

# NEDO再生可能エネルギー分野成果報告会2025 プログラムNo.2-10

## 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：2025年7月16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<br>久野勇太 E-mail:kuno.yuta@jwa.or.jp TEL:03-5958-8151 |

# 事業概要（1/2）

## 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技術を開発**する。

## 2. 期間

2021年8月から2025年3月まで。

# 事業概要（2/2）

## 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. 成果概要

**以下の各要素技術の開発・分析を実施。**

- ・ 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

さらに、開発した要素技術を組み合わせ、日射量予測が大きく外れる事象の改善効果を検証。この結果、複数モデルの統合予測において信頼度が高いと予測した場合の **$\pm 3\sigma$ 誤差が23.0%低減、最大誤差が29.8%低減し、本事業の最終目標の達成を確認。**

- 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。

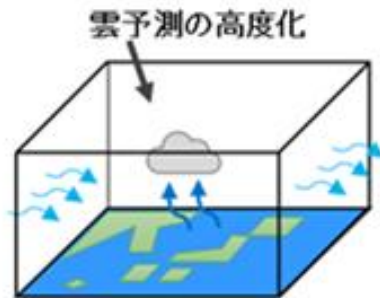


**日射量予測が大きく外れる事象の改善**が必要

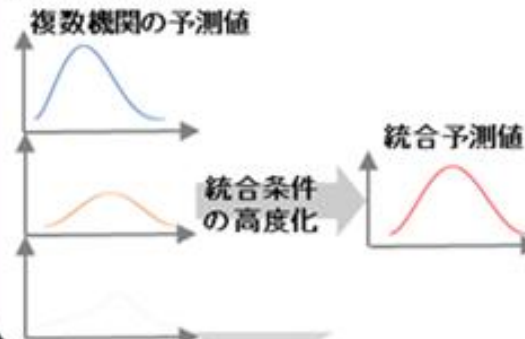
本事業では、**翌日および翌々日程度先の日射量予測を対象に日射量予測の最大誤差を低減する技術開発**を実施した。

# 技術開発内容

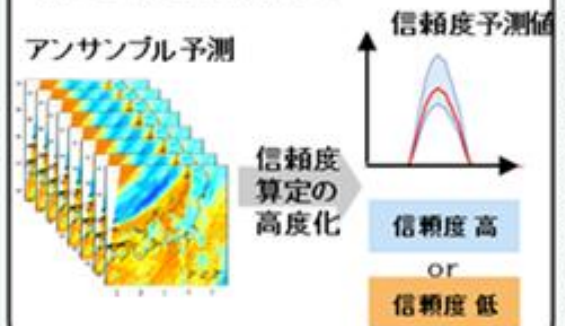
日射量予測に特化した気象モデルに係る技術開発



複数機関の気象モデル予測値の統合に係る技術開発

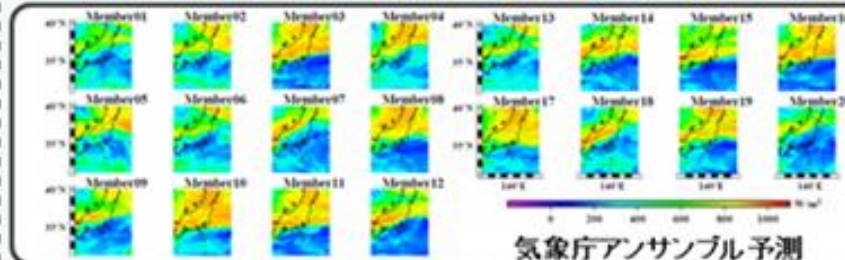


アンサンブル予報に基づく信頼度予測に係る技術開発



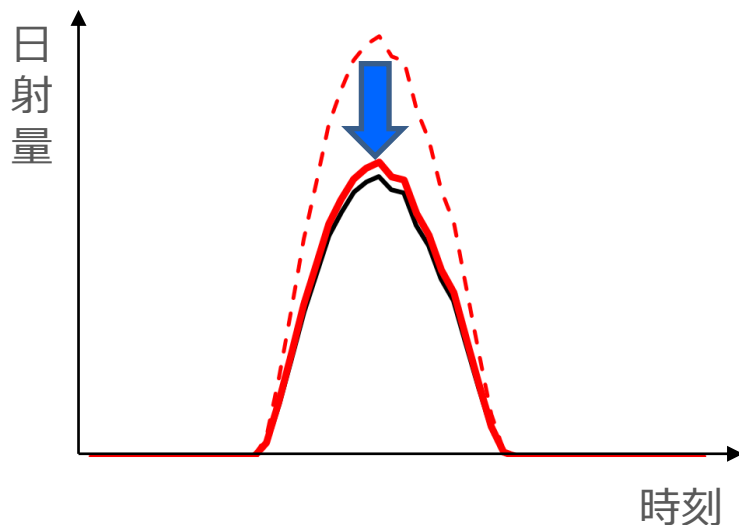
大外し低減予測技術の開発(開発技術の組合せ)と評価

(日本気象協会)



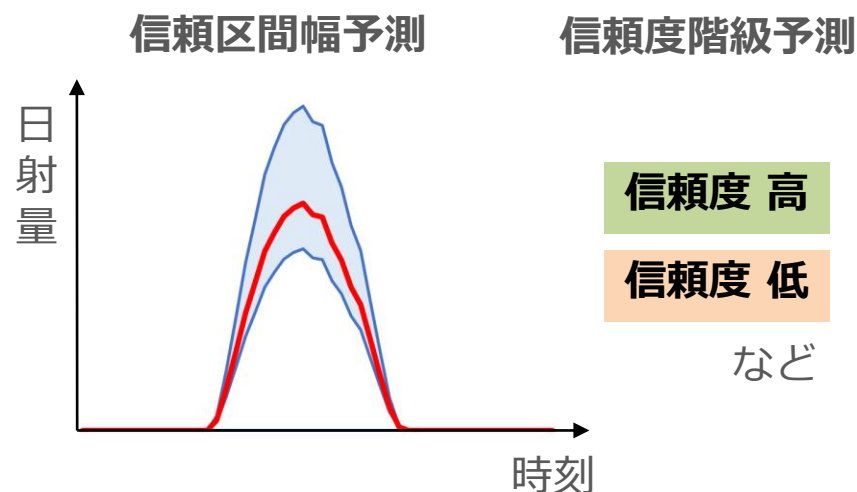
大外し事象の誤差低減のための  
領域モデルを補間する各種気象  
庁GPVを利用した日射量予測の  
特性分析(産業技術総合研究所)

## 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 )

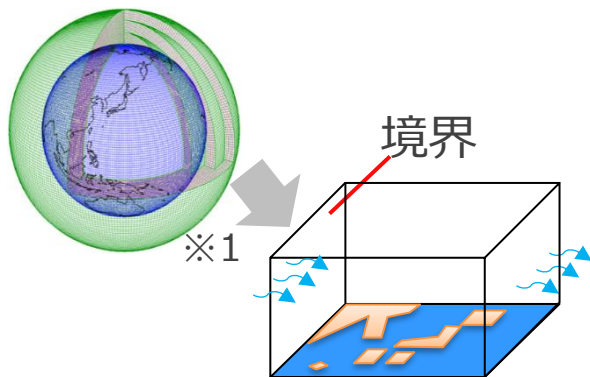
# 開発内容（日射量予測に特化した気象モデルに係る技術開発）

## <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。

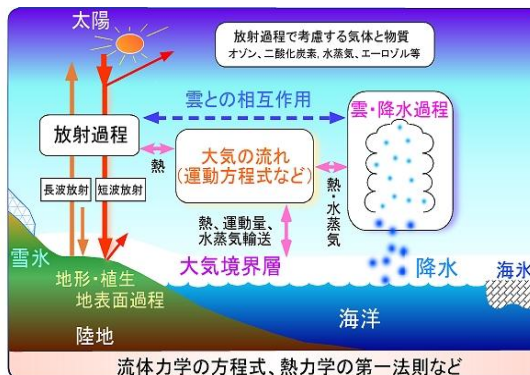
### ①初期値・境界値の設定

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

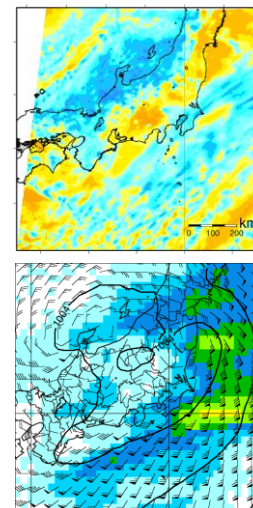
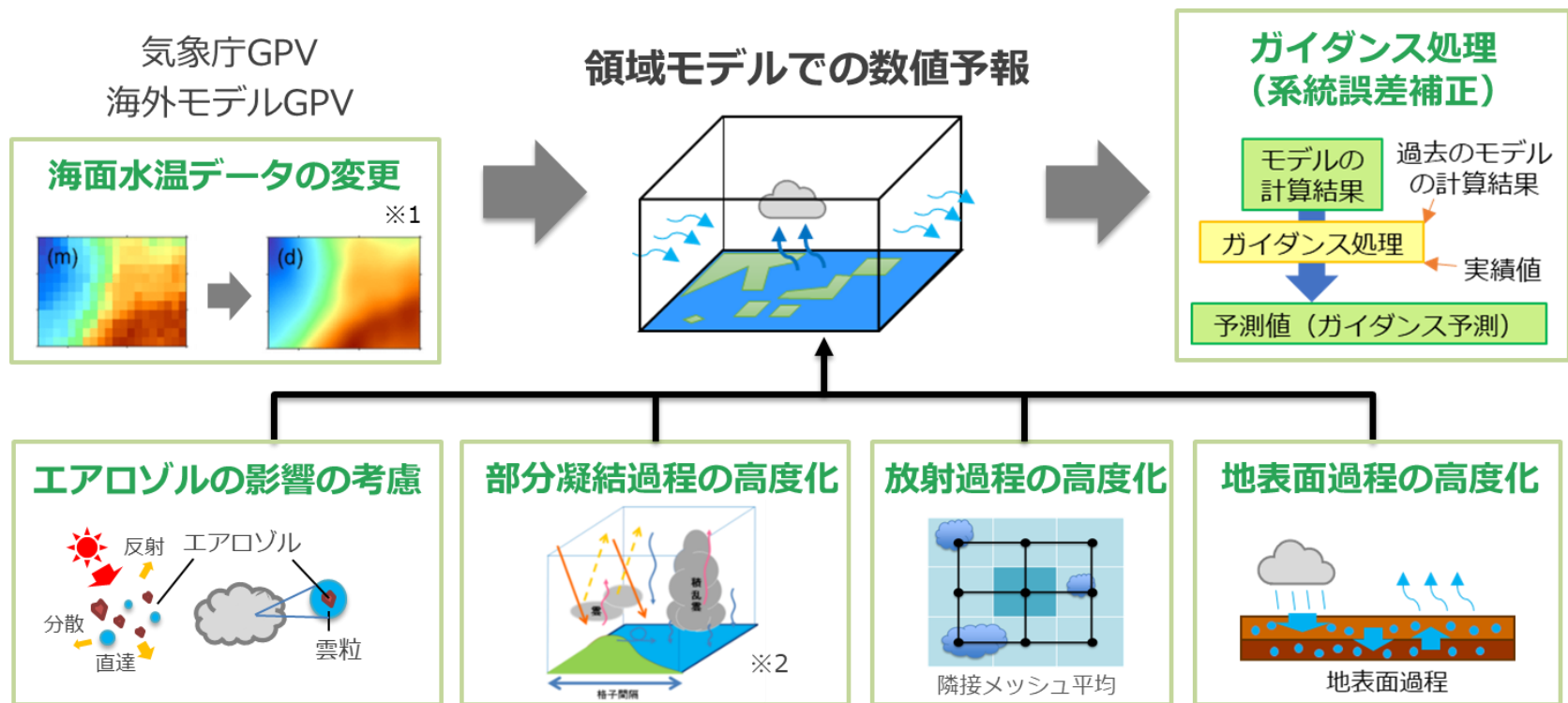


図 領域モデルにおける数値予報の流れ

# 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**を実施した。
- 日々のエアロゾルに伴う日射量や雲への影響を考慮可能な気象モデルを開発した。また、部分凝結過程の改良、放射過程における雲の取り扱いの高度化、高解像度な海面水温データの活用、地表面過程の改良も実施した。



※1 Inter-Comparisons of Daily Sea Surface Temperatures and In-Situ Temperatures in the Coastal Regions (<https://www.mdpi.com/2072-4292/12/10/1592/htm>)

※2 気象庁 数値予報解説資料第45巻第1部第4([https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/nwptext/45/1\\_chapter4.pdf](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。**

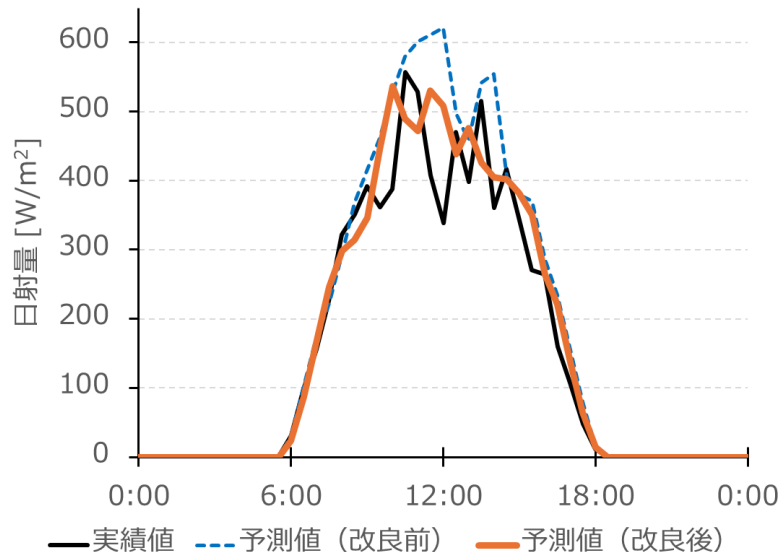


図 エアロゾルの粒径・吸湿性および雲の生成に係るパラメータ調整前後の予測結果例（2019年5月8日、北海道エリア、翌日予測）

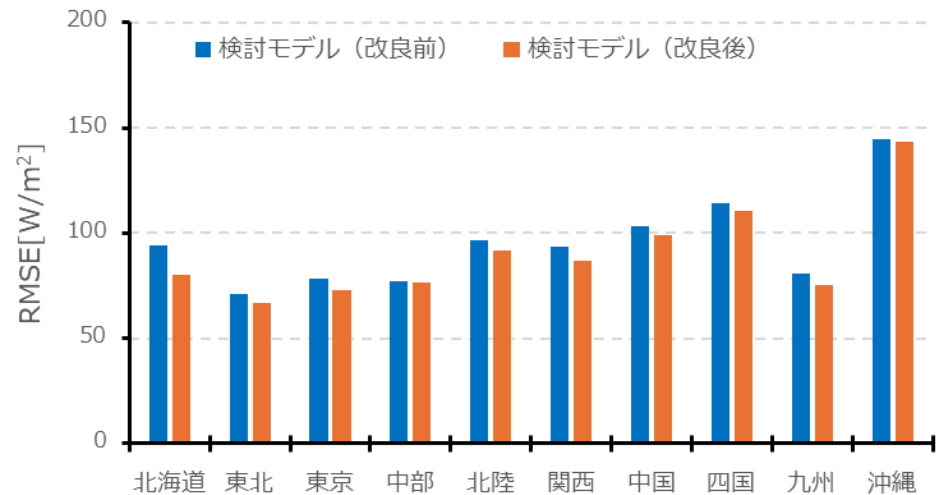


図 モデル改良前後での日射量予測精度 (RMSE)

※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。

## ＜開発モデルによる日射量予測結果＞

- 開発モデル（WRF-GSM、WRF-ECの2つ）は既往モデルに比べて**予測誤差が小さく、精度が高いことを確認**できた。

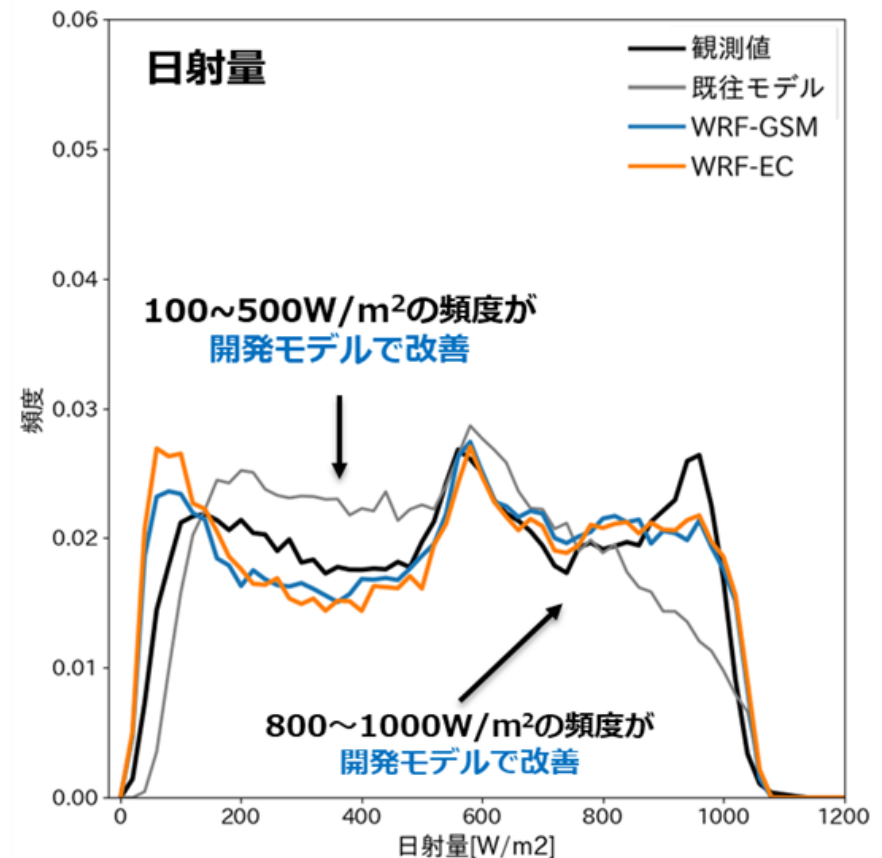
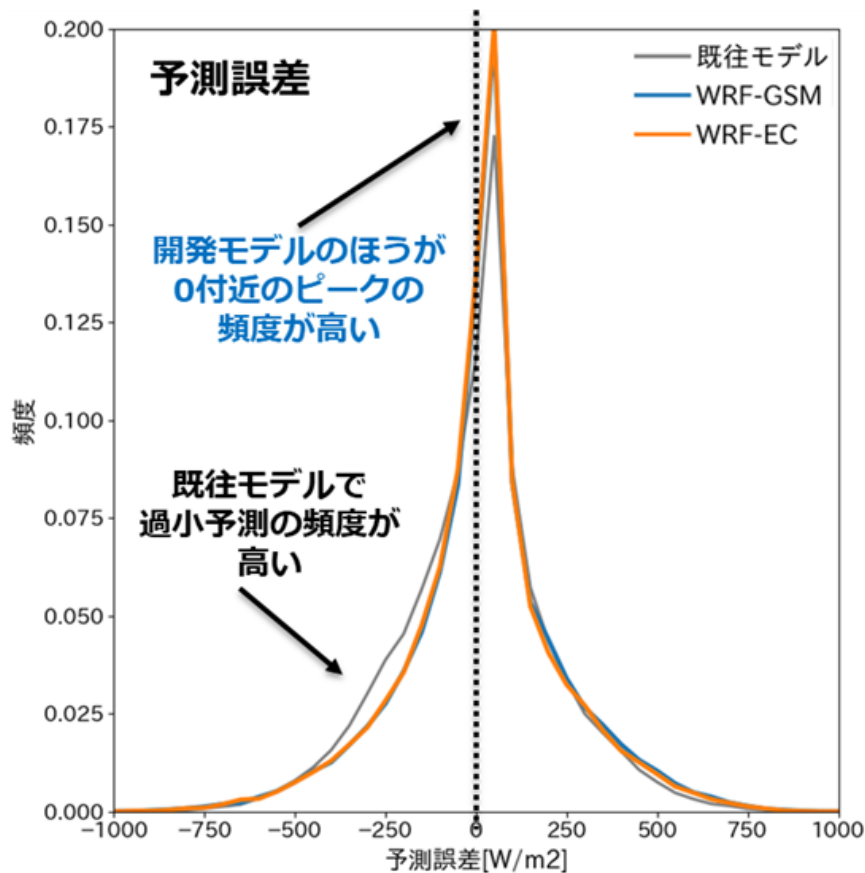
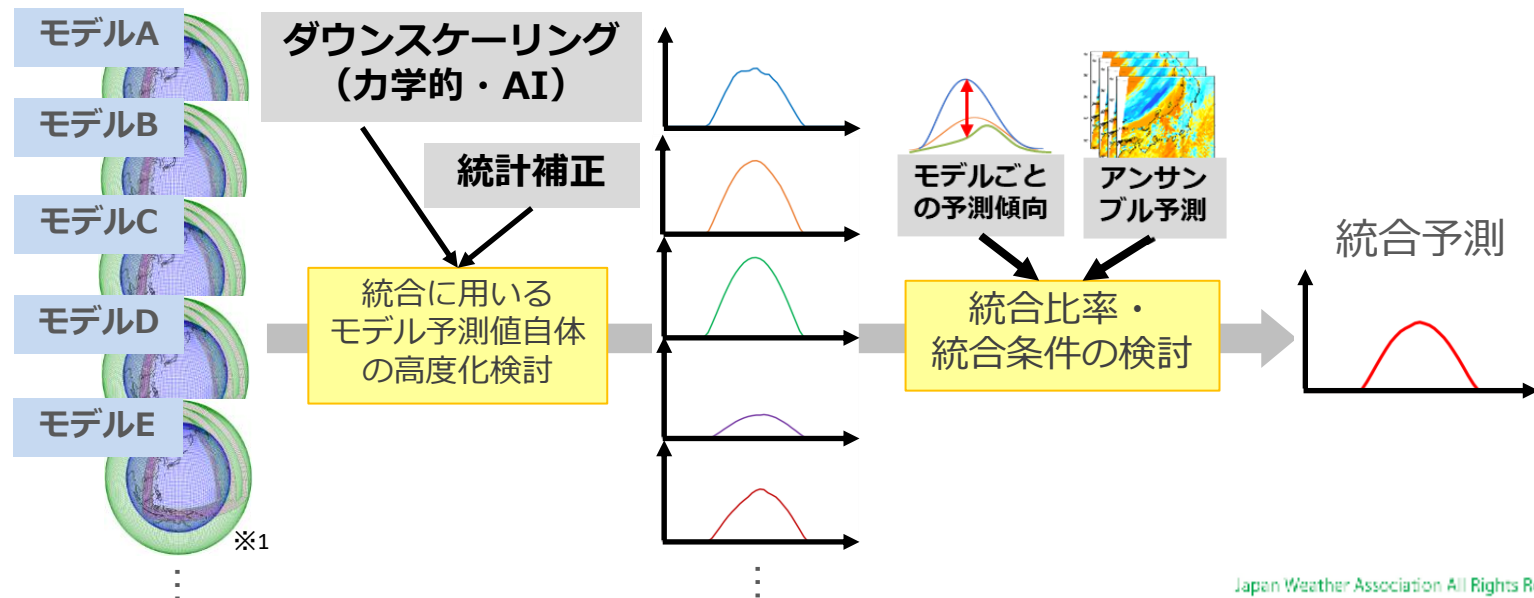


図 日射量予測誤差の頻度分布（左）と日射量頻度分布（右） ※ともに翌日12時断面

# 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**した。



## <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

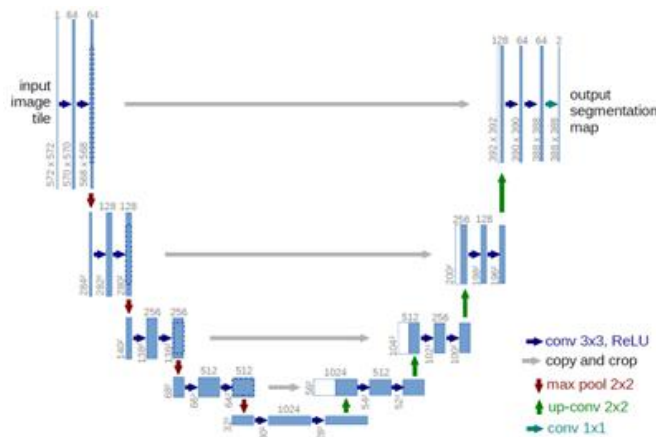


図 U-netの基本構造

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

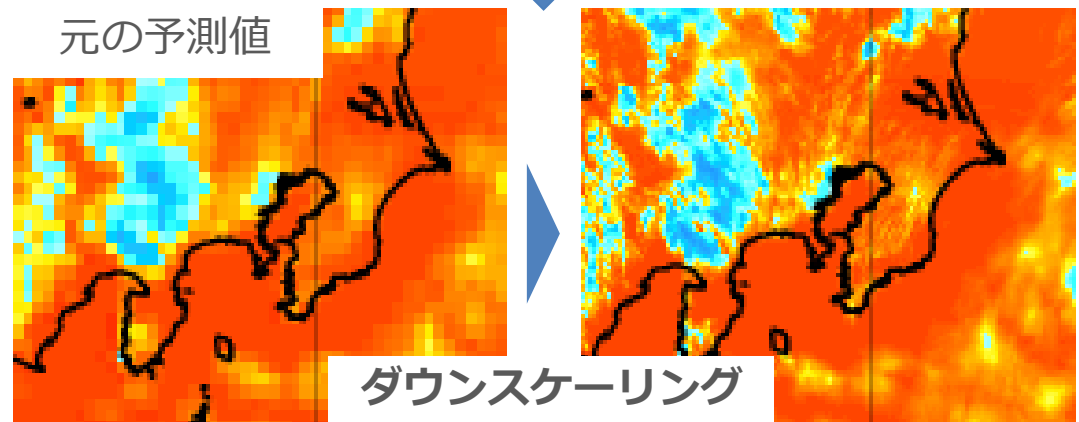


図 日射量分布のイメージ

# 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

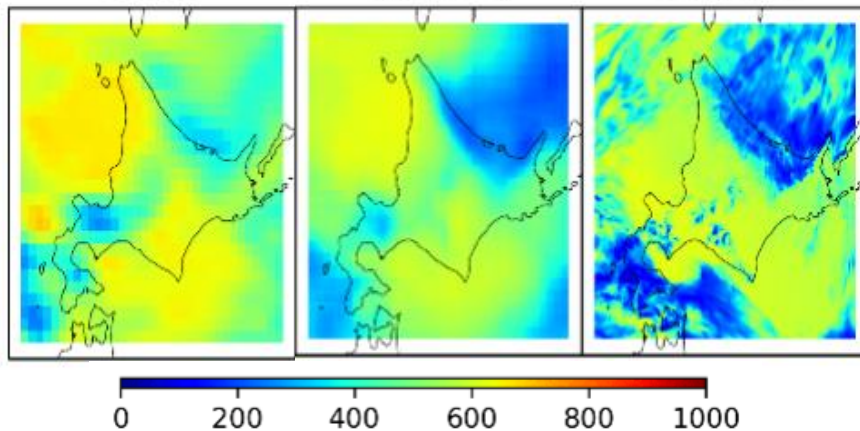


図 日射量分布

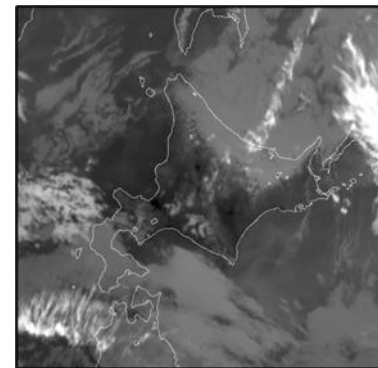


図 衛星赤外画像

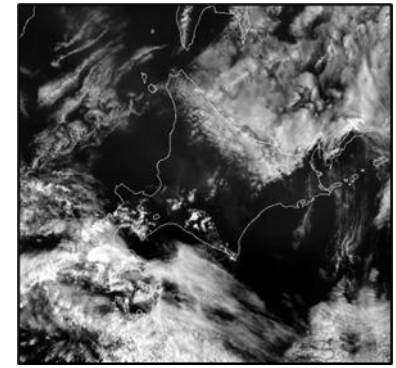


図 衛星可視画像

- 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。**

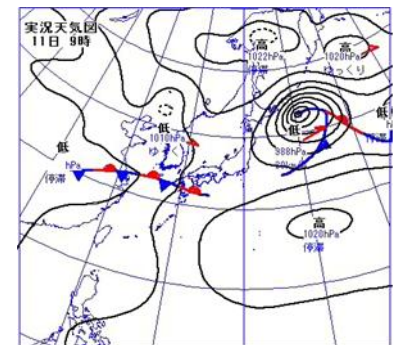


図 実況天気図（9時）

# 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）

## <予測誤差傾向に基づく予測値の補正手法>

- 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開発した。
- ベンチマーク予測値と比較して $\pm 3\sigma$ 誤差幅が平均13%程度減少することを確認した。

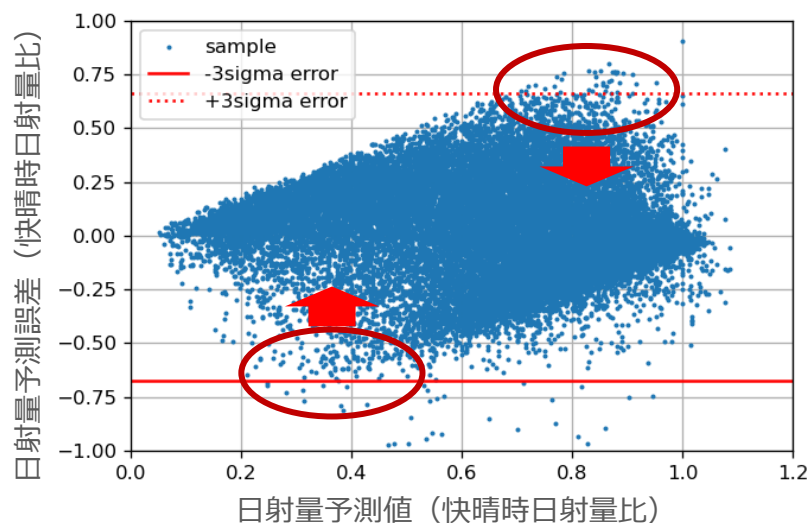


図 日射量・予測誤差（快晴指数）散布図（大阪）  
赤矢印は大外し低減のために補正したい方向を示す。

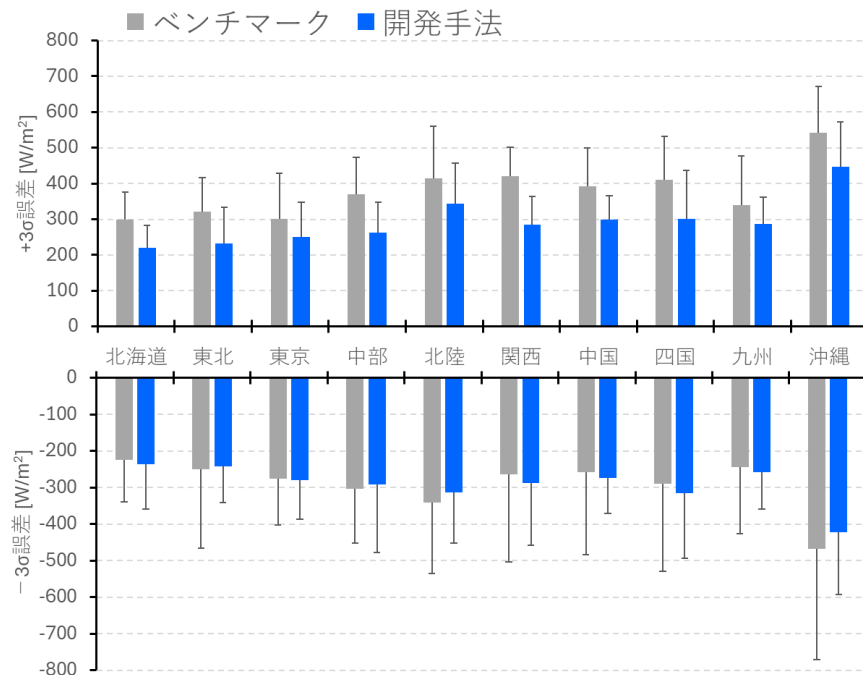
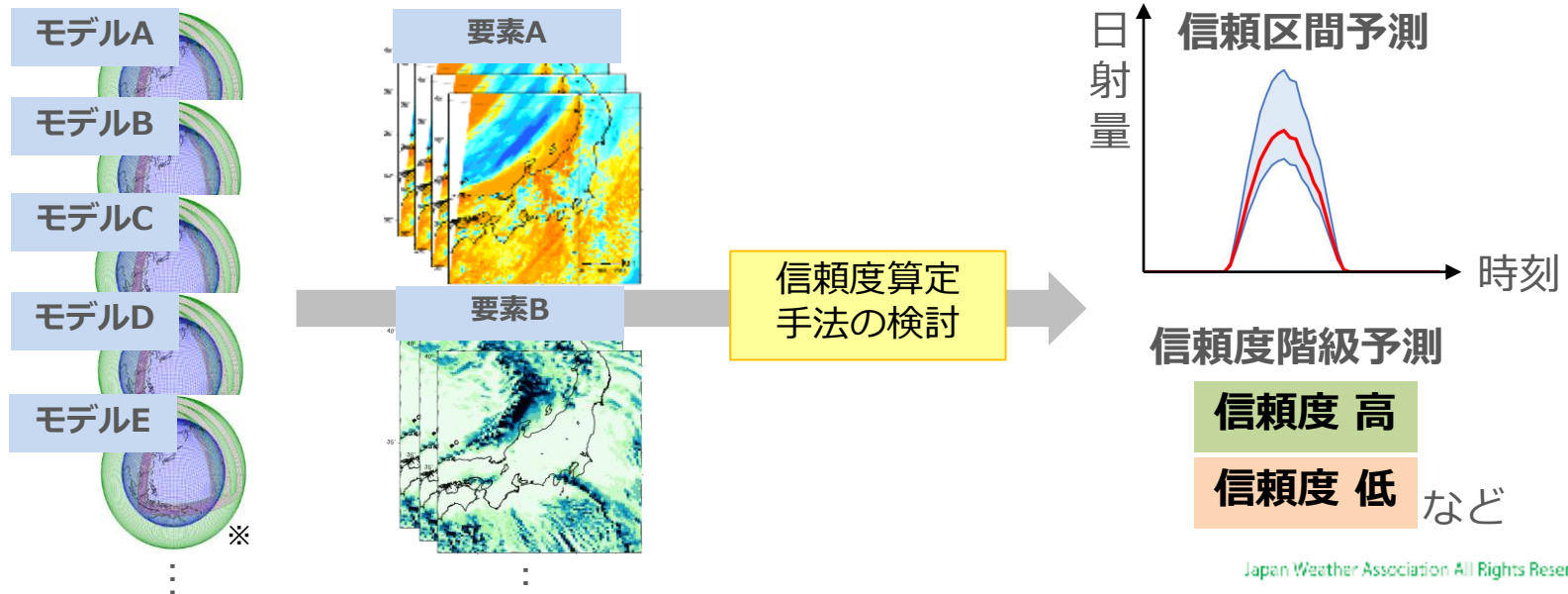


図  $\pm 3\sigma$ 誤差と最大誤差（2021年4月～2024年3月）

## ＜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**した。



# 開発内容（アンサンブル予報に基づく信頼度予測に係る技術開発について）

## ＜複数のアンサンブル予報の活用＞

- 信頼度予測として、日射量予測誤差の大きさを予測する信頼度階級予測と誤差の大きさを定量的に予測する信頼区間幅予測を対象に技術開発を実施した。
- 信頼度階級予測・信頼区間幅予測ともに、**複数のアンサンブル予報を組み合わせることで活用すること（マルチセンタージェランドアンサンブル手法）**により、**信頼度予測の精度向上を確認した。**

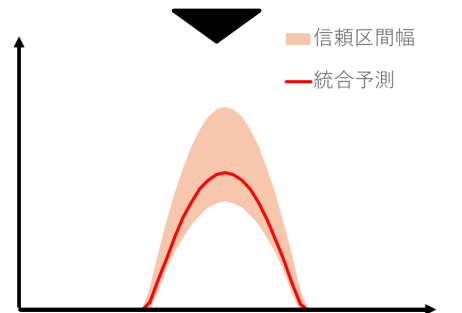
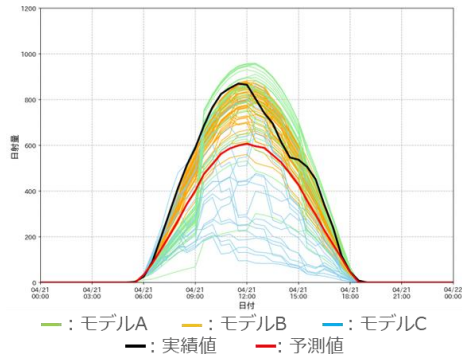


図 信頼区間幅予測のイメージ

### 信頼区間幅予測

：区間幅が狭くなる傾向を確認

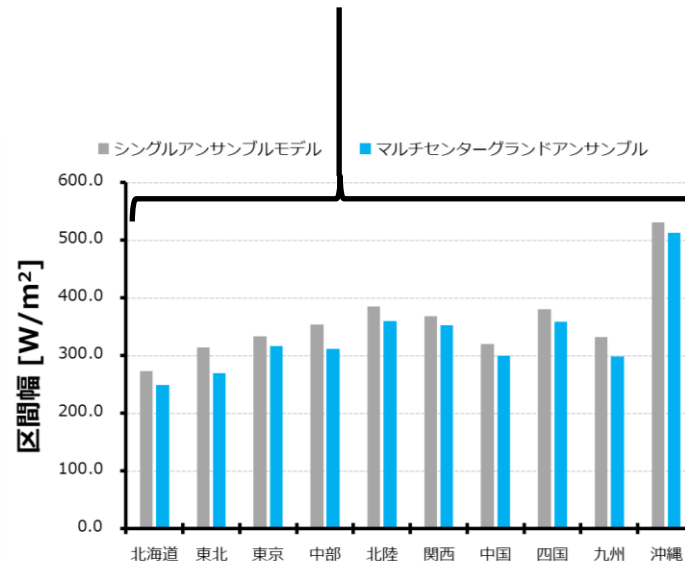
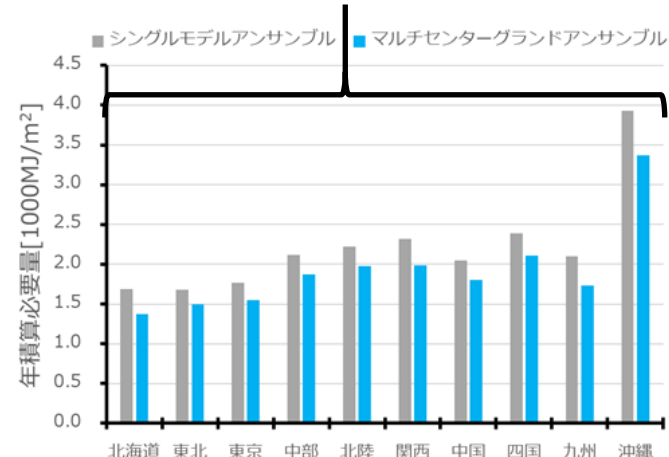


図 検証結果 (左) 信頼区間幅予測

### 信頼度階級予測

：日射量で模擬した予測誤差に対応するための調整力等の必要量が低減する傾向を確認



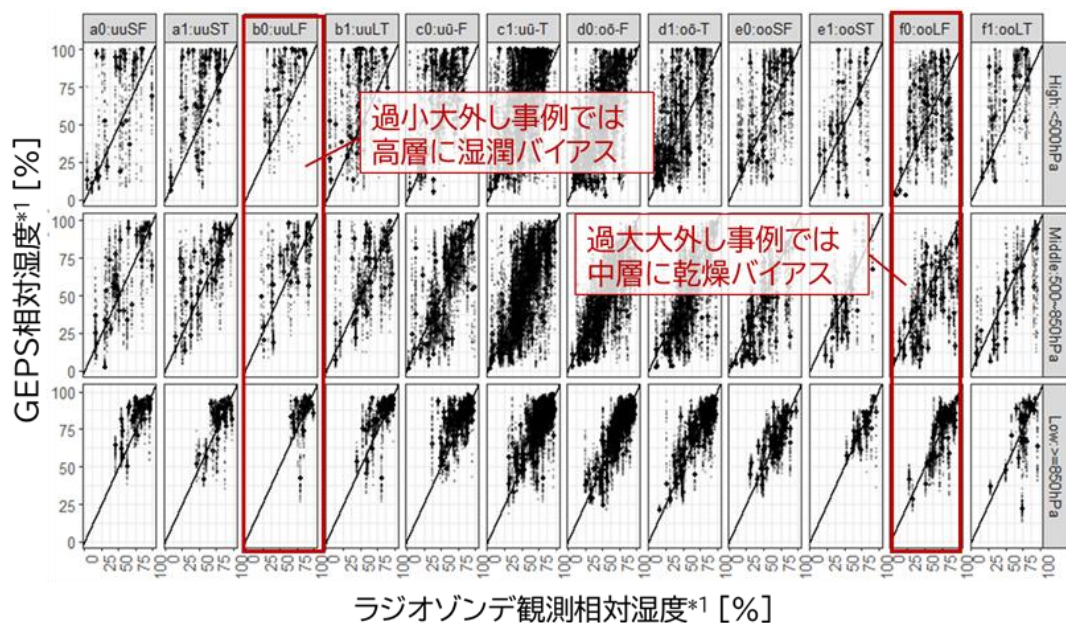
(右) 信頼度階級予測※過大予測側

ともに2023年1～12月の結果。

# 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)

## <大外し事例の要因分析>

- 気象庁のアンサンブル予報およびそれを初期値とする領域モデルの計算結果を活用し、大外し事例の要因を分析した。
- 気象庁全球アンサンブル予報 (GEPS) において、**中層の乾燥バイアス傾向と高層の湿潤バイアス傾向**があることが分かった。中層の乾燥バイアスにより雲の発生が抑制され過大予測を招く一方、高層の湿潤バイアスにより雲が過剰に発生して過小予測となる傾向があることが確認された。



\*1 初期時刻UTC12 FH36 (予報対象時刻D+1JST09)

図 相対湿度のGEPS予報とラジオゾンデ観測の相関プロット

# 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)

## <メソアンサンブル予報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。
- 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**。
- 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**。

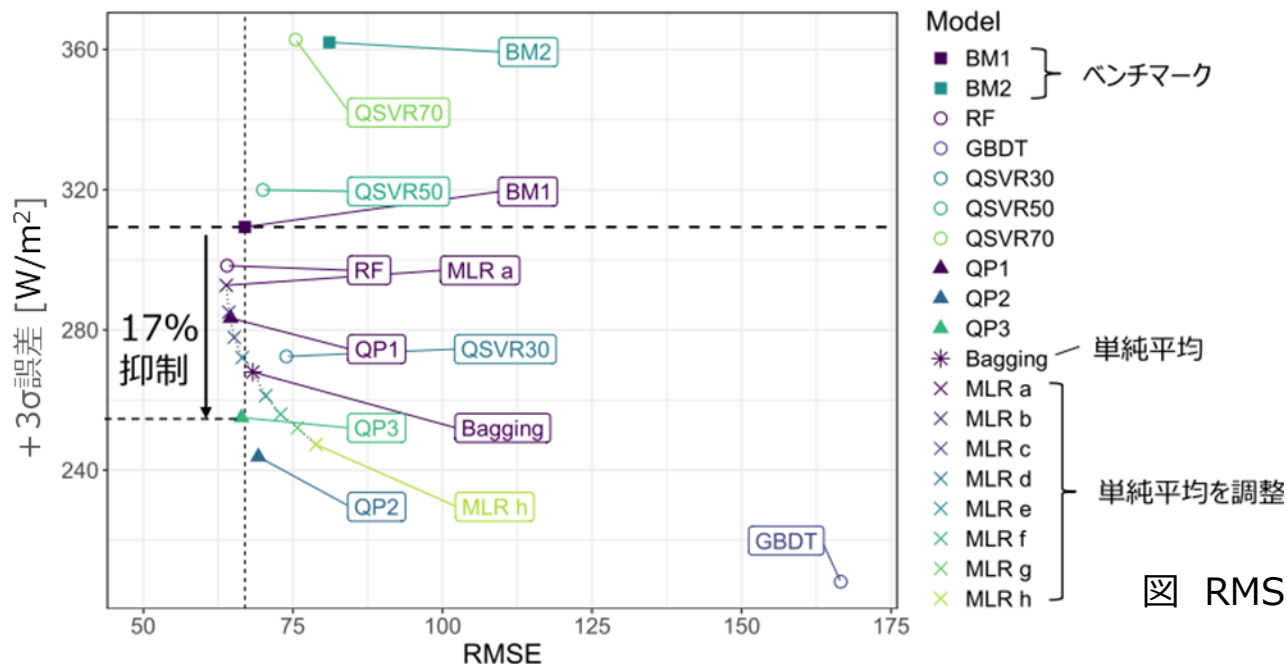
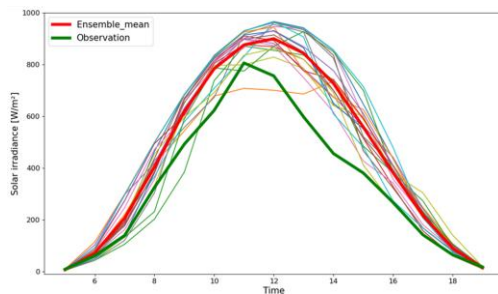
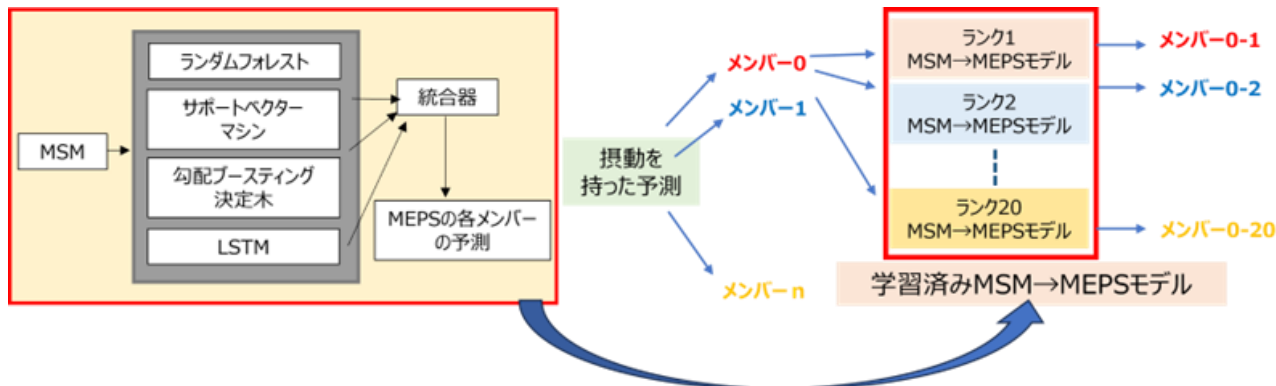


図 RMSEと+3σ誤差のトレードオフ関係

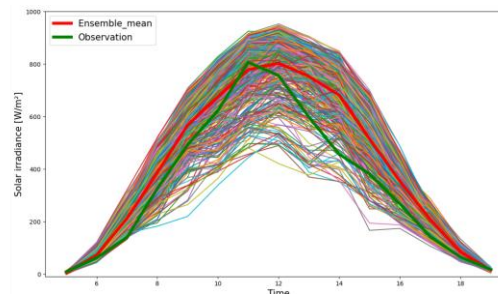
# 開発内容 (大外し事象の誤差低減のための領域モデルを補間する 各種気象庁GPVを利用した日射量予測の特性分析)

## ＜機械学習モデルによるアンサンブル予報の生成＞

- 新たな誤差抑制のためのアプローチとして、メソアンサンブル予報をメソスケールモデル予報から生成する手法を検討した。
- **観測データを学習に用いていないにも関わらず、実績値に近い値を予測するメンバーを生成できた。** したがって、観測値を学習しない手法でも予報精度の改善が可能であることが示唆された。



(a) MEPSデータ



(b) 機械学習モデルの420メンバー予報

図 機械学習モデルによるアンサンブル予報生成手法概要 (上) と生成結果の例 (下)

# 開発内容（大外し低減予測技術の開発と評価）

## ＜最終目標の達成状況＞

- 開発した要素技術を組み合わせ、日射量予測が大きく外れる事象の改善効果を検証した。
- 複数モデルの統合予測において信頼度が高いと予測した場合の **$\pm 3\sigma$ 誤差が23.0%低減**（最大誤差は29.8%低減）し、本事業の最終目標である「従来の予測手法に比べて最大誤差を20%以上低減する技術を開発する」を達成した。

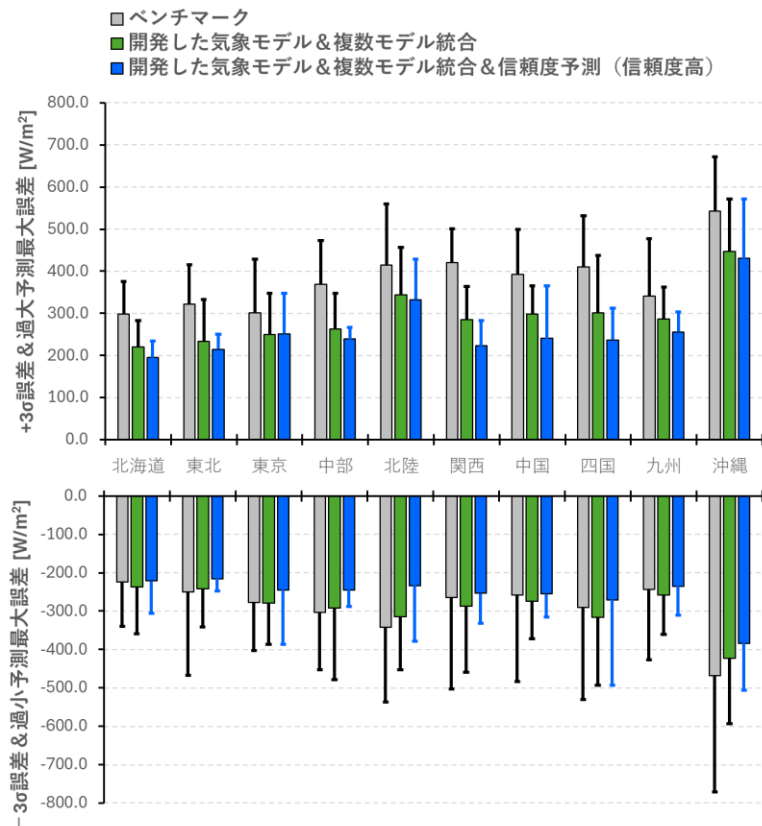


図 ±3σ誤差および最大誤差の検証結果（左）と±3σ誤差の改善率（右）

※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（技術開発成果）

- **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。**
  - ・「**日射量予測に特化した気象モデル**」として、日々のエアロゾルに伴う日射量や雲への影響を考慮可能な気象モデルを開発した。部分凝結過程の改良、放射過程における雲の取り扱いの高度化等の改良も実施した。
  - ・「**複数機関の気象モデル予測値の統合**」については、統合前のモデル予測値の高度化手法としてAIダウンスケーリング手法を開発した。さらに、機械学習を活用し、大外し誤差を低減するための統合予測の補正手法を開発した。
  - ・「**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予報を組み合わせ活用するマルチセンターグランドアンサンブル手法を開発した。
  - ・「**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の湿潤・乾燥傾向を明らかにした。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を確認した。さらに、アンサンブル予報の生成手法を検討し、観測値を学習しない手法でも予報改善が可能であることを示した。
- **開発した要素技術を組み合わせた結果、 $\pm 3\sigma$ 誤差が23.0%低減し、最終目標を達成した。**

- 本事業にて開発した技術は、できる限り早期に実用化することが望まれる。実用化にあたっては、**日々の運用を行うための予測計算処理のシステム化が必要**となる。
- また、技術開発を通して、**大外しの低減効果を最大化した場合には平均的な予測の品質に対応するRMSEが増加傾向となるトレードオフの関係**が明らかとなった。このため、実運用にあたっては、予測の利用ニーズに合わせて、適用する手法や設定の調整を行うことが重要と考えられる。
- 近年では調整力を効率的に調達するための観点より、大外し誤差に加えて平均的な誤差（RMSEなど）の低減も重要とされている。加えて、三次調整力②に関しては、近年検討が進められている同時市場が導入された場合には、前日夕方から当日朝にかけて最新の予測情報を都度更新しながら電源調達を見直すことが示されている。このため、**当日により近い段階での日射量予測の高精度化**が今後の課題と考えられる。