

## 第4章 数値予報システムの開発進捗

### 4.1 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

#### 4.1.1 はじめに

気象庁では、全球数値予報システムの予測精度向上に向けた開発を計画的に進めてきており、第10世代スーパーコンピュータシステムにおいても全球モデル(GSM)の鉛直、水平解像度の増強を計画している(本田 2018)。第3.2.1項で示したとおり、2020年度(令和2年度)末の全球数値予報システムの更新において、GSMの鉛直層を100層から128層へ増強した。次期(令和4年度末予定)のGSMの更新では、水平解像度の20 kmから13 kmへの高分解能化を計画しており、現在開発を進めている。

数値予報モデルの水平解像度向上では、前線、細かい地形に伴う降水等の現象の表現向上を通じた全般的な予測精度向上を期待する。また、平成30年に気象庁が策定した「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」においても、台風防災への貢献に向けた開発の方向性として、GSMの水平解像度10 km以下への高分解能化を挙げている。次期のGSM更新における水平解像度の20 kmから13 kmへの向上は、2030年に向けたGSMの高度化に向けたステップという意味も持つ。

天気予報や台風予報の予測精度向上には、数値予報モデルの高分解能化に加え、物理過程の改良による系統誤差の軽減も重要になる。次期GSM更新における物理過程改良では、過去のGSM更新時に課題として残った部分への対応や、新しい季節予報システム(Japan Meteorological Agency / Meteorological Research Institute-Coupled Prediction System 3: CPS3, 第4.11.1項)及び気象研究所の開発成果取り込みによる系統誤差減少も狙う。近年のGSMの物理過程改良(GSM1212-GSM1705: 米原 2019; GSM2003: 気象庁 2021a)では、多くの要素で系統誤差が減少した反面、逆に誤差が拡大した要素もいくつか存在する。例えば、GSM2003では、地形性抵抗過程の改良により対流圏の循環場の予測精度が大幅に向上した反面、下部成層圏における気温や風の系統誤差拡大や、第一推定値とマイクロ波気温サウンダ観測との整合性悪化が課題として残った。また、令和3年度末に導入予定のCPS3の大気モデルはGSM2003をベースに季節予測精度向上のための物理過程の改良が加えられており、CPS3の系統誤差減少に寄与した。大気モデルの維持管理及びGSM・CPS間の開発成果の相互活用を効率的に行う上で、予測対象や時間スケールに依存しない部分については可能な限りGSM・CPSで仕様を共通化することが望ましい。

本節では、全球数値予報システムの水平解像度向上及び物理過程改良に向けた開発状況について報告する。

物理過程の開発においては、GSM2003からの追加改良としての地形性抵抗過程の改善について示すほか、CPS3の開発成果の活用としての湖の扱いの改良とオゾン気候値の更新、気象研究所の開発成果である放射過程における雲水有効サイズ診断式改良について示す。特に、それぞれの開発において、力学過程改良では実効解像度の向上、物理過程改良ではGSMに見られる風や気温等の系統誤差軽減の効果が得られたことについて示す。また、最後に力学過程と物理過程の改良を組み合わせした場合での、台風及びそれに伴う降水事例へのインパクト等について示す。本節の以下では、現在の解像度、次期更新で計画している解像度でのGSMをそれぞれ「20 km GSM」「13 km GSM」と呼ぶ。

#### 4.1.2 全球モデルの水平高解像度化に向けた力学過程の開発

現在のGSMや各国の数値予報センターの全球モデルの水平解像度は、20 km~10 km程度と総観規模の現象を十分解像可能なものとなっている。この中で、更なる水平高解像度化による予測精度向上を得るためには、格子数や切断波数を増強することに加え、信頼可能スケール(エイリアシング<sup>1</sup>、フィルター処理、離散化誤差のいずれにも大きく影響されない空間スケール)をより高波数域まで拡大させ、実効解像度を向上させることが重要である。13 km GSMに向けた力学過程の開発では、実効解像度の向上を念頭に置いた。

##### (1) 実効解像度を向上させるための変更 格子次数の見直し(1次格子→2次格子)

スペクトルモデルにおいて、切断波数 $N$ で表現した変数についての $m$ 次の非線形項をエイリアシングなしに表現するには、格子点数 $L$ は、 $L > (m+1)N$ を満たす必要がある。このような条件を満たす格子を $m$ 次格子と呼ぶ。移流項の計算にセミラグランジュ法を用いるGSMでは、現在、水平格子系として1次格子を採用している。これは、セミラグランジュ法では主要な非線形項である移流項を陽に評価する必要がないことに由来する(Côté and Staniforth 1988)。一方で、高解像度化に伴い移流項以外の非線形項(気圧傾度力項、物理過程等)に伴うエイリアシングが顕在化し、1次格子のままの高解像度化では、実効解像度の向上が困難となることが近年指摘されるようになった(Wedi 2014; Malardel et al. 2016など)。現在のGSMでも、エイリアシングの問題(スペクトラルブロッキング等)が存在しており、実効解像度向上や計算安定性上の課

<sup>1</sup> 高波数の波を少ない格子点数でサンプリングした際に、本来高波数成分であるものが低波数成分として「化けて」出てくる現象でノイズやスペクトラルブロッキングの原因となる。エイリアシングとスペクトラルブロッキングの関係の解説については氏家ほか(2019)を参照。

題となっている (Ujii and Hotta 2019)。

13 kmGSM では非線形項に伴うエイリアシングの軽減のため、水平格子系を 1 次格子から 2 次格子に変更する。この際、切断波数は現在の 959 のまま固定とする。本変更により、東西格子数 (赤道付近)・南北格子数はそれぞれ 1.5 倍になり、水平格子間隔は約 13km とする (表 4.1.1)。以下では、1 次格子、2 次格子による波数切断を表す場合、切断波数を xxx として、それぞれ "TLxxx"、"TQxxx" と表記する<sup>2</sup>。

#### モデル標高作成におけるフィルター・数値拡散の調整

GSM では、計算安定性向上やエイリアシング、ギブス現象の抑制を目的として、モデル標高 (平均標高) の平滑化や予報変数に対するフィルター処理 (数値拡散) を施している。13 km GSM では、2 次格子化によりエイリアシングが軽減されることを踏まえ、実効解像度の向上のため、中高波数成分の減衰を弱めるようにこれらフィルターや数値拡散を調整する。モデル標高については、元の標高データセットからモデル格子への変換手法と、変換後作用させるフィルターの 2 点について変更を行う。現在の GSM のモデル標高は、米国地質調査所が作成した全球 1km 格子の地形データセットである GTOPO30 をモデル格子に面積積み付けで内挿した後、フィルターとして波数空間において全波数  $n$  成分について以下の係数をかけることで高波数成分を減衰させている。

$$f(n) = \exp \left( \log(df) \left( \frac{n(n+1)}{N(N+1)} \right)^2 \right) \quad (4.1.1)$$

$$df = 0.1 \quad (4.1.2)$$

ここで、 $df$  は減衰の大きさを表す係数 ( $df < 1$ ) である。また、 $N$  は切断波数である。Elvidge et al. (2019) によるモデル標高の相互比較では、GSM のモデル標高に適用されるこのフィルターは、相互比較に参加した機関のモデルの中ではフィルターによる減衰は小さい部類に含まれるものの、ECMWF の全球モデルである IFS で適用される手法に比べると中高波数域での減衰が強いことが示されている。また、GSM のモデル標高作成手法では、モデル格子への内挿に伴う平滑化が入る分の減衰も含まれる。現在のモデル標高のフィルターの設定は、計算安定性やエイリアシングの影響を考慮して経験的に決められたものであるが、2 次格子の導入によりエイリアシングが軽減されることで、モデル標高の高波数域でのフィルターをさらに弱めることが可能になる。13 km GSM では、これまでの手法よりも標高スペクトルをより保持できるよう、モデルよりも高解像度 (TL7999 相当) の適合ガウス格子に一度内挿したのち、波・格子変換によりモデル格子に変換するようにし、さらに波数空間上でのフィルターを

<sup>2</sup> それぞれ Linear, Quadratic の頭文字を取る

以下の通り変更し中高波数での減衰が小さくなるようにする。

$$f(n) = S_1(n)S_2(n) \quad (4.1.3)$$

$$S_1(n) = \frac{1}{1 + \lambda_1 \left( \frac{n(n+1)}{N(N+1)} \right)^2} \quad (4.1.4)$$

$$S_2(n) = \frac{1}{1 + \lambda_2 \left( \frac{n(n+1)}{N(N+1)} \right)^8} \quad (4.1.5)$$

$S_1, S_2$  はそれぞれ、中波数、切断波数域への寄与が大きいフィルターであり、両者の組み合わせによってモデル標高のフィルターを構成する。 $\lambda_1, \lambda_2$  は経験的に決めるパラメータであり、13 km GSM ではそれぞれ、 $\lambda_1 = 0.866, \lambda_2 = 4$  としている。これらの変更により、標高スペクトル計算時に混入する誤差 (内挿処理による高波数成分の減衰や、少ない格子でサンプルすることによるエイリアシング等) を軽減させることが可能になるほか、元データの特性を可能な限り保持した標高スペクトルを得ることができる。

数値拡散について、GSM では 4 次の水平拡散を数値拡散として、水平発散、相対渦度および仮温度に適用している (JMA 2019)。拡散係数の大きさは、GSM8911 (切断波数 106, 第 3.2 節) の運用開始時に経験的に決めた値を外挿して設定している<sup>3</sup>。13 km GSM では、中高波数成分の表現やギブス現象の有無、計算安定性のバランスを考慮して拡散係数を現行の半分とした。

#### (2) 変更のインパクト

20 km GSM と 13 km GSM では、スペクトル法における切断波数は 959 と同じであるが、13 km GSM では、切断波数付近のノイズの減少や中高波数域でのスペクトルの保持に伴う実効解像度の向上により、より小スケールの現象の表現能力が向上する。

2 次格子の導入は、エイリアシングに伴うノイズの減少に大きく貢献する。図 4.1.1 は、南米ペルー付近におけるモデル第 44 層目 (約 500 hPa) の相対渦度の分布を表している。1 次格子を採用している 20 kmGSM では、急峻な標高の周辺においてエイリアシングに伴う渦度のノイズが顕著に見られるが、2 次格子を採用している 13 km GSM ではこれらのノイズが大きく減少している。これは、標高の勾配が大きいところでは気圧傾度力の非線形性が大きくなる場所、高次格子の導入によりエイリアシングが軽減されるためである。

図 4.1.2 は日本の中部域におけるモデル標高の鳥瞰図を示す。13 km GSM では地形作成手法の改良により実効解像度が向上し、20 km GSM に比べて中部山岳の起伏や、東京湾、大阪湾、伊勢湾、房総半島、渥美半島、能登半島などがよりはっきり表現されるようになる。

<sup>3</sup> 切断波数が 106 の時に全波数 106 成分に対する時定数を 7.2 時間とするのを基準として、拡散係数が切断波数  $N$  の-2 乗に比例するようにしている。

表 4.1.1 20kmGSM(TL959), 13kmGSM(TQ959) の切断波数、東西、南北格子数、格子間隔。

	切断波数	東西格子数 (赤道付近)	南北格子数	格子間隔 (30°N 付近)	格子間隔 (赤道付近)
20kmGSM (TL959)	959	1920	960	19.244 km	20.849 km
13kmGSM (TQ959)	959	2880	1440	12.890 km	13.899 km

これら力学過程の改良は大気のエネルギースペクトルの改善という形で顕著に現れる。図 4.1.3 は、モデル面第 71 層目 (約 150hPa) における、東西風の運動エネルギー (回転成分、発散成分) 及び気温のスペクトルを示す。1 次格子を採用している 20 km GSM では、エイリアシングに伴うスペクトラルブロッキングに対応した切断波数付近でのスペクトルの反り上がりが特に渦度と気温で顕著である。一方、2 次格子を採用している 13 km GSM では、スペクトラルブロッキングはほぼ解消される。また、13 km GSM は全波数 200 以上成分でのスペクトルの振幅が 20 km GSM に比べて大きく、全波数 800 付近までは、1 次格子での 13 km 格子に相当する TL1439 で計算されたスペクトルの振幅とほぼ同等である。このことは、力学過程の改良によりこれまでと同じ切断波数で高い実効解像度向上を得られていることを示している。基底関数として球面調和関数を用いたスペクトル法では、スペクトル変換における計算コストは切断波数の 3 乗に比例する。切断波数を大きく取ることなく、実効解像度向上を得られていることは、計算コストを抑えつつ効率的に高解像度化されていることでもある。

#### 4.1.3 物理過程の改良：地形性抵抗過程の改良

GSM2003 では、Lott and Miller (1997) に基づくサブグリッド地形効果パラメタリゼーションと Beljaars et al. (2004) に基づく地形性乱流形状抵抗を導入した。この改良により、冬季に日本付近でトラフが浅いバイアスが軽減して北半球 500 hPa 高度を始めとした対流圏の予測精度が改善する効果を得た (気象庁 2021a)。一方で、下部成層圏における西風の弱風バイアスの拡大、上部成層圏における第一推定値と衛星観測データの整合性の悪化等成層圏の予測精度には課題が残った。これらの課題を解決するために、地形性重力波抵抗 (Gravity Wave Drag, 以下 GWD) 過程および地形性乱流形状抵抗 (Turbulent Orographic Form Drag, 以下 TOFD) のパラメタを見直した。

GWD による運動量フラックスの地表面での生成量  $\tau_{\text{sfc}}$  [Pa] は以下で表される。

$$\tau_{\text{sfc}} = \rho_l |\mathbf{u}_l| N_l \left( \frac{H_{\text{eff}}}{3} \right)^2 \frac{\sigma}{\mu} G(D1^2 + D2^2)^{1/2} \quad (4.1.6)$$

ここで、 $\rho$  は大気密度 [ $\text{kg m}^{-3}$ ]、 $\mathbf{u}$  は水平風ベクトル [ $\text{m/s}$ ]、 $N$  はプラント・バイサラ振動数 [ $\text{s}^{-1}$ ]、 $H_{\text{eff}}$

はサブグリッドスケールの地形の実効的な振幅 [m]、 $\sigma$  はサブグリッド地形の勾配 [ $\text{m m}^{-1}$ ]、 $\mu$  はサブグリッド地形の標準偏差 [m]、 $D1, D2$  は重力波の下層風向方向成分及び下層風向に直交する成分、 $G$  は山の形状を反映させた調整パラメタである。下付き文字の  $l$  は地表面からの高度が  $\mu$  から  $2\mu$  までの値で平均した値であることを表す。 $H_{\text{eff}}$  は、 $z_{\text{blk}}, n_{\text{eff}}$  をそれぞれブロック流抵抗を考慮する山の高さ [m]、調整パラメタとして、以下の式で表される。

$$H_{\text{eff}} = n_{\text{eff}} (3\mu - z_{\text{blk}}) \quad (4.1.7)$$

地表面で生成された運動量フラックスは上方に伝播するが、各高度における運動量の飽和フラックス  $\tau_{\text{sat}}$  [Pa] は飽和振幅  $H_{\text{sat}}$  [m] を用いて以下で表される。

$$\tau_{\text{sat}} = \rho |\mathbf{u}| N \left( \frac{H_{\text{sat}}}{3} \right)^2 \frac{\sigma}{\mu} G(D1^2 + D2^2)^{1/2} \quad (4.1.8)$$

飽和フラックスを超えた分の運動量フラックスは背景場に渡され、水平風の加速率に寄与する。 $\tau_{\text{sfc}}$  は調整パラメタである  $G$  と  $n_{\text{eff}}$  に、 $\tau_{\text{sat}}$  は  $G$  に比例する形で表される。GWD により水平風の加速率の大きさや鉛直プロファイルの特性はこれらのパラメタに依存する。

図 4.1.4 は、中東域で領域平均した GWD による東西風加速率の鉛直プロファイルの  $G, n_{\text{eff}}$  に対する感度を示したものである。黒線で示した GSM2003 での GWD のパラメタの場合、100 hPa 付近に東西風加速率の極小値 (西風の減速) が見られる。感度実験からは、GWD による加速率の鉛直プロファイルの特性は  $G, n_{\text{eff}}$  のパラメタへの依存性も大きく、 $G$  が大きく  $n_{\text{eff}}$  が小さくなるほど、より上層で振幅飽和に達して応力が分配されるようになるため、加速率のピーク高度が上がり、かつ、大きさが小さくなる様子が見られる。GSM2003 の GWD による東西風加速率が下部成層圏で強くそのピーク高度が他のモデルに比べて低い点は、地形性抵抗に関するモデル間相互比較 ("COORDE"<sup>4</sup> プロジェクト、Niekerk et al. 2020) でも指摘されてい

<sup>4</sup> The COncstraining ORographic Drag Effects project の略。数値実験作業部会 (WGNE: Working Group on Numerical Experimentation) 及び全球大気システム研究 (GASS: Global Atmospheric System Studies) のもとで実施されたプロジェクト。

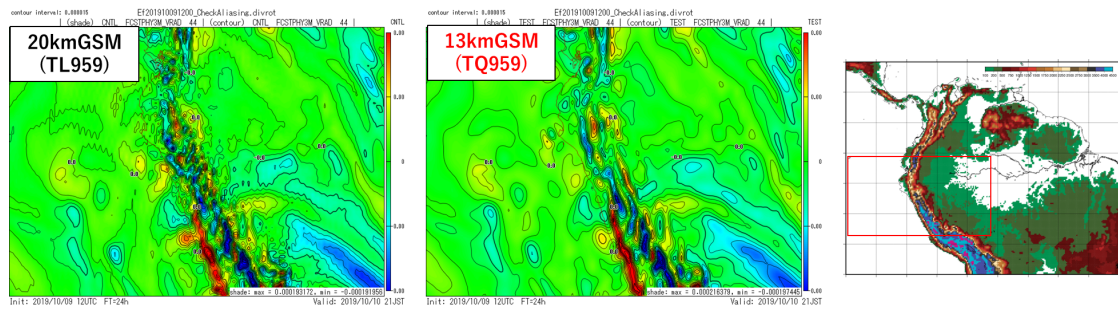


図 4.1.1 南米ペルー付近（右図の赤枠）におけるモデル面第 44 層目（約 500 hPa）の渦度  $[s^{-1}]$  分布。（左）20 km GSM（1 次格子）、（中）13 km GSM（2 次格子）。2020 年 10 月 9 日 12UTC 初期値の FT=24。

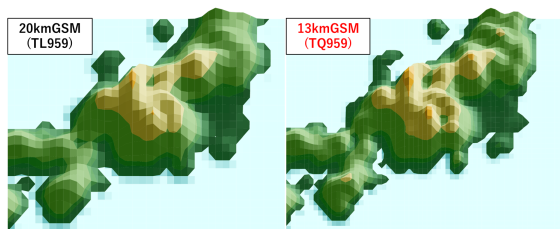


図 4.1.2 日本の中部域におけるモデル標高の鳥瞰図。（左）20 km GSM、（右）13 km GSM

るが、この特性は GWD のパラメータに依存していることが明らかになった。図 4.1.4 で示した感度実験や COORDE の結果を踏まえ、次期 GSM 更新に向けた改良では、 $G = 0.6$ 、 $n_{\text{eff}} = 1.0$  とした。また、GWD のパラメータ調整に合わせる形で、GWD のパラメータ変更により対流圏中下層での東西風減速を弱めることを補完し、北半球の循環場の精度を維持するために、TOFD による東西風減速の振幅を GSM2003 の 2 倍に強めるように調整した。

本節で示す改良のインパクトやその妥当性を検証するために、Niekerk et al. (2020) が提唱したサブグリッド地形パラメタリゼーションの効果を示す実験（以下、COORDE 型実験）を実施した。COORDE 型実験とは、(i) 水平解像度 50 km 程度の数値予報モデルにおける SSO (Subgrid Scale Orography; サブグリッド地形効果パラメタリゼーション、ここでは TOFD は含まない) の有無による東西風の変化と、(ii) 水平解像度 10 km 程度の数値予報モデルにおける地形の解像度の違い (10 km 以下と 80~200 km 程度) による東西風の変化を計算し、(ii) を参照値として比較することで、(i) の妥当性を検証するものである。図 4.1.5 に改良前後での COORDE 実験結果と参照値を示す。なお、(i) の実験の解像度は約 40 km (TL479)、(ii) の実験では高解像度、低解像度はそれぞれ約 9 km (TL1919)、110 km (TL159) とした。改良前は、下部成層圏 (100 hPa から 70 hPa 付近) で、SSO による減速が参照値 (図 4.1.5(c)) と比べて大きい傾向が見られる (図 4.1.5(a)) が、改良後ではその減速が大きく減少している (図 4.1.5(b))。その

結果として、図 4.1.5(d),(e) で見られるように、同じ高度で見られた東西風のバイアスが大きく減少した。また、解析・予報サイクル実験においては、下部成層圏での東西風バイアスの軽減に加えて、上部成層圏における第一推定値と衛星観測データの整合性向上や、対流圏から成層圏にかけて主要な予測スコアの改善が見られた (図略)。

#### 4.1.4 物理過程の改良：その他の改良

##### (1) 湖の取り扱いの改良

湖は、陸よりも熱容量が大きく水温の日変化が小さい一方で、海よりも水温の季節変化の振幅は大きい。また、淡水の湖は、海と比べて蒸発量が多い、凝固点が高いといった違いがあるほか、夏は表面ほど温度が高く、深い湖は冬は凍結しにくいといった特徴がある<sup>5</sup>。数値予報モデルが高度化・高解像度化されるにつれ、湖の水温・凍結の状態を適切に表現することは大気の数値予報精度向上にとって無視できなくなり、その扱いの精緻化が重要になってくる。

GSM では、湖等の陸水は海格子として扱われており、モデル内で海と湖の区別はない。接地境界層過程では、湖についても海面・海氷過程と同様の定式化で解かれる。物理定数についても海の塩分濃度を仮定しており、湖格子でも海格子と同様、凝固点は  $-1.64^{\circ}\text{C}$ 、バルク法における潜熱フラックスの計算に使う水面の比湿は水面温度と地表面気圧から計算した飽和比湿の 0.98 倍 (塩分濃度約 3.7% に相当) としている。また、湖面温度、湖水密接度についても、GSM では湖の特徴を考慮したものになっておらず、簡便な扱いとなっている。湖 (陸水) 温度は、全球日別海面水温解析 (栗原ほか 2006) を陸域に外挿した値を標高補正 ( $6.5 \text{ K/km}$ ) して用いている。湖水密接度については、北米の五大湖やロシアのラドガ湖などは全球海水解析 (海洋気象情報室作成) の対象であるため、解析値を初期値に用いているが、非解析域 (主に陸域) では、湖面温度が  $-1.64^{\circ}\text{C}$

<sup>5</sup> 秋から冬に表面が冷えると成層が不安定化し対流が発生する。水の密度は  $4^{\circ}\text{C}$  で最大であり、湖の全体の温度が  $4^{\circ}\text{C}$  前後となるまでこの状態が継続するため。

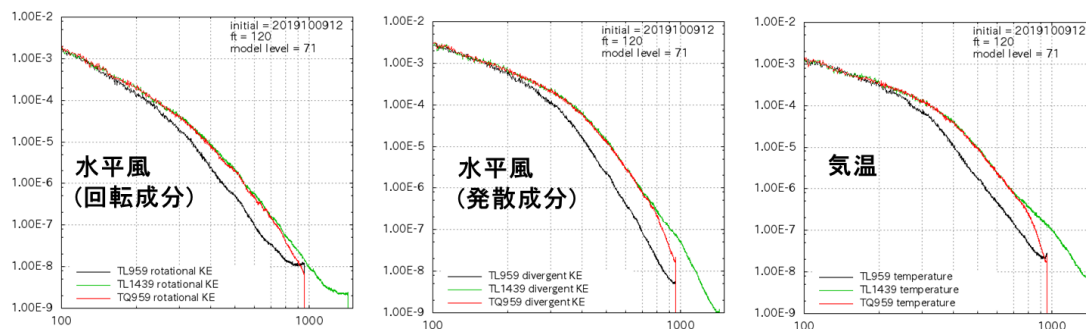


図 4.1.3 モデル面第 71 層目 (約 150hPa) の (左) 運動エネルギーの回転成分 [ $\text{m}^2\text{s}^{-2}$ ]、(中) 運動エネルギーの発散成分 [ $\text{m}^2\text{s}^{-2}$ ]、(右) 気温のスペクトル [ $\text{K}^2$ ]。黒: 20 km GSM(TL959)、赤: 13 km GSM(TQ959)、緑: 13 km GSM (TL1439) 横軸は波数。2020 年 10 月 9 日 12UTC 初期値の FT=120。

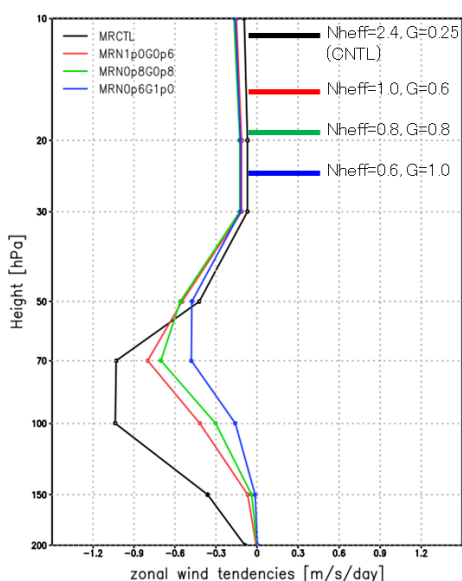


図 4.1.4 中東域 (28°E-68°E, 15°N-50°N) 平均の地形性重力波抵抗による加速率 [ $\text{m/s day}^{-1}$ ] の 200 hPa から 10 hPa まで鉛直プロファイルのパラメータによる違い。黒:  $n_{\text{eff}} = 2.4, G = 0.25$  (GSM2003 での設定)、赤:  $n_{\text{eff}} = 1.0, G = 0.6$ 、緑:  $n_{\text{eff}} = 0.8, G = 0.8$ 、青:  $n_{\text{eff}} = 0.6, G = 1.0$ 。統計期間は 2015 年 1 月 1 日から 2015 年 1 月 14 日までの各日 00UTC 初期値、FT=24。

以下の場合に密接度 1 とする。

次期の GSM 更新に向けた改良では、下層気温を中心とした予測精度向上を狙い、以下に示す湖の扱いの精緻化を行う。

#### 湖格子の考慮

GSM において、非陸格子のひとつとして、海格子に加えて湖を考慮するようにする。湖格子の判別には、米国地質調査所作成の全球地表面種別データセット (水平解像度 1 km) である GLC2000 を用いた。モデル格子内で、湖 (陸水) として分類されているデータが卓越する場合は、そのモデル格子は湖として取り扱う。例

外として、全球日別海面水温解析の対象となっているカスピ海や黒海は海格子のままとする。

#### 湖面温度や凍結の季節変化の改良

湖格子における湖面温度については、MODIS<sup>6</sup>の地表面温度プロダクトから月別気候値を算出し、時間内挿した湖面温度気候値を与える。湖水密接度については、湖水密接度を  $C$ 、湖面温度気候値を  $T$  として、以下の式で診断する (氷床を除く陸格子の密接度は 0 とする)。ただし、五大湖、バイカル湖、ラドガ湖等、海水解析の対象である大きな湖では、従来と同様、海水解析値を使う。

$$C = \begin{cases} 0 & T \geq 273.15 \text{ K} \\ 1 - e^{0.1(T-273.15)} & T < 273.15 \text{ K} \end{cases} \quad (4.1.9)$$

#### 接地境界層過程における湖の扱い (海面過程の拡張)

湖の特徴を表現することと実装の簡便さの両立を念頭に置き、湖格子における接地境界層の計算は海面過程における物理定数を湖向けに変更する形で行う。湖格子では淡水を仮定し、凝固点は  $0^\circ\text{C}$ 、バルク法による潜熱フラックスの計算に使う水面の比湿は水面温度と地表面気圧から計算した飽和比湿と同じとして計算を行う。

湖の取り扱い改良のインパクトについて、以下に例を示す。図 4.1.6 は、2019 年 8 月 15 日の北米域における湖面温度分布を示している。図中の楕円及び矢印で示した領域 (ウィニペグ湖、アサバスカ湖、グレートスレーブ湖等) では、改良版の方が、現手法に対して湖面温度が  $5^\circ\text{C} \sim 10^\circ\text{C}$  程度高くなっている。これは、当該領域の湖面温度について、現手法ではハドソン湾等の低い海面温度を外挿して計算しているのに対し、改良版では衛星観測による気候値に基づく値となるた

<sup>6</sup> MODERate resolution Imaging Spectroradiometer (Terra 衛星および Aqua 衛星に搭載されている中分解能撮像分光放射計)

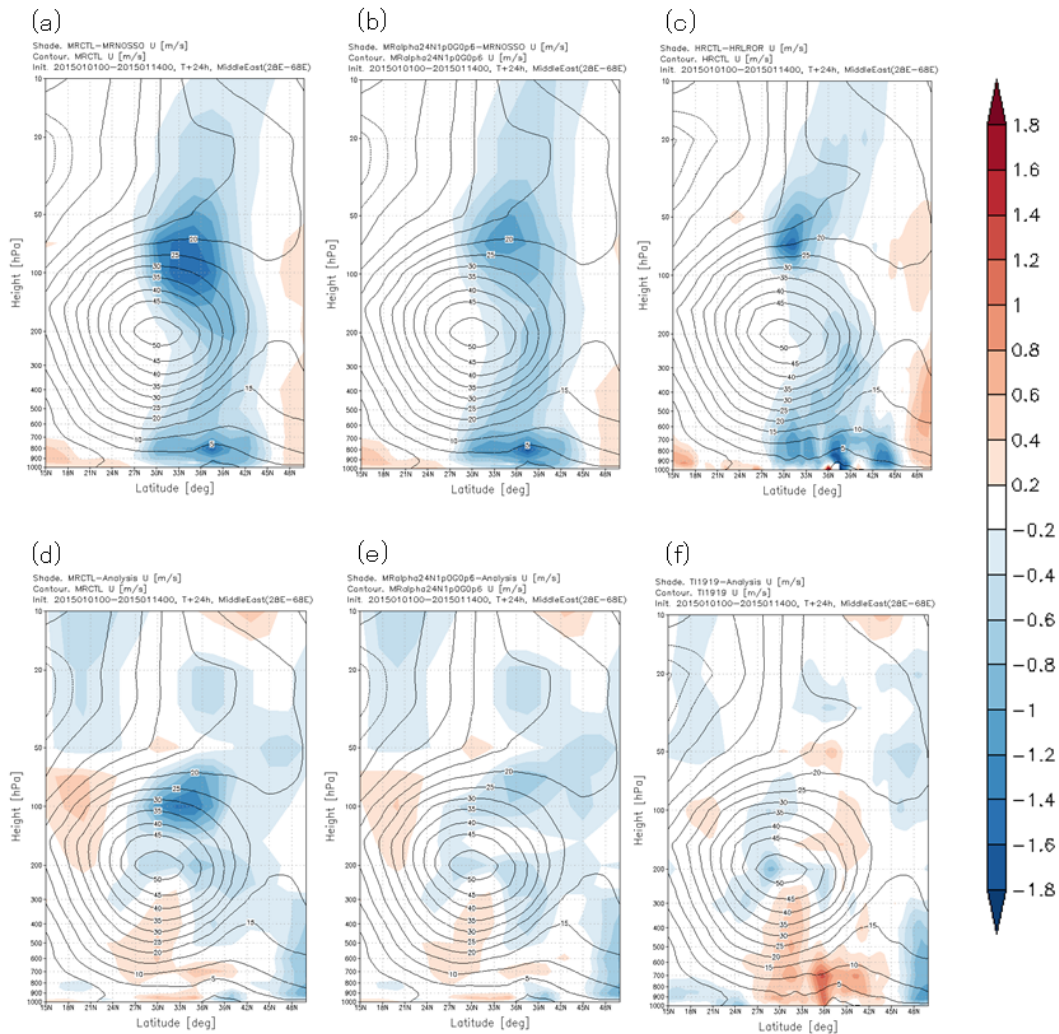


図 4.1.5 COORDE 型実験での中東域における、(a), (b) 中解像度 (TL479:水平解像度約 40 km) 実験での東西風 [m/s] (等値線) と SSO の有無による差 (カラー)、(c) 高解像度実験 (TL1919:水平解像度約 9 km) における、東西風 [m/s] (等値線) と低解像度地形 (地形のみが TL159:水平解像度約 110 km) 実験との差 (カラー)。(d)-(f) は東西風 [m/s] とその解析値からの差 (カラー)。24 時間予測値で、実験期間、領域は図 4.1.4 と同じ。(a),(d) がパラメータ調整前、(b),(e) がパラメータ調整後、(f) が高解像度実験によるもの。

め、湖水温度が海面温度よりも高くなりやすいという特性が反映されたためである。湖面温度の違いは湖周辺での地上気温の系統誤差にも影響する。図 4.1.7 は、2019 年 8 月平均の地上気温の 6 時間予測値の SYNOP に対する平均誤差を示したものである。図中の楕円で示した湖のある領域では、現手法で見られた低温バイアスが改良版では軽減している。これは、湖面温度が改良版では高くなったことに起因する。その他、冬期において湖面温度の低下や湖の凍結が表現されるようになったことに伴う湖周辺での高温バイアスが軽減された地域が見られた (図略)。湖面温度の取扱の改良のインパクトについて、データ同化サイクルにおける観測値と第一推定値の整合性や主要予報スコアはいずれも中立～改善であり、特に下層気温の予報スコアに改善が見られた (図略)。

## (2) オゾン気候値の更新

現在の GSM では放射過程で利用するオゾン濃度について、気象研究所化学輸送モデル MRI-CCM1 (Shibata et al. 2005) を用いて作成された 3 次元月別気候値を、1 hPa より上層で SPARC プロジェクトによる衛星観測に基づく帯状平均月別気候値 (Randel et al. 1998) で補正したもの (以下、現気候値) を使用している (村井 2009; 関口ほか 2019)。放射計算の精度向上及び成層圏の気温バイアス軽減を狙い、オゾン気候値についてより新しい精緻なデータセットに基づき更新する。次期 GSM に向けては、気象庁第 3 次長期再解析 (JRA-3Q, 気象庁 2021b) 向けに整備された、MRI-CCM2 (Deushi and Shibata 2011) をベースにしたオゾン再解析から作成した新しいオゾン気候値 (1981-2010 年で平均、以下、新気候値) を利用することを計画している。この

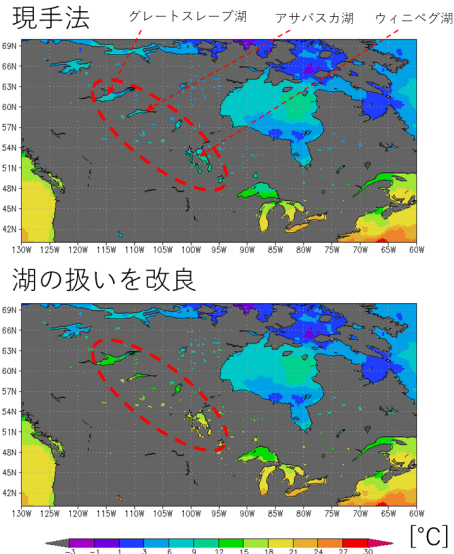


図 4.1.6 北米域における湖面温度及び海面温度 [°C] の分布。(上) 現行手法、(下) 改良版手法。時刻は 2019 年 8 月 15 日 12UTC。図中の楕円及び矢印については本文を参照。

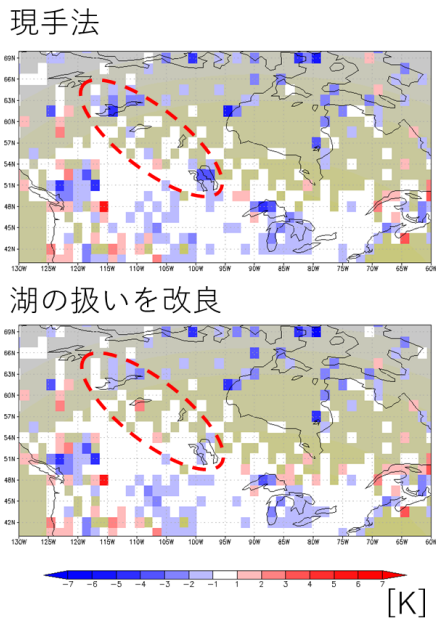


図 4.1.7 北米域における、2019 年 8 月平均の FT=6 における気温の SYNOPSIS に対する平均誤差 [K]、(上) 現行手法、(下) 湖面温度改良版。図中の楕円については本文を参照。

新気候値は CPS3 でも使用されるものであり、これらのシステムにおいて、成層圏の気温の解析精度、予測精度向上が確認されている。オゾン気候値更新は、予測対象や時間スケールに依存しない部分についてシステム間で仕様を共通化させることも狙いに含まれる。

図 4.1.8 は、1 月のオゾン濃度気候値の帯状平均の分布を示したものである。新気候値は現気候値に対して熱帯の 10 hPa 付近でオゾン濃度が減少し、SPARC 気

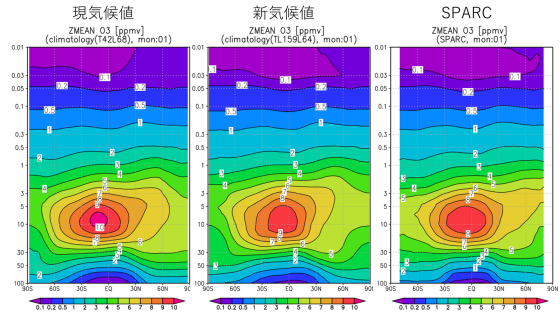


図 4.1.8 1 月における帯状平均のオゾン濃度気候値 [ppmv]。(左) 現気候値、(中) 新気候値、(右) 衛星観測に基づく気候値 (Randel et al. 1998)

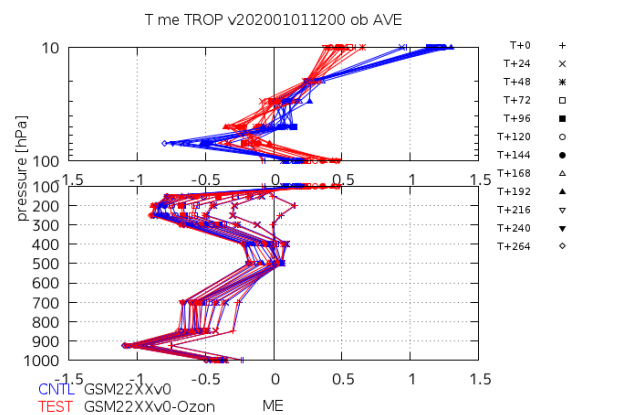


図 4.1.9 解析予報サイクル実験による 2020 年 1 月平均の熱帯 (20°S-20°N) の気温予測のラジオゾンデ観測に対する平均誤差 [K] の予報時間別 (FT=0 から FT=264 までの 24 時間毎) の鉛直プロファイル。(青) 現オゾン気候値使用、(赤) 新オゾン気候値使用

候値に近づいている。また、100 hPa 付近では新気候値はオゾン濃度がやや減少している。オゾン気候値の更新の全球数値予報システムへのインパクトは、特に成層圏の気温予測に顕著に見られる。図 4.1.9 は、解析予報サイクル実験で得られた 2020 年 1 月平均の熱帯 (20°S-20°N) における気温予測のラジオゾンデ観測に対する平均誤差である。対流圏では平均誤差の違いはほとんどみられないが、10 hPa では、現オゾン気候値使用時で見られた高温バイアスが新オゾン気候値を使用することで大きく減少する。一方で、100 hPa 付近では高温バイアスが拡大する。これらの気温の変化は、オゾン濃度の増減に対応した放射過程による加熱率の変化でほぼ説明できることを確認しており (図略)、想定される変化と考える。なお、対流圏の予測精度への影響は小さく、主要予測スコアはほぼ中立であった (図略)。予測精度への影響は中立以上で、想定されるインパクトが確認されたことから、オゾン濃度の新気候値を次期 GSM の更新に含めることは問題ないとする。

### (3) 雲氷有効サイズ診断式の改良

数値予報モデルにおける雲氷による放射の効果の扱いは、大気上端での放射量や放射過程による加熱率の鉛直プロファイルの変化を通じて、数値予報モデルの放射収支や気温等の系統誤差に大きく影響する。放射過程で必要となる雲氷光学特性をパラメタライズするためには雲氷有効サイズの情報が必要となるが、GSMでは、雲氷有効サイズは雲氷量や気温などから診断する。雲氷有効サイズや光学特性のパラメタライゼーションは、参照値とする観測された雲氷の領域による違い、仮定する雲氷の形状の違い等に起因した不確実性も大きい。そのため、GSMでの利用にあたっては、研究の進展に応じて診断式を随時見直してきた。次期GSM更新に向けては、雲氷有効サイズの診断式を、中緯度での巻雲を対象にパラメタライズされたWyser (1998)の手法から、熱帯・中緯度の両方で適用可能なSun (2001)の手法に変更する。この変更により、診断される雲氷有効サイズはより小さくなり、放射による雲氷の効果が大きく表現されるようになる。このことによる大気上端上向き長波放射フラックスの過剰バイアス軽減を狙う。また、気象研究所で開発中の雲氷光学特性および有効サイズの診断式改良(Nagasawa 2021)のうち、雲氷有効サイズ診断式を先行的に採用し、今後のNagasawa (2021)による手法の取り込みに備える狙いもある。

雲氷有効サイズ診断式改良の全球数値予報システムへのインパクトについて示す。図4.1.10は、解析予報サイクル実験で得られた2019年8月平均の大気上端上向き長波放射量(OLR: Outgoing Longwave Radiation)の衛星観測プロダクトであるCERES(Cloud and the Earth's Radiant Energy System)との差、および雲氷有効サイズ診断式改良前後の差を示す。GSMにはOLRの正バイアスが顕著であることが知られている(米原ほか2019)が、雲氷有効サイズ診断式の改良により、期待通りその正バイアスが軽減されている。また、大気上端から出ていく放射量が減少した結果、対流圏の気温は全体的に暖まる傾向となり、GSMで見られる対流圏の気温の負バイアスも減少する(図4.1.11)。これらの結果、主要スコアも中立以上のものとなった(図略)。

#### 4.1.5 力学過程と物理過程の改良の予測精度への影響

力学過程の改良と物理過程を加えた13 km GSMの全球数値予報システムにおける予測精度へのインパクトを確認するために解析予報サイクル実験を実施した<sup>7</sup>。対照実験には、2021年3月時点の全球数値予報システムと同等の設定を用いた。図4.1.12に2019年7月-9月について解析値を対象とした、代表的な要素の予測を領域毎に検証した結果を示す。主要なスコアについては、概ね中立から改善が得られている。図4.1.13に令和元年台風第19号(令和元年東日本台風)とそれ

に伴う降水の予測事例について示す。この事例では、進路予測には大きな変化は見られなかった(図略)ものの、台風中心示度については13 km GSMは20 km GSMより深まり、ベストトラックに近づく傾向が見られた。一方で、台風の衰退のタイミングが遅れる傾向は13 km GSM、20 km GSMで共通である。また、日本付近の降水予測について、東海地方における地形効果による降水の強まりは13 km GSMの方がより顕著に表現され、解析雨量と整合するようになった。令和元年台風第19号事例に限らず、統計検証においても、13 km GSMは日本付近の強い降水の頻度が増加し、より解析雨量と整合するようになったほか、台風中心示度は強まる傾向が見られた(図略)。これらの実験結果から、水平高解像度化とそれに合わせた力学過程・物理過程の改良で期待される効果が得られていると考える。

#### 4.1.6 まとめと今後の予定

前線、細かい地形に伴う降水等の現象の表現向上を通じた全般的な予測精度向上、系統誤差の軽減を通じた循環場や気温等の予測精度向上を目的に、全球モデルの水平解像度の20 kmから13 kmへの増強、地形性抵抗過程や湖の扱い、雲氷有効サイズの診断式の改良、オゾン気候値の更新といった物理過程の改良に向けた開発を進めている。それぞれの開発について基礎調査と性能評価を行い、想定された改善効果を得られることを確認した。水平高解像度化に向けた力学過程の改良では実効解像度向上や全体的な精度向上、地形性抵抗過程の改良による対流圏から成層圏の系統誤差軽減と予測精度改善、CPS3や気象研究所の物理過程開発成果取り込みによる気温の系統誤差減少を確認した。また、これら改良を組み合わせた試験では、標準的なスコアの改善や台風接近に伴う、日本域の降水の細かい表現の向上を確認した。

今後は、これらの改良と全球解析の改良(第4.2節)を組み合わせた仕様での準リアルタイム実行を行い、メソ数値予報システム等後続システムへの波及も含めた効果の確認を進める。並行して、物理過程(雲、積雲、海面、非地形性重力波、地形データの扱い等)の更なる改良に向けた開発を進め、物理過程改良の上乗せをした上で令和4年度末に全球数値予報システムを更新する計画である。

#### 参考文献

- Beljaars, A., A. R. Brown, and N. Wood, 2004: A new parametrization of turbulent orographic form drag. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **130**, 1327–1347.
- Côté, J. and A. Staniforth, 1988: A Two-Time-Level Semi-Lagrangian Semi-implicit Scheme for Spectral Models. *Mon. Wea. Rev.*, **116**, 2003–2012.

<sup>7</sup> 第4.2節で示す全球解析の改良も含まれる。



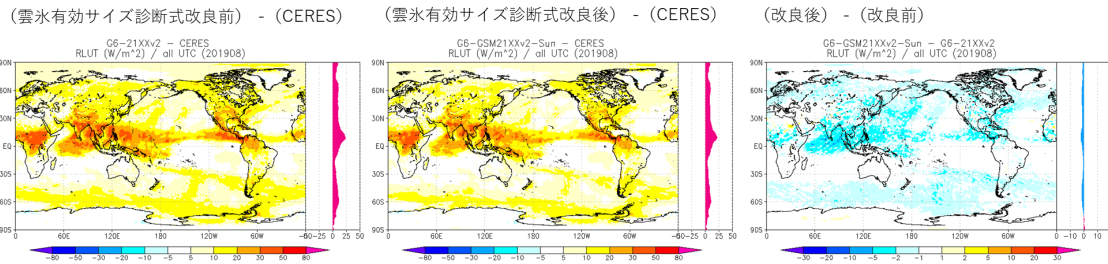


図 4.1.10 解析予報サイクル実験による 2019 年 8 月平均の OLR の CERES プロダクトに対する誤差。(左) 雲氷有効サイズ診断式改良前、(中) 雲氷有効サイズ診断式改良後。(右) 2019 年 8 月平均の OLR の雲氷有効サイズ診断式改良前後の差。単位はすべて  $[W m^{-2}]$ 。

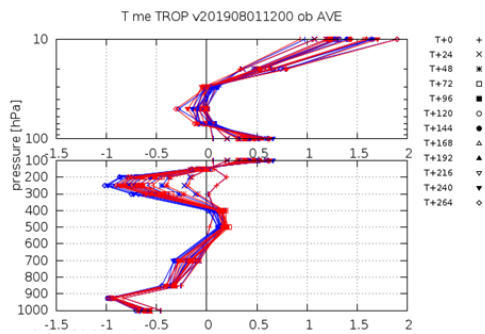


図 4.1.11 解析予報サイクル実験による 2019 年 8 月平均の熱帯 ( $20^{\circ}S-20^{\circ}N$ ) の気温予測のラジオゾンデ観測に対する平均誤差  $[K]$  の予報時間別 (FT=0 から FT=264 までの 24 時間毎) の鉛直プロファイル。(青) 雲氷有効サイズ診断式改良前、(赤) 雲氷有効サイズ診断式改良後

Deushi, M. and K. Shibata, 2011: Development of a Meteorological Research Institute Chemistry-Climate Model version 2 for the Study of Tropospheric and Stratospheric Chemistry. *Papers in Meteorology and Geophysics*, **62**, 1–46.

Elvidge, A. D., I. Sandu, N. Wedi, S. B. Vosper, A. Zadra, S. Boussetta, F. Bouyssel, A. Niekerk, M. A. Tolstykh, and M. Ujiie, 2019: Uncertainty in the Representation of Orography in Weather and Climate Models and Implications for Parameterized Drag. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **11**, 2567–2585.

本田有機, 2018: NAPS10 における改良計画. 平成 30 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 2–5.

JMA, 2019: *Outline of the operational numerical weather prediction at the japan meteorological agency. Appendix to WMO Technical Progress Report on the Global Data-processing and Forecasting Systems (GDPFS) and Numerical Weather Prediction (NWP) Research*. Japan, 229 pp., (Available online at <http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/>

[jma-center/nwp/outline2019-nwp/index.htm](http://jma-center/nwp/outline2019-nwp/index.htm)).

気象庁, 2021a: 全球モデルの改良. 数値予報開発センター年報 (令和 2 年), 気象庁 数値予報開発センター, 31–41.

気象庁, 2021b: 気象庁第 3 次長期再解析 (JRA-3Q) の本計算進捗. 数値予報開発センター年報 (令和 2 年), 気象庁 数値予報開発センター, 115–124.

栗原幸雄, 桜井敏之, 倉賀野連, 2006: 衛星マイクロ波放射計, 衛星赤外放射計及び現場観測データを用いた全球日別海面水温解析. 測候時報, **73**, S1–S18.

Lott, F. and M. J. Miller, 1997: A new subgrid-scale orographic drag parametrization: Its formulation and testing. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **123**, 101–127.

Malardel, S., N. Wedi, W. Deconinck, M. Diamantakis, C. Kuehnlein, G. Mozdzynski, M. Hamrud, and P. Smolarkiewicz, 2016: A new grid for the IFS. *ECMWF Newsletter.*, **146**, 23–27.

村井臣哉, 2009: 放射. 数値予報課報告・別冊第 5 号, 気象庁予報部, 87–90.

Nagasawa, R., 2021: Impact of ice cloud treatment on the OLR in the radiation calculation of JMA global NWP model. *WGNE. Res. Activ. Earth. Sys. Model.*, **51**, 4.13–4.14.

Niekerk, A., I. Sandu, A. Zadra, E. Bazile, T. Kanehama, M. Köhler, M. Koo, H. Choi, Y. Kuroki, M. D. Toy, S. B. Vosper, and V. Yudin, 2020: Constraining Orographic Drag Effects (COORDE): A Model Comparison of Resolved and Parametrized Orographic Drag. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **12**.

Randel, W. J., F. Wu, J. M. Russell, A. Roche, and J. W. Waters, 1998: Seasonal Cycles and QBO Variations in Stratospheric CH<sub>4</sub> and H<sub>2</sub>O Observed in UARS HALOE Data. *J. Atmos. Sci.*, **55**, 163–185.

関口亮平, 長澤亮二, 中川雅之, 籾将吉, 2019: 放射. 数

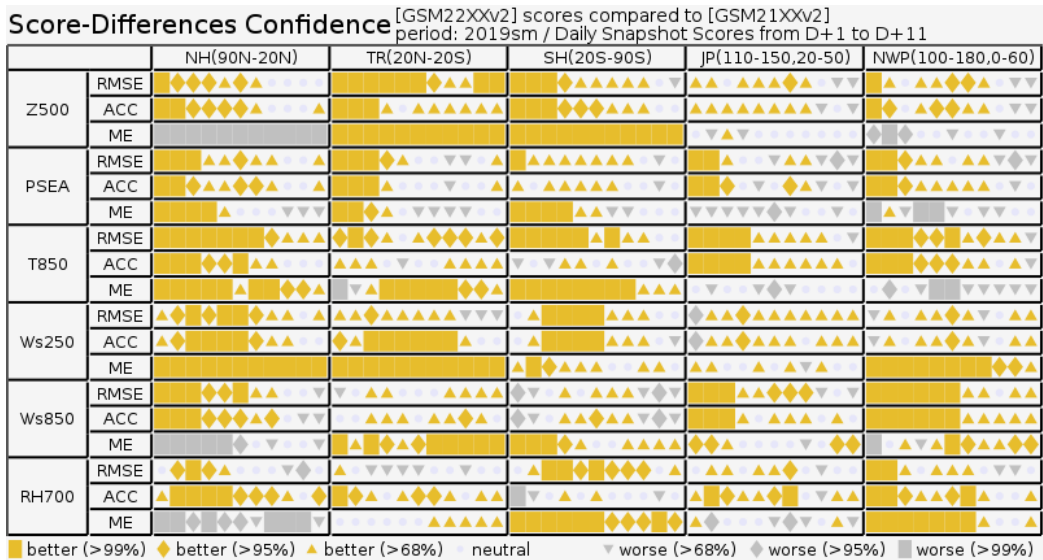


図 4.1.12 2019 年 7 月–9 月における対流圏主要要素の解析値に対する 13 km GSM(TEST) と 20 km GSM(CNTL) のスコア差の有意性判定 (スコアカード)。解析値を参照値としている。検証対象の領域は、NH が北半球 (20°N 以北)、TR が熱帯 (20°S – 20°N)、SH が南半球 (20°S 以南)、JP が日本周辺 (110°E–150°E, 20°N–50°N)、NWP が北西太平洋領域 (100°E–180°E, 0°–60°N) を意味する。要素は上から 500 hPa 高度、海面更正気圧 (PSEA)、850 hPa 気温 (T850)、250 hPa 風速 (Ws250)、850 hPa 風速 (Ws850)、700 hPa 相対湿度 (RH700)。スコアカードはそれぞれ上から RMSE、ACC、ME、黄色、灰色がそれぞれ統計的に有意に改善、悪化していることを示しており、塗りつぶし面積が広いほど統計的有意性が高い。

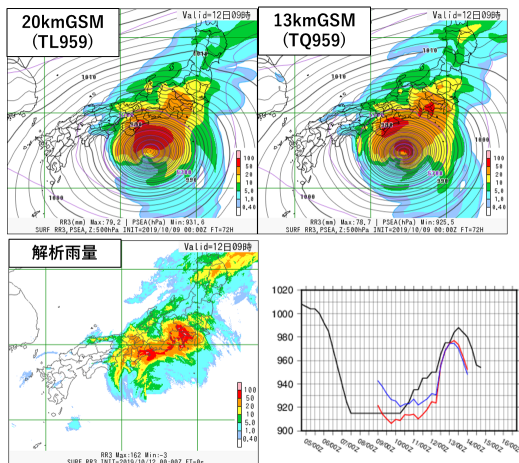


図 4.1.13 2019 年 10 月 12 日 09JST を対象とした令和 2 年台風第 19 号の予測事例。(左上) 20 km GSM、(右上) 13 km GSM、(左下) 解析雨量。等値線は海面更正気圧 [hPa]、カラーは前 3 時間雨量 [mm]。(右下) 台風第 19 号の中心気圧 [hPa]。青：20 km GSM、赤：13 km GSM、黒：気象庁作成のベストトラック。GSM の初期値はすべて 2019 年 10 月 9 日 00UTC。

値予報課報告・別冊第 65 号, 気象庁予報部, 66–80.

Shibata, K., M. Deushi, T. T. Sekiyama, and . Yoshimura, 2005: Development of an MRI Chemical Transport Model for the Study of Stratospheric Chemistry. *Papers in Meteorology and Geophysics*, **55**, 75–119.

Sun, Z., 2001: Reply to comments by Greg M. Mc-

Farquhar on ‘Parametrization of effective sizes of cirrus-cloud particles and its verification against observations’. (October B, 1999, 125, 3037–3055). **127**, 267–271.

氏家将志, 堀田大介, 黒木志洸, 2019: 離散化の見直し及び高速化. 数値予報課報告・別冊第 65 号, 気象庁予報部, 25–38.

Ujiie, M. and D. Hotta, 2019: Elimination of spectral blocking by ensuring rotation-free property of discretized pressure gradient within a spectral semi-implicit semi-Lagrangian global atmospheric model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **145**, 3351–3358.

Wedi, N. P., 2014: Increasing horizontal resolution in numerical weather prediction and climate simulations: illusion or panacea? *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **372**, 20130 289.

Wyser, K., 1998: The Effective Radius in Ice Clouds. **11**, 1793–1802.

米原仁, 2019: 気象庁全球モデルにおける近年の改良. 数値予報課報告・別冊第 65 号, 気象庁予報部, 1–11.

米原仁, 佐藤均, 下河邊明, 2019: 性能評価試験. 数値予報課報告・別冊第 65 号, 気象庁予報部, 114–120.