

2024年度NEDO再生可能エネルギー一部成果報告会 プログラムNo.15

太陽光発電主力電源化推進技術開発/研究開発 項目（Ⅱ）先進的共通基盤技術開発/発電量の 短期予測に向けた日射量予測技術の開発（日射 量の短期予測に関する研究開発）

発表日：2024年12月17日

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

発表者名：宇都宮健志

*団体名（企業・大学名など）：(一財) 日本気象協会

問い合わせ先：(一財) 日本気象協会 環境・エネルギー事業部 エネルギー事業課

宇都宮健志 E-mail: utsunomiya@jwa.or.jp TEL: 03-5958-8151

1. 目的

主に発電所地点や狭いエリアの短時間先をターゲットとして、「ひまわり8号・9号データを用いた短時間先の日射量予測技術の開発」を実施する。また、関連して予測の信頼度情報の作成手法を開発する。

2. 期間

2020年7月 ~ 2025年3月

3. 目標（中間・最終）

1km四方程度のエリアを想定した数時間先の日射量予測について、従来の手法より予測精度をRMSEで15%改善する（中間目標）。6時間程度先までの予測においても現行の手法よりも予測精度を向上させるとともに、数時間程度先までの信頼度情報の作成手法を開発する（最終目標）。

4. 成果・進捗概要

物理学的手法とディープラーニング手法（AI）を組み合わせることで、数時間先までの予測精度をRMSEで15%以上改善することができた。さらに、雲の生成・消滅の効果を組み込む等することで、6時間先までの予測精度を向上することができた。現在、予測モデルのさらなる高度化と、信頼度情報の作成手法の検討を進めている。

背景、目的、開発項目

- 太陽光発電に係るインバランスの低減、自己託送や調整力利用、蓄電池の最適制御、効率的な需給運用のために、高精度な発電量（日射量）予測の必要性が増加している。
- 大外しリスクや上振れ、下振れを見込んだ再エネ運用、電力取引、電力の需給運用の必要性が増加している。



(1)6時間程度先までの高精度な日射量予測技術の開発

6時間程度先までの高精度な日射量予測を行うために、気象衛星画像を用いた大気力学と雲物理過程などを考慮したAI予測モデルを構築する。

(2)数時間程度先予測における信頼度情報の開発

数時間程度先予測において信頼幅情報の作成手法を検討し、その有効性を評価する。

*東京理科大学の発電量予測評価技術の開発と連携して実施

開発目標

事業の最終目標

(1) 6時間程度先までの高精度な日射量予測技術の開発

従来の手法より数時間先の予測において予測精度を二乗平均平方根誤差 (RMSE) で15%改善するとともに、6時間程度先までの予測においても現行の手法よりも予測精度を向上させる。

(2) 数時間程度先予測における信頼度情報の開発

予測誤差を織り込んだ予測情報を活用するために、数時間程度先までの信頼度情報を開発する。

実施内容

(1) 6時間程度先までの高精度な日射量予測技術の開発

研究開発のコンセプト

- 6時間程度先までの高精度な日射量予測を行うために、気象衛星画像を用いた、大気力学と雲物理過程などを考慮したAIモデルを構築する。

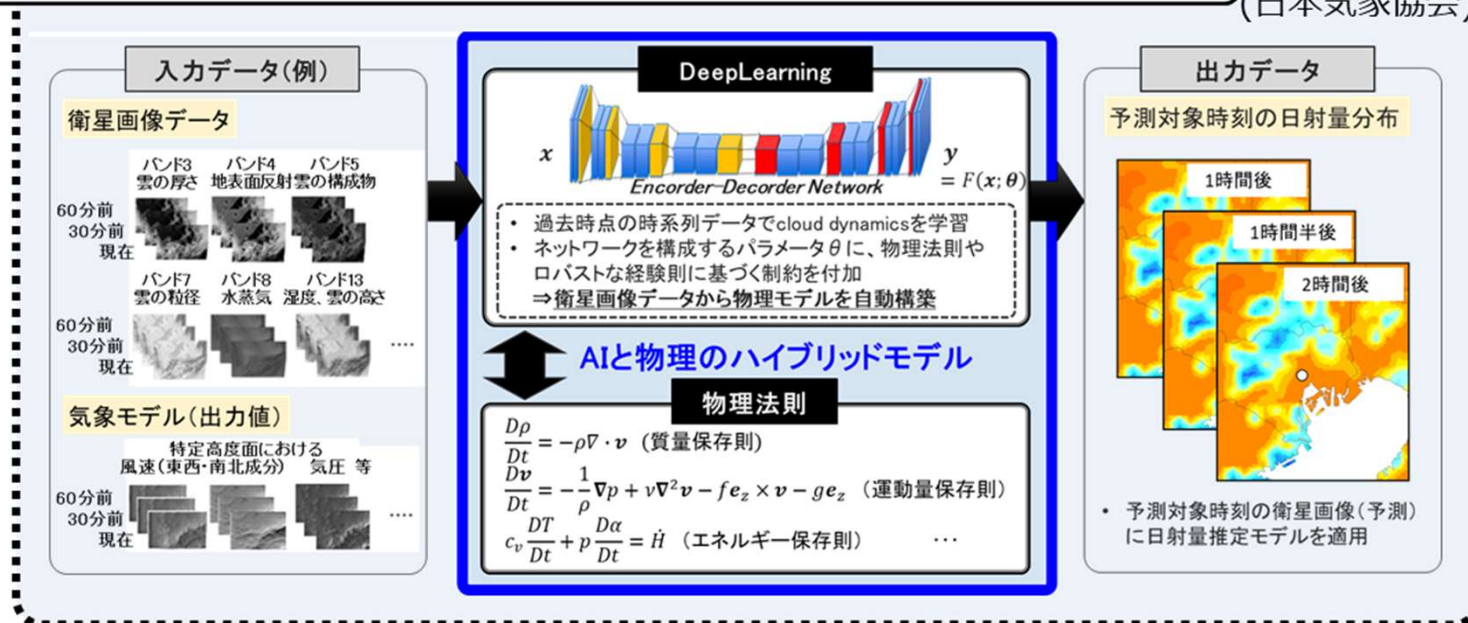
本事業で開発する予測モデル（物理AIモデル）のイメージ

(日本気象協会)

連携

発電量予測
評価技術
(東京理科大学)

高精度な日射量予測
発電量予測技術
(短時間先を対象)

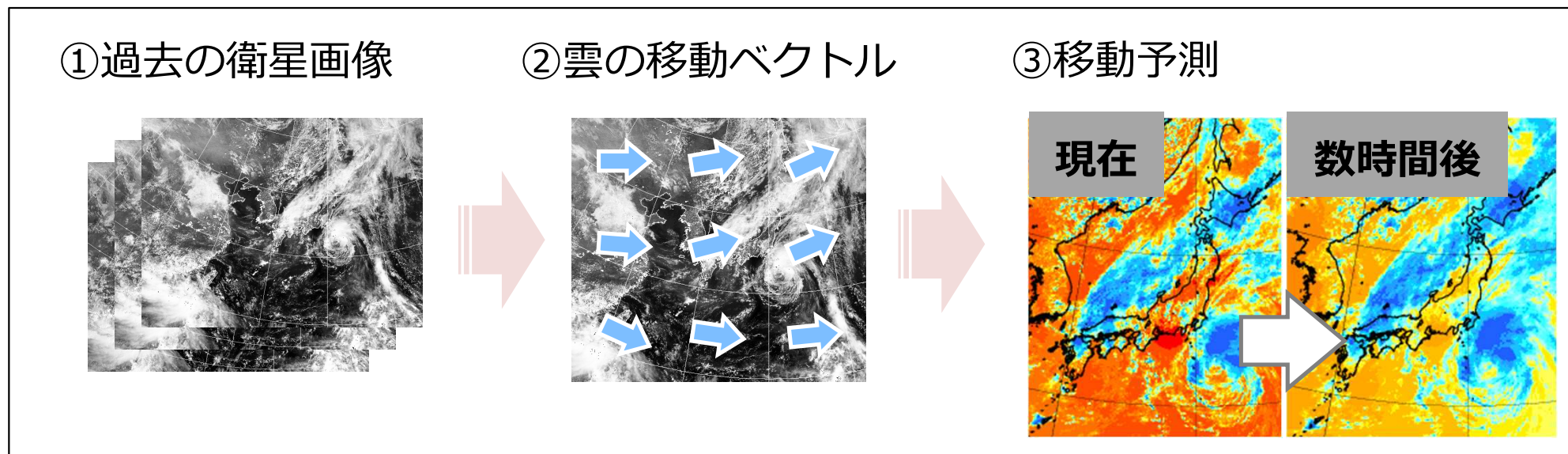


実施内容

(1) 6時間程度先までの高精度な日射量予測技術の開発

従来の予測手法

- 複数枚の衛星画像から雲の移動ベクトルを算出し、外挿的に日射量分布を予測する。



■従来の予測手法の弱点

- ・細かい空間スケールの動きの追跡が困難
- ・上中下層に異なる雲の動きの追跡が困難
- ・雲の生成・消滅の表現が困難

物理学（雲力学）とAIを融合した予測モデルを開発

実施内容

(1) 6時間程度先までの高精度な日射量予測技術の開発



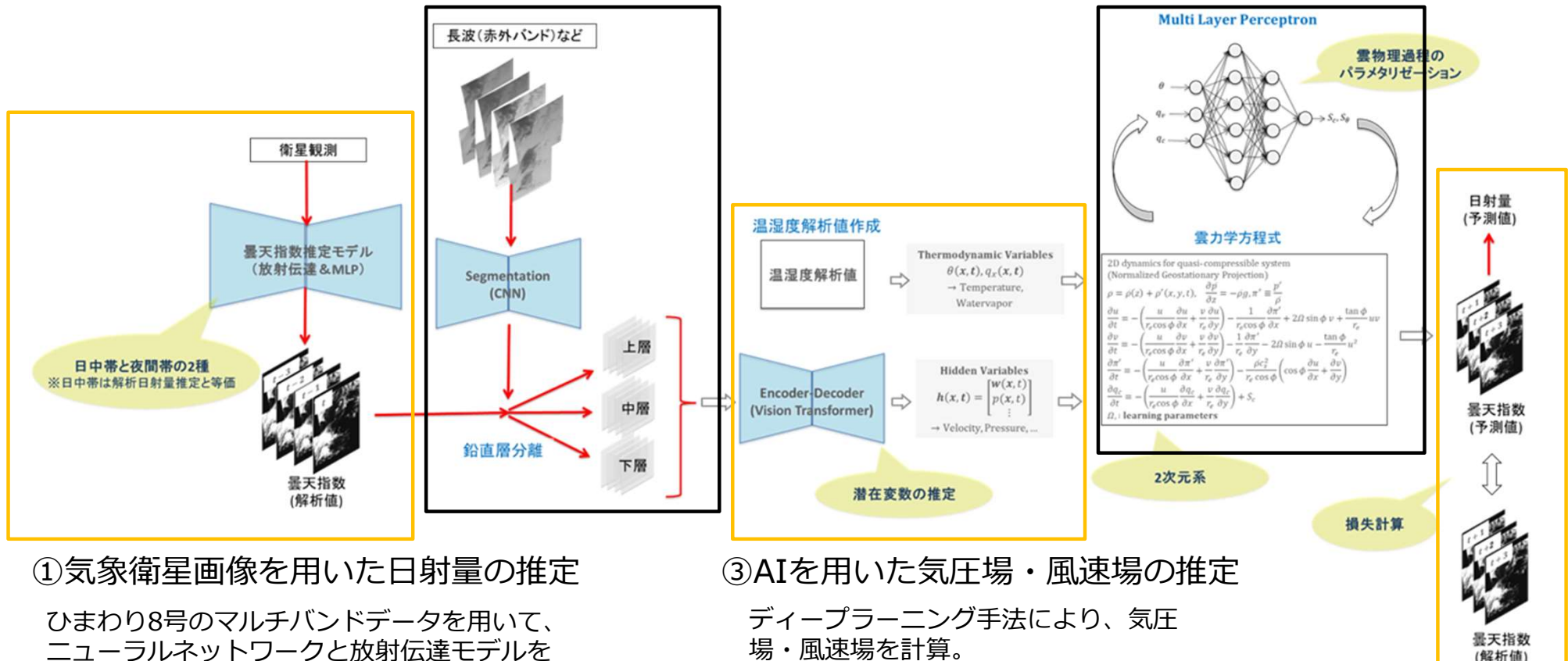
開発中した予測モデルのアーキテクチャ

②鉛直層の分離

ひまわり8号のマルチバンドデータに基づき、上層、中層、下層の雲分布や地表面の状態を推定。

④雲の生成・消散の考慮

雲物理過程のパラメタリゼーションにより、雲の生成・消散を考慮。



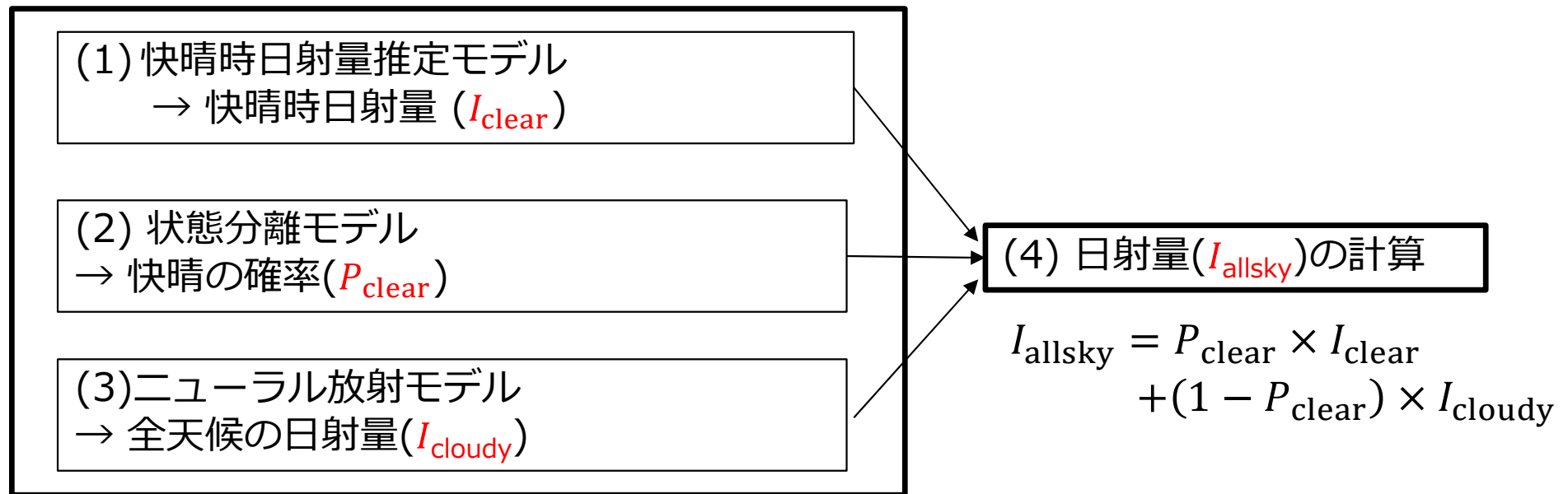
実施内容



(1) 6時間程度先までの高精度な日射量予測技術の開発

気象衛星画像を用いた日射量推定の概要

- 状態分離、雲の透過率・反射率の算定にAIを活用した推定モデルを開発した。



・放射モデル

$$I_{cloudy} = \frac{T_c}{1 - R_c \times R_{surface}} \times I_{clear}$$

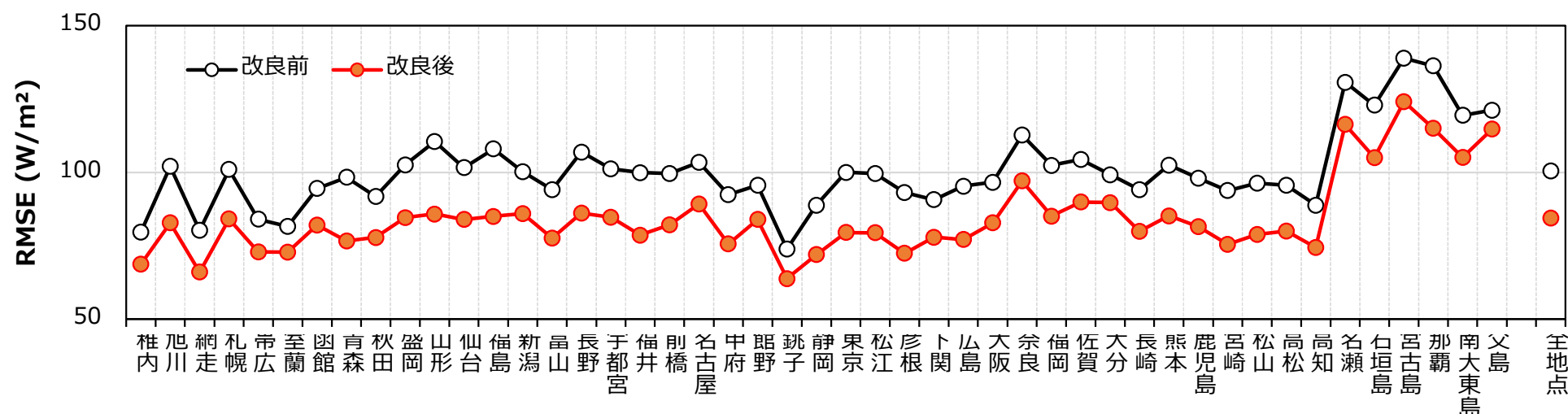
T_c : 雲の透過率、 R_c : 雲の反射率

実施内容

(1) 6時間程度先までの高精度な日射量予測技術の開発

日射量の推定値（初期場）の精度検証結果

- 従来の手法と比較して、日射量の推定値（初期場）の推定精度が大幅に向上した。



RMSE

誤差の大きさを表す指標。値が小さいほど精度が良い。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_{est(i)} - R_{obs(i)})^2}$$

(n : データ数, $R_{\text{est}(i)}$: 日射量推定値, $R_{\text{obs}(i)}$: 日射量観測値)

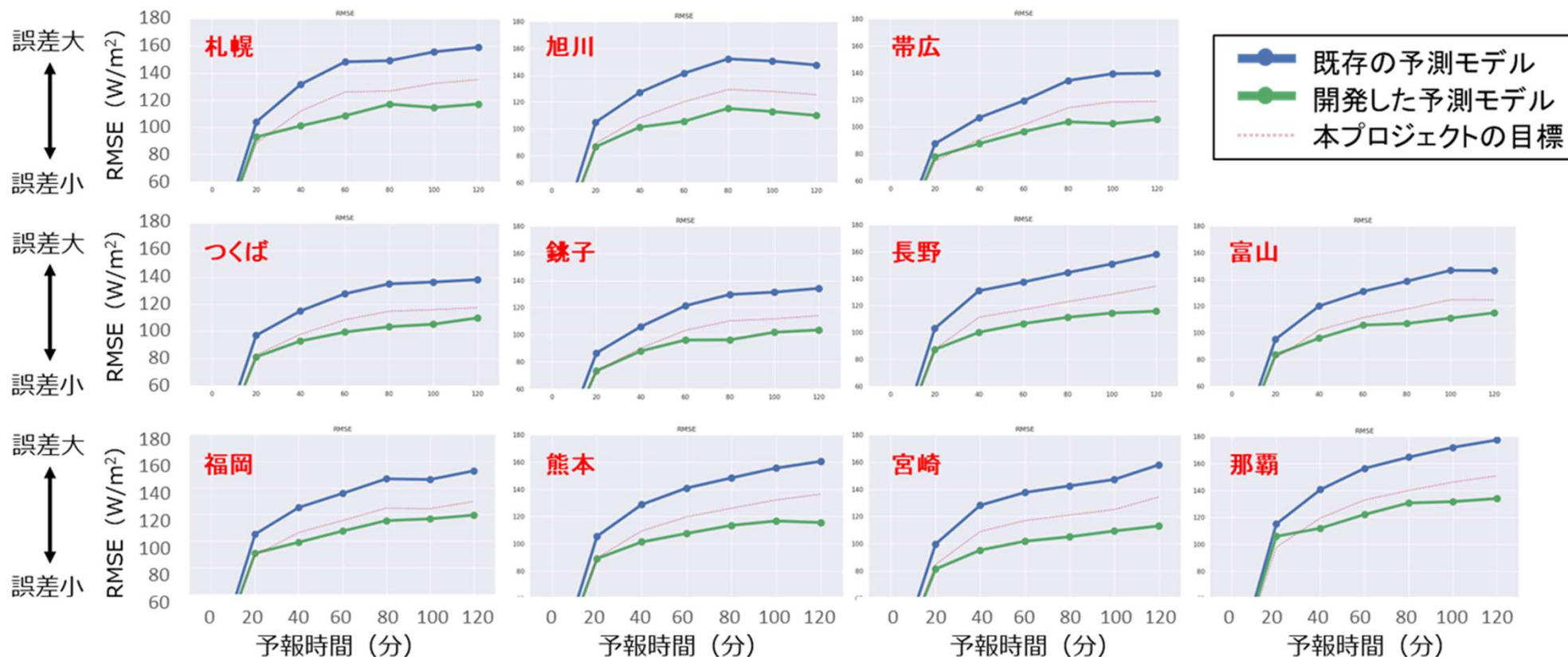
＜評価仕様＞

- ・対象期間： 2021年1月1日～12月31日
- ・対象地点： 日射量を観測している47地点
- ・対象データ
 - 推定値： 5分毎の日射量推定値（瞬時値）
 - 観測値： 5分毎の日射量観測値（瞬時値）
- ・備考： 推定・観測とも0(W/m²)のデータは検証対象外とした

(1) 6時間程度先までの高精度な日射量予測技術の開発

数時間先までの予測精度検証結果例 (RMSE)

横軸：予報時間（分）
縦軸：RMSEの値（W/m²）



<評価仕様>

- ・対象期間： 2018年1月1日～12月31日
- ・対象地点： 日射量を観測している10地点
- ・対象データ 予測値： 20分毎の日射量予測値（瞬時値）
真値： 20分毎の日射量推定値（瞬時値）

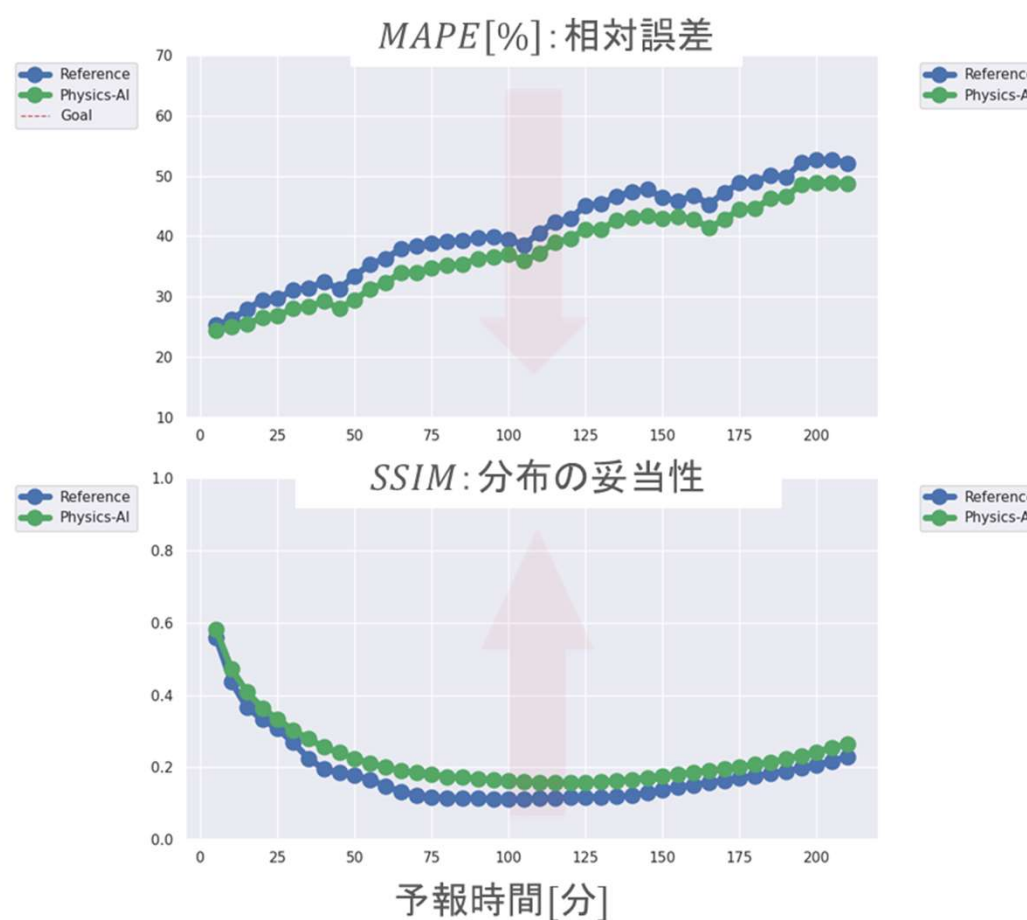
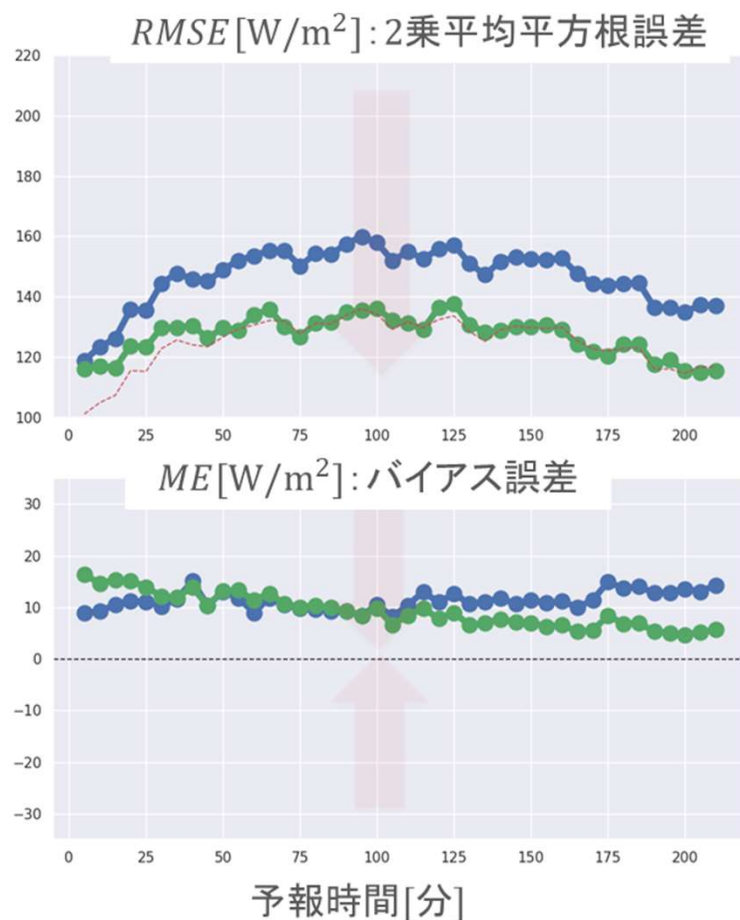
2023年度末目標のRMSE15%改善を達成

実施内容

(1) 6時間程度先までの高精度な日射量予測技術の開発

数時間先までの予測精度検証結果例（つくば地点における各予測指標）

2018年1月～12月、初期時刻9:00～15:00
真値は日射量観測値



予測時間延長(3時間先⇒6時間先)に向けた取り組み

- 予報時間を延長すると、「雲の移動距離の拡大」「移流計算のコスト増大と数値不安定化」「地図投影の曲率の影響」を考慮する必要が発生する。
- 上記を考慮するとともに、雲物理過程の最適化を行った。

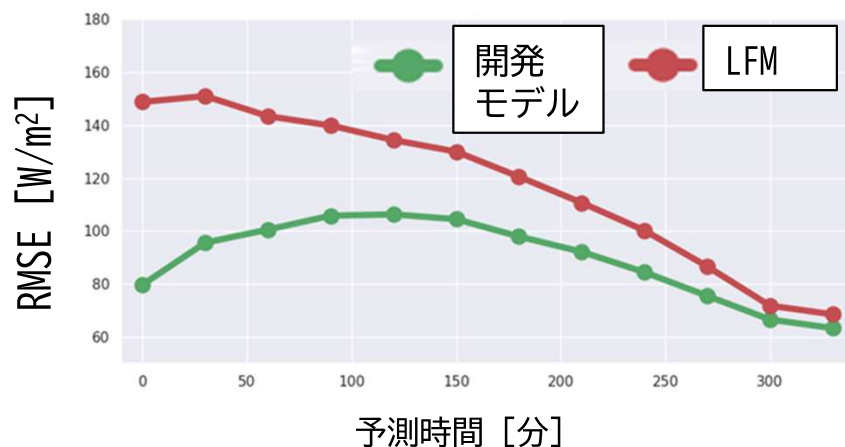


実施内容

(1) 6時間程度先までの高精度な日射量予測技術の開発

予測時間延長(3時間先⇒6時間先)に向けた取り組み（精度検証結果の例）

- 開発した6時間先予測において、全ての予測時間で開発モデルが気象庁の局地数値予報モデル（LFM）のRMSEを上回った。



◆ 検証条件

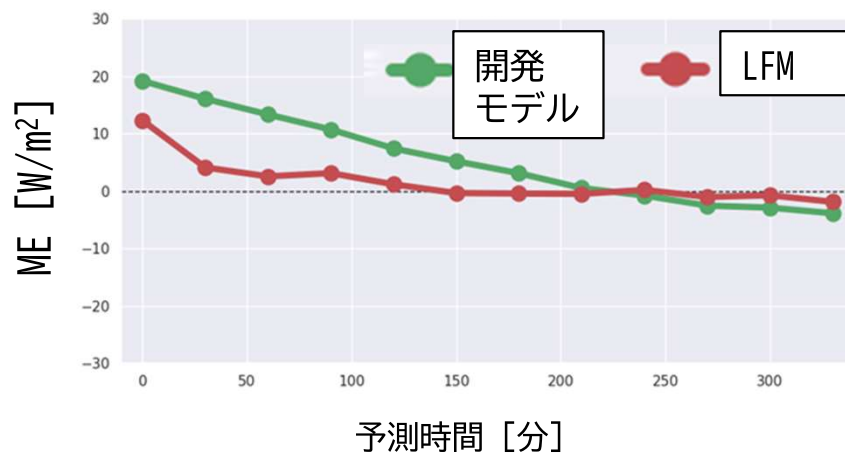
検証期間：2018年

対象地点：つくば

初期時刻：09:30, 10:30, 11:30
12:30, 13:30

実績値：気象庁観測値

予測値：開発モデル



実施内容



(1) 6時間程度先までの高精度な日射量予測技術の開発

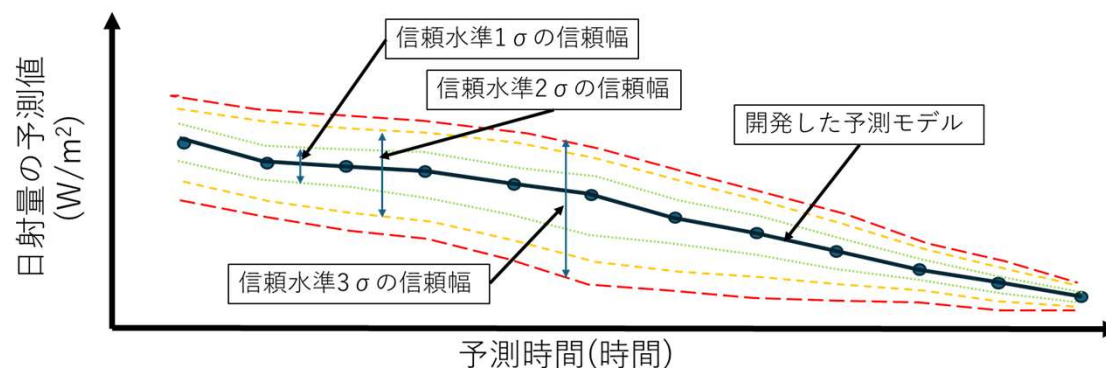
信頼度情報作成の技術的背景

- 6時間程度先までの高精度な日射量予測を行うために、衛星画像を用いた日射量予測技術の開発をこれまで行ってきた。
- 予測モデルの改良により予測精度は向上したものの、初期場の誤差、モデルの不完全さ等により生じる予測誤差をゼロにすることは極めて困難である。

信頼度情報作成の目的

- 気象衛星画像を用いる日射量予測モデルに対して、誤差の大きさに関する確率的情報として**信頼幅**の作成方法を検討する。

<信頼幅のイメージ>



実施内容



(2)数時間程度先予測における信頼度情報の開発

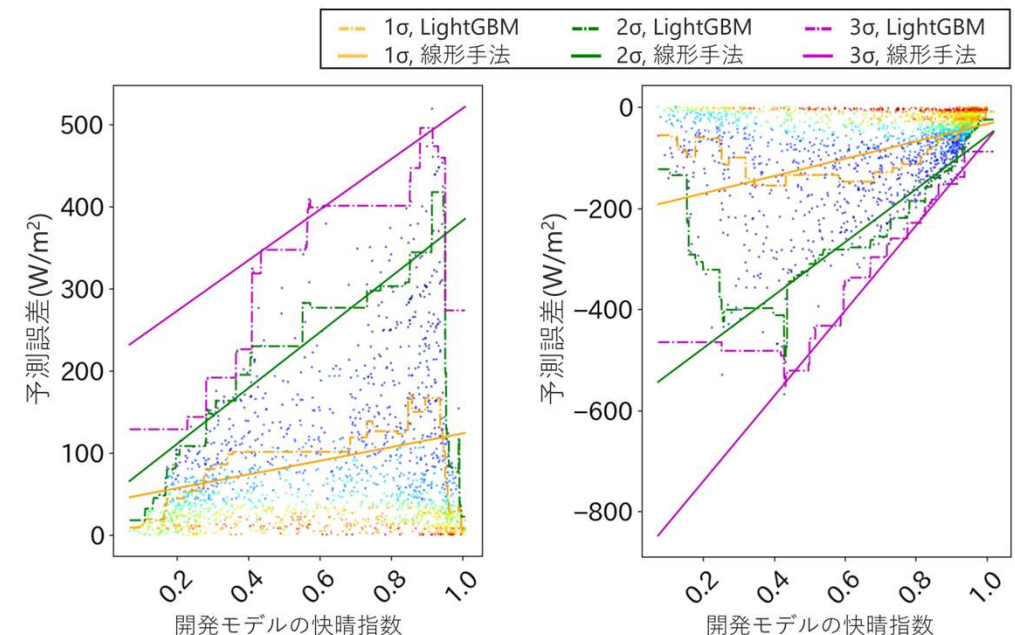
統計手法(分位点回帰手法) による信頼幅作成

- 予測誤差に関連性の高い特徴量と予測誤差に対して 各信頼水準における分位点回帰を行い、そのパラメータを使って幅上端と幅下端の値を作成した。
→ 特徴量、予測手法(線形、非線形手法)の違いが、信頼幅の評価結果(信頼幅の滞在率、区間幅、逸脱幅の大きさ)に与える影響を調査した。

<信頼幅の作成条件>

予測対象地点	前橋
予測対象年	2018年 各月の前半：教師期間 各月の後半：検証期間
予測時間	～6時間先
予測初期時刻	09:00-14:00
信頼水準	1 σ 、2 σ 、3 σ
対象予測値	気象衛星画像を用いた日射量予測モデル

<特徴量と予測誤差の関係の例>



実施内容

(2)数時間程度先予測における信頼度情報の開発

検討した特徴量の例

特徴量の種類	利用データの種類	利用データ範囲	備考
①アンサンブル予測のスプレッド（ポイント）	気象モデルの日射量のアンサンブル予測値	ポイント	アンサンブル予測結果を直接利用（気象モデルの不確実性に関する情報を利用）
②開発モデルの予測値の快晴指数（ポイント）	開発モデルの日射量予測値	ポイント	開発モデルの日射量予測値の大小により信頼幅を作成（天候の状態による誤差傾向を利用）
③ LFM日射量予測値の快晴指数（空間のスプレッド（50km））	局地数値予報モデル LFM	周囲50km	快晴指数の空間分布情報を活用した場合の信頼幅を作成
④ ③+太陽高度	③と太陽高度の計算値	周囲50km +ポイント	日射の状況に加えて、太陽高度の情報も利用
⑤ ③+相対湿度	③と相対湿度の予測値		日射の状況に加えて、湿度の情報も利用
⑥ ② + ③	②と③		ポイントでの日射の状況に加えて、日射の空間分布の情報も利用

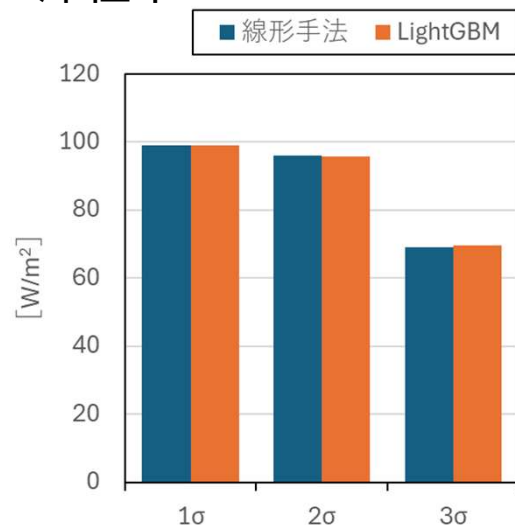
実施内容

(2)数時間程度先予測における信頼度情報の開発

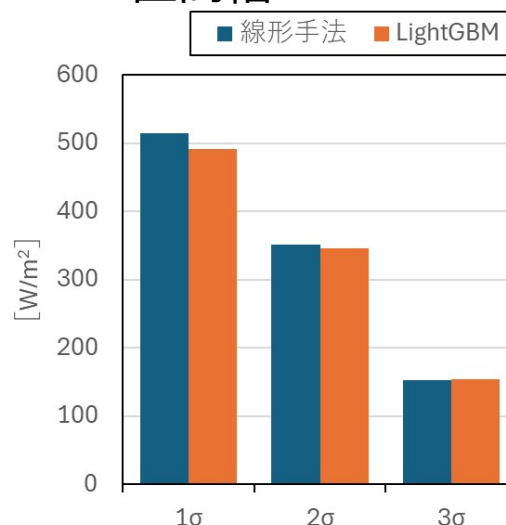
線形手法と非線形手法の比較結果の例

- LFM日射量予測値の快晴指数の空間スプレッドを特徴量として用いた場合の滞在率、区間幅、逸脱幅の大きさを計算した。
- 非線形手法（LightGBM）を用いることで、区間幅の大きさがやや狭くなる傾向が確認された。

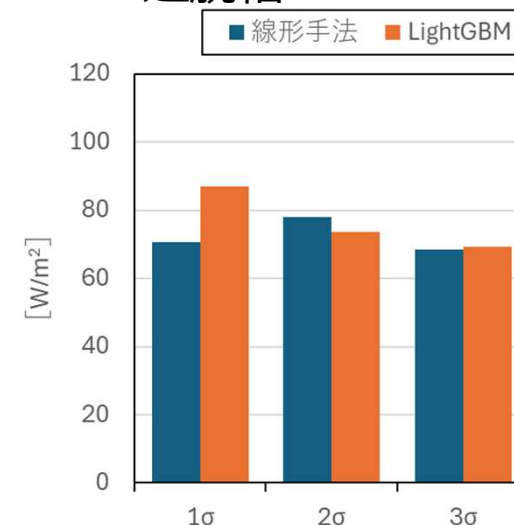
滞在率



区間幅



逸脱幅



- ・ 滞在率：信頼区間幅(上端と下端)に実績が含まれている割合
- ・ 区間幅：信頼区間幅(上端と下端)の平均値
- ・ 逸脱幅：信頼区間幅(上端と下端)に実績が含まれていない時刻を対象とした上側逸脱(実績>上端)あるいは下側逸脱(実績<下端)幅の平均値

まとめと今後の技術課題

(1)6時間程度先までの高精度な日射量予測技術の開発

- 大気力学と雲物理過程などを考慮した、気象衛星画像を用いたAI予測モデルの開発により、従来の予測手法と比べて、数時間先の予測において予測精度をRMSEで15%以上改善することができた。
- 6時間程度先までの予測においても、開発したモデルが気象庁の局地数値予報モデル（LFM）のRMSEを上回ることができた。
- 現在、全国各地における予測精度の検証を進めるとともに、予測の初期時刻が夜間帯の場合の予測精度向上に向けた技術開発を実施中である。
- 日中帯、夜間帯の予測に共通して、RMSEの最適化のために全体的に分布がややぼやけている側面があり、快晴時の過小傾向につながっている。各種プロセス（熱力学や3次元の大気力学（鉛直流や大気層間の相互作用）の導入、雲物理過程のさらなる調整等）を精緻化することで、上記の傾向が改善する可能性がある。

まとめと今後の技術課題

(2)数時間程度先予測における信頼度情報の開発

- 予測誤差に関連性の高い特徴量と予測誤差に対して 各信頼水準における分位点回帰を行い、そのパラメータを使って信頼幅を作成し、滞在率、区間幅、逸脱幅の大きさの指標を用いて評価を行った。
- 分位点回帰手法として、非線形手法（LightGBM）を用いると、区間幅が狭くなる傾向がみられた。
- 現在、各特徴量と手法を組み合わせた場合の滞在率、区間幅、逸脱幅の違いについて分析を進めている。また、地点や学習期間を増やすとともに、使用する特徴量（説明変数）を変えた場合の影響の検討を進めている。さらに、気象衛星を用いた予測モデル自体から直接予測誤差の確率的情報を作成する方法も試行中である。

2024年度NEDO再生可能エネルギー一部成果報告会 プログラムNo.15

太陽光発電主力電源化推進技術開発／研究開発 項目（Ⅲ）先進的共通基盤技術開発／翌日 および翌々日程度先の日射量予測技術の開発

発表日：2024年12月17日

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

発表者名	：（一財）日本気象協会 久野勇太
*団体名（企業・大学名など）	：（一財）日本気象協会、（国研）産業技術総合研究所
問い合わせ先	：（一財）日本気象協会 環境・エネルギー事業部 エネルギー事業課 久野勇太 E-mail: kuno.yuta@jwa.or.jp TEL:03-5958-8151

1. 目的

将来の太陽光発電の導入量拡大を目指し、太陽光発電の発電量予測誤差による電力系統への影響を緩和するために、翌日および翌々日程度先の日射量予測が大きく外れる課題を解決するための技術開発を行う。

2. 期間

2021年8月から2025年3月まで。

3. 目標（中間・最終）

現在から翌日および翌々日程度先の日射量予測において、従来の予測手法に比べて最大誤差（ $\pm 3\sigma$ 相当の誤差で検証）を低減する技術を開発する。

中間目標：10%以上低減 最終目標：20%以上低減

4. 成果・進捗概要

日射量予測に特化した気象モデル、複数機関の気象モデル予測値の統合、アンサンブル予報に基づく信頼度予測、大外し事象の誤差低減のための領域モデルを補間する各種気象庁GPVを利用した日射量予測の特性分析といった各要素技術の開発・分析を実施中。

2022年度末時点で中間目標の達成を確認。

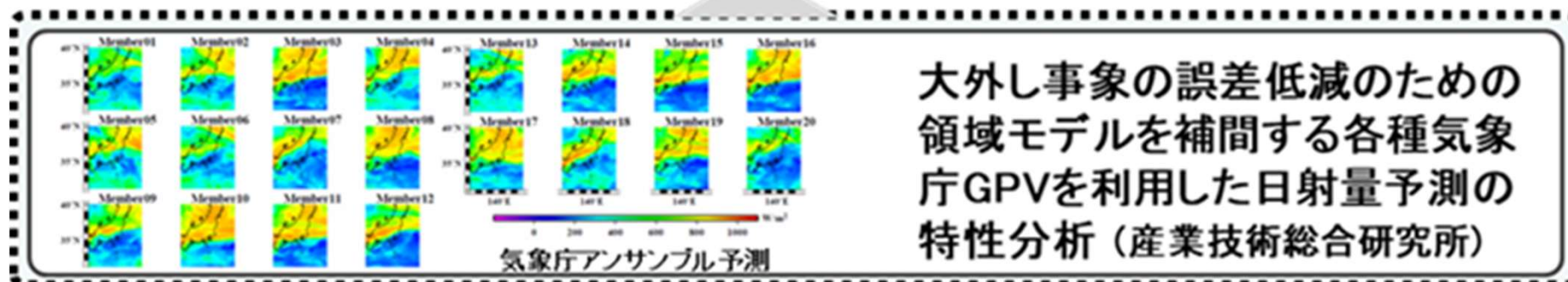
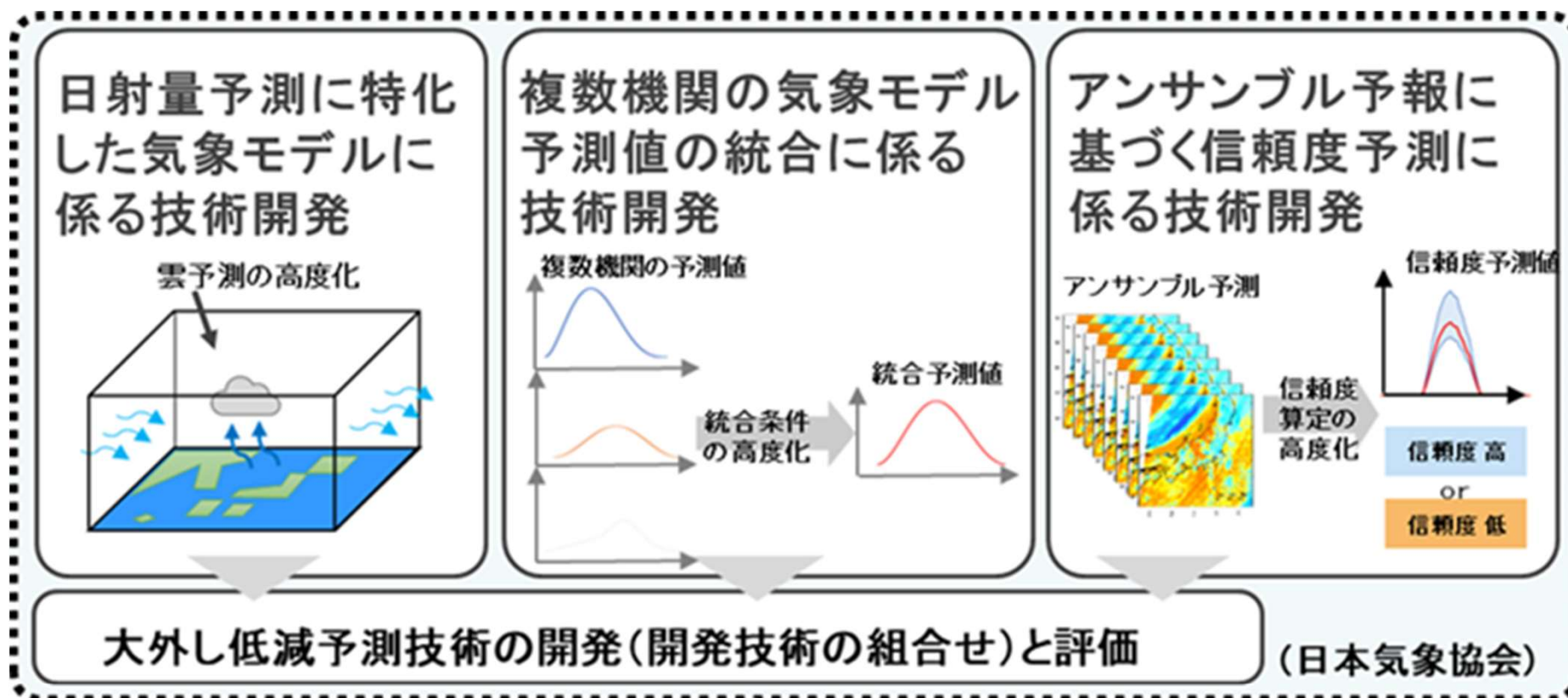
- 太陽光発電を取り巻く市場環境変化に伴い、需給運用の複雑化や電力の安定供給等の観点から**発電電力量の予測技術のさらなる高度化**が求められている。
- 発電量予測について、電力システムに与える影響は特に**日射量予測が大きく外れる事象**のインパクトが甚大であるとされている。



日射量予測が大きく外れる事象の改善が必要

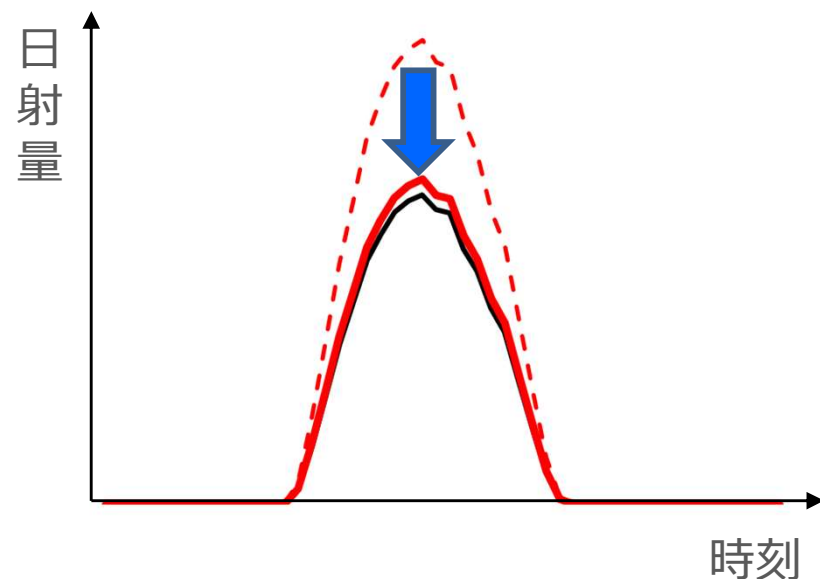
本事業では、**翌日および翌々日程度先の日射量予測を対象に日射量予測の最大誤差を低減する技術開発**を行う。

技術開発内容



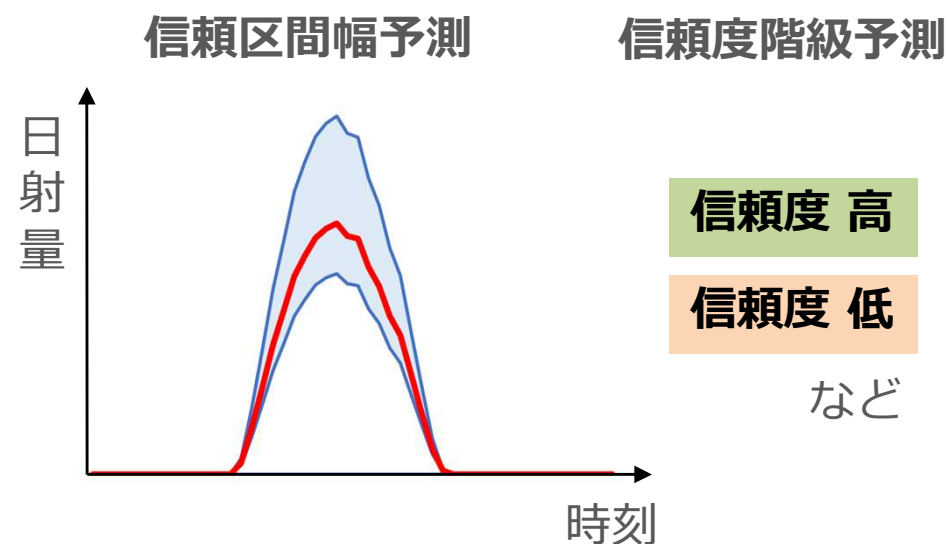
技術開発の成果として期待される日射量予測

大きく外れる事象を
改善した日射量予測



- : 開発前の日射量予測値
- : 開発後の日射量予測値
- : 日射量実測値

大きく外れるリスクを
事前把握可能な信頼度情報



- : 開発後の日射量予測値
- : 信頼区間幅予測
(— : 幅の上端値、下端値)

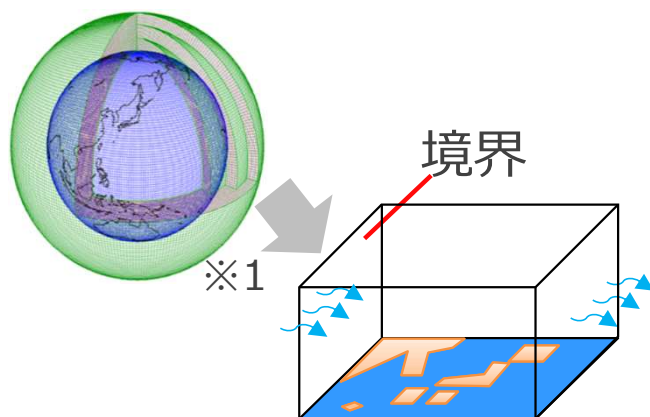
開発内容（日射量予測に特化した気象モデルに係る技術開発）

<背景>

- 翌日および翌々日程度先の日射量予測には、一般に**気象モデル**による数値予報結果が活用される。この気象モデルを用いた数値予報には必ず誤差が含まれる。
- 世界各国の気象機関や民間の気象会社がそれぞれ異なる気象モデルを運用しているが、**複数モデルの何れでも予測誤差が大きい場合もある**。
- したがって、**気象モデル自体の技術開発が必須**である。さらに、**予測要素とする日射量に着目した改良**が求められる。

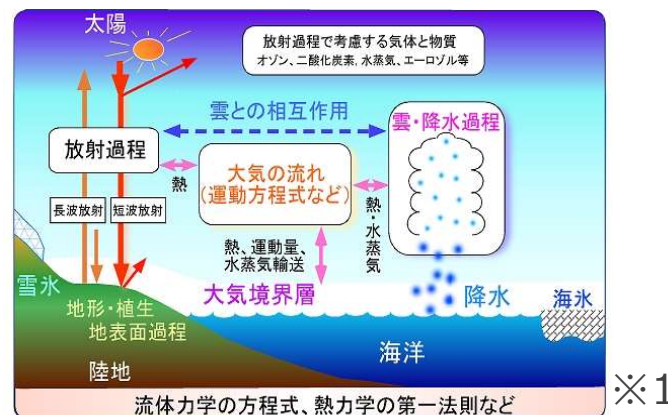
①初期値・境界値の設定

全球モデルの予測値などを
基に数値予報に用いる初期
値・境界値を作成



②数値予報

物理式等を活用し今後の気象
を予測
モデル毎に様々な手法を採用



③予測結果

気象要素ごとに数値
データとして出力

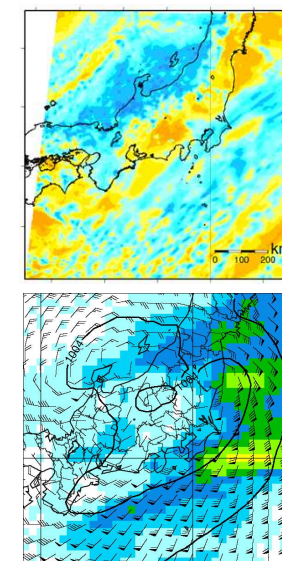
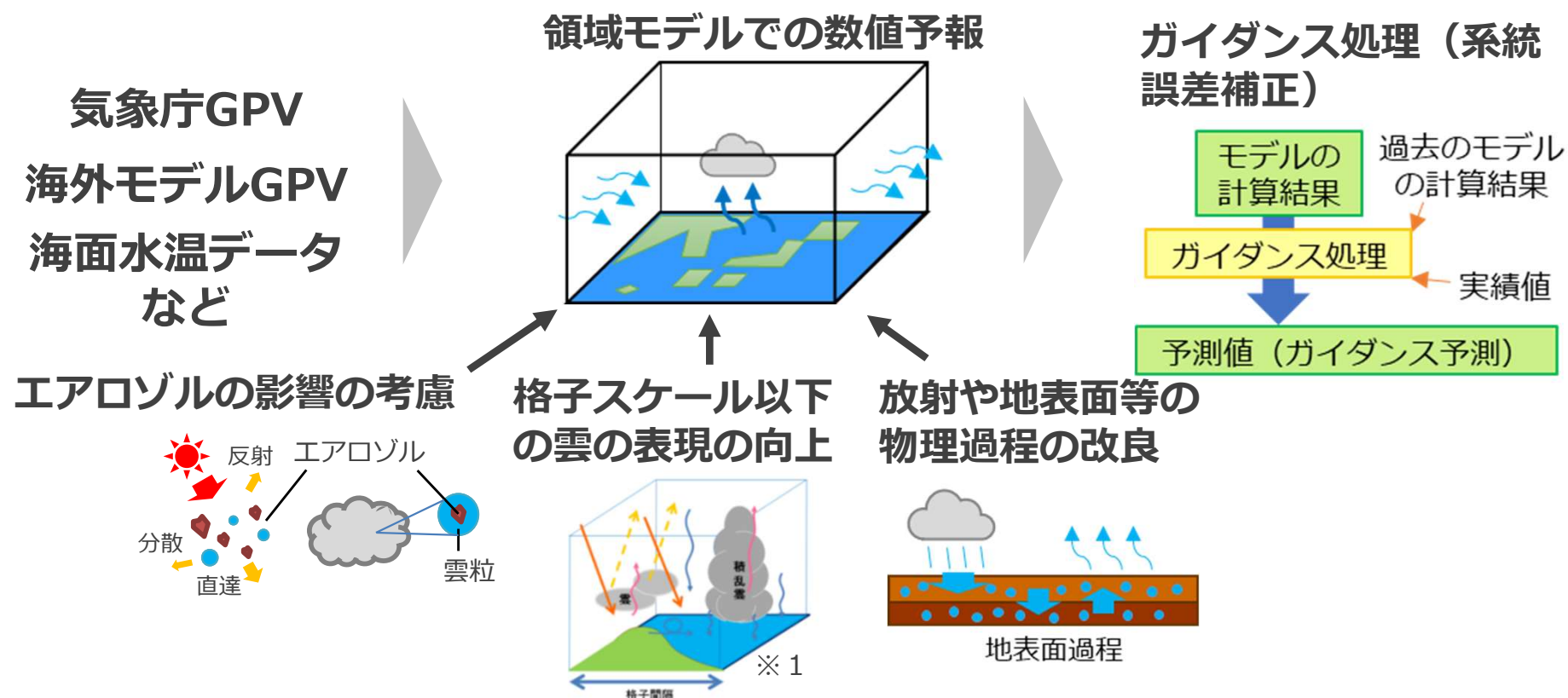


図 領域モデルにおける数値予報の流れ

開発内容（日射量予測に特化した気象モデルに係る技術開発）

＜技術開発内容＞

- 気象モデルで**日射量およびこれに影響する雲をより一層正確に予測するための技術開発**を行う。
- 領域気象モデルWRF（The Weather Research and Forecasting Model）をベースモデルとし、日射量予測の誤差が大きい事象を改善するための**計算条件の設定**や**雲や放射に影響する物理過程の改良**を検討する。



※1 出典：気象庁 数値予報解説資料第45巻第1部第4章
https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/nwptext/45/1_chapter4.pdf

開発内容（複数機関の気象モデル予測値の統合に係る技術開発）



＜エアロゾルの粒径・吸湿性および雲の生成に係るパラメータの調整効果＞

- 気象モデルによる数値予報について、エアロゾルデータの活用手法および雲の生成に係るパラメータの調整を検討した。
- **日々最新のエアロゾルデータから求めたエアロゾルの粒径・吸湿性の反映および雲の生成に係るパラメータの調整により、日射量予測誤差の低減が期待できることを確認した。**より長期間での検証が必要なため、複数年を対象とした過去予測計算を実施中。

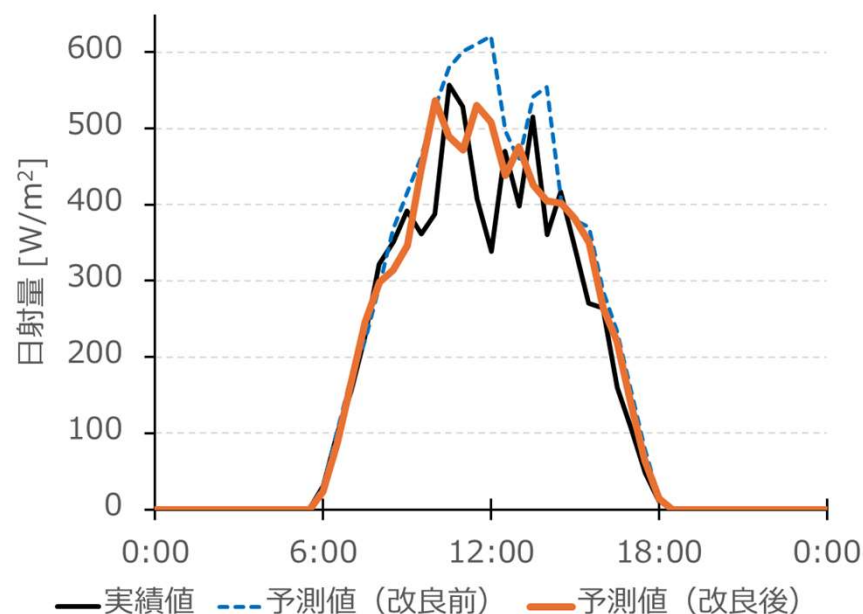


図 エアロゾルの粒径・吸湿性および雲の生成に係るパラメータ調整前後の予測結果例（2019年5月8日、北海道エリア、翌日予測）

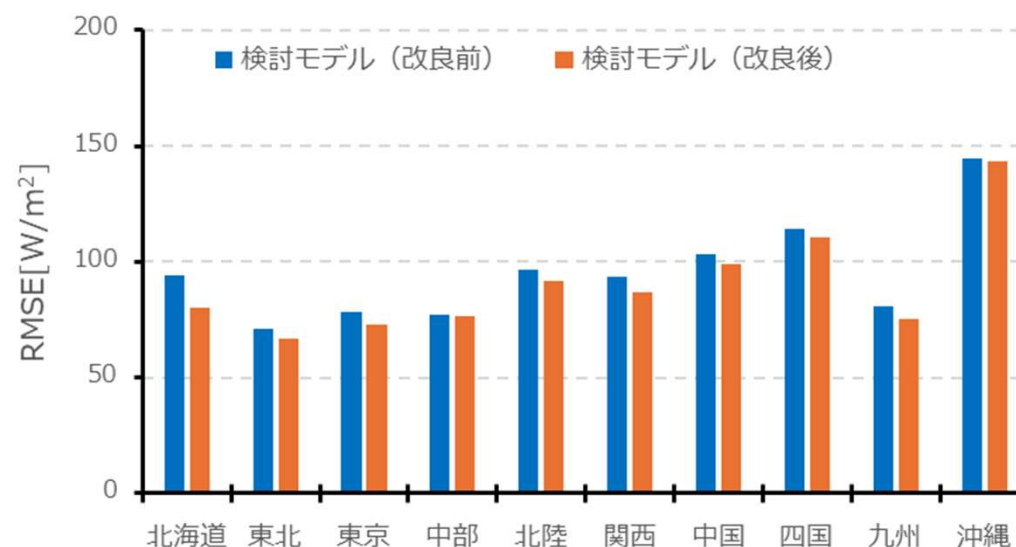
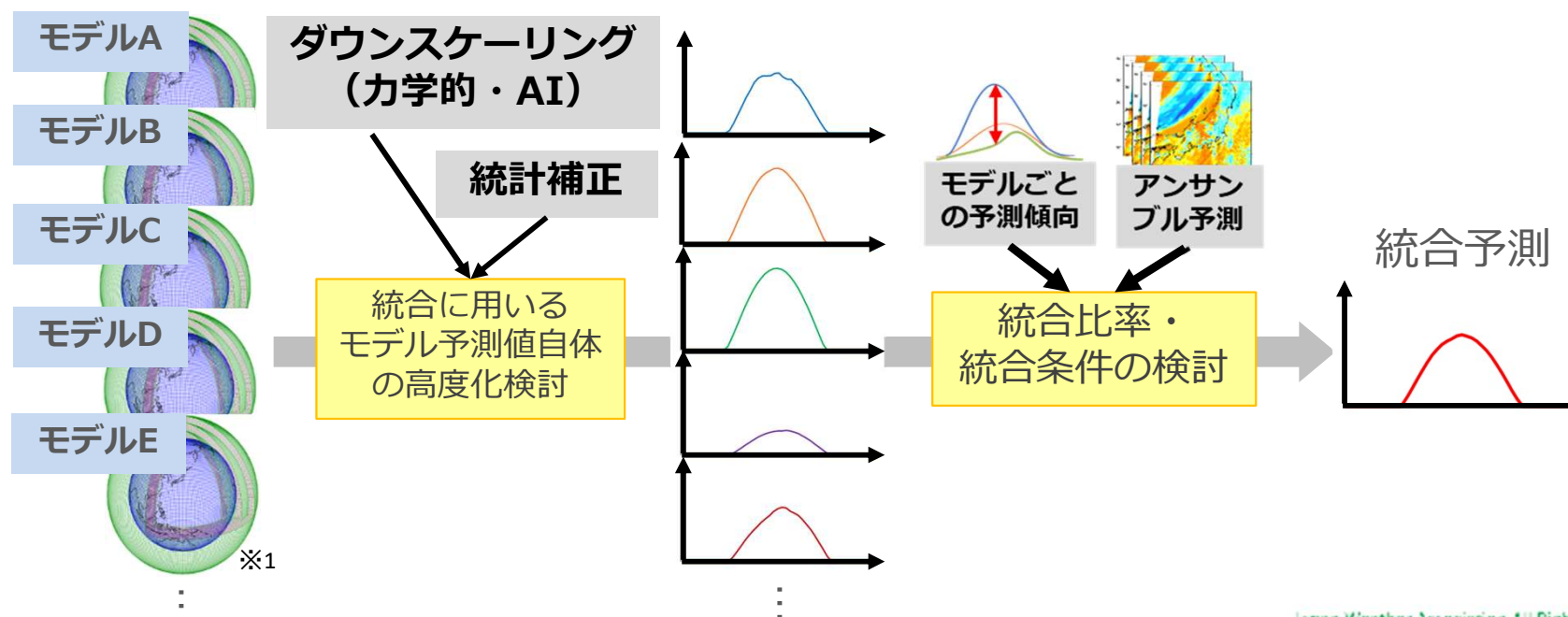


図 モデル改良前後での日射量予測精度（RMSE）
※日射量予測誤差が大きかった事例（2019年度）が対象。
※エアロゾルの粒径・吸湿性および雲の生成に係るパラメータの調整前後の結果。

開発内容（複数機関の気象モデル予測値の統合に係る技術開発）

＜背景・技術開発内容＞

- 単一の気象モデル予測値を利用する場合、多くの日では実績に近い値を予測できても、**予測が大きく外れる日も存在**する。
 - 複数機関のモデル予測値を利用する場合でも、平均的な予測精度の向上のみならず、**発生頻度が少ない予測が大きく外れる事象の改善およびその予測技術の確立が課題**。
- ▼
- したがって、日射量予測が大きく外れる事象を改善するための、**統合する気象モデル予測値の自体の高度化（系統誤差補正など）**や**気象条件に応じた柔軟な統合手法を開発**する。



開発内容（複数機関の気象モデル予測値の統合に係る技術開発）

＜AIダウンスケーリング手法概要＞

- 一般的に全球モデルは領域モデルと比較して空間解像度が粗いため、**適切にダウンスケーリングを実施することにより、予測精度向上の可能性**がある。
- 全球モデルを初期値境界値とした**領域モデル計算は有効なダウンスケーリング手法**であるが、**計算コストが大きい**ため、以下のように実施が難しい場合がある。
 - ✓ ダウンスケーリング対象のモデル数が多い
 - ✓ アンサンブル予報の各メンバーに対してダウンスケーリングを行う
- そこで、AIを利用し、**計算コストを抑えたダウンスケーリング**の実施を検討

AI（畳み込みネットワークなど）による学習

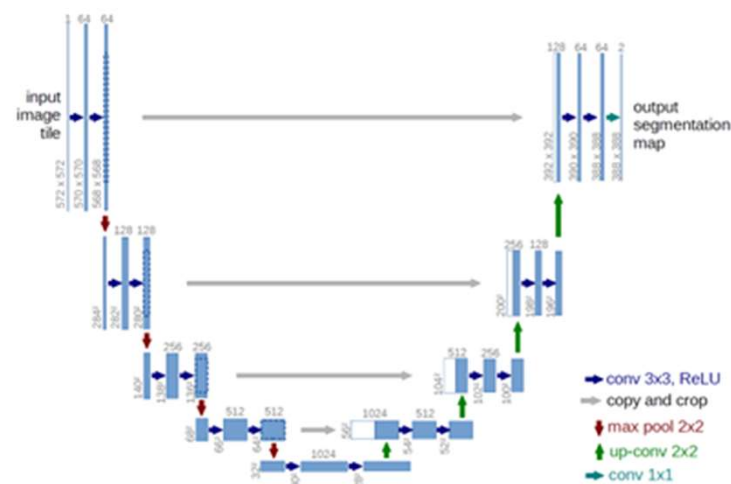


図 U-netの基本構造

出典：<https://arxiv.org/pdf/1505.04597.pdf>

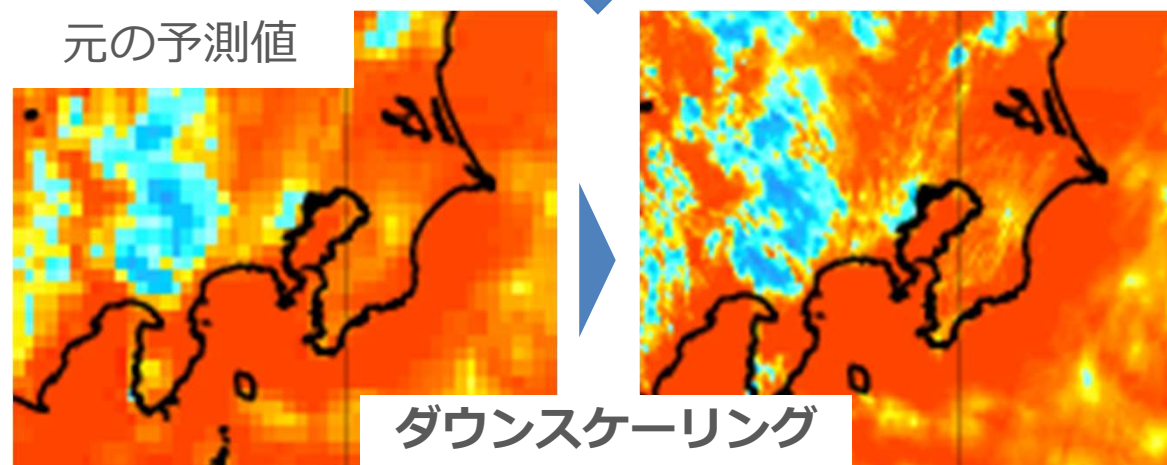


図 日射量分布のイメージ

開発内容（複数機関の気象モデル予測値の統合に係る技術開発）

＜AIダウンスケーリング結果の例＞

- ダウンスケーリング前後の予測値と衛星データに基づく日射量推定値を比較した結果、**ダウンスケーリングにより日射量分布の再現性が向上することを確認した。**

予測対象：2021年8月11日 15:00

ダウンスケーリング前 ダウンスケーリング後 日射量推定分布

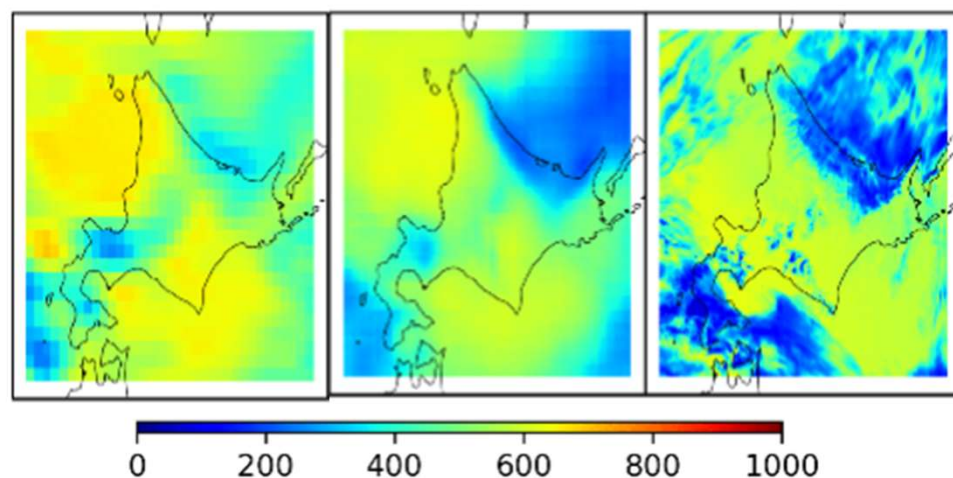


図 日射量分布

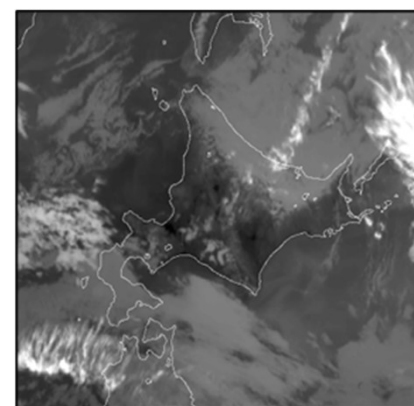


図 衛星赤外画像

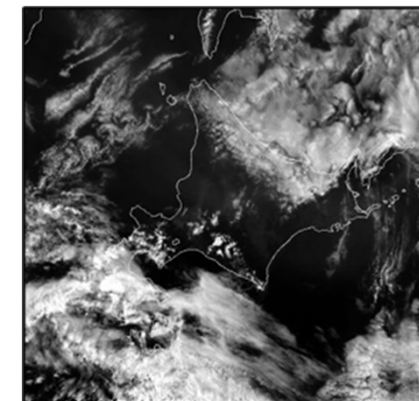


図 衛星可視画像

- 北海道エリアの広い範囲で晴れたが、網走北見紋別地方は雲頂の低い雲に覆われた事例。
- **ダウンスケーリング前のモデルでは再現できていないオホーツク海から網走北見紋別地方にかけての雲域に伴う日射量が少ない地域をダウンスケーリングモデルにより再現した。**

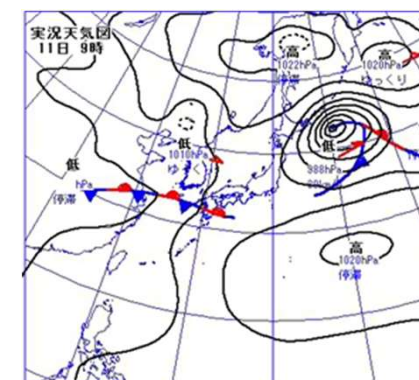


図 実況天気図（9時）

＜予測誤差傾向に基づく予測値の補正手法検討＞

- 日射量予測値と予測誤差の関係より、過大・過小大外しリスクが大きい日射量予測値が異なることを確認した。したがって、予測誤差傾向に基づいて予測値を補正することにより $\pm 3\sigma$ 誤差低減が期待される。
- そこで、アンサンブル予測のばらつき等の情報を基に、サポートベクトル回帰を用いた日射量予測値の補正手法を検討している。
- 検討中の予測では、ベンチマーク予測値と比較して **$\pm 3\sigma$ 誤差幅が平均16%程度減少することを確認**した。一方、RMSEは数%増加したため更なる改良を検討中。

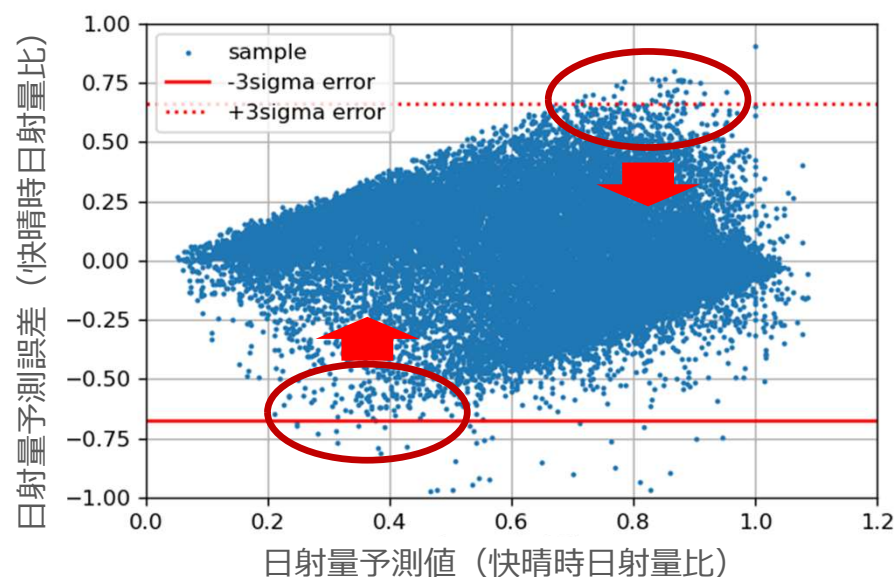


図 日射量・予測誤差（快晴指数）散布図（大阪）
赤矢印は大外し低減のために補正したい方向を示す。

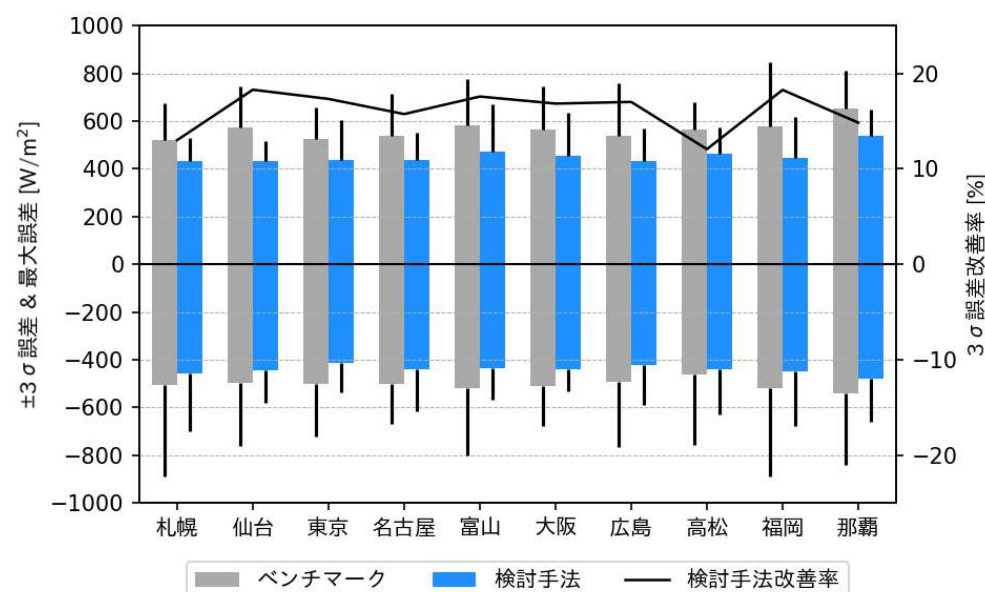
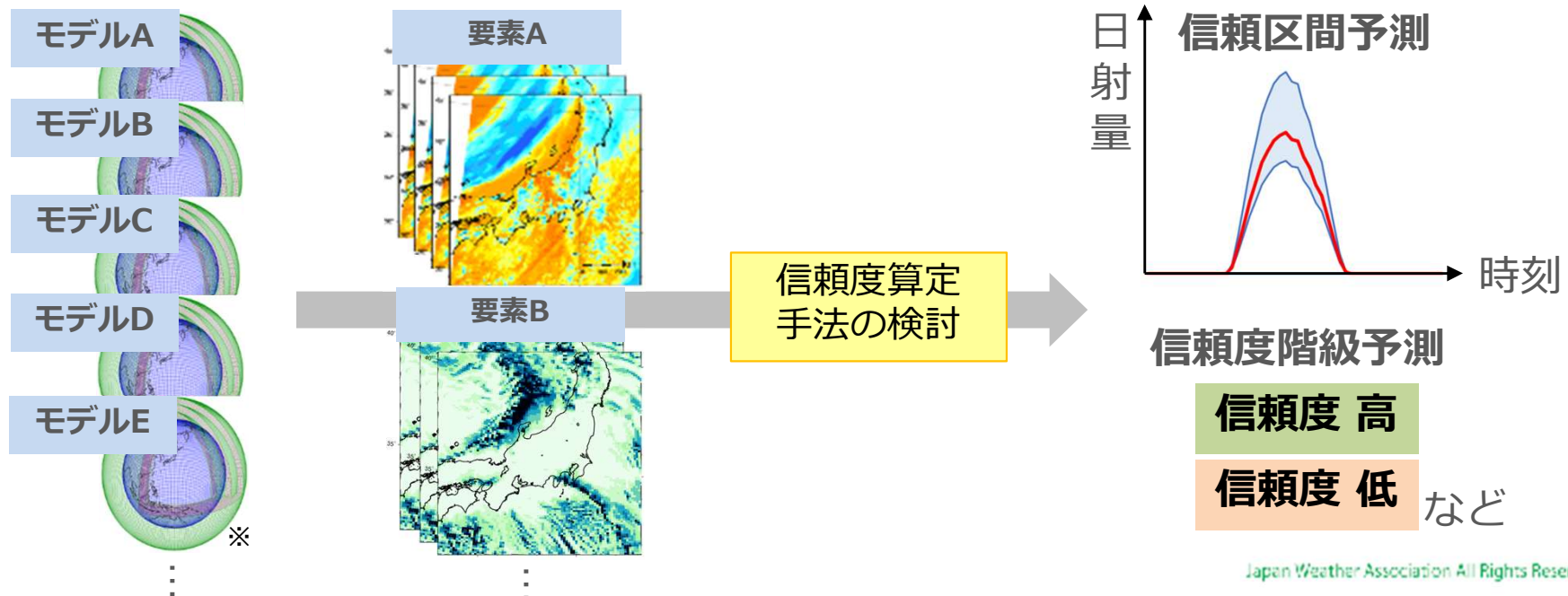


図 $\pm 3\sigma$ 誤差と最大誤差（2021年4月～2023年12月）

＜背景・技術開発内容＞

- 日射量予測が大きく外れる課題が改善しても、**大きく外れる可能性をゼロにすることは難しい。**
 - 近年、日射量予測の信頼度情報として、アンサンブル予報を活用した大外しの検知手法が研究されているが、**日射量予測が大きく外れる可能性をより一層正確に予測することが課題。**
- ▼
- したがって、日射量予測が大きく外れる可能性の予測に適した**アンサンブル予報の活用手法**を検討し、信頼度として適切に予測する技術を開発する。



＜信頼区間幅予測の手法検討＞

- 複数のアンサンブルモデル予測値を組み合わせて使用するマルチセンターグランドアンサンブル手法の検討を実施している。アンサンブルモデル予測値のばらつきや最大・最小メンバー予測値等と過去の予測誤差の関係に基づく回帰モデルにより、 3σ の確率で生じうる日々の誤差の大きさを予測する手法を検討中。
- 信頼区間幅予測について精度検証を実施した結果、マルチセンターグランドアンサンブル手法の場合、単一のアンサンブルモデルを用いる手法に比べて、同程度の滞在率（実績が幅に入る確率）を維持しつつ、**区間幅が狭いことを確認**した。

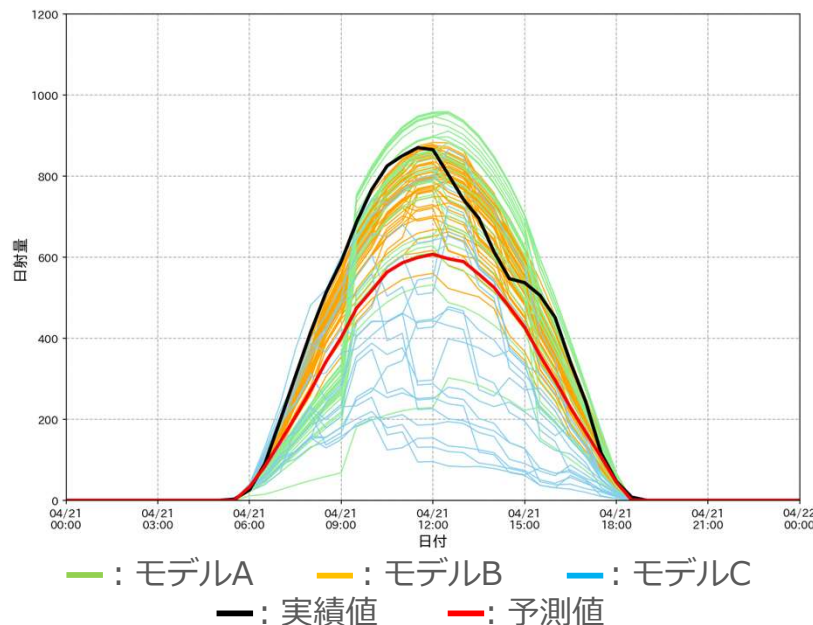


図 複数のアンサンブルモデル予測値（イメージ）

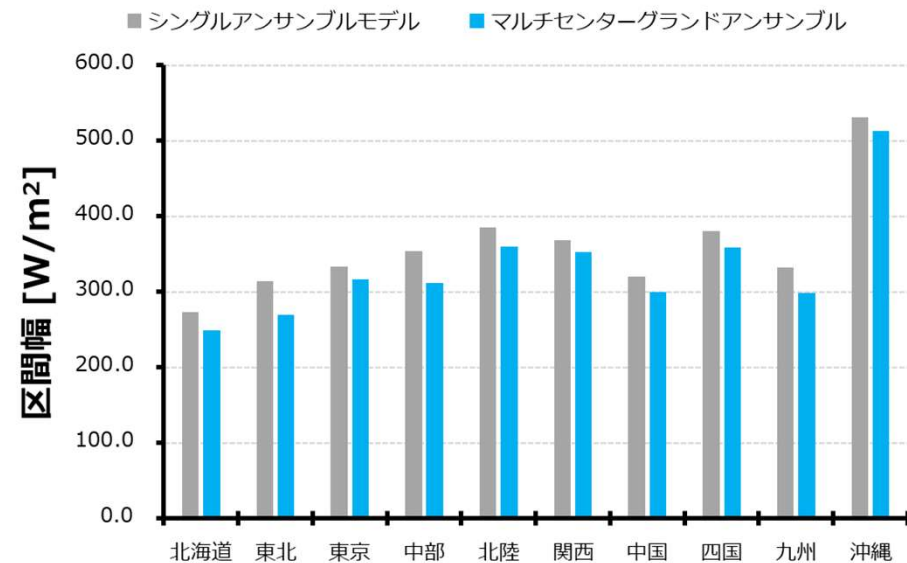


図 信頼区間幅予測の検証結果（2023年1～12月）

検証はエリア平均値（エリア内の気象官署地点平均値）を対象に実施した。

開発内容（大外し事象の誤差低減のための領域モデルを補間する 各種気象庁GPVを利用した日射量予測の特性分析）



＜統計的な評価：大外れ事例以外も含めた評価＞

- 気象庁全球アンサンブル予報システム（GEPS）を用いて大外し事例の誤差要因分類を実施。過去の大外し事例を対象に気象庁メソアンサンブル予報システム（MEPS）の予測結果も調査。
- ベンチマーク予測の大外し事例について、アンサンブル予測の最大値-最小値の範囲内に実績値が含まれていたか（捕捉の可否）等を調査。

2021年5月～8月（東京電力エリア暖候期）のダウンスケール実験

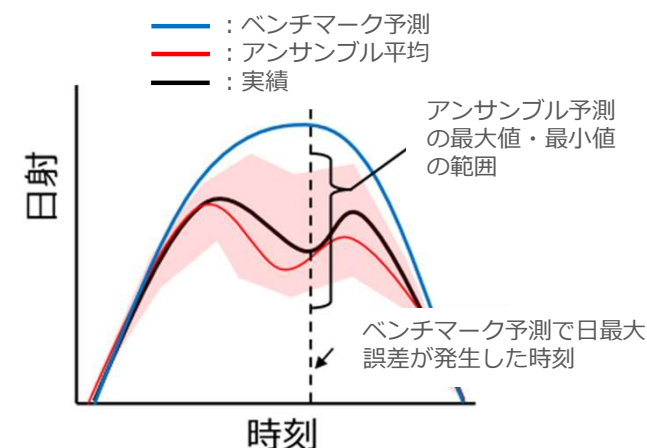
- 東京電力エリア（暖候期）でのGEPS-WRFの予測傾向とベンチマーク予測大外しの関係性について評価を検討

東京電力エリア（暖候期）121事例(おお外し事例含む)の分類結果

	相対湿度誤差 大	相対湿度誤差 小
総観場の誤差 大	8事例 不確実性の範囲内50%（4事例）	5事例 不確実性の範囲内 60%（3事例）
総観場の誤差 小	6事例 不確実性の範囲内 33%（2事例）	102事例 不確実性の範囲内 90%（92事例）

東京電力エリア（暖候期）のベンチマーク大外し事例

事例日	電力エリア	大外し傾向	総観場の誤差	相対湿度誤差	補足の可否
2021-05-22	TEPCO	過大	大	大	否
2021-06-17	TEPCO	過小	小	小	可
2021-06-27	TEPCO	過小	大	大	可
2021-07-06	TEPCO	過大	小	小	否
2021-08-02	TEPCO	過小	小	小	可
2021-08-25	TEPCO	過大	大	小	否



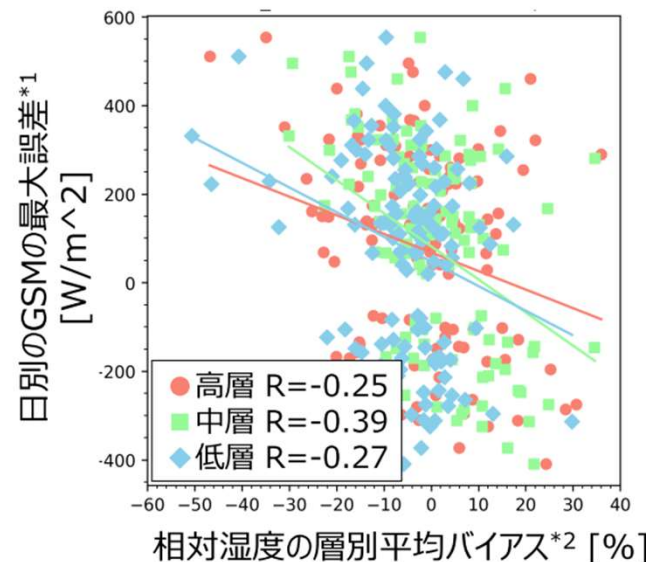
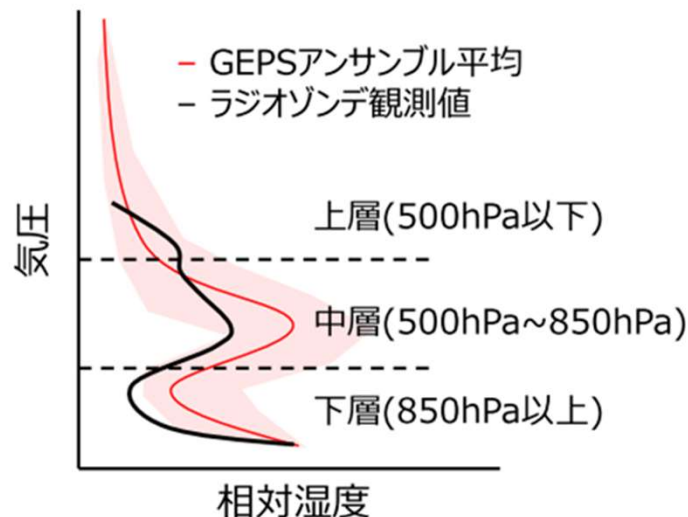
不確実性の範囲内事例
(2021-06-17)

開発内容（大外し事象の誤差低減のための領域モデルを補間する 各種気象庁GPVを利用した日射量予測の特性分析）

＜気象庁予報データの特性分析および領域モデルの数値計算実験＞

- 気象庁全球モデル（GSM）における低層の相対湿度バイアスと日射最大誤差に弱い相関を確認。
- その他、気象庁全球アンサンブル予報において以下を確認。
 - ・ 過大大外し発生事例は、**鉛直層の相対湿度バイアスが乾燥傾向**、かつ確率予報として不確実性が高い。
 - ・ 過小大外し発生事例では鉛直層相対湿度バイアスは乾燥・湿潤が半々。一方で、確率予報として不確実性が低～中程度にとどまる。

● GSMの大気鉛直方向の相対湿度バイアスと日射誤差の関係



GSM:
中層相対湿度バイアスと日射誤差に弱い相関

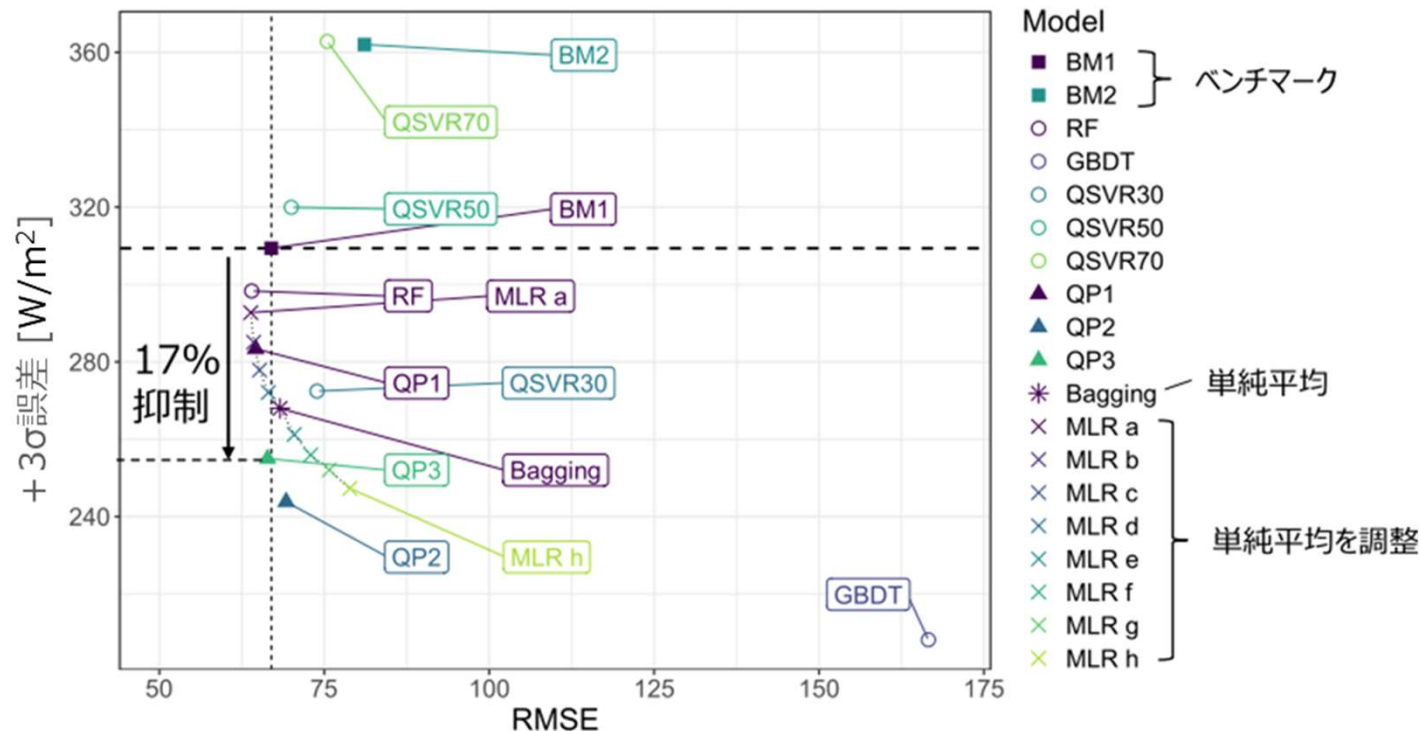
*1 各日の絶対誤差が最大となった値とした。

*2 館野の各層平均値についてGSMとラジオゾンデ観測値を比較。（観測値－予報値）

開発内容（大外し事象の誤差低減のための領域モデルを補間する 各種気象庁GPVを利用した日射量予測の特性分析）

＜MEPSを入力とした機械学習モデルの開発＞

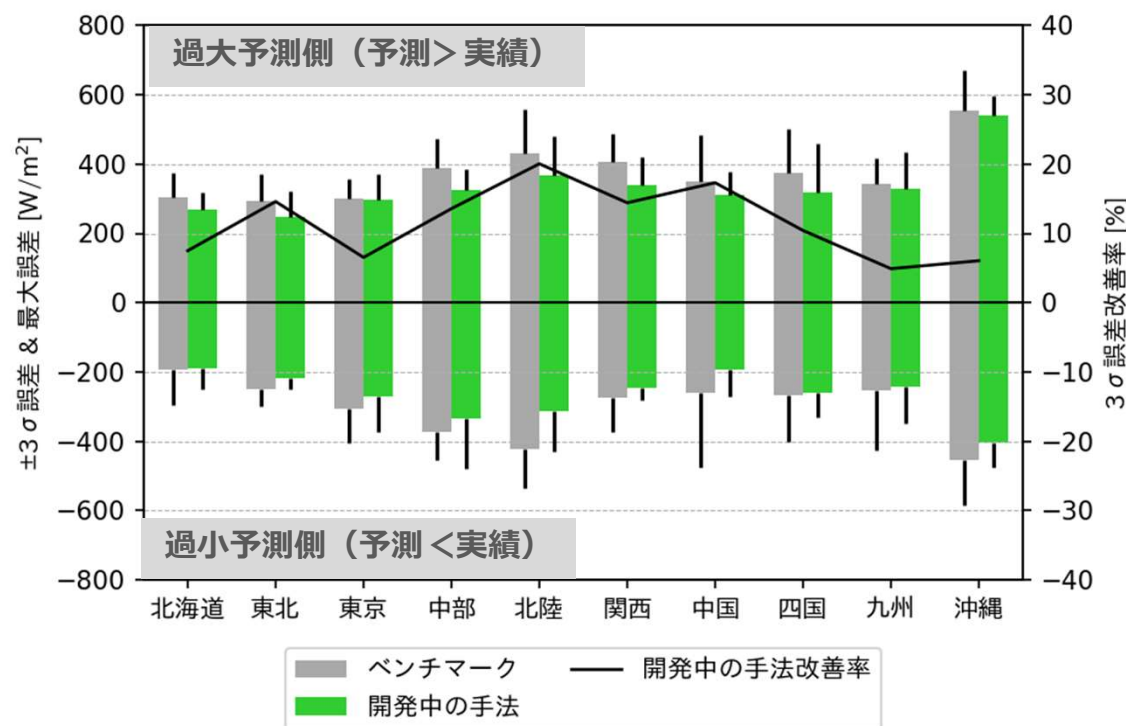
- 過大予測側に特化した誤差低減手法を検討中。
- 複数の機械学習モデル予測値を統合した場合の精度検証を実施。この結果、**RMSEを維持しつつ過大大外しを17%程度改善**した。さらなる改善に向けて統合する予測の増加や検証期間を延長した解析を検討中。
- 前頁までの内容を含め、気象庁GPVを利用した日射量予測の特性分析の結果、内容については、**気象庁・気象研究所との意見交換を毎年開催し、アンサンブルや機械学習利用に関してフィードバックを実施**。



開発内容（大外し低減予測技術の開発と評価）

＜中間目標の達成状況＞

- 2022年度末に検討段階の手法を組み合わせ※、2021年10月～2022年9月の1年間を対象に予測精度を検証した。※領域モデルの予測結果を統合予測に反映し、さらに統合モデルの予測結果を信頼度階級予測に反映した。
- この結果、**中間目標（ $\pm 3\sigma$ 誤差を10%以上低減）の達成を確認**した。



日射量予測に特化した気象モデルと複数機関の気象モデル予測値の統合を組み合わせることで **$\pm 3\sigma$ 誤差を12%低減**した。（左図）

さらに、信頼度が高いと予測した場合（全体の約半数の事例）は、 **$\pm 3\sigma$ 誤差が過大予測側は17%、過小予測側は24%低減**した。

図 領域モデルの予測結果を統合予測に反映した際の予測精度検証結果（エリア平均）

※エリア平均は、エリア内の気象官署地点平均とした

※3σ誤差改善率は、過大・過小3σ誤差の差をベンチマーク予測値と比較して算出

まとめ（技術開発の進捗報告）

- **翌日および翌々日程度先の日射量予測の最大誤差低減を目指し、技術開発を実施中。**
 - ・「**日射量予測に特化した気象モデル**」については、エアロゾルデータの活用や雲の生成に係るパラメータの調整等により、日射量予測誤差が低減することを確認。
 - ・「**複数機関の気象モデル予測値の統合**」については、AIダウンスケーリングにより、日射量分布の予測精度が改善することを確認。また、機械学習手法による日射量予測値の補正により、 $\pm 3\sigma$ 誤差を低減させることができた。
 - ・「**アンサンブル予報に基づく信頼度予測**」については、複数のアンサンブルモデル予測値の活用により、信頼区間幅を狭めることや信頼度階級による大外し誤差の判別性が向上することを確認。
 - ・「**大外し事象の誤差低減のための領域モデルを補間する各種気象庁GPVを利用した日射量予測の特性分析**」では、気象庁全球アンサンブル予報において、過大大外し発生事例は鉛直層の相対湿度バイアスが乾燥傾向かつ確率予報として不確実性が高いこと等が明らかとなった。また、過大予測側に特化した予測として、複数の機械学習モデル予測値の組合せによる誤差低減効果を確認。
- **2022年度末には検討段階の手法を組み合わせ、2021年10月～2022年9月の1年間を対象に予測精度を検証し、中間目標の達成を確認。**

今後の技術開発予定

- **最終目標（ $\pm 3\sigma$ 誤差の20%低減）の達成に向けて、さらなる技術開発を実施する。**
 - ・「**日射量予測に特化した気象モデル**」については、ガイダンス（系統誤差補正）の検討および複数年での精度検証を実施予定。
 - ・「**複数機関の気象モデル予測値の統合**」については、複数の全球モデルに対するAIダウンスケーリングの活用効果の検証、および予測誤差傾向を踏まえた予測値の補正手法についてさらなる改良を実施予定。
 - ・「**アンサンブル予報に基づく信頼度予測**」については、信頼度区間幅予測および信頼度階級予測における複数アンサンブルモデル予測値の活用検討を実施予定。
 - ・「**大外し事象の誤差低減のための領域モデルを補間する各種気象庁GPVを利用した日射量予測の特性分析**」では、気象庁全球モデルの上空気象要素と日射量予測誤差の関係性の分析や機械学習モデルの種別増加の検討、検証期間の延長を実施予定。
- **2024年度末には「大外し低減予測技術の開発と評価」として、各要素技術の組み合わせの検討と最終目標に対する達成状況の確認を実施する予定。**