



太陽光発電予測に基づく 調和型電力系統制御 のためのシステム理論構築

研究代表者 井村 順一 東京工業大学

アドバイザー 飯野 穰 東芝(株)

HARPS

System Theory for HARmonized Power System Control
Based on Photovoltaic Power Prediction (HARPS)



12 グループリーダー



井村順一
(東工大)



原辰次
(東大)



太田快人
(京大)



造賀芳文
(広大)



植田譲
(東京理科大)



杉原英治
(大阪大)

システム制御



児島晃
(首都大学東京)



東俊一
(京大)

数理科学



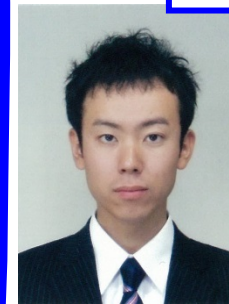
鈴木秀幸
(大阪大)

気象工学



村田晃伸
(産総研)

電力システム



益田泰輔
(名城大)



山口順之
(東京理科大)

129名 (77名の研究関係者 + 52名の学生)

アウトライン

1. 本チームの概要
2. 研究進捗
3. 国際連携 & 社会連携
4. システム構築
コラボルームの取り組み
5. まとめ

研究目的

太陽光発電の大量導入および、調和した電力供給を実現するために、太陽光発電予測／需要予測に加えて、需要側エネルギーマネジメントシステム、協調パワーコンディショナー、デマンドレスポンスアグリゲータといった様々な様態が想定される中間層（調和型アグリゲータ）の機能や特性を活用した、次々世代の電力系統制御のためのシステム理論を構築する

状況設定

- PV102GW導入を標準として、PV330GWまでを見据える
- 蓄電池：太陽光発電に相当する量を目安

アプローチ

以下の2つの柱を軸とする

制御

1. PV予測を活用した調和型電力系統制御

EEDC/UC/EDC/LFC(/HDP/HDC)/GF/送配電の制御手法の展開

- 各種制御での予測誤差対応(常時, 大外れ時など)
- 各制御間の連携

2. 供給-中間層-需要から成る電力システム構造

供給側: 新電力のBG

需要家側: DRアグリゲータ(CEMS, FEMS, BEMS含む)

送配電側: 協調PCS

などの中間層を含むシステム構造の設計

- 中間層(調和型アグリゲータ=グローバルアダプタ)の役割
- 上下左右関係を有する中間層の最適設計

構造

組織体制

G:グループ
U:ユニット

研究員

・グループ間を超えた研究

横糸でつなぐ

村田G
鈴木G
益田G
児島G
植田G
東G
井村G
杉原G
太田G
造賀G
原G
山口G

予測U
村田

需給U
益田

需要家U
植田

送配電U
杉原

基盤U
原

異分野融合の要として コラボルーム(理科大)

運営取りまとめ: 山口, 植田
・研究打ち合わせ
・研究会, など



総括組織

総括: 井村
ユニットリーダー会議
グループリーダー会議
研究方針, ユニット連携促進・
情報公開/啓蒙活動促進等

事務組織(東工大)

・会議運営
・ポータルサイト整備
・アウトリーチ(出版等)

社会との橋渡し

国際展開に向けて

国際共同研究

・KTH (SW), Univ. of
Orleans (FR), ...
・国際WS等

勉強会・若手育成

研究会・セミナー・WS

若手・研究員異分野研究会など

社会実装を見据えて

コンソーシアム

企業・電力専門家等の
助言による研究展開

研究実施計画と期待される成果

前半

後半

予測U

予測手法の改良
複数予測統合

予測手法の改良
統合モデルの開発

予測二重把握
予測誤差評価

予測誤差評価

需給U
需要家U
送配電U

制御連携を想定した
各制御の個別展開

制御連携
基礎理論

制御連携
改良

枠組みの調整

数値例

原理

基盤U

制度/構造枠組み

制度/構造設計基盤理論

コラボR

システム
試作 → 基礎完成
/運用

システム改良・拡張

個別の基礎理論技術と制御連携の基盤の構築

総括

期待される成果

- 次々世代の姿
 - ・予測手法
 - ・予測の活用
 - ・構造の最適化
- 連携研究システム
 - ・コラボルーム
 - ・運営手法
- アウトリーチ
 - ・電力ポータルサイト

企業を巻き込んだ研究会（企業との意見交換）

社会実装に向けて

国際共同研究&ワークショップ等開催

国際展開に向けて

研究実施計画と期待される成果

前半

後半

予測U

予測手法の改良
複数予測統合

予測ニーズ把握
予測誤差評価

需給U
需要家U
送配電U

制御連携を想定した
各制御の個別展開

枠組みの調整

基盤U

制度/構造枠組み

コラボR

システム試作
基礎完成/運用

個別の基礎理論構築

制御連携の基盤の構築

本年度は、**連携の実質化**に向けた**基盤構築**がテーマ

- ・チーム内連携
- ・国際連携
- ・社会連携

数値例 原理

制度/構造設計基盤理論

システム改良・拡張

1. 連携研究システム
- ・コラボルーム
 - ・運営手法
3. アウトリーチ
- ・電力ポータルサイト

企業を巻き込んだ研究会（企業との意見交換）

国際共同研究＆ワークショップ等開催

社会実装に向けて

国際展開に向けて

アウトライン

1. 本チームの概要
2. 研究進捗
3. 国際連携 & 社会連携
4. システム構築
コラボルームの取り組み
5. まとめ

本年度前半の活動内容

	全体会議	UL会議	U/GL会議	その他
4	3/22 第3回 3/22 HARPCON 準備会	4/5 第9回	4/1 第8回コラボR 4/6 第9回コラボR 4/16 第4回送配電U 4/21 第2回予測U 4/28 第3回GL会議 4/28 第10回コラボR	4/19 電中研見学 4/26 第5回セミナー 4/27 さきがけ相界面合同WS
5		5/13 第10回		5/10 中島Tとの打合せ
6	6/15 第1回HARPCON	6/8 第11回		6/10 第4回若手研究会
7		7/13 第12回	7/7 第5回需要家U 7/25 第5回送配電U 7/26 第3回予測U	7/4,5 MIT, CMU打合せ 7/21 第5回若手研究会
8			8/2 第11回コラボR 8/28-29 第4回GL会議(合宿)	8/4 産総研FREA見学 8/5-6 WSUとのWS 8/6 東電見学 8/17 第6回セミナー 8/24 第5回若手研究会
今後	1/12 第2回HARPCON		9/15 第3回需給U	9/23 Clemson Univ 訪問 10/26-29 日本気象学会秋季大会OS 11/14-15 自制連合OS 11/15-17 COOPS WS(内田T)

研究対象：次々世代電力システム構造

系統運用者層

OCCTO, 取引委員会, 送配電事業者

中間層

発電事業者
小売事業者

物理ネットワーク
市場・契約ネットワーク

AG1

AG2

AG4

AG3

AG5

融通

中間層↔ユーザー層

ユーザー層

融通

大量PV+大量蓄電池！

市場

電力量
kWh

調整力
kW

前日市場

1時間市場

リアルタイム市場

相対取引

制御

EDC
UC
LFC
GF
PSS

集約・融通

電力量
kWh

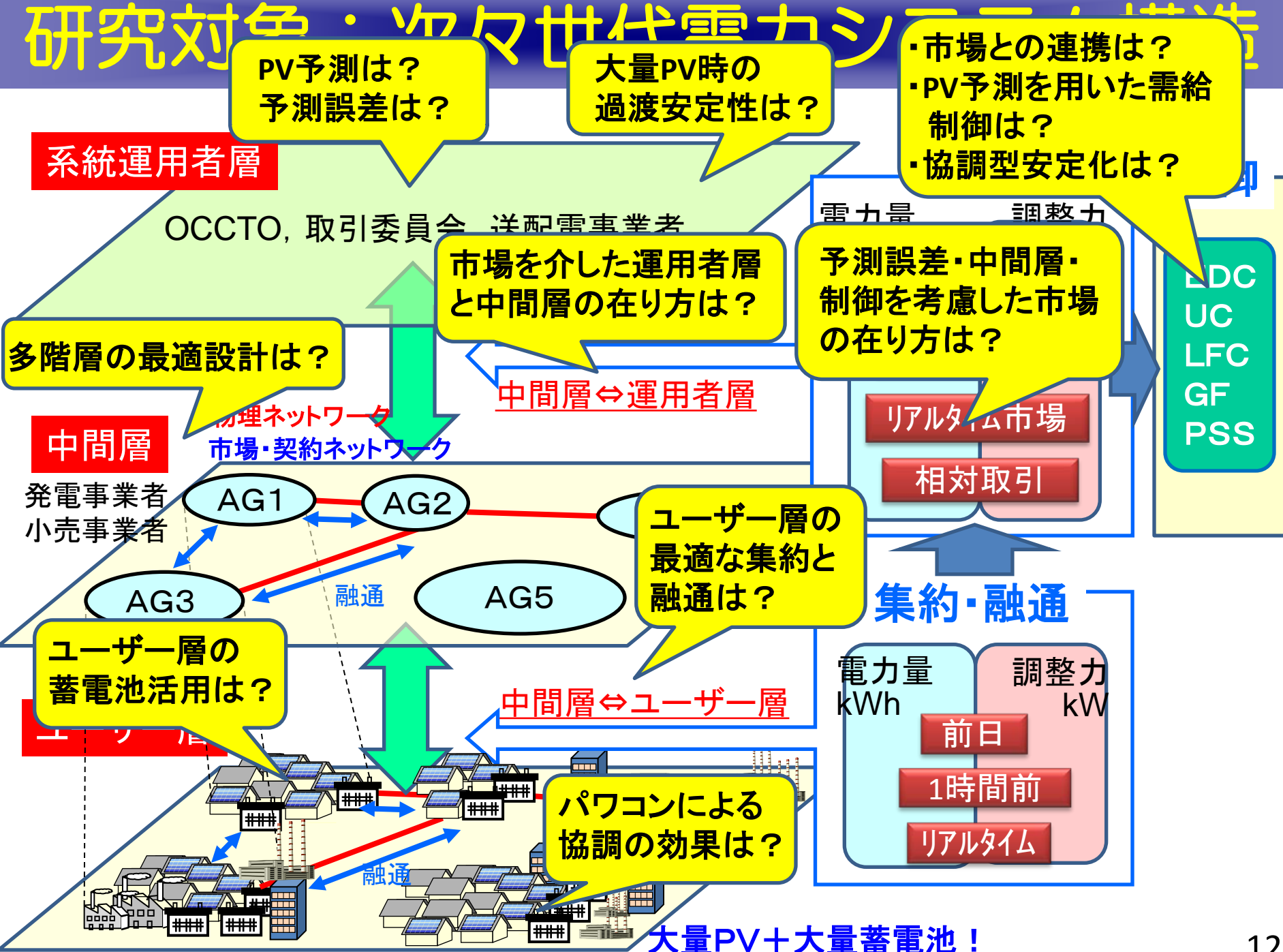
調整力
kW

前日

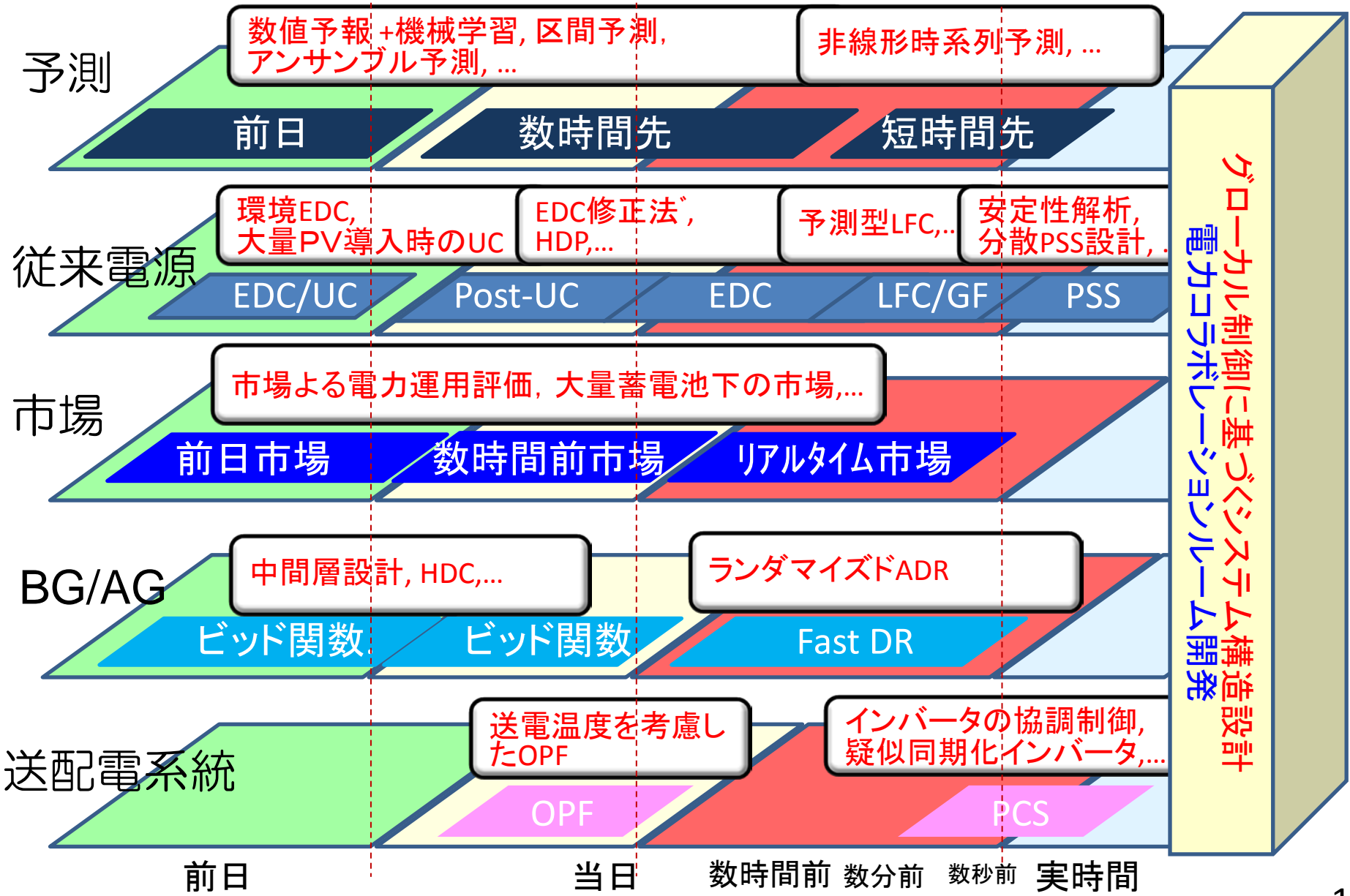
1時間前

リアルタイム

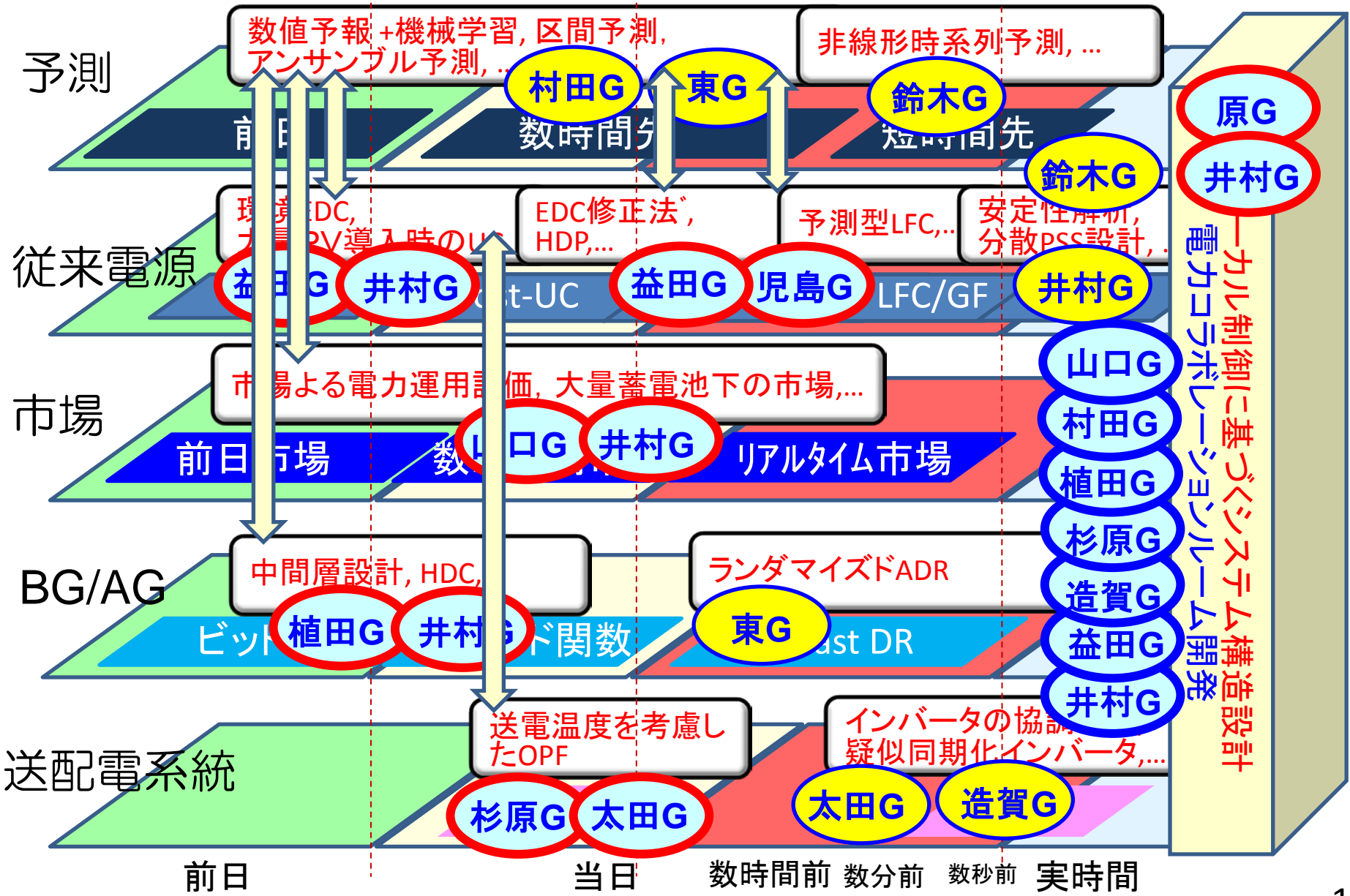
研究対象・ユタ世代電力シ



個々の研究トピックと連携体制



個々の研究トピックと連携体制



電力コラボレーションシステム構築設計

本年度前半の研究業績のまとめ

外部発表（印刷中，発表予定含む）

- **論文・フル査読付国際会議 計45編**

- 論文: 17編 (内, 国際論文: 11編)**

- 査読付き国際会議: 28編**

- 内, IEEE Trans. on Control of Network Systems 1編 (井村G)

- Scientific Reports 2編 (鈴木G, 太田G)

- Renewable Energy and Environmental Sustainability 1編 (村田G)

- **受賞: 1件 (植田G)**

- 43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference Best Student Paper Award

- **招待講演・解説: 6件 (内, 国際 0件)**

- **口頭発表: 23編 (内, 国際会議 2編)**

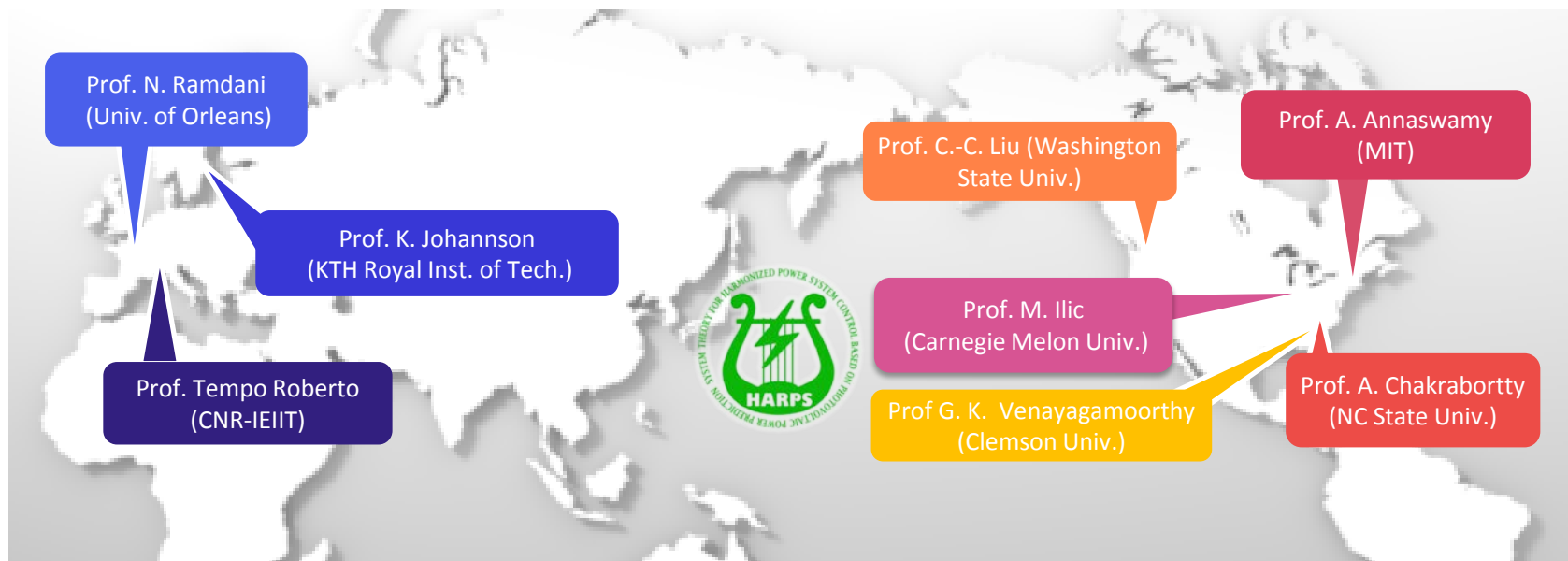
- **ポスター発表: 8編 (内, 国際会議 4編)**

- **報道: JST NEWS 1件**

アウトライン

1. 本チームの概要
2. 研究進捗
3. 国際連携 & 社会連携
4. システム構築
コラボルームの取り組み
5. まとめ

国際連携の取り組み



1. Prof. C.-C. Liu (Washington State Univ.)
2. Prof. M. Ilic (Carnegie Melon Univ.)
3. Prof. A. Annaswamy (MIT)
4. Prof. N. Ramdani (Univ. of Orleans)
5. Prof. K. Johansson (KTH Royal Inst. of Tech.)
6. Prof. Tempo Roberto (CNR-IEIIT)
7. A. Prof. A. Chakraborty (NCSU)
8. Prof. G. K. Venayagamoorthy (Clemson Univ.)

国際連携の取り組み



Prof. C.-C. Liu (WSU)

[ターゲット]
配電系統における太陽光発電と蓄電池
の統合

[本年度の活動状況]

- 2nd ESIC-HARPS Workshop on Smart Grid and Renewable Energy
2016年8月5-6日, 東京理科大
- 東京電力技術開発センター(鶴見)見学 2016年8月6日
- 造賀G 本年度訪問・打ち合わせ予定

Carl Imhoff 氏 招聘

Manager, Electricity Infrastructure Sector, PNNL

- 2016年8月4日 産総研 FREAにて情報交換会
- 2nd ESIC-HARPS Workshop (2016年8月5-6日)
- 次年度PNNL見学を依頼



国際連携の取り組み

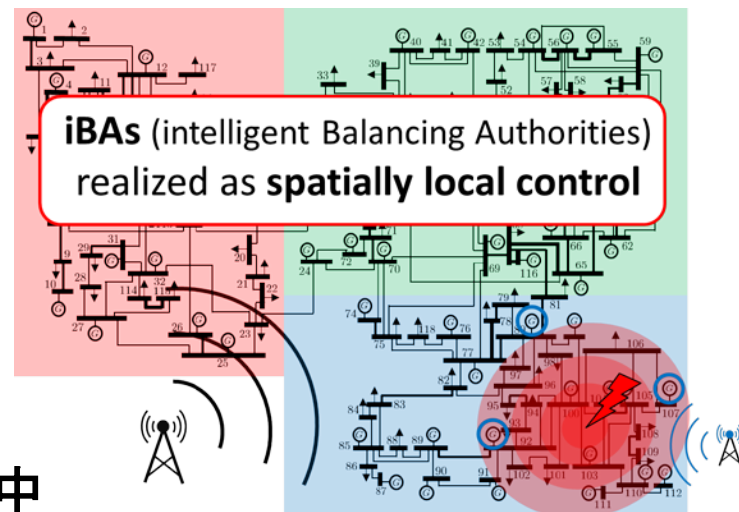


Prof. M. Ilic (CMU)

[ターゲット] DyMonDs \Leftrightarrow グローバル制御,
Smart Grid in a Room Simulator (SGRS) \Leftrightarrow
コラボレーションルーム ...

[本年度の活動状況]

- MITにて打ち合わせ 2016年7月5日(原, 井村)
- 2017年1月に東京にて第2回ワークショップ企画



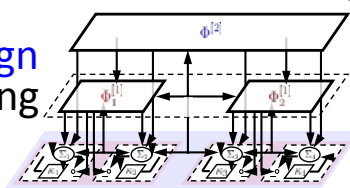
Prof. A. Chakraborty (NCSU)

[ターゲット] 風力発電を含む電力システム
の安定化のための分散設計

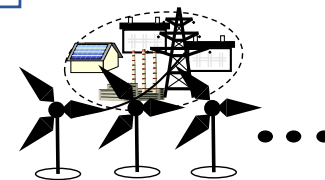
[本年度の活動状況]

- 2016年7月8日にボストンにて打ち合わせ
- 2016年8月14日-26日東工大滞在
(東大(原), 理科大(山口),
慶応大(内田G滑川)など)
- 2016年12月 NCSUに訪問予定

HARPS Distributed Design
of Controllers for Evolving
Network Systems



NCSU Model of
Wind-Integrated
Power Systems



その他の国際連携

4. [Prof. A. Annswamy \(MIT\)](#)
 - ・2016年7月4日MITにて打ち合わせ (原)
5. [Prof. N. Ramdani \(U. of Orleans\)](#)
 - ・継続して検討中
(昨年度: **国際共著論文Automatica 1編**, 国際会議論文 4編)
6. [Prof. K. Johansson \(KTH\), Prof. H. Sandberg \(KTH\)](#)
 - ・査読付き**国際会議論文 2編**
(昨年度: **国際共著論文IEEE Trans. on AC 1編**, 国際会議論文 1編)
 - ・2016年7月4日訪問(井村G:定本)
7. [Prof. R. Tempo \(CNR-IEIIT\)](#)


共同研究プログラムCOOPS(PI 藤崎G(内田T))に井村G参加

 - ・2016年7月8日 ボストンにて打合せ
 - ・2016年12月12-14日 ミラノにてワークショップ参加予定
8. [Prof. G.K. Venayagamoorthy \(Clemson Univ\)](#)
 - ・2016年9月23日 Clemsonにてワークショップ開催予定
(井村, 植田, 造賀, 東, 大竹 5名)

社会連携: HARPSコンソーシアム(HARPCON)

ポストFIT (FITのない2030年以降)のあるべき姿を、
中間層の役割と設計指針を中心に探る

東工大 先進エネルギー国際
研究(AES)センター 柏木先生

連携  エネルギー全体の視点から

政策提言
プロジェクト提案


JST EMS CREST HARPS
HARPCON

企業5社(13名)

飯野AD



電力専門家
(4名)

連携  電力全体(特に需要家側)の視点から

実装を見据えた、
・研究の方向性
・個別共同研究

JST EMS CREST
中島チーム 岩船先生

社会連携: HARPSコンソーシアム(HARPCON)

3月22日 設立準備会



HARPSコンソーシアム設立準備会(3月22日)にて

6月15日 第1回HARPCON会議

8月5日 国際ワークショップ(共催)

1月12日 第2回HARPCON会議予定

JST CREST HARPS コンソーシアム
HARPCON 設立準備会

日時: 2016年3月22日 13:00-19:30

場所: 東京工業大学 大岡山キャンパス 西8号館E棟 10F 大会議室 E1001

プログラム

司会 杉原英治 (大阪大学)

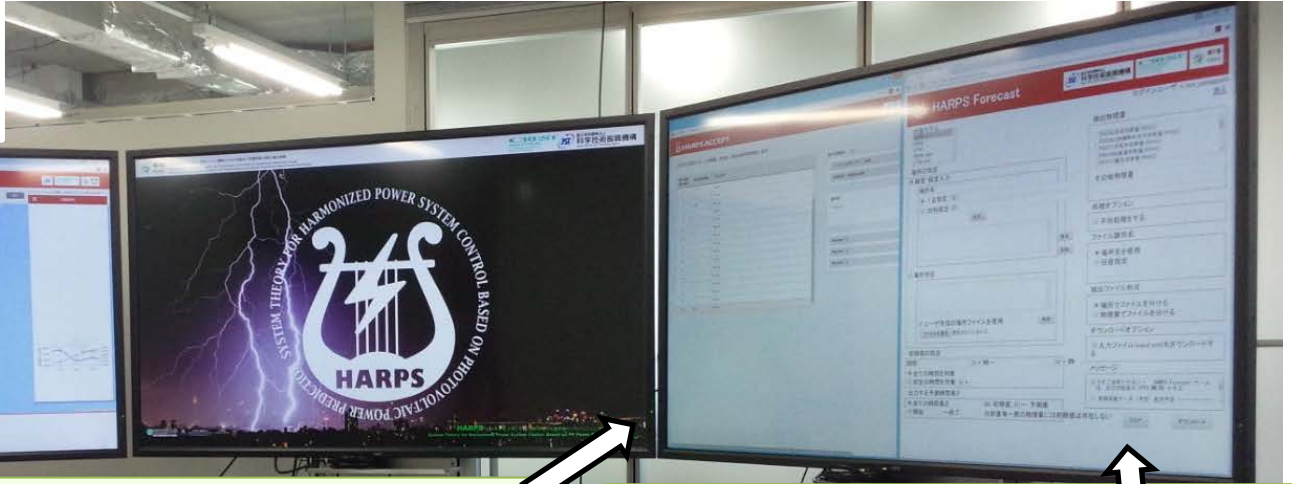
- | | |
|---------------|--|
| 13:00 - 13:05 | 開会挨拶
飯野 稔 (東芝, CREST EMS 領域アドバイザー) |
| 13:05 - 13:15 | 参加者紹介 |
| 13:15 - 14:05 | 特別講演: 再生可能エネルギーの普及拡大に向けた政策の動向
岩船 由美子 (東京大学) |
| 14:05 - 14:35 | HARPCONの活動に向けて
井村 順一 (東京工業大学, CREST EMS 領域 HARPS 研究代表者) |
| 14:35 - 14:45 | - 休息 - |
| 14:45 - 15:15 | 研究紹介1: 太陽光発電予測の現状
大竹 秀明 (産業技術総合研究所) |
| 15:15 - 15:45 | 研究紹介2: 太陽光発電が著しく大量に導入された電力系統における
需給運用評価
福見 拓也 益田 泰輔 (エネルギー総合工学研究所) |
| 15:45 - 16:15 | 研究紹介3: アグリゲータの役割と設計について
植田 譲 (東京理科大学) |
| 16:15 - 16:25 | - 休息 - |
| 16:25 - 16:55 | 研究紹介4: コラボレーションルーム構築
山口 順之 (東京理科大学) |
| 16:55 - 17:15 | 全体討論: 今後の方針について
司会: 井村 順一 |
| 17:15 - 17:30 | - 移動 - |
| 17:30 - 19:30 | 技術交流会 |

アウトライン

1. 本チームの概要
2. 研究進捗
3. 国際連携
4. システム構築
コラボルームの取り組み
5. まとめ

HARPS電力コラボルーム

デジタル電力シミュレータを備えたコラボレーションルーム
各数理モデルの協調効果をブレインストーミング的に検討



<HARPS ACCEPT>

HARPS電力システムモデル，電源構成モデル，電力市場モデル，中間層モデルを組み合わせ，各研究者が開発した各種の時空間レベルの制御手法を組み込んだデジタル電力シミュレーションを実行

<HARPS Forecast>

全国の日射量実績・予測のデータベースとインターフェイス

<HARPS Database>

OCCTO公開情報，JEPX価格，PV導入量，建物床面積などのデータをストレージ上でデータベース化

<HARPS OASIS>

研究成果の外部公開

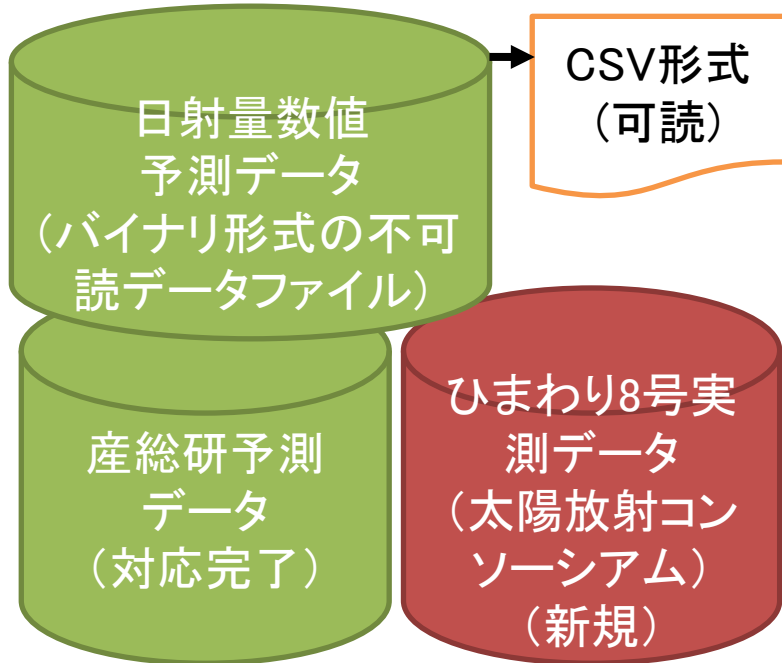


HARPS Forecast

全国の日射量データベース（予測値・実績値）とインターフェイス

データ抽出プログラム

ウェブアプリケーション

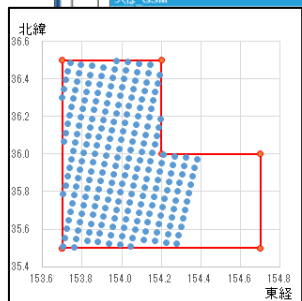


データ
出力



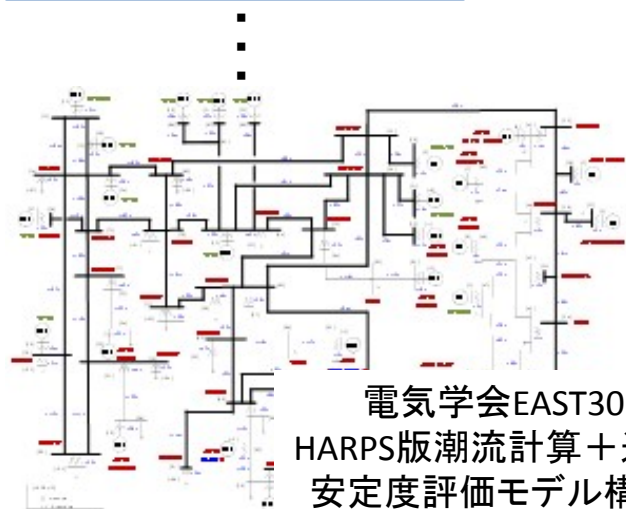
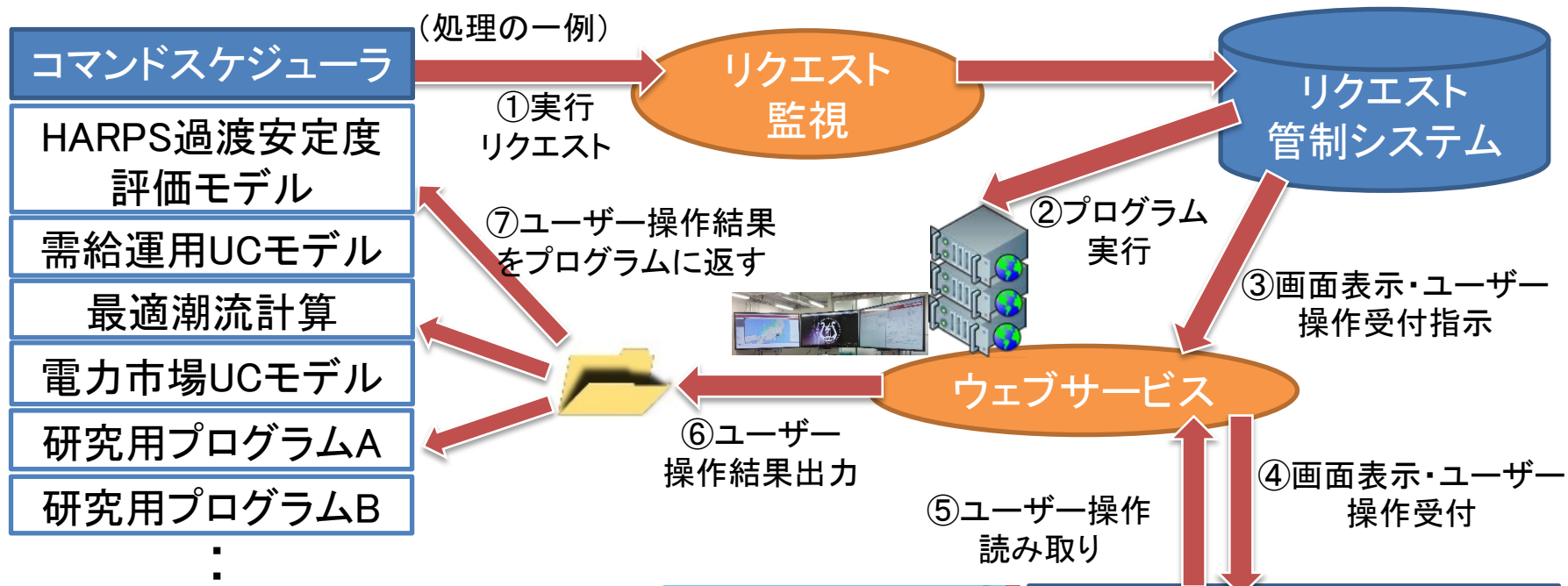
The screenshot shows the HARPS Forecast web application interface. The browser address bar displays `http://192.168.0.95/harps/main`. The page title is "HARPS Forecast". The interface includes a navigation menu with options like "ファイル(E)", "編集(G)", "表示(V)", "お気に入り(A)", "ツール(T)", and "ヘルプ(H)". The main content area is divided into several sections: "対象モデル" (Target Model) with a dropdown menu showing "GSM", "MSM", "LFM", "MSM_ast", and "LFM_ast"; "場所の指定" (Location Specification) with radio buttons for "緯度・経度入力" (Latitude/Longitude Input) and "場所指定" (Location Specification); "抽出物理量" (Extracted Physical Quantities) with a text input field for "Tsun(全天日射量)"; "処理オプション" (Processing Options) with checkboxes for "平均処理をする" (Average Processing) and "場所名を使用" (Use Location Name); and "抽出ファイル形式" (Export File Format) with radio buttons for "場所でファイルを分ける" (Separate Files by Location) and "物理量でファイルを分ける" (Separate Files by Physical Quantity). There are also buttons for "ダウンロード" (Download) and "クリア" (Clear).

オリジナルの数値日射量は、緯度経度で表される点に対応してデータが保持されている。HARPS Forecastでは、研究者が緯度経度で指定した多角形領域を指定すると、その領域の日射量データを一度に出力することができる。



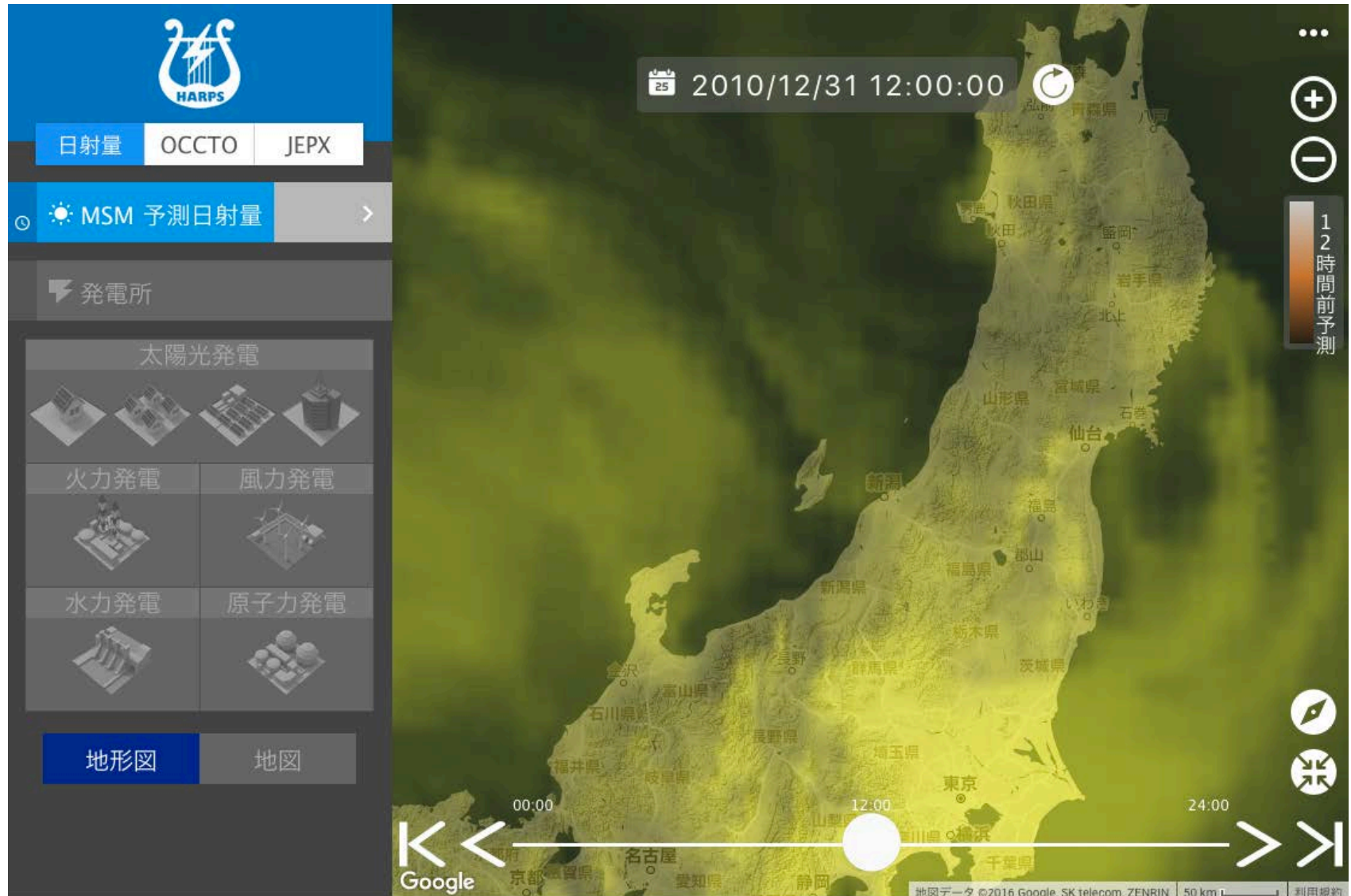
HARPS ACCEPT

複数の研究用プログラムの実行・データ入出力・表示・操作を「コマンドスケジューラ」, 「リクエスト管制システム」, 「ウェブブラウザ」が連動して処理する



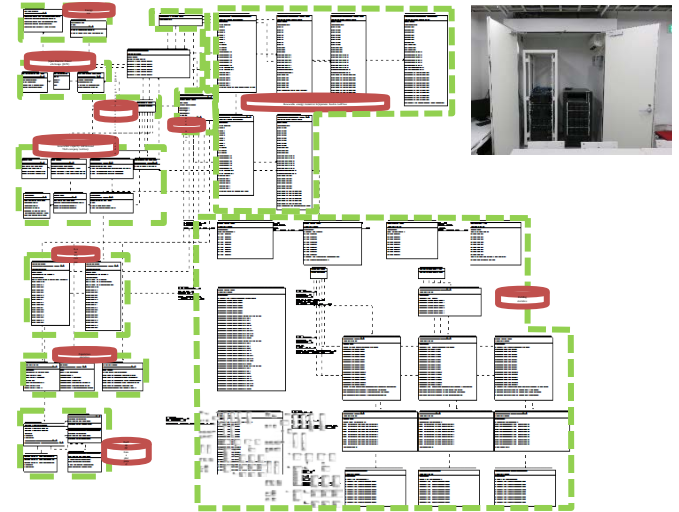
HARPS OASIS

予測日射量等の情報表示システム



HARPSデータベース

- 電力需給・系統運用に関連する公開データのデータベースと、地点や時間で串刺検索を可能にするWebアプリケーション
- 54テーブル，716属性のデータをSQL Server 2012で保持
 - OCCTO系統情報公開（OASIS）
 - JEPX取引情報
 - 固定価格買取制度情報公開用ウェブサイト
 - 法人建物統計（経済センサス）
 - 総務省統計局 統計でみる都道府県・市区町村のすがた（社会・人口統計体系）
 - 住宅別PV発電量，需要量・PV発電量，住宅別需要量



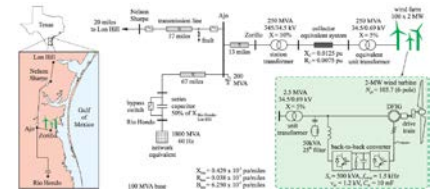
HARPSデータベースのデータの関係図
(リレーションダイアグラム)

実務上の経験のないPV大量導入を想定し，現実的な電力系統データを用いて，研究者が迫真の研究成果を挙げることが重要（社会実装）

- わが国では電気学会にて標準データの整備が進められているが，ボランティアベースであり活動量に限界がある
- 海外では，実務者が研究用データを公開したり，研究者が実務者の要請に応える研究成果の公開をしている



実務者による研究用データの公開例：米国FERCによるPJMのUCデータとネットワークデータの公開



実務者の要請に応える研究例：テキサスのダンピング制御を研究したIEEE論文

（迫真の研究と必要なデータの例）

- | | | |
|------------------------------|---|-----------------|
| • PV出力予測精度向上による系統運用・制御費用低減効果 | ➡ | • 発電所スケジューリング |
| • PV出力変動に対応する電力市場と系統運用の連携方策 | ➡ | • アンシラリーサービス |
| • PV出力変動に伴う電力潮流変化と安定度評価 | ➡ | • 電力ネットワークと需要分布 |
| • PV出力変動に対応するデマンドレスポンスの活用 | ➡ | • デマンドレスポンス実証結果 |

アウトライン

1. 本チームの概要
2. 研究進捗
3. 国際連携 & 社会連携
4. システム構築
コラボルームの取り組み
5. まとめ

まとめ

【研究進捗】

論文：45編

論文誌論文：17編

国際会議論文：28編

【国際連携】

8件進行中(2件増加)
2編の国際会議論文成
国際ワークショップ
(1件済, 2件企画中)



2nd ESIC-HARPS Workshop

【社会連携】



コンソーシアム
HARPCON設立

本年度前半は
連携実質化に向けて

【アウトリーチ】

- OS等企画：国内2
- HPの充実
- 解説：6編



【システム構築】



コラボルーム コア部分構築

参考資料

- 各ユニットの本年度前半のまとめ
- 各グループの本年度前半のまとめ

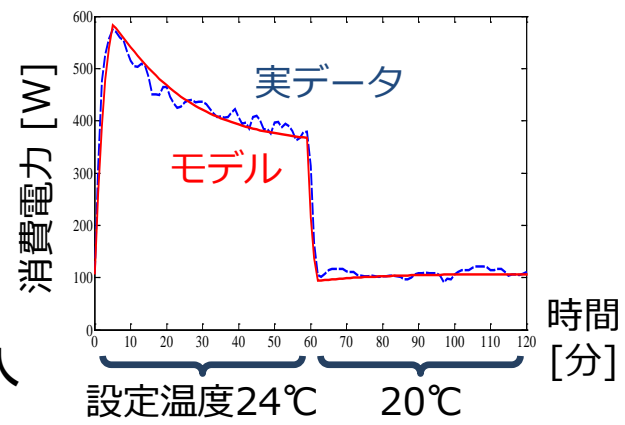
各ユニットの本年度前半のまとめ

ユニット	現状	今後の課題
予測U	<ul style="list-style-type: none"> 日射アンサンブル予測の有用性を検討中 機械学習モデルを用いた数時間先予測手法を開発 コラボルームのHARPS FORECASTを構築 予測誤差を補正する予測ガバナを開発中 	<ul style="list-style-type: none"> 日射、PV予測モデルの高精度化を継続 複数予測の統合予測技術の開発 日射、PV予測の大外し予見技術の開発 実システムへの適用を想定した予測ガバナの高度化を継続
需給U	<ul style="list-style-type: none"> 日間予測を利用した蓄電池・電源運用の検討 (UC・EDC) 送配電Uと共同で、ネットワーク制約を考慮したEDC (最適潮流計算) を検討 	<ul style="list-style-type: none"> ユニット内連携：UC情報を反映した周波数解析モデルによる予測型LFCのシミュレーション評価 (児島G&益田G) ユニット間連携：ネットワーク制約を考慮した発電機起動方法(UC)の検討 (送配電U)
需要家U	<ul style="list-style-type: none"> HDPとHDCのユニット内連携を実施中 各種DR手法の開発と市場モデル、需要予測モデルの検討を開始 	<ul style="list-style-type: none"> 市場モデルを考慮したHDP・HDC連携 Slow DR, Fast DR協調による予測不確実性への対応
送配電U	<ul style="list-style-type: none"> ユニット内は計画外対応を整理し、情報共有や連携研究を開始 ユニット間では需給Uと連携しシステムデータと電源データの結合作業を行い、潮流計算モデルを構築中 	<ul style="list-style-type: none"> 各グループの様々な計算プログラムを連動して実行し、統合試験・評価を行うためのプラットフォームを他ユニットとともに構築
基盤U	<ul style="list-style-type: none"> 縦・横の2つの中間層が持つべき機能とその構成について議論し、階層化分散制御系の構成・制御方式に関する理論的枠組みと系統的設計法を検討中 	<ul style="list-style-type: none"> 中間層の役割りと制御性能限界との関係を明らかにし、階層化電力システムと市場システムからなる2重階層化分散制御システムの系統的設計手法の構築

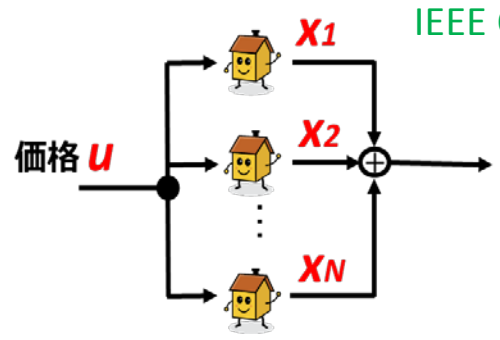
東G 需要制御基礎論の開発

➤ ① 需要家の電力消費モデルの開発 IEEE CPSNA2016

- エアコンの実験データを基にモデル(切換え型マルコフ連鎖系)を開発
- 価格変更効果の劣化をモデルに導入
- 厚生最大化の考え方を価格決定アルゴリズムに導入



➤ ② 需要家集合の可制御性解析 IEEE CPSNA2016



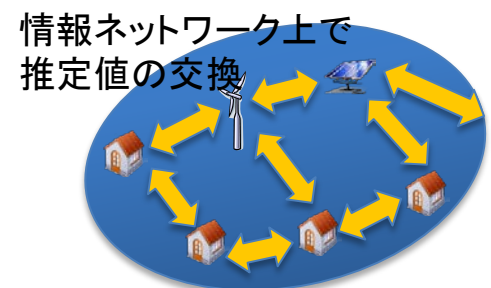
- 可制御性指標: 目標値との偏差

$$C := \max_{r \in [0, N]} \min_{u' \in \{u_1, u_2, \dots, u_m\}} \frac{|E(y|u = u') - r|}{N}$$

- 可制御性を最大にする需要家集団の特徴づけ

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{x}_{ij} = \frac{2j-1}{2m} \quad (\text{需要家の性向が均一にばらつく})$$

➤ ③ 需要供給家の分散制御法の開発 Applied Mathematics and Computation 2017



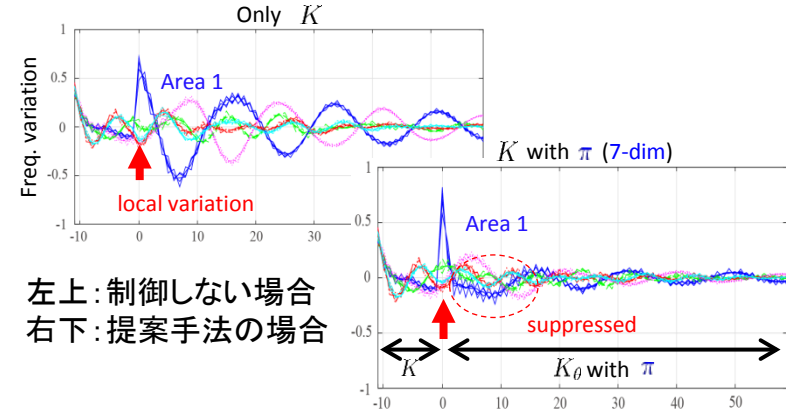
- 需要供給インバランス量のネットワーク型分散推定法の提案
=> 各個の需要供給量を交換する方法
- プライバシーの漏洩問題の解決
=> 信号をマスキングしながらも正しい推定が可能な方法

井村G 中間層型電力系統制御基礎理論

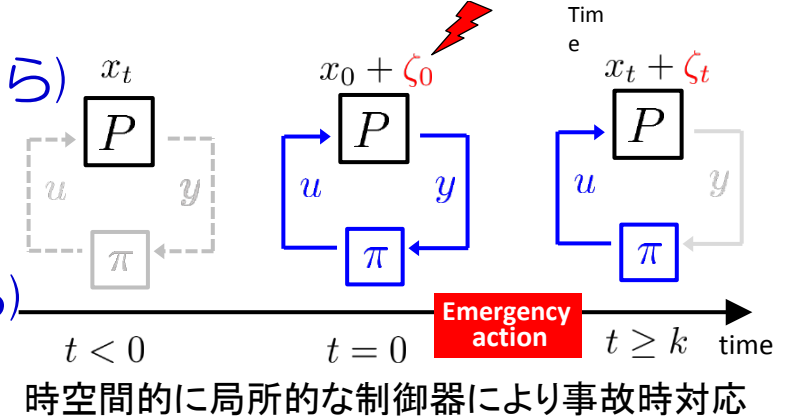
研究成果

論文：5編（印刷中を含む）
 査読付き国際会議：7編（発表予定を含む）

- 協調型安定化制御器の分散設計(定本ら)
 ⇒ 協調型PSSの分散ゲイン調整を可能とする手法の提案
- iBAsを実現するためのRetrofit制御(石崎ら)
 ⇒ 局所制御による事故時対応型制御の体系的アプローチの基礎理論の提案
- 受動性に基づくPCS群の設計方策(井上ら)
 ⇒ 擬似同期化力を持たせたPCS設計の基礎理論の提案

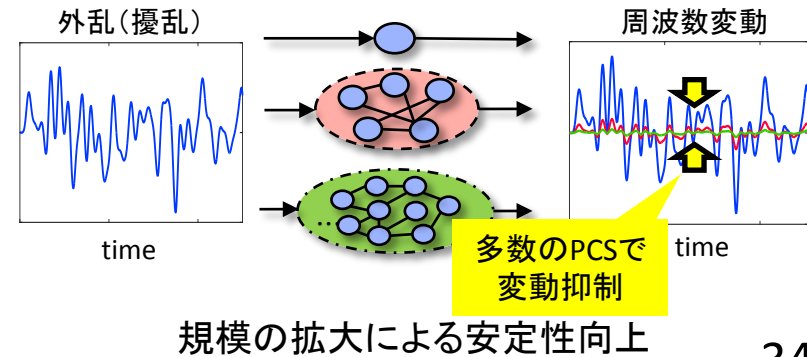


左上: 制御しない場合
 右下: 提案手法の場合



今後の展開

- 協調型PSSの分散設計の風力発電への適用
- iBAsを実現するための制御理論構築
- 擬似同期化PCSの設計方策の電力シミュレータ等での有効性検証



植田G 需要家アグリゲータの最適化

研究成果

査読付き国際会議：4編 (発表予定を含む)
 (43rd IEEE PVSC Best Student Paper Award)

- 需要家アグリゲータにおけるPV付き個別需要家の蓄電池を用いた合計潮流計画値達成と必要充放電の最適配分および翌日計画に向けたSOC調整を可能とする計画・運用手法を開発

⇒ 不要な充放電を削減

⇒ 需要家間融通により需要抑制を回避

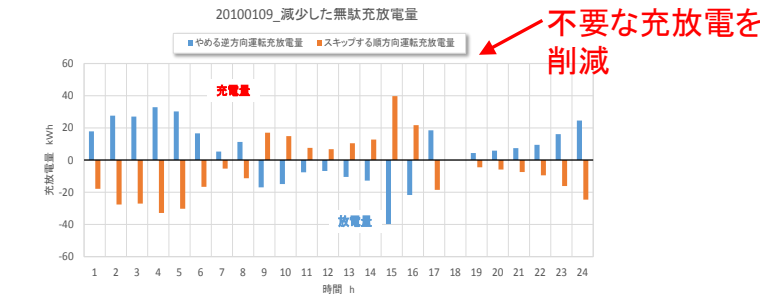
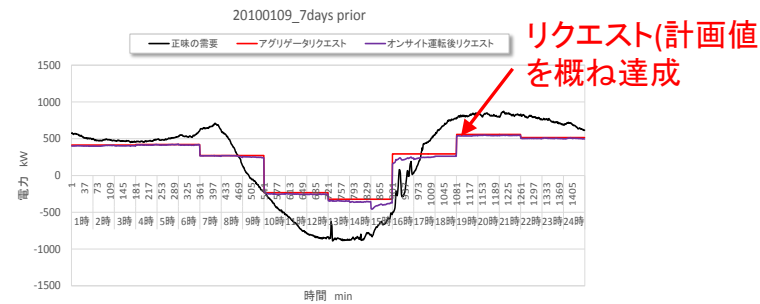
- 中間層における翌日計画および当日DRに向け、日射予測、需要予測、PV発電量把握手法を検討

⇒ リアルタイムPV把握、翌日予測における発電・需要ともRMSE10%以下を達成

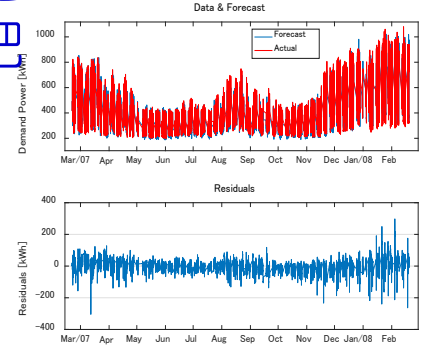
今後の展開

- 予測不確実性を考慮したシミュレーションによる開発手法の有効性の検証

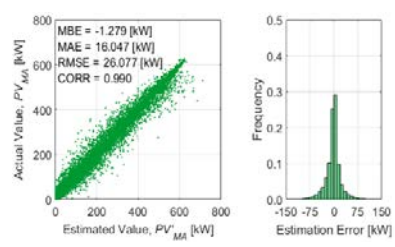
充放電の最適配分例：



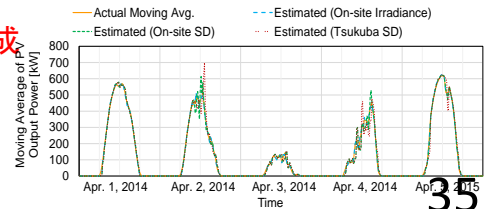
翌日需要予測：



PV把握：



RMSE10%以下を達成



太田G インバータの協調制御

研究成果

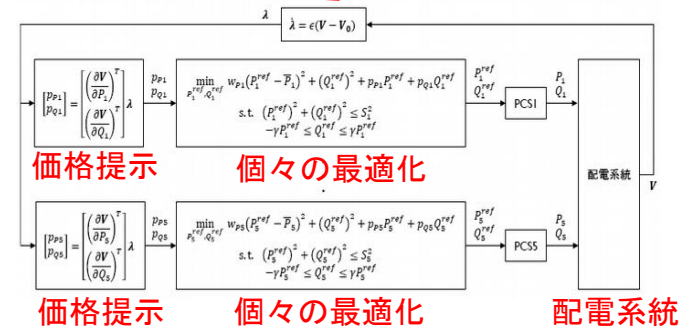
論文・国際学会発表4編（掲載予定含む）

- 複数のインバータが無効電力を協調制御して逆潮流電力による連系点での電圧上昇を抑制する方法を開発
 - ⇒ 価格提示により個々のインバータが必要な無効電力量を計算
 - ⇒ 価格更新によって全体最適を実現
- 配電系統とメガソーラー系の双方に適用可能な方法を提案
 - ⇒ シミュレーションによる検証
 - ⇒ 模擬電源系による実験検証
出力1kW（500kW機を模擬）×10台

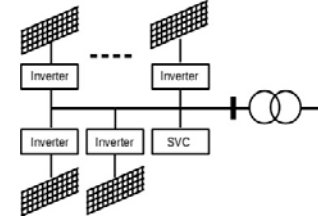
今後の展開

- メガソーラー系において有効電力、無効電力双方を制御する方法の開発

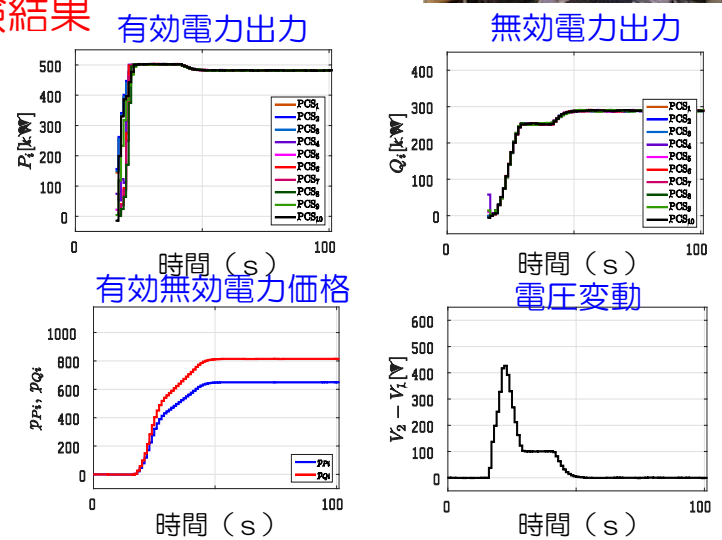
協調制御系の構成 ← ラグランジュ乗数更新



メガソーラー系 スケールダウンモデル



実験結果



児島G 予見LFC/EDC修正法の開発

研究成果

論文・国際会議発表3編, 解説1編他

予測型システム制御法の確立とその応用

1. 予見LFCとその展開 (需給U)

➤ 情報の確度を考慮した予見制御法を整備

- ・ 予見情報の確度を考慮した H_∞ 予見制御法を導出
- ・ 今後, 日射量・需要予測を考慮したPV導入システムに適用し, 性能を評価する

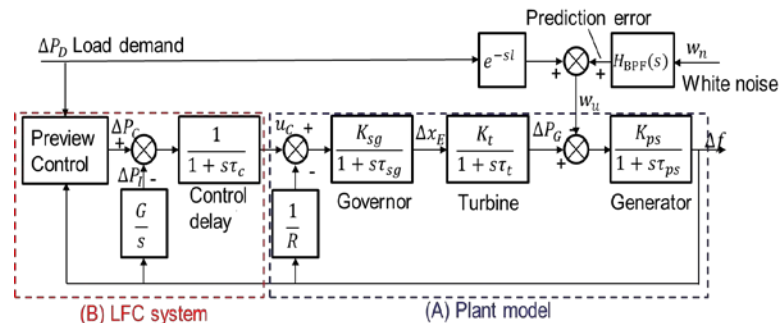
➤ Moving Horizon Estimation による多機系統の情報推定

- ・ 系統の状態推定性能を調べ, 予測制御法を導く

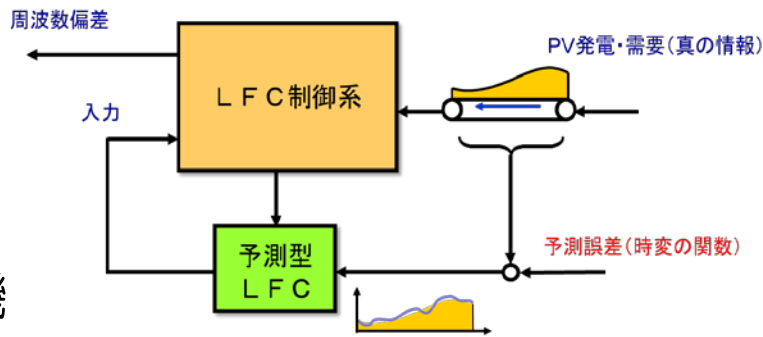
2. 電線温度制約を考慮したEDC回復則 (送配電U)

➤ 温度制約を考慮したEDC回復則を導出

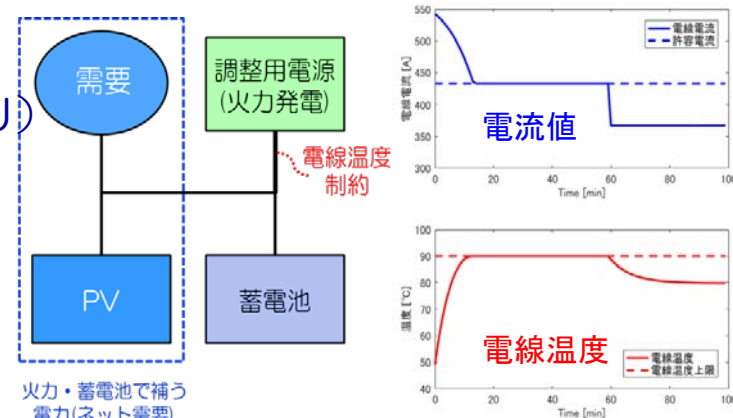
- ・ 天候変化など計画外時の需給バランスを, 電線温度制約の下で回復させる手法を検討
- ・ 連系線の柔軟な運用法と回復可能性を調べる



1 (a) 予見LFCのシステム構成



1 (b) 情報の確度を反映させた予見制御法



2 電線温度制約を考慮したEDC (基本問題)

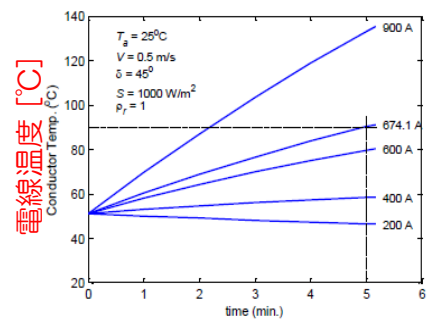
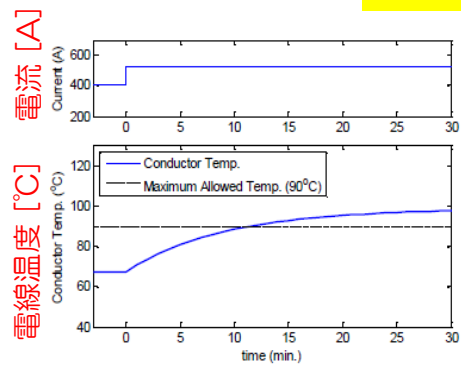
杉原G 送電線過負荷時の電線温度評価

研究成果 査読付き国際会議：1編，国内口頭発表：1編

10分程度の時間遅れ有り

送電線過負荷に対する短時間許容・常時許容電流値の評価

1. ステップ電流変化に伴う電線温度変化の短時間特性評価
2. 制御リードタイムを考慮した短時間許容電流評価
3. 気象条件変化に伴う常時許容電流値の評価



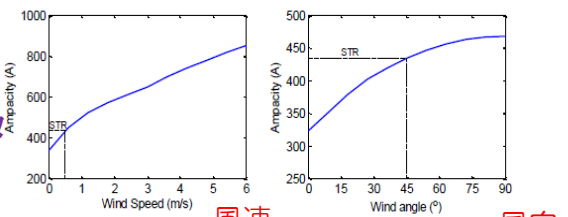
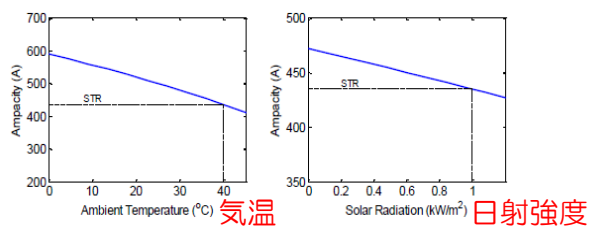
通電電流 [A]
(30分間の評価)

通電電流 [A]
(5分間の評価)

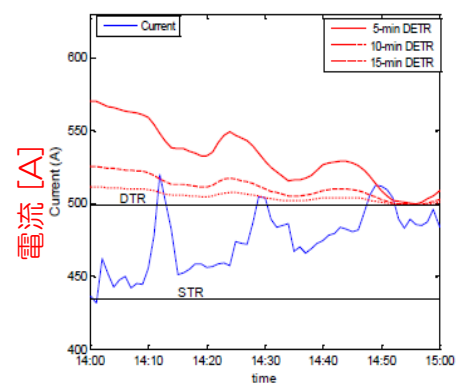
1. ステップ電流変化に伴う電線温度変化

今後の展開

PV発電の短時間先予測誤差を利用した送電線過負荷リスク管理手法の構築

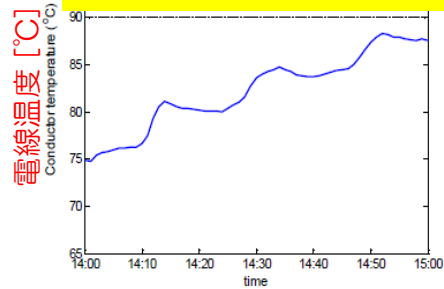


3. 気象パラメータの影響評価



通電電流変化と許容電流

制御リードタイムに応じて送電容量が変化



電線温度変化

2. 電線温度に基づく短時間許容電流値

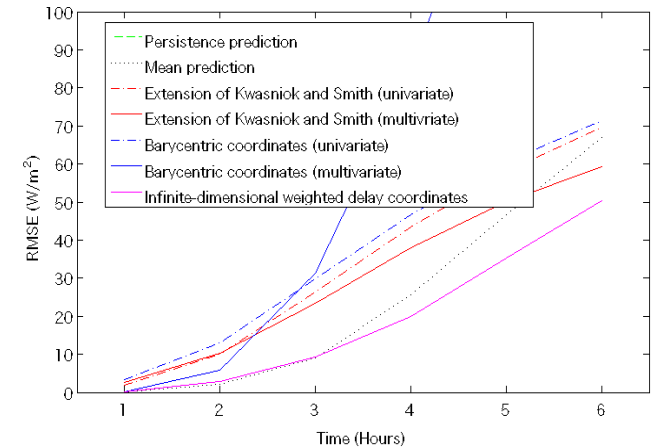
鈴木G PV予測改善と複数地域グリッド

研究成果

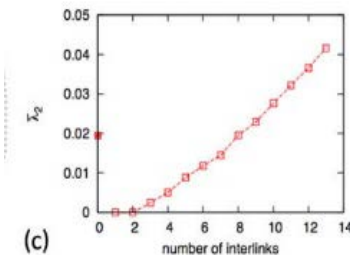
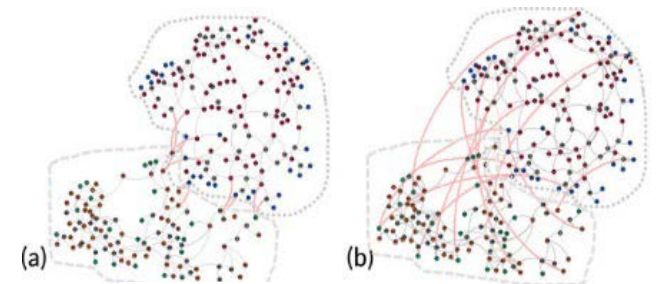
国際誌論文 1 編ほか

- ▶ 無限次元の埋め込みに基づく時系列予測手法を提案し、PV予測に適用
 - ⇒ 既存の非線形時系列予測で用いられてきた埋め込み座標を無限次元に拡張
 - ⇒ PV予測に適用することにより精度改善（特にこれまで悪かった午前中が改善）
- ▶ 複数地域を結合させた電力グリッドの安定性
 - ⇒ 複数地域グリッドモデルの安定性を解析し、数値シミュレーションにより検証
 - ⇒ 安定性の観点から最適な地域間結合

無限次元の埋め込みによるPV予測改善



最適な地域間結合



今後の展開

- ▶ 他のPV予測手法との連携・融合
- ▶ 時空間PVデータに対する予測手法
- ▶ 階層的グリッドへの展開
- ▶ 慣性定数・同期化力低下時の安定性

造賀G 擬似同期化カインバータ・配電系電圧制御

研究成果

➤ 擬似同期化カインバータの改良

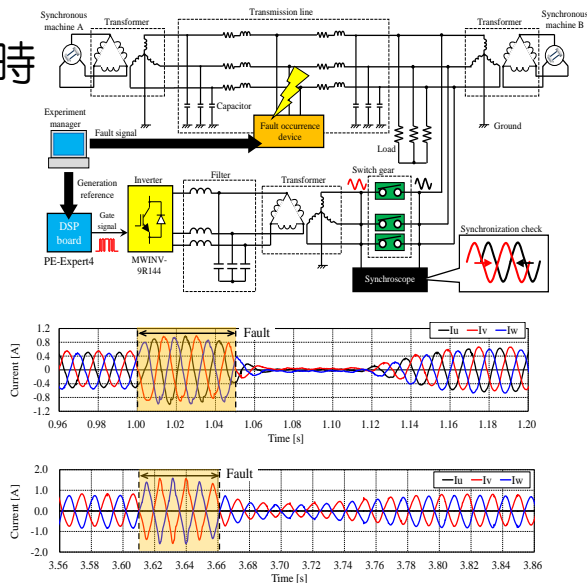
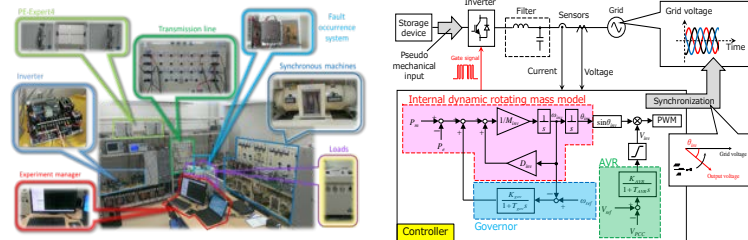
- ⇒ マルチループの不安定性回避・制御系構築
- ⇒ 独立運転時・複数台並列運転時の安定性などを確認
- ⇒ 単相バージョンも開発し、事故時挙動、単独/並列運転時の安定性を確認
- ⇒ 実証実験により、安定動作および事故時の挙動を確認

➤ 配電系統(従来制御機器による)常時電圧制御

- ⇒ OLTC, SVRを対象とした効率的な制御方法を開発
- ⇒ 数値シミュレーションにより効果を確認

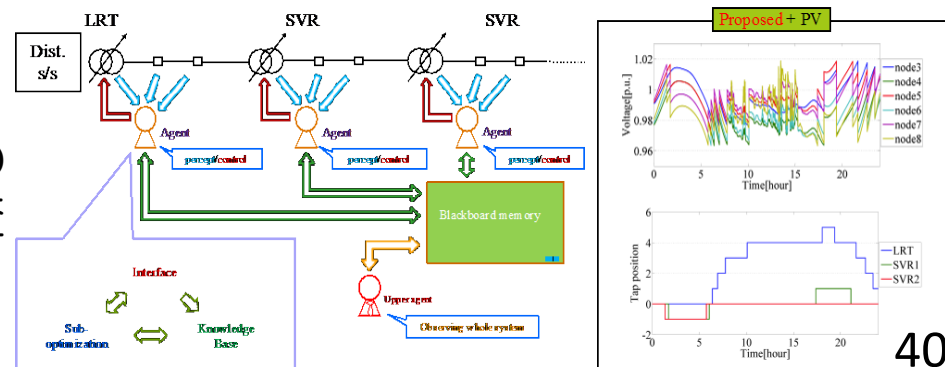
➤ 【国際連携の推進】

- ⇒ 米国WSU, PNNLとの国際連携を強化
- ⇒ 配電系制御を軸に、コラボルームを含む連携方針を決定



今後の展開

- 引き続き、擬似同期化カインバータの改良と拡張+デバイス上の制約を調査
- PCSの制御を考慮した、より効率的な配電系電圧制御の開発



益田G 需給運用の将来課題の評価

研究成果 論文・査読付国際会議：4編

➤ PV大量導入時のUC制約条件の整理

- 発電機台数とPV出力の関係を図示
- 需給インバランス発生を分析

➤ ケーススタディ・シミュレーション評価

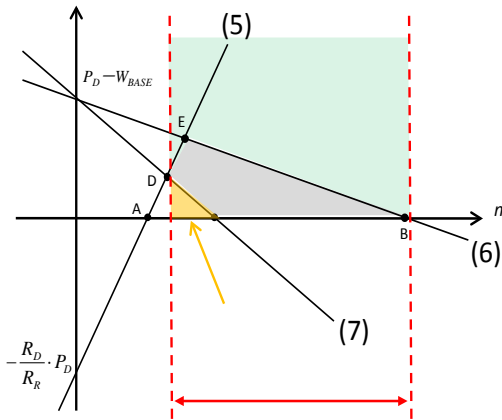
ケーススタディ

- 原子力発電の見直し
- 火力発電以外のリソースによるLFC

シミュレーション評価

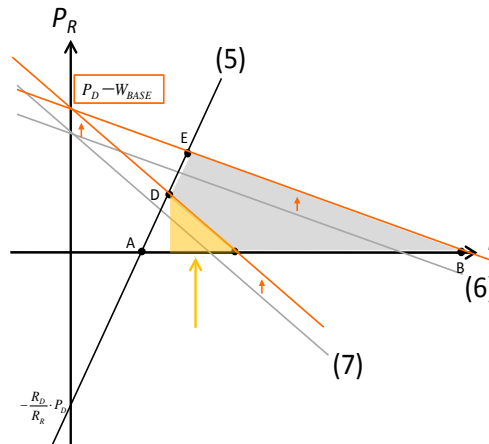
- 需給運用シミュレーションにより、ケーススタディの妥当性を検証

- 発電機台数とPV出力を領域表示
- 領域外→停電または余剰



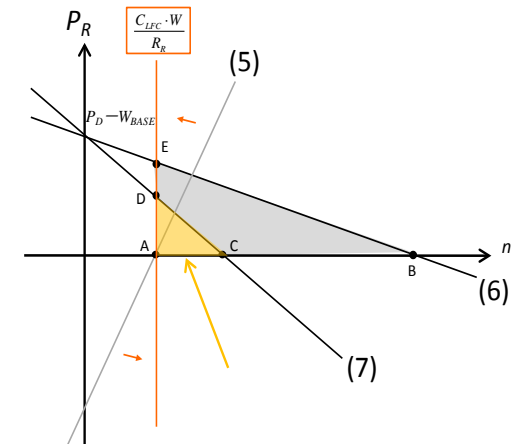
発電機台数とPV出力の関係
(二次元平面図)

- 原子力発電が減少することで、余剰は減少、停電は増大



原子力発電の導入量が減少
(ケーススタディ1)

- 火力発電のLFC負担が減少することで、余剰は減少、停電は増大



火力発電のLFC負担が減少
(ケーススタディ2)

知見：需給バランス維持とPV有効利用を同時に実現する需給運用が重要

今後の展開 バッテリー・火力機の協調運用手法の作成

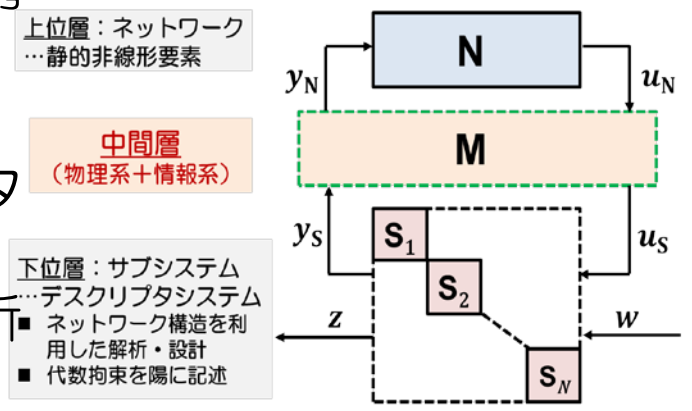
原G 階層化分散制御系設計の構築： 中間層（アグリゲータ）設計に向けて

研究成果

- 階層分散型制御系設計アーキテクチャの提案
 - ⇒ 局所制御器および大域的制御器の階層的制御器設計問題の提案
 - ⇒ アグリゲーションを踏まえたグローバル制御系設計問題の構造の解明
- 大規模最適化における効用関数のばらつきと最適値との関係の解析
 - ⇒ 効用関数総和の最適化における，各効用関数のばらつきの影響の解析
 - ⇒ アグリゲーションにおける望ましいクラスタの基本的性質の導出
- 消散性に基づく階層化デスクリプタシステム表現による解析
 - ⇒ 大規模電力系統の統一的システム表現と中間層の役割の検討
 - ⇒ 安定条件の導出と送配電ユニットとの連携

今後の展開

- 複数のアグリゲータによる望ましいクラスタリングの解明と設計手法への展開
- 階層分散型制御系における制御性能限界解析
- 縦・横の両者の中間層設計の体系化



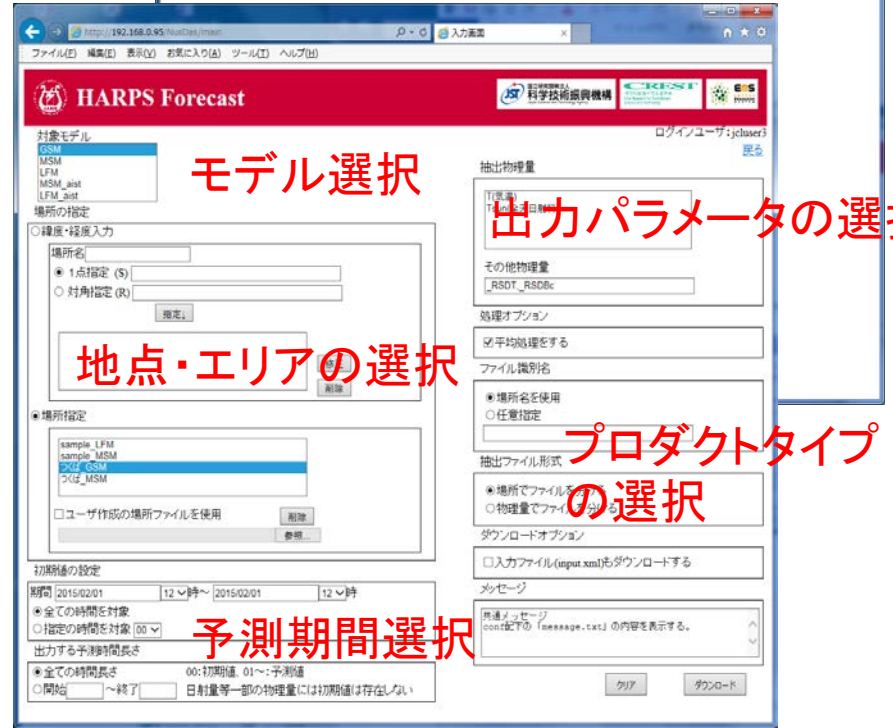
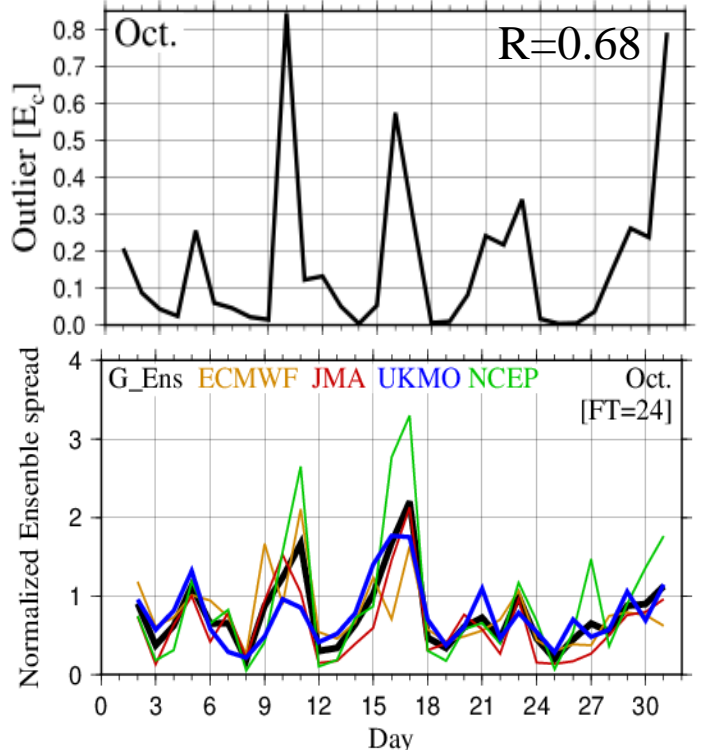
村田G PV発電の予測技術

研究成果

システム構築

② HARPS FORECAST 開発

➤ ① 日射予測大外しの予見可能性
 複数予報機関(日・欧・英・米)を併用した
 日射予測大外しの予見可能性
 (上)大外し係数と(下)アンサンブルスプレッド
 有意な相関を確認(10ヶ月)



- 複数の海外予測機関のデータを利用(アンサンブル予測の検討)
- 予測大外れ対策、予測値の信頼区間推定技術へ
- 各種予測データの集約(気象庁現業データ(許可申請中)、AIST予測データなど)。実績データは整備検討中。
- HARPS各グループ内での予測データ利用促進
 →今後の分野横断型の研究加速へ 43