



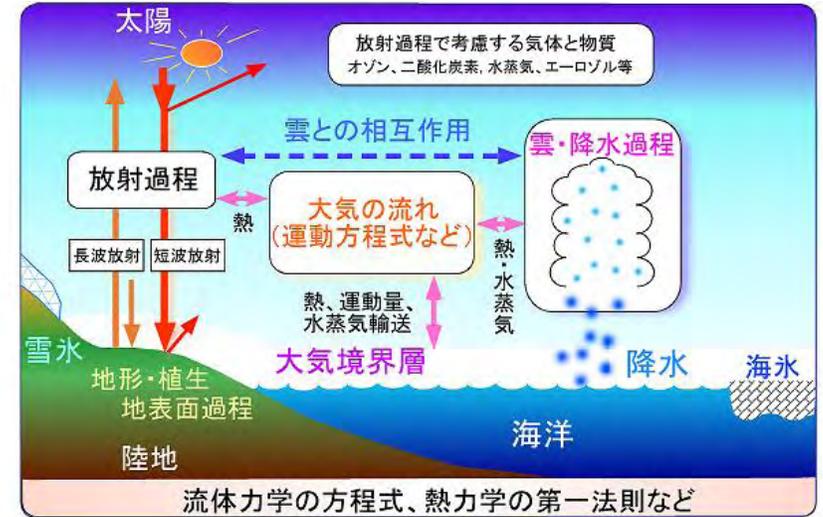
# 数値予報モデルの予測精度向上の取組

気象庁情報基盤部数値予報課  
北村 祐二

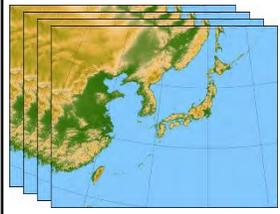
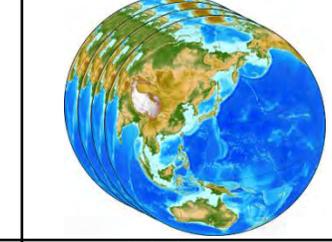
2024.3.4 第20回ESIシンポジウム@東京大学生産技術研究所

# 数値予報とは

- 地球大気や海洋・陸地の状態の変化を物理法則に従って数值的に計算
  - 流体の運動方程式、熱力学の方程式のほか、雲・降水に関わる過程や放射過程なども計算の対象
- 世界中から観測データを収集・処理し予報初期の大気の状態を推定して、予測プログラムによって未来の状態を計算した結果を、格子点情報として民間気象業務支援センターを通じて提供している



# 気象に関する数値予報モデル

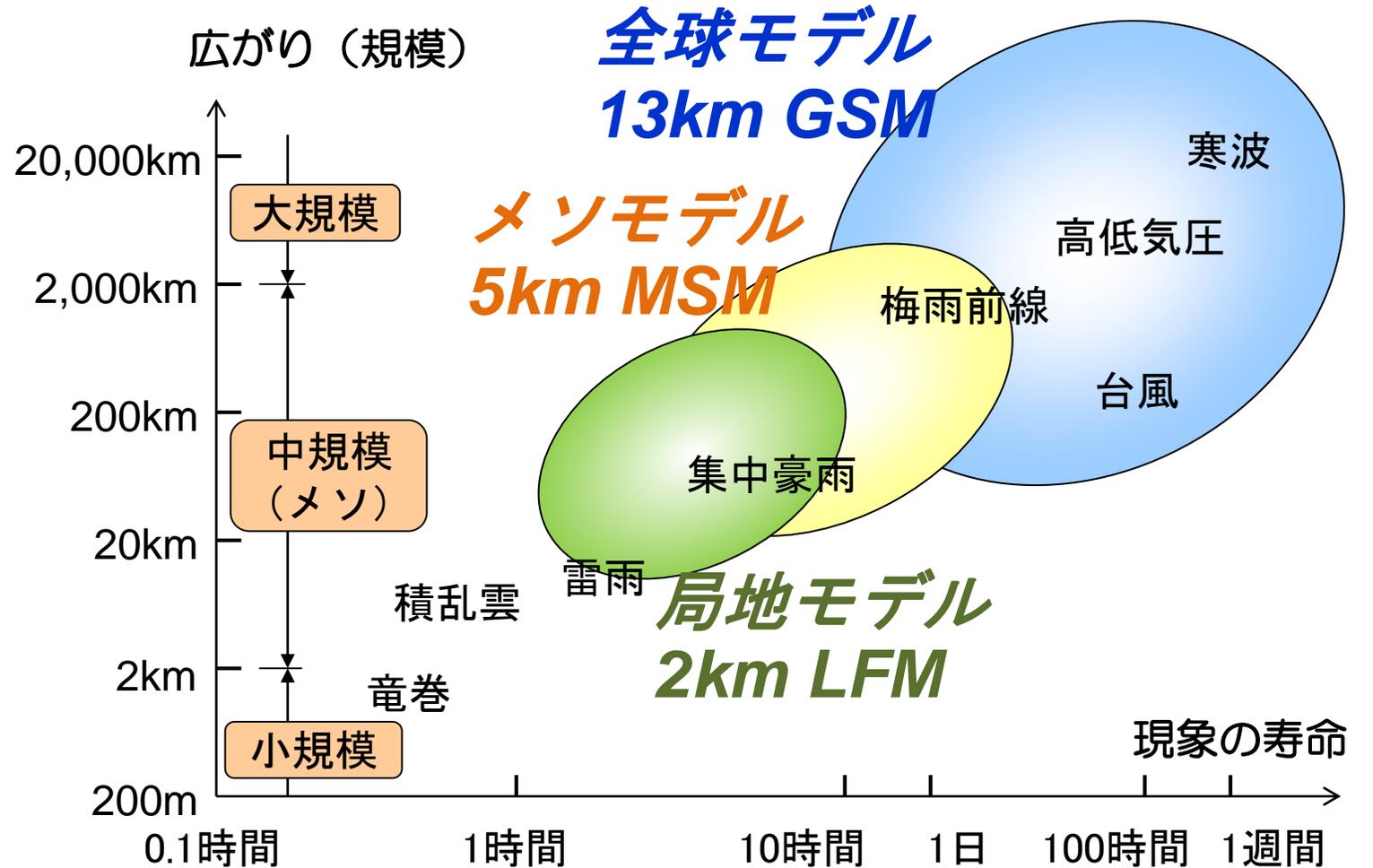
	局地モデル (LFM)	メソモデル (MSM)	メソEPS (MEPS)	全球モデル (GSM)	全球EPS (GEPS)	季節EPS (JMA/MRI-CPS3)
モデル領域※						
水平格子間隔	2 km	5 km	5 km	約 13 km	約27km (18日まで) 約40km (それ以降)	大気約 55 km 海洋約 25km
予報期間 (初期時刻)	10時間 (毎時)	78時間 (00,12UTC) 39時間 (03,06,09, 15,18,21UTC)	39時間 (00,06,12,18UTC)	264時間 (00,12UTC) 132時間 (06,18UTC)	5.5日 (06,18UTC) *4 11日 (00UTC) 18日 (12UTC) 34日 (週2回)	7か月 (00UTC)
メンバー数	1	1	21	1	51 (18日まで) 25 (それ以降)	5
モデルを用いて発表する予報	航空気象情報 防災気象情報 降水短時間予報	防災気象情報 降水短時間予報 航空気象情報 分布予報 時系列予報 府県天気予報	防災気象情報 航空気象情報 分布予報 時系列予報 府県天気予報	台風予報 分布予報 時系列予報 府県天気予報 週間天気予報 航空気象情報	台風予報 週間天気予報 早期天候情報 2週間気温予報 1か月予報	3か月予報 暖候期予報 寒候期予報 エルニーニョ監視速報
初期値解析手法	ハイブリッド 3次元変分法	4次元変分法	メソモデル初期値 + SV*1の摂動 (初期値+側面)	ハイブリッド 4次元変分法	全球モデル初期値+ SV*1の摂動 + LETKF*2の摂動	大気：全球モデル初期値 +BGM法*3の摂動 海洋：4次元変分法 +海洋解析誤差摂動
海面水温	固定値 (HIMSST)	固定値 (HIMSST) +1次元海洋混合層 モデルによる変動	固定値(HIMSST) +1次元海洋混合層 モデルによる変動	偏差固定 (MGDSST)	6日以降に季節EPSの 予測SSTを利用 (2段階SST法)	3次元海洋モデルとの 大気海洋結合で変動を予 測

\*1 SV :特異ベクトル / \*2 LETKF :局所アンサンブル変換カルマンフィルタ / \*3 BGM 法:成長モード育成法  
\*4 06,18UTCの気象業務支援センター経由でのデータ提供は、台風の条件を満たす場合のみ。

※図の地形データにはNational Centers for Environmental Information作成のETOPO1を使用

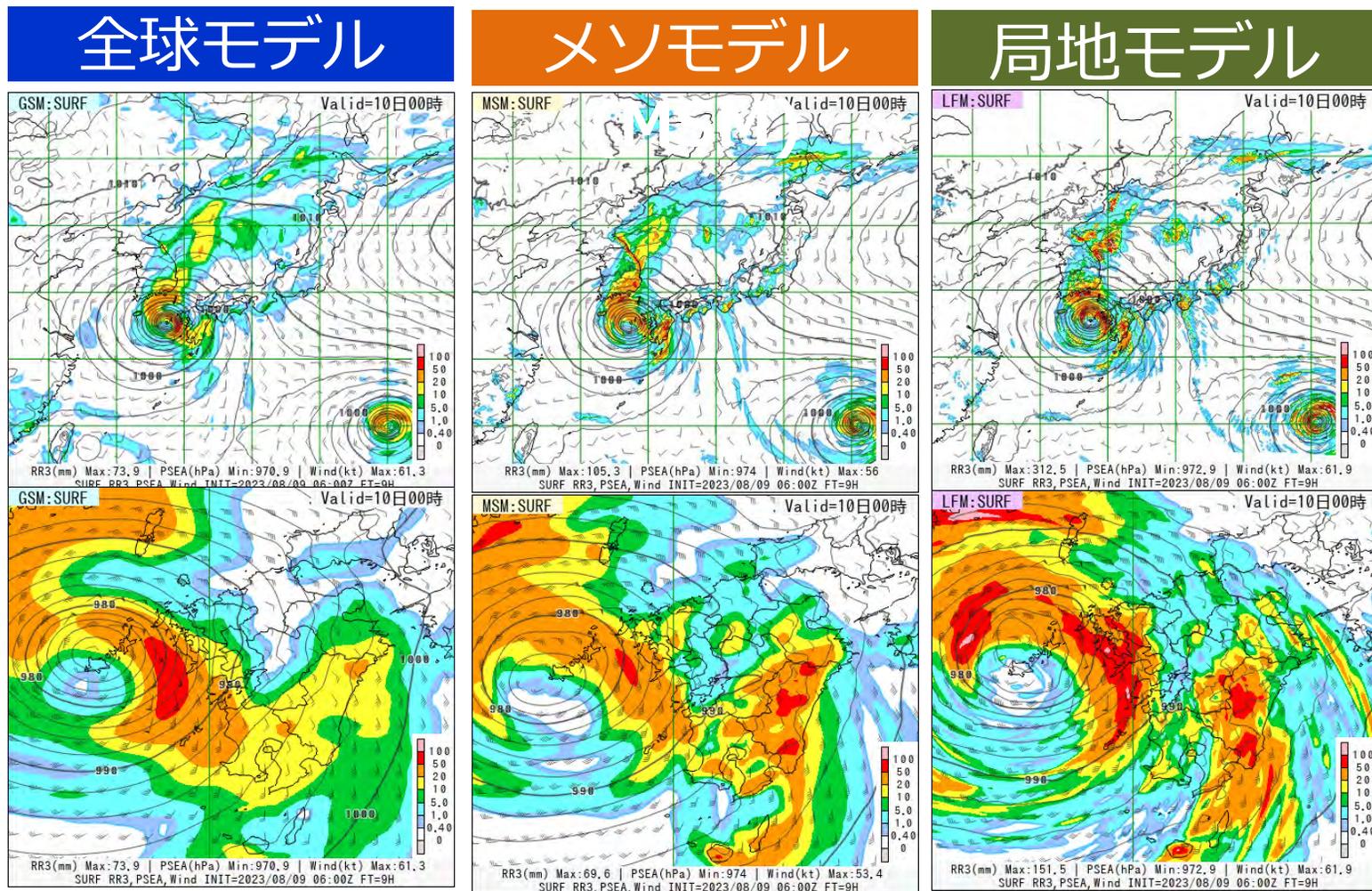
# 気象のスケールと数値予報モデル

- 現象の規模によって異なるタイムスケールを持つ
  - 現象の空間スケールが大きいほど時間スケールが長い
- 対象とする現象に応じて数値予報モデルを使い分けている
  - 高解像度のモデルで全てをリアルタイムに予測するのは非現実的



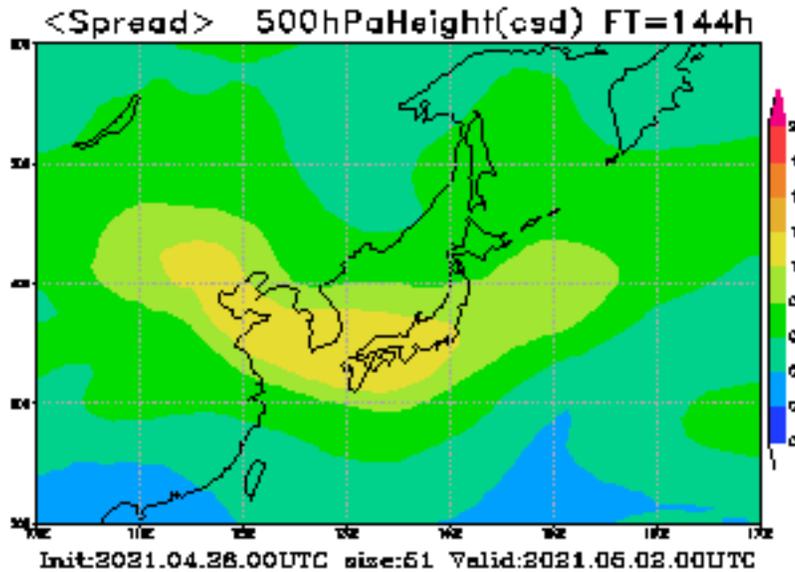
# 各モデルの予測特性の違い

- 令和5年台風第6号の予測例
- 高解像度のモデルほど降水域がシャープに表現される傾向がある

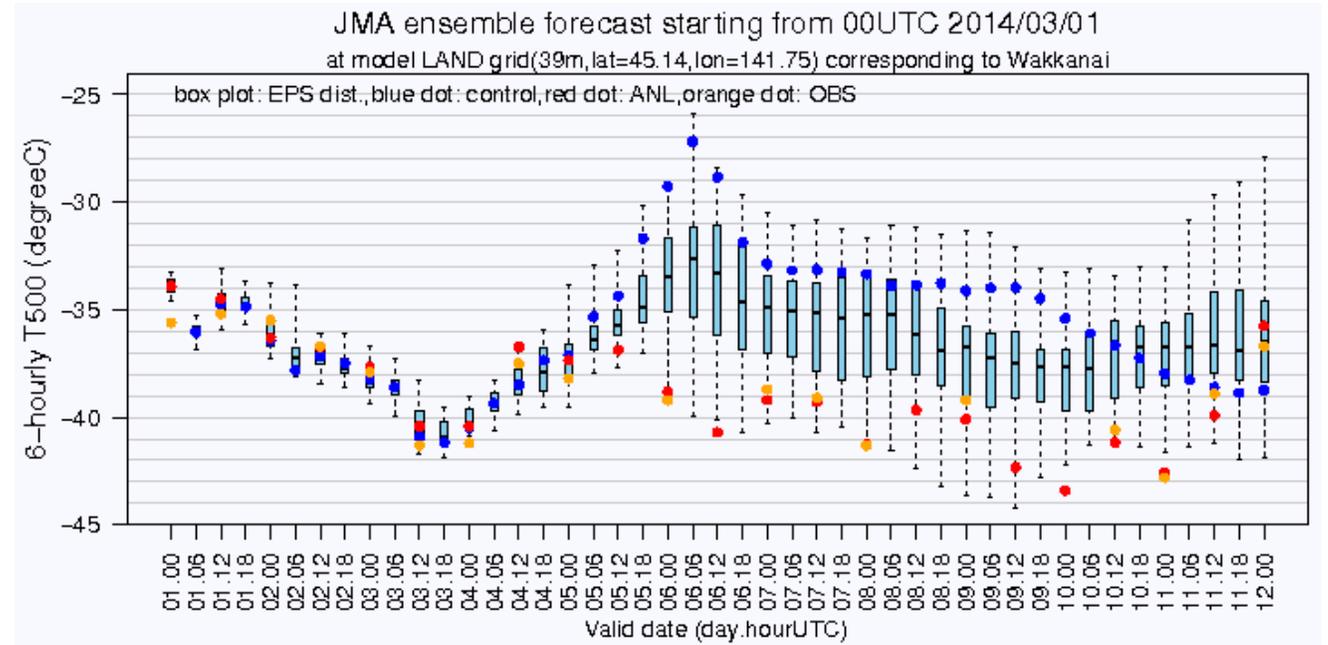


# アンサンブル予報

- 数値予報モデルの予測は、初期値・境界値の不確実性やモデル自体の不完全性により誤差が生じる
- アンサンブル予報は、異なるずれ（摂動）を与えた多数の予測計算の結果のばらつきの大きさから、予測の誤差を見積もる方法



アンサンブルスプレッドの一例



ある地点での500hPa面の気温についての箱ひげ図

# GPV地上プロダクト（風・気温・日射量等）

- **全球モデル（日本域）**

- 緯度0.1度×経度0.125度間隔
- 0～132時間（初期時刻00, 06, 12, 18UTC）：1時間間隔出力
- 135～264時間（初期時刻00, 12UTC）：3時間間隔出力

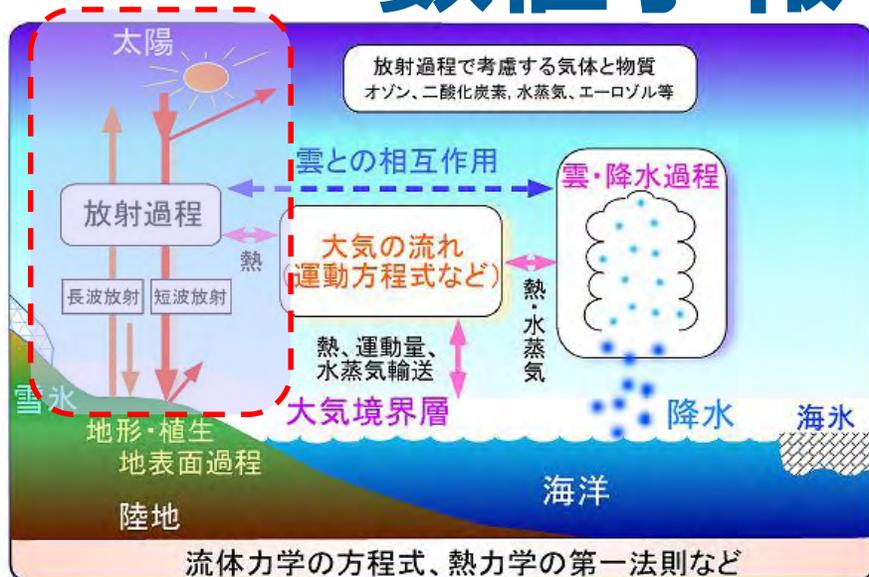
- **メソモデル**

- 緯度0.05度×経度0.0625度間隔
- 39時間予報（初期時刻03, 06, 09, 15, 18, 21UTC）、78時間予報（初期時刻00, 12UTC）いずれも1時間間隔出力

- **局地モデル**

- 緯度0.02度×経度0.025度間隔
- 10時間予報（毎正時）、30分間隔出力

# 数値予報モデルの放射過程



数値予報モデルの放射過程では、鉛直方向の放射伝達を計算することにより、以下を計算する。

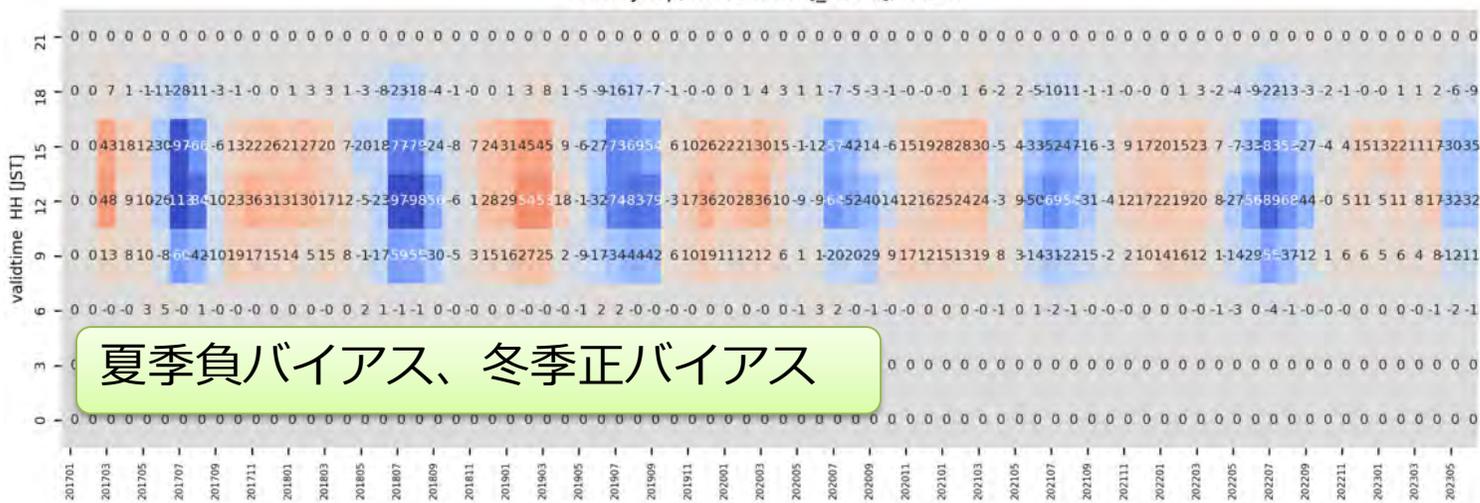
- ・ 放射（太陽放射、地球放射）による大気加熱・冷却
- ・ 大気-地表面間の放射エネルギーの交換（地表面での放射フラックス）
- ・ 大気-宇宙間の放射エネルギーの交換（大気上端での放射フラックス）

	短波放射（太陽放射）	長波放射（地球放射）
扱う波長域	0.174 - 0.364 $\mu\text{m}$ （紫外域） 0.364 - 0.685 $\mu\text{m}$ （可視域） 0.685 - 5.0 $\mu\text{m}$ （近赤外域）	3.33~400 $\mu\text{m}$ （赤外域）
吸収・散乱を扱う大気物質	予測値：水蒸気（対流圏） 気候値：水蒸気（成層圏）、二酸化炭素、酸素、オゾン、エアロゾル	予測値：水蒸気（対流圏） 気候値：水蒸気（成層圏）、二酸化炭素、オゾン、亜酸化窒素、メタン、フロンガス、エアロゾル
雲の扱い	雲（液体、固体）による吸収・射出・散乱を考慮 モデルが予測した雲を放射計算に利用	

# メソモデル(MSM)の日射量予測特性

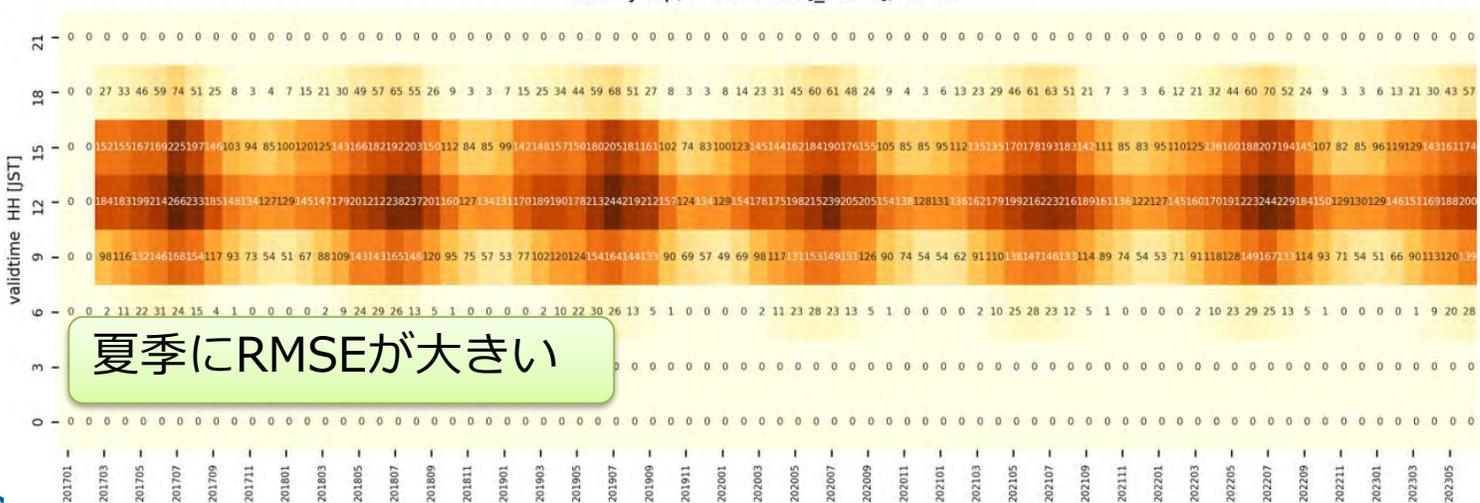
2017年1月-2023年6月

Radiation Monthly MeanError[W/m<sup>2</sup>]  
obs:synop, model:msm[\_RSDB], ft:24h



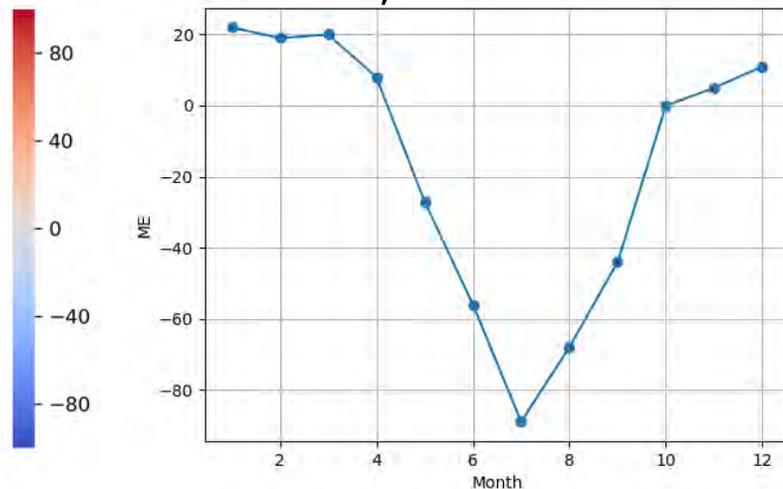
夏季負バイアス、冬季正バイアス

Radiation Monthly RMSE[W/m<sup>2</sup>]  
obs:synop, model:msm[\_RSDB], ft:24h

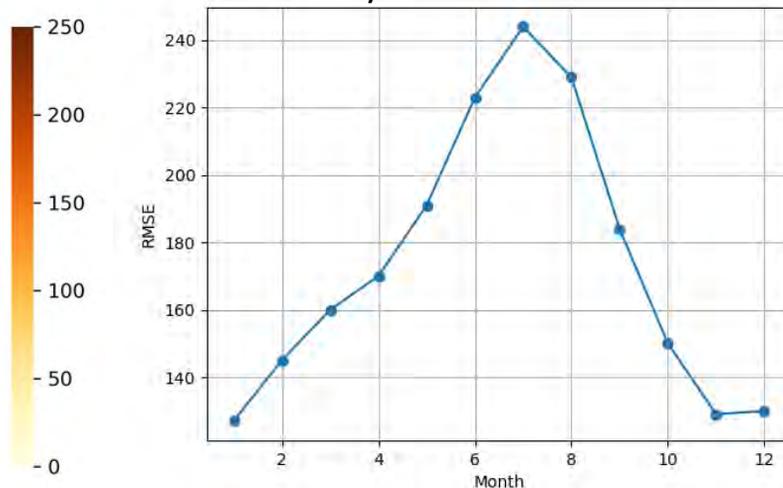


夏季にRMSEが大きい

2022年, 12JSTのME

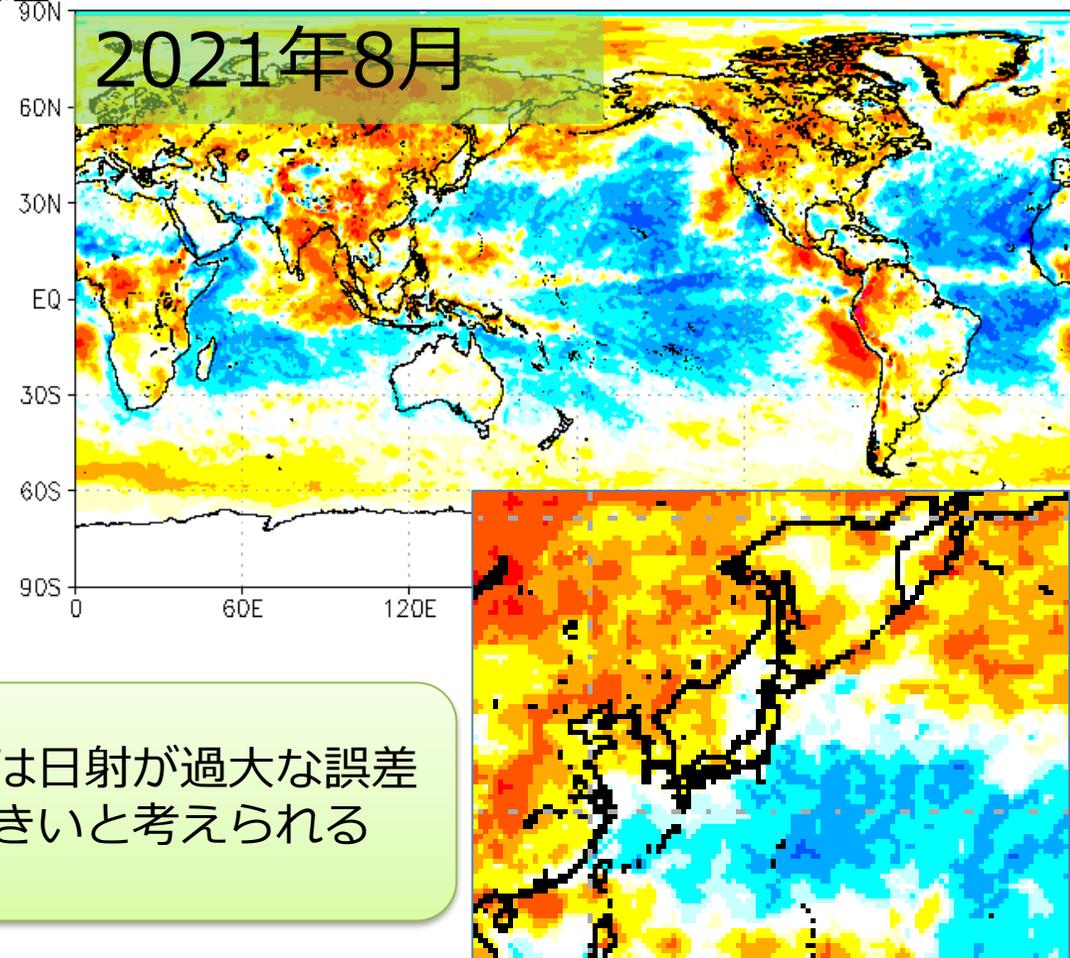
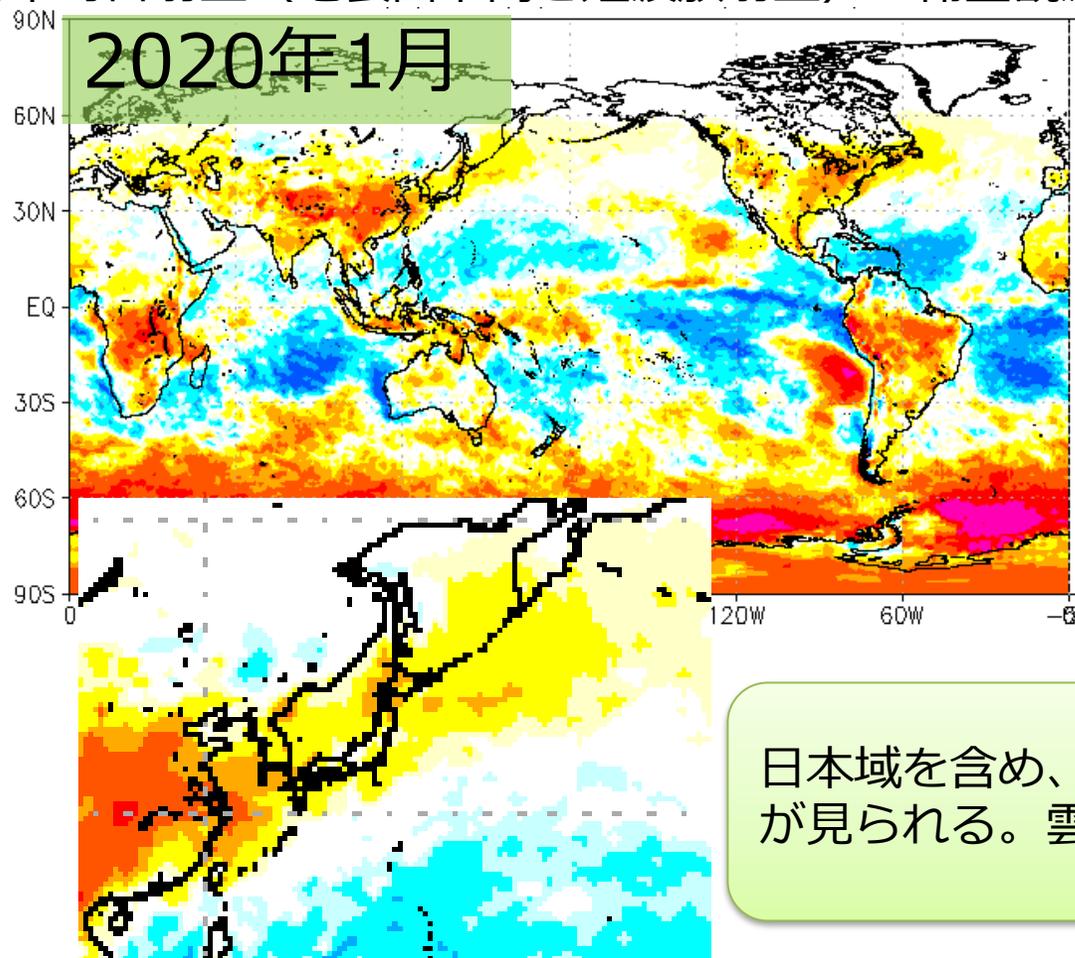


2022年, 12JSTのRMSE

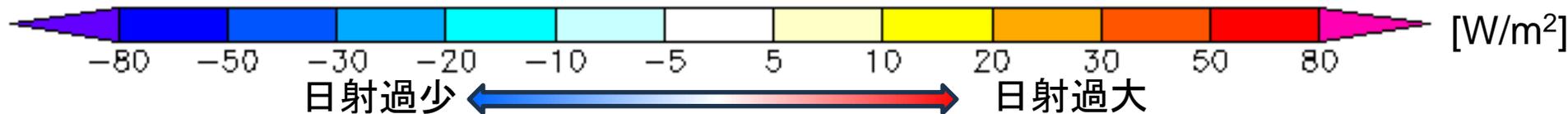


# 全球モデル(GSM)の日射量予測特性

月平均日射量（地表面下向き短波放射量）の衛星観測に対する誤差



日本域を含め、中高緯度では日射が過大な誤差が見られる。雲の影響が大きいと考えられる

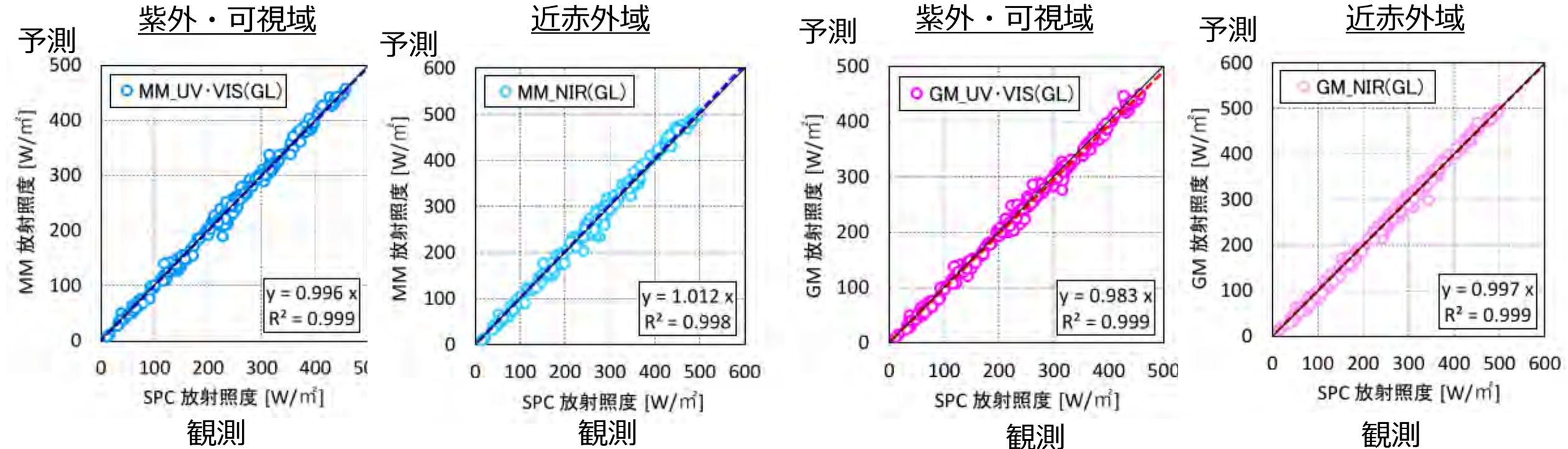


# 数値予報モデルの晴天時の日射量予測特性

晴天時における、メソモデル（MSM）、全球モデル（GSM）の短波放射量の高層気象台の分光放射計観測値との比較

## メソモデル

## 全球モデル

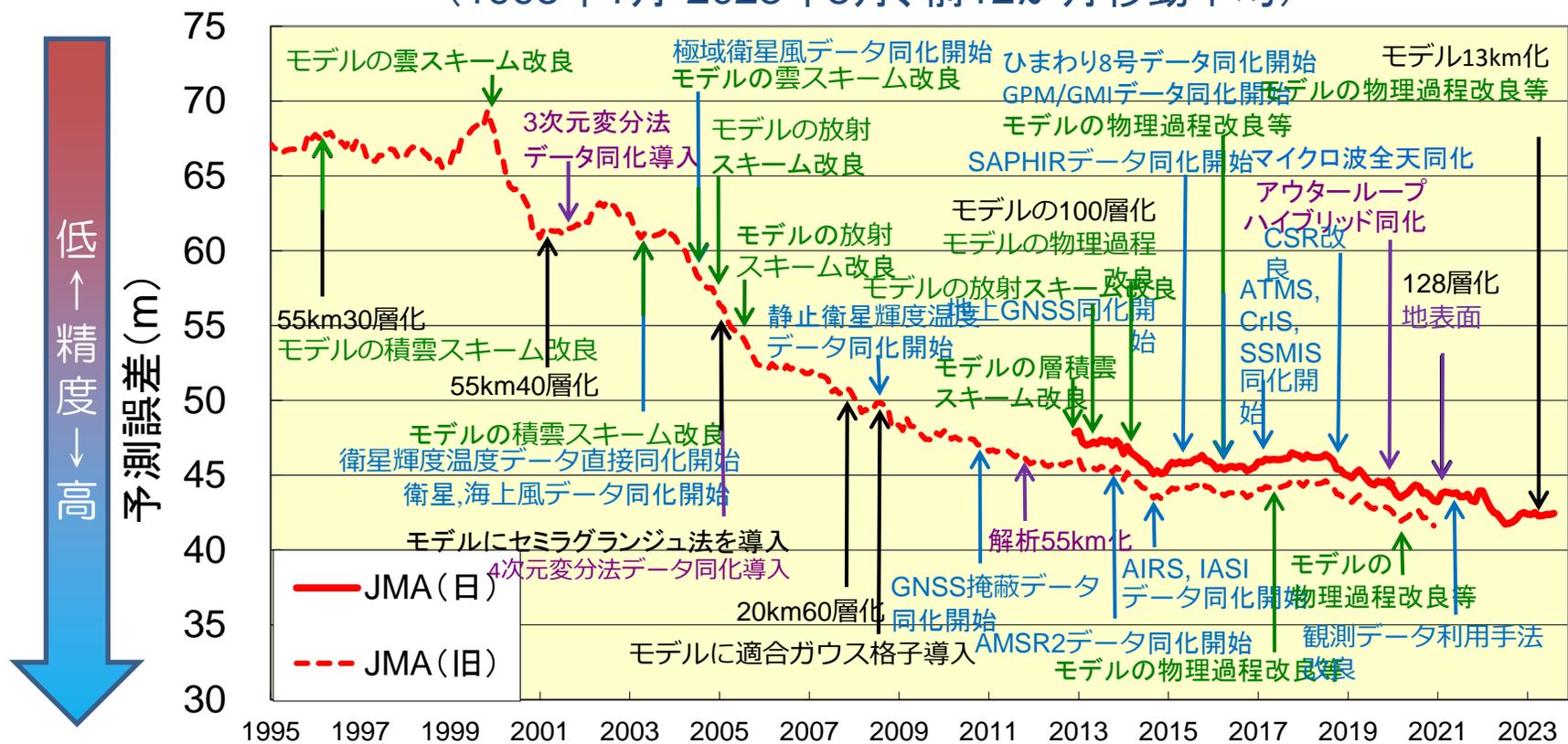


晴天時の日射量予測の精度は高い

図の出典：居島, 2023: 分光放射計を用いて観測した太陽光波長別放射照度の活用 — 数値予報モデル等の放射照度の検証 —, 高層気象台彙報 第78号

# 全球モデルの改良と精度向上

北半球5日予報500hPa高度RMSEの経年変化  
(1995年1月-2023年8月、前12か月移動平均)



- 緑：モデル物理過程
- 黒：モデル力学過程・解像度
- 紫：データ同化システム
- 青：新たに同化されたデータ

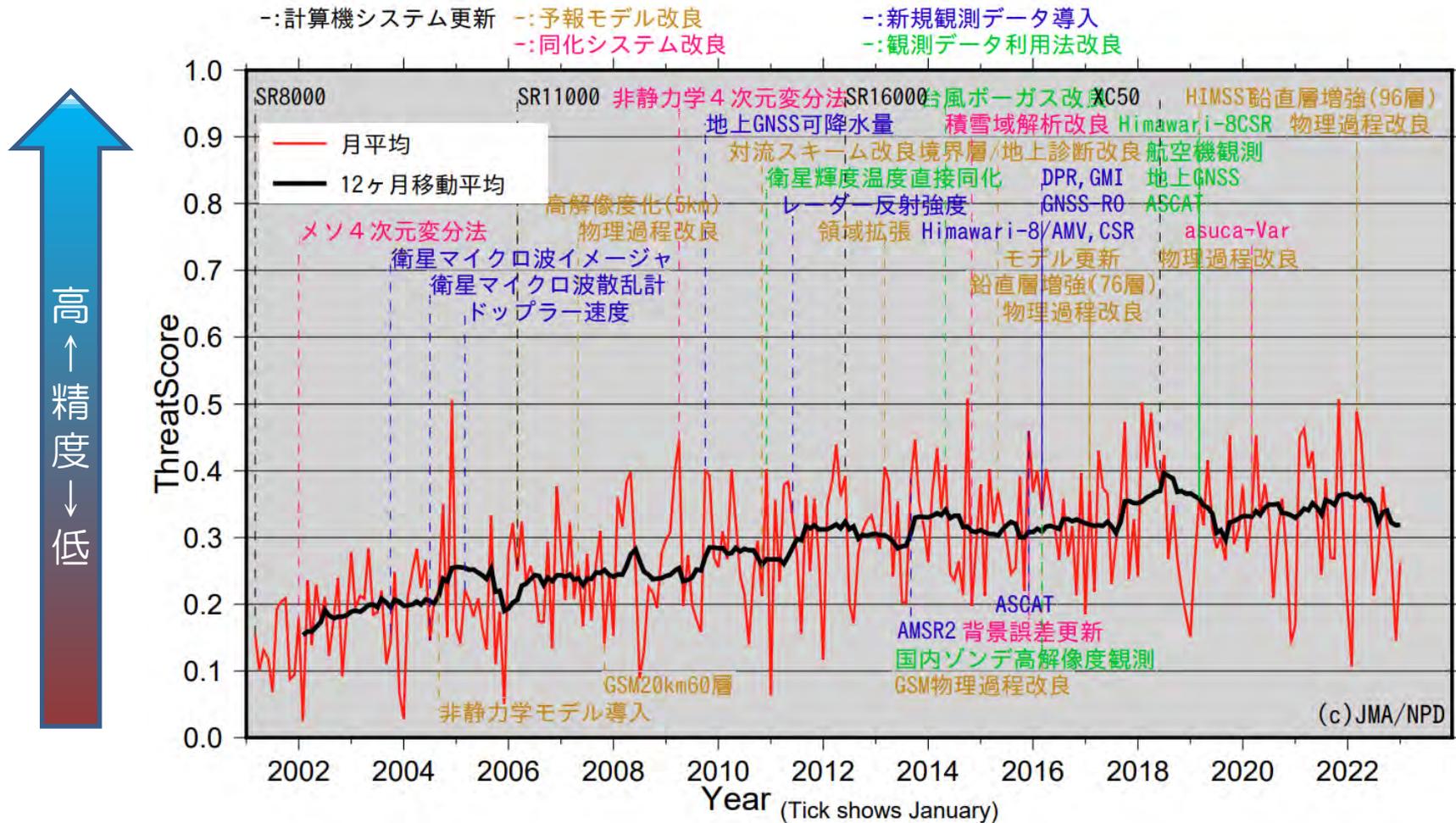
新たな観測データの活用や数値予報モデルの改良等の継続的な技術開発、及びこれらを支えるスーパーコンピュータの性能向上により、予測精度は着実に向上

点線は  
2.5度格子で  
検証した旧検証。

実線はWMOで  
仕様を統一し  
1.5度格子で  
検証した新検証。

# メソモデルの精度向上

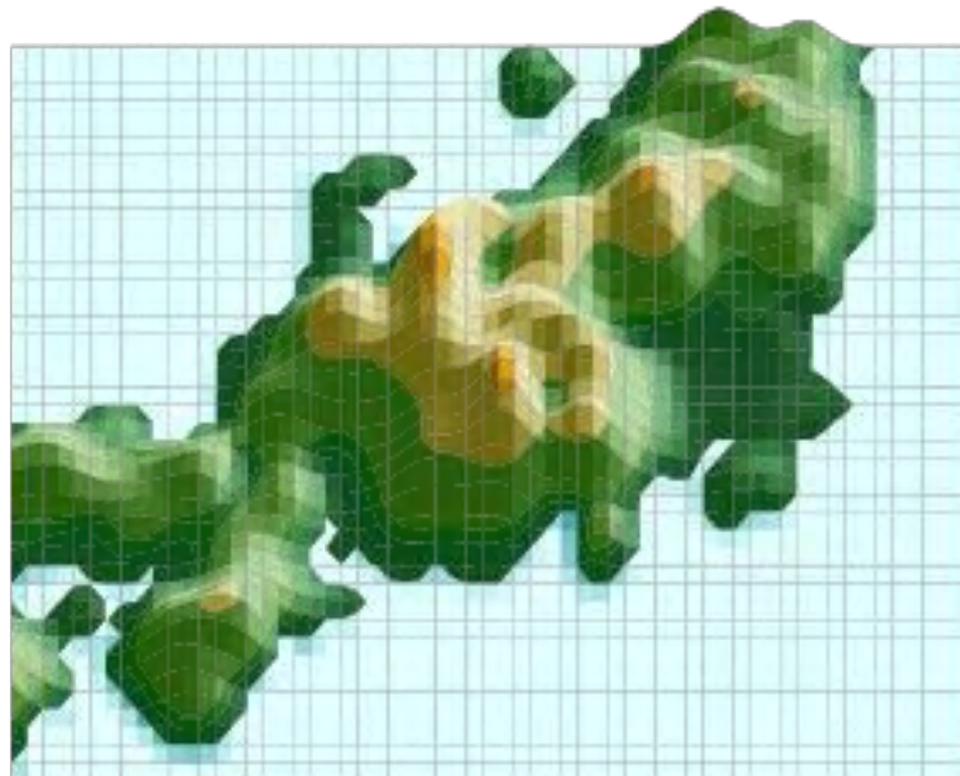
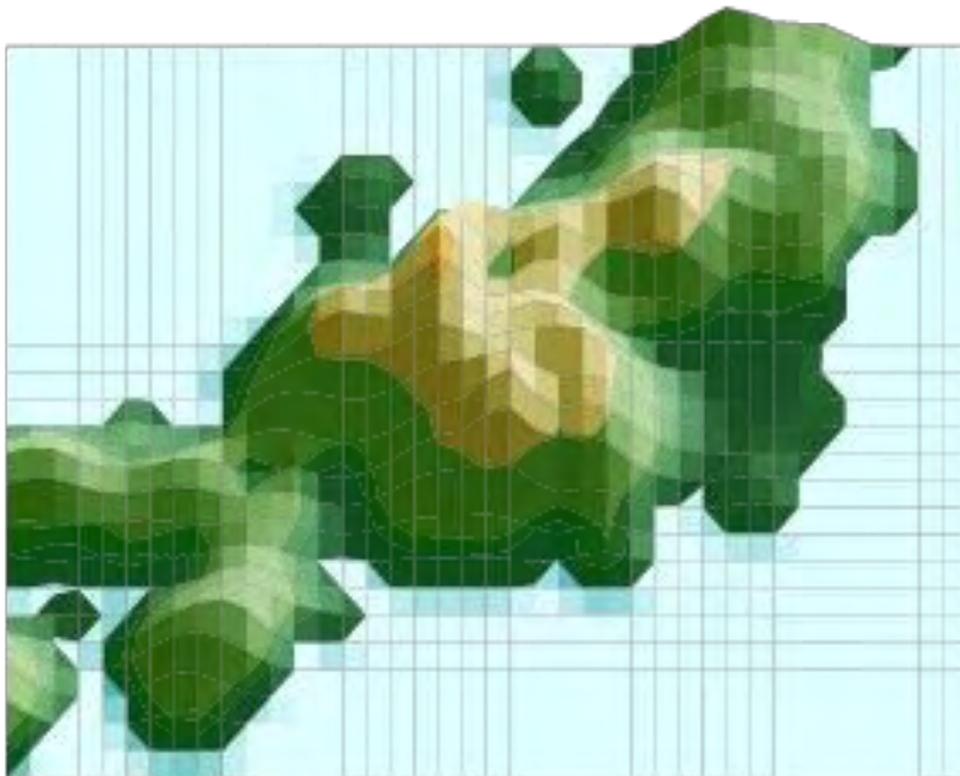
予報時間03~15時間の3時間毎の降水量予測に対する平均スコア  
(閾値10mm/3h, 検証格子20km, 2001年3月~2023年1月)



# 2023年3月の全球モデルの改良

改良前：約20km(TI959)

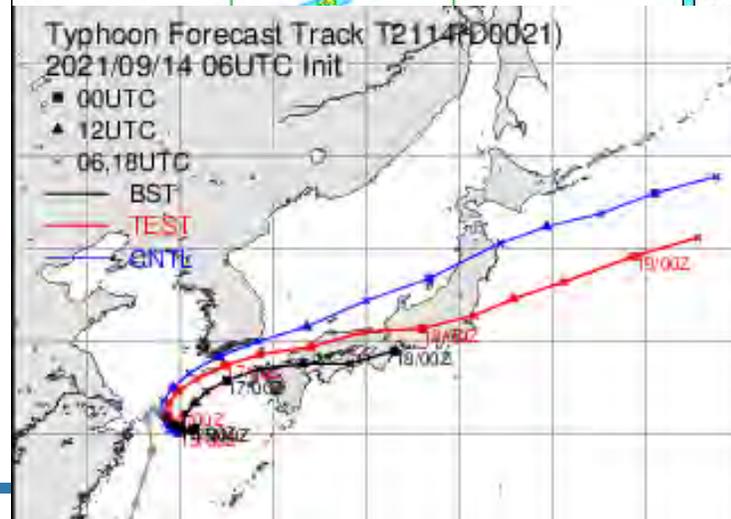
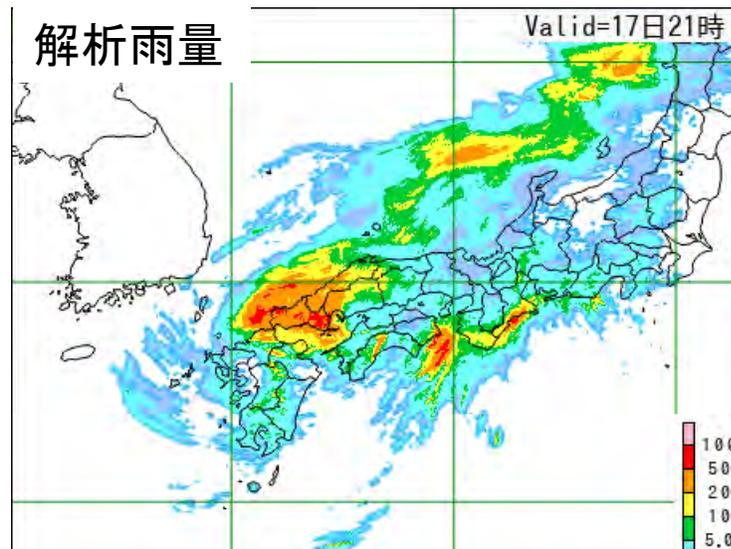
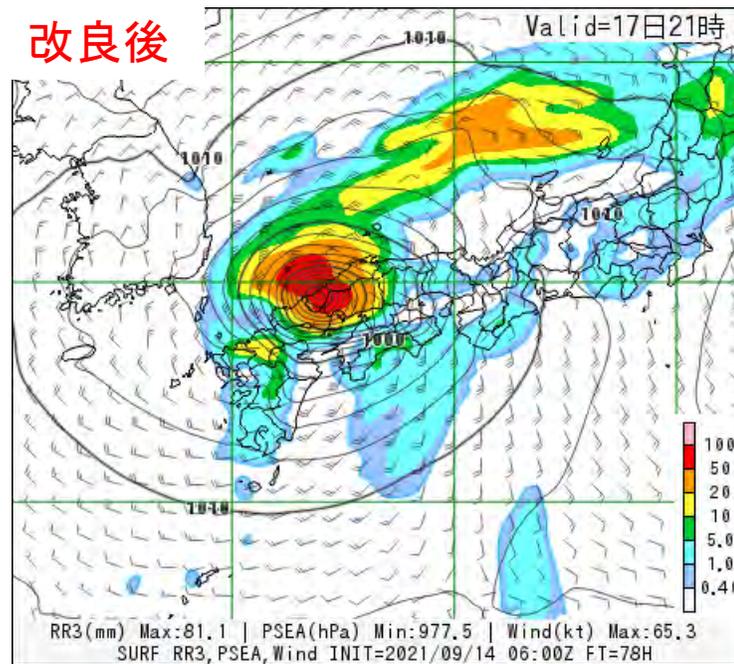
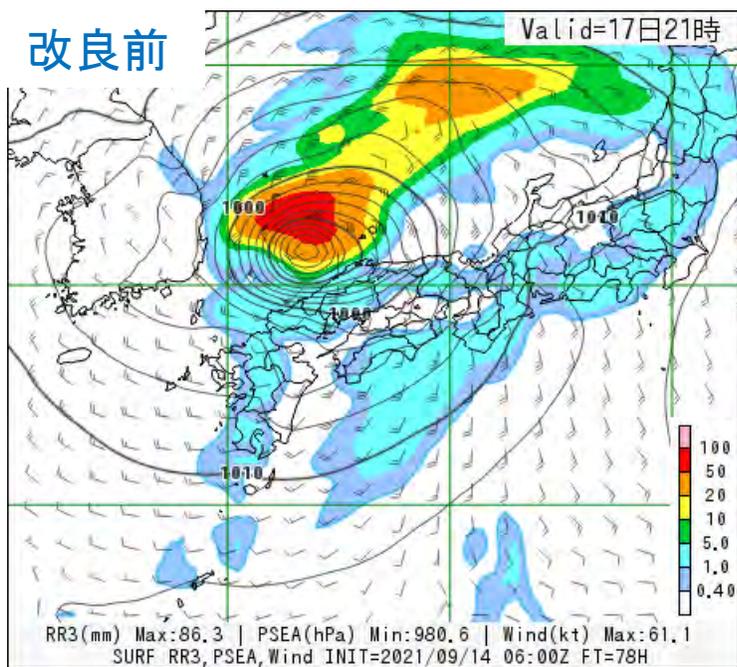
改良後：約13km(Tq959)



- 全球モデルの水平解像度を約20kmから約13kmに高解像度化
- 湾や半島など細かい地形が、よりはっきり表現されるようになる
- 標高オリジナルデータセットをGTOPO30からより高品質なMERIT DEM+RAMP2に変更

# 台風進路予測改善に伴う降水予測の改善

令和3年台風第14号の予測事例（2021年9月17日21時を対象とした78時間予測）の3時間降水量（カラー）と海面更正気圧[hPa]（等値線）



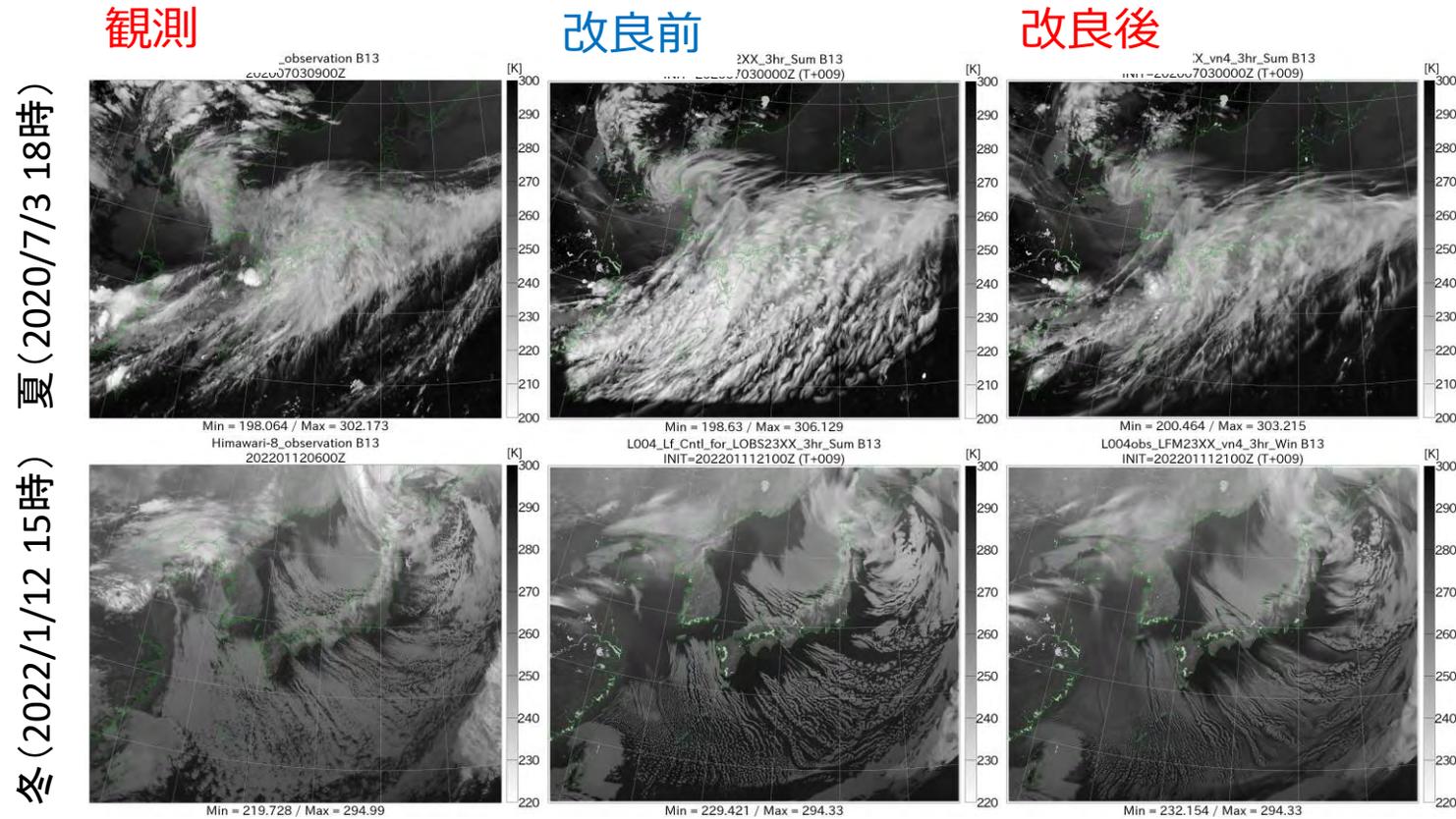
2021年9月14日06UTC初期値の台風進路予測

青：改良前、赤：改良後、黒：気象庁ベストトラック

高解像度化等に伴う上層のジェットの実態の改善（図略）により転向後の台風進路予測が改善。台風進路予測の改善により台風に伴う降水予測も改善

# 2023年3月の局地モデルの改良

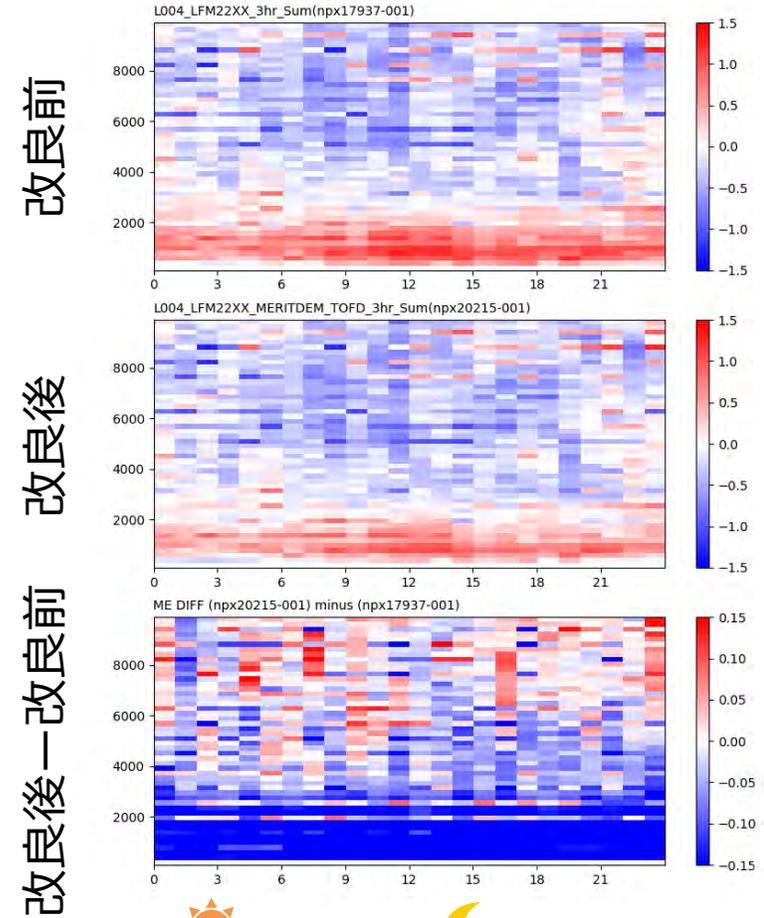
- 2020年、メソモデルの雲物理を改良したことにより、上層雲の過剰バイアスが軽減
- 2023年3月に上記の改良を局地モデルにも適用
- この改良により、夏季の日射量に見られる負バイアスが大幅に軽減した



Himawari-8/AHI B13  
輝度温度 (T+9)

# 2023年3月の局地モデルの改良

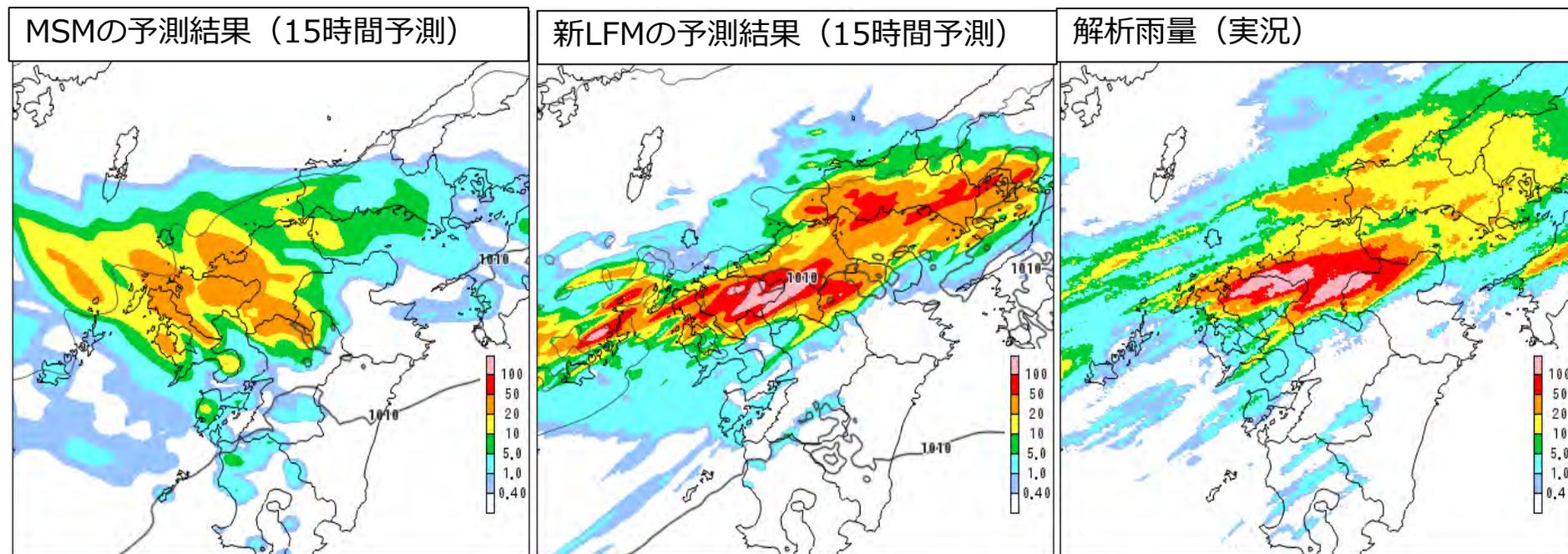
- 地上から下層にかけて強風バイアスがあることが確認されている
- 2023年3月に格子内スケールの地形による抵抗の効果(TOFD)を考慮する改良を行った
  - あわせて、標高オリジナルデータセットを全球モデルと同様により高品質なMERIT DEMに変更
- この改良により、地上から下層の強風バイアスが軽減された
- メソモデルにも同様のバイアスがあり、今後の課題



夏季の風速の対ウインドプロファイラ検証  
対象時刻別 (UTC)

# 2024年3月の局地モデルの改良

- 2024年3月5日（明日！）に改良した局地モデルを予測時間を10時間から最大18時間に延長して運用開始
- 2026年に局地モデルの水平解像度を1kmに高解像化、局地アンサンブル予報システムの運用開始を予定



# 気象庁第3次長期再解析(JRA-3Q)

- 長期間にわたる高品質で均質なデータセットを提供するため、1947年9月から現在までを対象とした気象庁第3次長期再解析(JRA-3Q)を実施中
  - 気候研究や季節予報、異常気象分析、気候監視をはじめ、再生可能エネルギー立地条件調査等への活用が期待される
- JRA-3Qデータは2023年より民間気象業務支援センターや文部科学省のデータ統合・解析システム(DIAS)等を通じて国内外に広く提供
  - DIAS等データ提供協力機関から提供されるデータは非商用利用に限定(CC-BY-NC-SA 4.0)
- 詳しくは、[https://jra.kishou.go.jp/JRA-3Q/index\\_ja.html](https://jra.kishou.go.jp/JRA-3Q/index_ja.html)

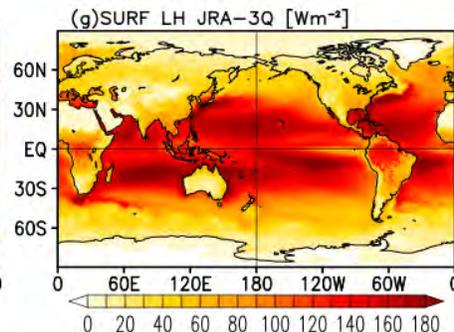
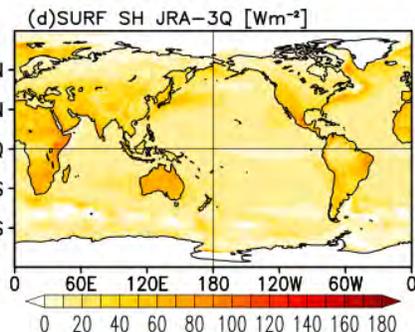
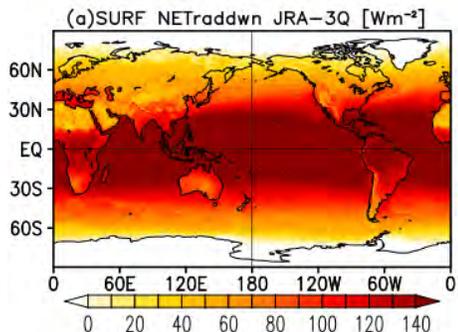
# 地表面エネルギー収支

Radiative net heat fluxes

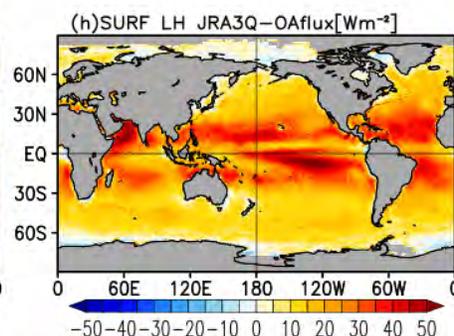
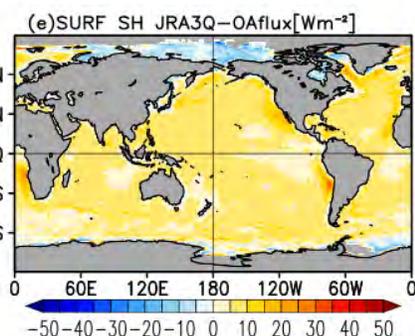
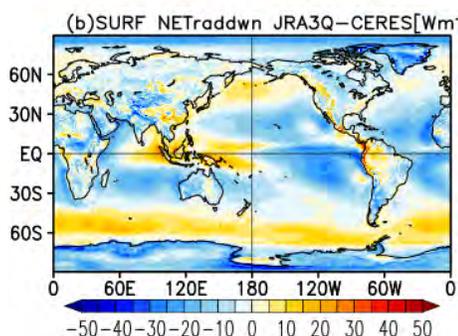
Sensible heat fluxes

Latent heat fluxes

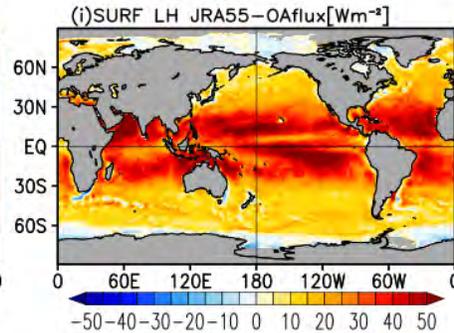
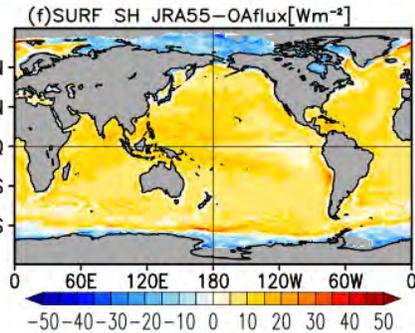
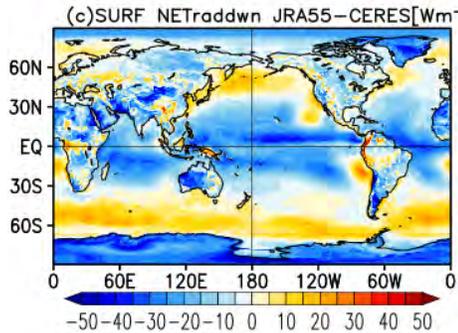
JRA-3Q



JRA-3Q - CERES



JRA-55 - CERES



- 図は2002年から2008年までの平均
- 衛星観測との比較において気象庁第2次長期再解析(JRA-55)よりもバイアスが縮小
- 雲放射スキームの改良等物理過程が改良されたことがバイアス縮小に寄与
- 裸地のアルベドを更新したことも放射収支の改善に寄与

Kosaka et al. (2024), JSMJ, doi:10.2151/jmsj.2024-004

# まとめ

- 気象庁では利用目的に応じて数値予報モデルを日々運用しており、格子点プロダクトを配信
- 日射量予測の観点からは、
  - 晴天放射の精度はGSM, MSMともに高いことが分かっている
  - 系統誤差を減らすには、直接的には雲量のバイアスや雲放射の改良が求められる
- MSM, LFMでは地上から下層にかけて強風バイアス
  - LFMでは地形性抵抗の効果の導入で改善した
- ランダム誤差軽減には、気象場のより正確な予測が重要で、他のプロセスも含めた総合的な改良が必須

# より詳しい情報は

- 数値予報解説資料集（数値予報モデルの一般向け解説）
  - <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/nwpkaisetu/nwpkaisetu.html>
- 数値予報開発センター年報（より専門的な情報）
  - [https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/npdc/npdc\\_annual\\_report.html](https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/npdc/npdc_annual_report.html)
- 気象庁情報カタログ（提供している情報の一覧）
  - <https://www.data.jma.go.jp/suishin/catalogue/catalogue.html>