

【個別報告2】

安定かつ経済的な需給計画・運用に 貢献する再エネ出力予測

電力中央研究所 グリッドイノベーション研究本部
研究統括室
副統括室長 兼 課題統括（再エネ出力予測） 上席研究員
由本 勝久

研究報告会2022

2022年11月10日

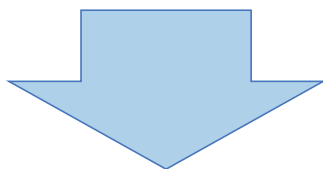
RI 電力中央研究所

© CRIEPI 2022

RI 電力中央研究所

本報告でお伝えしたいこと

- 2050年カーボンニュートラルの実現に向け、再生可能エネルギー（再エネ）を主力電源として最大限導入する
- しかし、導入の中心となる太陽光発電（PV）・風力発電は自然変動電源と呼ばれ、**天気によって出力が変化する**



大量導入すると需要と供給を
バランスさせるのが困難にな
るとの懸念

需給運用を安定かつ経済的に行うには

- ① 予測精度の向上、
- ② 予測大外しの検知、
- ③ 低出力現象の分析と長期予測 が重要な技術課題

© CRIEPI 2022

1

報告内容

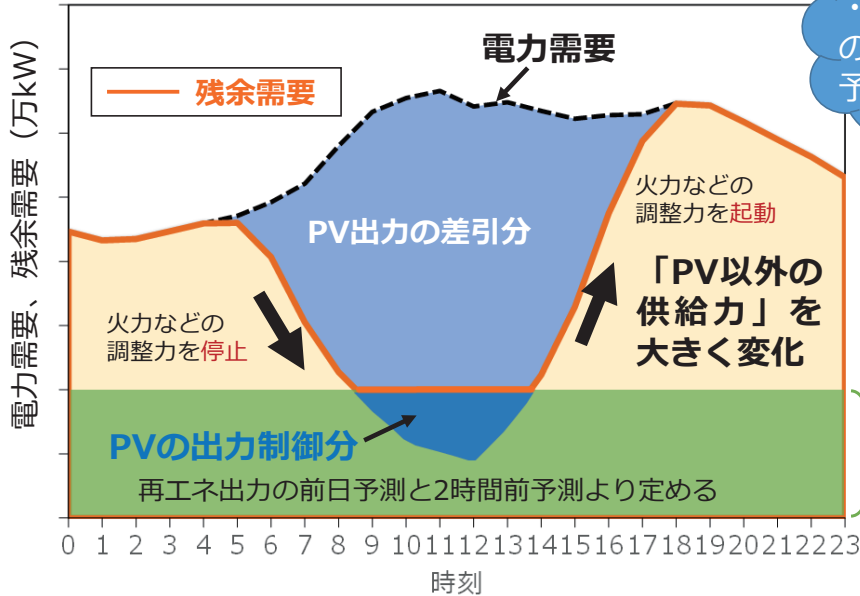
1. 電力システムの需給計画・運用における予測の重要性
2. 当所の再エネ出力予測の基盤技術
3. 再エネ大量導入時の需給計画・運用に貢献する予測技術の開発
4. まとめ

報告内容

1. 電力システムの需給計画・運用における予測の重要性
2. 当所の再エネ出力予測の基盤技術
3. 再エネ大量導入時の需給計画・運用に貢献する予測技術の開発
4. まとめ

再エネ大量導入時の需給運用の難しさの例 (1)

残余需要 = 「電力需要」 - 「再エネ (PV) 出力」
 → PV以外の供給力が分担する分



・供給力、調整力
 ・再エネ出力制御
 の準備の適正化に
 予測が不可欠

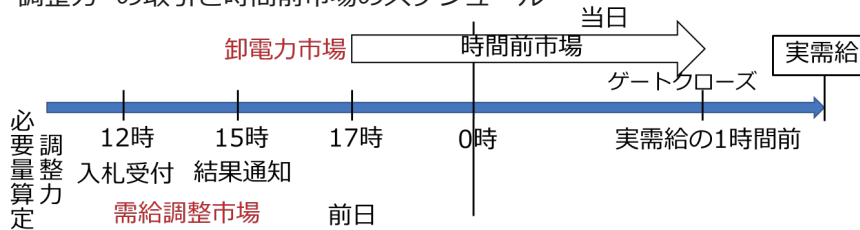
※PV以外の供給力：揚水動力
 や連系線融通も含める等、こ
 こでは詳細を省いて示してい
 る。

“下げ代不足”

短時間変動用の調整力
 + 出力変化が困難な電源、等

再エネ大量導入時の需給運用の難しさの例 (2)

調整力※の取引と時間前市場のスケジュール



再エネ出力予測
 誤差の増大によ
 り、調整力の市
 場調達が複雑に

前日

調整力の必要量を、最大に近い予測誤差に基づき計算
 → 誤差が大きいとそれだけ必要量が増大

※3次調整力②のこと。
 再エネ出力の予測誤差
 に対応する。

当日断面

- 下振れ (再エネの実出力が予測を下回る場合)
 - 調整力が不足するため、時間前市場からの調達や他エリアからの融通が必要 → 追加量の検討が必要
- 上振れ (再エネの実出力が予測を上回る場合)
 - 調整力に余剰が出て、経済性に懸念 → 調達を減らす検討が必要

再エネ大量導入時の予測の重要性

- PV・風力発電は日射や風の変化で出力が変化する



大量導入した場合、供給力・調整力を大きく変化させねばならない

- 需給バランスを適切に維持するには、予測が不可欠
- 導入量が増えるにつれて予測誤差の大きさそのものも増大するため、これを考慮すると需給の調整が複雑化



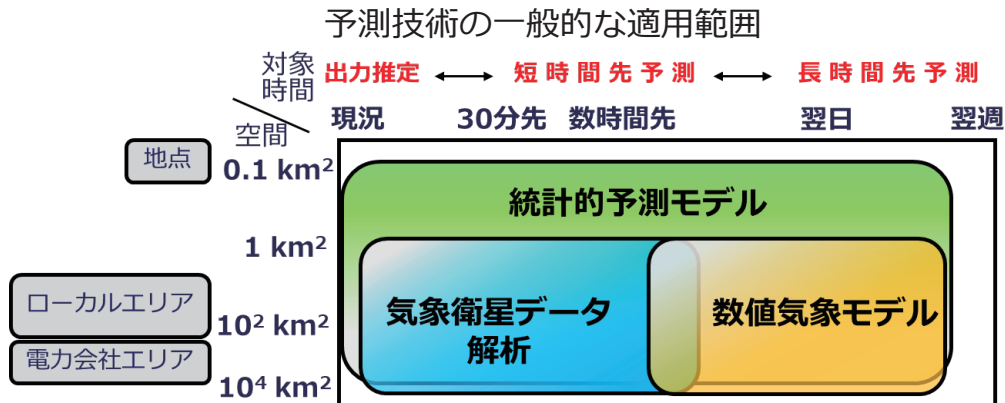
“出力予測技術の高度化が不可欠”

当所では、予測精度の向上のみならず、将来の需給運用の実務への貢献を考えた予測技術の開発を進めている

報告内容

1. 電力システムの需給計画・運用における予測の重要性
2. 当所の再エネ出力予測の基盤技術
3. 再エネ大量導入時の需給計画・運用に貢献する予測技術の開発
4. まとめ

再エネ出力予測技術



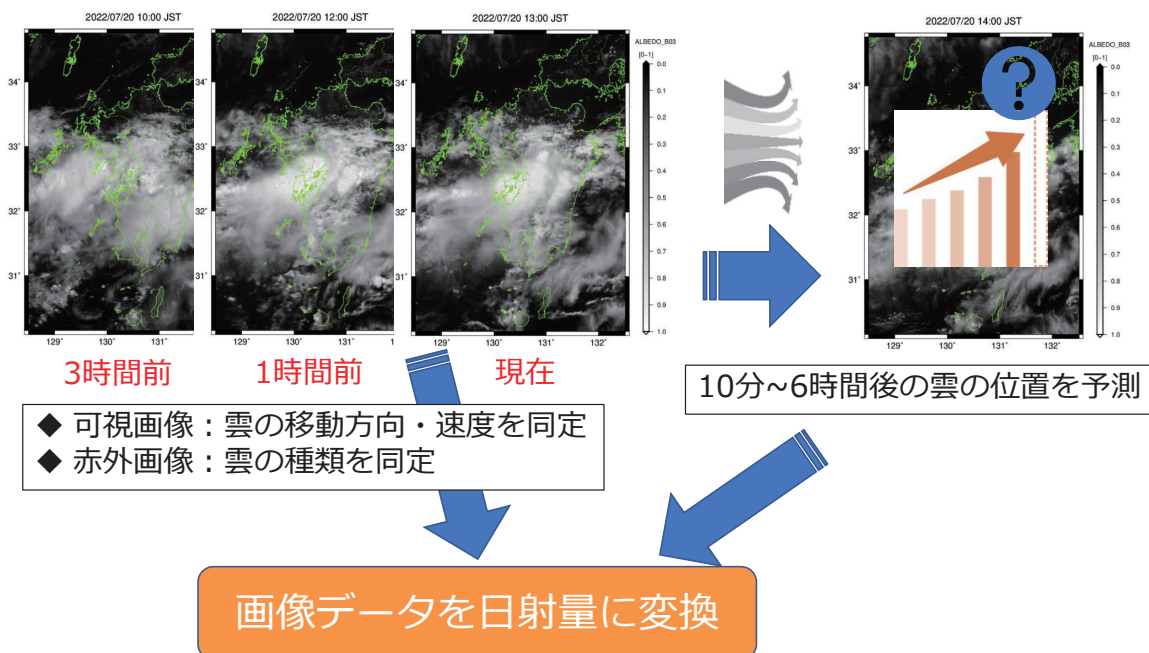
当所が保有する予測の基盤技術

- 気象衛星データ解析による日射予測 (SoRaFAS)
- 数値気象モデルによるPV・風力発電出力予測 (NuWFAS)
- 統計手法による残余需要予測

当所開発の日射予測・解析システム (SoRaFAS)

Solar Radiation Forecasting and Analysis System

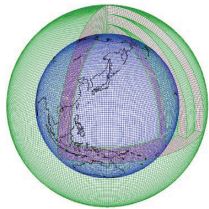
電中研報告N18003



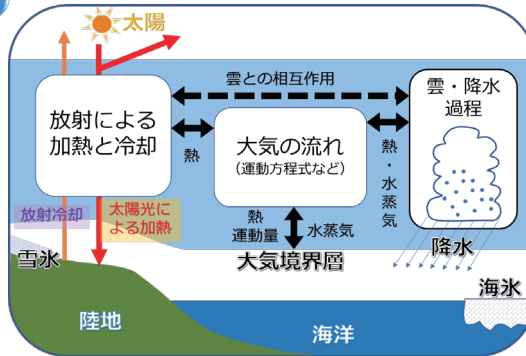
当所開発の気象予測解析システム (NuWFAS)

Numerical Weather Forecasting and Analysis System

電中研報告N09024



出典：気象庁WWW「数値予報とは」
<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/ku/know/whitep/1-3-1.html>

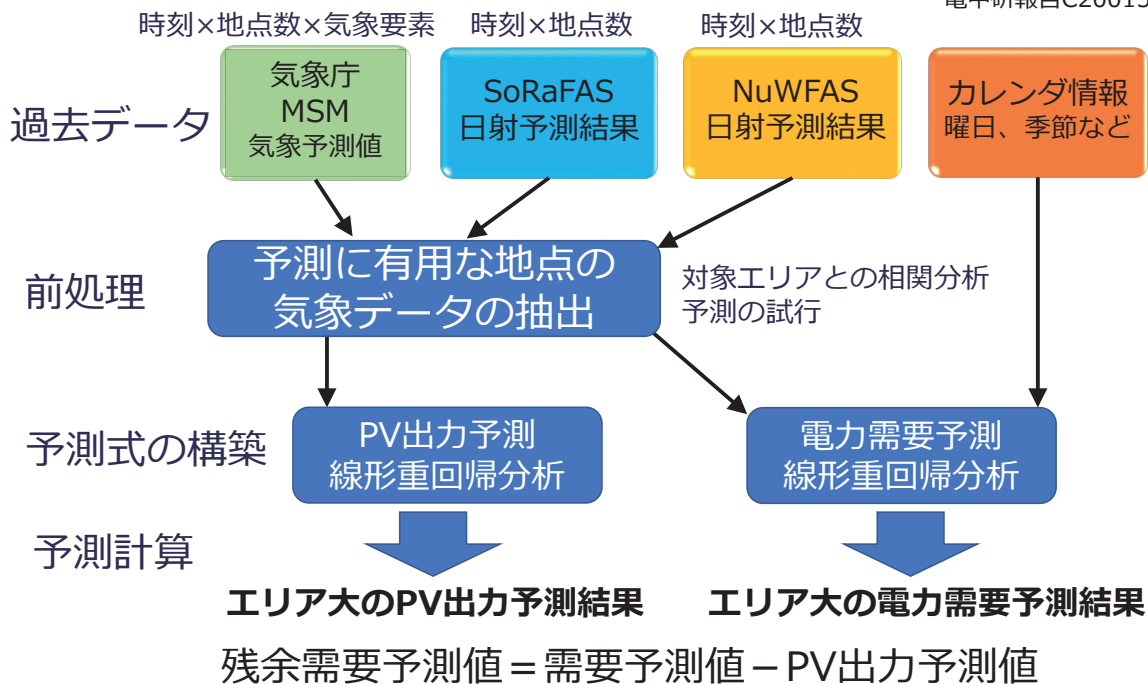


WRF : Weather Research and Forecasting
 米国大気研究センター(NCAR)などが開発した数値気象モデル

コンピュータ上で仮想の地球の大気の動きをシミュレーション
 物理学や化学の法則に基づいて時間変化を計算

統計手法による残余需要予測

電中研報告C20015



当所の予測技術の特徴

- 気象に関する長年の研究の蓄積
 - ✓耐風、耐雪、耐塩対策等に活用されてきた
 - ➡電力設備の復旧支援・災害対応へ【個別報告4】
- 予測システムの内製化
 - ✓新技術を迅速に採用することが容易（例：積雪量予測）
 - ✓柔軟・迅速に電気事業の新たなニーズに応えることが可能
- 予測結果をWebベースで配信
 - ✓ブラウザのみで結果を受信、閲覧可能
 - ✓電力会社の実配信➡利用評価を基に改善・改良
- 様々な専門分野の研究者とのコラボレーション
 - ✓気象学 ・ 統計学 ・ 電力システム工学の有機的結合
（基盤技術）（手法改良）（適用先）
 - ✓応用面、実用面に比重を置いて、ニーズを先取り

報告内容

1. 電力システムの需給計画・運用における予測の重要性
2. 当所の再エネ出力予測の基盤技術
3. 再エネ大量導入時の需給計画・運用に貢献する予測技術の開発
4. まとめ

再エネ主力電源化に向けて

安定かつ経済的な需給計画・運用のための 再エネ出力予測の重要技術課題

| 技術課題 | ①予測精度の向上 | ②予測大外しの検知 | ③再エネの 低出力現象の分析と 出力の長期予測 |
|------|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 活用先 | <ul style="list-style-type: none"> 需給計画・運用における経済性の向上、など | <ul style="list-style-type: none"> 調整力必要量の削減 再エネ出力制御量の削減 需給ひっ迫の可能性検討 | <ul style="list-style-type: none"> 需給ひっ迫の回避 エネルギーセキュリティの向上 長期の需給計画策定(年間計画など) |

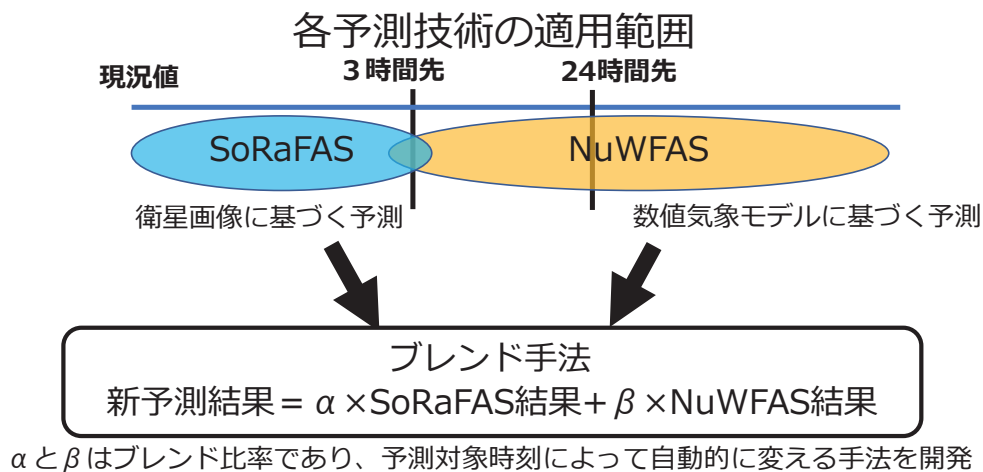
現在進行中の当所における取り組みを紹介

①予測精度の向上

現在進行中の2件を紹介

- 複数予測技術の融合による精度向上
 - ✓ 予測技術によって苦手・得意とする条件が異なるため、組合せ効果で相互補完
- ローカルエリアでの予測精度向上
 - ✓ 新しい適用先・プレイヤーでの活用
 - ・マイクログリッドや需要地系統
 - ・VPP（仮想発電所）やアグリゲータ事業者

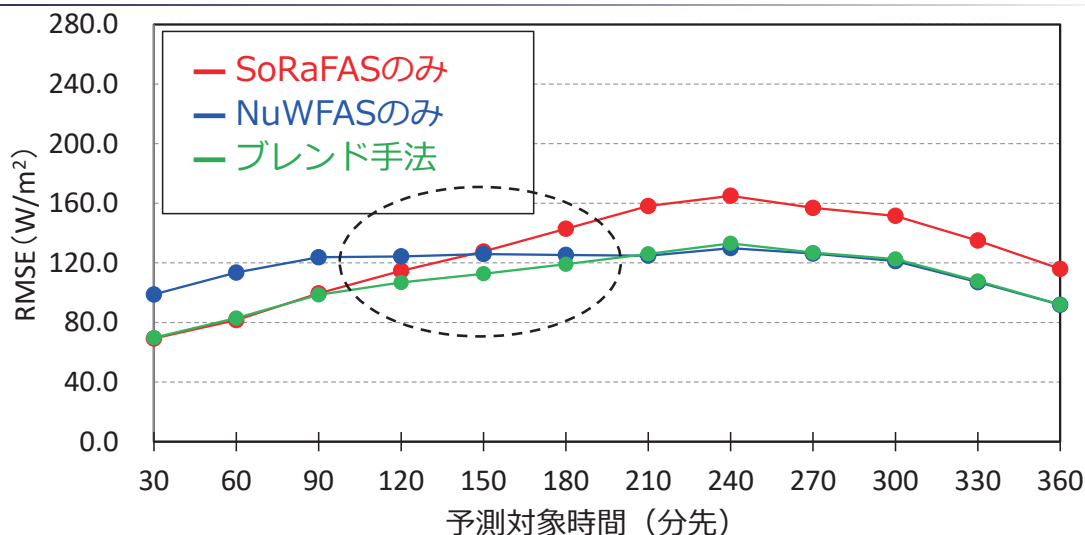
当所提案の複数予測技術の融合法



従来技術が苦手としていた、2時間先から3時間先の予測で精度向上を確認

卸電力市場の当日市場（1時間前が最短）での調達に活用が期待

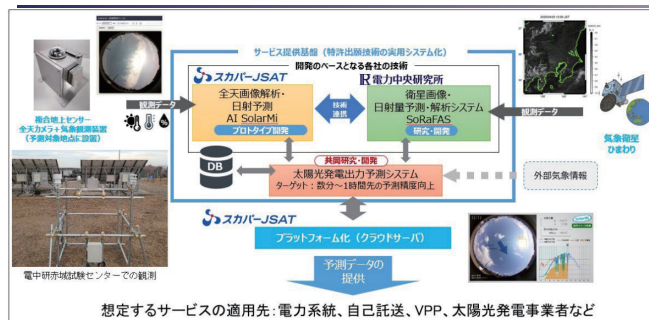
ブレンド手法による日射予測結果



RMSE：平均2乗誤差の平方根

2021年10月～12月 赤城試験センターでの結果
 予測実施時刻：8:00,8:30,9:00,9:30の平均値

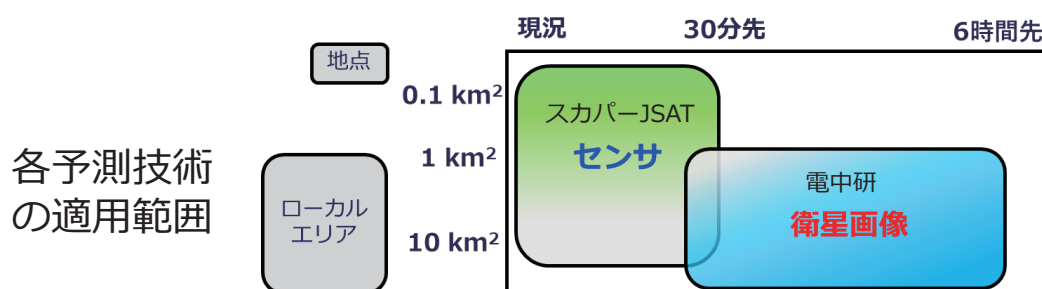
ローカルエリアでの予測精度向上



- ✓ スカパーJSAT様: **センサ**
全天画像+気象観測
数分先から15分先程度
(最大30分)
- ✓ 電中研: **衛星画像**
SoRAFAS
30分先から3時間先程度
(最大6時間)

プレスリリース2020年12月3日 https://criepi.denken.or.jp/press/pressrelease/2020/12_03press.pdf?v4

複合地上センサ予測と衛星画像予測のハイブリッド予測システム



予測精度向上に向けた今後の研究の方向

- 従来技術の改良、など
- AI・機械学習の適用 (現在進行中※)
- IoT (Internet of Things:モノのインターネット) の融合
 - ➡ 気象センサ等の観測装置を分散設置し、IoT技術により気象データをリアルタイムに収集する
 - 数値気象モデルの初期値
 - 予測結果の精度検証用データ➡補正・補完にも (洋上風力発電用の風速観測)
 - AI・機械学習の学習データの蓄積
 - ➡ 複合地上センサ予測と衛星画像予測のハイブリッド予測システムは、IoTの融合の初期技術

今後注目したい
研究課題

※参考:

由本・比護他、平成28年 電気学会 B部門大会、120(2016)
菅野他、令和4年電気学会全国大会、6-213(2022)
菅野・野原、2022年度日本気象学会秋季大会、P439(2022)

②予測大外しの検知

決定論的予測の結果例

翌日PV出力予測で大きな誤差が生じた回数
(年間8760時間に対する百分率)

| | |
|------------|------|
| ±20%を超える誤差 | 1.6% |
| ±30%を超える誤差 | 0.3% |



回数は少ないものの
予測大外しは生じる

※一つの予測値を求める「決定論的予測」では限界がある

- ✓ 翌日予測：13時30分に出力
- ✓ 期間：2021年の1年間の毎日
- ✓ 粒度：1時間単位
- ✓ 誤差：導入設備量に対する比

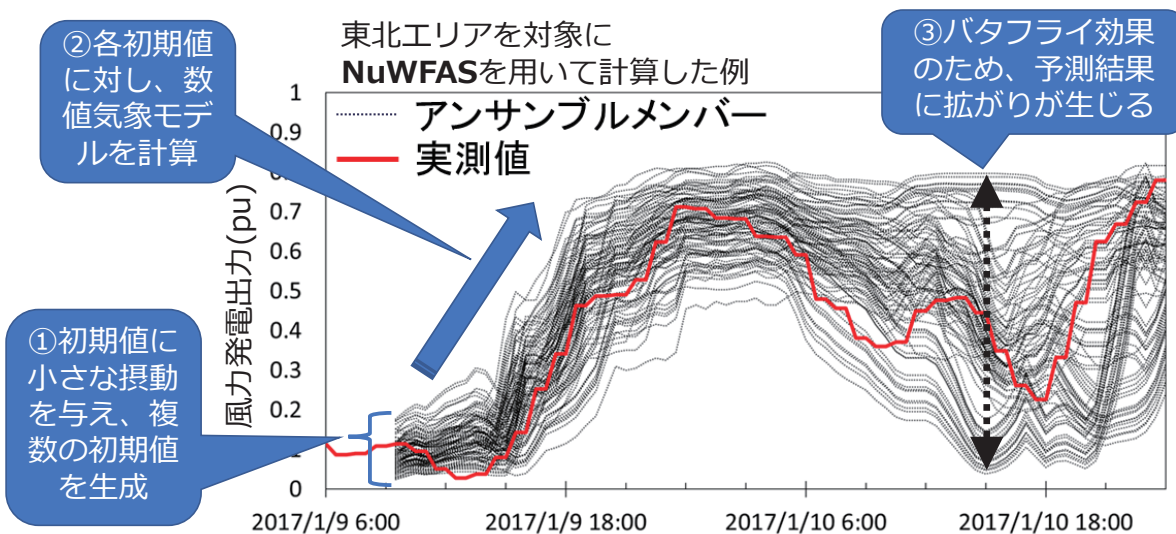
計算方法は、電中研報告C20008に記載

大外しにどう備えるかが
重要と認識

予測大外しの検知に向けた、
アンサンブル予測に基づく確率予測の研究開発に着手

アンサンブル予測とは

複数の予測を同時に求める予測法 電中研報告C19005



アンサンブルメンバー：個々の予測のこと

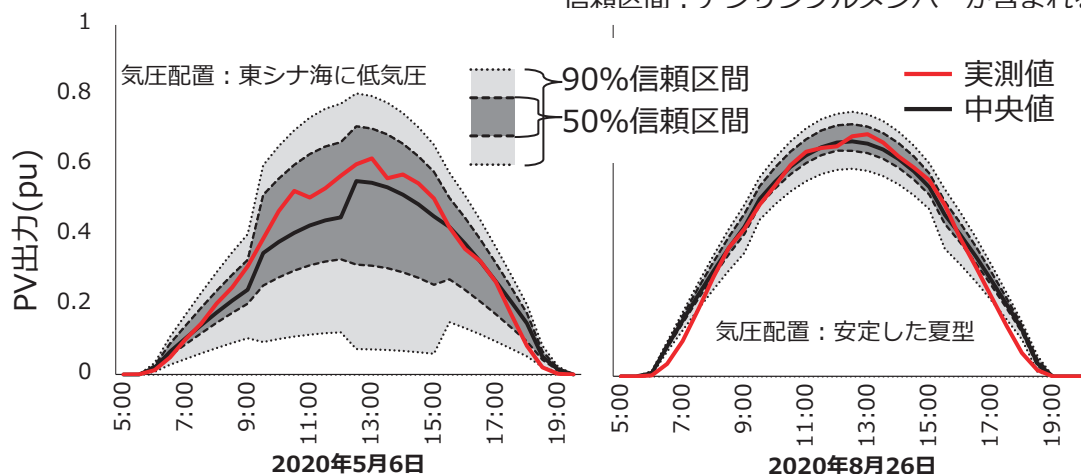
pu(per unit)：定格容量を1.0とした発電出力の比

確率予測による予測の信頼性評価

アンサンブル予測を確率論的に表現

中国エリアを
対象にした翌日PV出力予測の例

信頼区間：アンサンブルメンバーが含まれる確率



PV出力予測の信頼性が低い事例

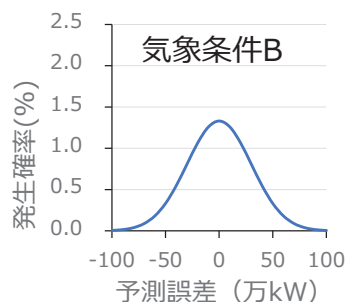
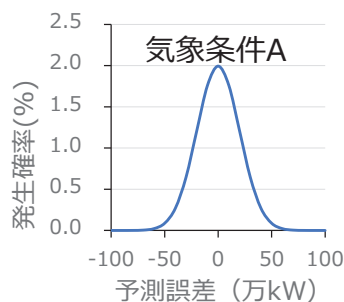
PV出力予測の信頼性が高い事例

pu(per unit)：定格容量を1.0とした発電出力の比

予測大外しの検知に向けた今後の研究の方向

- 第1ステップ：信頼区間・確率予測の使用性向上
 - 区間の幅から予測の信頼性を定量評価
 - ➡再エネ出力制御の所要量等の検討に活用
- 第2ステップ：予測大外しと気象条件との関係性評価
 - 大外しが起こり易い気象条件の抽出と分析・評価方法の開発
- 第3ステップ：気象条件ごとの予測誤差の発生確率
 - 予測大外しの可能性を把握

確率密度分布
イメージ



③再エネの低出力現象の分析と出力の長期予測

研究の背景

- 自然変動電源（PV、風力）の出力特性
 - 変動性→これまでの報告内容
 - 間欠性
 - 雨や無風で出力低下が長期間に亘ること

- 間欠性について
 - 出力が非常に低い無光無風期間（Dark Doldrums, Wind Drought）が欧米で問題
 - ドイツでは2017年1月中旬から下旬、オランダでは2018年4月30日に実際に起こり、系統に影響があったと報告

Doldrums : 無風状態
Drought : 干ばつ

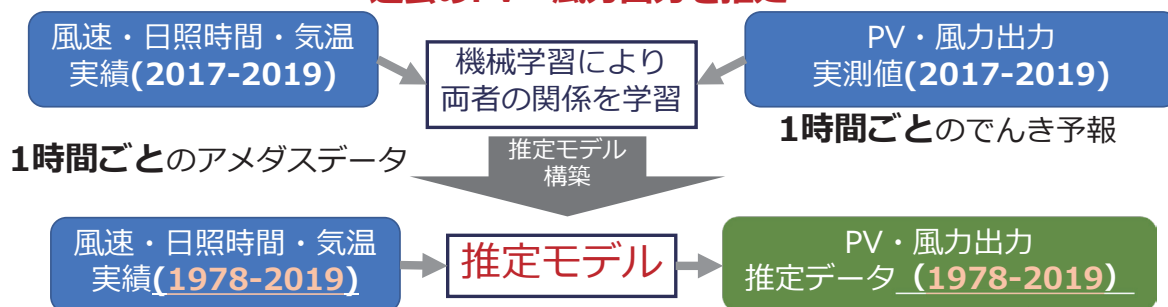
参考 : Bowen Li, et al., Wind Energy, Volume24, Issue1(2021)

◆ 日本でも再エネの低出力現象があるのではないかと
◆ エネルギーセキュリティ上の懸念になるのではないかと

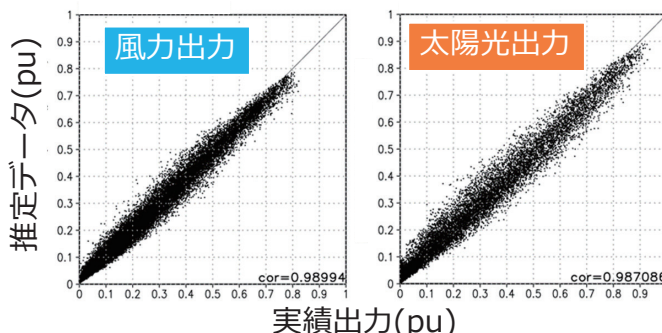
③再エネの低出力現象の分析と出力の長期予測

当所における低出力現象に関する研究

過去のPV・風力出力を推定



pu(per unit) :
定格容量を1.0
とした発電出力
の比

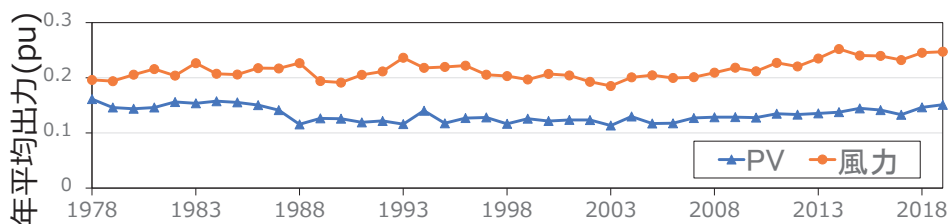


42年分

2017-2019
のデータの比較

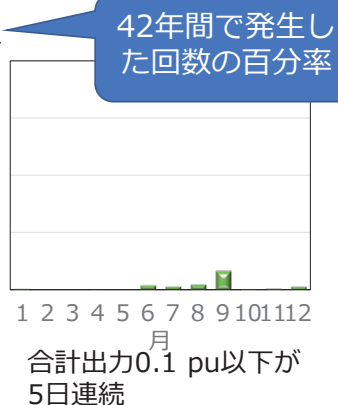
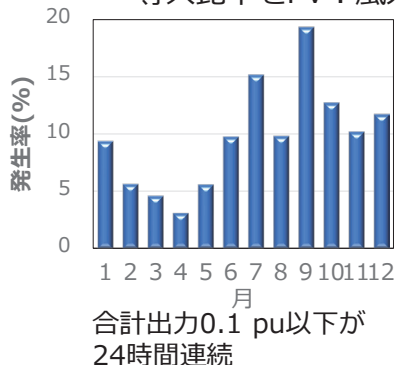
低出力現象に関する分析結果例

42年(1978-2019)分の推定データの結果(東北エリア)



pu(per unit) :
定格容量を1.0
とした発電出力
の比

導入比率をPV : 風力 = 3 : 1とした場合の試算結果



42年間で発生した
回数の百分率

長期予測に向けた今後の研究の方向

今後のニーズ

- ✓ 出力予測の対象スパン : 現在は3日先程度まで → 一週間先 (週間計画での活用)
- ✓ エネルギーセキュリティの検討 → 長期 (例えば3カ月以上) のPV・風力の発電電力量予測

■ 低出力現象について

- ✓ 洋上風力も含めた低出力現象の分析とデータの蓄積
- ✓ 無光無風が発生する条件の気象学的検討

■ 長期予測について

- ✓ チャレンジングな課題
- ✓ まずは地球規模の気象現象 (エルニーニョ等) と日本域での日射・風速との関係性の解明からスタート

報告内容

1. 電力システムの需給計画・運用における予測の重要性
2. 当所の再エネ出力予測の基盤技術
3. 再エネ大量導入時の需給計画・運用に貢献する予測技術の開発
4. まとめ

まとめ

- 2050年カーボンニュートラルに向け
 - ➔需給計画・運用を安定かつ経済的に行うために、出力予測の高精度化・高度利用が不可欠
- PV・風力が大量導入された場合、予測精度向上・大外し検知・長期予測が重要な課題
- 当所では、SoRaFAS・NuWFAS・統計手法による予測システムを開発
 - ➔これらをベースとして新たな予測技術の開発を進捗中

当所では、再エネ主力電源化に向け、安定かつ経済的な需給運用に貢献する予測技術の開発を推進します

ご清聴ありがとうございました

R 電力中央研究所
Central Research Institute of Electric Power Industry

参考文献

1. 送配電網協議会：需給調整市場とは、
<https://www.tdgc.jp/jukyuchoseishijo/outline/outline.html> (2022年10月3日閲覧).
2. 需給調整市場検討小委員会 事務局：三次②必要量の低減に向けた新たな取り組みについて、第30回需給調整市場検討小委員会 資料2 (2022年7月13日).
3. 橋本 篤・宇佐美 章・小林 広武：ひまわり8号を用いた日射量推定・予測システムの開発－九州エリアにおける1年間の精度評価－、電力中央研究所 研究報告N18003(2019).
4. 橋本 篤・平口 博丸：気象予測・解析システム (NuWFAS) の高度化と北海道を対象とした予測精度評価、電力中央研究所 研究報告N09024 (2010).
5. 比護 貴之：需給運用で用いる残余需要予測の高精度化に関する基礎検討－複数の残余需要予測式の比較評価－、電力中央研究所 研究報告C20015 (2021).
6. 比護 貴之・橋本 篤・野原 大輔・由本 勝久・門倉 真二・平口 博丸：短時間先日射予測における統計手法の活用、令和元年電気学会電力・エネルギー部門大会、No.13(2019).
7. 橋本 篤・由本 勝久：衛星画像予測と数値気象モデルを組み合わせた短時間先日射量予測手法の開発、令和4年電気学会電力・エネルギー部門大会、No.15(2022).
8. 電中研・スカパーJSATプレスリリース2020年12月3日
https://criepi.denken.or.jp/press/pressrelease/2020/12_03press.pdf?v4
9. 由本 勝久・比護 貴之・鶴見 剛也：多数地点の日射データに基づく統計的手法による短時間先日射予測の開発－天気別予測の効果の検討－、平成28年 電気学会 電力・エネルギー部門大会、120 (2016)

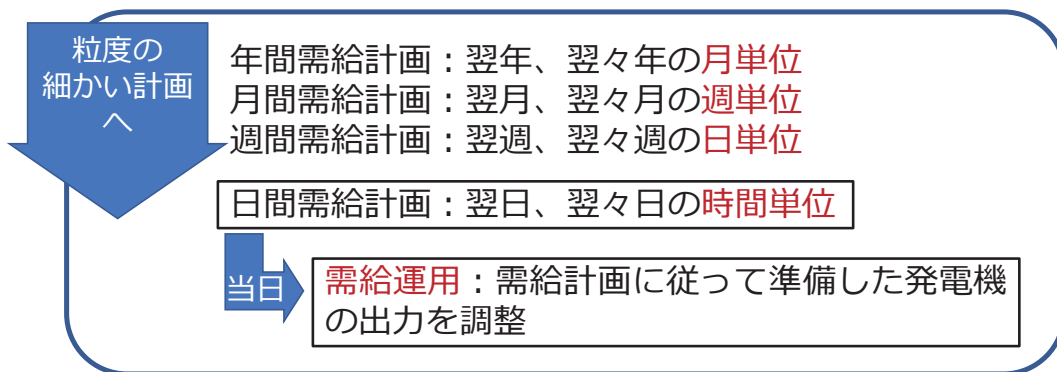
参考文献

10. 菅野 湧貴・野原 大輔・大庭 雅道・藤本 悠：勾配ブースティング決定木を用いた風力発電出力予測とその解釈性に関する基礎的検討、令和4年電気学会全国大会、6-213(2022)
11. 菅野 湧貴・野原 大輔：機械学習を用いたエリア合計太陽光発電出力の予測、2022年度日本気象学会秋季大会、P439(2022)
12. 野原 大輔・菅野 湧貴：太陽光発電出力確率予測 – 中国エリアにおける予測事例とその検証 –、電力中央研究所 研究報告C20008 (2019).
13. 大庭 雅道・門倉 真二・野原 大輔・平口 博丸・橋本 篤：電中研風力発電出力予測システムの構築 – 東北エリアにおける予測事例とその検証 –、電力中央研究所 研究報告C19005 (2020).
14. 電力中央研究所：Annual Report2020,
<https://criepi.denken.or.jp/intro/annualreport.html>
15. Bowen Li, Sukanta Basu, Simon J. Watson, Herman W. J. Russchenberg:
Mesoscale modeling of a “Dunkelflaute” event, Wind Energy, Volume24,
Issue1(2021) <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/we.2554>
16. M. Ohba, Y. Kanno, D. Nohara: Climatology of dark doldrums in Japan, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 155, 111927(2022)

付 録

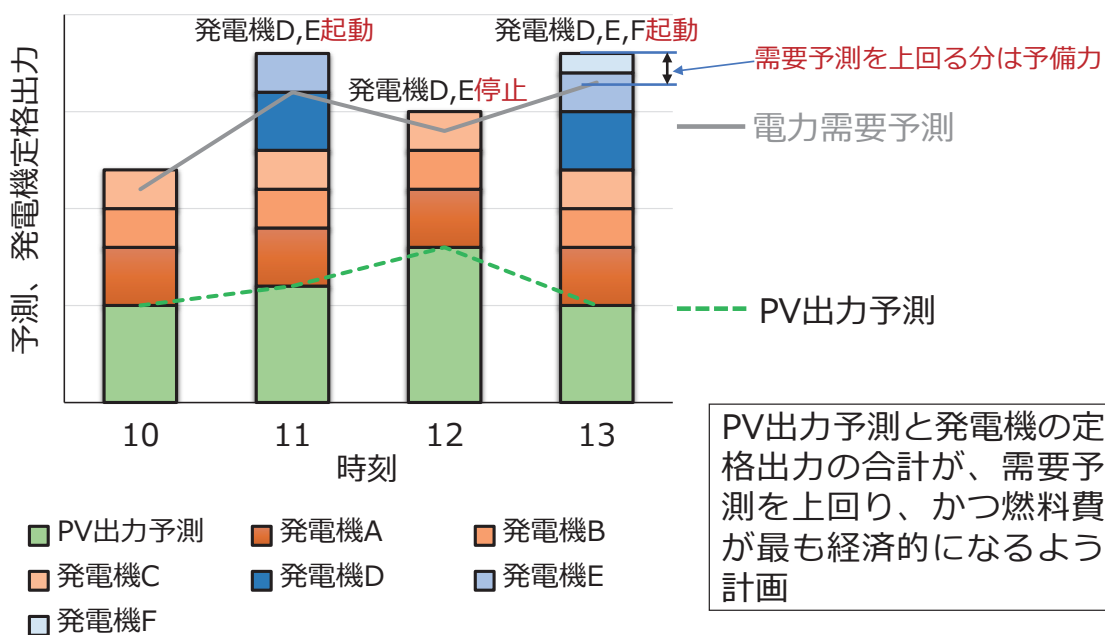
電力システムにおける需給計画・運用

- 一般送配電事業者では、**想定した将来の電力需要・再エネ出力に対し**、需要と供給をバランスでき、**需要を上回る供給力を確保する計画を策定している（需給計画）**
- 時々刻々変化する当日の電力需要に合わせて発電機出力等を調整する（**需給運用**）

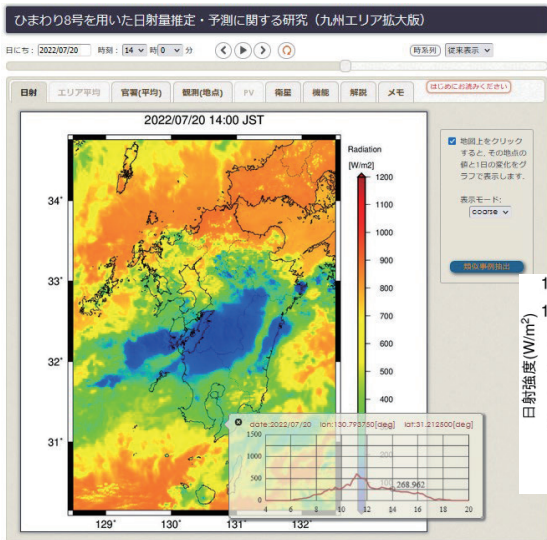


需給計画の例

翌日の発電機起動停止計画の策定イメージ

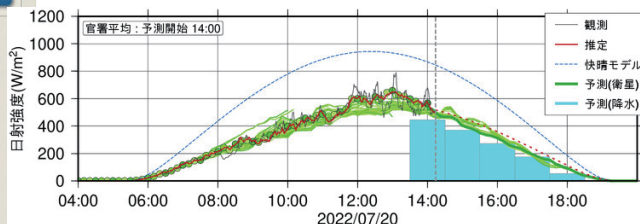


SoRaFASによる日射の推定・予測



SoRaFAS画面例
2022/07/20 14:00の日射推定結果

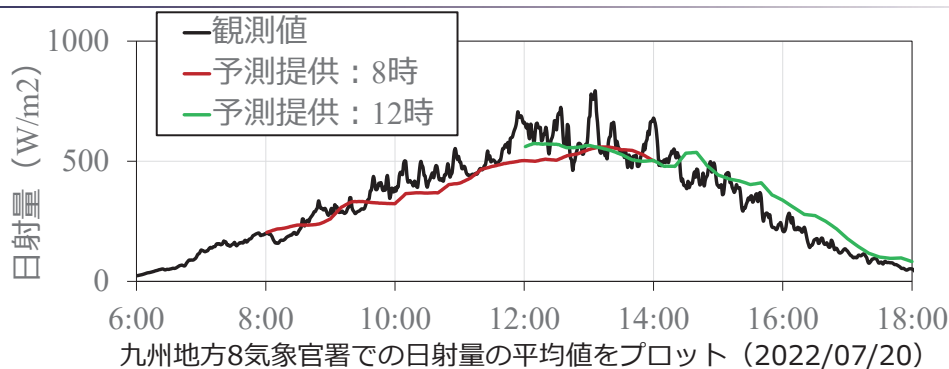
- 日射の推定：衛星画像から直接変換（1分間隔、1km解像度）
- 日射の予測：10分間隔、6時間先まで（実用的には2～3時間先まで）



2022/07/20 14:00提供の過去実績と予測結果のグラフ
(九州地方8気象官署での観測値の平均)

※推定：これまでの各時点での日射推定結果
※予測（衛星）：今後の日射予測結果

SoRaFASによる予測結果



日射量予測誤差 期間RMSE
(当所 赤城試験センター：2021/10~2021/12)

| 予測提供時刻 | 1時間後 | 2時間後 | 3時間後 | 4時間後 |
|--------|------|------|------|------|
| 9時00分 | 83 | 104 | 145 | 171 |
| 10時00分 | 81 | 129 | 170 | 144 |
| 11時00分 | 102 | 143 | 116 | 88 |

10分値、W/m²

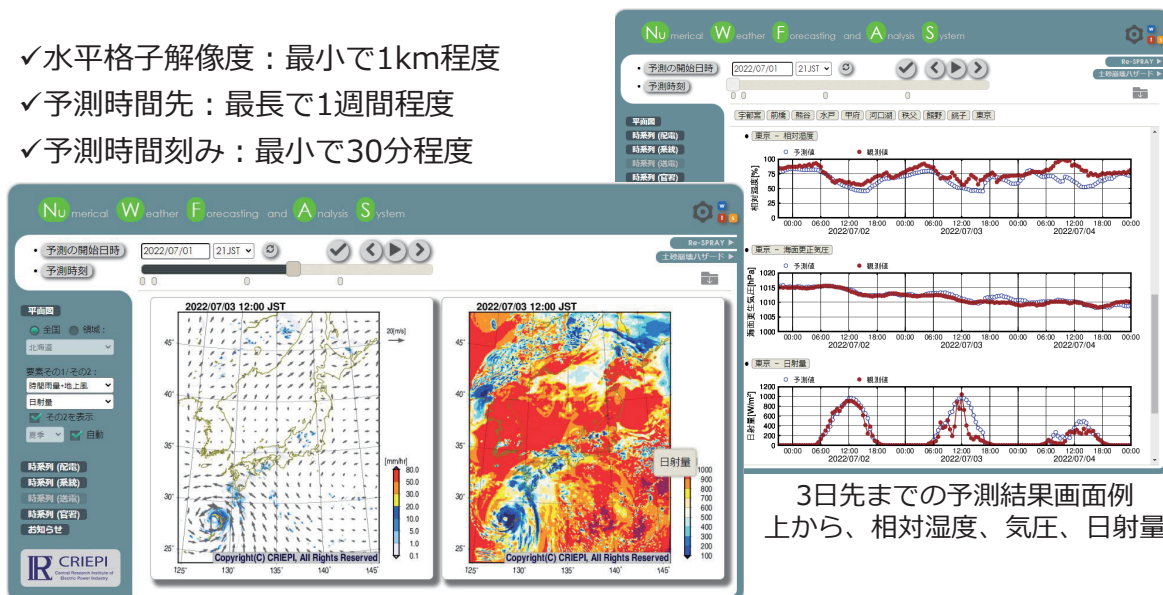
(参考)
赤城試験センターでの観測結果

| | 2021年10月 | 2021年11月 | 2021年12月 |
|-----|----------|----------|----------|
| 月最大 | 844 | 811 | 675 |
| 月平均 | 292 | 310 | 262 |

10分値、W/m²

NuWFASによるPV・風力出力予測

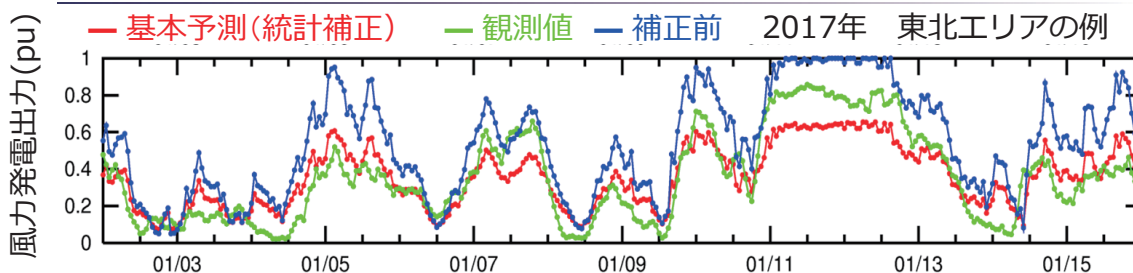
- ✓水平格子解像度：最小で1km程度
- ✓予測時間先：最長で1週間程度
- ✓予測時間刻み：最小で30分程度



3日先までの予測結果画面例
上から、相対湿度、気圧、日射量

風速・降水量と日射量の分布を表示した例（動画も可能）

NuWFASによる予測結果例



NuWFAS基本予測による予測誤差 年間RMSE（定格容量%）

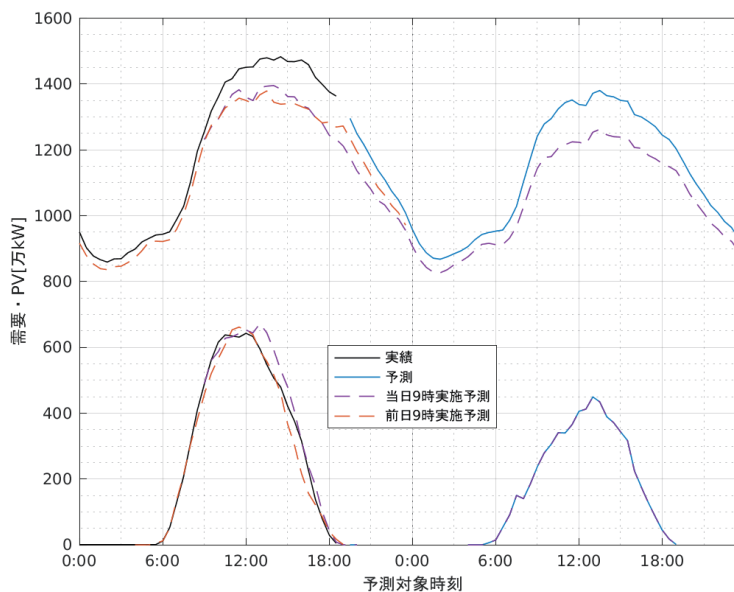
RMSE：
平均2乗誤差の
平方根

| | 風力予測誤差 | PV予測誤差 |
|---------------|--------|--------|
| 6時間先まで | 7.4 | 7.5 |
| 6時間から12時間先まで | 8.2 | 7.8 |
| 12時間から18時間先まで | 8.4 | 8.1 |
| 18時間から24時間先まで | 8.8 | 8.3 |
| 24時間から30時間先まで | 9 | 8.8 |
| 30時間から36時間先まで | 9.5 | 9.1 |

残余需要予測システム

- ✓エリア大の当日・翌日の電力需要とPV出力の予測を30分単位で表示
- ✓実績・予測：でんき予報
- ✓当日9時実施予測：
翌日24時までの予測
- ✓前日9時実施予測：
当日24時までの予測

現在、システム
を構築中



プロトタイプ of 配信画面例
※ブラウザで表示