

## 第3章 数値予報システムの開発成果

### 3.1 開発成果一覧

表 3.1.1 2023 年 1 月から 2023 年 12 月までに数値予報システムに導入した開発成果

節	表題	日時
3.11	全球波浪モデルの高解像度化と延長予報の頻度増強	1 月 31 日
年報 (令和 4 年) 4.14	日本沿岸海況監視予測システムの改良	2 月 9 日
3.2, 3.6, 3.7, 4.2	全球数値予報システムと全球アンサンブル数値予報システムの改良	3 月 14 日
3.3, 3.4, 3.6, 3.8, 3.9	メソ数値予報システムとメソアンサンブル予報システムの改良	3 月 28 日
3.5, 3.6, 3.9, 3.10	局地数値予報システムの改良	3 月 28 日
2.12	高潮予測 GPV の予報時間延長	7 月 24 日
4.3	メソ、局地解析における沖縄・松江のレーダーデータの利用再開	11 月 8 日

## 3.2 全球数値予報システムの水平解像度向上、物理過程改良、全球解析の高度化

### 3.2.1 はじめに

全球数値予報システムは、天気予報や週間天気予報、台風予報での利用、メソ数値予報システムへの境界値提供をはじめ多くの役割を担う基盤数値予報システムである。気象庁では、スーパーコンピュータシステムの更新とともに、全球数値予報システムの分解能の向上や計算手法の精緻化などの改良を通して予測精度の向上を進めてきた。第10世代スーパーコンピュータシステムにおいては、鉛直、水平解像度の増強や物理過程の精緻化等を通じた全球モデル(GSM)や全球解析(GA)の改良を開発計画(本田2018)に沿って進め、令和4年度(2022年度)末の段階で、概ね計画通りの改良を実施した。

2023年3月14日に実施した全球数値予報システムの更新では、GSMの水平解像度を20 kmから13 kmに増強するとともに、高解像度化に合わせた力学過程の改良、地形性抵抗過程、非地形性重力波過程、放射過程、湖の扱い等物理過程の改良、全球解析及び積雪深解析の高度化を行った。あわせて、モデル標高の作成に用いる標高オリジナルデータセットをより高精度のものに更新した。これらの更新により、循環場・気温等の誤差減少、前線や細かい地形に伴う降水等の現象の表現向上を通じて、北半球500 hPa高度予測精度、台風進路予測精度、日本付近の降水予測精度などが改善した。本稿では、その改良内容と予測精度の評価結果及び予測特性の変化について報告する。以下では、第3.2.5項に示すGSMのバージョンの命名規則に沿い、本稿で示す改良を総称してGA/GSM2303と呼ぶ。

### 3.2.2 変更概要

ここでは、GA/GSM2303における変更の概要やその狙いについて示す。各変更の詳細や個々の変更のインパクトについては、気象庁(2022a)、気象庁(2022b)、気象庁(2023)を参照されたい。

#### (1) 水平高解像度化と高解像度化に合わせた力学過程改良

GSMの格子点数を増強すると同時に格子点数と切断波数の関係の見直しを行った。さらに、モデル標高に施すフィルタや大気モデルの数値拡散の見直しを行った。これらにより、GSMの水平解像度を約20 kmから約13 kmに向上させた。

前者について、格子数を増強するとともに、信頼可能スケール(エイリアシング<sup>1</sup>、フィルタ処理、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る(実効解像度を向上させる)ことを目的に、水平格子系を1次格子から2次格子に変更した。この際、切断波数は959のままとした。この変更により、東西格子数(赤道付近)・南北格子数はそれぞれ1.5倍、全球としては格子点数が約2倍になり、水平格子間隔は約13 kmとなる。また、2次格子を採用することで、非線型項に伴うエイリアシングが軽減され、実効解像度が向上する。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>。

後者について、2次格子の採用によりエイリアシングが軽減されることを踏まえ、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たモデル標高(平均標高)の平滑化関数や予報変数に対するフィルタ処理(数値拡散)の見直しを行った。この変更により、中高波数成分の減衰を弱めることで、実効解像度を更に向上させた。

#### (2) 地形性抵抗過程の改良

下部成層圏における西風の弱風バイアスの減少、データ同化サイクルにおける上部成層圏での第一推定値と衛星観測データの整合性向上、北半球における対流圏の循環場の予測精度向上を目的に、Lott and Miller(1997)に基づくサブグリッド地形による重力波抵抗(Gravity Wave Drag, 以下GWD)とBeljaars et al.(2004)に基づく地形性乱流形状抵抗(Turbulent Orographic Form Drag, 以下TOFD)のパラメータを調整した。具体的には、GWDにおいて、サブグリッドスケールの運動量フラックスがより上方に伝播するよう、飽和フラックス<sup>3</sup>の振幅が大きくなるようにパラメータを調整した。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更新前の2倍に強めるように調整した。

#### (3) 非地形性重力波過程の改良

成層圏の気温や風速のバイアス軽減、及びデータ同化サイクルにおける衛星観測と第一推定値の整合性向上を目的に、非地形性重力波過程における射出高度での運動量フラックス(射出フラックス)の緯度依存性の精緻化と、安定時の鉛直拡散係数の調整を行った。射出フラックスについては、全体的にフラックスの大きさが精緻化前よりも小さくなるようにするとともに、高緯度側でフラックスが精緻化前よりも特に小さくなるようにした。非地形性重力波過程の精緻化とあわせ

<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。

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

<sup>3</sup> 飽和フラックスを超えた分の運動量フラックスは環境場に返される。GWDの場合は、環境場に返された運動量は、水平風を減衰させるよう働く。

て、成層安定時における局所渦スキーム (Han and Pan 2011) による拡散係数を成層圏ではより小さくなるよう調整を行った。

#### (4) 放射過程の改良

大気上端上向き長波放射フラックスの過剰バイアスの軽減とそれによる対流圏の低温バイアスの減少を狙い、雲放射過程における雲氷有効サイズ診断式について、Wyser (1998) の手法から、熱帯・中緯度の両方で適用可能な Sun (2001) の手法に精緻化した。これは、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。

成層圏の気温予測精度向上を目的に、放射過程で利用するオゾン濃度の 3 次元気候値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ものから、気象庁第 3 次長期再解析 (JRA-3Q, Kosaka et al. 2024) 向けに整備された、MRI-CCM2 (Deushi and Shibata 2011) に基づくオゾン再解析から作成したものに更新した。ただし、1 hPa より上層では 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) で補正したものをを用いる点に変更しない。

高解像度モデルと低解像度モデルのバイアス特性の差を小さくすること、予測対象や時間スケールに依存しない部分について GSM と季節予報システム (CPS3) で仕様を共通化しコード維持管理性を向上させることを目的に、CPS3 で導入済の太陽天頂角計算高度化 (Hogan and Hirahara 2016) と地表面アルベド計算の空間高解像度化 (Hogan and Bozzo 2015) を GSM にも導入した<sup>4</sup>。

#### (5) 湖の扱いの改良

GA/GSM2303 より前の 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かった。GA/GSM2303 では、対流圏下層気温を中心とした予測精度向上を狙い、湖の扱いの精緻化を行った。湖格子における湖面温度については、MODIS<sup>5</sup> の地表面温度プロダクトから作成した湖面温度月別気候値を与えると同時に、湖水密接度については、湖面温度気候値の関数として診断するように変更した。ただし、五大湖、バイカル湖、ラドガ湖等、海面水温・海水解析の対象である大きな湖では、従来と同様、気象庁作成の全球日別海面水温解析値 (栗原ほか 2006) 及び海水解析値を使う。また、海面過程における凝固点

<sup>4</sup> GSM の放射過程では、計算コスト削減のために経度方向に 4 格子で平均した場で放射計算を行っている。ここで示した改良は、地表面アルベド計算のみ元の格子の解像度で計算するもの。

<sup>5</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)

及びバルク法による潜熱フラックスの計算に用いる水面の比湿についても、海と湖で扱いを分けるようにした。海格子では凝固点は $-1.64^{\circ}\text{C}$ 、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) を水面の比湿としているところを、湖格子では凝固点は $0^{\circ}\text{C}$ 、水面温度と地表面気圧のもとの飽和比湿を水面の比湿 (淡水を仮定) とした。

#### (6) 全球解析の改良

LETKF で用いる観測空間での鉛直局所化で用いるガウス関数の局所化スケールの種類について、維持管理の観点から整理を実施した。GA/GSM2303 より前は、衛星観測輝度温度データに対しては荷重関数の 2 乗と  $0.6\sqrt{2}$  スケールハイトを局所化スケール<sup>6</sup>としたガウス関数のうち大きい値で構成される関数を用いていた。従来型観測に対しては 1.2 (地上気圧・地上 GNSS 天頂大気遅延量) または 0.6 (その他従来型観測) スケールハイトを局所化スケールとするガウス関数を局所化関数として使用しているため、合計 3 種類の局所化スケールが存在していた。GA/GSM2303 では、衛星観測輝度温度データに適用するガウス関数についても地上気圧等と同様、1.2 スケールハイトを局所化スケールとするガウス関数に変更し、ガウス関数を用いる場合の局所化スケールを 0.6 スケールハイト、1.2 スケールハイトの 2 種類に整理した。

#### (7) 積雪深解析の改良

積雪分布をより適切に初期値に反映させ、対流圏下層を中心とした予測精度向上を狙い、積雪深解析の改良を実施した。GA/GSM2303 では、積雪深解析の頻度を 1 日 1 回 (18UTC) から 4 回 (00, 06, 12, 18UTC) に高頻度化し、観測データがより早期に反映されるようにした。また、モデル予測値と衛星から推定した積雪域を組み合わせる第一推定値作成処理の改良もあわせて実施した。この改良では、衛星積雪域の誤判定 (見逃し) の影響緩和のため、衛星からの推定で積雪なしと判定されてもただちに積雪深の第一推定値を 0 cm とはせず、積雪深予測値の大小に応じて次第に第一推定値を 0 cm に近づけるようにした。

#### (8) 標高オリジナルデータセットの更新

高解像度化の効果をより引き出すことや、地形に関わる表現の精緻化を通じた北半球の循環等の予測精度向上を目的に、GSM で用いる標高オリジナルデータセットとして用いる数値標高モデル (digital elevation model; DEM) を GTOPO30 (Gesch et al. 1999) から更新した。GA/GSM2303 で新しく利用する主要な DEM として、GTOPO30 よりも高精度・高解像度である MERIT DEM (Yamazaki et al. 2017) を採用した。MERIT DEM には南緯 60 度以南が含まれていないため、南極域については RAMP2 (Liu et al. 2015)

<sup>6</sup> 値が  $e^{-0.5}$  となる距離。

と合わせることで全球 DEM を構成する。

### 3.2.3 検証結果

GA/GSM2303 の現業導入に際して実施した、予測精度を検証するための業務化試験<sup>7</sup>等の結果に基づき、予測精度の変化の概要を示す。

#### (1) 実験設定

対照実験には 2022 年 7 月時点の現業数値予報システムを用いた。以下では、対照実験を CNTL、CNTL に第 3.2.2 項で示した変更と第 3.7 節、第 3.8 節で示す観測データ利用改良を取り込んだ実験を TEST と呼ぶ。なお、ここで示す予測特性の変化については、GA/GSM2303 の影響が主であることを事前の個別の実験等で確認している。実験期間は北半球における夏冬の 2 期間を対象としており、ここではそれぞれ夏期間、冬期間と呼ぶ。実験の解析と予報は以下の期間について実施した。

- 夏期間
  - 解析: 2021 年 6 月 10 日～2021 年 10 月 11 日
  - 予報: 2021 年 6 月 20 日～2021 年 10 月 11 日
- 冬期間
  - 解析: 2021 年 11 月 10 日～2022 年 3 月 11 日
  - 予報: 2021 年 11 月 20 日～2022 年 3 月 11 日

現業運用されている全球解析には、予測を決められた時刻までに提供するための速報解析と、解析値の品質を維持するために観測データの入電を十分待ってから行うサイクル解析の 2 種類があり、業務化試験では現業運用に準じて両方の解析を行う。上の実験期間の解析とはサイクル解析を意味し、速報解析の実施期間は予報と同一になる。なお、両解析と予報の間のデータフローなど、気象庁の全球数値予報システムの全体像については JMA (2023) を参照されたい。

検証対象期間は各予報期間最初の 10 日間を除く期間とした。また、台風検証以外の検証では最後の 11 日間の予報も検証には用いておらず月末日を検証期間の終わりにしている。

#### (2) 北半球 500 hPa 高度場の予測

図 3.2.1 に北半球 500 hPa 高度の予測の二乗平均平方根誤差 (RMSE: Root Mean Square Error) について TEST から CNTL を引いたものを示す。夏期間は 3 日先まで、冬期間は 5 日先までそれぞれ、統計的に有意な改善が見られた。夏期間・冬期間合わせた平均での 2 日先の RMSE の改善幅は約 0.29 m であった。この改善は、実況 (解析値) に対して予測でのリッジやトラフの振幅の誤差のパターンが小さくなった結果であった。TEST は CNTL に対して 500 hPa 高度が系統的に大きい/小さいということはなく、CNTL で実況より振幅が浅い場合・深い場合いずれにおいても、TEST では

より適切にトラフの振幅を表現する事例が多く見られた。例として、図 3.2.2 に GSM が予測するトラフの振幅が実況よりも浅かった場合、深かった場合両方の事例での CNTL、TEST の予測結果を示す。2021 年 12 月 8 日 12UTC の事例では、日本付近のトラフが CNTL の予測では実況より浅かったものの、TEST ではその誤差が軽減された。2021 年 12 月 12 日 12UTC の事例では、沿海州にあるトラフの後面の振幅を CNTL は実況より深く予測していたが、TEST ではその誤差を軽減させていた。この図で示した事例のように、誤差のパターンは変わらないが、TEST では CNTL よりも誤差の振幅が減少する事例が多く見られ、そのことが RMSE の減少に繋がっていた。500 hPa 高度の振幅表現改善は、地形性抵抗の改良や標高データセットの更新の個々の変更単独の試験でも確認されており、これらの改良の効果が大きいと考えられる。

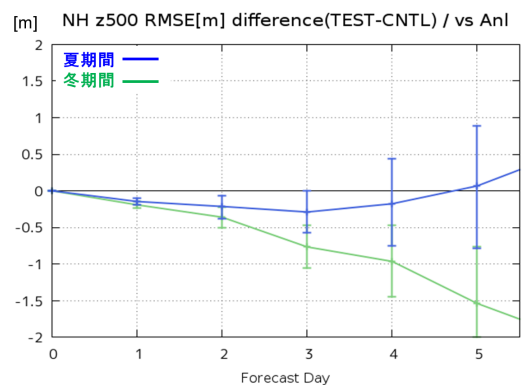


図 3.2.1 北半球 (20°N 以上) での 500 hPa 高度場の解析値に対する RMSE [m] について、TEST から CNTL を引いたもの (縦軸)。横軸は予測時間 [day]。緑線が冬期間で青線が夏期間。縦軸の値が 0 よりも小さければ改善、大きければ改善を意味する。エラーバーは、ブートストラップ法 (リサンプル数 10000) で見積もった 95%信頼区間を表す。

#### (3) 台風予測

図 3.2.3 に実験期間 (夏期間及び冬期間) における台風進路予測の平均誤差を示す。検証は気象庁ベストトラックに対して行っている。図に示すように、TEST は CNTL に対して一貫して進路予測誤差が小さく、FT=0 から FT=72 までで、平均して約 6%の改善が見られた。個々の台風毎に見ても TEST は CNTL に対して進路予測誤差が減少する例が多く、特に進路予測誤差の大きかった 2021 年台風第 6 号、14 号、19 号で大きな改善が見られた (図略)。さらに、台風第 14 号の進路予測改善は降水予測改善にも波及していた。この点については、第 3.2.3 項 (4) で改めて示す。台風の強度予測について、図 3.2.4 に中心気圧の散布図 (横軸: 実況 (気象庁ベストトラック)、縦軸: 48 時間予測値) を示す。CNTL では、散布図が対角線よりも上寄りに分布しており、予測が実況よりも浅い傾向が目立つことを示し

<sup>7</sup> 業務化試験の位置付け・内容については (石田 2017) を参照。

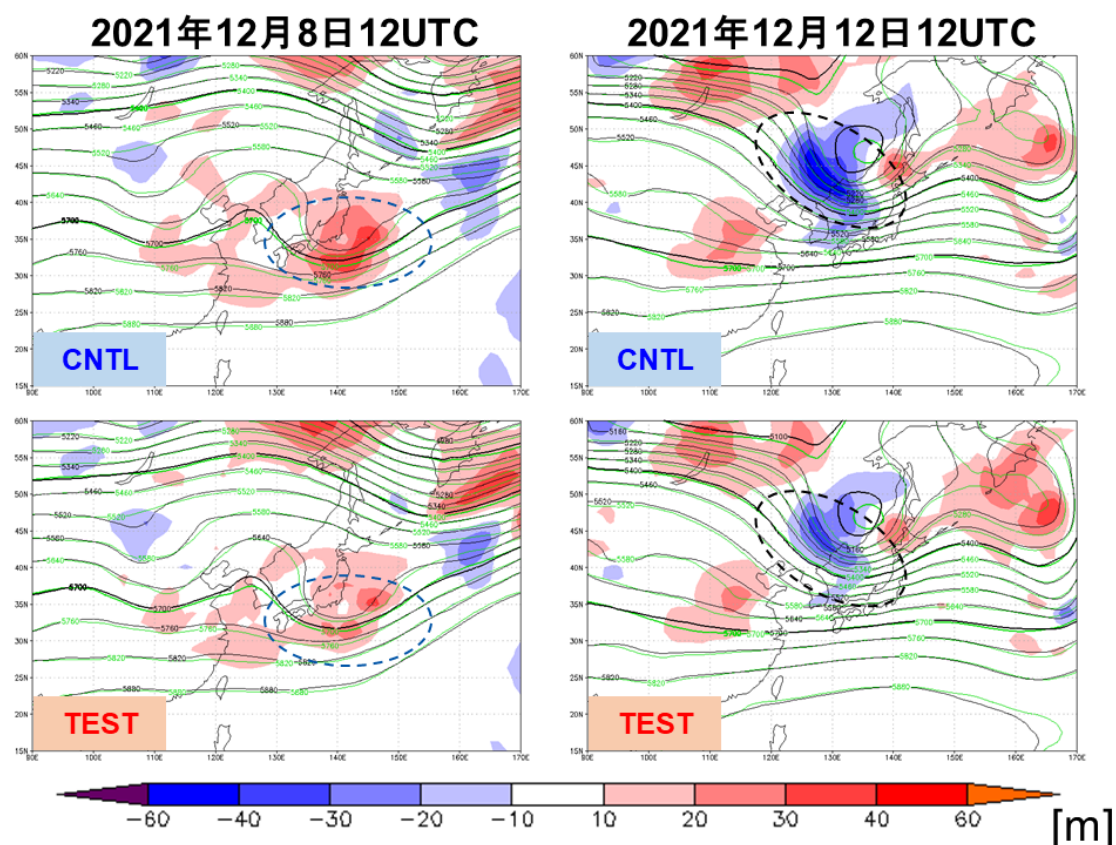


図 3.2.2 (左) 2021 年 12 月 8 日 12UTC、(右) 2021 年 12 月 12 日 12UTC を対象とした、日本周辺の 500 hPa 高度 [m] の 48 時間予測値 (等値線：黒)、解析値 (等値線：緑)、48 時間予測値の対解析誤差 (カラー)。(上) CNTL、(下)TEST。

ている。それに対し、TEST では CNTL より散布図が対角線に近づいた。これは、台風中心気圧が CNTL より深まることで実況との整合性が向上していることを示している。一方で、散布図の左下にある実況よりも発達している台風については、発達の程度が大きくなる。すなわち、CNTL で過発達する台風については、TEST ではその傾向が強まることを示している。なお、急発達時にその表現が不十分である点や、成熟期や衰退期に発達を続けたり衰弱が遅れるといったこれまでの GSM に見られる特徴は継続して見られた (図略)。

#### (4) 日本付近の降水予測

ここでは解析雨量を参照値とした降水予測検証結果について示す。図 3.2.5 は、夏期間における 10 mm/3h を閾値とした降水予測のエクイタブルスレットスコア (ETS) を示す。予報時間を通じて TEST は CNTL よりも ETS が大きく、改善傾向を示している。降水量の閾値別に見た、降水頻度の予測については図 3.2.6 に示すように、TEST では弱い降水 (たとえば 1 mm/3h) の頻度が減少し、強い降水 (たとえば 10 mm/3h) の頻度が増加することで、バイアスコア (BI) が 1 に近づくようになった。冬期間の降水については、図 3.2.7

に示す通り、24 時間予測までは ETS はやや改悪するが、その後は改善に転じ、132 時間予測まで改善が維持された。この予報初期の ETS 改悪は海上主体であり、高解像度化等で降水表現がよりシャープになったことが影響している<sup>8</sup>と考えられる。なお、陸上のアメダス降水量と比較した統計検証では改悪は見られなかった (図略)。開発中に行った実験の結果からは、これらの夏期間の ETS 及び BI の改善や、冬期間の降水予測特性の変化は、特に高解像度化による影響が大きいことがわかっている。

台風進路予測の改善が日本付近の降水予測を改善した例として、図 3.2.8 に 2021 年台風第 14 号に伴う降水予測事例を示す。この事例では、台風第 14 号は実況では福岡県に上陸したのち、9 月 17 日の夜に中国地方にも降水をもたらしていたが、CNTL は実況 (ベストトラック) よりも進路を北に予測し、中国地方には強い降水 (たとえば 20 mm/3h 以上) をもたらさない予測

<sup>8</sup> 高解像度化や降水過程の精緻化で降水がよりシャープになると、位置ずれの影響が出やすく、ETS では不利になる場合 (いわゆる「ダブルペナルティ」の問題) がある。ダブルペナルティの問題についての解説は幾田 (2010) などを参照されたい。

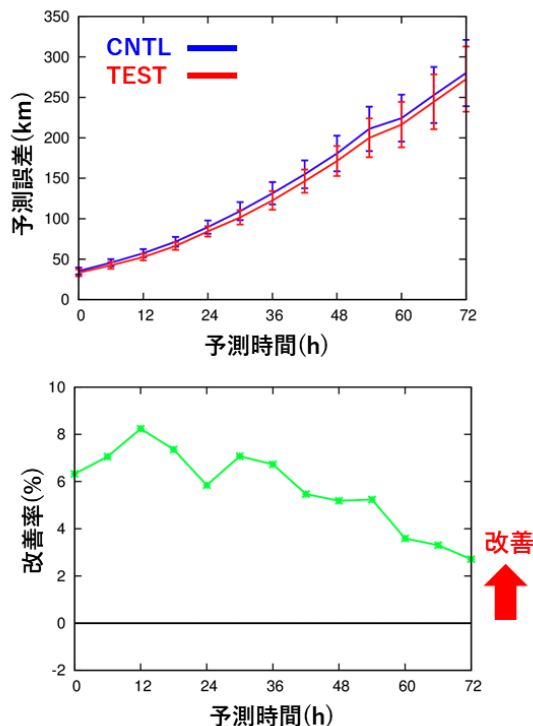


図 3.2.3 夏期間及び冬期間に存在した台風を対象とした台風進路予測の(上)平均誤差 [km] (赤線: TEST、青線: CNTL)、(下)平均誤差の TEST の CNTL に対する改善率 [%]。改善率は (CNTL の平均誤差 - TEST の平均誤差) / (CNTL の平均誤差) × 100 で定義する。

になっていた。TEST は CNTL よりも実況に近い進路を予測しており、中国地方を中心に強い降水を予測し、降水予測も実況に近いものとなっていた。また、この事例では、TEST は CNTL よりも中高緯度のジェット強度やその位置を適切に表現していた(図略)ほか、降水量自体も TEST のほうが実況により近かった。高解像度化や物理過程改良による総観規模の現象の予測改善と、より細かいスケールの降水の表現向上の両方が降水予測改善に寄与したと考えられる。

#### (5) 各種統計検証スコア (冬期間)

図 3.2.9 及び図 3.2.10 に、冬期間について解析値とラジオゾンデ観測値を参照値として、代表的な要素の予測を領域ごとに検証した結果を示す。検証は、アノマリー相関係数 (ACC: Anomaly Correlation Coefficient) またはラジオゾンデ観測に対しては相関係数 (CC: Correlation Coefficient)、RMSE、平均誤差 (ME: Mean Error) とその変化の有意性についてのものである。

冬期間では、対初期値検証・対ラジオゾンデ検証ともに多くの要素で予測時間前半を中心に有意な改善が見られた。特に、北半球での 500 hPa 高度場や 850 hPa 気温、850 hPa や 250hPa の風といった、中高緯度での総観規模擾乱の表現に関わる要素での、RMSE の改善が大きい。

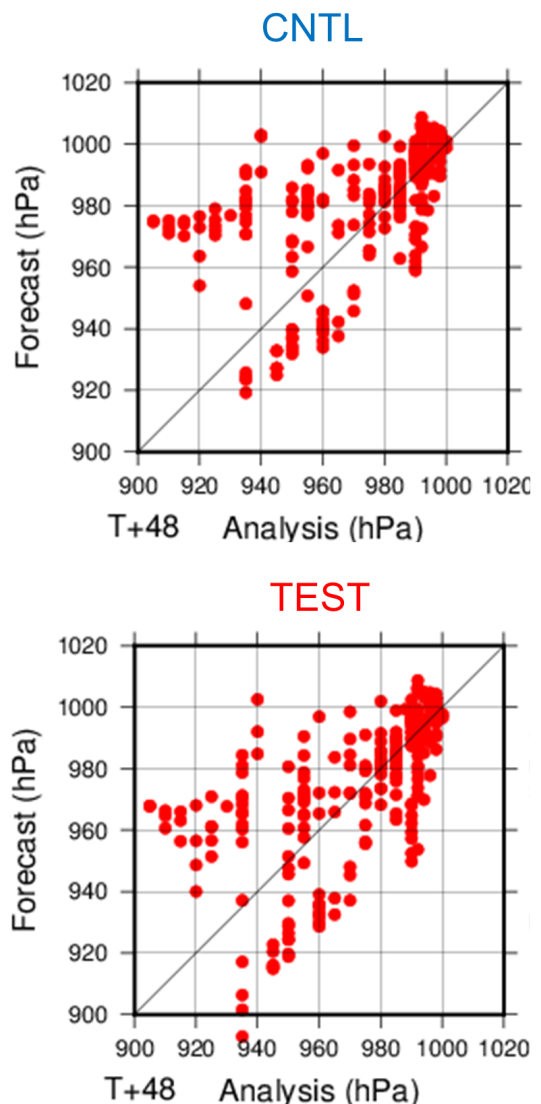


図 3.2.4 夏期間及び冬期間に存在した台風を対象とした中心気圧 [hPa] の散布図。横軸: 実況 (気象庁ベストトラック)、縦軸: 48 時間予測値。(上) CNTL、(下) TEST。

#### (6) 各種統計検証スコア (夏期間)

図 3.2.11 及び図 3.2.12 に、夏期間について解析値とラジオゾンデ観測値を参照値として、冬期間と同様に代表的な要素を領域ごとに検証した結果を示す。

夏期間についても、冬期間同様、北半球での 500 hPa 高度場や 850 hPa 気温、850 hPa や 250hPa の風等の RMSE の改善が見られた。北半球での 500 hPa 高度の対解析 ME や熱帯での 700 hPa 相対湿度の対ラジオゾンデ観測 RMSE 等、一部の要素で改悪は見られるものの、全体としては有意な改善が卓越している。

### 3.2.4 まとめと今後の開発

2023 年 3 月 14 日に実施した全球数値予報システムの更新では、GSM の水平解像度を 20 km から 13km に増強、高解像度化にあわせた力学過程の改良、各種物

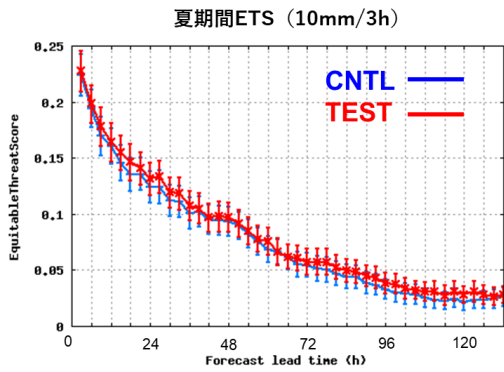


図 3.2.5 夏期間における、閾値 10mm/3h の降水に対する解析雨量を参照値としたエクイタブルスレットスコア (ETS、縦軸)。横軸は予報時間 [ht]。赤線が TEST で青線が CNTL。

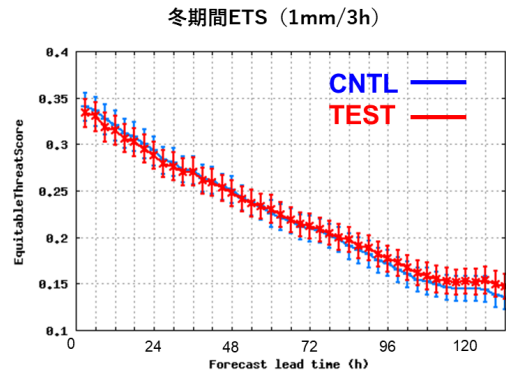


図 3.2.7 図 3.2.5 と同じ。ただし、冬期間における閾値 1 mm/3h の降水について。

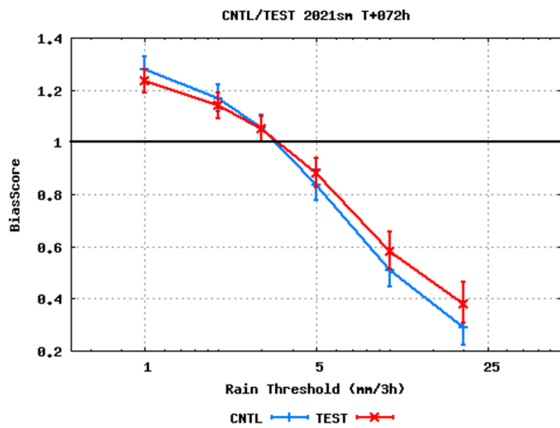


図 3.2.6 夏期間における、3 時間降水量の 72 時間予測の解析雨量を参照値としたバイアススコア (BI、縦軸)。横軸は降水量の閾値 [mm/h]。赤線が TEST で青線が CNTL。

理過程の改良、全球解析及び積雪深解析の高度化を行った。また、モデル標高の作成に用いる標高オリジナルデータセットをより高精度のものに更新した。これらの更新により、北半球 500 hPa 高度予測精度、台風路予測精度、日本付近の降水予測精度などが改善した。北半球 500 hPa 高度については、2 日予測誤差 (RMSE) が約 0.29 m 減少した。これは、地形性抵抗や標高オリジナルデータセットの改良により、誤差のパターンの振幅が小さくなったことによる効果が大きかった。台風予測について、3 日先の進路予測誤差が約 6 % 減少したほか、高解像度化により台風中心気圧は全般的に深くなる傾向が見られた。日本付近の降水予測については、夏期間の 10mm/3h 以上の降水等、降水量の多い事例を中心に精度の改善が見られた。さらに、台風進路予測精度の改善や降水の表現能力向上に伴い、2021 年台風第 14 号等、日本付近の降水予測が大きく改善した例も見られた。

第 10 世代スーパーコンピュータシステム上での GSM

の更新は GSM2303 が最後となるが、今後は次期 (第 11 世代) スーパーコンピュータシステム上での GSM の改良を目指し、引き続き雲・積雲・放射・海面過程等の物理過程の改良を行う。また、重点計画で示した方向性である、GSM の水平解像度 10 km 以下への高分解能化や全球 10 km メッシュの高解像度海面水温解析値の利用の実現に向けた開発も並行して進めている。前者については計算機の性能向上だけに頼らずに、数値予報モデルを将来の計算機の構成に適合させる形で高速化することが重要となる。後者については、高解像度海面水温解析の運用準備ができ次第速やかに数値予報で利用できるよう、海面温度解析値がデータ同化サイクルを含む全球数値予報システムの予測精度に与える影響を予め把握することが重要となる。これらの開発や調査の進捗については、第 4.1 節で報告する。

### 3.2.5 補足：全球モデル (GSM) の仕様

GSM2303 について、力学過程及び物理過程の仕様を表 3.2.1 にまとめる。各過程の詳細については JMA (2023) もあわせて参照されたい。表におけるアウターモデル及びインナーモデルとは、データ同化プロセスにおいて 4 次元変分法やアンサンブル予報の中で用いられるモデルであり、アウターモデルは解析における第一推定値の計算に用いるモデルを、インナーモデルは解析修正量を求める計算やアンサンブル予報に用いるモデルを指す。ただし、4 次元変分法で用いるインナーモデルの物理過程にはバージョンの古いものや簡略化したものが含まれている。

表 3.2.2 に、GSM の水平・鉛直の分解能等の基本仕様の向上や、力学・物理過程の改良についての更新履歴を示す。表の左列に示すように、GSM にはバージョン名が付けられており、変更に伴い改定されている。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」の後ろに付けたもので、例えば、2023 年 12 月時点での最新 GSM のバージョン名は、本稿で示す 2023 年 3 月に運用を開始

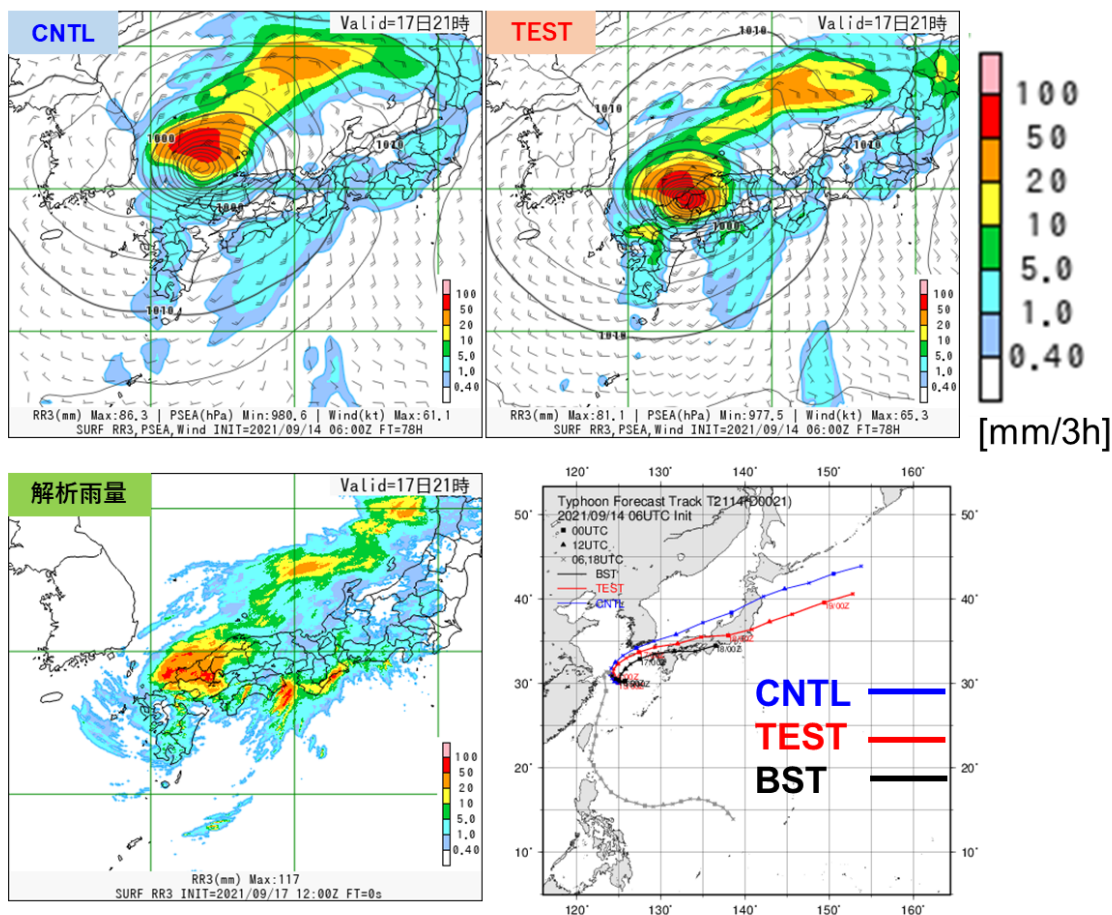


図 3.2.8 2021 年 9 月 17 日 21JST を対象とした、CNTL (左上)、TEST (右上) における 3 時間降水量 (カラー、mm/3h)。CNTL、TEST の初期値は 2021 年 9 月 14 日 06UTC。 (左下) 2021 年 9 月 17 日 21JST における前 3 時間解析雨量 [mm/3h]。 (右下) 2021 年 9 月 14 日 06UTC 初期値における、CNTL (青線)、TEST (赤線) の台風進路予測。黒線は気象庁ベストトラック。

したものであり、「GSM2303」と呼ぶ。表の中の分解能の表記について、はじめの T, TL もしくは TQ は三角形波数切断を意味し、その後の数字は切断波数を表す。T または TQ の場合は 2 次格子<sup>9</sup>、TL の場合は 1 次格子を意味する。また、その後の L は鉛直層を意味し、直後の数字は層数を表す。

<sup>9</sup> T または TQ の場合で数学的な意味に違いはないが、実効解像度を向上させることを目的に 2 次格子を採用している場合は TQ で表記している



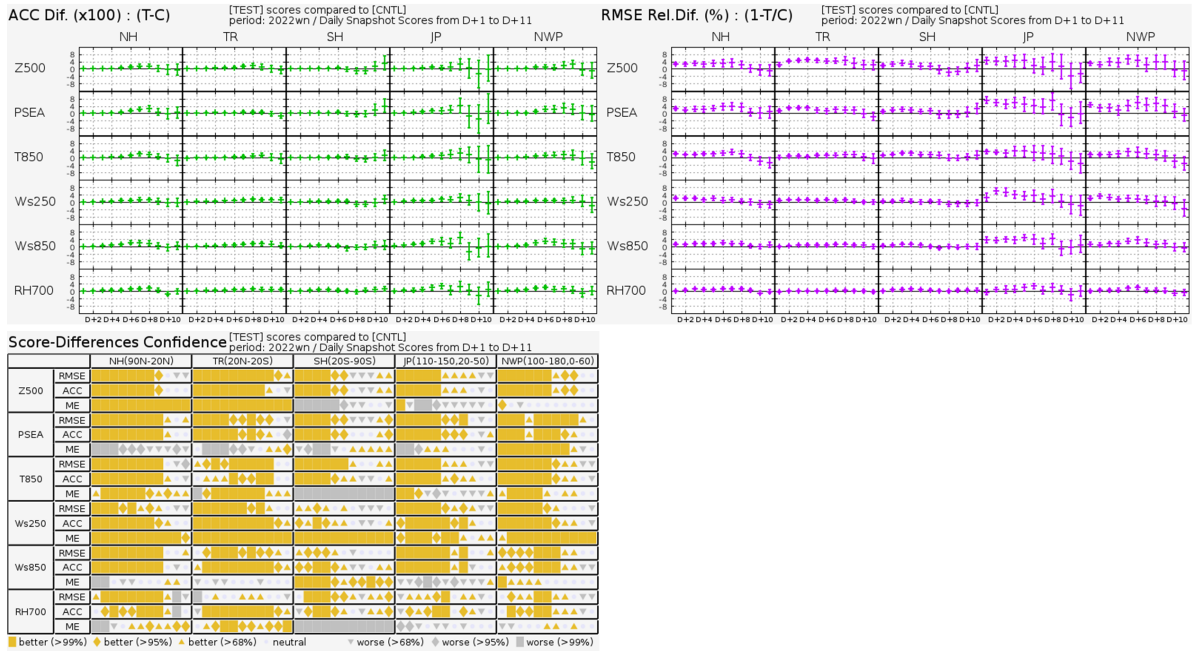


図 3.2.9 冬期間における対流圏主要要素の ACC の改善幅 (左上図)、RMSE の改善率 (右上図) と TEST と CNTL のスコア差の有意性判定 (左下図: スコアカード)。解析値を参照値としている。検証対象の領域は、NH が北半球 (20°N 以北)、TR が熱帯 (20°S-20°N)、SH が南半球 (20°S 以南)、JP が日本周辺 (110°E-150°E, 20°N-50°N)、NWP が北西太平洋領域 (100°E-180°E, 0°-60°N) を意味する。要素は上から 500 hPa 高度 (Z500)、海面更正気圧 (PSEA)、850 hPa 気温 (T850)、250 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 について、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。

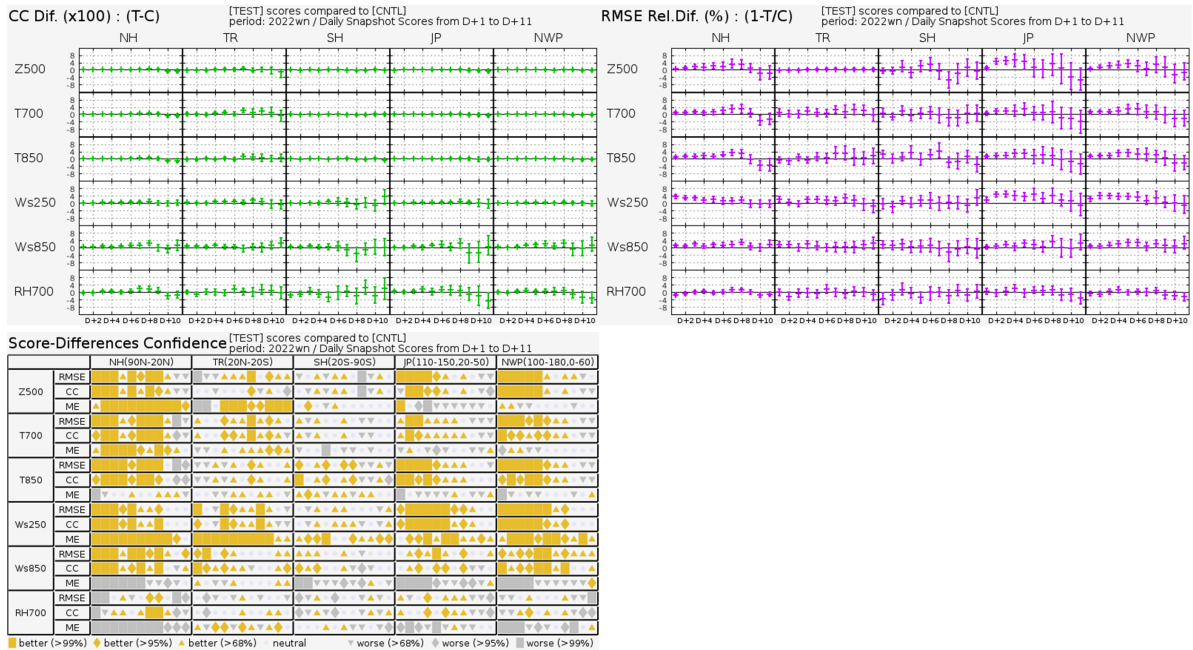


図 3.2.10 冬期間における対流圏主要要素の CC の改善幅 (左上図)、RMSE の改善率 (右上図) と TEST と CNTL のスコア差の有意性判定 (左下図: スコアカード)。ラジオゾンデを参照値としている。検証対象の領域は、NH が北半球 (20°N 以北)、TR が熱帯 (20°S-20°N)、SH が南半球 (20°S 以南)、JP が日本周辺 (110°E-150°E, 20°N-50°N)、NWP が北西太平洋領域 (100°E-180°E, 0°-60°N) を意味する。要素は上から 500 hPa 高度 (Z500)、700 hPa 気温 (T700)、850 hPa 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、CC、ME について、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。



表 3.2.1 GSM の仕様 (2023 年 3 月時点)

力学過程		
支配方程式	プリミティブ方程式系	
予報変数	東西風、南北風、気温、比湿、雲水量、地上気圧の対数	
離散化	水平：球面調和関数を基底関数としたスペクトル法、鉛直：有限差分法	
水平格子系	適合ガウス格子 (宮本 2005)	
水平分解能	予報モデル及びアウトターモデル：TQ959 (格子間隔約 13 km : 0.125 度)、インナーモデル：TL319 (格子間隔約 55 km : 0.5625 度)	
鉛直座標系	$\sigma - p$ ハイブリッド座標 (Simmons and Burridge 1981)	
層数 (最上層)	128 層 (0.01 hPa)	
移流+時間積分	2 タイムレベル セミインプリシット - セミラグランジアン法 (Yukimoto et al. 2011)	
積分時間間隔	300 秒 (TQ959)、600 秒 (TL319)	
数値拡散	4 次の線形水平拡散を渦度、発散、仮温度に適用。スポンジ層として 2 次の線形水平拡散を 30 hPa より上層で発散に適用。	
物理過程		
放射	長波	2 方向吸収近似 (Yabu 2013) による放射伝達、大気分子による吸収は 2 種類の $k$ -分布法で評価 (Fu and Liou 1992; Chou et al. 2001)。雲はマキシマム-ランダムオーバーラップ (Geleyn and Hollingsworth 1979) を仮定。光学特性は、水雲は Lindner and Li (2000)、氷雲は Ebert and Curry (1992) による。
	短波	$\delta$ -Eddington 法による散乱・吸収計算 (Joseph et al. 1976; Coakley et al. 1983)。雲はマキシマム-ランダムオーバーラップを仮定し、Collins (2001) に基づく簡略化した独立カラム近似を適用。光学特性は、水雲は Dobbie et al. (1999)、氷雲は Ebert and Curry (1992) による。
積雲対流	予測型クロージャアを用いるスペクトル型マスマックススキーム (Arakawa and Schubert 1974; Moorthi and Suarez 1992; Randall and Pan 1993)。雲モデルには氷相を考慮した簡易な雲微物理過程を用いる。	
雲	確率密度関数に基づいた凝結スキーム (Smith 1990) を基本に、雲水から降水への変換や再蒸発、雪の融解などの簡易な雲微物理過程、及び雲氷と雪の落下スキームを含む。また、層積雲に関する診断的スキーム (Kawai and Inoue 2006) を使用。	
境界層	乱流エネルギークロージャア型 (Mellor and Yamada 1974, 1982) と K クロージャア型 (Han and Pan 2011) のハイブリッドスキーム。	
地形性抵抗	Lott and Miller (1997) のスキームに Wells and Vosper (2010) 及び Vosper (2015) に基づく改良を加えたもの。Beljaars et al. (2004) のスキームにより乱流地形抵抗を扱う。	
非地形性重力波	緯度依存性を持つ定数筋起源によるスペクトルパラメタリゼーション (Scinocca 2003)。	
地表面	Monin-Obukhov 相似則に基づくバルク式、安定度関数は Beljaars and Holtslag (1991) を用いる。開水面と海水面は Best et al. (2004) の手法により混在格子として扱う。	
陸面	植生	Sellers et al. (1986) によるスキームを改良した手法でモデル化。
	積雪	体積、密度、アルベド、温度等の変化を予測。部分積雪を扱う。
	土壌	熱伝導はフーリエの法則に従い、水分の移動及び凍結・融解が考慮される。
海水	体積・形状・密度不変で物性が一様な熱伝導体として扱う。内部の熱伝導はフーリエの法則に従い、表面では放射と乱流フラックスの上部境界条件、及び融解を考慮する。	
化学過程	成層圏での簡易な診断型メタン酸化及び光乖離スキーム (Untch and Simmons 1999)。	
海面水温	時間発展は、全球海面水温解析値の平年偏差を、予測時間により季節変動する気候値に加える。	
海水分布	時間発展は、南北半球ごとの全球海水密度解析値の海水面積平年偏差を維持するように、海水密度の初期偏差固定予測値を気候値で修正する手法で扱う。	

## 参考文献

- Arakawa, A. and W. H. Schubert, 1974: Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment, Part I. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 674–701.
- 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.
- Beljaars, A. C. M. and A. A. M. Holtslag, 1991: Flux Parameterization over Land Surfaces for Atmospheric Models. *J. Appl. Meteor.*, **30**, 327–341.
- Best, M. J., A. C. M. Beljaars, J. Polcher, and P. Viterbo, 2004: A proposed structure for coupling tiled surfaces with the planetary boundary layer. *J. Hydr. Meteorol.*, **5**, 1271–1278.
- Chou, M.-D., M. J. Suarez, X.-Z. Liang, and M. M.-H. Yan, 2001: A thermal infrared radiation parameterization for atmospheric studies. *Technical report series on global modeling and data assimilation, Vol. 19, NASA Goddard Space Flight Center*, 56pp.
- Coakley, J. A., R. D. Cess, and F. B. Yurevich, 1983: The effect of tropospheric aerosols on the earth's radiation budget: a parameterization for climate models. *J. Atmos. Sci.*, **40**, 116–138.
- Collins, W. D., 2001: Parameterization of Generalized Cloud Overlap for Radiative Calculations in General Circulation Models. *J. Atmos. Sci.*, **58**, 3224–3242.
- 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.
- Dobbie, J. S., J. Li., and P. Chýlek, 1999: Two-and four-stream optical properties for water clouds and solar wavelengths. *J. Geophys. Res.*, **104**, 2067–2079.
- Ebert, E. E. and J. A. Curry, 1992: A parameterization of ice cloud optical properties for climate models. *J. Geophys. Res.*, **97**, 3831–3836.
- Fu, Q. and K. N. Liou, 1992: On the correlated k-distribution method for radiative transfer in nonhomogeneous atmospheres. *J. Atmos. Sci.*, **49**, 2139–2156.
- Geleyn, J.-F. and A. Hollingsworth, 1979: An economical analytical method for the computation of the interaction between scattering and line absorption of radiation. *Contrib. Atmos. Phys.*, **52**, 1–16.
- Gesch, D. B., K. L. Verdin, and S. K. Greenlee, 1999: New land surface digital elevation model covers the Earth. *Eos Trans. AGU*, **80**, 69.

表 3.2.2 GSM の主な更新履歴

バージョン	主な変更内容
GSM8803	運用開始。仕様は T63L16、最上層 10 hPa
GSM8911	T106L21 へ仕様向上、ハイブリッド座標系と新陸面過程の導入
GSM9603	T213L30 へ仕様向上、新積雲対流過程の導入
GSM9912	雲水スキームの導入、積雲対流過程と放射過程の改良
GSM0103	T213L40・最上層 0.4 hPa へ仕様向上、積雲対流過程の改良
GSM0305	積雲対流過程の改良、及び雪の近赤外アルベドの調整
GSM0407	層積雲スキームの導入、雲氷落下・積雲対流過程の改良、氷床アルベドの調整
GSM0412	晴天放射スキームの改良
GSM0502	TL319L40 へ仕様向上、セミラグランジュ移流スキームの導入
GSM0507	放射過程における雲の取扱いの改良、オゾン気候値の改定
GSM0711	TL959L60・最上層 0.1 hPa へ仕様向上、時間積分の 2 タイムレベル化、エロゾル気候値の改定
GSM0801	積雲対流過程の改良
GSM0808	力学過程の改良、適合ガウス格子の採用
GSM1212	層積雲スキームの改良
GSM1304	放射過程（エロゾル気候値、水蒸気吸収係数）の改良
GSM1403	TL959L100・最上層 0.01 hPa へ仕様向上、放射・境界層・重力波・積雲過程の改良、陸面初期値利用の改良
GSM1603	積雲対流・雲・陸面・放射・海水・海面過程、及び力学過程の改良
GSM1705	積雲対流・雲・陸面・放射・海水過程、及び力学過程の改良
GSM2003	地形性抵抗・非地形性重力波・境界層・陸面・雲・海水過程の改良
GSM2103	TL959L128 へ仕様向上、積雪、土壌水分初期値利用の改良
GSM2303	TQ959L128 へ仕様向上、地形性抵抗・非地形性重力波・放射過程の改良、地形オリジナルデータセットの更新

- Han, J. and H.-L. Pan, 2011: Revision of Convection and Vertical Diffusion Schemes in the NCEP Global Forecast System. *Weather and Forecasting*, **26**, 520–533.
- Hogan, R. J. and A. Bozzo, 2015: Mitigating errors in surface temperature forecasts using approximate radiation updates. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **7**, 836–853.
- Hogan, R. J. and S. Hirahara, 2016: Effect of solar zenith angle specification in models on mean short-wave fluxes and stratospheric temperatures. *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 482–488.
- 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.
- 幾田泰醇, 2010: 高分解能モデルの降水予報精度評価に適した検証手法. 平成22年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 11–17.
- 石田純一, 2017: 数値予報システム開発のプロセス. 数値予報課報告・別冊第63号, 気象庁予報部, 4–10.
- JMA, 2023: *Outline of the Operational Numerical Weather Prediction at the Japan Meteorological Agency*. Japan, 252 pp., (Available online at <http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline2023-nwp/index.htm>).
- Joseph, J. H., W. J. Wiscombe, and J. A. Weinman, 1976: The delta-Eddington approximation for radiative flux transfer. *J. Atmos. Sci.*, **33**, 2452–2459.
- Kawai, H. and T. Inoue, 2006: A Simple Parameterization Scheme for Subtropical Marine Stratocumulus. *SOLA*, **2**, 17–20.
- 気象庁, 2022a: 全球モデルの水平分解能向上、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.
- 気象庁, 2022b: 全球解析システムの改良. 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, 76–83.
- 気象庁, 2023: メソモデルの鉛直層増強、予報時間延長. 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, 21–24.
- Kosaka, Y., S. Kobayashi, Y. Harada, C. Kobayashi, H. Naoe, K. Yoshimoto, M. Harada, N. Goto, J. Chiba, K. Miyaoka, R. Sekiguchi, M. Deushi, H. Kamahori, T. Nakaegawa, T. Y. Tanaka, T. Tokuhira, Y. Sato, Y. Matsushita, and K. Onogi, 2024: The JRA-3Q Reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **102**.
- 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, 気象庁, **73** 特別号, S1–S18.
- Lindner, T. H. and J. Li, 2000: Parameterization of the Optical Properties for Water Clouds in the Infrared. *J. Climate*, **13**, 1797–1805.
- Liu, H., K. Jezek, B. Li, and Z. Zhao, 2015: *Radarsat Antarctic Mapping Project Digital Elevation Model, Version 2*. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center.
- 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.
- Mellor, G. L. and T. Yamada, 1974: A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 1791–1806.
- Mellor, G. L. and T. Yamada, 1982: Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **20**, 851–875.
- 宮本健吾, 2005: 適合ガウス格子. 数値予報課報告・別冊第51号, 気象庁予報部, 39–42.
- Moorthi, S. and M. J. Suarez, 1992: Relaxed Arakawa-Schubert: A parameterization of moist convection for general circulation models. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 978–1002.
- 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. Modell.*, **51**, 4.13–4.14.
- Randall, D. and D.-M. Pan, 1993: Implementation of the Arakawa-Schubert cumulus parameterization with a prognostic closure. *The representation of cumulus convection in numerical models, AMS Meteorological Monograph Series*, **46**, 137–144.
- 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.
- Scinocca, J. F., 2003: An accurate spectral nonorographic gravity wave drag parameterization for general circulation models. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 667–682.
- Sellers, P. J., Y. Mintz, Y. C. Sud, and A. Dalcher, 1986: A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. *J. Atmos. Sci.*, **43**, 505–531.
- 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.

- Simmons, A. J. and D. M. Burridge, 1981: An energy and angular-momentum conserving vertical finite-difference scheme and hybrid vertical coordinates. *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 758–766.
- Smith, R. N. B., 1990: A scheme for predicting layer clouds and their water content in a general circulation model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **116**, 435–460.
- Sun, Z., 2001: Reply to comments by Greg M. McFarquhar on ‘Parametrization of effective sizes of cirrus-cloud particles and its verification against observations’. (October B, 1999, 125, 3037–3055). *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **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.
- Untch, A. and A. J. Simmons, 1999: Increased stratospheric resolution in the ECMWF forecasting system. *ECMWF Newsletter*, **82**, 2–8.
- Vosper, S. B., 2015: Mountain waves and wakes generated by South Georgia: Implications for drag parametrization. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **141**, 2813–2827.
- Wells, H. and S. B. Vosper, 2010: The accuracy of linear theory for predicting mountain-wave drag: Implications for parametrization schemes. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **136**, 429–441.
- Wyser, K., 1998: The Effective Radius in Ice Clouds. *J. Climate*, **11**, 1793–1802.
- Yabu, S., 2013: Development of longwave radiation scheme with consideration of scattering by clouds in JMA global model. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, **43**, 4.07–4.08.
- Yamazaki, D., D. Ikeshima, R. Tawatari, T. Yamaguchi, F. O’Loughlin, J. C. Neal, C. C. Sampson, S. Kanae, and P. D. Bates, 2017: A high-accuracy map of global terrain elevations. *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 5844–5853.
- Yukimoto, S., H. Yoshimura, M. Hosaka, T. Sakami, H. Tsujino, M. Hirabara, T. Y. Tanaka, M. Deushi, A. Obata, H. Nakano, Y. Adachi, E. Shindo, S. Yabu, T. Ose, and A. Kitoh, 2011: Meteorological Research Institute-Earth System Model Version 1 (MRI-ESM1) –Model Description–. *Technical Reports of the Meteorological Research Institute*, **64**, 1–83.