



## 第2章 応用編

### 2.1 全球数値予報システムの改良

# 変更の概要1

- 水平高解像度化、モデル標高の改良
  - 約20kmから約13kmへ高解像度化、モデル標高をより精緻化
- 物理過程改良
  - 非地形性重力波過程、境界層過程の改良
    - 射出フラックスの緯度依存性を高度化、安定時の鉛直拡散係数を調整
  - 地形性抵抗過程の調整
    - 地形性重力波抵抗の調整、地形性乱流形状抵抗の調整
  - 雲放射過程の改良
    - 氷雲有効サイズ診断式の見直し



本節では、2023年3月の全球モデル(GSM: Global Spectral Model)の改良について述べる。

GSMの水平解像度を、約20kmから約13kmに高解像度化するとともに、高解像度化に合わせたモデル改良を実施した。

## 変更の概要2

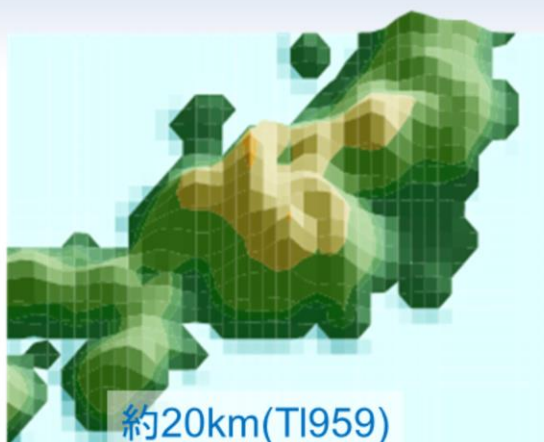
- 湖面の取り扱い高度化
  - 海と湖の区別を導入し、湖面温度の算出に衛星観測データを利用
- 積雪深解析の高度化
  - 高解像度化に加えて解析を1日1回から1日4回に高頻度化
- 全球解析において衛星観測データ利用の拡充(2.4節参照)
- 全球アンサンブル予報システム(GEPS)においても予報モデルにGSM2303を適用

また、積雪深解析の高解像度化、高頻度化を実施した。なお、積雪深解析の結果は、日本域については従来よりアメダス観測値を空間内挿した値で置き換えたのちGSMの初期値として利用されており、当該処理に変更はない。

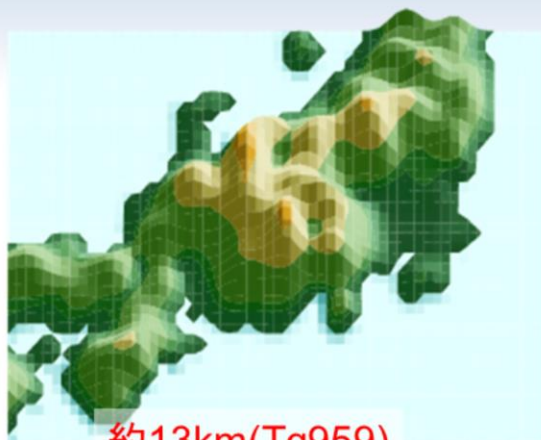
GEPSに利用される数値予報モデルは基本的に低解像度版のGSMであり、2023年3月の改良時にはGSMの物理過程の改良が同時に反映された。また同時に2段階SST法で利用する季節アンサンブル予報システムによる予測海面水温の適用領域を、熱帯・亜熱帯域から全球域に拡大した。

GSMIにはバージョン名がつけられており、変更に伴い改訂されている。バージョン名の形式は、全球数値予報システムに改良を導入した西暦の下二桁と月を「GSM」の後ろにつけたもので、今回の2023年3月に導入されたGSMのバージョン名は「GSM2303」、GEPSのバージョン名は「GEPS2303」である。GSM2303の詳細については数値予報開発センター(2022a, 2023a)、GEPS2303の詳細については数値予報開発センター(2022b, 2023b)を参照のこと。

# 水平高解像度化、モデル標高の改良



約20km(TL959)



約13km(Tq959)

- 東西格子数(最大)は1920⇒2880
- 全水平格子点数は1,315,520⇒2,969,984 (x鉛直128層)
- 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
- 東京湾、大阪湾、房総半島、能登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。

- GSMの水平解像度をTL959(約20km)からTQ959(約13km)へ高解像度化
  - 2次格子を採用することで、切断波数を変えずに解像度を(実効的に)向上
  - 2次項由来のエリアシングの完全な解消、その他非線形項のエリアシングの軽減によるノイズの減少
- モデル標高の改良
  - 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
  - 高解像度化によるエイリアシング軽減に伴い、地形フィルターを弱めることでモデル標高を精緻化
    - 前線近傍での降水やシアー、地形の影響による降水等の表現が向上

改良前(左)と改良後(右)の東日本付近のモデル地形の変化。標高オリジナルデータセットは改良前はGTOPO30(米国地質調査所作成)、改良後はMERIT DEM (Yamazaki et al., 2017)+RAMP2(米国雪氷データセンター配布)。

なお、GSMの解像度の変遷は約110km('89-'96)、約55km('96-07)、約20km('07-'23)、約13km('23-)となっており、高解像度化は実におよそ15年ぶりである。

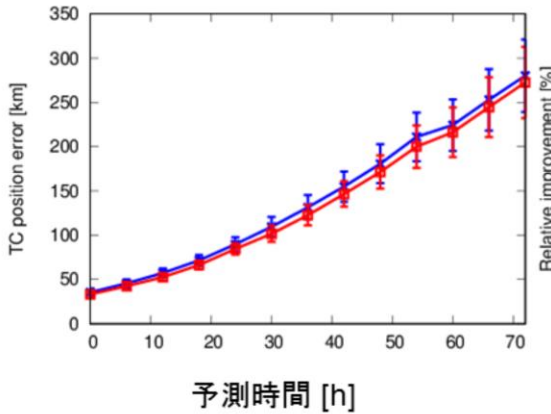
## 改良のインパクト

- これまでより細かい地形等の地域特性が精緻に表現され、より小スケールの現象の表現能力が向上し、地形性降水や前線に伴う降水などが、よりシャープな予測となる事例が多く見られる。
- 主要なスコアについては、概ね中立から改善
  - 500hPa 高度などの総観規模の予測精度が向上
  - 台風進路予測は、GSMでは3日予報(72時間先)までで平均約6%の改善
  - 夏季を中心に降水スコアが改善
  - 夏季、冬季とも地上気温の低温バイアスや予測誤差が改善
- 系統誤差の特性には変化は生じていない
  - 誤差パターンは同じでその大きさが各事例で少しずつ小さくなる
  - プロダクト利用上の注意点について、これまでから大きな変更なし
  - ガイドランスの予報の精度、特性の変化は概ね小さい

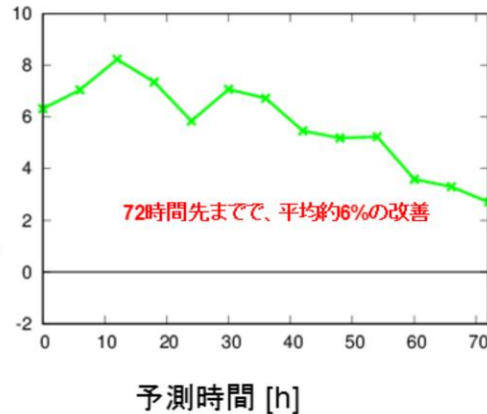
# 台風進路予測の改善

- 統計的検証で見ても進路予測誤差は改善する。台風別に見ても、改善する事例が多く、特に進路予測誤差が大きかった令和3年台風第6, 14, 19号での改善が目立つ

GSMの台風進路予測平均<sup>※</sup>誤差 [km] 青:改良前、赤:改良後



GSMの台風進路予測平均誤差の改善率 [%]



※・・・ 2020年11月20日00UTC～2021年3月11日18UTC、2021年6月20日00UTC～2021年10月11日18UTC(初期値)の統計

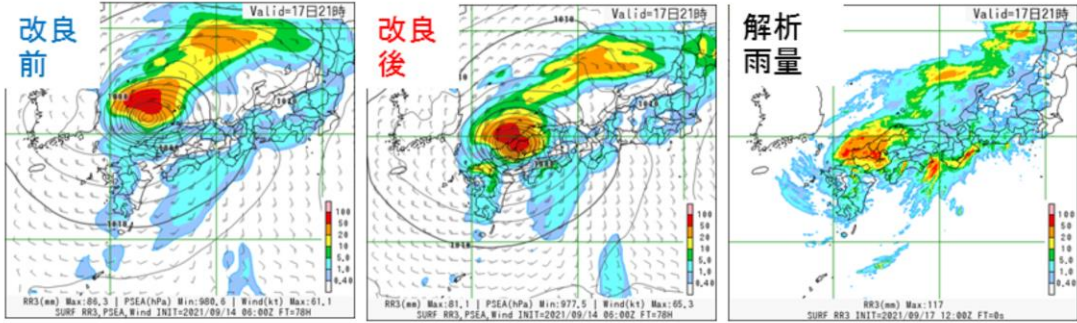


令和3年台風第5号～第22号までの変更前(青線)および変更後(赤線)の台風進路予測誤差(左、単位はkm)と、その変更前後の改善率(右、単位は%)。改善率は平均誤差について(変更前-変更後)/(変更前) x100で定義。エラーバーは95%信頼区間を表す。改善率の正の値は、変更後で予測誤差が改善していることを示す。横軸は予測時間 (h)。

GSM2303の低解像度版を予報モデルとするGEPSにおいては改良の前後で概ね中立だが、予報4~5日目では若干の改善傾向が見られた。(図略)

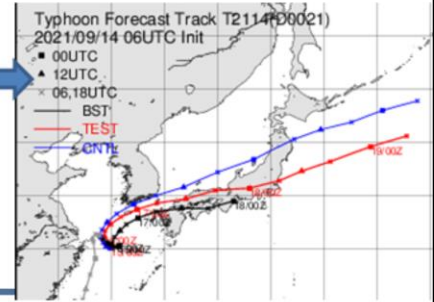
# 台風進路予測改善に伴う降水予測の改善例

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

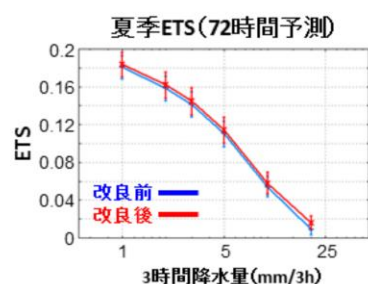
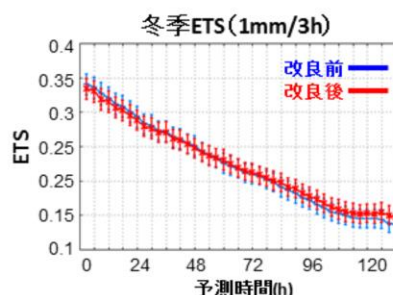
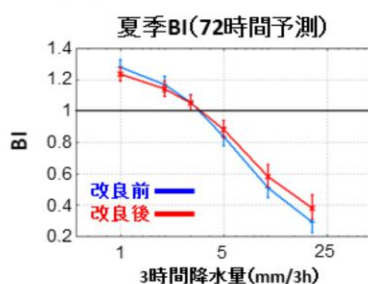
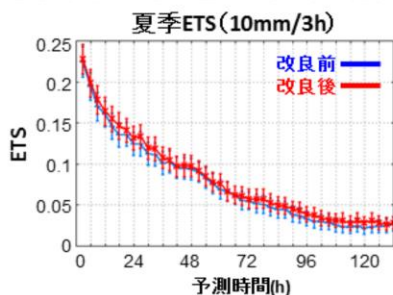
高解像度化等に伴う上層のジェット表現の改善(図略)により転向後の台風進路予測が改善。台風進路予測の改善により台風に伴う降水予測も改善



これは令和3年台風第14号の事例であり、高解像度化等に伴う上層のジェットの表現の改善(図略)により転向後の台風進路予測が改善した(右下図)。台風進路予測の改善により台風に伴う降水予測も改善した(上図:左から改良前、改良後、解析雨量)。

# 降水スコア

- 夏季を中心に降水スコアが改善。
- 夏季の降水スコアは、改良後はETSが増加し、BIも1に近づいている。10mm/3h以上の降水に対して概ね改善が見られた。
- 冬季は予報後半で改善傾向（予報前半ではやや悪化）。



夏季（左上、2021年7月～2021年9月）および冬季（左下、2021年12月～2022年2月）における改良前（青）と改良後（赤）の解析雨量に対する降水予測のエクイタブルスレットスコア（ETS）。横軸は予測時間（h）。夏季を中心に降水スコアが改善。冬季は予報後半で改善傾向（予報前半ではやや悪化）。

夏季（2021年7月～2021年9月）における改良前（青）と改良後（赤）の解析雨量に対する3日予報（72時間先）の降水予測のバイアススコア（BI、右上）とエクイタブルスレットスコア（ETS、右下）。横軸は3時間降水量（mm/3h）。夏季の降水スコアは、改良後はETSが増加し、BIも1に近づいている。10mm/3h以上の降水に対して概ね改善が見られた。

BI: 実況の「現象あり」の事例数に対する予測の事例数の割合を示し、BI>1は予測の頻度が過大、BI<1は過小であることを意味する。

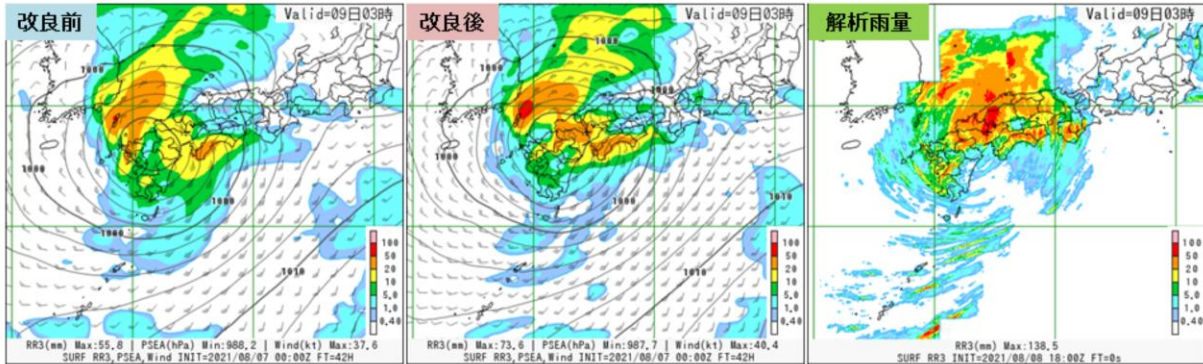
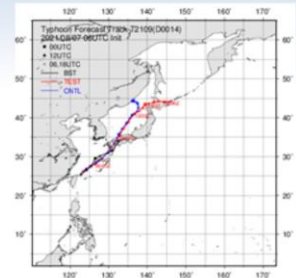
ETS: 予測が的中した割合を示し、最大値の1に近づくほど予測精度が高いことを意味する。



# 降水予測の改善例

## 令和3年台風第9号(2021年8月9日3時)

- 台風進路予測は大きく変わらなかったが、降水予測が改善した事例。
- 実況では鹿児島県に上陸後、広島県に再上陸。改良前、改良後のGSMはともに実況に近い進路予測となっていた。
- 改良後のGSMでは台風周辺の降水をより強める予測になり、降水表現の改善が見られる。



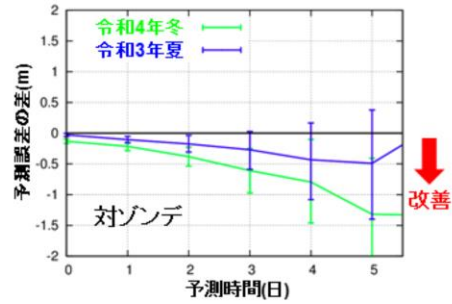
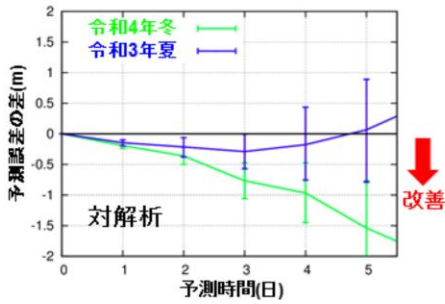
2021年8月9日3時を対象とした3時間降水量(塗りつぶし、単位はmm/3h)、海面更正気圧(等値線、単位はhPa)の改良前(左)と改良後(中)のGSMの予測値と3時間降水量(塗りつぶし)の解析雨量。GSMは2021年8月7日00UTC初期値の42時間予測。



右上図は令和3年台風第9号の進路の改良前（青）及び改良後（赤）のGSMの2021年8月7日06UTC初期値からの予測、実況（黒、ベストトラック）。

# 北半球Z500の予測誤差の改良前後の差

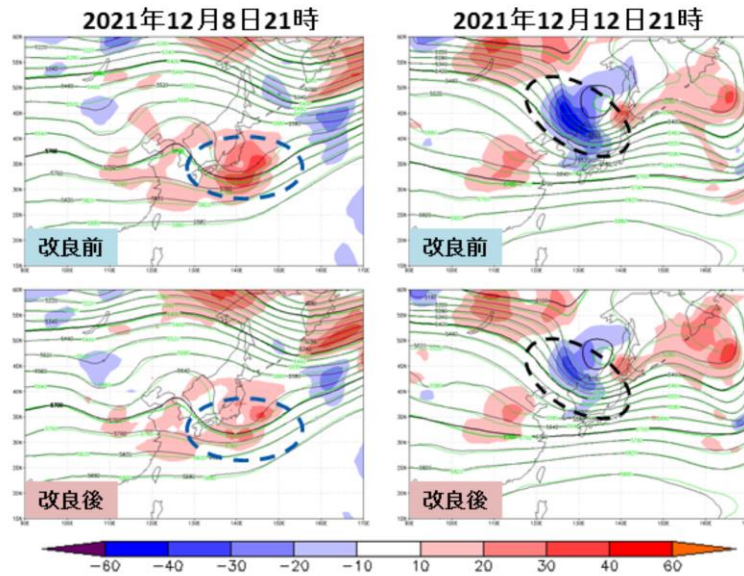
- 5日予報(120時間先)まで改善で、改善幅も大きめ(2日予報(48時間先)で約0.3m)。



北半球(20~90°N)500hPa高度予測誤差の改善量(改良後-改良前、単位はm)。解析値(左)とゾンデ観測(右)に対する誤差。夏季(青、2021年7月~9月)と冬季(緑、2021年12月~2022年2月)の検証結果。

# 500hPa高度予測の改善例

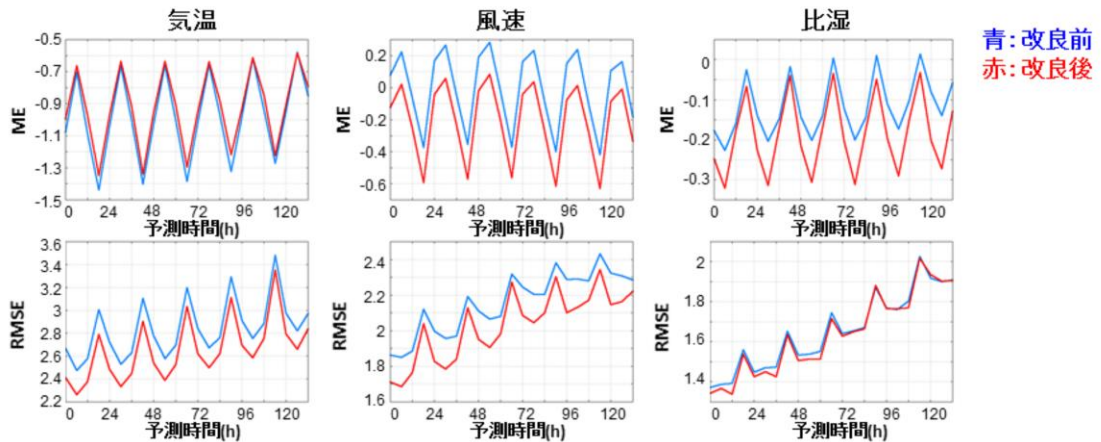
- 事例で見ても誤差傾向は改良前後で変わらず、誤差が縮小して改善する事例が多く見られる。
- 大陸側でトラフが深すぎる誤差が縮小し、トラフの予測に改善が見られる(右の黒丸付近)。
- 日本を通過後のトラフで浅い誤差が縮小し、改善する事例も見られる(左の青丸付近)。



2021年12月8日21時(左)と2021年12月12日21時(右)の500hPa高度の解析値(等値線、緑)と2日予報(48時間先)の予測値(等値線、黒)及びその差分(塗りつぶし)。上段が改良前、下段が改良後。

# 地上予測要素

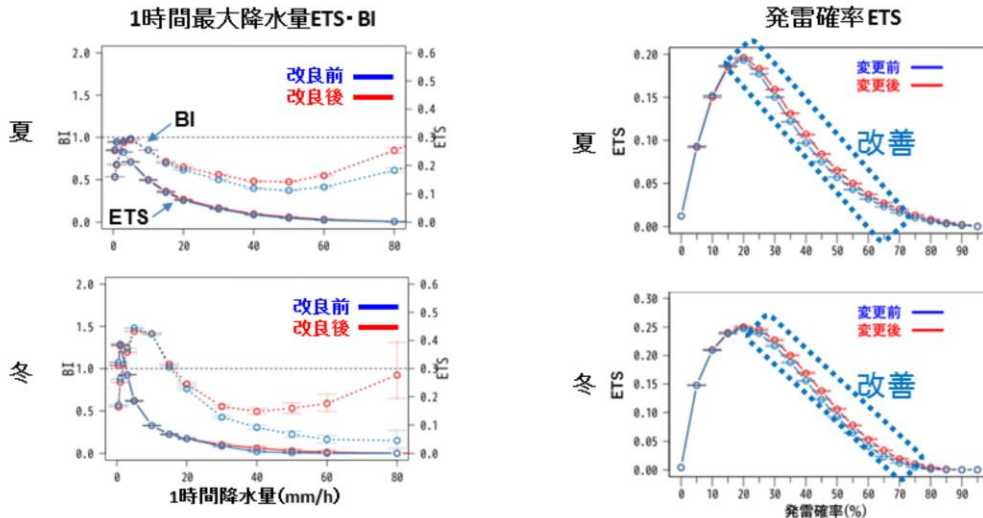
- 地上予測要素(図は夏季の対日本域SYNOPのMEとRMSE)
  - 気温はMEが小さくなり、RMSEも改善(冬季も同様、図略)。
  - 風と比湿はややバイアスは悪化した、RMSEは改善(冬季はMEも改善、図略)。



夏季(2021年7月~2021年9月)における地上気温(左、単位はK)、地上風速(中、単位はm/s)、地上比湿(右、単位はg/kg)の改良前(青)と改良後(赤)の対日本域SYNOPのME(上段)及びRMSE(下段)。横軸は予報時間(h)。

# GSM ガイダンスへの影響

- GSMの高解像度化を含む改良に伴う、GSM ガイダンスの仕様変更はない。
- 予測の精度と特性の変化は概ね小さい。
  - GSM降水量ガイダンスは概ね中立で、強雨ではBIが増加(図は1時間最大降水量のスコア)。
  - GSM発雷確率ガイダンスでは改善が見られた。



夏季(左上、2021年7月~9月)及び冬季(左下、2021年12月~2022年2月)におけるGSM改良前(青線)およびGSM改良後(赤線)のGSM1時間最大降水量ガイダンスのエクイタブルスレットスコア(ETS)とバイアスコア(BI)。予測時間は6時間から84時間。横軸は1時間降水量(単位はmm/h)。

夏季(右上、2021年7月~9月)及び冬季(右下、2021年12月~2022年2月)におけるGSM改良前(青線)およびGSM改良後(赤線)のGSM発雷確率ガイダンスのエクイタブルスレットスコア(ETS)。予測時間は6時間から84時間。横軸は発雷確率(単位は%)。

# 参考文献

- 数値予報開発センター, **2022a**: 全球モデルの水平解像度向上、物理過程改良に向けた開発, 数値予報開発センター年報(令和3年), 気象庁数値予報開発センター, **66-75**.
- 数値予報開発センター, **2022b**: 全球アンサンブル予報システムの改良, 数値予報開発センター年報(令和3年), **84-91**.
- 数値予報開発センター, **2023a**: 全球モデルの物理過程改良, 数値予報開発センター年報(令和4年), 気象庁数値予報開発センター, **62-70**.
- 数値予報開発センター, **2023b**: 全球アンサンブル予報システムの改良, 数値予報開発センター年報(令和4年), **71-74**.
- Yamazaki D., D. Ikeshima, R. Tawatari, T. Yamaguchi, F. O'Loughlin, JC Neal, CC Sampson, S. Kanae & PD Bates A, 2017: high accuracy map of global Terrain Heights Geophysical Research Letters, vol .44, pp.5844-5853, 2017 doi: 10.1002/2017GL072874