

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「太陽光発電の予測不確実性を許容する
超大規模電力最適配分制御」

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：井村 順一
（東京工業大学
大学院情報理工学研究科、教授）

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

本研究は、太陽光発電が大量導入された超大規模電力システムにおいて、太陽光発電を最小限の調整力・予備力で効率よく最大限利用するために、不確かさを有する太陽光発電予測と需要予測のもとであっても、系統側の調整用電源、および、大規模に分散設置された需要家側の蓄電池と太陽光発電システムをリアルタイムに最適運用するエネルギー管理システムの構築を目指し、予測値と配分値の時空間分解能に着目した電力最適配分制御系の基礎理論を構築することを目的とした。そのため、電力最適配分制御理論を主に研究する井村グループ、太陽光発電予測技術・評価を主に研究する大関グループ、需要家側の電力シミュレーションによる電力配分評価を行う植田グループ、系統側の需給シミュレーション評価を行う益田グループの4つの研究グループからなるチームを編成した。その結果、理論面と実システム面の両面から有機的に連携し、次に示すように需給バランスのための基本的な枠組みを提案し、それを解決するための要素技術・理論を開発した。

研究1. 需要家側制御を含む電力最適配分制御の基本的な枠組み

研究2. 太陽光発電の短時間予測技術の開発と予測評価

研究3. 需要家側制御とその評価

研究4. 太陽光発電予測を用いた系統側制御とその評価

以下に、それぞれについて概要を述べる。まず、研究1では、全グループによる議論を通じて、大量導入された太陽光発電のもとで、系統側の調整用電源に加えて、需要家側の蓄電池による需給バランス計画および運用における全体の枠組みの提案を行った。また、その中で、前日計画の一つとして、系統大の太陽光発電予測をもとに系統側と需要家側の電力負荷配分を決める環境的経済的負荷配分制御 (Environmental Economic Dispatch Control, 略して EEDC)、エリアレベルの太陽光発電予測をもとに需要家側の電力負荷配分を各 DR アグリゲータに前日に要求する調和型配分計画 (Harmonized Dispatch Plan, 略して HDP)、そして、当日運用である調和型需要家制御 (Harmonized Demand-side Control, 略して HDC) という、新たな調整機能を提案した。

研究2では、研究1の枠組みを前提にして、大関グループが、今後の運用において必須となる気象庁局地モデル (Local Forecast Model, 略して LFM) による太陽光短時間予測技術の開発に加えて、太陽光発電の空間集約化による予測誤差への影響を見積もるために、系統大の太陽光発電予測と、各ポイントでの太陽光発電予測で生じる予測誤差を比較・評価した。また、次世代予測技術の重要な手法として、予測誤差に関する情報を付加した、予測信頼度付きの区間予測技術の開発を行った。

研究3では、まず、井村グループが、研究2で開発した区間予測を用いた EEDC を解くための基礎理論を、区間解析を活用して構築した。つぎに、井村グループと植田グループで、EEDC で得られた需要家側負荷配分を各アグリゲータに配分・要求する機能である HDP を実現するために、低時間分解能型の要求手法の基礎理論の構築を行った。また、HDP で得られた前日計画をもとに、各アグリゲータが末端需要家の蓄電池を調和的に制御するための HDC アルゴリズム、および、その運用評価を行った。

最後に、研究4として、益田グループと大関グループが連携して、大関グループによる太陽光発電予測の誤差評価をもとに予測誤差モデルの開発を行うとともに、系統側の従来電源による調整における予測誤差による経済的評価等を行った。また、EEDC で得られた系統側の区間値型の電力負荷配分を用いることで、予測誤差を考慮したユニットコミットメントの手法を提案した。さらに、井村グループがポスト EDC として、予測が外れた際の予測修正型 EDC の基礎理論を開発した。

(2) 顕著な成果

< 優れた基礎研究としての成果 >

1. 太陽光(PV)発電予測の不確実さを許容した電力負荷配分制御のための基礎理論の構築

概要: 太陽光発電予測の不確実さを許容した分解能階層型電力配分制御の枠組みを構築し、需要家側への電力負荷配分計画に関する基礎理論を構築し、その成果を国際論文誌 IEEE Trans. on Smart Gridなどに掲載した(原著論文 A32, A2, A19, A21)。また、その基盤となる予測制御と分散制御に関する理論の成果を制御分野最高峰の論文誌 IEEE Trans. on Automatic Control (2015 年 2 編 regular paper で掲載予定)などに掲載し、国際的に高い評価を得た(原著論文 A27, A30, A26)。計測自動制御学会論文賞の中で 1 件だけに選ばれる武田賞を原著論文 A3 で受賞した。

2. 太陽光発電予測を利用した電力系統および需要家運用評価

概要: 太陽光発電予測を利用して電力系統運用を行う場合の需給バランスを評価し、予測誤差が電力余剰や停電に与える影響を定量的に明らかにした。発電機特性を詳細に考慮し実データを用いた大規模系統モデルにおける評価は我が国でも初めての試みであり、電気学会論文誌に掲載された(原著論文 A1)。また、電力系統分野で最高峰の国際会議である PSCC2014 で発表した(原著論文 A18)。さらに、需要家間における蓄電池 SOC や受電点潮流の多様性を用いた調和的な蓄電池充放電アルゴリズムを開発し、2007 年の 541 軒分の住宅負荷と太陽光発電量の実測値を用いた年間シミュレーションによりその効果を検証した。この成果は国際論文誌に投稿中である。

3. 階層分散型負荷周波数制御のための基礎理論の構築

概要: 広域連携を可能とする次々世代の負荷分散周波数制御のための基礎理論を構築した。そのため、分散設計を可能とする階層型分散制御の基礎的な枠組みを提案した。本成果は原著論文 A22, A25 で発表した。また、分散制御の基本となる階層型オブザーバ設計理論を提案した原著論文 A12 は European Control Conference 2014 で Student Paper Award の Finalist に選出されるなど国際的に高い評価を得た。

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

1. 太陽光発電予測の不確実性評価

概要: 太陽光(PV)発電の短時間予測技術について、数値予報モデルを利用した技術を開発した。気象庁の現業数値予報モデルの一つであるメソモデル Meso scale model(MSM)-Grid point value(GPV)を入力にした、機械学習 Support vector regression(略して SVR)の短時間予測応用を初めて示した。これまでは短時間予測技術に関して、時系列モデルもしくは衛星観測データがメインであったが、数値予報モデルをベースにしたモデルにより 1 時間先予測において、年間 RMSE (二乗平均誤差)にて約 $60\text{W}/\text{m}^2$ を達成した。また、気象庁の新しい数値予報モデル Local forecast model(LFM)を国内において初めて用いて日射予測誤差を詳細評価し、機械学習と組み合わせた手法についても MSM(GPV)以上の予測誤差低減の可能性を示した。本成果は Progress in Photovoltaics: Research and Applications (IF 9.696, 2014) に掲載など国内外で高い評価を得た(原著論文 A5, A10, A17, A23, A29, 国際会議発表 E4, E5, E8, E21)。また、Conference Best Paper Award of International Conference on Electrical Engineering 2014 も受賞した。

§ 2. 研究構想(および構想計画に対する達成状況)

(1) 当初の研究構想

研究開始時に、大量導入した太陽光発電のもとでの需給バランスのための最適配分制御のためには、太陽光発電予測の予測誤差を考慮した時空間分解能に着目した新しい基盤理論が必要であることを提案した。そのためには、これまで独立に研究してきた制御理論分野、電力分野、気象予測分野の研究者が一同に会した研究チームが必要であり、さらに、その有機的な連携を構築することが研究を進める上での大きな課題であった。2年強の短い研究期間であったため、研究期間を3つのフェーズに大きく分けて、各フェーズでの課題を具体的に絞り、研究・開発してきた。第1フェーズでは、需要家制御も含めた需給バランスのための新しい枠組みについて議論し、連携のための基盤を構築した。第2フェーズは予測、供給側制御、需要家制御など各担当での研究を、第1フェーズで作成した枠組みの中での連携性を確認しつつ、個別に進め、第3フェーズでは個別に開発してきた予測制御技術を統合し、性能評価する連携研究を行ってきた。とりわけ、単なるデータの受け渡しによる連携にとどまらず、予測や各種制御手法における需給制御全体の中での役割や合理性を軸に据えた技術開発及び理論構築を行ってきた点に特徴がある。

(2) 新たに追加・修正など変更した研究構想(FSでの取り組みによる成果、FS以外の成果等)

開始当初の研究計画による研究と並行して、研究開始1年後よりFS（ヒュージビリティ・スタディ）として、第1フェーズ（2013.10.1-2014.3.31）と第2フェーズ（2014.5.17-2015.1.31）において他のCRESTチームとの融合・連携研究に関する基礎検討を精力的に行ってきた。詳細は下記のとおりである。

FS第1フェーズ

1. 太陽光発電予測に基づく調和型需給バランス制御の実現に向けた基礎研究

（代表：井村順一、2013年10月1日-2014年3月31日）

参加チーム：井村T、中島T、太田T、鈴木(秀)T、杉原T、東T、造賀T

概要：井村CRESTチームでは、主に太陽光発電予測に基づく最適電力配分に焦点をあててきた。しかしながら、大量導入した太陽光発電のもとでの安定供給を実現するために、電力システム全体の様々なシステム統合が不可欠である。

本FSでは、次世代の電力システムの実現を目指した様々な研究分野で研究している7つのCRESTチームが参加し、太陽光発電が大量導入された際の需給バランス制御を実現するために、予測と制御の2つを軸に、前日予測・計画や当日予測・運用・事故時といった時間スケールと、系統大レベルから個々の需要家レベルまでの空間的スケールの観点から、

1. 連携のための課題抽出と基礎検討

2. PV導入量が28-53GWと102GWの場合に対して、あるべき姿とその課題抽出を行った。井村チームの個別の具体的な活動としては、以下のとおりである。

1. 大関Gは鈴木(秀)Tと連携して、基礎的な検討として、同一データを用いて数値モデル予測と非線形時系列予測の比較・評価を行い、融合技術開発の基礎研究を行った。
2. 植田Gは中島Tと連携して、衛星による日射量推定データを利用してPV発電量リアルタイム把握の可能性について検討した。
3. 井村Gは、鈴木T、太田T、造賀Tと、LFCレベルでの安定度解析やLFCと同期化力インバータの協調の可能性、そのため、ポストLFCとして、従来のLFCを特殊形として含む自然な拡張である階層分散安定化制御手法を開発した(原著論文A22, A25)。また、短時間PV予測を用いた予見補償の可能性などを検討した。
4. 井村Tは、杉原T、東Tと個別に議論し、連携のための課題抽出を行った。

2. 地域統合エネルギー管理システム構築に向けた融合研究

(代表:原 辰次、2013 年 9 月 1 日-2014 年 3 月 31 日)

グローバル制御の実現に向けて、本 CREST チームで開発してきた時空間分解能型需給バランス制御手法をもとに、グローバル制御の基本構造について、原チームと共同で議論し、グローバル制御の中核であるグローバルアダプターの機能と情報構造の特徴づけを行った。

3. EMS で使用する地球科学情報を配信するためのビッグデータ・インタフェースの作成

(代表:中島 孝、2013 年 7 月 22 日-2014 年 3 月 31 日)

中島 G が用意した衛星データ利用のための各種ツールを利用し、PV 発電量リアルタイム把握に向けて植田 G 側 web システムへの衛星データ自動データ取得機能の実装を行い、各種ツールの機能や必要仕様について中島 G にフィードバックを行った。また、大関Gは、広域エリアの予測誤差検討において、気象庁地上気象官署の数点のデータと、1km メッシュで整備された衛星推定日射を利用した場合における比較検討を行った。

FS第2フェーズ

太陽光発電予測に基づく調和型需給バランス制御の実現に向けた基礎研究2

(代表:井村順一、 2014 年 5 月 17 日-2015 年 1 月 31 日)

参加チーム:井村 G, 植田 G, 大関 G, 益田 G, 児島 G, 中島(映)G, 太田 G, 服部 G, 鈴木(秀)G, 杉原 G, 山口 G, 東 G, 造賀 G, 津村 G

概要: 本 FS では、井村 FS 第 1 フェーズのあるべき姿などの検討結果をもとに、時間スケール、時間スケールの両観点から、最強チームで目指す次世代の太陽光発電予測に基づく調和型電力システムのコアとなる研究目標を抽出し、その実現に向けた研究計画を作成、および、その実現可能性に関する連携研究等を実施した。

具体的には、まず、第 1 フェーズの結果をさらに深めて、太陽光発電 330GW 導入までを見据えた次々世代のあるべき姿を導出した。つぎに、このあるべき姿をもとに、最強チームで目指す調和型電力システムの本質として、

1. PV 予測を活用した需給バランス制御
2. 供給-中間層-需要から成る電力システム構造

の2つを抽出し、それらの視点を柱とする研究目標を掲げ、それを実現するために、5つの役割(クラスタ)の有機的な連携によるアプローチを創出し、それに基づいて各クラスタ、そして各グループごとの研究計画をそれぞれ作成した。

§ 3 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

①「井村」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
井村 順一	(独) 東京工業大学大学院情報理工学研究科	教授	H24.10～
児島 晃	(公) 首都大学東京システムデザイン研究科	教授	H24.10～
石崎 孝幸	(独) 東京工業大学大学院情報理工学研究科	助教	H24.10～
鄭 心知	(公益) 京都高度技術研究所/(独) 東京工業大学大学院情報理工学研究科	主席研究員/産学官連携研究員	H24.10～
小池雅和	(独) 東京工業大学大学院情報理工学研究科	産学官連携研究員	H24.10～
端倉弘太郎	(公) 首都大学東京システムデザイン研究科	特任助教/産学官連携研究員	H24.10～
Ayken Taylan	(独) 東京工業大学大学院情報理工学研究科	D3	H24.10～
Valeriu Tocitu	(独) 東京工業大学大学院情報理工学研究科	D3	H26.4～
定本知徳	(独) 東京工業大学大学院情報理工学研究科	D2	H25.4～H26.3
吉野 孝平	(独) 東京工業大学大学院情報理工学研究科	M2	H24.10～
藤江 一希	(公) 首都大学東京システムデザイン研究科	M2	H24.10～H25.3
梅田 勝矢	(公) 首都大学東京システムデザイン研究科	M2	H25.4～
武藤 生磨	(独) 東京工業大学大学院情報理工学研究科	M2	H24.10～
田川 芳洋	(独) 東京工業大学大学院情報理工学研究科	M2	H25.5～
小浦 弘之	(公) 首都大学東京システムデザイン研究科	M1	H26.4～
宮沢 奈津矢	(独) 東京工業大学大学院情報理工学研究科	M1	H26.5～
李 健宇	(独) 東京工業大学大学院情報理工学研究科	M1	H26.5～
具 利晟	(独) 東京工業大学大学院情報理工学研究科	M1	H26.5～
渡邊 郁弥	(独) 東京工業大学工学部	B4	H26.5～
加藤 拓郎	(独) 東京工業大学工学部	B4	H26.5～

發知 諒	(公)首都大学東京 システムデザイン学部	B4	H26.5～
------	-------------------------	----	--------

研究項目

- ・ 区間予測を用いた最適配分計画のための基礎理論の構築
- ・ 時空間分解能需給バランスのための電力最適配分制御の基盤理論の構築
- ・ 階層分散型負荷周波数制御の基礎理論の構築
- ・ 予測情報の更新を考慮した制御論・修正運用型経済負荷配分制御の基礎理論の構築
- ・ 予測型 PSS と予測型 PSS の性能評価
- ・ 大型施設の電力需要計測のための設備整備とデータ収集

②「植田」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
植田 譲	(学)東京理科大学工学部	講師	H24.10～
内田 晃介	(学)東京理科大学工学部	プロジェクト研究員	H25.9～
荒井 瑛紀	(学)東京理科大学工学部	B4	H26.5～
飯田 絢人	(学)東京理科大学工学部	B4	H26.5～
北本 大晟	(学)東京理科大学工学部	B4	H26.5～
早川 貫之	(学)東京理科大学工学部	B4	H26.5～
吉田 優介	(学)東京理科大学工学部	B4	H26.5～
鴨野 恭平	(学)東京理科大学工学部	B4	H26.5～

研究項目

- ・ 住宅地域アグリゲータを想定した蓄電池充放電手法の検討
- ・ 住宅間の多様性を利用した住宅側蓄電池を調和的に制御するアルゴリズム開発
- ・ 個別住宅の電力需給シミュレーション評価
- ・ 需給シミュレーション用住宅負荷データ作成
- ・ PV 発電量データ収集・調査

③「大関」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
大関 崇	(独)産業技術総合研究所太陽光発電工学研究センター	主任研究員	H24.10～
村田 晃伸	(独)産業技術総合研究所太陽光発電工学研究センター	グループリーダー	H24.10～
益田 泰輔	(一般) エネルギー総合	主任研究員	H24.10～H26.3

	工学研究所		H26.4より共同研究(3)へ移動
山田 芳則	気象庁気象研究所	室長	H24.10～
原 旅人	気象庁数値予報課	技術専門官	H24.10～H24.12
松林 健吾	気象庁数値予報課	技官	H25.1～
嶋田 進	(独)産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門	研究員	H26.1～
相澤 幸郎	(独)産業技術総合研究所太陽光発電工学研究センター	研究補助員	H24.11～H25.3
吉永 殷久	(独)産業技術総合研究所太陽光発電工学研究センター	研究補助員	H24.11～H25.3
Joao Fonseca	(独)産業技術総合研究所太陽光発電工学研究センター	産総研特別研究員	H25.4～H26.11
	東京大学生産技術研究所	特任研究員	H26.11～
大竹 秀明	(独)産業技術総合研究所太陽光発電工学研究センター	産総研特別研究員	H25.4～
下瀬 健一	(独)防災科学技術研究所 観測・予測研究領域	契約研究員	H25.4～H27.3 H25.12-H26.4まで異動により一時不参加

研究項目

- ・ MSM(GPV)を利用した短時間予測手法の検討
- ・ LFM モデル出力の評価
- ・ 区間予測手法の開発
- ・ PV 予測の不確実性評価
- ・ 数値モデル予測と時系列予測の融合検討&大外れ解析

④「益田」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
益田 泰輔	(一般)エネルギー総合工学研究所	主任研究員	H26.4～H27.3

研究項目

- ・ PV 予測を利用した電力系統需給運用シミュレーションモデルの開発
- ・ PV 予測を利用した需給運用における停電・電力余剰の評価
- ・ PV 区間予測を利用した需給運用における停電・電力余剰の評価
- ・ PV 予測誤差モデルの開発と評価

(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

【国際連携】

- ・ 電力ネットワークを含むネットワーク系のモデリングや制御で世界的に活躍しているスウェーデン王国 KTH Royal Institute of TechnologyのKarl H. Johansson教授, Henrik Sandberg准教授と共同研究を開始し、相互に研究者を(のべ6回)派遣し、様々な研究展開を試み、その成果の一つがIEEE Transaction Automatic Control (原著論文A30, regular paper)の論文誌に掲載された。今後も継続して、共同研究を推進していく予定である。
- ・ 区間解析の世界的専門家である、フランス王国 Universite d'OleansのNacim Ramdani教授と共同研究を開始し、Ramdani教授の長期東工大滞在や相互の行き来、Skypeミーティングなどを通じて、区間予測のもとでの最適電力配分に関する研究を進め、そのための基盤理論の基礎を構築してきた。その成果は、電気学会論文誌(A2)や国際会議MTNS2014(A15), IFAC2014(A19)などで発表し、国際論文誌に投稿中である。すでに次の具体的な研究構想も固まっており、引き続き、共同研究を推進する予定である。
- ・ 国際会議SICE2013でのOS、国際会議ICCAS2014でのTutorial sessionや国際ミニシンポジウムなどで、海外からの研究者を含む研究発表講演会を企画し、様々な研究分野の視点からの研究を進めていくための国際交流を深めた。
- ・ 米国をはじめとする国外から著名な研究者や新進気鋭の若手研究者を招待した、本チームのセミナー「PV-EMSセミナー」(毎回、15-30名参加)を2年間で12回実施し、国際的に連携していく基盤を構築した。

【国内連携】

- ・ 上述したFSにおいて、他の6つのCRESTチームとの融合/連携研究に関する基礎検討を推進してきた。
- ・ 一般社団法人日本太陽エネルギー学会太陽光発電部会第5回セミナー「太陽光発電システムの発電出力把握・予測技術」に協力する形で参加し、主に太陽光発電予測に関する国内での連携を強化した。
- ・ 2014年9月9日に仙台管区気象台との意見交換を行い、地域気象予測における情報を収集するとともに交流基盤を築いた。

§ 4 研究実施内容及び成果

4. 1 電力安定供給の実現のための枠組みの提案 (全グループ)

大量導入された太陽光発電を需要家側の蓄電池を用いて有効に利用し、安定に電力供給するための需給バランス制御を実現するために、まずは、現状の電力システムにおける需給バランス制御や太陽光発電予測技術から生じる問題点を整理し、現在の電力システムの延長線上としての位置づけやシステム構造の柔軟性を勘案したうえで、図 4.1-1 に示すように、電力安定供給のための新しい枠組みを設定した(原著論文 A32, A21)。これは、チーム間の連携体制を明確化するうえでも大変有用であった。

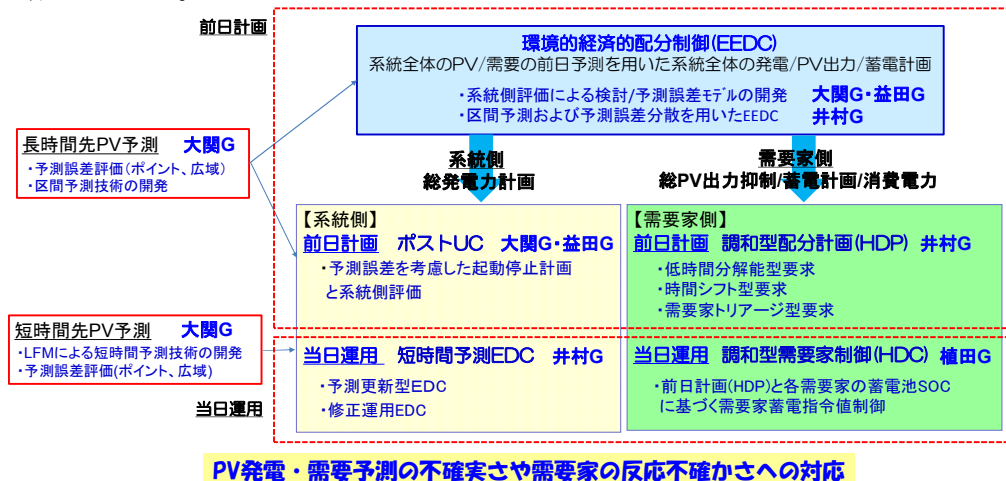


図 4.1-1 電力安定供給のための枠組みと各グループの役割

図 4.1-1 の枠組みはつぎのとおりである。前日計画において、系統運用者が、太陽光発電および負荷需要の予測を用いて、供給側の調整用電源の発電総電力と需要家側の蓄電池充放電の総電力に関して最適配分を行う。本研究では、これを環境的経済的負荷配分 (Environmental Economic Dispatch, EEDC) と呼ぶ。さらに、その全体計画を用いて、調整用電源の負担分は、前日計画として現在のユニットコミットメント(UC)と同様に各火力機に配分し、起動停止計画を行い、当日運用を行う。一方、系統運用者は、需要家側に対して計画された蓄電池充放電の総電力を、需要家アグリゲータごとの太陽光発電予測に基づいて、前日計画として各アグリゲータに最適配分し、各アグリゲータは当日運用として、その前日計画と各需要家の当日の蓄電量(SOC)に基づいて需要家ごとに調和した配分運用を行う。前者の制御を調和型配分計画 (Harmonized Dispatch Plan, HDP)、後者の運用を調和型需要家制御 (Harmonized Demand-side Control, HDC) と呼ぶ。この枠組みで主たる問題となるのが、太陽光発電予測の不確かさと需要家の振る舞いの不確かさである。太陽光発電予測を用いたEDCや需要家制御は多々研究されているが、このような配分計画から運用まで、そして供給側から需要家側の制御までの全体を通した枠組みの提案は、これまで見当たらない。

この枠組みの実現に向けて、太陽光発電の予測誤差評価(4.4 節)、短時間先予測や区間予測技術の開発(4.4 節)に加えて、太陽光発電の予測誤差の影響を、系統全体の経済的視点(4.5 節)から、そして、統計的予測誤差モデルの視点(4.4 節)から関東エリアを想定した年間シミュレーション等を用いて検討するとともに、まずは、太陽光発電の予測誤差を確率的に捉えた電力配分計画として、信頼度付きの区間予測を用いた手法 (4.2 節)と予測誤差の分散情報を用いた手法 (4.2 節)の2つのアプローチに基づく理論を構築することでEEDCの基礎理論を構築し、その手法のシミュレーション評価 (4.4, 4.5 節)を行った。つぎに、EEDCで算出された電力配分計画を用いた供給側での UC (4.4, 4.5 節)、および、HDP (4.2 節)の基礎理論を構築した。さらに当日運用として、予測誤差を考慮した修正運用型EDC (4.2 節)、および、HDC (4.3 節)を開発した。

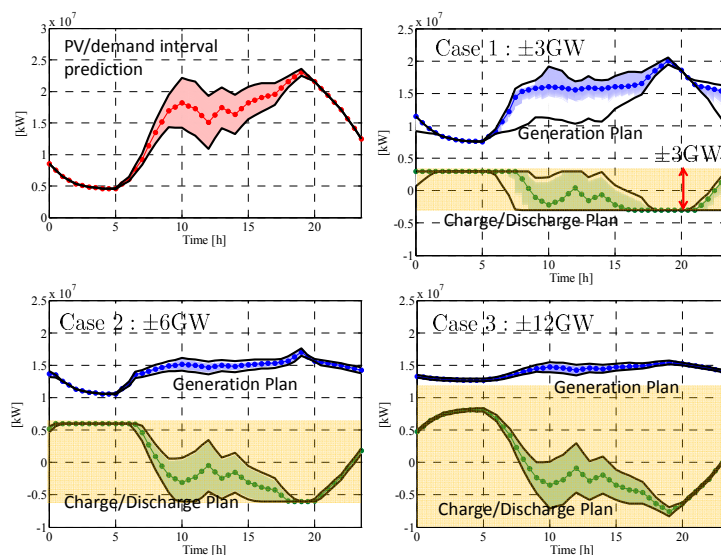
以下では、グループごとに、これらのそれぞれに対して得られた成果を詳述する。

4. 2 予測不確実さを許容する階層型電力負荷配分制御 (井村グループ)

A. 区間予測を用いた最適負荷配分計画のための基礎理論の構築：EEDCの基礎理論として (植田、大関、益田グループとともに) (原著論文 A2, A15, A19)

太陽光発電予測において、その予測値だけでなく、信頼度情報を付与する区間予測手法の研究は、大量導入された太陽光発電のもとでの需給制御に必要な次世代の予測技術として位置付けられる。本チームでは大関グループが本手法の研究を開始した。一方、得られた信頼度付の予測値をUCやEDCにどのように活用するかが次の重要な課題の一つである。とりわけ、図 4.2-1 の左上図のように、たとえば、90%の確率で太陽光発電・需要が入る予測区間値が与えられた際、その情報をもとに、

供給側電源と需要家蓄電池の電力配分をどのようにすればよいのかは、最も基本的な問題である。一般に、予測区間の上下限をそれぞれ用いれば、電源側と蓄電池側の上下限が求められるというものではないため、予測として与えられた区間内に存在するすべての太陽光発電の軌道に対して通常の配分問題を解く必要がある。このような問題は区間最適化と呼ばれるが、確立した手法は見当たらない。本研究では、与えられる最適化問題の解の予測値



4.2-1 区間予測を用いた電力配分最適化

に対する単調性を利用した、効率的な解法の基礎理論を構築した。一般の 2 次計画問題のような最適化問題では、解の単調性は保証されない。そこで、一般的な 2 次計画問題において、KKT 条件をもとに、解の単調性が保証されるための十分条件を導出した。これは十分条件であるが、さらに、本研究で考える最適配分問題の特徴を活用することで、ほとんどの場合において、その単調性が保証されることを証明した。これにより非常に効率的に区間最適解を導出することに成功した。図 4.2-1 の上段の右図および下段の図は、需要家側の総蓄電池のインバータ容量が $\pm 3\text{GW}$ 、 $\pm 6\text{GW}$ 、 $\pm 12\text{GW}$ の 3 つの場合について、供給側電源の発電電力と、需要家蓄電池の充放電電力の区間最適解を導出したものである。蓄電池のインバータ容量が大きくなるにつれて供給側電源の発電電力がフラットになっており、予測の不確かさを需要家蓄電池が吸収している自然な結果がうかがえる。

B. 時空間分解能需給バランスのための電力最適負荷配分制御の基礎理論の構築：HDPの基礎理論として (植田グループとともに) (原著論文 A30, A21)

① 基本的なアプローチ (低時間分解能型要求)

EEDC で算出した需要家全体の消費電力・蓄電池充放電・PV抑制計画をもとに、系統運用者がアグリゲータ(図 4.2-2 ではエリアに相当)ごとの太陽光発電予測(前日予測)をもとに、アグリゲータごとの消費電力(受電点電力)、蓄電池充放電、PV抑制計画を算出するための基礎理論を構築した。この際、アグリゲータ側のフレキシビリティを増大し、また、予測誤差や蓄電池の充放電制約などを相対的に緩和するための方策として、時間分解能が低い、すなわち、平均パワー(エネルギー)としてアグリゲータに要求値を与える手法を開発した。これは、アグリゲータが多様であり、か

つ多数である性質に着目し、粗い要求によっては指定できない個々のアグリゲータの細かな振る舞いは、全体としては平均化されることを利用したものである。EEDC レベルでは、数万〜数百万となる需要家の蓄電池は、各蓄電池の蓄電容量ならびにインバータ容量をそれぞれ総和して、1つの蓄電池とみなしたものを想定して算出するため、実際に、各需要家への要求の際には時間分解能を低くしておくことが有効である。これにより、

EEDC レベルで、需給バランスでの経済性や環境性(太陽光発電をできる限り抑制しないで使用すること)といった大域的な目的を達成しつつ、各需要家の利益最大化も同時に達成することが可能になる。図 4.2-2 に1つの数値シミュレーション結果を示す。

この理論を構築するために、まず、需要家ごとの太陽光発電電力を含むネットの負荷需要、蓄電池の充放電電力、受電点電力からなる需給バランス関係式をもとに、太陽光発電電力を含むネットの負荷需要は正規分布に従う確率変数として扱うことで、時空間分解型数理モデルを導出した。このモデルをもとに、様々な時空間分解能での最適電力配分計画を可能とする、機会制約付最適化問題として定式化した。これにより、予測誤差の共分散行列を用いて、時間集約(低時間分解能化)と拘束条件を満たさないリスクとの基礎的な関係式を導出した。予測の不確かさが大きい、すなわち、予測誤差の共分散が大きな時刻では、蓄電池のインバータ容量に関する拘束条件が見かけ上、厳しくなる。そのため、高い時間分解能のままでは制約条件を満たす解が存在しない場合がありえる。実際、図 4.2-3 に示すように、40 分間隔では、ある時刻において太陽光発電の不確かさが大きいため、拘束条件である蓄電池の充放電制約の上下限値が交差してしまい、実行可能解は存在しなかった。一方、1.5 時間や 3 時間間隔では、上下限値に差が生じ、実行可能解が存在する。このように低時間分解能化することにより、予測の不確かさを相対的に緩和して、解ける問題に帰着することができることを示した。これにより、導出した関係式により、予測の不確かさに依存して与えることができる時間分解能の目安を導出することが可能となった。

② 時間シフト型多分解能配分計画

図 4.2-2 では、3 時間ごとに時間集約(低時間分解能化)した要求を用いる場合、全エリア(全アグリゲータ)の受電点電力の総量と、供給側電源の総発電電力の差が大きいことがわかる。そこで、各エリア(各アグリゲータ)への要求の開始時刻を少しずつシフトして与える手法を提案した。図 4.2-4

は 10 分毎に開始時刻をシフトした場合の結果を示す。この場合には、4 時間集約型であっても総発電計画した電力とほぼ一致することが可能であることがわかる。本手法では、集約時間とシフトする時間が決められた際に、総発電電力との相違の理論的な限界値を導出することに成功した。これにより、図 4.2-5 に示すように、本手法の性能限界を理論的に計算することが可能である。

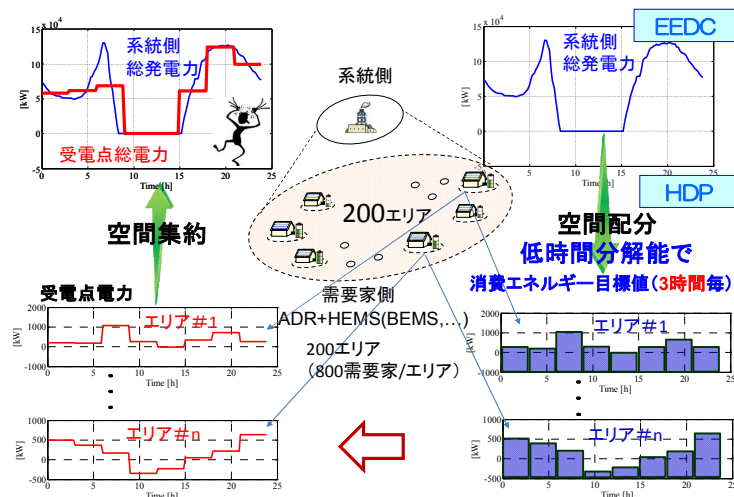


図 4.2-2 階層型多分解能配分計画

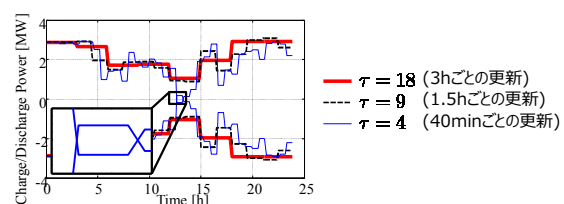


図 4.2-3 階層型多分解能配分計画(赤線、黒破線、青線は拘束の上下限を示す)

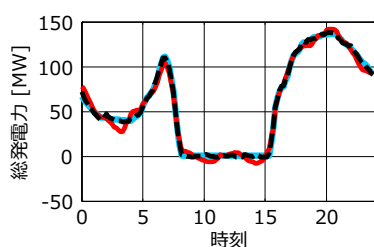


図 4.2-4 時間シフト型多分解能配分計画

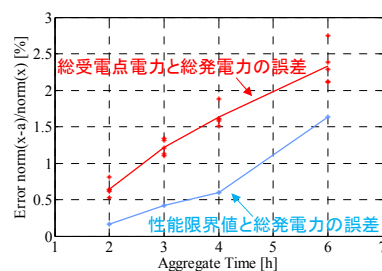


図 4.2-5 時間シフト型の性能限界

③ トリアー型多分解能配分計画

上記の時間シフト型計画に加えて、さらに系統運用者とアグリゲータ(エリア)の間における契約型の需要家の制御理論を開発した。これは、当該日の太陽光発電状況やその予測の難しさ(共分散の大きさ)をもとに当該日の拘束条件を満たすべき必要な蓄電量を情報としてアグリゲータ側に提供することで、アグリゲータ側に確保すべき蓄電量を申告させ、需要家の

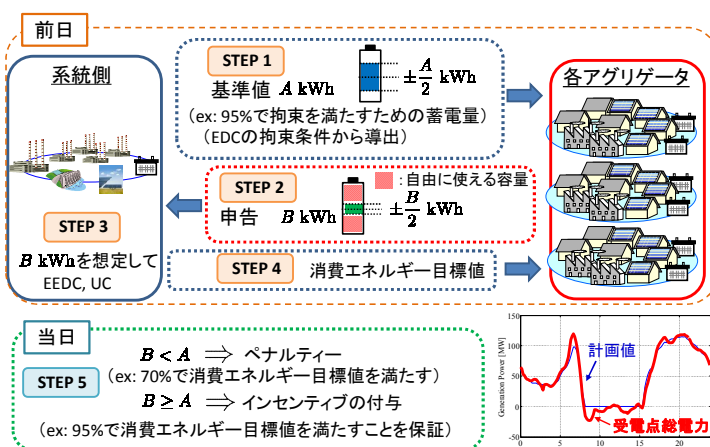


図 4.2-6 需要家トライ型多分解能配分計画

の確実な振る舞いを最大限実現しようとするものである。図 4.2-6 にそのシナリオを示す。ステップ1で、系統運用者は、図 4.2-4 で示すような、当該日の太陽光発電の共分散を用いた信頼度解析を行うことで、拘束条件を満たすための蓄電量の情報をアグリゲータに提供し、その情報をもとにステップ2で各アグリゲータが、需要家側のトライ型も勘案して、系統の需給調整のために使用可能な蓄電量を申告する。ステップ3、4でその申告値をもとに、EEDC、UC を行い、各アグリゲータに、蓄電充放電や受電点電力の要求を行う。このアルゴリズムによって系統側にとって、自由に使える需要家側の蓄電量が明確になり、需要家側の振る舞いの不確かさを低減することが可能になる。

④ その他の基礎理論

上記のほかに、多分解能階層モデリング(原著論文 A28)、多分解能階層化オブザーバ(原著論文 A11, A12, A24, A31)、階層分散最適化アルゴリズム(原著論文 A20)など、分解能ごとに階層化された制御システム固有の個別理論の基盤的な展開を実施した。

C. 予測情報の更新を考慮した制御論・修正運用型経済負荷配分制御の基礎理論の構築

(原著論文 A3, A4, A26, A27, 国内会議発表 D20, D40, 他投稿中)

太陽光発電大量導入時における日射量予測技術の開発、電力システムに基づく需要家モデルの確立に伴い、今後これらの予測技術を電力システムの的確な運用に反映させる制御法の開発が必要になる。本課題においては、①予測情報の更新を考慮した制御論、②修正運用型経済負荷配分制御、に関して以下の成果を得た。

① 予測情報の更新を考慮した制御論

日射量予測、予測可能な擾乱を想定した予測制御問題に着目し、 H_∞ 、 H_2 制御性能を最適化する予見制御法を開発した。予見制御法とは、一定時間未来までの目標値・外乱の情報を利用することにより、制御系の性能をさらに改善する手法であり、問題の定式化により、外乱抑制、追従制

御等様々な問題を解くことが可能である。本課題では、制御系の部分情報と不確かな予見情報に基づいて、 H_∞ 、 H_2 ノルムを一定値以下に抑制する制御則の構成法を明らかにした(原著論文 A3, A4, A16, A26)。これらの結果は、対象の部分情報に基づく設計法を与えるため、大規模電力システムの集約モデルから予測制御則を構成することが可能である。また、予見情報が更新される一般的な制御問題を考察し、不確かな予測更新情報から制御上有用な情報を推定する予見フィルタリング問題の解法を明らかにした(原著論文 A26, A27)。

これらの理論的な成果は、FS 第 1、2 フェーズで典型的な系統制御問題に展開され、その特徴が、予測型系統安定化制御(PSS)、予測型負荷周波数制御(LFC)に基づいて検討された(詳細は、4.6 節 FS での成果に記載)。

② 修正運用型経済負荷配分制御

太陽光発電など自然エネルギー源による発電出力は天候に大きく左右されるため、蓄電池系と火力発電等の予備力を効果的に運用することが必要になる。本課題では、経済負荷配分制御(EDC)を安定して運用するひとつの修正計画法を開発し、その効果を発電量予測の信頼区間に基づいて評価した(国内会議発表 D20, D40)。このような制御問題を扱う場合には、日射量予測、需要の不確かさの上下限を考慮し、想定される任意の変動に対して、電力システムが許容できる EDC 修正則を定める必要がある。そこで、外乱による応答の偏差を constraint tightening 法により評価し、周期系のモデル予測制御法から EDC 修正則を構成する方法を明らかにした。提案法は、オフラインで設計することも可能であり、この特徴から、発生し得る蓄電量変動に対して EDC 修正則を予め計算しておくこと、そして適用範囲を事前に評価することができる。

本手法は、大関G、益田Gによって提供された PV 発電予測データに基づく制御問題に適用され、図 4.2-7 のような結果が得られた。図 4.2-7(a) はネット需要(PV 発電予測から需要予測を引いたもの)、(b) は火力機の予備力を定めたものであり、これらの前提条件から、図 4.2-7(c) のような EDC 調整可能領域と対応する制御則を得る。すなわち提案法を用いれば、蓄電量が図 4.2-7(c) の領域内で変化した場合にも、適切な運用により蓄電量を図 4.2-7(c)中の破線の軌道まで回復できることが保証される(国内会議発表 D20, D40, 端倉他, 計測自動制御学会論文集投稿中)。

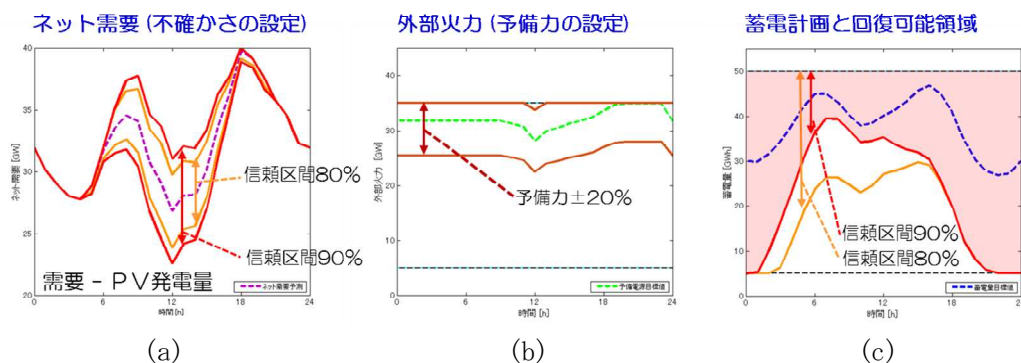


図 4.2-7 EDC 修正計画法に基づく回復可能領域の評価

4. 3 PV 発電および需要予測と需要家側シミュレーションによる電力配分評価 (植田グループ)

A. 住宅間の多様性を利用した需要家側蓄電池を調和的に制御するアルゴリズムの開発と評価 (国際会議発表 E13, 国内会議発表 D28, ポスター発表 F17)

需要家側にPVとともに大量導入された蓄電池を電力需給バランス確保のために用いる手法として、EEDC で得られた需要家側負荷配分を各アグリゲータに要求する HDP により低時間分解能でアグリゲータに与えられた充放電量の配分を、個別住宅群において公平に分担するための調和的な蓄電池充放電アルゴリズムの開発(HDC)と評価を行った。

① 評価に用いた住宅の構成

各住宅は図 4.3-1に示すように太陽光発電設備と蓄電池を有することとする。各住宅の蓄電池に関する仕様は全て同じものとし、蓄電池容量は 10kWh、インバータ最大出力は 2kW、インバータ

変換効率は 90%とした。蓄電池容量は正味の容量を 0 - 100%とし、蓄電池の種類による影響を受けないものとする。蓄電池は太陽光発電電力からのみ充電され、蓄電池からの放電電力は設置された住宅の負荷にのみ供給される。また、負荷で消費できなかった PV 出力は系統へ逆潮流として流れるものとする。時刻 t における住宅 n の受電点潮流 $P(n, t)$ は以下の式で計算される。

$$P(n, t) = P_{pv}(n, t) - P_d(n, t) - P_{ch}(n, t) + P_{dis}(n, t)$$

ここで、 P_{pv} [kW]:PV 出力、 P_d [kW]:需要電力、 P_{ch} [kW]:充電電力、 P_{dis} [kW]:放電電力である。

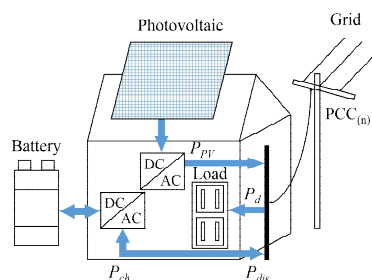


図 4.3-1 住宅の設備構成と電力の流れのイメージ図

② PV 発電および電力需要データ

評価には NEDO「集中連系型太陽光発電システム実証研究」によって得られた、2007 年 1 月 1 日から 12 月 31 日の一般住宅 541 軒の電力需要と PV 出力の一時分値および一分値を使用した。一時分値はアグリゲータが前日に翌日の蓄電池運用計画を決定するために使用され、一分値は運用当日をシミュレーションするために使用される。図 4.3-2 には年間の全住宅合計受電点潮流の持続曲線（一分値）を示す。ここで示す正味の電力潮流とは PV 出力と需要電力の差であり、正の値は逆潮流、負の値は順潮流である。また、表 4.3-1 には使用したデータの統計値をまとめた。

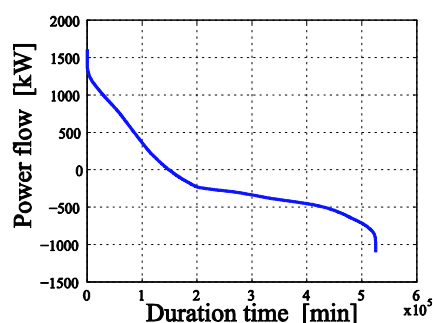


図 4.3-2 評価に用いたデータの負荷持続曲線

③ 調和的な蓄電池充放電アルゴリズムの概要

はじめに系統運用者がアグリゲータに逆潮流と順潮流のピーク低減を要求する場合を想定し検討を行った。アグリゲータはピーク低減の要求に対して翌日 0 時から 24 時の一時分値により、住宅 541 軒合計の正味の受電点潮流を基に DR 計画として SOC 目標値、受電点潮流に対する不感帯幅および順潮流と逆潮流のピーク参照値を算出する。これらの計画値は全住宅に一律に配信されるものとし、各住宅は DR 計画と自宅の蓄電池 SOC および受電点潮流から充放電電力を逐次決定する。各住宅の運用シミュレーションは一分値を用いて行った。SOC 目標値は図 4.3-3 に示すように、正味の受電点潮流が負から正に変わるまで (Time period A)、それ以降再び受電点潮流が負に変わるまで (Time period B)、およびそれ以降 (Time period C) の三つの時間帯ごとに与えることとした。単純なピーク低減を目標とする場合には SOC 目標値はそれぞれ 0%、100%、0%となる。DR 計画を受けた個々の住宅は、蓄電池 SOC や受電点潮流によって充放電量を決定する。住宅間におけるこれらの値の多様性を利用することで、DR 計画を受けた蓄電池が一斉に充放電を行うことを回避するとともに、より系統に依存し

表 4.3-1 評価に用いたデータの統計値

Peak forward power flow	1,098 kW
Peak reverse power flow	1,606 kW
Annual demand energy	3,473 MWh
Annual PV output energy	2,482 MWh

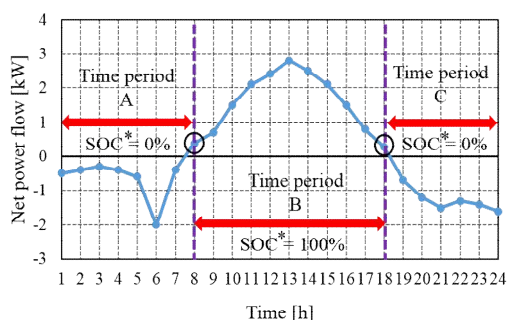


図 4.3-3 調和的な蓄電池充放電制御における DR 計画手法のイメージ図

た住宅(逆潮流が多い、または順調流が多い)ほど充放電負担が増えるアルゴリズムとした。具体的には、図 4.3-4、4.3-5 に示したように、SOC または受電点潮流に応じてそれぞれの時間帯で充放電量を線形または非線形に変化させることとした。

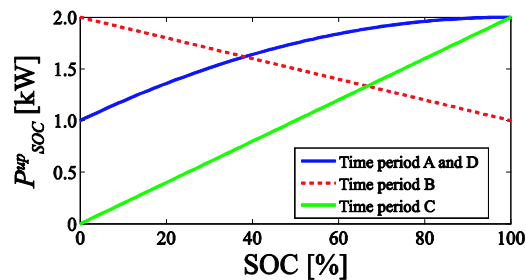


図 4.3-4 各時間帯における SOC と充放電電力の関係

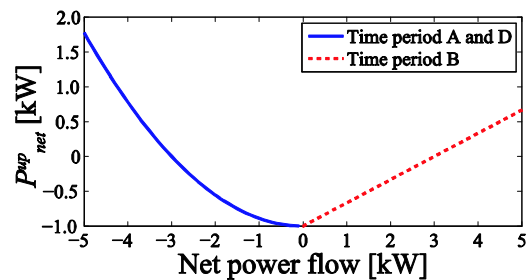


図 4.3-5 各時間帯における受電点潮流と充放電電力の関係

④ ピーク低減効果と公平性の評価

シミュレーションによる評価として、DR 計画を使用せず自端情報のみにて蓄電池充放電を行う場合を比較対象として、ある1週間の充放電シミュレーションを行った結果を図 4.3-6 に示す。ピーク低減を目標とした DR 計画において、本検討にて開発したアルゴリズムが効果的ピーク低減を行っている様子が分かる。表 4.3-2 には、ピーク低減効果および公平性指標となる充放電電力量と逆潮流、および順調流の 541 軒分の結果におけるそれぞれの相関係数を示した。結果より、より少ない充放電量(891MWh)でより大きなピーク低減効果が得られており、充放電電力量との相関係数も対逆潮流、対順調流ともに同じくらいの値になっており、より適切な充放電負担の配分が可能になったことが分かる。

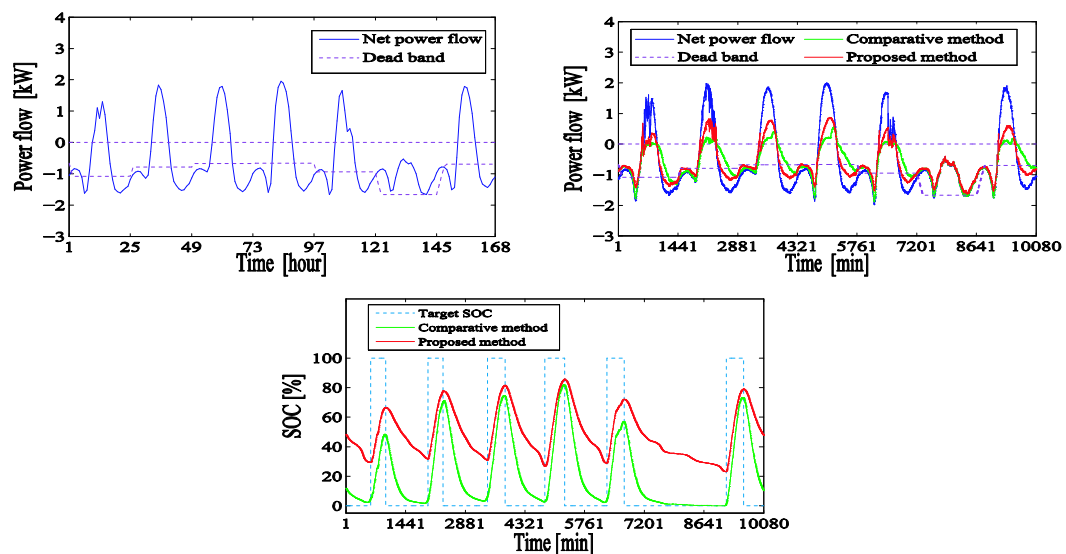


図 4.3-6 各時間帯における受電点潮流と充放電電力の関係

表 4.3-2 調和的蓄電池充放電アルゴリズムのピーク低減効果の評価結果

	Comparative	Proposed
Peak forward power	1,063 kW (3%)	860kW (22%)
Peak reverse power	1,052 kW (34%)	907kW (44%)
Annual charged energy	1,151MWh	891MWh
Coefficient of correlation between $E_d(n)$ and $E_{ch}(n)$	-0.0061	0.4728
Coefficient of correlation between $E_{pv}(n)$ and $E_{ch}(n)$	0.8268	0.5737

B. 需給シミュレーション用負荷データの作成と大型施設負荷とのアグリゲーション効果の検討

系統大でHDPおよびHDCのシミュレーションを行うために必要な住宅負荷データの作成を行った。作成したのは全国約840地点のアメダス地点における、それぞれ541軒分の住宅負荷の一分値である。負荷の作成には、はじめに気候が温暖で空調負荷が最も少ない時期の負荷をもとに基準となる24時間の負荷パターンを作成した。この基準パターンをもとに、気温に対する負荷の応答、週末・祝祭日における負荷の応答を時間ごとに算出し、アメダス地点の気温とその日の曜日・祝祭日情報を用いて補正を行った。作成した負荷データの一例を図4.3-7に示す。例に示したのは群馬県前橋のアメダス気温データを用いて作成した負荷と、同じ日の太田市において実測された住宅負荷の1時間値である。結果より、気温応答、曜日応答を考慮することで概ね推定負荷と実測負荷が一致していることが分かる。

また、大規模商用設備における負荷電力の計測を井村グループと共同で実施し、このデータを用いて住宅群と大型商用設備をまとめてアグリゲートすることで、ピーク抑制やHDPを満たすのに必要な蓄電池容量を大幅に低減できる可能性があることを、実測データを用いて確認した。

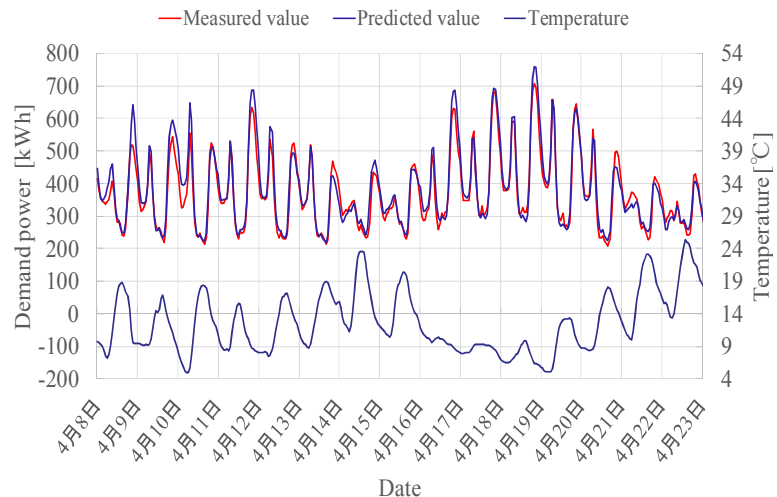


図 4.3-7 住宅負荷データ作成例

4. 4 PV 発電予測の不確実性評価および電力系統シミュレーションによる評価（大関グループ）

本研究課題では、PV 発電予測として、短時間予測についての検討をメインに行った。ここで短時間とは需給運用の当日運用や火力発電の起動停止を想定して、1～5 時間程度先の予測をターゲットとしている。短時間予測の予測技術の開発方法として、大関グループで開発してきた、Meso scale model(MSM)-Grid point value(GPV)を入力とし、機械学習の一つであるSupport vector regression (SVR)を利用した前日予測技術を応用した(原著論文 A17, 国際会議発表 E21, E23)。次に気象庁が新しく開発し 2013 年より運用を開始した局地予報モデル(Local forecast model, LFM)の利用について検討した。まず LFM のモデル出力の評価を行い、その後 SVR との組み合わせによる検討を行った(原著論文 A23, A29, 国際会議発表 E7, E4)。また前日予測に関して、電力系統シミュレーションに利用するため、大関グループで開発してきた MSM(GPV)を入力に SVR を利用した予測技術を用いてデータセットの提供を行った(原著論文 A5, A14, 国際会議発表 E4)。

A. MSM (GPV) を利用した短時間予測手法の検討（国際会議発表 E23）

これまで開発してきた予測手法を短時間予測(ここでは1時間)に改良するために入力データおよび学習データについて検討を行った。表 4.4-1 に、入力データに利用している MSM (GPV) の中で選択したデータと各ケースの関係を示す。短時間予測のため、時系列データをオンライン学習するなど検討を行った。学習データに関しては、従来は1日ごとに学習を実施していたが、短時間にとまない時間ごとの学習とした。それに伴い、60日分の予測(960時間)分を変更して検討を行った。表 4.4-2 に学習データ数を示す。

表 4.4-1 入力データの種類

Source Input Data		Forecast Method Setup									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
GPV-MSM	Air temperature at t	○	×	○	○	○	×	×	○	○	×
	Air temperature at $t-1h$	○	×	○	○	○	×	×	○	○	×
1-day-ahead	Air rel. humidity	○	×	○	○	○	×	×	○	○	×
	Air rel. humidity at $t-1h$	○	×	○	○	○	×	×	○	○	×
	Cloudiness at t	○	×	○	○	○	○	○	○	○	×
	Cloudiness at t (3 levels)	○	×	○	○	○	○	○	○	○	×
Measured at $t-1h$	Insolation	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×
	Air temperature	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×
	Air rel. humidity	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×
Calculated	Extraterrestrial insolation at t	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Extraterrestrial insolation at $t-1h$	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○
	Clearness index at $t-1h$	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○
	Clearness index at $t-2h$	×	×	×	×	○	×	×	×	×	×
1-day-ahead Forecasted	Insolation at t	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×
	Insolation at $t+1h$	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○

表 4.4-2 学習データ数 60 日 (960 時間を 1.0 とした場合)

	Forecast Method Setup						
	11	12	13	14	15	16	17
Quantile	0.125	0.20	0.25	0.33	0.5	0.75	1

図 4.4-1 に入力データの違いによる年間 RMSE の結果を示す。セットアップ1は、前日予測であり、セットアップ2は、晴天指数をベースとした持続モデルである。この二つを基準として考える。セットアップ3は前日予測と同じ入力データセットを利用した場合でも、持続モデルセットアップ2よりも約12%RMSEを改善できた。またセットアップ4、5により晴天指数の入力が有効であることを示している。セットアップ6～9からは、気温や湿度の実測データ入力についても検討を行ったがあまり効果はなかった。セット10からわかるように、これらの変種は予測誤差を少し増大している。日射の実測データを入力に利用することが有効であることを示した。最終的に持続モデルと比較するとRMSEで14%、MAEで23%の改善を示した。

また、学習セットの検討結果を図4.4-2に示す。もっともよい結果は、60日間(960時間)の初期データセットの20～30日間(320から480時間)を選択したケースであり、学習データ数の低減かつ予測誤差を約1%低減した。

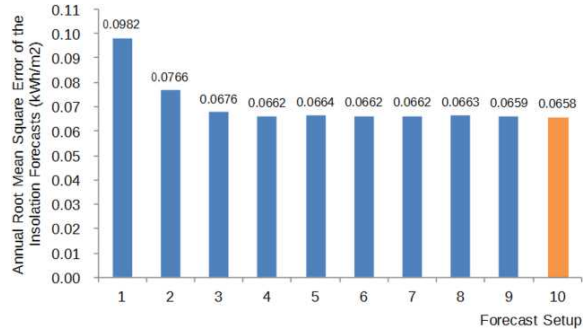


図 4.4-1: 予測モデルの入力データの違いによる短時間予測における年間 RMSE、つくば、2010 年

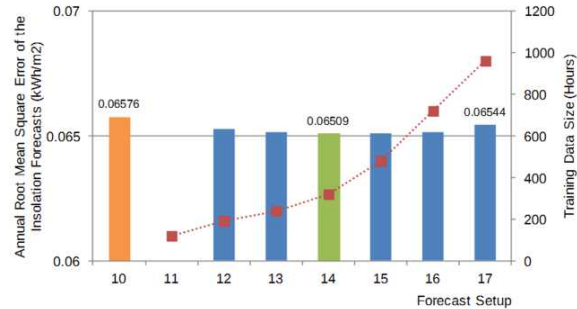


図 4.4-2 予測モデルの学習セットによる年間 RMSE つくば、2010 年

B. LFM モデル出力の評価 (国内会議発表 D31、国際会議発表 E22, F18)

気象庁では 2012 年から局地モデル(Local forecast model、LFM)の現業利用を開始した。モデルの水平解像度は 2km である。これは防災気象情報の資料の他、航空気象予報の作成支援資料として利用されている。LFM は 9 時間先までの予測が実施されている。(2013 年 5 月 28 日までは 3 時間毎、5 月 29 日以降は 1 時間毎に計算、出力がされる)。これまで MSM では中部の山岳地帯はモデルの中で大まかには表現されているものの、水平解像度 5km であることから、実際の地形よりも平滑化された地形が導入される。そのため、LFM ではモデル地形をより現実に近い状態で取り込むことが可能となった。これにより地形性の雲の予測の高精度化が期待される。モデルの境界値には MSM の予測値を用い、初期値には局地解析が用いられている。LFM では水平解像度の高解像度化が行われているものの、格子点以下のスケールの雲の予測は原理的に不可能である。しかし、格子点以下のスケールの雲量の見積もりには、部分凝結スキームと呼ばれる乱流過程の情報を加味した雲量を推定する方法が取られている。

雲の移動に伴い日射量の変動が大きい事例に注目し、事例解析を行った。図 4.4-3a は 2013 年 9 月 26 日 12 時における地上天気図(気象庁提供)を示している。この日は、台風が関東地方の南を東に移動した事例である。それに伴って、台風の西側の雲域が北海道東部から東北地方、関東地方にまで分布しているのがわかる(図 4.4-3b)。つくばにおける日射量の観測値の時系列を見ると、同日の日の出から 12 時頃までは比較的、これらの雲域の影響で観測された日射量は小さい(図 4.4-3c)。その後、雲域が北東方向に移動することで、13 時には日射量は一時的に高くなる。モデルの各初期値の予測結果についてみると、17UTC(02LST、ここで LST は日本時間)から 23UTC 初期値(08LST)の予測では午前中の観測された低い日射量に近い予測値を算出しているものの、13 時の比較的高い日射量を予測できていない。しかし、00UTC(09LST)初期値以降の予測値では、13 時の比較的高い日射量の予測が改善され、観測値に近い予測値が得られている。予測のリードタイムが短くなることで、予測が改善されたケースである。

図 4.4-4 は LFM と MSM の日射量予測誤差について平均誤差(MBE)と平均二乗誤差(RMSE)を月毎に比較した時系列である。ここでは計算領域が日本全土に拡張された 6 月から 12 月までの期間の結果を示す。また、LFM では 9 時間予測を行っているため、例えば 22UTC 初期値(日本時間 7 時)の場合は、8 時から 16 時まで 1 時間毎に日射量の予測値が得られる。そのため、比較する MSM については現在 39 時間予測であることから、予測誤差の比較する解析対象時間帯を LFM の予測時間帯に合わせ、評価を行う。ここでは 8-16 時までの時間帯とした(図 4.4-4)。LFM では 6,7 月の MBE は弱い正バイアスがみられ、8 月から 12 月にかけては 40W/m^2 程度の MBE が見られた(図 4.4-4a 上)。MSM では冬季の正バイアスが解析されていたが、それと同程度のバイアスが 2013 年の予測値においても解析された(4.4-4b 上)。LFM では MSM に見られた夏季の負バイアスは、やや改善されている。LFM では 21、22、23UTC 初期値ともに RMSE の大きさには明瞭な差が見られなかった(図略)。MSM の RMSE と比較すると、LFM の RMSE は MSM の 21UTC 初期値のものに近い(図 4.4-4a、b 下)。しかし、LFM の予測値は MSM に比べて大きく予測誤差が減少(改善)したとは言い難いことが分かった。

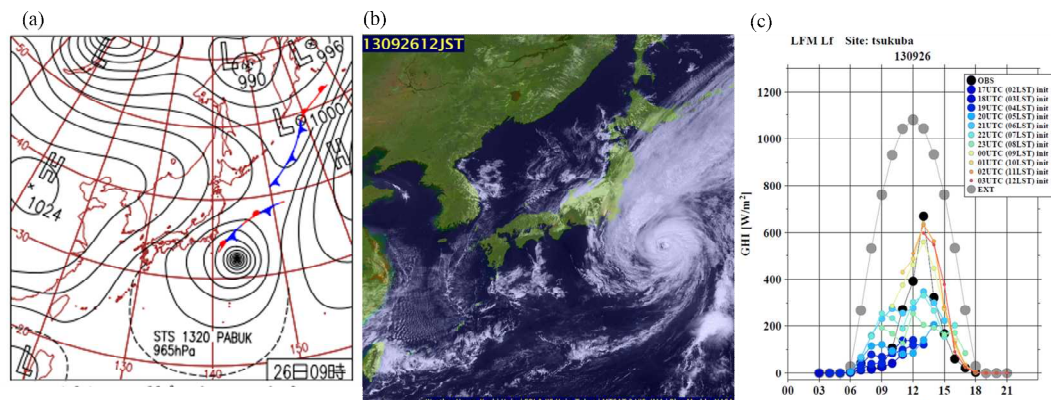


図 4.4-3 2013 年 9 月 26 日の(a)地上天気図, (b) 衛星可視画像, 及び(c)同日の地上の観測された日射量(黒丸●)と LFM(カラー)の日射量予測値の時系列

全体の分布に関して、図 4.4-5 は気象衛星から送られた 2013 年 9 月 10 日 12 時(日本時間)可視画像との比較を行った。関東地方には、まばらな積雲系の雲が点在している事例であり、関東の南部から近畿地方の太平洋側にかけて雲域が広がっている。図 4.4-5b,5c は MSM と LFM の雲の分布の予測の比較で、鉛直積算した水物質の量を示している。MSM の予測は前日 12 時に翌日 10 日 12 時を予測した結果であるが、この太平洋沿岸付近の雲の予測はなされているが、北関東から福島県付近にかけても雲を予測してしまっている。LFM は当日朝 6 時に当日 12 時の雲の分布を予測したものであるが、MSM に比べて、衛星画像に近い雲の予測をしていることが確認される。LFM では関東の南海上の雲域の表現は衛星観測に近いものの、北海道上空に光学的に薄い雲を予測してしまっている。また、オホーツク海上には比較的高度の低い下層の雲も現れているが、MSM と LFM はともに下層の雲の表現ができていないことも確認される。このような雲の予測の結果の違いは、日射量予測値の違いにも大きなインパクトを持ち、気象衛星から推定した日射量の分布と比較すると、本事例では LFM の当日予測の方が MSM よりも観測値に近い分布を表現しているのを確認した。

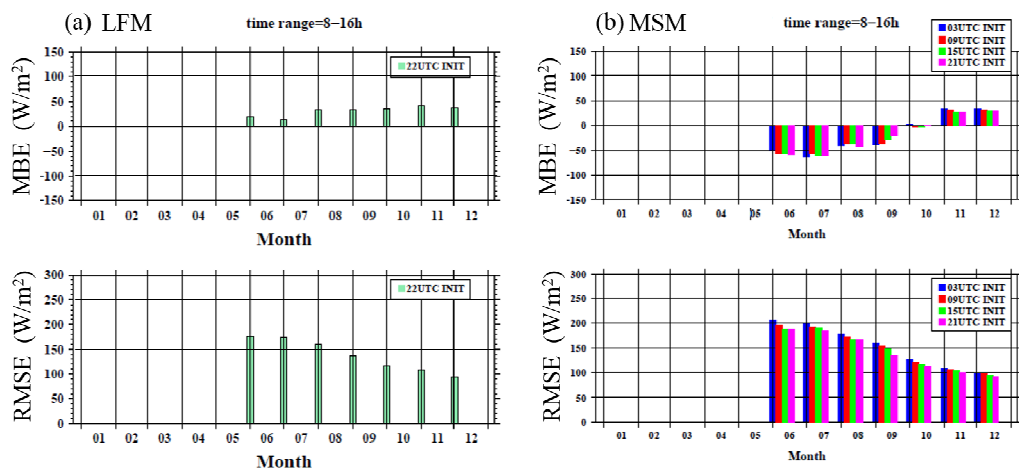


図 4.4-4 LFM と MSM の比較結果(MBE, RMSE), 2013/6~2013/12

C. LFM と機械学習を利用した予測改善効果 (ポスター発表 F16)

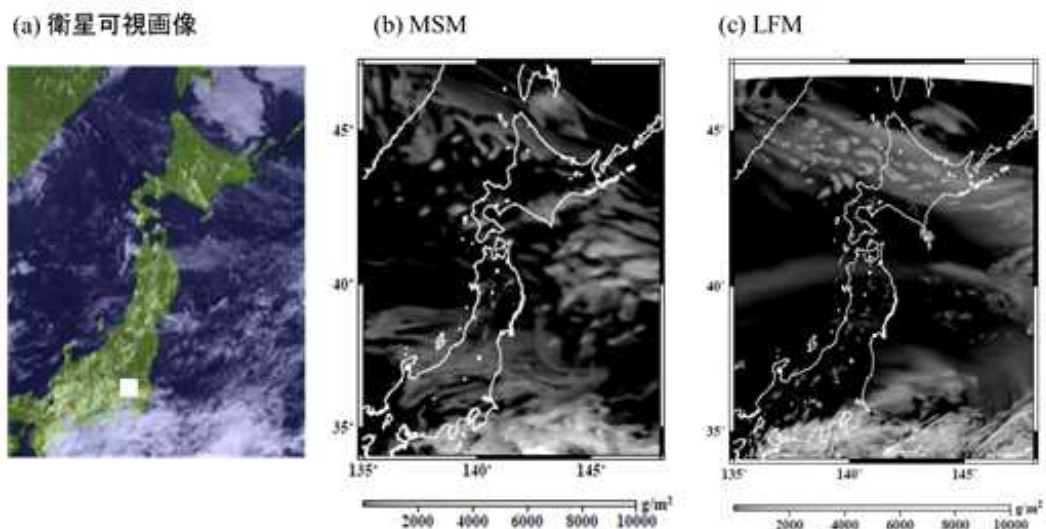


図 4.4-5 LFM と MSM の雲の分布による影響表評価

前述の MSM(GPV) で利用してきた機械学習を応用し、LFM を入力とした機械学習予測モデルに関して検討を行った。ベースは、MSM(GPV)の短時間予測モデルを利用して行った。検討期間は、2012/11～2013/08 とし、対象は広域予測として、関東エリア(6 か所実測の単純平均)とした。説明変量には、気温、高層、中層、下層雲量、大気外日射とした。図 4.4-6 予測誤差結果を示す。前日の予測誤差と比較すると、MSM1～3 時間先で約 0.062、3～5 時間で 0.065kWh/m² であった。これに対して、LFM はそれぞれ 0.058、0.060kWh/m² であり、予測誤差低減を実現できた。ただし、LFM を入力とした予測は単地点では改善効果が見られなかった。これは LFM により解像度が上がったことで地点予測の当たり外れのメリハリが協調される結果、RMSE の誤差低減が見られなかったことがあげられる。一方、広域エリアでは全体の雲の表現が改善されたことから広域での予測誤差低減んが実現できたと考えらえる。

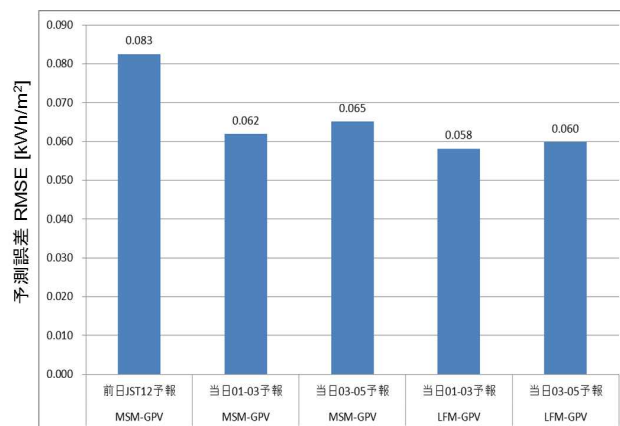


図 4.4-6 LFM を入力した機械学習予測モデルの結果(年間 RMSE)

D. 区間予測手法の開発 (原著論文 A29, 国際会議発表 E21, 国内会議発表 D43)

PV 予測の不確実性を表現するために、従来は期待値予測が主とされていたが、運用を考えると予測の信頼度を示す区間予測が期待されている。特に予測誤差は天候により特徴をもつため、天候毎に区間を縮小拡大する必要がある。本研究においても区間予測技術に関して検討を行った。区間予測に関して、過去の予測誤差傾向から推定するノンパラメトリック及び分布推定によるパラメトリック手法について検討を行った。

ノンパラメトリックな方法としては、モデルの予測誤差を晴天指数との関係で示した方法を提案した。晴天指数は、ある地点における地上日射量を大気外日射量で規格化した量として定義し、予測誤差は予測値から観測値(OBS)を差し引いた値として定義する。図 4.4-7 は予測された晴天指数と予測誤差(予測値から観測値を引いた値、LFM-OBS)の関係を示しており、時別値のデータから作成した散布図である。図中の異なるカラープロットは異なる月のプロットを意味する。この図からは、予測された晴天指数がやや高い(薄曇り)場合は、予測誤差が正バイアスになりやすい傾向があり、一方、予測された晴天指数がやや低い(曇り)場合は、予測誤差は負バイアスになる傾向があることがわかる。LFM の予測誤差には、予測された天候との明瞭な特徴と言える。予測値の区間推定には、以上の予測誤差の実績と晴天指数との関係(Look-up Table)を利用し、予測された晴天指数が計算される度に予測値に信頼性情報として付加した。Look-up Table は初期値毎、季節毎(ここでは、12,1,2 月を冬、3,4,5 月を春、6,7,8 月を夏、9,10,11 月を秋と定義する)にデータベースを作成した。

図 4.4-8 はつくばにおける同日の日射量(時別値)の時系列であり、観測値と区間予測を比較したものである。予測値には、時別

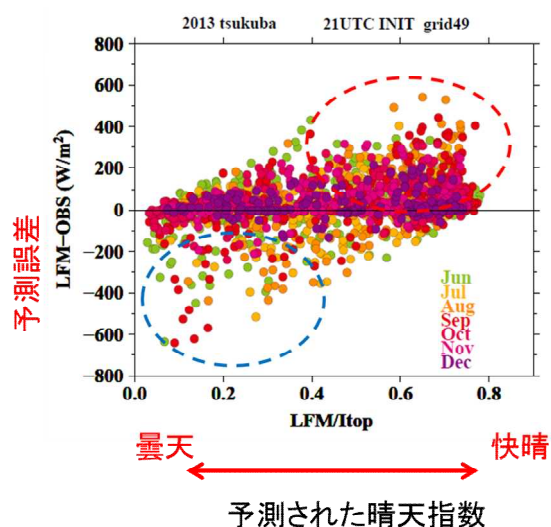


図 4.4-7 ノンパラメトリックな区間予測手法; 晴天指数と予測誤差との関係

値毎に区間が箱ひげ図で与えられており、区間は信頼度別に 80, 90, 95, 97% の各ランクで示し、上、下外側のエラーバーは実績の予測誤差の最大値と最小値を意味する。LFM では初期値が1時間毎に更新されるが、図には 3 時間毎に初期値を更新した予測値の時系列の比較を示す。LFM は9時間先予測まで可能であるため、例えば、当日3時の予測では12時までの予測が可能である。この日の事例では、予測値は観測値に近い値を示しているが、区間予測は過小予測側にも幅を持つように示されている。これは図 4.4-8 でも見たように、過去の予測実績からみた場合、薄雲時には日射量予測の過大予測の傾向があったため、区間予測は下側にもとるように示されている。しかし、信頼度が 95%、90%、80% になるに連れて、観測値は各区間予測から外れる時間帯が多くなる。

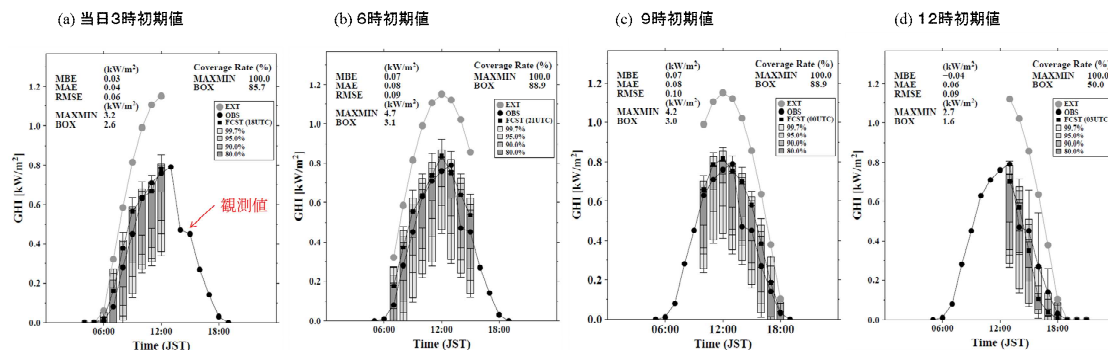


図 4.4-8 区間予測の例

1 時間先予測(■)、区間予測 (box-plots)、実測(●)、大気外日射量(●) つくば 2013/9/1 例
初期値(a) 03 LST (Local Standard Time), (b) 06 LST, (c) 09 LST and (d) 12LST

パラメトリックな手法としては、予測誤差分布の推定手法について開発を行った。予測には、MSM(GPV)を入力にした SVR の手法を利用し、その予測誤差をさらに MSM(GPV)により分類する手法を用いた。予測誤差は正規分布でなく、通常時は予測誤差が小さく、ある天候の時に予測誤差が大きくなる(ロングテールを有する)分布となっている。ここでは、ラプラス分布を仮定し、予測誤差を推定することとした。予測モデルは過去 60 日を利用しているため、ここでは任意のターゲット時間の区間予測にも同様の期間をとりようし、ユークリッド距離を利用してデータの選択を行い、最尤法による推定を行った。

区間予測の比較として、大気外日射を最大とし、最少を 0 としたケースを用いた。区間予測の評価として、設計時の信頼度を達成できていることを確認した。区間予測 97.5% まで、85% から 4 信頼度レベルを評価した結果、一部高い信頼レベルで達成値が設計よりもわずかに低かったが、ほとんどのケースで信頼レベルとよく一致した。また、区間予測の評価として区間幅について評価を行った。年間の区間幅平均は、リファレンスケースの 45% であった。また、区間予測からの

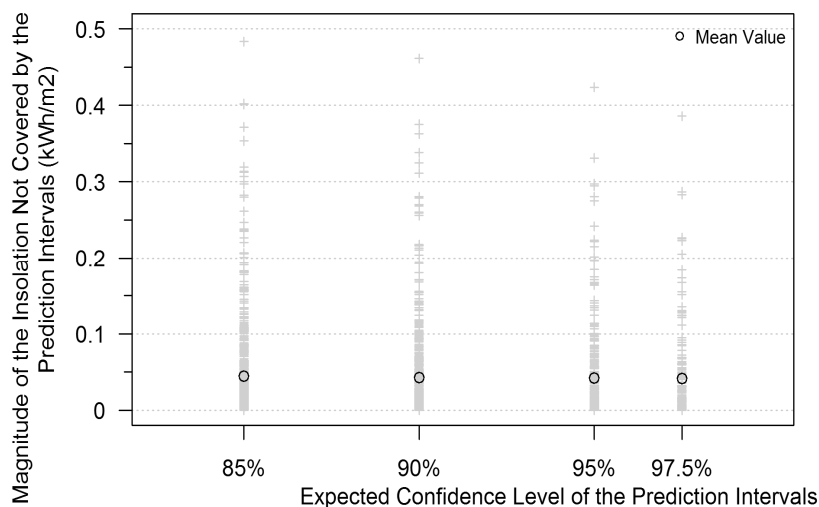


図 4.4-9 区間予測からの予測誤差結果

予測誤差を図 4.4-9 に示す。信頼度を上げるほど最大誤差を下げるができる。平均値はほとんど変わらないことも確認できる。97.5%の信頼度のケースでは大外れ時は 0.4kWh/m^2 が残っているが、平均は 0.05kWh/m^2 以下であった。

E. PV 予測の不確実性評価

(原著論文 A17, 国際会議発表 E23)

PV 予測の不確実性評価結果を図 4.4-10 に示す。広域エリアとピンポイントの予測誤差、翌日と当日の予測誤差を考慮して需給計画、運用を行う必要がある。ここでは、現状の予測モデルをベースとして、各時間、エリアによる予測誤差の傾向について評価を行った。ピンポイントの翌日予測をベースとすると、1 時間先にすることで RMSE を -40% 低減、さらに広域にすることで、RMSE を -48% 低減することが可能であることを示した。

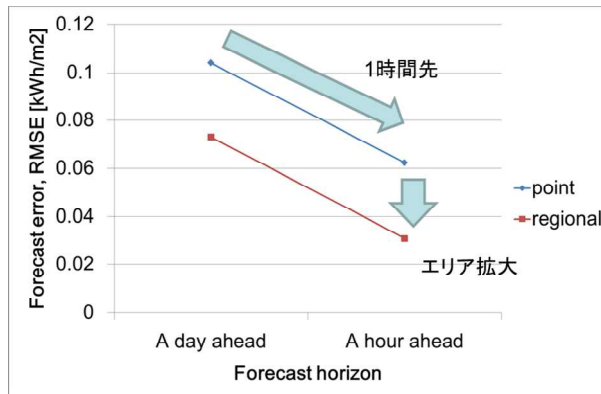


図 4.4-10 PV 予測の不確実性評価

4. 5 PV 発電予測の電力系統シミュレーションによる評価 (益田グループ)

A. PV 予測を利用した電力系統需給運用シミュレーションモデルの開発 (原著論文 A1)

PV 予測を利用した電力系統の日間需給運用を行うシミュレーションモデルを開発した。需給運用手法としては、現在の系統で一般的な経済負荷配分制御 (Economic load Dispatching Control, EDC) において、大関グループが開発を進めている日射予測手法による PV 予測を利用することとした。日間運用における EDC は前日計画と当時運用の二段階から成るとし、前日計画において火力発電の発電機起動停止計画 (Unit Commitment, UC) を作成し、当日運用において起動中の発電機群の最適負荷配分を行うとした。

計画段階では、発電機の種類と台数を考慮し、それぞれ異なる起動費と燃料費曲線を想定した。1 日の火力発電の UC は、火力発電の 1 日の起動費と燃料費の合計の最小化を目的関数とする動的計画法によって決定するとした。1 日前の計画段階において大きな PV 出力による余剰電力の発生が予想される場合は、出力抑制を行って対応することとした。

運用段階では、発電機の起動台数は計画段階と同じであるが、各火力発電機の出力は、実際の負荷需要と PV 出力に応じて変わることになる。最適負荷配分は、起動中の全火力発電機の合計燃料費の最小化を目的関数とする二次計画法を解くことによって求めるとした。運用段階における需給バランスが計画段階と異なり、火力発電にその合計最小出力以下の出力が必要な場合 (下げ代が不足する場合) は余剰電力が発生し、合計最大出力以上の出力が必要な場合 (上げ代が不足する場合) は供給支障電力が発生する。本研究では、これらを最適化の内生変数として問題を解くとする場合と、蓄電池運用によって停電・余剰を回避する場合の 2 つを想定することとした。

以上を定式化し、MATLAB 上で動作するプログラムとして需給運用シミュレーションモデルを開発した。本モデルを用いて、以下に示す 3 つの研究項目を実施した。

B. PV 予測を利用した需給運用における停電・電力余剰の評価

(原著論文 A1, A9, A18, 国際会議発表 E16)

関東エリアを模擬したモデル系統において、1 年間の系統運用シミュレーション (単位時間: 1 時間) を行った。シミュレーションに用いる発電プラントデータを表 4.5-1 に示す。原子力発電は最大出力で一定運転、水力発電は最大出力の 95% で一定運転 (残り 5% は LFC 容量) するものとした。負荷需要のデータは 2010 年 1 月～12 月の 1 時間ごとの東京電力の実績データを用いた。簡単のため、負荷需要は予測値と実際値は同じであるとした。日射量のデータは地上気象官署による 2010 年 1 月～12 月の 1 時間ごとの水平面全天日射量を関東エリア 6 気象官署について平均したデータを用いた。予測データは、上記の日射量データから大関グループが開発した予測モデルによって作成した。PV 出力は日射強度を基準日射強度で除して正規化した日射強度に PV の定格

容量およびシステム出力係数(本論文では 0.8)を乗ずること
で計算している。図 4.5-1 に、PV の予測値と実際値の誤差
(1 時間あたりの誤差電力の大きさ、全時間平均)を月ごとに
示す。なお、縦軸の値は定格容量に対する割合[%GW]で、
これに PV 設置容量を乗じた値が実際の誤差となる。

PV の設備容量をパラメータとして解析したが、ここでは
30[GW]を想定した場合の結果を紹介する。毎月の合計供
給支障電力量および合計余剰電力量を、図 4.5-2 に示す。

各月の上に示す数字は、毎月の合計発電電力量の実際値[TWh](出力抑制を行う前の値)を示す。
数字の単位は TWh であることに注意されたい。過大予測は停電の、過小予測は電力余剰の原因
であるが、図 4.5-2 は必ずしも図 4.5-1 とは対応しておらず、予測誤差よりも他の系統条件が原因
で停電や電力余剰が発生していると考えられる。余剰電力量は5月が最大で、供給支障電力量は
5月と10月を中心に大きくなっている。低負荷期ほど火力発電機の起動台数は少なくなるが、一般
に、起動台数が少ないほど調整代も小さくなるため、このような傾向が現れているものと予想され
る。

表 4.5-1 発電プラントデータ

	Available capacity [MW]	
	Jul. 15 - Sep. 14	Other
Nuclear	18,000	12,000
Hydro	6,000	
Thermal	39,150 (94 machines)	

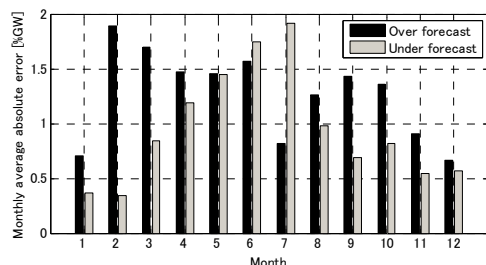


図 4.5-1 毎月の PV 出力平均予測誤差

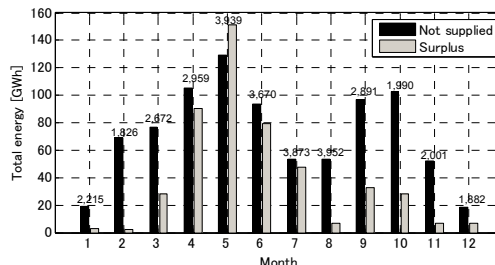


図 4.5-2 毎月の合計供給支障電力量および
合計余剰電力量

図 4.5-3 および図 4.5-4 に 5 月と 10 月の毎時の平均供給支障電力と平均余剰電力を示す。余
剰電力は PV 出力に応じて大きくなり 12 時に最大となっているが、供給支障電力は 12 時では小さ
く、その前後(9 時～11 時および 14 時)にピークが見られる。12 時は PV 出力が大きい火力発
電の合計出力は小さくなるが、負荷需要も大きい LFC 容量(短周期負荷変動に対する調整
力)も大きく確保する必要があり、結果として多くの火力発電機が部分負荷運転を行っている。この
ように、12 時前後は発電機の起動数が多いため、合計最小出力が大きく、下げ代が小さくなって、
余剰電力がよく発生することになる。一方、12 時は多くの発電機が部分負荷運転を行っているため、
上げ代は大きくなって、供給支障電力はあまり発生しない。

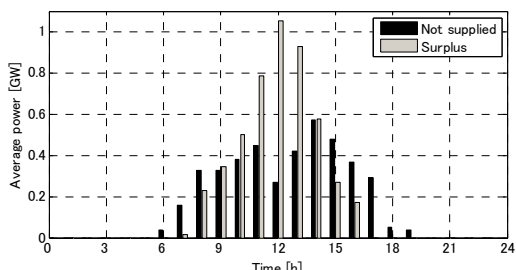


図 4.5-3 毎時の平均供給支障電力と平均余
剰電力(5 月)

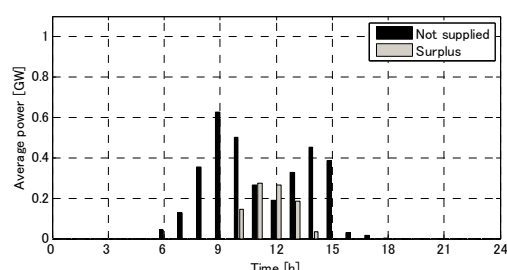


図 4.5-4 毎時の平均供給支障電力
と平均余剰電力(10 月)

以上に示すように、1 年分の負荷需要および日射量の実データを用いて、PV 出力の 1 日
前予測に基づいて UC を行うとした場合の系統運用をミュレーションによって評価し、PV の
予測誤差による供給支障電力と余剰電力の発生原因を定量的に明らかにした。供給支障電
力および余剰電力の発生は、予測誤差が原因ではあるが、電力系統側の条件にも大きく影

響される。本研究の成果は、PV 予測の技術開発や、PV が大量導入された将来の電力系統運用に応用していくことができる。

C. PV 区間予測を利用した需給運用における停電・電力余剰の評価（論文投稿中・非公開）

大関グループでは、PV 出力の前日予測だけでなく、当日の PV 出力の範囲を確率的に示す予測区間の計算手法も開発しており、ここでは予測区間情報を UC/EDC に利用するとした場合についても需給運用シミュレーションモデルを用いて評価した。

D. PV 予測誤差モデルの開発と評価（国内会議発表 D13, D10）

前 2 項目では、前日(24 時間前)の段階で予測した PV 出力に基づいて UC を作成し、予測誤差には当日の運用で対処するとしてきたが、当日運用での需給調整には発電機以外の蓄電池等の調整力が大量に必要となる。調整力の最小化を図るためには計画段階で予測誤差を考慮して UC を作成する必要があるため、UC/EDC に利用するための時刻間の相関を考慮した予測誤差モデルを開発した。

この予測誤差モデルを用いて 1 年分の予測 PV 出力カーブを作成した。カーブのばらつきが小さい日の例として 1 月 26 日(晴天予想)の予測 PV 出力カーブを図 4.5-5 に、ばらつきが大きい日の例として 1 月 12 日(曇雨天予想)の予測 PV 出力カーブを図 4.5-6 に示す。

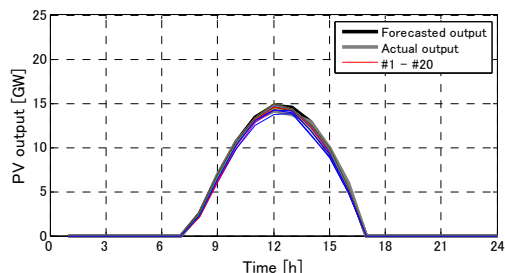


図 4.5-5 予測 PV 出力カーブ(晴天予想)

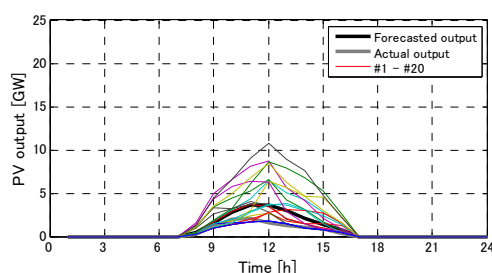


図 4.5-6 予測 PV 出力カーブ(曇天予想)

また、予測誤差を考慮しないで UC を作成する場合の 1 年分の系統運用シミュレーションも実施した。シミュレーション条件については前 2 項目と同様とし、運用時の停電・余剰については蓄電池の充放電によって対応するとした。1 日あたり充放電電力量の度数分布図(縦軸は日数)を図 4.5-7 に示す。なお、同図では充電または放電を行わない日数は含まない。

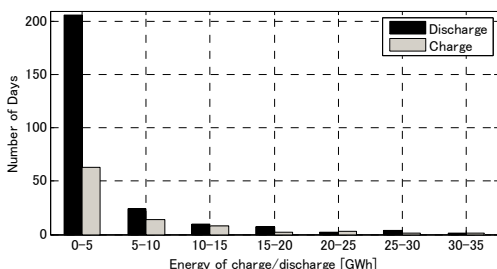


図 4.5-7 蓄電池の 1 日あたり充放電電力量の度数分布図

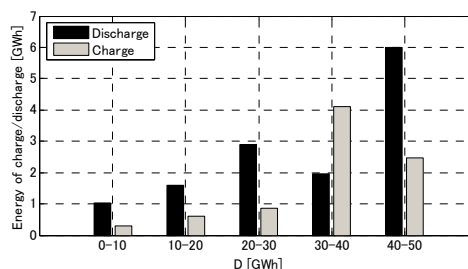


図 4.5-8 D の区間ごとの 1 日当たりの充放電電力量

これらの結果を比較することで、予測 PV 出力カーブと供給支障電力・余剰電力の関係について評価できる。予測 PV 出力カーブは予測がよく当たった場合は原予測カーブの周辺に集中し、予測があまり当たらなかった場合はばらつきが大きくなる傾向がある。本論文では、ばらつきを示す指

標として源予測との差の二乗平均平方根を1時間ごとに1日全体にわたって合計した指標 D を導入した。 D が大きいほどばらつきは大きく、小さいほどばらつきは小さい。指標 D を5区間に分けた場合の、区間ごとの1日あたり平均充電電力量と平均放電電力量を図4.5-8に示す。ここで、1日あたりの平均充放電電力量とは、ある区間における充電電力量または放電電力量の合計を、区間の全日数で除した値を示す。単調増加ではないが、 D が大きくなるにつれて平均充電電力量・放電電力量が大きくなる傾向が見られる。

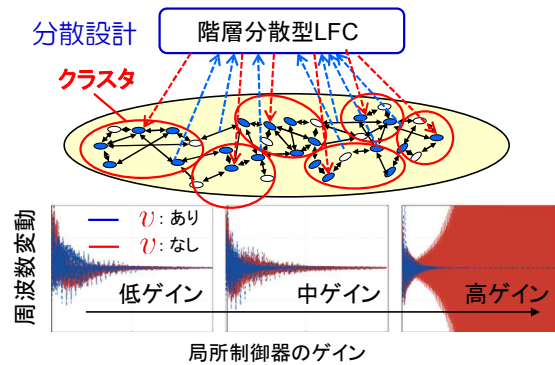


図 4.6-1 階層分散型LFC

以上に示すように、時刻間の相関を考慮した予測誤差モデルを用いて1年分の予測PV出力カーブを1日ごとに20系列ずつ作成し、予測誤差を考慮しないでUCを作成する場合の1年分の系統運用シミュレーションを行ってこれらの結果を比較した。予測PV出力カーブのばらつきと充放電電力量には一定の相関が確認され、予測誤差モデルを需給運用手法に適用することで、効果的な需給運用を行うことができる可能性を示した。

4. 6 FSでの成果

A. 階層分散型負荷周波数制御の基礎理論の構築（井村グループ）

（原著論文 A8, A13, A22, A25, A30）

太陽光発電が大量導入した際の発電不確かさによる系統全体の周波数安定性を確保するための1つの重要な方策として、広域連携がある。本FSでは、そのための方向性の一つとして、現在、主流になっている周波数偏倚 連系線電力制御(Tie line load frequency Bias Control, TBC)などの広域連携型の負荷周波数制御(Load Frequency Control, LFC)をさらに推し進めた、次々世代の広域連携型 LFC 技術を開発するために、階層分散型LFCの基盤理論を構築した。

図 4.6-1 の上部に、階層分散型LFCの構成を示す。各エリアをクラスタと呼び、クラスタ内は通常のLFCなどで制御が行われているとし、その制御器を局所制御器と呼ぶ。一方、上層の制御器では、各クラスタ間の相互作用情報(位相差)を取得し、その情報に基づいて、各クラスタ内を制御する補助信号を生成する。TBCのような位相差によるバイアスを補助信号と捉えるのではなく、より高度な情報により、安定化を図るものである。さらに、本制御手法は、クラスタ内の局所制御器がクラスタ内(外部との接続を切り離す)を安定化する限り、いかなる局所制御器であっても、上層のコントローラによって全系の安定性が保証される点が特徴的である。たとえば、図 4.6-1 の下部の図では、通常のLFCで、局所ゲインが大きくなると、全系が不安定になり得ることを、その一方で、本手法では、上層の制御器によっていかなる場合でも安定性が保証される。この概念を分散設計と呼ぶ。これは広域連携をする際の制御系設計には必須であり、その概念を実現する体系的な設計理論を世界で初めて開発した(原著論文 A22, A25)。

さらに、本研究は、クラスタ構成に関して、その可制御性の視点から重要な示唆を与える。階層化することによって、1階層化よりも2階層化の方が、最上部コントローラは、より小さなHankel特異値を多く含み、それゆえ、最上部はより小さな次元のコントローラで全系の安定性が可能であることがわかった。また、クラスタリングの違いによって上層部のコントローラのHankel特異値が大きく変化し、上部コントローラの次元も大きく変わる。この場合、上部コントローラを低次元化することが重要になるが、井村Gの石崎、井村らで世界に先駆けて開発してきた大規模ネットワーク系のクラスタ化低次元化理論を拡張し、分散制御系のコントローラ低次元化に関する理論も導出した(原著論文 A30, A8, A13)。

B. 予測型系統安定化制御(PSS)、予測型負荷周波数制御(LFC)の検討と予測制御法の評価

(井村グループ)

本 CREST で導いた予測制御法を、①予測型系統安定化制御、②予測型負荷周波数制御問題に適用し、その有用性と展開の可能性を評価した。

① 予測型系統安定化制御 (FS 第 1 フェーズにて検討)

PV 大量導入時の日射量予測および需要家モデルが確立されると、これらの予測情報から系統の擾乱を適切に抑制することが可能になると期待される。本課題では、一機無限大母線に太陽光発電が導入された系統を定め(図 4.6-2 (a))、PV 発電量の変化が与える影響を予見的に補償する手法とその効果を検討した。そして原著論文 A16, A27 で導いた H2 予測制御法を適用すると、図 4.6-2 (b)のような PV 発電量の変動に対し、図 4.6-3 の応答が確認された。図 4.6-3(a) は系統への電力的出力の変化を示したものであり、予見動作により、エネルギーの急峻な変化が抑制される様子が確認される。また、図 4.6-3(b)は相差角変化を示したものであり、予見動作により相差角の

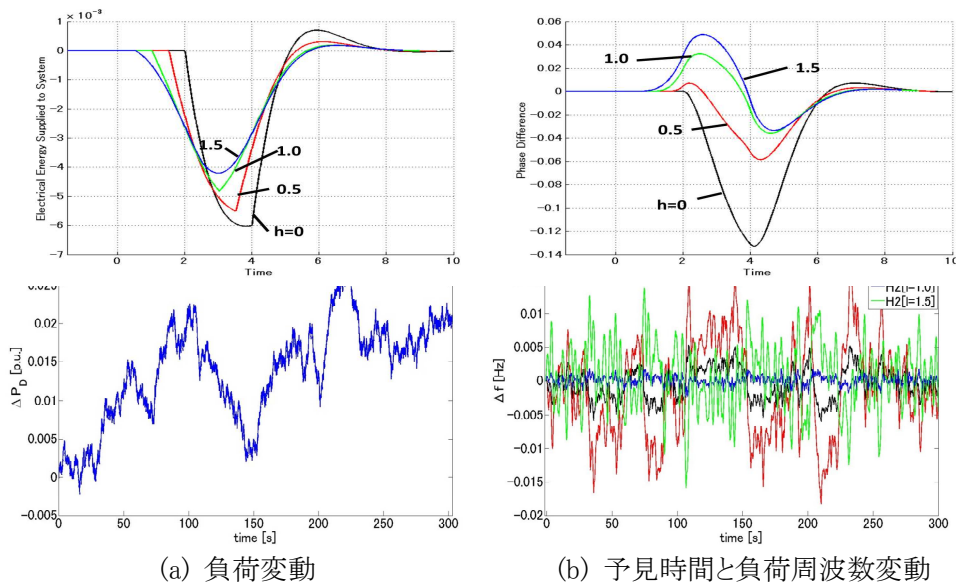
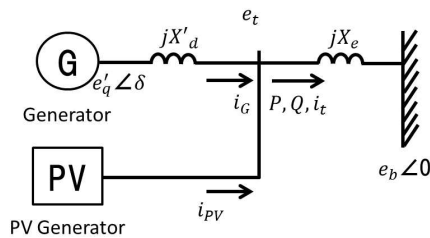


図 4.6-4 負荷周波数変動の抑制効果

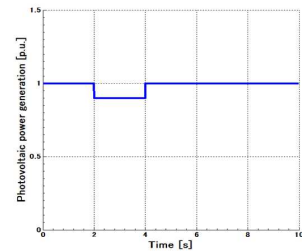
変動が効果的に抑制されることが分かる(国内会議発表 D42)。

(a) 電気エネルギー出力
(b) 相差角変化

図 4.6-3 予見時間と系統の応答



(a) 系統モデル



(b) PV 発電量の予見情報

図 4.6-2 予測型 PSS 制御

② 予測型負荷周波数制御 (FS 第 2 フェーズにて検討、益田グループとの共同研究)

PV 発電量の予測技術は EDC 等様々な運用計画に有用であり、将来的にさらに短時間の予測情報が得られれば、LFC 等の系統制御に新たな手法を導入することが可能になる。本研究では、予見型 LFC を新たに定め、需給の予測情報により負荷周波数変動を抑制する問題を検討した。そして、H2 予測制御法(原著論文 A16, A27)を導入し、図 4.6-4(a) のような昼間時の負荷変動を想定すると、対応する負荷周波数変動は図 4.6-4(b)のように求められた。これらの結果から、予見時間を増加させるにつれ、周波数変動が効果的に抑制されることが確認される。今後、負荷変動予測の不確かさと予測型 LFC の関係、数十秒単位の予測動作と LFC、EDC の制御効果を検討

する予定である(国内会議発表 D41)。

C. PV 発電量把握に向けた衛星データによる推定日射量の PV 自己診断支援システムへの活用 (植田グループ)

太陽光発電システムの発電量は、個々のシステムにおけるシステム構成(太陽電池アレイの設置傾斜角、方位角、インバータ容量など)に依存するため、より高精度に発電量を推定・把握するためにはこれらの情報を用いる必要がある。また、一般に地上気象官署等で計測されている日射量は水平面全天日射量であるため、個々の太陽電池アレイに実際に入射する傾斜面日射量を算出するには、水平面全天日射と直達日射を用いて計算によって傾斜面の全天日射を求める必要がある。植田グループではこれまで、太陽光発電自己診断支援システム「しっかり SUN」を構築し、インターネット上で公開して PV 設置者が簡易的に自身の PV システムの健全性を確認できる仕組みを提供するとともに、全国各地に設置された PV システムの設備情報や発電量の実績値の収集を行ってきた。その概要は図 4.6-5 に示したとおりであり、市役所等の地域を代表する建物の屋上に水平面全天日射と気温を測定する計測機器を設置し、その計測データを大学に設置したサーバに毎分送信する。一方、PV システム設置者は自身の PV システムの構成をシステムに登録し、定期的にある期間の発電量を登録する。この時「しっかり SUN」(図 4.6-6)は代表地点で実測された日射量と気温および設置者の PV システムの構成情報をもとに、同じ期間の発電量を推定する。この推定発電量はアレイ構成やモジュール温度、経年劣化等を考慮したものであり、PV システムが健全であり日陰等の影響がなければ得られるであろう発電量である。PV システム設置者はこの推定発電量と実際の発電量を比較することで自身の PV システムの健全性を簡易的に確認することができる。



図 4.6-6 「しっかり SUN」の地点登録画面の例

しかし、このシステムでは地域の代表地点に日射計と気温計を設置する必要がある、また同一市町村内でも代表地点と距離がある場合には推定発電量の誤差が大きくなるなど、改善すべき課題があった。今回、本 CREST 研究によるシステムの継続的な運用と高精度化に加えて FS 第一フェーズ、第2フェーズとして中島チームと連携することにより、全国市区町村の役所・役場を代表地点とした、衛星データを用いた 30 分毎の日射量および気温の取得を行い、システムの全国展開を図った。本システムへの社会的ニーズは大きく、アウトリーチ活動として行った各種講演や市民講座において多くの利用依頼が来るなど好評を博したほか、福島県川俣町との連携による取り組みにおいては地元新聞やテレビにて紹介される等、その関心の高さがうかがえた。

D. 数値モデル予測と時系列予測の融合検討&大外れ解析 (大関グループ)

今後の予測誤差改善手法として、異なる予測モデルの融合・統合が期待されている。ここでは、先行して産総研が有する数値予報モデルを入力とした SVR モデル(MSM(GPV)-SVR モデル)と東大が有する非線形時系列予測モデルの融合について検討を行った。図 4.6-7 に結果を示す。青で示すのは MSM(GPV)-SVR モデル、赤は非線形時系列モデルである。4 時間先まで非線形時系列モデルが優位であるが、5 時間先以上では SVR 前日予測が優位になる結果であった。しかしながら、融合モ



図 4.6-5 太陽光発電自己診断支援システムの概要

デルである緑の SVR 前日予測も非線形時系列モデルに入力した結果、予測誤差をどの時間でも前日予測より改善され、非線形時系列の単独モデルより予測誤差を改善できた。基礎的な検討ではあるが、予測モデルの融合により、予測誤差の改善の可能性を示した。

また予測誤差の分布を評価した。予測誤差は、現状ではロングテールを持ち、大外れが生じていることが分かった。翌日予測では、単地点においては最大/最小 $-0.75 \sim 0.72 \text{ kWh/m}^2$ の予測誤差があり、広域予測では最大最小誤差は $-0.40 \sim 0.54 \text{ kWh/m}^2$ と低減されている。1 時間先では、単地点の最大最小誤差は $-0.56 \sim 0.53 \text{ kWh/m}^2$ と翌日予測と比較すると低減され、広域では $-0.25 \sim 0.21 \text{ kWh/m}^2$ まで低減されている。また、それぞれの予測誤差のほとんどの場合において、箱髭図の箱および髭から外れている値は 20%~25% であり、稀なケースであることが分かる。この希少ケースの大外れをどのように予見するかが今後重要な課題である。

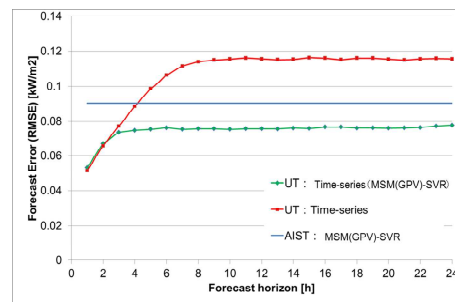


図 4.6-7 数値予報モデル入力の機械学習予測と非線形時系列モデルの融合検討結果

§ 6 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 7 件、国際(欧文)誌 30 件:フル査読付国際会議含む)

- A1. 益田泰輔, 大関崇, Joao Gari da Silva Fonseca Junior, 村田晃伸, “太陽光発電予測誤差が原因となる供給支障電力と余剰電力の評価”, 電気学会論文誌 B, vol. 134, no. 4, pp.286-295, 2014 (DOI:10.1541/ieejpes.134.286)
- A2. 小池雅和, 石崎孝幸, 植田譲, 益田泰輔, 大関崇, 定本知徳, 井村順一, “調整用火力コスト最小化に向けた不確かな太陽光発電予測に基づく蓄電池の充放電計画”, 電気学会論文誌 B, vol.134, no.6, pp.545-557 201 (DOI:http://dx.doi.org/10.1541/ieejpes.134.545)
- A3. Kotaro Hashikura, Akira Kojima and Yoshito Ohta, “On construction of an H^∞ preview output feedback law”, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol.6, No.3, pp.167-176, 2013 (DOI: http://dx.doi.org/10.9746/jcmsi.6.167)
- A4. Kotaro Hashikura, Akira Kojima and Yoshito Ohta, “Reduced-order construction of H^∞ state feedback law for discrete-time input-delayed systems,” Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers, Vol. 26, No. 12, pp. 477-488, 2013 (DOI: http://dx.doi.org/10.5687/iscie.26.477)
- A5. Hideaki Ohtake, Ken-ichi Shimose, Joao Gari da Silva Fonseca Jr, Takumi Takashima, Takashi Oozeki and Yoshinori Yamada, “Accuracy of the solar irradiance forecasts of the Japan Meteorological Agency mesoscale model for the Kanto region,” Japan. Solar Energy, Vol.98-B, pp.138-152, 2013 (DOI:10.1016/j.solener.2012.10.007.)
- A6. Akira Kojima, “A review on H^∞ preview and delayed control problems,” Proceedings of 32nd Chinese Control Conference, pp.2812--2817, Xi'an, China, July 26-28, 2013.
- A7. Kotaro Hashikura, Akira Kojima, and Yoshito Ohta, “Reduced-order construction of H^∞ state feedback law for discrete-time single input-delayed systems,” Proceedings of the 1st IFAC Workshop on Control of Systems Governed by Partial Differential Equations, pp.85-92, Sept. 25-27, 2013 (DOI: 10.3182/20130925-3-FR-4043.00037).
- A8. Tomonori Sadamoto, Takayuki Ishizaki, Jun-ichi Imura, “Low-dimensional functional observer design for linear systems via observer reduction approach,” Proc. IEEE Conference on Decision and Control, pp.776-781, Florence, Italy, Dec. 10-13, 2013 (DOI: 10.1109/CDC.2013.6759976)
- A9. Taisuke Masuta, Takashi Oozeki, Joao Gari da Silva Fonseca Junior, and Akinobu Murata, “Evaluation of economic load dispatching control based on forecasted photovoltaic power output,” IEEE ISGT2014, Washington, D.C., Feb. 20, 2014
- A10. 下瀬健一, 大竹秀明, Joao Gari da Silva Fonseca Jr., 高島工, 大関崇, 山田芳則, “気象庁メソモデルの日射予測誤差要因の解析,” 電気学会論文誌 B, Vol. 134, No.6, pp.518-526, 2014 (DOI:10.1541/ieejpes.134.518)
- A11. Takayuki Ishizaki, Masakazu Koike, Tomonori Sadamoto, and Jun-ichi Imura, “Hierarchical decentralized observers for networked linear systems,” Proc. of American Control Conference (ACC2014), pp.5718-5723, Portland, USA, June 4-6, 2014 (DOI: 10.1109/ACC.2014.6858795)
- A12. Tomonori Sadamoto, Takayuki Ishizaki, and Jun-ichi Imura, “Projective state observers for large-scale linear systems,” Proc. of 13th European Control Conference (ECC), pp.2969-2974, Strasbourg, France, June 24-27, 2014 (10.1109/ECC.2014.6862383)
- A13. 定本知徳, 石崎孝幸, 井村順一, “大規模線形システムに対する低次元関数オブザーバの設計法,” 計測自動制御学会論文集, vol. 50, no. 6, pp.478-486, 2014 (DOI: http://dx.doi.org/10.9746/sicetr.50.478)
- A14. 大竹秀明, 下瀬健一, Joao Gari da Silva Fonseca Jr, 高島工, 大関崇, 山田芳則, “気象庁週間予報モデルの日射量予測の誤差評価,” 電気学会論文誌 B, Vol. 134, No. 6,

- pp.501–509, 2014 (DOI:10.1541/ieejpes.134.501)
- A15.Takayuki Ishizaki, Masakazu Koike, Nacim Ramdani, and Jun-ichi Imura, “Monotonicity characterization of interval quadratic programming,” Proc. of 21st International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems (MTNS14), pp.792–799, Groningen, The Netherlands, July 7–11, 2014
- A16.Kotaro Hashikura and Akira Kojima, “H₂ preview control based on partial information,” 32nd Chinese Control Conference, pp.9008–9015, Nanjing, China, July 28–30, 2014 (DOI: 10.1109/ChiCC.2014.6896517)
- A17.Joao Gari da Silva Fonseca Jr., Takashi Ozeki, Hideaki Ohtake, Takumi Takashima, Kazuhiko Ogimoto, “Regional forecasts of photovoltaic power generation according to different data availability scenarios: A study of 4 method,” Progress in Photovoltaics Research and Applications, Wiley, Aug. 2014 (DOI 10.1002/pip.2528)
- A18.Taisuke Masuta, Takashi Oozeki, Joao Gari da Silva Fonseca Junior, and Akinobu Murata, “Impact of forecast error of photovoltaic power output on demand and supply operation in power system,” 18th Power Systems Computation Conference, Wroclaw, Poland, Aug. 21, 2014
- A19.Masakazu Koike, Takayuki Ishizaki, Yuzuru Ueda, Taisuke Masuta, Takashi Ozeki, Nacim Ramdani, Jun-ichi Imura, and Tomonori Sadamoto, “Planning of optimal daily power generation tolerating prediction uncertainty of demand and photovoltaics,” Proc. of 19th IFAC World Congress, pp.3657–3662, Cape Town, South Africa, Aug. 24–29, 2014
- A20.Taylan Ayken and Jun-ichi Imura, “Diffusion based stopping criterion for distributed optimization,” Proc. of 19th IFAC World Congress, pp.10512–10517, Cape Town, South Africa, Aug. 24–29, 2014
- A21.Tomonori Sadamoto, Ikuma Muto, Takayuki Ishizaki, Masakazu, Koike, and Jun-ichi Imura, “Power supply scheduling optimization from a viewpoint of spatio-temporal aggregation,” 19th IFAC World Congress, pp.4571–4577, Cape Town, South Africa, Aug. 24–29, 2014
- A22.Takayuki Ishizaki, Tomonori Sadamoto, Jun-ichi Imura, “Hierarchical distributed stabilization of power networks,” European Physical Journal Special Topics on Resilient power grids and extreme events, Vol. 223, Issue 12, pp.2461–2473, Oct. 2014 (DOI: 10.1140/epjst/e2014-02275-x)
- A23.Ken-ichi Shimose, Hideaki Ohtake, Joao Gari da Silva Fonseca Jr., Takumi Takashima, Takashi Oozeki, Yoshinori Yamada, “Impact of aerosols on the forecast accuracy of solar irradiance calculated by a numerical weather prediction model,” Eur. Phys. J. Special Topics Vol. 223, Issue 12, pp.2621–2630, Oct. 2014 (DOI:10. 1140/epjst/e2014-02211-2)
- A24.小池雅和, 石崎孝幸, 定本知徳, 井村順一, “階層分散オブザーバの設計と電力ネットワークへの適用,” システム制御情報学会論文誌, vol. 27, no. 9, pp.353–363, 2014
- A25.Tomonori Sadamoto, Takayuki Ishizaki, Jun-ichi Imura, “Hierarchical distributed control for networked linear systems,” Proc. of 53rd IEEE Conference on Decision and Control, Los Angeles, U.S.A., Dec. 15–17, 2014
- A26.Akira Kojima, “H_∞ filtering for a system with uncertain preview signals,” Proc. of 53rd IEEE Conference on Decision and Control, Los Angeles, U.S.A., Dec. 15–17, 2014 (DOI: 10.1109/CDC.2014.7040075).
- A27.Akira Kojima, “H_∞ controller design for preview and delayed systems,” IEEE Transactions on Automatic Control, regular paper, Vol. 60, No.2, pp. 404–419, 2015 (DOI: 10.1109/TAC.2014.2354911).
- A28.Takayuki Ishizaki, Jun-ichi Imura, “Clustered model reduction of interconnected second-order systems,” Nonlinear Theory and Its Applications, Institute of Electronics,

- Information and Communication Engineers, Special Section of Complex Systems Modelling and its Transdisciplinary Applications, vol.E6-N, No.1, 2015 (in press)
- A29.Hideaki Ohtake, Joao Gari da Silva Fonseca. Jr., Takumi Takashima, Takashi Oozeki and Yoshinori Yamada, “Estimation of confidence intervals of global horizontal irradiance obtained from a weather prediction model,” Energy Procedia, Vol. 59, pp.278-284, 2014 (doi:10.1016/j.egypro.2014.10.378)
- A30.Takayuki Ishizaki, Henrik Sandberg, Kenji Kashima, Jun-ichi Imura, Kazuyuki Aihara, “Dissipativity-preserving model reduction for large-scale distributed control systems,” IEEE Transactions on Automatic Control, regular paper (in press)
- A31.定本知徳, 石崎孝幸, 井村順一, “大規模線形ネットワークに対する平均値オブザーバ”, システム制御情報学会論文誌, 2015 (掲載予定)
- A32.Tomonori Sadamoto, Takayuki Ishizaki, Masakazu Koike, Yuzuru Ueda, Jun-ichi Imura, “Spatiotemporally multiresolutional optimization towards supply-demand-storage balancing under PV prediction uncertainty,” IEEE Transactions on Smart Grid, Vol.6, No.2, pp. 853-865, 2015 (DOI:10.1109/TSG.2014.2377241)
- A33.Hideaki Ohtake, Ken-ichi Shimose, Joao Gari da Silva Fonseca. Jr., Takumi Takashima, Takashi Oozeki and Yoshinori Yamada, “Seasonal and regional variations of the range of forecast errors of global irradiance by the Japanese operational physical model,” Energy Procedia, Vol. 57, pp.1247-1256, 2014 (doi:10.1016/j.egypro.2014.10.114)
- A34.Ken-ichi Shimose, Hideaki Ohtake, Joao Gari da Silva Fonseca. Jr., Takumi Takashima, Takashi Oozeki and Yoshinori Yamada, “Improvement of the Japan Meteorological Agency Meso-Scale Model for the Forecasting the Photovoltaic Power Production: Modification of the Cloud Scheme,” Energy Procedia, Vol. 59, pp1346-1353, 2014 (doi:10.1016/j.egypro.2014.10.125)
- A35.Yoshihiro Tagawa, Masakazu Koike, Takayuki Ishizaki, Nacim Ramdani, Takashi Oozeki, Joao Gari da Silva Fonseca Junior, Taisuke Masuta, Jun-ichi Imura, “Day-ahead scheduling for supply-demand-storage balancing -model predictive generation with interval prediction of photovoltaics-,” Proc. of 14th European Control Conference (ECC), Linz, Austria, July 15-17, 2015 to appear
- A36.Fumiya Watanabe, Tomonori Sadamoto, Takayuki Ishizaki, Jun-ichi Imura, “Average State Kalman Filters for Large-Scale Stochastic Networked Linear Systems,” Proc. of 14th European Control Conference (ECC), Linz, Austria, July 15-17, 2015 to appear
- A37.Kotaro Hashikura, Katsuya Umeda, Koura Hiroyuki and Akira Kojima, “Design of a periodic photovoltaic charge-discharge schedule reflecting power demand prediction error”, Proc. of 10th Asian Control Conference, Sabah, Malaysia, May 31-Jun. 3, 2015 to appear

(2)その他の著作物(総説、書籍など)

- B1. 山田芳則, 大竹秀明, 下瀬健一, 大関崇, “気象庁の現業数値予報モデルの概要とメンモデルによって予測された日射量の誤差特性,” 太陽エネルギー学会誌, Vol. 39, No. 6, pp.37-41, 2013
- B2. 大関 崇, “太陽光発電システムの発電把握・予測の技術動向,” 太陽エネルギー学会誌, Vol. 39, No. 6, 2013
- B3. 三隅良平, 下瀬健一, 岩崎杉紀, 大東忠保, 佐藤陽祐, 鷺沼昂, 大竹秀明, 古関俊也, 斎藤篤思, 橋本明弘, 山下克也, 田尻拓也, 竹見哲也, 藤吉康志, 村上正隆, 中井専人, 李根玉, “第16回雲・降水国際学会参加報告,” 天気, 60(3), 177-185, 2013 (分担執筆)

(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 13 件、国際会議 3 件)

- C1. 大竹秀明, “気象庁数値予報モデルの日射量検証と問題点,” 日本気象学会春季大会 公開気象講演会「将来の再生可能エネルギーと気象」, 東京, 2013 年 5 月 18 日
- C2. 大関崇, “再生可能エネルギーと電力事情～太陽光発電、風力発電を中心に～,” 日本気象学会春季大会 公開気象講演会「将来の再生可能エネルギーと気象」, 東京, 2013 年 5 月 18 日
- C3. 益田泰輔, “電力系統運用における発電予測の影響評価,” 第 5 回セミナー「太陽光発電システムの発電出力把握・予測技術」(招待講演), 東京, 2013 年 8 月 5 日
- C4. 井村順一, “太陽光発電の予測不確実性を加味した階層型需給バランス制御,” 第 5 回セミナー「太陽光発電システムの発電出力把握・予測技術」(招待講演), 東京, 2013 年 8 月 5 日
- C5. 大関 崇, “太陽光発電の広域予測技術に関する研究,” 一般社団法人日本太陽エネルギー学会 太陽光発電部会 第 5 回セミナー「太陽光発電システムの発電出力把握・予測技術」, (招待講演), 東京, 2013 年 8 月 5 日
- C6. Joao Gari da Silva Fonseca Jr, “太陽光発電の発電予測におけるポストプロセッシングの研究,” 一般社団法人日本太陽エネルギー学会 太陽光発電部会 第 5 回セミナー「太陽光発電システムの発電出力把握・予測技術」, (招待講演), 東京, 2013 年 8 月 5 日
- C7. 植田 譲, “太陽光発電システムのモニタリング技術,” 一般社団法人日本太陽エネルギー学会 事業委員会 セミナー「気象データと太陽光発電システムの発電量」, (招待講演), 東京, 2013 年 9 月 18 日
- C8. 植田 譲, “システム発電特性分析 (太田、北杜、STEP-PV),” 一般社団法人日本太陽エネルギー学会 太陽光発電部会 第 7 回セミナー「太陽光発電システムの発電電力量評価・推定技術の最近動向」, (招待講演), 東京, 2013 年 12 月 19 日
- C9. 植田 譲, “太陽光発電大量普及時代に求められるモニタリング技術 ～住宅用からメガソーラまで～,” 東京理科大学 総合研究機構 太陽光発電研究部門 第 4 回シンポジウム, (招待講演), 東京, 2014 年 1 月 22 日
- C10. 植田 譲, “大量普及時代に求められる PV モニタリングと性能評価技術,” 英弘精機株式会社 第 3 回日射セミナー, (招待講演), 大阪, 2014 年 1 月 30 日
- C11. 植田 譲, “太陽光発電システムのモニタリングと性能評価技術,” PV EXPO 2014 専門技術セミナー, (招待講演), 東京, 2014 年 2 月 28 日
- C12. *Jun-ichi Imura, “Towards optimal dispatch control of huge-scale power systems accepting prediction uncertainty of photovoltaic power generation,” Japanese-European transdisciplinary workshop on Resilient Power Grids and Extreme Events (Keynote Speech 招待講演) Potsdam, Germany, Oct. 7-9, 2013
- C13. 石崎孝幸, “大規模ネットワークシステムのクラスタ低次元化,” 合原プロジェクト・NEC 合同ワークショップ ビッグデータの数理モデリング:理論と実社会への応用, 東京, 2013 年 12 月 26 日
- C14. Hideaki Ohtake, Joao Gari da Silva Fonseca. Jr., Takumi Takashima, Takashi Oozeki and Yoshinori Yamada, “A comparison of global horizontal irradiance obtained from both a local forecast model and a mesoscale model,” AOGS 11th Annual Meeting 2014, Sapporo, Jul. 28- Aug. 1, 2014
- C15. 石崎孝幸, “モデル低次元化－基礎的な考え方を中心に－,” 計測自動制御学会制御部門制御理論部会制御理論合宿(特別講演), 新潟, 2014 年 9 月 21 日
- C16. *Jun-ichi Imura, “Projective state observers for large-scale network systems towards global predictors,” International Conference on Control, Automations, and Systems (ICCAS) (Tutorial session 招待講演), KINTEX, Korea, Oct. 22-25, 2014

② 口頭発表 (国内会議 55 件、国際会議 24 件)

【国内会議】

- D1. 大竹秀明, 下瀬健一, 山田芳則, Joao Gari da Silva Fonseca Jr, 高島工, 大関崇, “気象庁メソ数値予報モデルの日射量予測の予測誤差特性,” 電気学会 新エネルギー・環境/メタボリズム社会・環境システム合同研究会 –再生可能エネルギーの発電予測とシステム技術-, 東京, 2012 年 11 月 21 日
- D2. 益田泰輔, 村田晃伸, 大関崇, “太陽光発電予測を用いた経済負荷配分制御の基礎的検討,” 電力技術/電力系統技術/半導体電力変換合同研究会, 沖縄, 2013 年 3 月 4, 5 日
- D3. Jun-ichi Imura, Yuzuru Ueda, Ikuma Muto, Takayuki Ishizaki, “Toward optimal dispatch control of huge-scale power systems under prediction uncertainty of photovoltaic power generation,” 計測自動制御学会第 13 回制御部門大会, 福岡, 2013 年 3 月 6-8 日
- D4. 大竹秀明, 下瀬健一, Joao Gari da Silva Fonseca Jr, 高島工, 大関崇, 山田芳則, “東北地方における気象庁メソモデルの日射量予測誤差と雲のタイプの出現頻度,” 第 7 回ヤマセ研究会, 弘前, 2013 年 3 月 7-8 日
- D5. 大竹秀明, 下瀬健一, Joao Gari da Silva Fonseca Jr, 高島工, 大関崇, 山田芳則, “気象庁メソモデルの日射量予測の大外れの予測可能性,” 6-131, pp.238-239. 電気学会全国大会, 名古屋, 2013 年 3 月 20-22 日
- D6. 大竹秀明, “気象庁数値予報モデルの日射量検証と問題点,” 日本気象学会春季大会 公開気象講演会「将来の再生可能エネルギーと気象」, 東京, 2013 年 5 月 18 日
- D7. 大竹秀明, 下瀬健一, Joao Gari da Silva Fonseca Jr, 高島工, 大関崇, 山田芳則, “気象庁メソモデルによる日射量予測値の予測実績からみた誤差幅の把握,” 第 32 回エネルギー・資源学会研究発表会, 東京, 2013 年 6 月 6-7 日
- D8. 大竹秀明, 下瀬健一, Joao Gari da Silva Fonseca Jr, 高島工, 大関崇, 山田芳則, “気象庁メソモデルによる日射量予測値の予測実績からみた信頼区間の検討,” 電気学会 電力・エネルギー部門大会, 新潟, 2013 年 8 月 27-29 日
- D9. 大関 崇, 大竹 秀明, Joao Gari da Silva Fonseca Jr, 高島 工, 山田 芳則, 荻本 和彦, “太陽光発電システムの数時間先の発電予測に関する研究,” 電気学会 電力・エネルギー部門大会, 新潟, 2013 年 8 月 27-29 日
- D10. 村田晃伸, 益田泰輔, 大関崇, “時刻間の相関を考慮した日射量予測誤差モデル,” 電気学会 電力・エネルギー部門大会, 新潟, 2013 年 8 月 27-29 日
- D11. 下瀬健一, 大竹秀明, ジョアン ガリ ダ シルバ フォンセカ ジュニア, 高島工, 大関崇, 山田芳則, “太陽光発電予測に向けた気象庁メソモデルの日射量予測改良一日射量予測に影響を及ぼす雲量予測手法の改良に関する一検討一,” 電気学会電力・エネルギー部門大会, 238, 新潟, 2013 年 8 月 27-29 日
- D12. 定本知徳, 武藤生磨, 石崎孝幸, 小池雅和, 井村順一, “不確かな予測に基づく階層的電力需給バランス,” 計測自動制御学会制御部門制御理論部会制御理論合宿, 大阪, 2013 年 9 月 10-11 日
- D13. 益田泰輔, 村田晃伸, 大関崇, Joao Gari da Silva Fonseca Junior, “時刻間の相関を考慮した日射量予測誤差モデルを利用した電力系統運用の基礎検討,” 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
- D14. 大竹秀明, 下瀬健一, 山田芳則, Joao Gari da Silva Fonseca Jr, 高島工, 大関崇, “局地予報モデルの太陽光発電への利用と日射量予測誤差解析,” 第 15 回非静力学モデルに関するワークショップ, 札幌・北海道大学低温科学研究所, 2013 年 9 月 26-27 日
- D15. 小池雅和, 石崎孝幸, 定本知徳, 井村順一, “パラメータ依存性をもつ 2 次計画問題の解析と電力システムへの応用,” 第 56 回自動制御連合講演会, pp.178-183, 新潟, 2013 年 11 月 16-17 日
- D16. 大竹秀明, 下瀬健一, Joao Gari da Silva Fonseca Jr, 高島工, 大関崇, 山田芳則, “局地予報モデルの日射量予測誤差と太陽光発電分野への応用,” 電気学会 新エネルギー・環境/メタボリズム社会・環境システム合同研究会, 東京, 2013 年 11 月 21-22 日
- D17. 大関 崇, 大竹 秀明, Joao Gari da Silva Fonseca Jr, 高島 工, 山田 芳則, 荻本 和彦,

- “数値気象モデルを利用した太陽光発電の短時間予測に関する研究,” 電気学会 新エネルギー・環境/メタボリズム社会・環境システム合同研究会, 東京, 2013 年 11 月 21-22 日
- D18.大竹秀明, 下瀬健一, Joao Gari da Silva Fonseca Jr, 高島工, 大関崇, 山田芳則, “局地予報モデルによる日射量予測プロダクトとその誤差特性,” 平成 25 年度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, 那覇, 2013 年 11 月 28-29 日
- D19.大竹秀明, 下瀬健一, Joao Gari da Silva Fonseca Jr, 高島工, 大関崇, 山田芳則, “気象庁メソモデルによる日射量予測値の均し効果による信頼区間の低減効果,” エネルギー資源学会 研究カンファレンス, 東京, 2014 年 1 月 23-24 日
- D20.端倉 弘太郎, 梅田 勝矢, 小浦 弘之, 児島 晃, “太陽光発電導入時における電力需要予測誤差を反映した充放電計画の検討,” 計測自動制御学会第 1 回制御部門マルチシンポジウム, 調布, 2014 年 3 月 5-7 日
- D21.Tomonori Sadamoto, Takayuki Ishizaki, Jun-ichi Imura, “Projective State Observers for Large-Scale Linear Systems,” 計測自動制御学会第 1 回制御部門マルチシンポジウム, 7B2-5, 調布, 2014 年 3 月 5-7 日
- D22.小池雅和, 石崎孝幸, 定本知徳, 井村順一, “区間 2 次計画問題の単調性解析と火力機の調整力最小化問題への応用,” 計測自動制御学会第 1 回制御部門マルチシンポジウム, 5B3-1, 調布, 2014 年 3 月 5-7 日
- D23.Tomonori Sadamoto, Takayuki Ishizaki, Masakazu Koike, Ikuma Muto, Jun-ichi Imura, “Novel Framework of Power Supply Scheduling from a Viewpoint of Spatio-Temporal Aggregation,” 計測自動制御学会第 1 回制御部門マルチシンポジウム, 5B2-4, 調布, 2014 年 3 月 5-7 日
- D24.大竹秀明, Joao Gari da Silva Fonseca Jr, 高島工, 大関崇, 山田芳則, “ヤマセ時の気象庁メソモデルの日射量予測と太陽光発電への応用,” 第9回ヤマセ研究会, 東北農業研究センター, 2014 年 3 月 10-11 日
- D25.大竹秀明, Joao Gari da Silva Fonseca Jr, 高島工, 大関崇, 山田芳則, “日射量予測の信頼区間の推定 —初期値と解析エリア面積の依存性—,” 平成 26 年電気学会全国大会, 松山, 2014 年 3 月 19-21 日
- D26.大関 崇, 大竹 秀明, Joao Gari da Silva Fonseca Jr, 高島 工, 山田 芳則, 荻本 和彦, “国内気象予報データを利用した海外における太陽光発電システムの発電予測に関する研究,” 平成 26 年電気学会全国大会, 松山, 2014 年 3 月 19-21 日
- D27.益田泰輔, 大関崇, Joao Gari da Silva Fonseca Junior, 村田晃伸, “太陽光発電予測誤差が電力需給に与える影響,” 平成 26 年電気学会全国大会, 松山, 2014 年 3 月 19-21 日
- D28.内田晃介, 植田譲, 井村順一, “太陽光発電設備が大量導入された系統における低時間分解能蓄電池運用計画に関する一検討,” 平成 26 年電気学会全国大会, 松山, 2014 年 3 月 19-21 日
- D29.Fonseca Jr. J. G. S., 大関崇, 大竹秀明, 高島工, 荻本和彦, “On the Use of an Ensemble-based Approach to Improve Forecast of Photovoltaic Power Generation with Support Vector Machines,” 平成 26 年電気学会全国大会, 松山, 2014 年 3 月 19-21 日
- D30.大竹秀明, 下瀬健一, Joao Gari da Silva Fonseca Jr, 高島工, 大関崇, 山田芳則, “太陽光発電量予測研究グループ 2014 電力システムへの気象モデルの日射量予測値の応用利用,” 日本気象学会春季大会, 横浜, D206, 2014 年 5 月 22 日
- D31.大竹秀明, Joao Gari da Silva Fonseca Jr, 高島工, 大関崇, 山田芳則, “局地モデルから出力される日射量予測とその予測精度の検証,” 第 33 回エネルギー・資源学会研究発表会, 大阪国際交流センター, 2014 年 6 月 10-11 日
- D32.大竹秀明, Joao Gari da Silva Fonseca Jr, 高島工, 大関崇, 山田芳則, “領域拡張された局地モデルによる日射量予測の誤差検証,” 電気学会電力・エネルギー部門大会, 京都, 2014 年 9 月 10-12 日
- D33.益田泰輔, 大関崇, Joao Gari da Silva Fonseca Junior, 村田晃伸, “太陽光発電予測誤差

- を考慮した確定的起動停止計画手法の基礎検討,” 電気学会電力・エネルギー部門大会, 京都, 2014 年 9 月 10-12 日
- D34. Fonseca Jr. J. G. S., 大関崇, 大竹秀明, 高島工, 荻本和彦, “Study on the applicability of a method to obtain prediction intervals for one-hour-ahead forecasts of insolation,” 電気学会電力・エネルギー部門大会, 京都, 2014 年 9 月 10-12 日
- D35. 益田泰輔, 大関崇, Joao Gari da Silva Fonseca Junior, 村田晃伸, “太陽光発電予測を利用した電力系統運用における運転予備力の評価,” 電気学会電力技術/電力系統技術合同研究会, 大阪, 2014 年 9 月 24 日
- D36. 大竹秀明, Joao Gari da Silva Fonseca Jr, 高島工, 大関崇, 山田芳則, “局地モデルの太陽光発電への利用計画とヤマセ時の日射量予測の事例解析,” ヤマセ研究会, 弘前大, 2014 年 10 月 8-9 日
- D37. 原辰次, 井村順一, 津村幸治, 植田譲, “エネルギーネットワークシステムに対するグローバル制御系設計,” 第 57 回自動制御連合講演会, pp.935-942, 渋川, 2014 年 11 月 10-11 日
- D38. 田川芳洋, 小池雅和, 石崎孝幸, Nacim Ramdani, 大関崇, Joao Gari da Silva Fonseca Junior, 益田泰輔, 井村順一, “太陽光発電の区間予測を利用したモデル予測制御型発電計画,” 第 57 回自動制御連合講演会, pp.943-949, 渋川, 2014 年 11 月 10-11 日
- D39. 武藤生磨, 石崎孝幸, 定本知徳, 小池雅和, 井村順一, “需要側への移動平均型電力消費要求を用いた需給-蓄電バランシング,” 第 57 回自動制御連合講演会, pp.955-962, 渋川, 2014 年 11 月 10-11 日
- D40. 端倉 弘太郎, 小浦 弘之, 梅田 勝矢, 児島 晃, “ロバストモデル予測制御による太陽光蓄電池の周期的運用,” 第 57 回自動制御連合講演会, pp.1500-1507, 2A08-5, 渋川, 2014 年 11 月 10 日-12 日
- D41. 發知 諒, 端倉 弘太郎, 児島 晃, 益田 泰輔, “予見補償を導入した負荷周波数制御,” 第 57 回自動制御連合講演会, pp.1514-1516, 2A08-7, 渋川, 2014 年 11 月 10 日-12 日
- D42. 梅田 勝矢, 端倉 弘太郎, 児島 晃, “太陽光発電大量導入時の系統予見安定化制御,” 第 57 回自動制御連合講演会, pp.1842-1845, 3A00-2, 渋川, 2014 年 11 月 10 日-12 日
- D43. 大竹秀明, Joao Gari da Silva Fonseca Jr, 高島工, 大関崇, 山田芳則, “局地モデルから出力される日射量予測値の信頼区間の推定,” 平成 26 年度 日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会 Korean Solar Energy Society 福島復興支援 合同研究発表会, いわき, 2014 年 11 月 13-14 日
- D44. 内田晃介, 植田譲, 大関崇, 井村順一, “PV 出力予測を用いた住宅群の公平なピークカット負担を目的とした充放電手法の検討,” 新エネルギー・環境/メタボリズム社会・環境システム合同研究会, pp13-18, FTE-15-3, MES-15-3, 名古屋, 2015 年 1 月 15-16 日
- D45. 大竹秀明, Joao Gari da Silva Fonseca Jr, 高島工, 大関崇, 山田芳則, “気象庁現業モデルによる日射量予測大外れの事例解析,” 電気学会 新エネルギー・環境/メタボリズム社会・環境システム合同研究会 再生可能エネルギーの発電予測とシステム技術, 名古屋, 2015 年 1 月 15-16 日
- D46. 加藤拓朗, 石崎孝幸, 小池雅和, 井村順一, “マルコフパラメータマッチングに基づく離散時間線形システムの多時間分解能制御,” 計測自動制御学会第 2 回制御部門マルチシンポジウム, 532-4, 千住, 2015 年 3 月 5-7 日
- D47. 定本知徳, 石崎孝幸, 井村順一, “グローバルな観点による拡大可能なネットワークシステムの制御,” 計測自動制御学会第 2 回制御部門マルチシンポジウム, 533-5, 千住, 2015 年 3 月 5-7 日
- D48. 渡邊郁弥, 定本知徳, 石崎孝幸, 井村順一, “大規模線形ネットワークシステムに対する平均値カルマンフィルタ,” 計測自動制御学会第 2 回制御部門マルチシンポジウム, 533-4, 千住, 2015 年 3 月 5-7 日
- D49. 小浦弘之, 端倉弘太郎, 児島晃, “太陽光発電大量導入を想定した短周期経済負荷配分制御,” 第 2 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, PS-10, 足立, 2015

年 3 月 4 日-7 日

- D50. 下瀬健一, 大竹秀明, Joao Gari da Silva Fonseca Jr., 高島工, 大関崇, 山田芳則, “太陽光発電予測に向けたエアロゾルが日射予測に及ぼす影響の調査”, 第 36 回日本気象学会九州支部発表会, 鹿児島, 2015 年 3 月 7 日
- D51. 大竹秀明, 高島工, 大関崇, Joao Gari da Silva Fonseca Jr, 山田芳則, “数値予報モデルによる前日日射予測の大外れの予兆”, 電気学会全国大会, 東京都市大学, 2014 年 3 月 24-26 日
- D52. 早川貫之, 植田譲, 井村順一, 鄭心知, “多様な需要家のアグリゲーションによる経済的効果及び PV 逆潮流削減効果の評価”, 平成 27 年電気学会全国大会, 6-146, 東京, 2015 年 3 月 24-26 日
- D53. 鴨野恭平, 植田譲, “スマートメータおよび日射計測を用いた配電系統における太陽光発電出力のリアルタイム把握”, 平成 27 年電気学会全国大会, 6-075, 東京, 2015 年 3 月 24-26 日
- D54. 大竹秀明, 高島工, 大関崇, Joao Gari da Silva Fonseca Jr, 山田芳則, “数値予報モデルと予測誤差分析. (一般社団法人日本太陽エネルギー学会 太陽光発電部会 第 13 回セミナー「太陽光発電システムの発電出力把握・予測技術(2)」, (株)東陽テクニカ/本社, 2014 年 3 月 27 日
- D55. 大竹秀明, 高島工, 大関崇, Joao Gari da Silva Fonseca Jr, 山田芳則, “広域エリア太陽光発電のための日射量予測大外れの事例解析”, 第 11 回ヤマセ研究会, 東北大学, 2015 年 3 月 27-28 日

【国際会議等】

- E1. Hideaki Ohtake, Joao Gari da Silva Fonseca. Jr., Takumi Takashima, Takashi Oozeki and Yoshinori Yamada, “Regional and seasonal characteristics of shortwave radiation by the Japan Meteorological Agency mesoscale model for the forecast of a photovoltaic power production,” 第 2 回非静力学モデルに関する国際ワークショップ, 仙台, 2012 年 11 月 28-30 日
- E2. Hideaki Ohtake, Ken-ichi Shimose, Joao Fonseca, Takumi Takashima, Takashi Oozeki and Yoshinori Yamada, “Characteristics of global horizontal irradiance forecasts by the Japan Meteorological Agency mesoscale model,” 2nd International Conference Energy & Meteorology (ICEM 2013), Meteo-France International Conference Centre, 25-28, June, 2013
- E3. Yuzuru Ueda, “Analysis result of voltage rise and simulations of battery integration for residential PV systems,” Special Session on SICE Annual Conference (organized by S. Hara, T. Suzuki, J. Imura), MoAT15.4, Nagoya, Sept. 14-17, 2013
- E4. Hideaki Ohtake, Ken-ichi Shimose, Joao Gari da Silva Fonseca Jr, Takumi Takashima, Takashi Oozeki, Yoshinori Yamada, “Range of forecast errors of global irradiance by the Japan Meteorological Agency numerical weather prediction model for the PV power forecast,” Proceedings of 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EUPVSEC), pp.3638-3643, Paris, France, Sept. 30-Oct. 4, 2013 (DOI: 10.4229/28thEUPVSEC2013-5AO.9.3.)
- E5. Takashi Oozeki, Joao Gari da Silva Fonseca Junior, Hideaki Ohtake, Ken-ichi Shimose, Takumi Takashima, Kazuhiko Ogimoto, “Development of the regional photovoltaic power forecasting using irradiation data from a few meteorological stations,” Proceedings of 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EUPVSEC), pp.3928-3930, Paris, France, Sept. 30-Oct. 4 2013 (DOI: 10.4229/28thEUPVSEC2013-5BV.4.26)
- E6. Jun-ichi Imura, “Spatiotemporal-resolved supply and demand balancing based on prediction of photovoltaic power generation,” Mini-Workshop on Multiscale Energy

- (organized by Hara FS), Tokyo, Oct. 17, 2013
- E7. Yuzuru Ueda, "Lessons learnt from the Demonstration research project on clustered PV systems," Mini-Workshop on Multiscale Energy (organized by Hara FS), Tokyo, Oct. 17, 2013
 - E8. Hideaki Ohtake, Ken-ichi Shimose, Joao Gari da Silva Fonseca. Jr., Takumi Takashima, Takashi Oozeki and Yoshinori Yamada, "Seasonal and regional variations of the range of forecast errors of global irradiance by the Japanese operational physical model," ISES solar world congress 2013, Cancun, Mexico, Nov. 3-7, 2013
 - E9. Ken-ichi Shimose, Hideaki Ohtake, Joao Gari da Silva Fonseca Jr., Takumi Takashima, Takashi Oozeki, Yoshinori Yamada, "Improvement of the Japan meteorological agency meso-scale model for the forecasting the photovoltaic power production: modification of the cloud scheme," ISES Solar World Congress 2013, Cancun, Mexico, Nov. 3-7 2013
 - E10. Jun-ichi Imura, "Spatiotemporal-resolved supply/demand balancing for huge-scale power systems," Workshop on of IEEE Conference on Decision and Control (organized by Hara FS), Firenze, Italy, Dec.11, 2013
 - E11. Jun-ichi Imura, "Spatiotemporal-resolved supply-demand balancing for huge-scale power systems under PV prediction uncertainty," Seminar talk at KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, Dec.16, 2013
 - E12. Hideaki Ohtake, Joao Gari da Silva Fonseca. Jr., Takumi Takashima, Takashi Oozeki and Yoshinori Yamada, "Estimation of confidence intervals of global horizontal irradiance obtained from a weather prediction model," European Geosciences Union (EGU) General assembly, Vienna, Austria, April 28, 2014
 - E13. Kosuke Uchida and Yuzuru Ueda, "Study on SOC schedul and BESS control for harmonized EMS in power grid with PV," 2014 IEEE Innovative Smart Grid Technologies Conference-Asia (ISGT ASIA), Kuala Lumpur, Malaysia, May 20-23, 2014
 - E14. Takayuki Ishizaki, Masakazu Koike, Nacim Ramdani, and Jun-ichi Imura, "Solving interval quadratic programming via a monotonicity-based approach," 7th Small Workshop on Interval Methods (SWIM2014), June 2014
 - E15. Tomonori Sadamoto, "Hierarchical distributed control for networked linear systems," Seminar talk at KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 27, May, 2014
 - E16. Taisuke Masuta, Takashi Oozeki, Joao Gari da Silva Fonseca Junior, Akinobu Murata, and Sekyung Han, "Impact of hot Reserve on power system operation using photovoltaic generation forecast," 20th International Conference on Electrical Engineering, Jeju, Korea, June 15-19, 2014
 - E17. Joao Gari da Silva Fonseca Jr., Takashi Oozeki, Hideaki Ohtake, Takumi Takashima, Kazuhiko Ogimoto, "On the use of maximum likelihood estimation and data similarity to obtain prediction intervals for forecasts of photovoltaic power generation," Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering 2014, pp.1181-1188, Jeju, Korea, June 15-19, 2014
 - E18. Masakazu Koike, "Monotonicity characterization of interval quadratic programming," Seminar talk at KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 4, July, 2014
 - E19. Joao Gari da Silva Fonseca Jr., Takashi Oozeki, Hideaki Ohtake, Takumi Takashima, Kazuhiko Ogimoto, "Development of a method to provide prediction intervals for forecasts of power generation of photovoltaic systems," Proceedings of the Grand Renewable Energy 2014 International Conference and Exhibition, Tokyo - Japan, July, 2014
 - E20. Hideaki Ohtake, Joao Gari da Silva Fonseca. Jr., Takumi Takashima, Takashi Oozeki and Yoshinori Yamada, "Global horizontal irradiance obtained from the local forecast model by the Japan Meteorological Agency," Grand Renewable Energy 2014 International

Conference and Exhibition, Tokyo, July 27 - Aug. 1, 2014

- E21. Fonseca Jr. J. G. S., Oozeki T., Ohtake, H., Takashima T., Ogimoto K., “Preliminary study on prediction intervals for regional forecasts of photovoltaic power generation in Japan,” Proceedings of the World Renewable Energy Congress XIII, London - United Kingdom, August, 2014
- E22. Hideaki Ohtake, Joao Gari da Silva Fonseca. Jr., Takumi Takashima, Takashi Oozeki and Yoshinori Yamada, “Accuracy of the global horizontal irradiance obtained from a local forecast model,” Proceedings of 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EUPVSEC), Amsterdam, The Netherlands, Sept. 22-26, 2014
- E23. Joao Gari da Silva Fonseca Jr., Takashi Oozeki, Hideaki Ohtake, Takumi Takashima, Kazuhiko Ogimoto, “A preliminary study on one-hour-ahead forecasts of insolation in Japan,” Proceedings of the 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EUPVSEC), Amsterdam, The Netherlands, Sept. 22-26, 2014
- E24. Hideaki Ohtake, Joao Gari da Silva Fonseca. Jr., Takumi Takashima, Takashi Oozeki and Yoshinori Yamada, “Comparison of the forecast of global horizontal irradiance obtained from numerical weather prediction models with different horizontal resolution,” The 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion 2014 (WCPEC-6), Kyoto, Nov. 23 -27, 2014

③ ポスター発表 (国内会議 11 件、国際会議 8 件)

- F1. Hideaki Ohtake, Ken-ichi Shimose, Joao Gari da Silva Fonseca. Jr., Takumi Takashima, Takashi Oozeki and Yoshinori Yamada, “Regional and seasonal characteristics of shortwave radiation by the Japan Meteorological Agency mesoscale model for the forecast of a photovoltaic power production,” AMS Fourth Conference on Weather, Climate, and the New Energy Economy, Austin, Jan. 6-8 2013
- F2. 武藤生磨, 井村順一, 植田譲, 石崎孝幸, “大量導入された太陽光発電を含む電力ネットワークの階層型電力配分制御,” 計測自動制御学会第 13 回制御部門大会、福岡、2013 年 3 月 6-8 日
- F3. 下瀬健一, 大竹秀明, ジョアン ガリ ダ シルバ フォンセカ ジュニア, 高島工, 大関崇, 山田芳則, “PV 発電予測に向けた気象庁メソ数値予報モデルの日射予測の改良 -日射予測と雲量予測-,” 第 10 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム, M-8, 金沢, 2013 年 5 月
- F4. 大竹秀明, 下瀬健一, 山田芳則, Joao Gari da Silva Fonseca Jr, 高島工, 大関崇, “太陽光発電量予測研究グループ, 気象庁メソモデルの日射量予測外れ時における雲のタイプの出現頻度,” 日本気象学会春季大会, 東京, 2013 年 5 月 15-18 日
- F5. 大竹秀明, 下瀬健一, Joao Gari da Silva Fonseca Jr, 高島工, 大関崇, 山田芳則, “気象庁メソモデルによる日射量予測の実績から解析された誤差幅の特徴,” 第 10 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム, 石川県立音楽堂, 2013 年 5 月 23 日-24 日
- F6. Hideaki Ohtake, Ken-ichi Shimose, Joao Fonseca, Takumi Takashima, Takashi Oozeki and Yoshinori Yamada, “Mapping of forecast errors of global horizontal irradiance obtained from the Japan Meteorological Agency mesoscale model,” 13th EMS annual meetings, Reading Univ, UK, Sept. 9-14, 2013
- F7. Takashi Oozeki, Joao Gari da Silva Fonseca Junior, Hideaki Ohtake, Ken-ichi Shimose, Takumi Takashima, Kazuhiko Ogimoto, “Development of the regional photovoltaic power forecasting using irradiation data from a few meteorological stations,” 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC), Paris, France, Sept. 30- Oct. 4 2013
- F8. Ken-ichi Shimose, Hideaki Ohtake, Joao Gari da Silva Fonseca Jr., Takumi Takashima, Takashi Oozeki, Yoshinori Yamada, “Improvement of the cloud scheme of the Japan

- Meteorological Agency meso-scale model for the forecasting the photovoltaic power production,” 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC), France, Sept. 30-Oct. 4 2013
- F9. 下瀬健一, 大竹秀明, ジョアン ガリ ダ シルバ フォンセカ ジュニア, 高島工, 大関崇, 山田芳則, “太陽光発電予測に向けた気象庁メソモデルの直達日射量と散乱日射量の予測精度検証,” 日本気象学会秋季大会, P117, 仙台, 2013 年 11 月 19-22 日
- F10. 下瀬健一, 大竹秀明, ジョアン ガリ ダ シルバ フォンセカ ジュニア, 高島工, 大関崇, 山田芳則, “太陽光発電予測に向けた気象庁メソモデルの日射量予測改良—日射量予測に影響を及ぼす雲量予測手法の改良—,” 日本気象学会秋季大会, P317, 仙台, 2013 年 11 月 19-22 日
- F11. 大竹秀明, 下瀬健一, Joao Gari da Silva Fonseca Jr, 高島工, 大関崇, 山田芳則, “局地予報モデル(LFM)の太陽光発電への利用と MSM 日射量予測との比較,” 日本気象学会秋季大会, 仙台, 2013 年 11 月 19-22 日
- F12. 大竹秀明, Joao Gari da Silva Fonseca Jr, 高島工, 大関崇, 山田芳則, “気象庁局地モデルから得られる日射量予測高分解能プロダクトの検証,” 学振175シンポ 宮崎, 2014 年 7 月 3-4 日
- F13. Hideaki Ohtake, Joao Gari da Silva Fonseca. Jr., Takumi Takashima, Takashi Oozeki and Yoshinori Yamada, “The characteristics of forecast errors of the global horizontal irradiance obtained from a local forecast model,” 14th Conference on Cloud Physics, Boston, USA, July 7-12, 2014
- F14. 大竹秀明, Joao Gari da Silva Fonseca Jr, 高島工, 大関崇, 宇田川佑介, 山田芳則, “電力系統運用のための気象予測情報の利用 — その 1— 局地モデルの日射量予測値の信頼区間推定,” 日本気象学会秋季大会, 福岡, 2014 年 10 月 21-23 日
- F15. Masakazu Koike, Takayuki Ishizaki, Tomonori Sadamoto, Jun-ichi Imura, “Optimal load dispatch towards supply-demand-storage balancing under prediction uncertainty of photovoltaic power generation,” IRED 2014, Kyoto, Nov. 18-20, 2014
- F16. Takashi Oozeki, Joao Gari da Silva Fonseca Jr., Hideaki Ohtake, Takumi Takashima, Yoshinori Yamada, and Kazuhiko Ogimoto, “Development of short term irradiance Forecasting Using LFM model in Japan,” The 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion 2014 (WCPEC-6), Kyoto, Nov. 23 -27, 2014
- F17. Kosuke Uchida, Yuzuru Ueda, “Study on BESS Operation Planning Considering with SOC of Individual Houses for Harmonized EMS,” The 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion 2014 (WCPEC-6), 8WePo. 8, 2 pages, Kyoto, Nov. 23-27, 2014
- F18. 具利晟, 石崎孝幸, 井村順一, “ディスクリプタ型線形ネットワークシステムの階層分散制御,” 計測自動制御学会第 2 回制御部門マルチシンポジウム, PS-51, 千住, 2015 年 3 月 5-7 日
- F19. 宮沢奈津矢, 小池雅和, 石崎孝幸, 井村順一, “区間 2 次計画問題に対する解の単調性を利用した解法アルゴリズム,” 計測自動制御学会第 2 回制御部門マルチシンポジウム, PS-53, 千住, 2015 年 3 月 5-7 日

(4)知財出願

- ①国内出願 (0 件) 該当なし
- ②海外出願 (0 件) 該当なし
- ③その他の知的財産権 該当なし

(5)受賞・報道等

- ①受賞(顕著な受賞の前に*を付記してください)

- G1. *端倉弘太郎, 児島 晃, 太田快人, 計測自動制御学会論文賞・武田賞,
受賞論文 Kotaro Hashikura, Akira Kojima, and Yoshito Ohta,

- “On construction of an H-infinity preview output feedback law,”
SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 6, No. 3, pp. 167-176 (2013 年 5 月)
- G2. *Tomonori Sadamoto, Student Best Paper Award Finalist of European Control Conference 2014
受賞論文 Tomonori Sadamoto, Takayuki Ishizaki, and Jun-ichi Imura,
“Projective state observers for large-scale linear systems,”
13th European Control Conference (ECC), Strasbourg, France, June 24-27, 2014
- G3. *Fonseca Jr. J. G. S., Conference Best Paper Award of International Conference on Electrical Engineering 2014
受賞論文 Joao Gari da Silva Fonseca Jr., Takashi Oozeki, Hideaki Ohtake, Takumi Takashima, Kazuhiko Ogimoto,
“On the use of maximum likelihood estimation and data similarity to obtain prediction intervals for forecasts of photovoltaic power generation,”
to be published in the ICEE 2014 special edition of the Journal of Electrical Engineering & Technology, KIEE, 2015.

②マスコミ(新聞・TV等)報道(プレス発表をした場合にはその概要もお書き下さい。)

- H1. 植田 譲 福島民報, “川俣でシステム運用開始「太陽光」きちんと発電してる?,”
2014 年 2 月 4 日
- H2. 植田 譲 KFB 福島放送, “太陽光発電自己診断システム運用開始,” 川俣, 2014 年 2 月 4 日

③その他

- I1. 大関 崇, “太陽光発電システムの発電予測技術開発,” RENEWABLE ENERGY 2013 併催シンポジウム, 2013(口頭発表)
- I2. ポスター展示:産業技術総合研究所 太陽光発電工学研究センター, “太陽光発電の予測不確実性を許容する超大規模電力最適配分制御,” イノベーション・ジャパン 2013, 2013(ポスター発表)
- I3. 大関 崇, “太陽光発電の発電予測技術の現状と課題,” 広域予測技術に関する研究, 電力技術懇談会, 2014(口頭発表)
- I4. 大関 崇, “太陽光発電の発電予測技術の概要,” CEE ワークショップ「再生可能エネルギー発電導入のための気象データ活用」, 2014(口頭発表)
- I5. 石崎孝幸, 井村順一, “東京工業大学 大学院情報理工学研究科 情報環境学専攻 井村研究室,” 電気学会論文誌 B, 研究グループ紹介, Vol. 134, No.6, PLN6-2, 2014
- I6. 大関 崇, “発電予測技術の最新動向,” 「第 31 回太陽光発電システムシンポジウム」, 2014(口頭発表)
- I7. 大関 崇, “日射/太陽光発電出力の予測手法の開発動向,” 専門講習会「風力・太陽光発電の出力予測技術」, 2014(口頭発表)
- I8. 山田 芳則, “気象予測,” 専門講習会「風力・太陽光発電の出力予測技術」, 2014(口頭発表)
- I9. 植田譲, “太陽光発電に関する基本知識～私たちの生活がどう変わるの? メリット・デメリット～,” 狛江市 環境講演会, 狛江市役所4階特別会議室, 2014 年 7 月 12 日

(6)成果展開事例

①実用化に向けての展開

- ・ 非公開

②社会還元的な展開活動

- 本研究成果、活動状況をインターネット(URL; <http://www.cyb.mei.titech.ac.jp/crest/index.html>)で公開し、情報提供している。
- 開発した太陽光発電自己診断支援システム「しっかり SUN」を「<http://ssspv.net/>」にて公開中。

§ 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9日	第1回 PV-EMS ミーティング(非公開)	産総研 OSL(2-12) 第5会議室	11人	キックオフミーティング
2012年10月29日	PV-EMS 個別テーマミーティング(非公開)	東工大 EEI 棟 411 会議室	7人	問題設定に関するミーティング
2012年12月19日	第1回 PV-EMS セミナー	東工大 西8W棟 101 室	15人	学術交流: Cai Kai 研究員(Tronto Univ)を招聘し、招待公演を行った。
2012年12月25日	第2回 PV-EMS ミーティング(非公開)	東工大 西8W棟 101 室	11人	問題設定に関するミーティング
2013年1月11日	PV-EMS 個別テーマミーティング(非公開)	東工大 西8W棟 410 室	6人	問題設定に関するミーティング
2013年2月4日	PV-EMS 個別テーマミーティング(非公開)	東工大 西8W棟 410 室	4人	問題設定に関するミーティング
2013年2月28日	第3回 PV-EMS ミーティング(非公開)	産総研 OSL(2-12) 第5会議室	9人	研究進捗報告会
2013年3月27日	PV-EMS 個別テーマミーティング(非公開)	東工大 西8W棟 410 室	6人	問題設定に関するミーティング
2013年4月5日	第4回 PV-EMS ミーティング(非公開)	産総研 (つくば)	18人	研究進捗報告会
2013年5月16日	第2回 PV-EMS セミナー	東工大	35人	学術交流 Nacim Ramdani 教授を招聘し、招待講演を行った。
2013年6月8日	第1回井村 FS 個別ミーティング(非公開)	東海大	5人	FS: 中島チームとの事前打合せ
2013年7月8日	第3回 PV-EMS セミナー	東工大	35人	学術交流 Henrik Sandberg 教授を招聘し、招待講演を行った。
2013年7月11日	第5回 PV-EMS ミーティング(非公開)	電中研 (赤城)	18人	研究進捗報告会
2013年8月5日	一般社団法人日本太陽エネルギー学会太陽光発電部会第5回セミナー「太陽光発電システムの発電出力把握・予	東京	100人	学術交流 学会セミナーでの協力

	測技術」(協力)			
2013 年 9 月 10 日	第 2 回井村 FS 個別ミー ティング(非公開)	東工大	4 人	FS:鈴木(秀)チームとの事 前打合せ
2013 年 9 月 13 日	第 4 回 PV-EMS セミナー (原チームとともに)	東工大	40 人	学術交流 Lucy Pao 教授を招聘し、招 待講演を行った。
2013 年 9 月 15 日	第 3 回井村 FS 個別ミー ティング(非公開)	名古屋	2 人	FS:太田チームとの事前打 合せ
2013 年 9 月 16 日	SICE Annual Conference 2013 JST CREST Special Session:NextGenerati on Distributed Energy Management Systems I, II (原チーム, 鈴木(達)チ ームとともに)	名古屋	50 人	学術交流 国際学会での特別セッションとして Lucy Pao 教授と Anuradha Annaswamy 教授を招聘し、 Keynote Speech を含む OS を行った。
2013 年 9 月 19 日	第 5 回 PV-EMS セミナー (原チームとともに)	東工大	40 人	学術交流 Mandayam Srinivasan 教 授, Anuradha Annaswamy 教授を招聘し、招待講演を 行った。
2013 年 9 月 20 日	第 4 回井村 FS 個別ミー ティング(非公開)	東工大	6 人	FS:鈴木(秀)チームとの事 前打合せ
2013 年 9 月 24 日	第 6 回 PV-EMS ミーティ ング(非公開)	東工大	17 人	研究進捗報告会
2013 年 9 月 24 日	総括サイトビジット	東工大	19 人	藤田総括への研究進捗報 告会議
2013 年 10 月 17 日	Mini-Workshop on Multiscale Energy Management (薄チーム, 原チームと ともに)	東工大	30 人	学術交流
2013 年 10 月 24 日	第 1 回井村 FS ミーティ ング(非公開)	東工大	20 人	FS 第 1 フェーズ キックオフミーティング
2013 年 11 月 7 日	第 6 回 PV-EMS セミナー	東工大	18 人	学術交流 A. Agung Julius 教授を招 聘し、招待講演を行った。
2013 年 11 月 8 日	第 7 回 PV-EMS セミナー (石井チームとともに)	東工大	35 人	学術交流 Graziano Chesi 教授を招聘 し、招待講演を行った。
2013 年 11 月 11 日	第 8 回 PV-EMS セミナー	東工大	15 人	学術交流 Frederik Deroo 氏を招聘 し、招待講演を行った。
2013 年 11 月 15 日	第 5 回井村 FS 個別ミー ティング(非公開)	東工大	6 人	FS:杉原チームとの事前打 合せ

2013 年 11 月 19 日	第 9 回 PV-EMS セミナー (合原 PJ 共同開催)	東工大	30 人	学術交流 Henk Nijmeijer 教授を招聘 し、招待講演を行った。
2013 年 11 月 22 日	第 6 回井村 FS 個別ミー ティング(非公開)	京大	11 人	FS: 太田, 鈴木(秀)チームと の打合せ
2013 年 11 月 25 日	第 7 回 PV-EMS ミーティ ング(非公開)	産総研(つ くば)	20 人	研究進捗報告会
2013 年 11 月 26 日	第 7 回井村 FS 個別ミー ティング(非公開)	電中研(大 手町)	10 人	FS: 杉原チームとの事前打 合せ
2013 年 12 月 10 日	第 8 回井村 FS 個別ミー ティング(非公開)	Firenze	2 人	FS: 東チームとの事前打合 せ
2013 年 12 月 20 日	第 10 回 PV-EMS セミナー (原チーム, 石井チーム とともに)	東工大	40 人	学術交流 Yang Shi 教授を招聘し、招 待講演を行った。
2014 年 1 月 9 日	第 8 回 PV-EMS ミーティ ング(非公開)	東工大	16 人	研究進捗報告会
2014 年 1 月 9 日	第 2 回井村 FS ミーティ ング(非公開)	東工大	30 人	FS 会議: マルタ, 山西, 三 平アドバイザー出席
2014 年 2 月 8 日	第 9 回井村 FS 個別ミー ティング(非公開)	京大	18 人	FS: 太田, 鈴木(秀), 造賀チ ームとの打合せ
2014 年 2 月 10 日	第 11 回 PV-EMS セミナー	東工大	15 人	学術交流 Martin Andreasson 氏を招 聘し、招待講演を行った。
2014 年 2 月 24 日	第 9 回 PV-EMS ミーティ ング(非公開)	産総研(つ くば)	20 人	研究進捗報告会
2014 年 2 月 26 日	第 10 回井村 FS 個別ミ ーティング(非公開)	電中研(大 手町)	10 人	FS: 杉原チームと打合せ
2014 年 2 月 26 日	第 11 回井村 FS 個別ミ ーティング(非公開)	東海大	17 人	中島チームの FS 会議とと もに実施
2014 年 3 月 6 日	第 12 回井村 FS 個別ミ ーティング(非公開)	電通大	2 人	FS: 東チームと打合せ
2014 年 3 月 17 日	第 10 回 PV-EMS ミーティ ング(非公開)	東工大	17 人	研究進捗報告会
2014 年 3 月 17 日	第 3 回井村 FS ミーティ ング(非公開)	東工大	30 人	FS 会議: 山西, 三平アドバイザー出席
2014 年 4 月 21 日	FS 第2フェーズ事前ミー ティング	理科大	15 人	FS 第 2 フェーズに向けた 事前打ち合わせ
2014 年 5 月 1 日	第 11 回 PV-EMS ミーティ ング(非公開)	エネ総研	18 人	研究進捗報告会
2014 年 6 月 8-9 日	第 1 回井村 FS2 ミーティ ング	クロスウェ ーブ船橋	27 人	FS 第 2 フェーズ キックオフミーティング
2014 年 6 月 12 日	第 12 回 PV-EMS ミーティ ング(非公開)	エネ総研	19 人	研究進捗報告会
2014 年 6 月 25 日	第 2 回井村 FS2 ミーティ ング	東大	24 人	アドバイザーサイトビジ ットキックオフ会議: 山 西、飯野アドバイザー出席

2014年7月9日	第13回井村FS個別ミーティング(非公開)	Groningen	2人	FS:津村チームと打合せ
2014年7月9日	第14回井村FS個別ミーティング(非公開)	Groningen	2人	FS:太田チームと打合せ
2014年7月10日	第15回井村FS個別ミーティング(非公開)	Groningen	2人	FS:東チームと打合せ
2014年7月14日	第16回井村FS個別ミーティング(非公開)	東工大	2人	FS:鈴木チームと打合せ
2014年7月18日	第3回井村FS2ミーティング	京都キャンパスプラザ	25人	FS第2フェーズ会議 研究課題検討
2014年8月1日	第17回井村FS個別ミーティング(非公開)	京都大	2人	FS:東チームと打合せ
2014年8月4日	第18回井村FS個別ミーティング(非公開)	理科大	8人	ユニットリーダーと打合せ
2014年8月4日	第13回PV-EMSミーティング(非公開)	理科大	18人	研究進捗報告会
2014年8月7日	第19回井村FS個別ミーティング(非公開)	エネ総研	6人	コラボルーム打合せ
2014年8月8日	第12回PV-EMSセミナー	東工大	15人	学術交流 Benjamin Biegel氏を招聘し、招待講演を行った。
2014年8月8日	第20回井村FS個別ミーティング(非公開)	東工大	5人	益田グループとの打合せ
2014年8月12日	第21回井村FS個別ミーティング(非公開)	東大	3人	津村、山口グループとの打合せ
2014年9月2日	第4回井村FS2ミーティング	電中研	38人	アドバイザーサイトビジット最終会議:山西、飯野三平アドバイザー出席
2014年9月5日	第22回井村FS個別ミーティング(非公開)	東工大	2人	東グループとの打合せ
2014年9月8日	第23回井村FS個別ミーティング(非公開)	電中研	4人	山口、津村、益田グループとの打合せ
2014年9月9日	仙台管区気象台との意見交換会	仙台管区気象台	9人	井村、大関、植田グループ
2014年9月17日	第24回井村FS個別ミーティング(非公開)	エネ総研	10人	計画外対策の打ち合わせ
2014年9月28日	第5回井村FS2ミーティング	東工大	30人	FS第2フェーズ会議 研究計画検討
2014年10月8日	第25回井村FS個別ミーティング(非公開)	エネ総研	8人	植田、大関、益田、児島グループと打合せ
2014年10月8日	第14回PV-EMSミーティング(非公開)	エネ総研	17人	研究進捗報告会
2014年10月22日	ICCASチュートリアルセッション(原チームとともに)	ソウル	40人	原チームとともに企画

2014 年 11 月 5 日	第 15 回 PV-EMS ミーティ ング(非公開)	東工大	17 人	研究進捗報告会
2014 年 11 月 11 日	自動制御連合講演会オ ーガナイズドセッション (原チームとともに)	福島	50 人	原チームとともに企画
2014 年 12 月 8 日	第 16 回 PV-EMS ミーティ ング(非公開)	理科大	19 人	研究進捗報告会
2015 年 3 月 9 日	第 17 回 PV-EMS ミーティ ング(非公開)	エネ総研	17 人	最終会議

§ 8 最後に

本研究プロジェクトは約 2 年間の短い期間であったが、本研究の目標であった太陽光発電予測の不確かさを受容する電力最適配分制御の基盤理論の基礎を構築するとともに、平行して、同CRESTの他の7チームと連携して、次年度以降の最強チームでの研究に向けて、大量導入された太陽光発電のもとで電力安定供給を実現する次々世代の需給制御理論及び技術に関する研究計画を作成することができ、所望の目的を達成できたと考える。

また、本研究プロジェクトは、基盤理論の構築に主眼を置いた研究を推進してきたが、様々な基礎理論・技術に関する研究成果に加えて、制御理論分野と電力分野の両分野の研究者によって次世代・次々世代の電力システムを実現するための連携基盤のコアを構築することができたことが今後の研究展開に向けた大きな成果であると考えている。分野間を超えた連携研究では、専門用語の違い、手段・アプローチの違い、そして何よりも研究の根幹に流れるポリシーや考え方の違いが障壁になる。この 2 年間強で、総計 40 回の研究ミーティング、および、12 回の海外研究者による研究セミナー等を行うことで互いの考え方をぶつけ合う場を増やし、相互に理解することではじめて創出される全く新しい理論・技術展開を見出すことに重視してきた。この 2 年間強で、その試みは十分に達成したものと思う。今後は、本研究で築いた連携基盤をコアにして、より広い研究領域での連携をターゲットに真に新しい概念、理論、技術を創出するコラボレーションを具現化し、かつ、企業も巻き込んで実用化に向けた基礎研究を行う連携体制・システムを構築してゆきたいと考えている。



研究ミーティングの様子