sample entropy を使用することにより太陽光発電の急激な出力変化の原因となるような日射量の変化を表すことができる可能性が示唆される。

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

① 「研究代表者」グループ

研究参加者

氏名	所 属	役職	参加時期
大森 浩充	慶應義塾大学工学部 システムデザイン工学科	教授	H24. 10～H27. 3
滑川 徹	慶應義塾大学工学部 システムデザイン工学科	教授	H24. 10～H27. 3
高橋 正樹	慶應義塾大学工学部 システムデザイン工学科	准教授	H24. 10～H27. 3
小野 雅裕	California Institute of Technology, Jet Propulsion Laboratory	研究員	H24. 10～H27. 3 (移籍したが Gr. は 同じ)
武田 朗子	慶應義塾大学工学部 管理工学科	准教授	H24. 10～ H25. 3 (移籍後は東大 Gr. へ)
井上 正樹	慶應義塾大学工学部 物理情報工学科	助教	H26. 4～H27. 3 (途中参加)
矢向 高弘	慶應義塾大学工学部 システムデザイン工学科	准教授	H26. 5～H27. 1 (FS 第 2 フェーズ)
石川 友規	慶應義塾大学大学院 理工学研究科 総合デザイン工学専攻	M1, M2 (滑川研)	H24. 10～H26. 3 (離脱 1.5 年)
大川 佳寛	慶應義塾大学大学院 理工学研究科 総合デザイン工学専攻	M1, M2, D1 (滑川研)	H24. 4～H27. 3
橘 義博	慶應義塾大学大学院 理工学研究科 総合デザイン工学専攻	M1, M2 (滑川研)	H24. 10～H26. 3 (離脱 1.5 年)
徳本晋一郎	慶應義塾大学大学院 理工学研究科 総合デザイン工学専攻	M1, M2 (滑川研)	H24. 10～H26. 3 (離脱 1.5 年)
祓川 悠	慶應義塾大学大学院 理工学研究科 総合デザイン工学専攻	M1 (滑川研)	H24. 10～H25. 1 (離脱 7 ヶ月)
向井 達哉	慶應義塾大学大学院 理工学研究科 総合デザイン工学専攻	M1, M2 (滑川研)	H24. 10～H26. 3 (離脱 1.5 年)
池上 裕人	慶應義塾大学大学院 理工学研究科 総合デザイン工学専攻	M1, M2 (滑川研)	H25. 4～H27. 3 (途中参加 2 年)
入田 隆	慶應義塾大学大学院 理工学研究科 総合デザイン工学専攻	M1, M2 (滑川研)	H25. 4～H27. 3 (途中参加 2 年)
高村 俊	慶應義塾大学大学院 理工学研究科 総合デザイン工学専攻	M1, M2 (滑川研)	H25. 4～H27. 3 (途中参加 2 年)
森 翔平	慶應義塾大学大学院 理工学研究科	M1, M2 (滑川研)	H25. 4～H27. 3 (途中参加 2 年)

	総合デザイン工学専攻		
名取 滉平	慶應義塾大学大学院 理工学研究科 総合デザイン工学専攻	M1, M2 (滑川研)	H25. 4～H27. 3 (途中参加 2 年)
原田幸世子	慶應義塾大学工学部 滑川研究室	研究補助員 (秘書)	H24. 10～H27. 3
小西 隆介	慶應義塾大学大学院 理工学研究科 開放環境科学専攻	B4, M1, M2 (高橋研)	H24. 10～H27. 3
萬 礼応	慶應義塾大学大学院 理工学研究科 開放環境科学専攻	M2, D1, D2 (高橋研)	H24. 10～H27. 3
石田 貴行	慶應義塾大学大学院 理工学研究科 開放環境科学専攻	M1, M2 (高橋研)	H25. 4～H27. 3 (途中参加 2 年)
田中 幸也	慶應義塾大学工学部 システムデザイン工学科	B4	H26. 5～H27. 3 (途中参加 1 年)
明石 陽子	慶應義塾大学工学部 高橋研究室	研究補助員 (秘書)	H25. 4～H27. 3 (途中参加 2 年)
高村 英雅	慶應義塾大学大学院 理工学研究科 基礎理工学専攻	M1 (小野)	H24. 10～H24. 10 (1 ヶ月離脱)
余 正希	慶應義塾大学大学院 理工学研究科 基礎理工学専攻	M1, M2 (小野, 大森)	H24. 10～H26. 3 (1. 5 年離脱)
杉本 貴史	慶應義塾大学大学院 理工学研究科 基礎理工学専攻	B4, M1, M2 (小野, 大森, 井上)	H24. 10～H27. 3
浦田 賢吾	慶應義塾大学工学部 物理情報工学科	B4 (井上)	H26. 4～H27. 3 (途中参加 1 年)
高村 英雅	無所属	研究補助員 (井上)	H26. 10～H27. 3 (途中参加 0. 5 年)
若林 優一	慶應義塾大学大学院 理工学研究科 基礎理工学専攻	M2 (井上)	H26. 10～H27. 3 (途中参加 0. 5 年)
志田 宇信	慶應義塾大学大学院 理工学研究科 総合デザイン工学専攻	D2, D3, D4 (大森研)	H24. 10～H27. 3
高松 尚宏	慶應義塾大学大学院 理工学研究科 総合デザイン工学専攻	M1, D1, D2 (大森研)	H24. 10～H27. 3
塩田 強	慶應義塾大学大学院 理工学研究科 総合デザイン工学専攻	M1, D1, D2 (大森研)	H24. 10～H27. 3
Wei Wang (王維)	慶應義塾大学大学院 理工学研究科 総合デザイン工学専攻	D1, D2 (大森研)	H25. 4～H27. 3 (途中参加 2 年)
田中 光平	慶應義塾大学大学院 理工学研究科 総合デザイン工学専攻	M1 (大森研)	H26. 4～H27. 3 (途中参加 1 年)

藤原 秀平	慶應義塾大学大学院 理工学研究科 開放環境科学専攻	M1, M2 (武田研, 大森)	H24.10~H26.3 (慶應→東大)
小川 安奈	慶應義塾大学大学院 理工学研究科 開放環境科学専攻	B4, M1, M2 (武田研, 大森)	H24.10~H27.3
伊藤 直紀	慶應義塾大学大学院 理工学研究科 開放環境科学専攻	M1, M2 (武田研, 大森)	H25.4~H27.3 (途中参加2年)
細江 豊樹	慶應義塾大学大学院 理工学研究科 開放環境科学専攻	M1 (武田研)	H24.10~H25.3 (6ヶ月離脱)
森 静奈	慶應義塾大学大学院 理工学研究科 総合デザイン工学専攻	M1 (矢向研)	H26.5~H27.1 (FS第2フェーズ)

研究項目

- ・ 分散制御アルゴリズムの開発
- ・ 耐故障性適応制御, 数値計算
- ・ 確率的電力制御アルゴリズムの開発・実装
- ・ EMSにおける情報ネットワーク運用技術
- ・ 分散制御系に関する実験, 解析と調査
- ・ 電力潮流問題におけるリスク管理法の開発
- ・ ロバスト分散最適化応用, 耐故障のための最適ネットワーク構築
- ・ 蓄電池, 自然エネルギー実装および数値シミュレーション
- ・ 太陽光発電量の予測モデルの考案とその解法の構築
- ・ 発電設備の始動コストを考慮したリアルタイム価格設定モデルの構築

②「東京大学」グループ

研究参加者

	氏名	所属	役職	参加時期
○	武田 朗子	東京大学大学院 情報理工学系研究科	准教授	H25.4~H27.3 (慶應→東大)
*	藤原 秀平	東京大学大学院 情報理工学系研究科 数理情報学専攻	D1 (武田研)	H26.4~H27.3 (慶應→東大)
*	松永 龍弥	東京大学大学院 情報理工学系研究科 数理情報学専攻	M1	H26.4~H27.3 (途中参加1年)

研究項目

- ・ 制約条件つき最適制御アルゴリズム開発
- ・ ロバスト最適化アルゴリズム開発

③「東海大学」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
渡邊 武志	東海大学	特定研究員	H26.5~H27.1 (FS第2フェーズ)

研究項目

- ・ 気象データの解析とインターフェース調整

③「東京工業大学」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
小野 功	東京工業大学大学院 総合理工学研究科 知能システム科学専攻	准教授	H26.5～H27.1 (FS 第2フェーズ)
小野田 崇	(一財)電力中央研究所 システム技術研究所	領域リーダー (副研究参事)	H26.5～H27.1 (FS 第2フェーズ)

研究項目

- ・ 制御通信シミュレータの適用検討

- (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
(研究チーム外での連携や協働についてご記入ください。ライフ分野では臨床医等を含みます。)

§ 3 研究実施内容及び成果

3. 1 電力需要の約 75%を自然エネルギーによって賄うことを可能とする分散ロバスト最適制御 (慶應義塾大学 大森グループ) および 不確定性最小化とリスク抑制のための制約条件つき最適制御アルゴリズムの開発 (東京大学 武田グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

(A) 確率モデルに基づいた制約条件つき最適制御アルゴリズムの開発

太陽光・風力発電が大規模に導入された電力網において、発電量の不確定性に対処し、電力不均衡に陥るリスクを定量的に抑制しつつ、効率の高い制御を行うための制御アルゴリズムの開発を行った。

(A-1) 不確定性の最小化

(1) 確率モデルに基づいた制約条件つき最適制御アルゴリズムの開発のために、まず必要な不確定性そのものを最小化するため、自然エネルギー発電予測アルゴリズムの開発をおこなった。すなわち、自然エネルギー(太陽光/風力)発電システムの翌日の発電量予測を行うため、予測問題に関してのデータ解析に対する初期値問題と発電予測モデルに対する未知相関係数推定問題に定式化した。発電データに関して天候により異なる発電特性を持つため、発電特性を考慮した予測手法が必要である。予測に際して、天気予報は気象庁ホームページより得られる予報を用いた。過去の発電データを特性毎に分類し、発電データの集合に分類した後、天気予報により、予測に用いる過去の発電データ集合を選定した。さらに、発電の周期性を、回帰的な数理モデルによって表現した。周期性を利用した数理モデルの構築では、数理モデルを、未知相関係数と既知の過去の実績値を用いて表現した。その後、過去の発電データから、動的システムの状態推定をするために、フィルタリング理論を用いた未知相関係数推定法を提案した。この時の過去データはデータ解析によって得られた発電データ集合を用い、フィルタリング理論は太陽光発電特性に従った予測理論を構築した。提案法により出力制約を満たしつつ推定するアルゴリズムを確立し、定理によりその有効性を示した。最後に、以上の提案手法のそれぞれに対する有効性を、実機を用いた予測実験により確認・検証した。

(2) 不確定性の最小化の研究課題として、需給の不確定性を最小化するための最適設備投資計画問題の構築とともに、最適解を求めるためのアルゴリズムの開発に向けて、研究に取り組んだ。太陽光発電システムの導入を考える際に、日射量によってもたらされる不確実性が太陽光

発電量の予測、ひいては収益計算にしばしば大きな影響を与え、最適設備投資計画の立案を難しくさせてしまう。その不確実性を最小にすべく、予測性能の高い「太陽光発電量の予測方法の開発」に取り組んだ。

(A-2) リスク抑制最適制御

(1) 複数の発電事業者がネットワーク上に存在するモデルにおいて、不確定な環境下で需給不均衡のリスクを定量的かつ分散的に抑制することを可能とする、市場ベースの電力取引メカニズムの開発である。本研究は2013年の国際学会 European Control Conference に採択され、口頭発表および Proceeding への掲載が決定した。また、2013年の制御部門大会においても口頭発表を行った。この研究はアプローチ (B-2) の成果の一部でもある。

(2) リスク抑制型最適制御を用いた、電力潮流（送電網上を流れる電力）の制御手法を開発した。既存研究に過去に開発した risk allocation approach を組み合わせることで、取るリスクの量において妥協することなく、より効率のよい電力網の運用が可能となることがわかった。この結果は、2012年の国内学会である制御理論シンポジウムにて発表された。

(3) リスク抑制最適制御の研究課題として、最小化された不確定さをもつモデルの制約条件が破られるリスクを定量的に抑制するための最適制御アルゴリズムの開発を行い、検討を重ねた。不確実な最適化問題を扱うための手法として知られる「ロバスト最適化法」の観点からの研究を進めた。

(A-3) 耐故障適応制御

(1) 電力系統に故障が発生した際に電力供給不足および余剰電力発生を抑制を考慮した、太陽光発電 (PV: Photovoltaic) ・エネルギー貯蔵システム (ESS: Energy Storage System) の最適配置問題をについて検討した。供給されない電力量の期待値を表す EENS (Expected Energy Not Supplied) , 発生した余剰電力量の期待値を表す EENU (Expected Energy Not Used) を制約条件で考慮し、IEEE Reliability Test System の電力系統を事例として、設定したパラメータにおいて耐故障性を維持しつつ、全体の発電可能量に対して 3.8% の PV を導入し、ESS を最小限に配置可能なことを確認した。

(2) 適応制御の基本的なアルゴリズム開発として、補償法として産業界で多く用いられている PID 制御パラメータを、環境変動に対して自律的に変化させる適応制御方策の基本的な研究を行った。

(B) 大規模分散最適制御アルゴリズム

出力制御可能な電源に対しては、全体コストを最適にする電力配分が可能だが、分散電源の大量導入により、電力ネットワークが複雑化すると、制約条件やコスト情報を集中管理することが不可能であり、最適化のための情報収集や計算を分散的に行わなければならない。

(B-1) 各主体の分散最適化

(1) 連続時間マルチエージェントシステムに基づいた分散協調アルゴリズムを開発した。そのアルゴリズムを実装したエージェントは近傍情報のみしか入手できないという環境下で、自分の地域の電力配分を大域的に最適化することができる。

(B-2) 市場全体の分散最適化

(1) ゲーム理論を用いた電力のリアルタイム・プライシングを導入することで、より大規模かつ確実な周波数制御を可能できる。これは、これまで個々に行われていた研究が本研究母体の連携によりはじめて可能となった成果である。

以下では、§ 1 研究実施の概要で述べた各研究項目についてその成果を述べる。

F1. 電力ネットワークの分散階層制御法

本研究では大規模な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。この手法は従来の手法では考慮していなかったサブシステムの関係性や通信途絶などの異常を考え、よりスマートグリッドへの適用を重点に置いたものである。本

研究で提案する分散階層制御器は、3つの段階を経て設計される。まず、状態や入力を含むサブシステムが重複する階層システムを構築する。次に、階層システムと元のシステムとの関係性を確認する。このとき、構築した階層システムと元のシステムの状態や評価出力の遷移が同じになる条件を導出した。最後に、階層システムに対する分散制御器を設計し、元のシステムに対応するように制御器を縮小する。この際に、設計した制御器を元のシステムに適合する条件を導出した。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。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。更には集中制御型や従来の分散制御則との比較を行い、提案手法の有効性を示した。

F2. 電力潮流を考慮した分散的な動的電力価格決定

本研究ではエネルギーマネジメントシステムのための電力潮流を考慮した分散的な動的電力価格決定メカニズムを提案した。市場参加者として電力消費を行う需要家、発電を行う供給者および電力網の管理と電力価格の決定を行う独立系統運用機関 (Independent System Operator, 以下 ISO) の3種類の参加者を想定した。そして各参加者の利益の総和を社会全体の利益とし、この利益を最大にする最適化問題を考えた。この最適化問題について、従来研究では直流電源モデルを対象としているが、本研究ではより現実的な交流電源モデルにおける電力潮流制約を考慮した最適化問題を考えた。ここで需要家および供給者は自身の利益最大化に基づいて利己的に行動するため、ISOは社会全体の利益を最大にする理想的な電力消費量と発電量を指令することができない。そこで本研究では利己的に行動する需要家と供給者が社会全体の利益を最大化するように行動させる電力価格について考えた。これは最適化問題の双対関数の最適解として表現する事ができ、最適な電力価格と見なすことができる。またISOは需要家や供給者についての情報に関して未知であるため単独では最適な電力価格を定める事が出来ない。これに対して最適化問題の双対関数の勾配法を用いた分散最適市場アルゴリズムを提案した。この提案市場アルゴリズムは電力価格に対する需要家、供給者の利益最大化に基づいた行動とISOの需給のインバランスを考えた電力価格更新によって成り立っており、更新を繰り返すことで最終的に導かれる電力価格は社会全体の利益を最大化する電力価格へと収束した。最後に価格の収束性を証明した後、数値シミュレーションを用いて提案した分散最適市場アルゴリズムの有効性について検証した。

さらに、従来、供給者のモデル (最小費用電力供給計画モデル) で用いられた微分可能な狭義凸な費用関数を、固定費による非連続性を考慮した費用関数に置き換えることを提案した。この非連続な費用関数は、発電機起動停止問題において仮定される、より現実的な関数である。従来の費用関数と比較して、非連続な費用関数がどのように動的電力価格に影響を与えるかについて検証を行った。

F3. 基幹系統故障時の供給不足と余剰電力を考慮した太陽光発電と電力貯蔵装置の最適配置

本研究では、太陽光発電 (Photovoltaic Power Generation System, PV) とエネルギー貯蔵システム (Energy Storage System, ESS) を基幹系統に配置することで、故障時に発生する供給不足と余剰電力の双方を抑制し、耐故障性を有する電力系統の設計を行う。そのためには、故障時に発生する供給不足と余剰電力、すなわち供給信頼度を評価する必要がある。その評価の方法には大別して確定的手法と確率論的手法の2つがある。一般に、確定的手法は広くもちいられており、計算の容易さなど利点があるが信頼供給度に関して比較的厳しい評価となることが知られている。その結果、供給不足、余剰電力を解消するためにはESSの導入量も大きくなり、コスト面で現実的ではない解が得られる可能性がある。一方、確率論的手法はそれぞれの設備の故障確率などを考慮することができ、より現実的に即したESSの導入量が決定できることが期待されるため、本研究では確率的評価指標のひとつである Expected Energy Not Supplied (EENS) と Expected Energy Not Used (EENU) を用いる。これらの指標を制約条件として組み込み、PV、ESSの最適配置・容量決定問題として定式化した。

IEEE Reliability Test System を用いた検証によって本研究の提案により、耐故障の指標である EENS、EENU に対して与えた制約を満たす PV、ESS の配置・容量の決定が可能であることを確認した。

F4. 機械学習法に基づく太陽光発電量予測モデル

再生可能エネルギー導入量の増加に伴い、円滑な電力運用を行うために高い精度での太陽光発電量の予測が必要とされている。従来は、主に、ARCHを始めとする時系列モデルが用いられていたが、ヒストリカルデータが豊富に得られるようになった現在、機械学習法と組み合わせることにより、より高い予測精度を持つモデルを構築できるようになった。時系列モデルのパラメータをサポートベクター回帰(SVR)によって学習するハイブリッド手法を提案した。その結果、最小二乗法でパラメータを求める通常の時系列モデルや時系列を考慮しないSVRに比べ、予測精度が高いことが数値実験を通して示された。

F5. ロバスト最適化法による不確定性の最小化

需給の不確定性の影響を最小化するための最適設備投資計画問題の構築とともに、最適解を求めるためのアルゴリズムの開発を行った。太陽光発電システムの導入を考える際に、日射量によってもたらされる不確実性が太陽光発電量の予測、ひいては収益計算にしばしば大きな影響を与え、最適設備投資計画の立案を難しくさせてしまう。その不確実性に対してロバストな設備投資計画法を提案し、その有効性について検証した。さらに、機械学習法で用いられる損失関数、金融工学で用いられるリスク尺度、ロバスト最適化法で用いられる不確実性集合の関係を明らかにした。今後、この成果を、分散協調型エネルギー管理システムのリスクの定量化に適用したい。

F6. リスク抑制型電力網制御と分散型電力網制御の融合

風力・太陽光発電が大量導入された近未来の電力網において、発電量の不確定性に起因するリスクを抑制しつつ、市場を介した効率的な電力の分配を可能とするものである。既存の電力市場のようにノミナルの電力量のみを取引するのではなく、供給変動分を吸収する「保険」契約も同時に市場で取引することで、リスク抑制と分散最適化を同時に達成した点に独自性がある。また、デマンドレスポンスの概念を取り入れ、この二つの市場に需要家も参加することで、短い時間スケールにおける供給の不確定性を吸収する役割も需要家が担える市場モデルを構築した。この市場モデルをさらに自然エネルギー供給家にも適用した。これにより、たとえば新たな風力発電所を建設する際に、既存の風力発電の出力と逆相関があるような場所を選択し、全体の不確定性を減少させるインセンティブを、市場に組み込むことができる。

F7. 閉ループ型リスク抑制型電力潮流制御

開発したリスク抑制型電力潮流制御手法は、統計的に得られた自然エネルギー発電量および電力需要量の確率分布を元に、事前に各バスにおける蓄電設備の充放電量を決めておく、閉ループ型の制御であった。これを現時刻における需給バランスを考慮してリアルタイムで決定する、閉ループ型の制御に拡張し、効率の大幅な改善を可能にした。

F8. 大規模分散制御のための適応合意形成アルゴリズム利用とネットワーク故障診断のための適応的アプローチ

供給側、需要側の空間的、時間的分散性に伴い、限られた情報で需要供給バランスを制御する必要がある。ここでは、適応合意形成アルゴリズムを開発することで、最適な分配を行うアルゴリズムを開発した。さらに、ネットワーク故障など時変システムに対応するための適応的アプローチによる手法を開発した。

3. 2 再生可能エネルギーの大量導入時に考慮すべき気象変動・変化に関する研究（東海大学 渡邊グループ）(F9)

(1) 研究実施内容及び成果

気象及び気候の変動・変化が再生可能エネルギーの大量導入時にどのような影響を与え、考慮すべき要因がどのようなものであるかを考察することを研究グループの役割として研究に取り組んだ。平成26年度のFS期間では、「Sample entropyを用いたRamp現象の予兆システムの構築」のための基礎的な研究という位置づけである。気象分野と制御分野の異分野共同体制で行った研究であり、また、これまで行われていないSample entropyを用いた日射量データの解析に関する研究テーマである。

本研究で得られた主な成果は、Sample entropy が日射量の急激な変化を表す性質を持つことが分かったことである。図1に示すように変動が激しかった日には Sample entropy の値は大きくなり、終日厚い雲に覆われた日には小さくなる。また、図2のような日射量が階段状に変化する時には、その前後で Sample entropy 値が急激に変化をしていることがわかる。Sample entropy を使用することにより太陽光発電の急激な出力変化の原因となるような日射量の変化を表すことができる可能性が示唆される。

Sample entropy は更新される時系列データを逐次効率的に計算をするアルゴリズムが開発されており(杉崎ら 2007)、Ramp 現象の検出システムの開発のための有効な手法となる可能性を得ることができた。

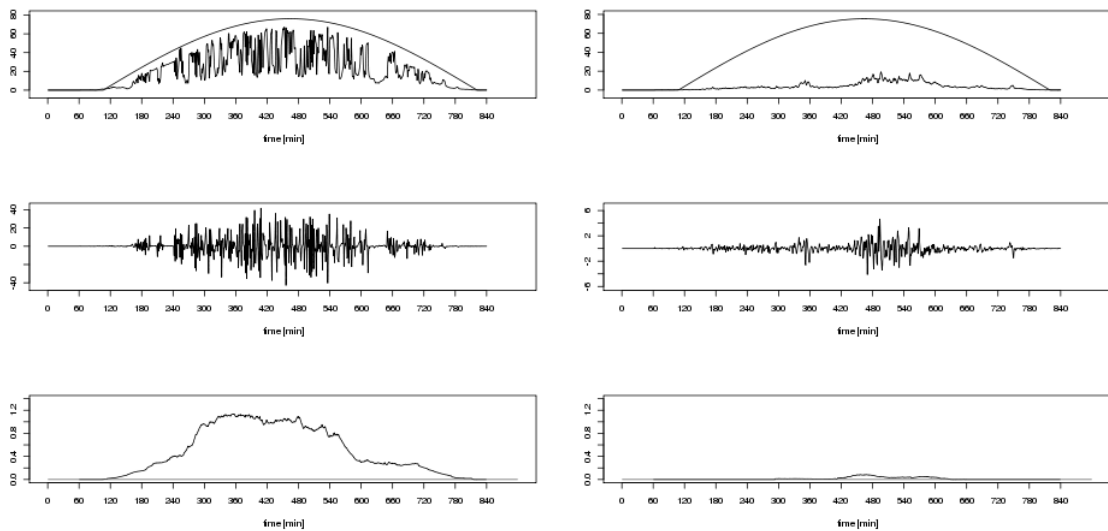


図1 (左) 2012年9月26日、石垣島での(上段)地上観測日射量と(中央)その差分系列および(下段)逐次計算された Sample entropy (右)左図と同様であるが、2012年9月29日のもの。

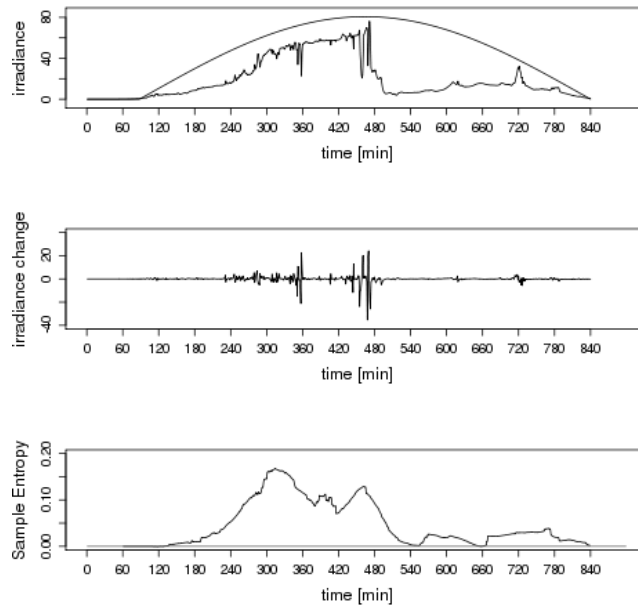


図2 図1と同様であるが、2012年8月31日のもの。

参考文献

杉崎、大森、“変動忘却係数を用いた複雑度のリアルタイム推定法” 第50回自動制御連合講演会 2007

§4 成果発表等

(1) 原著論文発表 (国内 (和文) 誌 5 件、国際 (欧文) 誌 26 件)

●国際 (欧文) 1

Shimpei Okido and Akiko Takeda, “Economic and Environmental Analysis of Photovoltaic Energy Systems via Robust Optimization”, Energy Systems, vol. 4, pp.239-266, 2013 (DOI: 10.1007/s12667-013-0077-1)

●国際 (欧文) 2

Tsuyoshi Shiota and Hiromitsu Ohmori, Design of Adaptive I-PD Control Systems Using Delta Operator Based on Partial Model Matching, 11th IFAC International Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing, ALCOSP 2013, Caen - France, 4 July 2013.

●国際 (欧文) 3

Takanobu Shida and Hiromitsu Ohmori, Adaptive Consensus Algorithms for State Variables of Leaderless Multi-Agent Systems, The 32nd Chinese Control Conference, Xi'an, China, pp.7308-7313, July, 2013.

●国際 (欧文) 4

Takahiro Takamatsu (Keio University), Hiromitsu Ohmori (Keio University), “Design of Adaptive Systems by Using Fractional Calculus System's Approach,” The 32nd Chinese Control Conference, China, on July 26-28, 2013.

●国際 (欧文) 5

Tomoki Ishikawa and Toru Namerikawa: “Short-Term Wind Power Prediction for Wind Turbine via Kalman Filter based on JIT Modeling,” SICE Annual Conference 2013, pp. 1126-1131, 2013年9月14日.

●国際 (欧文) 6

Tatsuya Mukai and Toru Namerikawa: “Optimal Battery Capacity Determination for Micro-Grid System,” SICE Annual Conference 2013, pp. 1105-1110, 2013年9月14日.

●国際 (欧文) 7

Takanobu Shida and Hiromitsu Ohmori, Optimal Power Dispatch for Minimization of Global Cost using Distributed Coordination Algorithm, The SICE Annual Conference 2013, Nagoya University, Nagoya, Japan, September 16, 2013.

●国際 (欧文) 8

Takafumi Okubo and Hiromitsu Ohmori, Energy Saving by Extremum-Seeking Control Using an Actuator with Adjustable Stiffness (AwAS), The SICE Annual Conference 2013, Nagoya University, Nagoya, Japan, September 17, 2013.

●国際 (欧文) 9

Naoki Ito, Akiko Takeda and Toru Namerikawa, “Convex Hull Pricing for Demand Response in Electricity Markets”, IEEE SmartGridComm 2013 Symposium, October 2013. (DOI: 10.1109/SmartGridComm.2013.6687949) 2013年10月21日.

●国際 (欧文) 10

Anna Ogawa, Akiko Takeda and Toru Namerikawa, “Photovoltaic Output Prediction Using

Auto-regression with Support Vector Machine” , NIPS 2013 workshop on Machine Learning for Sustainability, 2013, December 5-8, 2013.

●国際 (欧文) 1 1

Takanobu Shida and Hiromitsu Ohmori, Consensus algorithm with steady-state optimization for continuous-time multi-agent systems, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 7, No. 2, 2014年3月31日.

●国際 (欧文) 1 2

Jun-ya Goto, Akiko Takeda and Rei Yamamoto, “Interactions between Financial Risk Measures and Machine Learning Methods” , Computational Management Science, 11 (4), pp.365-402, 2014. (DOI:10.1007/s10287-013-0175-5,)

●国際 (欧文) 1 3

Akiko Takeda, Shuhei Fujiwara, Takafumi Kanamori, “Extended Robust Support Vector Machine Based on Financial Risk Minimization”, Neural Computation, 26 (11), pp.2541-2569 (2014).

●国際 (欧文) 1 4

Yawwani Gunawardana, Shuhei Fujiwara, Akiko Takeda, Christopher Woelk, Mahesan Niranjan, “Outlier-Detecting Support Vector Regression for Modelling at the Transcriptome-Proteome Interface”, Eighth International Workshop on Machine Learning in Systems Biology, (MLSB 2014), 2014.

●国際 (欧文) 1 5

Yutaro Yamaguchi, Anna Ogawa, Akiko Takeda, Satoru Iwata, “Cyber Security Analysis of Power Networks by Hypergraph Cut Algorithms”, IEEE SmartGridComm 2014 Symposium, 2014.

●国際 (欧文) 1 6

Ryusuke Konishi (Keio Univ.), Masaki Takahashi(Keio Univ.), Optimal Allocation of Photovoltaic Systems and Energy Storages in Power Systems Considering Power Shortage and Surplus, 2014 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ2014), (2014-0611-0613), (2014-0612 presentation), Rakvere, Estonia, pp. 1-6.

●国際 (欧文) 1 7

Takahiro Takamatsu(Keio University), Hiromitsu Ohmori(Keio University), “Design of Kreisselmeier Adaptive Observer using Projection Algorithm for Continuous-time Linear Fractional Order Systems,” The 5th International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes (ADCONIP 2014), Japan, on May 28-30, 2014.

●国際 (欧文) 1 8

Takahiro Takamatsu (Keio University), Hiromitsu Ohmori (Keio University), “Design of Model Reference Adaptive Control Systems with Fractional Order Adaptive Law and its Lyapunov Stability,” The 33rd Chinese Control Conference, Nanjing, China, on July 28-30, 2014.

●国際 (欧文) 1 9

Hitoshi Iyama and Toru Namerikawa : “Fuel Consumption Optimization for a Power-Split HEV via Gain-Scheduled Model Predictive Control,” Proc. of SICE Annual Conference 2014, pp.468-473, 2014.

●国際 (欧文) 2 0

Takahiro Takamatsu(Keio University), Koushirou Kubo(Keio University), Hiromitsu Ohmori(Keio University), “Design of Fractional Order Sliding Mode Controller via Non-integer Order Backstepping,” SICE Annual Conference 2014(SICE2014), September 9 – 12, 2014, Hokkaido University, Sapporo, Japan.

●国際 (欧文) 2 1

Takahiro Takamatsu(Keio University), Koushirou Kubo(Keio University), Hiromitsu Ohmori(Keio University), “Design of Fractional Order Sliding Mode Controller via Non-integer Order Backstepping by Fractional Order Derivative of Lyapunov Function” , 2014 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS2014), Tokai University, Kumamoto Campus, Japan, August 10-12, 2014.

●国際 (欧文) 2 2

T. Shiota, H. Ohmori (Keio Univ.), “Iterative PID Controller Design Method Based on System Identification” , SICE Annual Conference 2014, Sapporo, Japan, Sep. 9-12, 2014.

●国際 (欧文) 2 3

Takahiro Takamatsu(Keio University), Hiromitsu Ohmori (Keio University), “State-Feedback Control System using Adaptive Observer for Continuous-time Linear Fractional Calculus System,” SICE Annual Conference 2013(SICE2013), Japan, on September 14 – 17, 2013.

●国際 (欧文) 2 4

T. Shiota, H. Ohmori (Keio Univ.), “Design of Adaptive I-PD Control System for 2-DOF Flexible Link Robot” , The 5th International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes, Hiroshima, Japan, May 28-30, 2014.

●国際 (欧文) 2 5

T. Shiota, H. Ohmori (Keio Univ.), “Adaptive I-PD controller Design using Variable Reference Model” , The 2nd International Conference on Intelligent Systems and Image Processing, Kitakyushu, Japan, Sep. 26-29, 2014.

●国際 (欧文) 2 6

Yutaro Yamaguchi, Anna Ogawa, Akiko Takeda, Satoru Iwata, “Cyber Security Analysis of Power Networks by Hypergraph Cut Algorithms”, accepted by the IEEE Transactions on Smart Grid (29th December, 2014).

●国内 (和文) 1

末廣, 増井, 滑川: “重複情報を用いた電力ネットワークの分散階層制御”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 49, No. 12, pp. 1121-1130, 2013.

●国内 (和文) 2

大川, 祓川, 滑川: “電力潮流を考慮した分散的な動的電力価格決定” 計測自動制御学会論文集, Vol. 50, No. 3, pp. 245-252, 2014.

●国内 (和文) 3

高松尚宏, 大森浩充, “分数階微積分を用いた適応調整則を有するモデル規範型適応制御系の設計とそのリアプノフ安定性”, 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌) Vol. 134 No. 9, pp. 1228-1234, 2014.

●国内 (和文) 4

志田宇信, 大森浩充, 全体コスト最小化のための分散強調アルゴリズムによる最適電力配分, 計測自動制御学会論文集, Vol. 50, No. 9, pp. 677-683, 2014.

●国内 (和文) 5

石川友規, 小嶋昂明, 滑川徹: “JIT モデリングに基づくカルマンフィルタによる短期風力発電量予測,” 電気学会論文誌 C, Vol. 135, No. 1, 2015 (掲載決定) .

(2)その他の著作物 (総説、書籍など)

1. 詳細情報 (著者名、タイトル、掲載誌もしくは書籍 (誌名、巻、号、発表年) などを発行日順に記載して下さい。)

●その他の著作物 1

滑川徹, 日経エコロジー, テクノロジー最前線 「電力需給の予測, 実績と予報からデータ加工再エネ本格導入で必須に, 2013年2月8日.

●その他の著作物 2

滑川 徹: “制御理論アプローチによる電力需要予測と再生可能エネルギー発電予測”, シミュレーション, Vol. 32, No. 3, pp. 12-19, 2013.

●その他の著作物 3

小野雅裕: “自然エネルギー大量導入に備えた電力網のリスク管理”, シミュレーション, Vol. 32, No. 3, pp. 20-28, 2013.

●その他の著作物 4

武田朗子, ロバスト最適化法とその動向, 電気学会 C 部門 (電子・情報・システム部門) 論文誌特集号「デペンダブルなサービスシステムに貢献する情報・システム技術」, 134 (6), pp. 760-764 (2014).

(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 4 件、国際会議 1 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)

●招待講演 1

滑川徹, 自然エネルギー大量投入のための分散ロバスト最適制御 (JST CREST 大森チームの研究内容紹介の招待講演), UF NCR セミナー, フロリダ大学, 30 名, 2013 年 3 月 18 日.

●招待講演 2

武田朗子, “分野横断型融合研究のすすめ”, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 関西支部シンポジウム, 大阪大学 (大阪市), 2013 年 11 月 16 日.

●招待講演 3

大森浩充, “極値探査法の理論と応用”, 電気学会 電子・情報・システム部門 (C 部門) 制御研究会, 特別講演, 首都大学東京秋葉原サテライトキャンパス, 秋葉原ダイビル 12 階 1202 室 (会議室 C), 2013 年 12 月 2 日 (火) 16:10~17:10.

●招待講演 4

滑川 徹, 「リチウムイオン電池・ハイブリッド電気自動車・大規模システムにおける最適制御・最適運用の技術と応用」, 日本テクノセンター, 2014 年 5 月 14 日.

●招待講演 5

Toru Namerikawa, “Real-Time Pricing and Stabilization in Power Grids”, The University

of British Columbia, 2014年8月11日.

② 口頭発表 (国内会議34件、国際会議3件)

●口頭発表 1

塩田強, 大森浩充, “部分的モデルマッチングによる適応 I-PD 制御系の設計,” 第55回自動制御連合講演会, 講演論文集 CD-ROM, 京都大学, 2012.11.

●口頭発表 2

塩田強, 大森浩充, “差分演算子を用いた適応 I-PD 制御系の設計,” 平成25年電気学会全国大会, 講演論文集 CD-ROM, 名古屋大学, 2013.03.

●口頭発表 3

大久保貴史, 大森浩充, 可変弾性アクチュエータを用いた極値制御による省エネルギー実現, 平成25年電気学会全国大会, 名古屋大学, 2013.03.20.

●口頭発表 4

塩田強, 大森浩充, “デルタオペレータ表現に基づく適応 I-PD 制御系の設計,” 第13回適応学習制御シンポジウム, 講演論文集 CD-ROM, アクロス福岡, 2013.03.

●口頭発表 5

志田宇信, 大森浩充, “マルチエージェントシステムに基づく電力配分アルゴリズム,” 第13回制御部門大会, アクロス福岡, 2013.03.

●口頭発表 6

高松尚宏, 大森浩充, “連続時間線形分数階システムに対する Kreisselmeier 型適応観測器を用いた制御系設計法,” 第13回制御部門大会, アクロス福岡, 2013年3月5日~8日.

●口頭発表 7

向井 達哉, 滑川 徹, “充放電特性を考慮したマイクログリッドにおけるリチウムイオンバッテリーの最適容量決定・運用法の検討”, 第13回計測自動制御学会制御部門大会, 福岡, 2013年3月6日.

●口頭発表 8

石川 友規, 滑川 徹, “JIT モデリングに基づくカルマンフィルタによる短期風力発電量予測”, 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.

●口頭発表 9

塩田強, 大森浩充 (慶應義塾大学), 「2 自由度柔軟リンクロボットアームの適応 PID 制御」, 制御研究会, 広島大学東京オフィス, 2013年7月24日.

●口頭発表 10

塩田強, 大森浩充 (慶應義塾大学), 「可変規範モデルを用いた適応 I-PD 制御系の設計」, 第27回産業応用部門大会, 山口大学吉田キャンパス, 2013年8月28-30日.

●口頭発表 11

石川 友規, 滑川 徹, “風速モデルの検討とカルマンフィルタに基づく短期風力発電量予測”, 第55回自動制御連合講演会, 京都, 2012年11月17日.

●口頭発表 12

細田 康彦, 滑川 徹, “スイッチングカルマンフィルタとクラスタリングによる短期太陽光発

電子測”，第55回自動制御連合講演会，京都，2012年11月17日。

●口頭発表 13

武田朗子，住宅用太陽光発電システム導入に対するロバスト最適化の適用，第55回自動制御連合講演会，京都大学，2012年11月17日。

●口頭発表 14

武田朗子，分野横断型融合研究のすすめ，OR学会シンポジウム，政策研究大学院大学，2013年3月4日。

●口頭発表 15

武田朗子，ロバスト最適化法による太陽光発電システムのサイズ決定，「電力システムと最適化」ワークショップ，東京大学，2013年3月28日。

●口頭発表 16

石川 友規，滑川 徹

“誤差共分散の減少性を考慮したカルマンフィルタによる短期風力発電量予測，”第56回自動制御連合講演会，新潟大学，2013年11月16日～17日，pp.941-946.

●口頭発表 17

小西 隆介，高橋 正樹，“基幹系統故障時の供給不足と余剰電力を考慮した太陽光発電と電力貯蔵装置の最適配置，”第56回自動制御連合講演会，新潟大学，2013年11月16日～17日，pp.963-968.

●口頭発表 18

Ryusuke Konishi, Masaki Takahashi, Optimal Allocation of Photovoltaic Systems and Energy Storages in Power Systems Considering Power Shortage and Surplus, 2014 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ2014), Rakvere, Estonia, 2014年6月11日～13日。

●口頭発表 19

Naoki Ito, Akiko Takeda, Toru Namerikawa, “Convex Hull Pricing for Demand Response in Electricity Markets”, IEEE SmartGridComm 2013 Symposium, カナダ バンクーバー, 2013年10月22日。

●口頭発表 20

高村 俊，滑川 徹，“状態推定に基づく重複情報を用いた電力システムの分散階層周波数制御”第58回システム制御情報学会研究発表講演会，京都テルサ，2014年5月21日～23日。

●口頭発表 21

森 翔平，滑川 徹“パラメータ変動を考慮したH ∞ オブザーバを用いたバッテリー充電率推定”第58回システム制御情報学会研究発表講演会，京都テルサ，2014年5月21日～23日。

●口頭発表 22

高松 尚宏(慶應義塾大学)，久保 皓志郎(慶應義塾大学)，大森 浩充(慶應義塾大学)，「分数階積分系に対するバックステッピング法を用いたスライディングモード制御器の設計」制御産業計測制御 合同研究会，広島大学 東京オフィス，2014年7月9日。

●口頭発表 23

Yutaro Yamaguchi, Anna Ogawa, Akiko Takeda, Satoru Iwata, Cyber Cyber Security Analysis of Power Networks by Hypergraph Cut Algorithms, IEEE SmartGridComm 2014 Symposium, Hilton

Molino Stucky (Venice, Italy), 2014 年 1 月 4 日.

●口頭発表 24

渡邊武志 (東海大学), 高松尚宏, 志田宇信, 大森浩充 (慶應義塾大学), 中島孝 (東海大学), 再生可能エネルギーの大量導入時に考慮すべき気象変動, 第 57 回自動制御連合講演会, 群馬伊香保 ホテル天坊, 2014 年 11 月 10 日.

●口頭発表 25

高松尚宏, 大森浩充 (慶應義塾大学), 分数階システムを対象とした適応観測器によるリチウムイオン電池の状態推定, 第 57 回自動制御連合講演会, 群馬伊香保 ホテル天坊, 2014 年 11 月 10 日.

●口頭発表 26

森静奈, 矢向高弘 (慶應義塾大学), OMNeT++を用いた EMS シミュレータの構築と性能評価, 第 57 回自動制御連合講演会, 群馬伊香保 ホテル天坊, 2014 年 11 月 10 日.

●口頭発表 27

小野功, 益富和之, 西野宏亮, 石井秀明, 西垣貴央 (東京工業大学), 三浦輝久, 小野田崇 (電力中央研究所), 電力系統ネットワークと制御通信ネットワークの連成シミュレーションフレームワークの構築, 第 57 回自動制御連合講演会, 群馬伊香保 ホテル天坊, 2014 年 11 月 10 日.

●口頭発表 28

佐藤隆太郎, 滑川徹 (慶應義塾大学), 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安定化, 第 57 回自動制御連合講演会, 群馬伊香保 ホテル天坊, 2014 年 11 月 10 日.

●口頭発表 29

大川佳寛, 滑川徹 (慶應義塾大学), 電力市場参加者の行動不確かさを考慮した H_∞ 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, 群馬伊香保 ホテル天坊, 2014 年 11 月 10 日.

●口頭発表 30

猪狩俊介, 滑川徹 (慶應義塾大学), 太陽光発電出力の不確かさを考慮した 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, 群馬伊香保 ホテル天坊, 2014 年 11 月 10 日.

●口頭発表 31

王維, 大森浩充 (慶應義塾大学), 二地域電力システムの分散ロバスト制御, 第 57 回自動制御連合講演会, 群馬伊香保 ホテル天坊, 2014 年 11 月 10 日.

●口頭発表 32

松永龍弥, 武田朗子 (東京大学), 再生可能エネルギー大量導入のための設備投資計画問題, 第 57 回自動制御連合講演会, 群馬伊香保 ホテル天坊, 2014 年 11 月 10 日.

●口頭発表 33

小西隆介, 高橋正樹 (慶應義塾大学), 系統故障時の供給不足と余剰電力を考慮した最適運用と最適設備配置, 第 57 回自動制御連合講演会, 群馬伊香保 ホテル天坊, 2014 年 11 月 10 日.

●口頭発表 34

塩田強, 大森浩充 (慶應義塾大学), 「可変規範モデルを用いた適応 I-PD 制御系の一設計」, 第 57 回自動制御連合講演会, 群馬伊香保ホテル天坊, 2014 年 11 月 11 日.

●口頭発表 35

渡邊武志(東海大学), 高松尚宏, 志田宇信, 大森浩充, 中島孝, 日射量の急激な変動の特徴, 日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会, 2014年11月13日.

●口頭発表 36

入田隆, 滑川徹 “カルマンフィルタを用いた複数のサイバー攻撃における電力網の分散故障診断” SICE システム・情報部門 学術講演会, 岡山大学, 2014年11月21日~23日.

●口頭発表 37

小川安奈, 武田朗子, 渡邊武志, 中島孝, “Lasso を用いた特徴量選択による日射量予測モデルの構築”, 平成27年電気学会全国大会, 東京都市大学, 2015年3月24日.

③ポスター発表 (国内会議1件、国際会議1件)

●ポスター発表 1

Anna Ogawa, Akiko Takeda and Toru Namerikawa, “Photovoltaic Output Prediction Using Auto-regression with Support Vector Machine”, NIPS 2013 workshop on Machine Learning for Sustainability, Nevada (USA), 2013年12月10日.

●ポスター発表 2

渡邊武志(東海大学), 高松尚宏, 志田宇信, 大森浩充, and 中島孝, 2014: サンプルエントロピーを用いた日射量の変動の評価. 日本気象学会秋季大会, 福岡市, 2014/10/23.

(4)知財出願

①国内出願 (0件)

②海外出願 (0件)

③その他の知的財産権(0件)

(5)受賞・報道等

なし

(6)成果展開事例

①実用化に向けての展開

・FSにより得られた成果を, 第52回自動制御連合講演会でオーガナイズドセッションとして発表し, 観客約50名(目視によるカウント)を集めた.

・本研究成果をインターネット (<http://ohmori-control.jp/index.html>) で公開し, 一般に情報提供している.

§ 7 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
2012年 10月25日	チーム内ミーティング(2) (非公開)	慶應義塾大学矢上 (14-213)	12名	研究参加者紹介, 領域 会議報告, 研究方針確認
2012年 11月29日	チーム内ミーティング(3) (非公開)	慶應義塾大学矢上 (14-217)	12名	進捗状況報告 (滑川)
2012年 12月27日	チーム内ミーティング(4) (非公開)	慶應義塾大学矢上 (14-219)	12名	進捗状況報告 (小野)
2013年 1月28日	チーム内ミーティング(5) (非公開)	慶應義塾大学矢上 (14-217)	12名	進捗状況報告 (武田), 次年度研究計画
2013年 3月11日	チーム内ミーティング(6) (非公開)	慶應義塾大学矢上 (14-217)	12名	進捗状況報告 (高橋, 大森), 領域会議打ち合わせ
2013年 4月15日	第1回チーム内ミーティング (非公開)	慶應義塾大学矢上 DR2(14-212)	21名	メンバー紹介, 事務連 絡, 今後のスケジュール, 役割分担
2013年 5月13日	第2回チーム内ミーティング (非公開)	慶應義塾大学矢上 DR9 (14-219)	18名	研究方向性と研究連携 など方針確認 (大森)
2013年 6月10日	第3回チーム内ミーティング (非公開)	慶應義塾大学矢上 DR7 (14-217)	22名	宗谷岬ウインドファーム 見学会 (高松), 進捗 状況報告
2013年 7月29日	第4回チーム内ミーティング (非公開)	慶應義塾大学矢上 14-517 JSTCREST(大森チー ム)実験室	18名	余, 小川, 伊藤の研究 報告 進捗状況報告
2013年 9月2日	第5回チーム内ミーティング (非公開)	慶應義塾大学矢上 DR7 (14-217)	16名	藤原, 小野の研究報告, FS 調整会議報告
2013年 10月3日	藤田統括によるサイト ビジット	慶應義塾大学矢上 14-517 JSTCREST(大森チー ム)実験室	14名	サイトビジット 実験デモ
2013年 10月7日	第6回チーム内ミーティング (非公開)	慶應義塾大学矢上 14-517 JSTCREST(大森チー ム)実験室	17名	志田, 高松, 研究報告, 進捗状況報告
2013年 11月18日	第7回チーム内ミーティング (非公開)	慶應義塾大学矢上 14-517 JSTCREST(大森チー ム)実験室	18名	大川君研究報告, 進捗 状況報告
2013年 11月28日	教員集会 (非公開)	慶應義塾大学矢上 14-517 JSTCREST(大森チー ム)実験室	5名	今後のFS 戦略
2013年 12月16日	第8回チーム内ミーティング (非公開)	慶應義塾大学矢上 14-517	16名	武田先生 (鈴木秀幸チ ーム (東大): 山口氏ご

		JSTCREST(大森チーム)実験室		発表), 小西報告, 進捗状況報告
2014年 1月20日	第9回チーム内ミーティング (非公開)	慶應義塾大学矢上 14-517 JSTCREST(大森チーム)実験室	17名	ハワイ合同ワークショップ報告, 東チームとの連携打ち合わせ報告, 高松 (poponas による共通基盤シミュレータ)
2014年 2月17日	第10回チーム内ミーティング (非公開)	慶應義塾大学矢上 DR9(14-219)	11名	研究総括, 進捗状況報告, 新メンバー紹介
2014年 3月17日	第11回チーム内ミーティング	慶應義塾大学矢上 DR7(14-217)	22名	Robustness of Synchronization in Heterogeneous Multi-Agent Systems (Hyungbo Shim 氏講演)
2014年 4月19日	第1回チーム内ミーティング (非公開)	慶應義塾大学矢上 14-517 JSTCREST(大森チーム)実験室	20名	メンバー紹介, 事務連絡, 今後のスケジュール, 役割分担, FS
2014年 5月26日	第2回チーム内ミーティング (非公開)	慶應義塾大学矢上 14-517 JSTCREST(大森チーム)実験室	21名	事務連絡, 今後のスケジュール, 役割分担, 第2フェーズFS
2014年 6月21日	第3回チーム内ミーティング (非公開)	慶應義塾大学矢上 14-517 JSTCREST(大森チーム)実験室	26名	キックオフ会議の検討
2014年 6月29日	FS 第2フェーズキックオフ会議	慶應義塾大学矢上 DR7(14-217)	19名	FS 第2フェーズキックオフ会議
2014年 7月14日	第4回チーム内ミーティング (非公開)	慶應義塾大学矢上 14-517 JSTCREST(大森チーム)実験室	17名	最強チームの内容と予算案の検討, 企業からの意見徴収 (明電舎)
2014年 8月21日	第5回チーム内ミーティング (非公開)	慶應義塾大学矢上 DR7(14-217)	22名	最終報告会のための打ち合わせ
2014年 9月1日	FS 第2フェーズ 最終報告会	慶應義塾大学矢上 DR7(14-217)	22名	FS 第2フェーズ 最終報告会
2014年 9月29日	第6回チーム内ミーティング (非公開)	慶應義塾大学矢上 DR7(14-217)	16名	領域会議ための打ち合わせ
2014年 10月27日	第7回チーム内ミーティング (非公開)	創想館(14棟)地下2階 マルチメディアルーム	19名	自動制御連合講演会の発表内容のデモンストレーション
2014年 11月10日	第57回自動制御連合講演会	群馬県伊香保温泉旅館「ホテル天坊」	約50名 未確認	第57回自動制御連合講演会におけるOS開催
2014年 12月22日	第8回チーム内ミーティング (非公開)	慶應義塾大学矢上 DR7(14-217)	19名	予算執行上の注意, 研究最終報告書内容と評価会(12/21).

2015年 1月26日	第9回チーム内ミーティング（非公開）	慶應義塾大学矢上 DR7(14-217)	16名	林チームとの協議 (12/26)報告. 編成会議(1/25)報 告. 14-517 実験室の明 け渡しについて. 成果 報告 HP 準備. 予算執行
2015年 3月16日	第10回チーム内ミーティング（非公開）	慶應義塾大学矢上 DR7(14-217)	12名	14-517 実験室の物品移 動と明け渡しについて

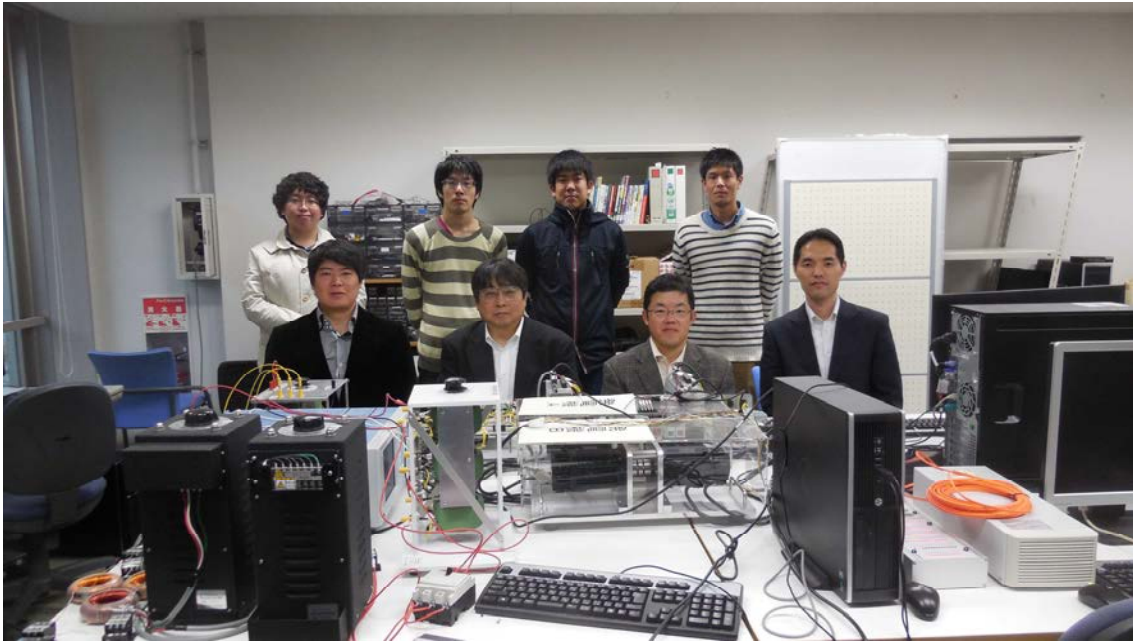
§8 最後に

なぜ約 75%の自然エネルギー導入が必要か。2007 年に Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)によって発表された報告書によると、大気中の CO₂濃度を 445 から 490ppm で安定させ気温上昇を 2 度から 2.4℃ 度以内に収めるには、温室効果ガスの排出を 2000 年と比べて 50%から 80%の削減する必要があるとされている。一方で、アメリカ合衆国 Energy Information Administration (EIA)が 2011 年にまとめた報告書によると、2035 年における世界のエネルギー需要は 2000 年の 1.9 倍になると予想されている。これらの数字を仮定すれば、現在温室効果ガスを排出するエネルギー源の最低でも約 75%を 2035 年までに自然エネルギーに置き換えねばならない計算になる。これが我々の設定する数値目標の根拠である。

本研究を貫く基本的なコンセプトは、確率モデルに基づく電力網の制御、計画、そして運用を行うことである。たとえ太陽光・風力発電所が地理的に分散していても、非常に低いがゼロではない確率で、任意の長さの期間、太陽光・風力からの電力供給がほぼ途絶える可能性がある。つまり、「最悪ケース」というものを定義することは不可能である。既存の制約条件付きロバスト制御手法は「最悪ケース」におけるロバスト性を保証することが主流であるが、そのような手法は適用できない。そもそも根本的な問題は、「最悪ケース」の定義が不可能な確率的不確定性が存在するため、際限なく設備投資を行い、蓄電設備を増強しても、電力不足に陥るなどのリスクをゼロにすることが不可能なことである。これが自然エネルギーの大量導入のボトルネックの一つである。このボトルネックを解消するためには、「最悪ケース」に基づく既存のロバスト制御ではなく、確率モデルに基づいたアプローチを取る必要があることを本研究で主張してきた。2.5 年間の研究では、この確率的なアプローチにより、危険率零でないが、セーフティネットを張った上で、最適化を図ることが可能であることが示せた。

もう一つの問題が数の問題である。高度に分散・多様化した大量の自然エネルギー発電システムへのスケーラビリティの問題である。これらの研究には、標準的な手法が未だ確立されていない。提案した技術は、これらのボトルネックを解消し、実現可能な自然エネルギーの導入比率を飛躍的に引き上げることを可能とする。

アメリカのオバマ大統領が 2009 年に行った演説で述べたように、世界各国は現在、21 世紀のエネルギー技術の主導権をめぐって激しい競争を繰り広げている。1960 年代の宇宙開発競争において、低軌道への有人飛行でソ連に後れを取ったアメリカは、月着陸というさらに遠大な目標を掲げ巻き返して成功した。同様に、自然エネルギー導入比率が 1%にすぎず欧米諸国に比べて大きな遅れを取っている日本がこの競争に勝利するためには、欧米よりもさらに高い目標を掲げ、既存の電力網の仕組みを根底から覆す技術を開発する必要があるのではないか。



一部のメンバーの集合写真(手前に有るのが実験装置) @14-517



一部のメンバーの集合写真(発表会の後)