

第4章 数値予報システムの開発進捗

4.1 全球モデルの物理過程改良

4.1.1 はじめに

気象庁では、第10世代スーパーコンピュータシステムにおける数値予報システムの開発計画(本田 2018)及び「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」(気象庁 2018)に沿い、全球数値予報システムの開発を進めている。

昨年度(令和3年度)は、前線や細かい地形に伴う降水等の現象の表現向上や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、気象庁全球モデル(GSM)の水平格子間隔の20 kmから13 kmへの高解像度化、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の開発を進めた(気象庁 2022a)。また、全球解析においては、積雪深解析の1日1回から4回実施への高頻度化や、局所アンサンブル変換カルマンフィルタにおける局所化スケールの見直しの改良も進めた(気象庁 2022b)。その後、令和4年度末の全球数値予報システムの更新を目指し、これら全球モデルと全球解析の改良を組み合わせた仕様での準リアルタイム実行による確認を令和4年2月から開始した。準リアルタイム実行結果では、500 hPa 高度や850 hPa 気温等標準的な要素のスコア改善(図 4.1.1)や、日本域の降水の細かい表現の向上等、これまでの開発で得られた実験結果と統合的なインパクトを確認している。

令和4年度は、準リアルタイム実行と並行して、モデル更新時の更なる予測精度向上を目的に、非地形性重力波過程の改良や、標高オリジナルデータセットの更新といった開発を進めた。非地形性重力波過程は、主に成層圏の循環場へのインパクトが主となるが、衛星観測と第一推定値の整合性向上などの初期値改善を通じて対流圏の短期予測精度にも影響する。また、標高オリジナルデータセットは、モデル標高や、地形性抵抗過程で用いられるモデル格子間隔より小さい空間スケールの地形の分散等の統計量の精緻化を通じて、特に北半球の循環場の予測精度に大きく影響する。全球モデル高解像度化の効果を引き出すための地形表現の精緻化という観点でも、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することは重要となる。

本節では、これら過程の改良に向けた開発状況について報告する。特に、それぞれの開発において、非地形性重力波過程の改良では成層圏の気温や風速のバイアス軽減や衛星観測と第一推定値の整合性向上が得られたこと、標高オリジナルデータセットの更新では北半球の循環場の予測精度向上が得られたことについて示す。

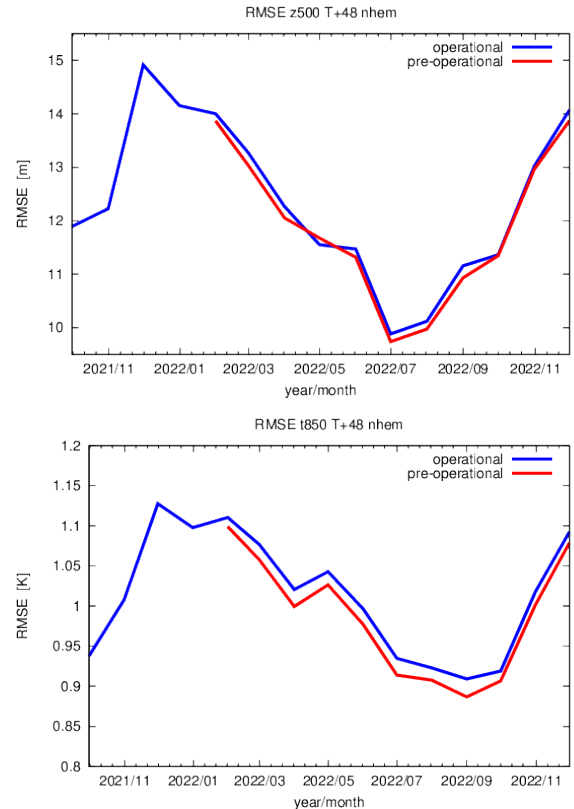


図 4.1.1 北半球域(20°N–90°N)、48時間予測における(上)500 hPa 高度[m]、(下)850 hPa 気温[K]の月平均RMSEの2021年10月から2022年12月までの時系列。青: 現GSM、赤: 準リアルタイム実行のGSM。準リアルタイム実行は2022年2月から表示。

4.1.2 非地形性重力波過程の改良

GSMでは、力学過程が解像できない空間スケール(以下、サブグリッドスケール)の現象はパラメタリゼーションで表現している。サブグリッドスケールの重力波による運動量輸送のうち、積雲対流活動や前線及びジェット近傍などで励起される、地形に起因しない重力波による効果は、非地形性重力波過程としてScinocca(2003)に基づくパラメタリゼーションで表現している。Scinocca(2003)に基づく手法は、2014年3月からGSMに導入され(Yonehara et al. 2014)、中層大気の気温や風の系統誤差減少、予測精度の向上、熱帯下部成層圏における準2年周期振動(QBO: Quasi-biennial Oscillation)の再現性向上に貢献した。一方で、成層圏では、冬(夏)半球高緯度域で東西風の負(正)バイアス・気温の正(負)バイアスや、QBOの周期が現実よりも短い等の系統誤差は未だ残っている。特に、東西風や気温のバイアスは予測の時間スケールを問わず見られる。また、QBOは周期の長い現象であるものの、その再現性はデータ同化サイクルを通じて、短期予測の精度にも影響する。本項で述べる改良では、これら系統

誤差の減少やそれを通じた予測精度向上を目的に、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。

(1) 射出フラックスの緯度依存性の精緻化

Scinocca (2003) の非地形性重力波パラメタリゼーションによる水平風の時間変化率は、水平運動量フラックスの鉛直収束として、以下の式で表される。

$$\left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}\right)_{\text{NGW}} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial z} \quad (4.1.1)$$

ここで、 \mathbf{u} , \mathbf{F} , ρ はそれぞれ、水平風ベクトル [m/s]、パラメタライズされた水平運動量フラックス [Pa]、大気の密度 [kg m^{-3}] である。各高度における \mathbf{F} は、散逸過程として振幅飽和とクリティカルレベルフィルタリングを考慮して計算される。振幅飽和について、射出高度から射出された運動量フラックスは、重力波の振幅が小さい場合はフラックスを保存させながら鉛直伝播する。一方、鉛直伝播に伴って振幅が大きくなり飽和に達した場合は、重力波の位相速度と方位角の関数として定式化された飽和フラックスを超えた分を環境場に返し、環境場を加速または減速させる。クリティカルレベルフィルタリングについて、流れに対して位相速度がゼロになる高度（クリティカルレベル）に到達すると、重力波はそれより上方に伝播できないという性質がある。Scinocca (2003) のスキームでは、その性質を考慮しており、クリティカルレベルに到達すると運動量フラックスをすべて環境場に返し、それより上方に伝播するフラックスを 0 として扱う。振幅飽和及びクリティカルレベルフィルタリングの定式化の詳細は Scinocca (2003) 及び金浜・山田 (2019) を参照されたい。

Scinocca (2003) のスキームにおいて、運動量フラックスが射出される高度（GSM では 450 hPa で固定）やその大きさは、予測結果に大きな影響を持ち、誤差や不確実性のソースでもある。本節で示す改良では、この射出高度におけるフラックスの大きさの定式化を精緻化する。これは、射出フラックスの大きさは、子午面循環を通じて、現在の GSM に見られる東西風や気温の系統誤差に影響していると考えられるためである。射出フラックスが大きくなると、一般には、成層圏での東西風の変化が早まる。このことは QBO の周期を短くしたり、冬半球の極渦を弱める他、上部成層圏～中間圏での夏半球から冬半球への子午面循環を強めるように働く¹。また、子午面循環に伴う冬半球側での下降流の強化は断熱昇温を強めるため、冬半球側を高温化させるようにも働く。これらの効果は現在の GSM で見られる系統誤差と整合しており、射出フラックス

¹ 冬半球の西風の減速とバランスさせるため、南北風に伴うコリオリ力による西風加速が必要になる。

が過大であることが現在の誤差のソースになっていると考えられる。

射出フラックスの定式化の変更

2022 年 12 月時点での GSM では、射出高度における位相速度、方位角で積分した射出フラックスの大きさ F_0 は緯度 $y[^\circ]$ の関数として、以下の式で定式化されている。

$$F_0 = \rho_0 F_{\text{launch}} \eta \quad (4.1.2)$$

$$\eta = 1 - (1 - A) \exp\left(-\left(\frac{y}{2w}\right)^2\right) \quad (4.1.3)$$

ここで、 $\rho_0 F_{\text{launch}} = 3.5 \times 10^{-3}$ Pa, $A = 0.55$, $w = 10^\circ$ である。

本節で示す改良では、 F_0 の緯度依存性を以下のように変更する。

$$F_0 = \rho_0 F_{\text{launch,bs}} \eta \quad (4.1.4)$$

$$\eta = 1 - (1 - B) \exp\left(-\left(\frac{y}{2w_{\text{eq}}}\right)^2\right) - (1 - C) \exp\left(-\left(\frac{y - 90 \text{sgn}(y)}{2w_{\text{pl}}}\right)^2\right) \quad (4.1.5)$$

$$B = \frac{\rho_0 F_{\text{launch,eq}}}{\rho_0 F_{\text{launch,bs}}} \quad (4.1.6)$$

$$C = \frac{\rho_0 F_{\text{launch,pl}}}{\rho_0 F_{\text{launch,bs}}} \quad (4.1.7)$$

ここで、 $\rho_0 F_{\text{launch,bs}} = 3.2 \times 10^{-3}$ Pa, $\rho_0 F_{\text{launch,eq}} = 1.8 \times 10^{-3}$ Pa, $\rho_0 F_{\text{launch,pl}} = 0.6 \times 10^{-3}$ Pa, $w_{\text{eq}} = 10^\circ$, $w_{\text{pl}} = 7.5^\circ$ である。

図 4.1.2 は変更前後の射出フラックスの緯度依存性を表したものである。改良後は赤道付近では $\rho_0 F_{\text{launch,eq}}$ 、中緯度では $\rho_0 F_{\text{launch,bs}}$ 、高緯度では $\rho_0 F_{\text{launch,pl}}$ に近づくような分布をしており、全体的に改良前よりも射出フラックスは小さく、特に高緯度で射出フラックスが小さくなるように調整されている。本改良は系統誤差を小さくするための調整の側面もあるが、物理過程におけるパラメータの不確実性の範囲内の調整であると考えられる。また、水平解像度が高くなるほど格子スケールで解像する重力波の寄与が大きくなると考えられるため、サブグリッドスケールでの射出フラックスを小さくする変更は高解像度化で向かうべき変化と整合していると考えられる。中緯度から極にかけての射出フラックスの減少は、ジェット・前線等の空間的分布に伴う重力波発生源の偏りを簡便な形で考慮していると解釈できる。

(2) 安定時の鉛直拡散係数の調整

GSM の境界層過程では、Mellor and Yamada (1974) のレベル 2 スキームに基づくものと局所渦スキームのハイブリッドアプローチを採用しており、両者のうち拡散係数が大きい方を計算に用いる (米原 2019)。ま

た、GSMの境界層過程は大気境界層に限らず、モデル大気全体で計算されている。成層安定な対流圏上層や成層圏では局所渦スキームによる拡散係数が主に適用されており、自由大気において予測精度や計算安定性維持のために微小な鉛直拡散をかける役割を果たしている。一方で、対流圏上部や下部成層圏で鉛直拡散をかけることは、風速の鉛直シアを過剰に弱めることにもなる。これは、重力波が鉛直伝播する過程でクリティカルレベルに遭遇しにくくなるという点で非地形性重力波過程とも関連があり、水平風の減速やQBOの再現性にも影響を及ぼしうる。そのため、局所渦スキームで求まる拡散係数の計算における安定時の安定度関数について、ある気圧（以下、遷移気圧）より上層で徐々に小さくなるような減衰係数をかけて拡散係数を減衰させている（気象庁 2021）。本節で示す改良では、非地形性重力波過程における射出フラックスの改良と併せて、遷移気圧をより下層に設定し成層圏では鉛直拡散の影響が小さくなるよう、調整を行った。具体的には、現在のGSMでは600 hPaから50 hPaの間で気温の鉛直勾配が -2K km^{-1} より大きく、かつ比湿が 0.02 g kg^{-1} より小さい最も高度の低い層を遷移気圧²としていたものを、下層側にさらに100 hPaずらすように変更した。

(3) 改良の効果

射出フラックスの精緻化及び安定時の鉛直拡散係数の調整（以下、まとめて「非地形性重力波過程の改良」と呼ぶ）の効果を確認するため、AMIP³型実験によるQBO再現性の検証、解析予報サイクル実験による予測精度へのインパクトの検証を行った。対照実験としては、2022年2月に準リアルタイム実行を開始した水平解像度が13 kmに増強された全球数値予報システム及びその予報モデルの低解像度版を用いた。以下では、対照実験をCNTL、非地形性重力波過程の改良を適用したものをTESTNGWと呼ぶ。

AMIP型実験

水平解像度約80 kmのGSMを用いてAMIP実験を実施し、解析予報サイクル実験のみでは検証が困難であるQBOの再現性を評価した。積分期間は1990年1月から2020年12月までの31年間である。最初の1年はスピンアップとして、積分開始2年目以降の期間を評価した。下部境界値としては、気象庁海洋気象情報室によって整備されたMGDSST再解析値（栗原ほか2006）及び、海水解析値データセット（Ishii et al. 2005; Matsumoto et al. 2006）の日別解析値を時間内挿して与えた。

² 両者の条件を満たさなかった場合は350 hPaを遷移気圧とする。

³ Atmospheric Model Intercomparison Projectの略で、観測された月別海面水温・海水分布を境界条件に与えて積分した過去実験の結果をモデル間で比較する、大気モデル相互比較プロジェクト（Gates 1992; Gates et al. 1999）。

図4.1.3は、 5°N - 5°S で平均した、AMIP実験期間の最後の10年間における帯状平均東西風[m/s]の時間-高度断面図を表している。欧州中期予報センターが作成した再解析であるERA5(Hersbach et al. 2020)では、100 hPaから5 hPaにおいて、東西風の正負が約2年ごとに入れ替わるQBOに対応する変動が見られるのに対し、CNTLではその周期がERA5よりも短い。TESTNGWでは、熱帯域での射出フラックスが減少したことに伴い、成層圏に伝播する運動量フラックスも減少したことで、東西風の変化がよりゆっくりとなる。その結果、QBOの周期が伸び、ERA5とより整合するようになる。また、TESTNGWでは、100 hPaから50 hPa付近の東西風の振幅が大きくなり、ERA5とより整合するようになる。振幅の増加については、下部成層圏の安定時鉛直拡散係数が小さくなったことで、西風位相の表現が改善されたことに起因する。

解析予報サイクル実験

非地形性重力波過程の改良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、解析予報サイクル実験を実施した。実験は夏期実験として2020年8月、冬期実験として2020年1月の2期間を実施した。夏期実験と冬期実験で主なインパクトは共通しているため、ここでは、冬期実験の結果の主なインパクトのみ述べる。

図4.1.4（上）は、CNTLにおけるマイクロ波気温サウンダであるAMSU-Aの輝度温度について、特に成層圏の気温に感度のあるch13による観測値と第一推定値の差(O-B)を示したものである。ch13のO-Bでは、北半球と南半球にそれぞれについて負バイアス、正バイアスが顕著に見られる。これは成層圏の気温の第一推定値が北半球（冬半球）で高温、南半球（夏半球）で低温バイアスを持つことに対応する。図4.1.4（下）で示すO-BのTESTNGWとCNTLの差で見ると、TESTNGWは南北両半球で見られるバイアスを軽減するように変化する。またバイアスだけでなく、O-Bの標準偏差についてもTESTNGWはCNTLよりも小さくなった（図略）。これらのことから、成層圏の気温に感度のある衛星観測について、観測値と第一推定値の整合性は向上したと言える。更に、成層圏の風の第一推定値についても、熱帯を中心に観測値との整合性が向上した。図4.1.5は、熱帯域におけるラジオゾンデ東西風O-Bの標準偏差の変化率を示している。対流圏上層から下部成層圏にあたる100 hPaから50 hPa付近を中心に、TESTNGWは、CNTLに対してO-Bの標準偏差の大幅な減少が見られる。

予測においても、成層圏の気温や東西風の誤差の減少が見られた。図4.1.6は、2020年1月で期間平均した帯状平均東西風及び気温の5日予測値のCNTLのMEおよびTESTNGWとCNTLの差、RMSE改善率を示している。図4.1.6(a)で示すとおり、CNTLで

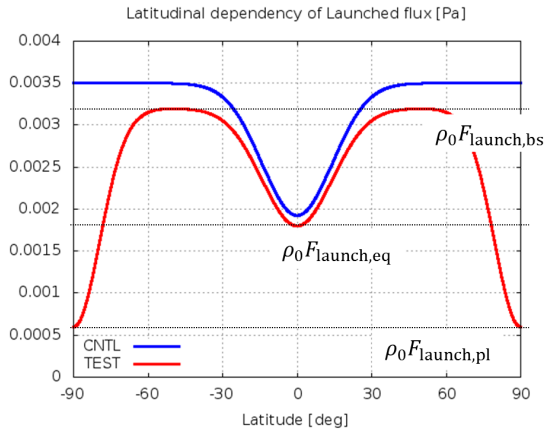


図 4.1.2 射出フラックスの緯度依存性。縦軸は射出フラックス F_0 [Pa]、横軸は緯度 [°]。青：改良前、赤：改良後。

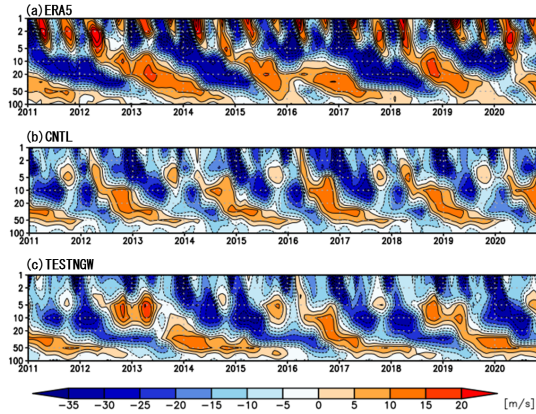


図 4.1.3 AMIP 実験における、 5°N - 5°S で平均した 2011 年から 2020 年までの帯状平均東西風 [m/s] の時間-高度断面図。縦軸は気圧 [hPa]。(a)ERA5、(b)CNTL、(c)TESTNGW。

は、成層圏において北（南）半球高緯度で東西風の負（正）バイアス、気温の正（負）バイアスが見られるが、TESTNGW ではその誤差が減少する（図 4.1.6(b)）。解析予報サイクル実験で見られた、東西風と気温の変化は、第 4.1.2 項 (1) で述べた、射出フラックスが変化することに伴う子午面循環の変化の仕組みと整合的である。なお、TESTNGW における成層圏の東西風や気温のバイアス減少は、AMIP 実験においても見られており、モデルの解像度や予測の時間スケールを問わず改善した（図略）。また、南半球の高緯度においては、東西風と気温ともに TESTNGW での RMSE の減少も顕著であった（図 4.1.6(c)）。さらに、熱帯の東西風や気温では対流圏界面付近を除き、RMSE の減少が見られた。

4.1.3 標高オリジナルデータセットの更新

GSM では、地形の効果の大気現象への影響を力学過程、物理過程それぞれで考慮している。力学過程におい

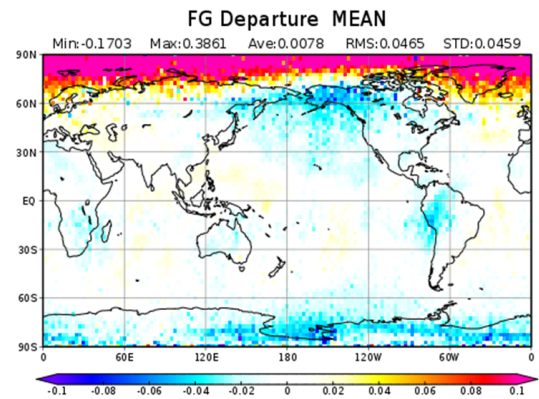
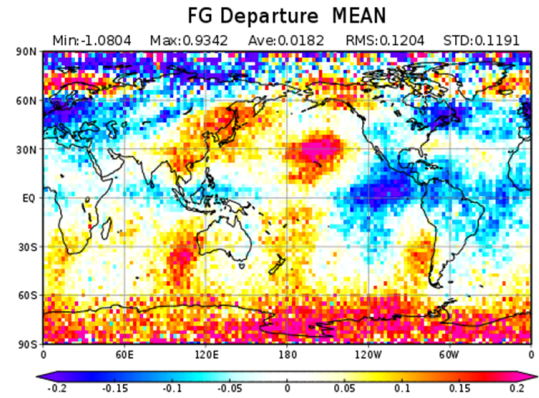


図 4.1.4 解析予報サイクル実験による 2020 年 1 月平均の AMSU-A ch13 輝度温度の (上)CNTL における観測値と第一推定値 (O-B) の差 [K]、(下)O-B の TESTNGW と CNTL の差 [K]

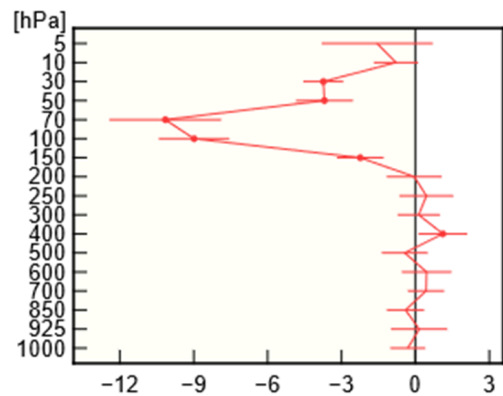


図 4.1.5 解析予報サイクル実験による 2020 年 1 月の熱帯域 (20°N - 20°S) 平均のラジオゾンデ東西風観測値と第一推定値の差の標準偏差の変化率 [%]。負の値は TESTNGW の方が観測値と第一推定値の差が小さいことを表している。

ては、プリミティブ方程式系における下部（地表面）境界条件として地形の存在を考慮している。時空間方向に離散化したプリミティブ方程式系を数値的に解く際には、モデルの各格子点でその格子を代表する標高（以下、モデル標高）やその水平勾配を与える。物理過程に

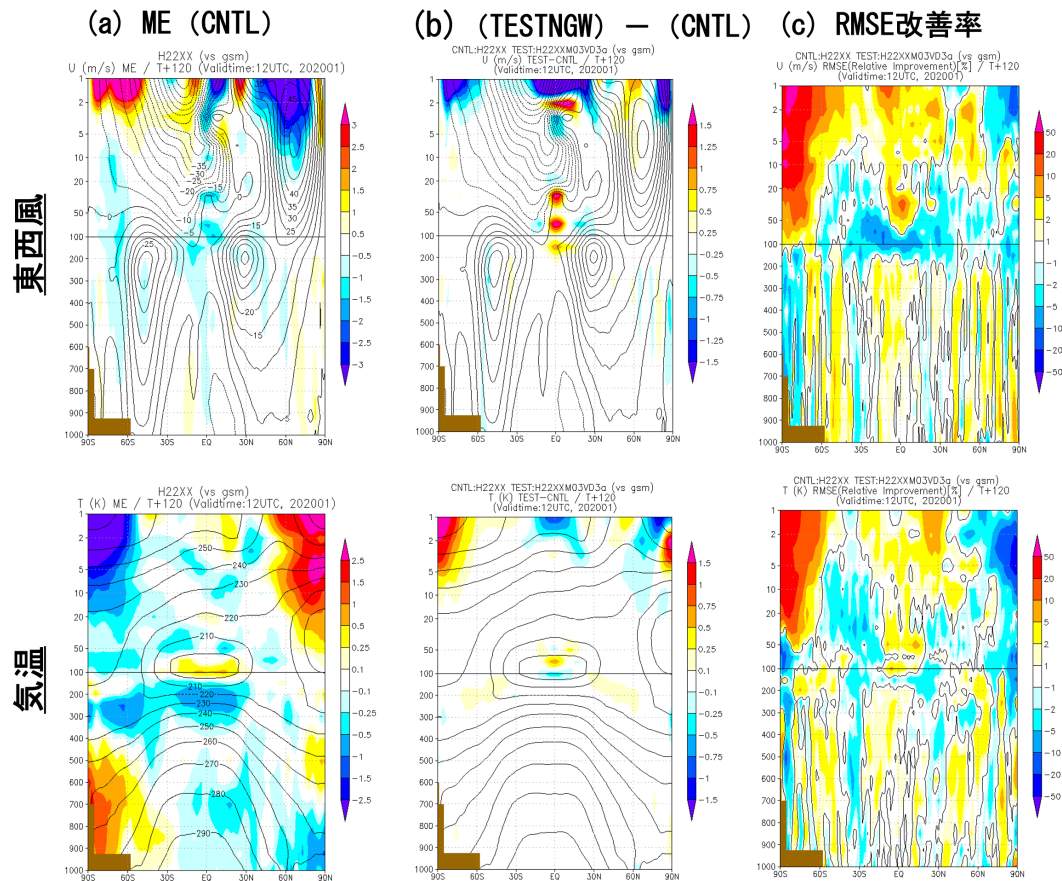


図 4.1.6 解析予報サイクル実験による 2020 年 1 月平均の帯状平均 (上) 東西風 [m/s]、(下) 気温 [K] の 5 日予測値。(a)CNTL の対解析 ME、(b)TESTNGW と CNTL の差、(c) 対解析 RMSE の改善率 [%]。改善率は CNTL と TESTNGW の RMSE の変化率 $\times 100$ で定義し、正の値は TESTNGW が CNTL に対して改善していることを表す。

おいては、GSM では、サブグリッドスケールの地形による運動量輸送のパラメタリゼーションとして、地形性重力波やブロック流抵抗 (Lott and Miller 1997; Vosper 2015)、乱流性地形形状抵抗 (Beljaars et al. 2004) を考慮している (以下、まとめて「地形性抵抗過程」と呼ぶ)。これら地形性抵抗過程では、入力データとして、格子内の標高の分散や、格子内の地形を楕円近似した際の偏角やアスペクト比といった、サブグリッドスケールの地形の統計量 (以下、サブグリッド地形統計量) を用いる。

これらモデル標高やサブグリッド地形統計量を作成するために、GSM では、標高オリジナルデータセットとして、数値標高モデル (digital elevation model; DEM) を用いる。2022 年 12 月時点の GSM では、標高オリジナルデータセットとして GTOPO30 (Gesch et al. 1999) を用いている。GTOPO30 は米国地質調査所が作成・公開している全球 30 秒 (水平解像度約 1 km) データセットであり、多くの現業数値予報モデルでの利用実績がある (Elvidge et al. 2019)。GTOPO30 は、作成された当時としては高精度であったが、現在ではその品質に関する問題点も指摘されるようになった。た

例えば、GTOPO30 にはベネズエラに現実よりも遥かに標高の高い山岳があり (Iwao et al. 2008)、GSM のモデル標高にも反映されてしまっている。また、観測技術の高度化や、計算資源の増大による大容量のデータの取り扱い、種々の誤差を特定し除去するためのアルゴリズム開発の進展を背景に、GTOPO30 が作成された以降も、より高精度・高解像度の DEM が多数作成されるようになった。

地形に関わる表現の精緻化は現在の数値予報モデルの予測精度向上に大きな影響を及ぼすことが近年の研究 (Kanehama et al. 2019) や GSM 開発 (気象庁 2021; 気象庁 2022a) でも示されている。今後、GSM の高解像度化やその後の改良を進めるにあたっては、高解像度化の効果をより引き出すという観点で、標高オリジナルデータセットの更新も重要な課題のひとつとなる。

これらのことから、GSM に用いる標高オリジナルデータセットの更新に関する開発を行った。新しく利用する主要な DEM には、MERIT DEM (Yamazaki et al. 2017) を採用した。MERIT DEM は、南北 60 度までを SRTM (Farr et al. 2007)、北緯 60 度以北に

AW3D (Tadono et al. 2015)、欠損域の補完に VFP-DEMs と複数の DEM を利用し、更に種々のバイアスを除去した高精度・高解像度の DEM である。図 4.1.7 で示すとおり、MERIT DEM では、前述の GTOPO30 に見られるベネズエラ付近の偽の山岳は見られないほか、領域全体にわたり高精度の DEM であることが衛星レーザー高度計での観測結果に対する検証により示されている (Yamazaki et al. 2017)。また、解像度も全球 3 秒 (約 100 m) であり、GTOPO30 と比較して 10 倍の解像度がある。MERIT DEM には南緯 60 度以南が含まれていないため、南極域の DEM である RAMP2 (Liu et al. 2015) と合わせることで全球 DEM を構成する。

(1) モデル標高、サブグリッド地形統計量の標高オリジナルデータセットによる違い

ここでは、水平解像度 13 km の GSM について、モデル標高やサブグリッド地形統計量の標高オリジナルデータセットによる違いについて述べる。2022 年 2 月以降準リアルタイム実行されている GSM では、モデル標高は気象庁 (2022a)、サブグリッド地形統計量は JMA (2022) に基づいて作成しており、標高オリジナルデータセット更新にあたってはこれらの手法を継続して採用する。

図 4.1.8(a), (b) はそれぞれ、全球域での MERIT DEM と RAMP2 から作成したモデル標高とその GTOPO30 からの差を示す。GTOPO30 から作成したモデル標高との差は、全球域に渡って見られ、特に、グリーンランド、カナダ、南米、アフリカ、オーストラリアなどで差が大きい。これら差が大きい領域は、GTOPO30 のオリジナルデータソースの違いの分布 (図 4.1.8(c)) とも対応しており、GTOPO30 の品質が地域によって異なることが反映されていると考えられる。サブグリッド地形統計量について、サブグリッド地形の標高の分散についても、GTOPO30 のデータソースの違いの分布に対応した差が見られた他、ユーラシア大陸で分散がやや小さくなる傾向が見られた (図略)。図 4.1.9(a),(b) は、図 4.1.8(a),(b) を日本とその周辺に拡大して示したものである。この領域では、標高オリジナルデータセットの違いによるモデル標高の差は比較的小さく、日本では中部山岳付近で最大 20 m 程度の差である。なお、水平解像度 20 km と 13 km でのモデル標高の差は日本付近で最大 200 m 程度であり、水平解像度の差は標高オリジナルデータセットの違いによる差よりも大きい (図略)。

(2) 標高オリジナルデータセット更新のインパクト

標高オリジナルデータセット更新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、解析予報サイクル実験を実施した。対照実験は第 4.1.2 項 (3) で示した TESTNGW 相当の設定で、以下では CNTLDDEM と呼ぶ。CNTLDDEM に対して標高オリジ

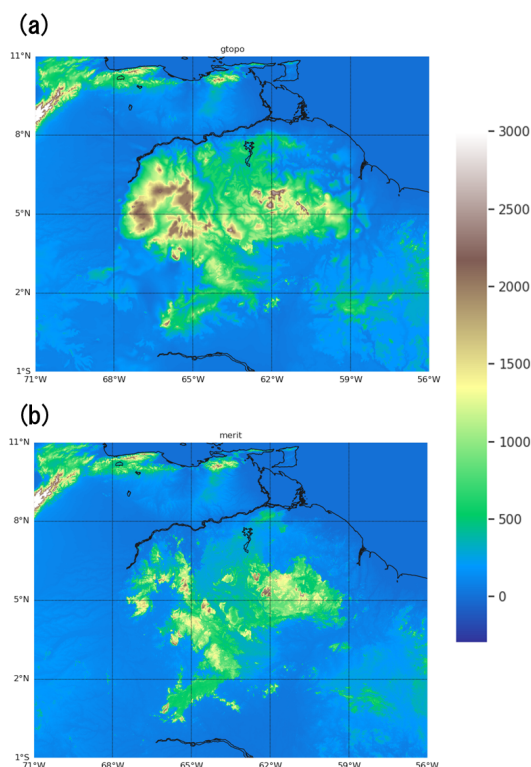


図 4.1.7 南米ベネズエラ付近 (1°S – 11°N, 71°W – 56°W) における標高 [m] の DEM による違い。(a) GTOPO30, (b) MERIT DEM。GTOPO30, MERIT DEM ともに 30 秒格子で表示。

ナルデータセットの更新を適用したものを TESTDEM と呼ぶ。実験は夏期実験として 2020 年 8 月、冬期実験として 2020 年 1 月の 2 期間を実施した。ここでは、より大きいインパクトが得られた冬期実験の結果を述べる。

図 4.1.10(a) は SYNOP 地上気温について、観測値と第一推定値の差 (O-B) の標準偏差の変化率を示す。SYNOP 地上気温は、全球解析では同化されていないため、図 4.1.10 は、地上気温の第一推定値の精度の独立観測データによる検証結果でもある。北半球、熱帯、南半球いずれも TESTNGW は CNTLNGW よりも観測値と第一推定値の整合性向上が見られ、特に南半球で整合性向上が顕著である。図 4.1.10(b) の水平分布でも、オーストラリアや南アメリカで、整合性向上が大きい領域が見られる。これは、標高オリジナルデータセットが高精度化されたことにより地形の表現が改善され、標高の影響を強く受ける地上気温の第一推定値がより観測に近づいたためと考えられる。図 4.1.11 は、2020 年 1 月平均 500 hPa 高度の予測の RMSE の、TESTDEM の CNTLDDEM に対する 2 日予測改善率の分布を示している。熱帯域では全般的に改善を示しているほか、北半球では、特に、北太平洋東部で改善が目立つ。北太平洋域は、海上であるため標高データセット更新の直接の影響は小さいことから、この改善は、解

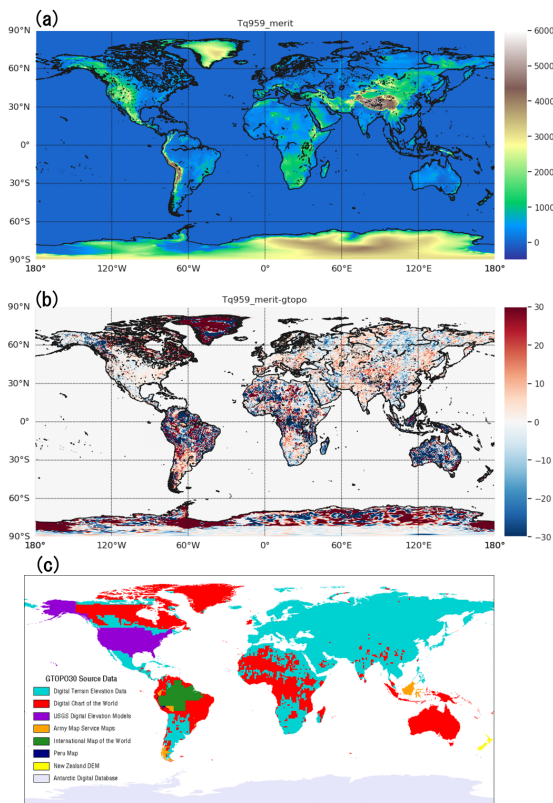


図 4.1.8 水平解像度 13 km における (a)MERIT DEM+RAMP2 から作成したモデル標高 [m]、(b) モデル標高の MERIT DEM+RAMP2 と GTOPO30 の差 [m]、(c)GTOPO30 のデータソースの分布。(c) は米国地質調査所のホームページ (<https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-global-30-arc-second-elevation-gtopo30>) から引用。

析予報サイクルや予報モデルによる時間積分を通じて改善が伝播した結果であると考えられる。特に、中緯度総観規模の流れにおいて北太平洋域の上流にあたるユーラシア大陸や極東域での地形の表現の改善が影響していると考えられる。図 4.1.12 は、2020 年 1 月平均の北半球における 500 hPa 高度の予測の RMSE について、TESTDEM と CNTLDEM の差を示したものである。2 日予測から 5 日予測まで、TESTDEM では、CNTLDEM に対する改善傾向が見られる。日々の誤差の分布で見ると、標高オリジナルデータの更新によるバイアスの増減や誤差のパターンに大きな変化はない(図略)が、誤差が少しずつ小さくなった結果、RMSE の減少につながっている。

4.1.4 まとめと今後の予定

令和 4 年 12 月現在準リアルタイム実行中の水平高解像度版全球モデルの更なる予測精度向上を目的に、非地形性重力波過程の改良とそれに合わせた鉛直拡散係数の調整、標高オリジナルデータセット更新の開発を進めてきた。非地形性重力波過程の改良について、

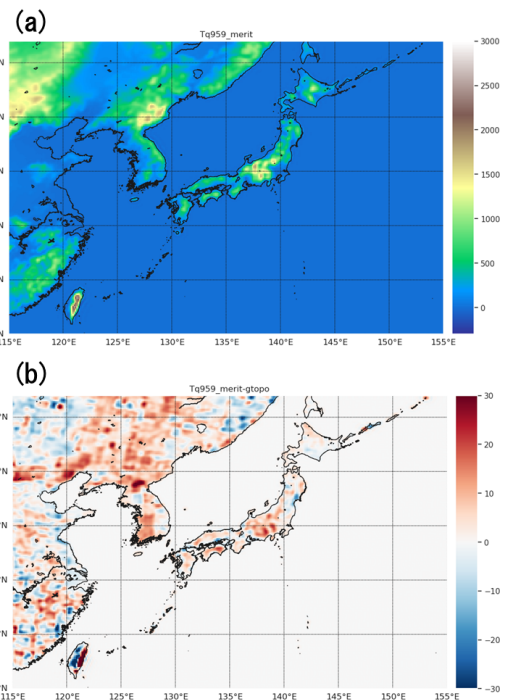


図 4.1.9 図 4.1.8(a),(b) と同じ。ただし、日本とその周辺域について。

重力波の射出フラックスの緯度依存性を精緻化することと安定時の鉛直拡散係数を見直すことで、成層圏の気温や東西風のバイアスの低減、AMSU-A 等気温サウンダの成層圏チャンネルの観測と第一推定値の整合性向上を通じた予測精度改善を確認した。標高オリジナルデータセットの更新について、現在使用している GTOPO30 から、60 °S 以北は MERIT DEM、以南は RAMP2 に更新することで、GTOPO30 に見られる地形表現の問題(偽の山岳や DEM 作成に用いるデータソースの違いによる品質の不連続の問題等)が解消されること、冬季北半球において、地上気温の第一推定値や 500 hPa 高度等の予測精度が改善することを確認した。

今後は、準リアルタイム実行の仕様に、本節で示した改良と観測データ利用改良(第 4.5.3 項; 第 4.5.7 項、(注) GOBS23XX 開発の節番号を secref)を合わせた仕様での試験を実施し、改善の効果を確認したのち、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.
 Elvidge, A. D., I. Sandu, N. Wedi, S. B. Vosper, A. Zadra, S. Boussetta, F. Bouyssel, van A. Niek-

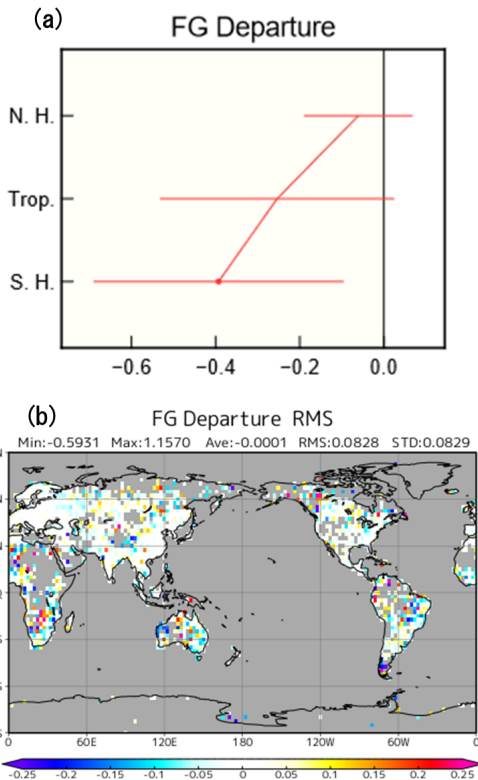


図 4.1.10 (a) 解析予報サイクル実験による 2020 年 1 月平均の SYNOP 地上気温の北半球域 (N.H. と表記、 20°N – 90°N)、熱帯域 (Trop. と表記、 20°S – 20°N)、南半球域 (S.H. と表記、 90°S – 20°S) 平均の観測値と第一推定値の差 (O–B) の標準偏差の変化率 [%]。負の値は TESTDEMの方が観測値と第一推定値の差が小さいことを表している。(b) O–B の標準偏差の TESTDEM と CNTLDEM の差 [K]。

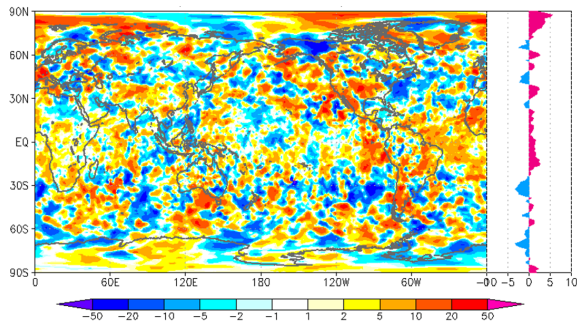


図 4.1.11 解析予報サイクル実験による、2020 年 1 月平均の 500 hPa 高度の 2 日予測の対解析 RMSE の改善率 [%] の分布とその帯状平均値。改善率は CNTLDEM と TESTDEM の RMSE の変化率 $\times 100$ で定義し、正の値は TESTDEM が CNTLDEM に対して改善していることを表す。

erk, M. A. Tolstykh, and M. Ujiie, 2019: Significant uncertainty in the representation of orography in numerical weather prediction and implications for atmospheric drag and circulation. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **11**, 2567–2585.

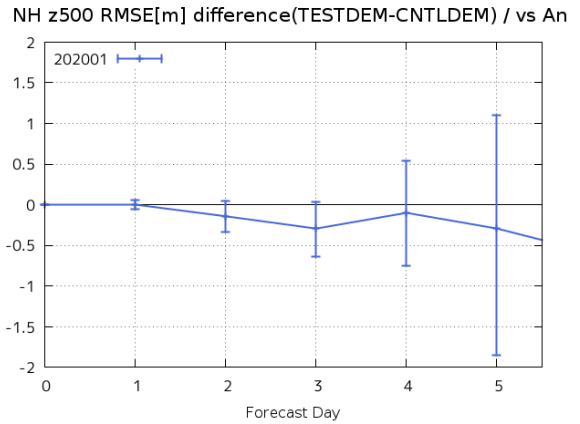


図 4.1.12 2020 年 1 月における、北半球 (20°N – 90°N) での 500 hPa 高度場の対解析 RMSE [m] について、TESTDEM から CNTLDEM を引いたもの (縦軸)。横軸は予測時間 [day]。縦軸の値が 0 よりも小さければ TESTDEM が CNTLDEM に対して改善、大きければ改悪を意味する。エラーバーは、ブートストラップ法 (リサンプル数 10000) で見積もった 95% 信頼区間を表す。

Farr, T. G., P. A. Rosen, E. Caro, R. Crippen, R. Duren, S. Hensley, M. Kobrick, M. Paller, E. Rodriguez, L. Roth, D. Seal, S. Shaffer, J. Shimada, J. Umland, M. Werner, M. Oskin, D. Burbank, and D. Alsdorf, 2007: The shuttle radar topography mission. *Reviews of geophysics*, **45**.

Gates, W. L., 1992: AMIP: the Atmospheric Model Intercomparison Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **73**, 1962–1970.

Gates, W. L., J. S. Boyle, C. Covey, C. G. Dease, C. M. Doutriaux, R. S. Drach, M. Fiorino, P. J. Gleckler, J. J. Hnilo, S. M. Marlais, T. J. Phillips, G. L. Potter, B. D. Santer, K. R. Sperber, K. E. Taylor, and D. N. Williams, 1999: An Overview of the Results of the Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP I). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **80**, 29–55.

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.

Hersbach, H., B. Bell, P. Berrisford, S. Hira-hara, A. Horányi, J. Muñoz-Sabater, J. Nicolas, C. Peubey, R. Radu, D. Schepers, A. Simmons, C. Soci, S. Abdalla, X. Abellan, G. Balsamo, P. Bechtold, G. Biavati, J. Bidlot, M. Bonavita, G. Chiara, P. Dahlgren, D. Dee, M. Diamantakis, R. Dragani, J. Flemming, R. Forbes, M. Fuentes, A. Geer, L. Haimberger, S. Healy, R. J. Hogan, E. Hólm, M. Janisková, S. Keeley, P. Laloyaux, P. Lopez, C. Lupu, G. Radnoti, P. Rosnay, I. Rozum, F. Vamborg, S. Villaume, and

- J. Thépaut, 2020: The ERA5 global reanalysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **146**, 1999–2049.
- 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.
- Ishii, M., A. Shouji, S. Sugimoto, and T. Matsumoto, 2005: Objective analyses of sea-surface temperature and marine meteorological variables for the 20th century using ICOADS and the Kobe Collection. *Int. J. Climatol.*, **25**, 865–879.
- Iwao, K., N. Yamamoto, D. Patton, S. Kodama, R. Nakamura, M. Matsuoka, S. Tsuchida, S. Sekiguchi, and E. Tsukuda, 2008: Validating global digital elevation models with degree confluence project information and ASTER-DEM on geo grid. *Int. Arch. Photogramm., Remote Sens and Spatial Info. Sci.*, **37**, 1847–1852.
- JMA, 2022: *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, 246pp pp., (Available online at <http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline2019-nwp/index.htm>).
- 金浜貴史, 山田和孝, 2019: 重力波. 数値予報課報告・別冊第 65 号, 気象庁予報部, 81–86.
- Kanehama, T., I. Sandu, A. Beljaars, van A. Niekirk, and F. Lott, 2019: Which Orographic Scales Matter Most for Medium-Range Forecast Skill in the Northern Hemisphere Winter? *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **11**, 3893–3910.
- 気象庁, 2021: 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, 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, 2018: 2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画. 52pp pp.
- 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.
- 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.
- Matsumoto, T., M. Ishii, Y. Fukuda, and S. Hirahara, 2006: Sea ice data derived from Microwave radiometer for climate monitoring. *AMS 14th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography*, P2.21.
- Mellor, G. L. and T. Yamada, 1974: A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 1791–1806.
- Scinocca, J. F., 2003: An accurate spectral nonorographic gravity wave drag parameterization for general circulation models. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 667–682.
- Tadono, T., J. Takaku, K. Tsutsui, F. Oda, and H. Nagai, 2015: Status of “ALOS World 3D (AW3D)” global DSM generation. *2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, IEEE, 3822–3825.
- Vosper, S. B., 2015: Mountain waves and wakes generated by South Georgia: Implications for drag parametrization. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **141**, 2813–2827.
- 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.
- 米原仁, 2019: 境界層. 数値予報課報告・別冊第 65 号, 気象庁予報部, 87–92.
- Yonehara, H., M. Ujiie, T. Kanehama, R. Sekiguchi, and Y. Hayashi, 2014: Upgrade of JMA’s Operational NWP Global Model. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, 6.19–6.20.

4.2 全球アンサンブル予報システムの改良

4.2.1 はじめに

数値予報開発センターでは、大気モデルの大部分を共有している全球に関する数値予報システム（全球モデル (GSM)、全球解析 (GA)、全球アンサンブル予報システム (GEPS)）の改良をなるべく同時に現業化できるように開発を進めている。

GSM と GA が整合することは、データ同化においてモデルの予測特性を適切に扱うために必要であり、また、GEPS と GSM の予測特性が整合することは、GSM の予測に関する確率予測情報を GEPS が適切に作成するために必要だからである。

令和 4 年 2 月には、令和 4 年度末の全球数値予報システムの更新を目指し、GSM・GA の改良を組み合わせた仕様での準リアルタイム実行による確認を開始した。このうち、GSM の改良の内容は GEPS2203 にも反映した第 3.2 節。

その後 GEPS では、令和 4 年度末の導入を目指して、GEPS2203 以降の GSM の開発成果（第 4.1 節。以下、令和 4 年度末に導入予定の GSM を GSM23XX と呼ぶ）を取り込むとともに、2段階 SST（海面水温）法（高倉・小森 2020）の適用範囲の拡大などの改良を進めてきた。

後者については、予測 SST の利用により、特に 2 週目以降における大気下層気温の予測の改善が、中高緯度でも期待できるという調査結果（第 4.2.3 項に詳述）を踏まえたものである。

今回、GEPS のこれらの改良予定項目について性能を評価するための実験を行い、アンサンブル平均予測の精度向上や確率予測情報の精度向上など想定した効果が得られていることを確認した。本稿では、改良予定項目の概要と実験結果について述べる。

4.2.2 改良予定項目の概要

GEPS で使用する予報モデルを GSM23XX で導入予定のものに更新する。前項でも述べたとおり、これにより GEPS と GSM の予測特性が整合し、GSM による予測に関する確率予測情報をより適切に作成できるようになることが期待できる。

さらに、2段階 SST 法で外力として使用する現業季節アンサンブル予報システム (CPS3) の SST 予測値について、適用領域を低緯度域中心から全球域に拡大する。

4.2.3 2 段階 SST 法適用領域拡大

GEPS2203 仕様で 2 段階 SST 法の適用範囲を全球域に拡大した影響調査を行ったところ、以下の結果が得られた。

- 連続初期日型実験において、大気下層の気温予測が改善した（図省略）。

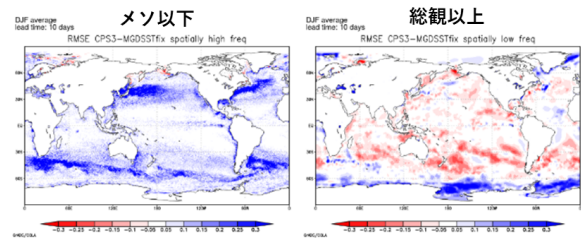


図 4.2.1 GEPS2203 仕様で下部境界に CPS3 の SST 予測偏差を全球域に与えた実験と、MGDSST 初期偏差を全球域に与えた実験の、2019 年 12 月～2020 年 2 月の予測 10 日目における SST の RMSE の差：(左) メソ以下のスケール、(右) 総観規模以上のスケール。赤色は CPS3 予測偏差実験の方が良いことを、青色は MGDSST 初期偏差固定実験の方が精度が良いことを示す。「総観規模以上」は 0.25 度格子に内挿した SST 偏差に対して緯度経度方向に 1-1-1 フィルタ（三点移動平均）を 30 回かけたもの（振幅が半分以下になる空間スケールが数百 km になる）、「メソ以下」は全成分から総観規模以上の成分を差し引いたものとして計算。

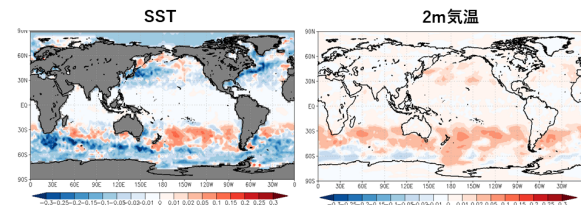


図 4.2.2 5 メンバー再予報型実験（1991～2020 年の月末初期日）による 2 段階 SST 法の全球域への適用領域拡大の効果。(左) SST、(右) 2m 気温に対する冬期間（12～2 月）初期日の予測 6～12 日平均でのアノマリー相関の差（適用領域拡大後から拡大前を引いたもの）。赤色は適用領域拡大によって改善、青色は改悪していることを示す。

- 再予報型実験では、2 週目以降は 200hPa 東西風や 500hPa 高度など、上層の要素でも予測の改善が見られた（図省略）。
- （特に冬半球の）中緯度で空間スケールが小さくなる海洋渦を考慮して CPS3 の SST 予測値をスケール分離して検証したところ、総観規模以上の SST アノマリーの再現は MGDSST の偏差固定値と比較して良くなる一方で、メソ以下のスケールの再現性は低下していた（図 4.2.1）。
- 再予報型実験で寄与を見積もったところ、メソ以下のスケールの SST 変動の再現性低下による 2m 気温への影響は相対的に小さかった（図 4.2.2）。

つまり、従来中高緯度で誤差が大きいと考えられていた CPS3 の SST 予測値について、MGDSST 偏差固定値に対する誤差の違いは主として、CPS3 の海洋モデルの水平解像度が 0.25 度であるために解像できないメソ渦に由来しており、一方、大気下層の予測精度は、CPS3 の SST 予測値の利用により総観規模以上の変動が加わることで（MGDSST 偏差固定値の現業仕様と比べて）改善していた。これらの結果から、2 段階

SSTの適用範囲を全球域に拡大して開発を進めることとなった。なお、海水域では2段階SSTは適用されず、MGDSSTの海水域マスクは初期値固定として、CPS3の海水域マスクは予測対象時刻のものが使われる。

4.2.4 総合性能評価試験

本節で述べている改良を合わせた効果を検証するための総合性能評価試験として、連続初期日型実験と再予報型実験を実施した。以下ではこれらの実験の仕様とその結果について記述する。

(1) 連続初期日型実験

実験の設定

実験の諸元は以下の通りである。

- 比較対象（以下 CNTL）：2022年7月時点の現業全球EPSによる予報。ただし初期値はサイクル解析によるものを使用。
- 改良版（以下 TEST）
 - － GSM23XX に導入予定のモデルを使用
 - － 2段階SST法を全球に適用
 ただし初期値はGSM23XXを用いたサイクル解析によるものを使用。
- 実験期間と初期時刻
 - － 夏実験：2021年6月20日～10月11日の各日12UTC
 - － 冬実験：2021年11月20日～2022年3月11日の各日12UTC
- メンバー数：51（現業全球EPSと同じ）

主要要素の確率予測

図4.2.3と図4.2.4に、夏実験と冬実験についての11日先までの予報時間ごとのCRPS¹を示す。夏実験については、熱帯の850 hPa気温が予報前半で改悪となるほかはおおむね中立から改善となっている。冬実験についてはいずれの領域・要素でもおおむね中立から改善である。夏実験での熱帯下層気温の悪化は対ラジゾンデ観測で評価すると見られなくなるので、解析値の変化の影響の可能性があるが詳細は不明である。改善についてはモデルの変更によるものと考えられる。

図4.2.5に、夏実験のZ500とU250のスプレッドを示した。TESTでは対流圏上層でスプレッドが増える傾向が見られる。しかし、図4.2.6にあるとおり、スプレッドスキルの関係を壊すような大きな変化ではないため、スプレッドの調整等は不要と判断した。冬実験でも同じような傾向であった（図略）。

日本の降水予測

図4.2.7に日本の降水予測について解析雨量に対して検証した結果を示す。ブライアスコア(BSS:Brier Skill Score)は1 mm/24hr及び5 mm/24hrの閾値に

¹ Continuous Ranked Probability Scoreの略で、閾値t以下となる確率予測に対するブライアスコアを $\int_{-\infty}^t dt$ で積分したもの。

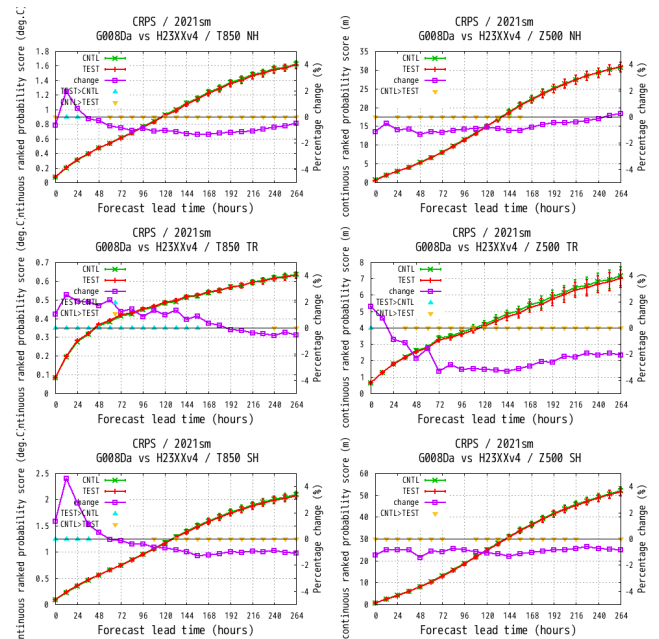


図 4.2.3 夏実験における領域別のCRPS。要素は左列が850hPa気温[K]、右列が500 hPa高度場[m]。領域は上から順に北半球(20°N-90°N)、熱帯(20°S-20°N)、南半球(20°S-90°S)。CNTL実験は緑線、TEST実験は赤線。紫線は変化率((TEST-CNTL)/CNTL[%]、右縦軸)。変化率が負であるとCNTLに対するTESTの改善を意味する。差に統計的な有意性がある場合に▽(CNTL>TEST)ないし△(TEST>CNTL)をプロットしている。

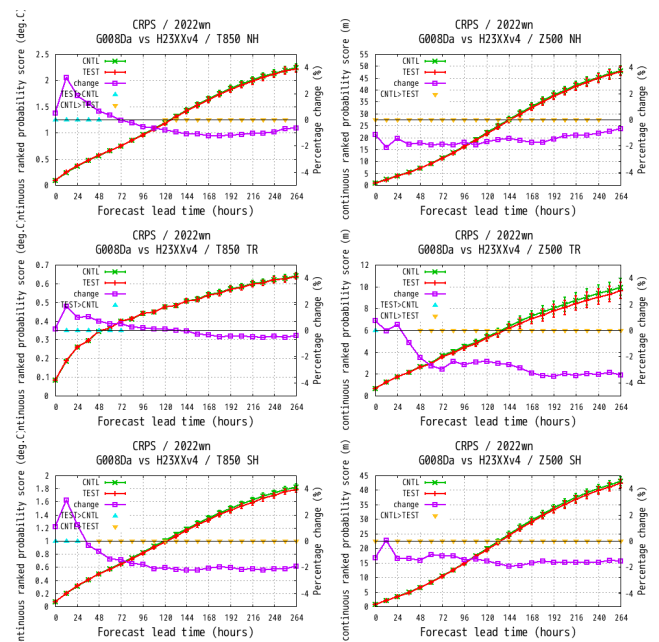


図 4.2.4 図 4.2.3 に同じ。ただし冬実験のもの。

ついて、夏実験については中立、冬実験については改善傾向である。

台風進路予測

図 4.2.8 に予報時間ごとのアンサンブル平均台風進路予測誤差と、台風接近確率(ここでは、FT=0-120 h

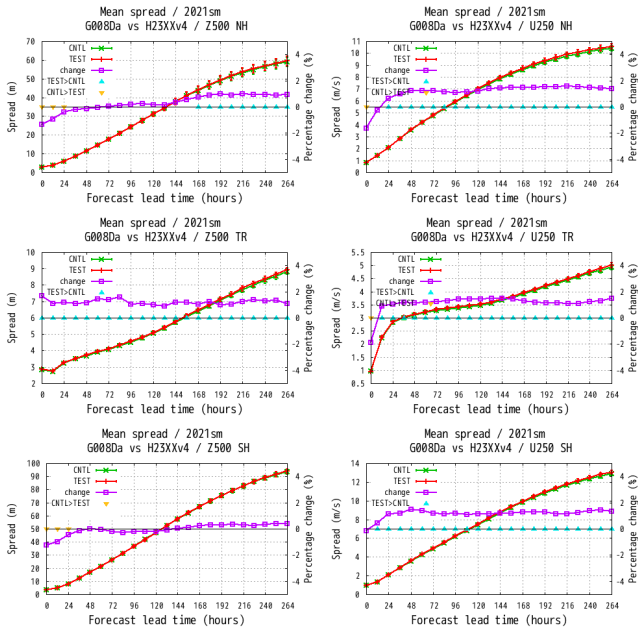


図 4.2.5 夏実験におけるスプレッド。左列は 500 hPa 高度場 [m]、右列は 250 hPa 東西風 [m/s]。領域は上から順に北半球 (20°N - 90°N)、熱帯 (20°S - 20°N)、南半球 (20°S - 90°S)。CNTL 実験は緑線、TEST 実験は赤線。紫線は変化率 ((TEST-CNTL)/CNTL [%]、右縦軸)。スプレッドの差に統計的な有意性がある場合に ∇ (CNTL > TEST) ないし Δ (TEST > CNTL) をプロットしている。

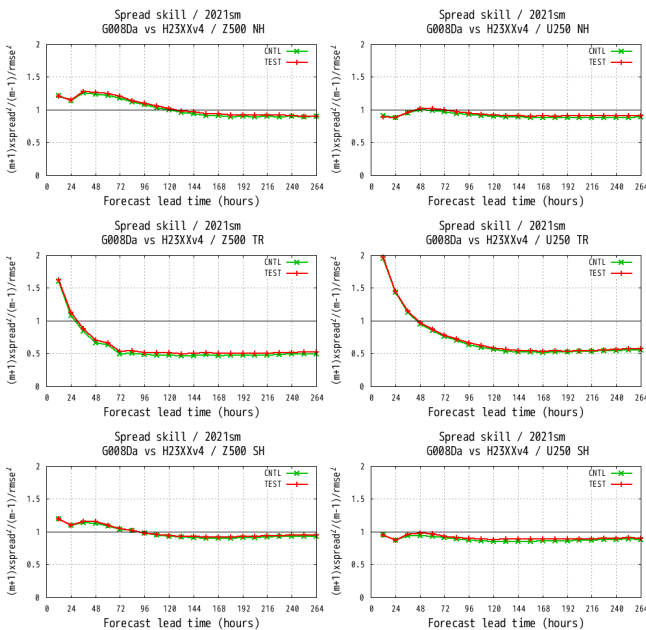


図 4.2.6 夏実験におけるスプレッドスキル (スプレッドと RMSE の比)。左列は 500 hPa 高度場 [m]、右列は 250 hPa 東西風 [m/s]。領域は上から順に北半球 (20°N - 90°N)、熱帯 (20°S - 20°N)、南半球 (20°S - 90°S)。CNTL 実験は緑線、TEST 実験は赤線。

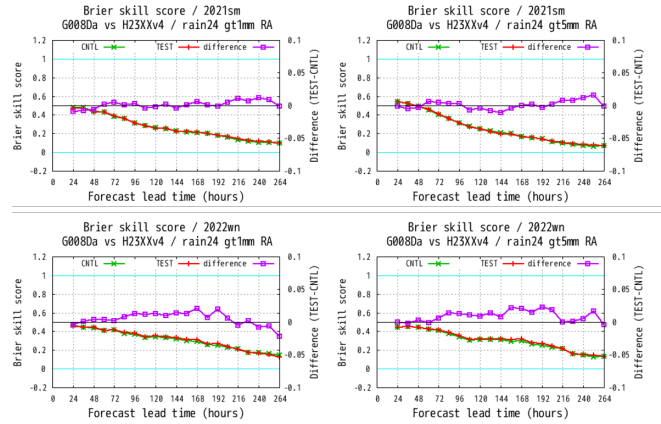


図 4.2.7 対解析雨量による降水の確率的予測のブライアスキルスコア。上段は夏実験、下段は冬実験。左列は閾値 1mm/24h、右列は閾値 5mm/24h の降水事例に対するもの。CNTL は緑線、TEST は赤線。紫線は差 (TEST-CNTL、右縦軸)。

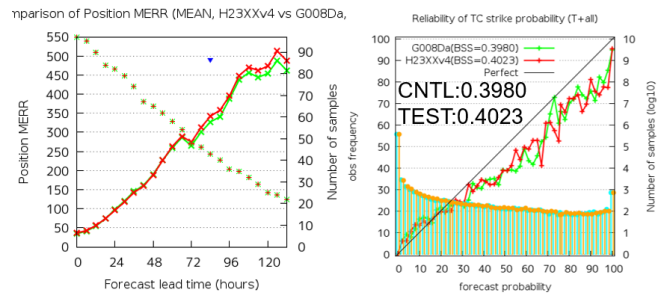


図 4.2.8 アンサンブル平均の台風進路予測平均誤差 (左) と台風接近確率の信頼度曲線とブライアスキルスコア (右)。CNTL は緑、TEST は赤。左図は \times と実線が平均誤差 [km] (左縦軸) で $+$ がサンプル数 (右縦軸) を示しており、ピンクの三角 (該当なし) と青の三角はそれぞれサンプル間の相関を考慮する場合としない場合に 5% の有意水準で差が有意であることを示す。右図は実線が信頼度曲線 (左縦軸)、水色とオレンジの棒グラフで CNTL と TEST の予報頻度 (右縦軸) を示す。また、CNTL と TEST のブライアスキルスコアの値を図中に示した。

の間に 120km 以内に台風中心が位置する確率) の予測の検証結果を示す。検証は気象庁ベストトラックに対して行っている。アンサンブル平均の台風進路予測の平均誤差は、予報後半にやや悪化の傾向が見られているが、有意性判定は相関を考慮しない場合の 84 時間予報についてのみ付いている。台風接近確率の BSS や信頼度曲線、予測頻度に大きな変化はなかった。

(2) 再予報型実験

予測 12 日以降の評価を目的とした実験として、再予報型実験を実施した。CNTL、TEST ともに大気初期値は JRA-3Q を使い、1991 年～2020 年での月末の 12UTC 初期値の予測のみを対象とした 13 メンバーで評価した。

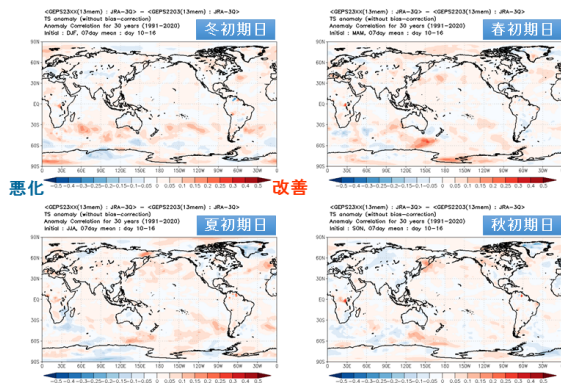


図 4.2.9 再予報型実験での予測 2 週目に対する地上気温のアンサンブル平均予測のアノマリー相関係数の差 (TEST - CNTL)。(左上) 冬初期日、(右上) 春初期日、(左下) 夏初期日、(右下) 秋初期日に対するバイアス補正なしの結果。暖色は改善、寒色は改悪を示す。

アンサンブル平均予測

図 4.2.9 に予測 2 週目に対する地上気温のアンサンブル平均予測のアノマリー相関の差 (TEST - CNTL) を示す。どの季節でも中緯度の海上で改善傾向が見られており、2 段階 SST 法の適用領域拡大によるものと考えられる。

図 4.2.10 と図 4.2.11 に北半球と熱帯に対するアンサンブル平均予測のアノマリー相関の差 (TEST - CNTL) を示す。概ね誤差幅の範囲内で中立の要素・季節が多いことが分かる。また、2 段階 SST の適用領域拡大による改善はごく下層が中心であった (図省略)。これらの結果から、今回の変更による大きな問題はないと考えられる。

4.2.5 まとめと今後の予定

令和 4 年度末に計画されている GEPS の改良予定項目について性能を評価するための実験を行い、アンサンブル平均や確率予測情報の精度などに想定した効果が得られ、問題がないことを確認した。今後は全ての改良予定項目を組み合わせることで現業に相当する構成での評価を行う予定である。

参考文献

高倉寿成, 小森拓也, 2020: 2 段階 SST 法の詳細と導入事例紹介. 令和 2 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 2-8.

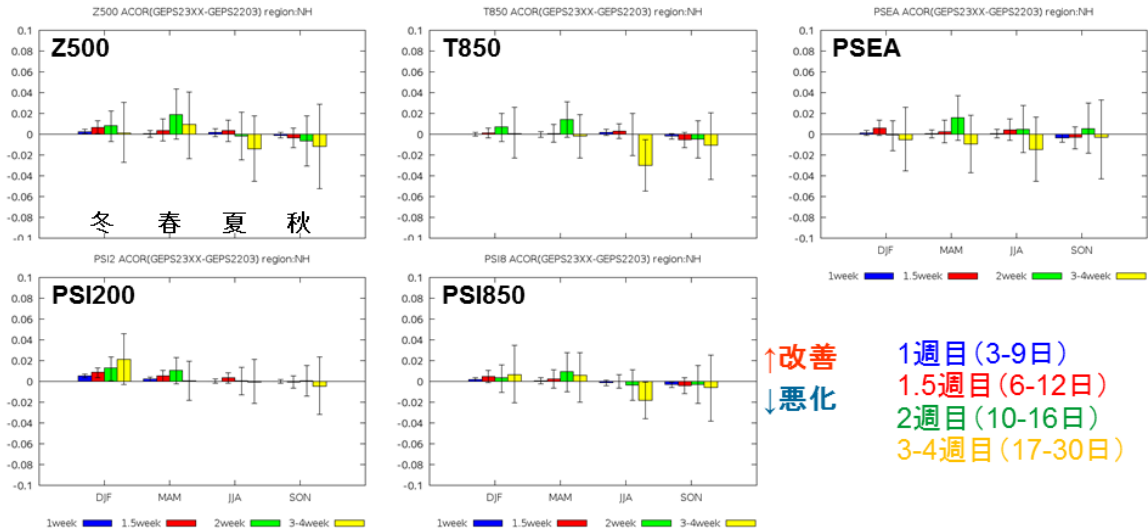


図 4.2.10 再予報型実験（1991～2020 年）による 13 メンバーアンサンブル平均の北半球（20°N - 90°N）でのアノマリー相関係数の差（TEST - CNTL）。（上段）左から 500hPa 高度、850hPa 気温、海面更正気圧、（下段）200hPa 及び 850hPa の流線関数に対するバイアス補正なしの検証結果。それぞれの図は左から順に冬、春、夏、秋の並びとなっており、青は 1 週目（予測 3～9 日）、赤は 1.5 週目（予測 6～12 日）、緑は 2 週目（予測 10～16 日）、黄は 3～4 週目（予測 17～30 日）を表す。誤差棒はブートストラップ法で見積もった 95% 信頼区間。

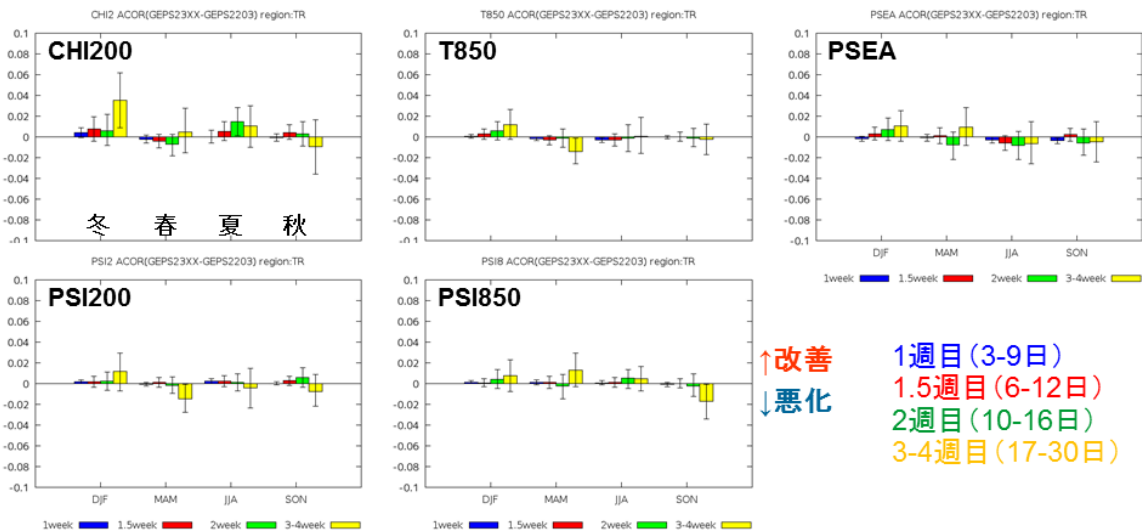


図 4.2.11 図 4.2.10 と同じ。ただし、熱帯（20°S - 20°N）に対する（上段）左から 200hPa 速度ポテンシャル、850hPa 気温、海面更正気圧、（下段）200hPa 及び 850hPa の流線関数の検証結果。

4.3 メソアンサンプル予報システムへの確率的物理過程強制法の導入

$$X_p = (1 + r_X)X_c \quad (4.3.1)$$

4.3.1 はじめに

メソアンサンプル予報システム (MEPS) は、メソモデル (MSM) の予測に対して信頼度や不確実性等の情報に付加することを目的に運用されており、MSM と合わせて防災気象情報、航空気象情報、天気予報等の作成を支援する資料として利用されている。

MEPS は 2019 年 6 月に運用を開始した。國井・小野 (2020) は、MEPS の運用開始に至る開発経緯、仕様と狙いを述べるとともに今後の課題と展望を示した。これを踏まえ、数値予報開発センターでは MEPS の継続的な開発に取り組んでいる。2020 年 9 月には初期摂動と側面境界摂動を改良し (気象庁 2021)、2022 年 3 月には MSM の鉛直層増強と物理過程改良に追従して MEPS の設定を更新した (気象庁 2022)。

本節では、國井・小野 (2020) が挙げた課題のうち、モデルアンサンプル手法の導入に向けた開発について述べる。現在の MEPS は、初期摂動と側面境界摂動のみで MSM の不確実性を表現するシステムとなっており、数値予報モデルの不確実性を考慮していない。そのため、本質的には考慮すべき摂動が不足していると考えられ、予報誤差程度のアンサンプルスプレッドを確保するために過大な初期摂動を用いている可能性もある。このような課題に対し、数値予報モデルの不確実性を表現するため、モデルアンサンプル手法の一つである確率的物理過程強制法 (SPPT 法: Stochastically Perturbed Parametrization Tendencies scheme; Buizza et al. (1999), Palmer et al. (2009)) による摂動を新たに導入し、併せて初期摂動の振幅を小さくすることによりスプレッドを適正化する開発を進めてきた。

以下、川田ほか (2021) に基づき MEPS への SPPT 法の導入に向けた開発について説明し、これまでの検証実験で得られた結果を報告する。MEPS による予報から作成するアンサンプル摂動は、局地解析の背景誤差として用いられる (第 3.4 節 注:3.5 項) ことから、今回の MEPS の変更が局地数値予報システムへ与える影響について調査した結果も示す。

4.3.2 変更の概要

ここでは、MEPS への SPPT 法の導入に向けた変更の概要を説明する。はじめに SPPT 法について、次に SPPT 法の導入に伴い検討した初期摂動の振幅調整について述べる。

(1) SPPT 法

SPPT 法は、物理過程の時間変化率に対して摂動を与えることで、数値予報モデルの物理過程の不確実性を表現することを狙った摂動手法である。摂動を与える前と与えた後の物理過程の時間変化率をそれぞれ X_c 、 X_p として、次のように摂動を与える。

ここで、 r_X は時空間に相関を持つガウス型の乱数を与える (Palmer et al. 2009)。時空間の相関スケールや振幅の大きさには任意性がある。検討の結果、今回報告する実験では、乱数の振幅は 0.5、時間相関 6 時間、空間相関 500 km とした。また、計算安定性の観点から、積雲対流過程と放射過程の時間変化率にのみ摂動を与えることとした¹。

(2) 初期摂動の振幅調整

現在の MEPS のスプレッド (図 4.3.1 左) は、アンサンプル平均の RMSE (図 4.3.1 中) と比べると特に日本域でスプレッドが過大な傾向にある。理想的なアンサンプル予報の性質として、スプレッドの大きさはアンサンプル平均の RMSE と同程度であることが望ましい。スプレッドの適正化という観点では初期摂動を小さくすることが考えられるが、これまで初期摂動を小さくすると降水確率予測の精度が悪化することが把握されており、単純に初期摂動の振幅を小さくすることは難しかった。また、SPPT 法を導入することで、数値予報モデル由来の摂動が新たに加わることになり、システム全体としてはスプレッドが増加すると思われる。これらのことから、SPPT 法の導入と併せて初期摂動の振幅を調整することを検討した。その結果、SPPT 法の導入と併せることで、降水確率予測の精度を維持しつつスプレッドを適正化できることが分かったため、初期摂動の振幅を小さくする (現 MEPS の 95 %) こととした。なお、側面境界付近のスプレッドは過小傾向であるため、側面境界摂動の振幅は調整しない。

4.3.3 性能評価

SPPT 法の導入と初期摂動の振幅調整による影響を確認するための性能評価実験を行った。現ルーチンの MEPS と同じ設定の実験をコントロール (CNTL) とし、CNTL に対し前項で示した変更を適用した実験をテスト (TEST) とする。実験期間は夏:2020 年 7 月 1 日-7 月 31 日、冬:2020 年 1 月 20 日-2 月 25 日とした。

(1) スプレッドの適正化

図 4.3.1 に 850 hPa 相当温位について FT=9 における CNTL のスプレッドとアンサンプル平均の RMSE の夏実験の期間平均を示す。CNTL の課題として、スプレッド (左) をアンサンプル平均 (中) と比較すると、日本周辺等の初期摂動が入りやすい領域ではスプレッドが過大な一方、それ以外の領域ではスプレッド

¹ 雲物理過程 (氏家 2020)、境界層過程 (西本 2020) ではインプリシットスキームを用いることで計算安定性を確保できる時間変化率を求めており、これらの時間変化率を (4.3.1) によって変更することは計算不安定につながりやすいと考えられる。実際に計算不安定となる事例が多発した。

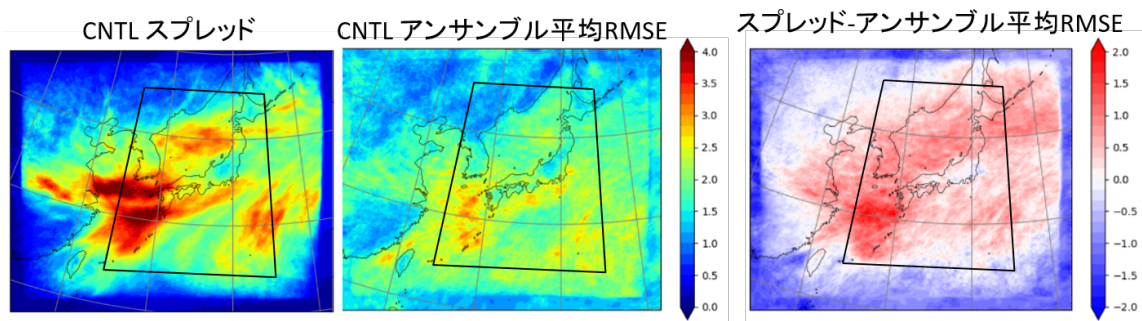


図 4.3.1 CNTL のスプレッドおよびアンサンブル平均の RMSE の夏期間平均。850hPa の相当温位 [K]、FT=9。左からスプレッド、アンサンブル平均の RMSE、スプレッドとアンサンブル平均 RMSE の差。黒枠は検証の日本域 (125°-145°E,25°-45°N) を示す。

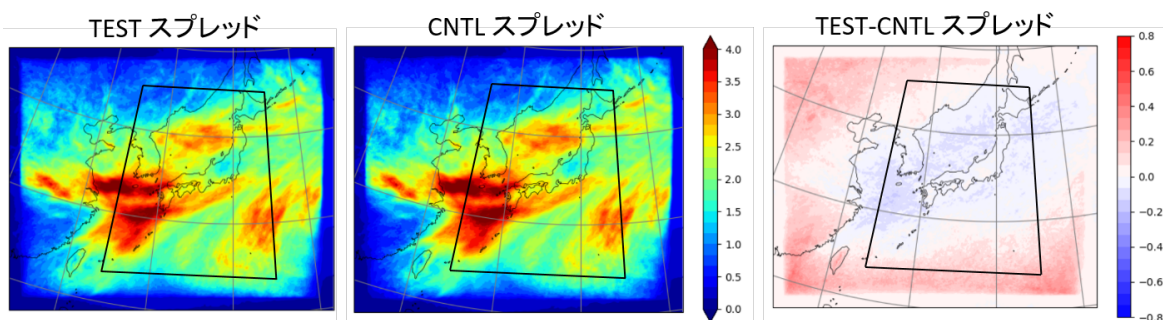


図 4.3.2 スプレッドの夏期間平均。850hPa の相当温位 [K]、FT=9。左から TEST, CNTL, TEST-CNTL。黒枠は図 4.3.1 と同じ。

が過小な傾向があることが分かる。図 4.3.2 に TEST と CNTL のスプレッドを示す。基本的には初期摂動が支配的であるため、TEST のスプレッドの空間分布が CNTL から大きく変化するわけではないが、TEST と CNTL のスプレッドの差 (右) を見ると、初期摂動が入りやすい領域でスプレッドが小さくなり、それ以外の領域でスプレッドが大きくなっている。それぞれ CNTL の課題を緩和しスプレッドが適正化する方向に変化していることが分かる。このスプレッドの空間分布の変化は、初期摂動の振幅を小さくしたことによるスプレッドの減少が初期摂動が入りやすい領域で見られ、SPPT 法の導入によるスプレッドの増加は予報領域全体に及び、その両者が合わさったものと考えられる。

図 4.3.3 は夏期間の 850 hPa 相当温位の予報時間別のスプレッドスキルである。左は予報領域全体 (MSM 域と呼ぶ)、右は図 4.3.1 の黒枠で示した領域 (「日本域」と呼ぶ、125°-145°E,25°-45°N) について示した。日本域では予報前半のスプレッドの過大傾向が改善しつつ、MSM 域では予報後半にかけてのスプレッドの過小傾向が改善していることが分かる。この変化は冬実験についても同様に見られた (図略)。

初期摂動の影響が大きい日本域のスプレッドの変化としては、夏実験、冬実験ともに 850 hPa の相当温位に見られるような予報前半の過大なスプレッドが抑制され適正化する要素がほとんどであった。予報後半にか

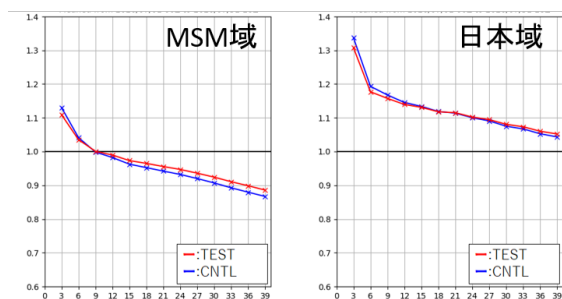


図 4.3.3 夏期間の 850hPa 相当温位 [K] の予報時間別のスプレッドスキル。青線が CNTL、赤線が TEST。検証領域は (左) MSM 域、(右) 日本域。横軸は予報時間 [h]。

けては、SPPT 法の導入によりスプレッドが増加して適正化する要素が多いが、下層の気温では過大傾向となった (図略)。一方、上層や地上は初期摂動の影響が小さくスプレッドが不足していたが²、SPPT 法の導入によりスプレッドが大きくなり適正化した (図 4.3.4)。

(2) 降水確率予測

降水確率予測の変化を確認するため夏期間の 3 時間降水量のブライアスキルスコア (BSS) を図 4.3.5 に示す。いずれの閾値においても CNTL に対して TEST が

² メソスケール現象予測に影響が大きい中下層における物理量の摂動を優先的に算出している (國井・小野 2020)。

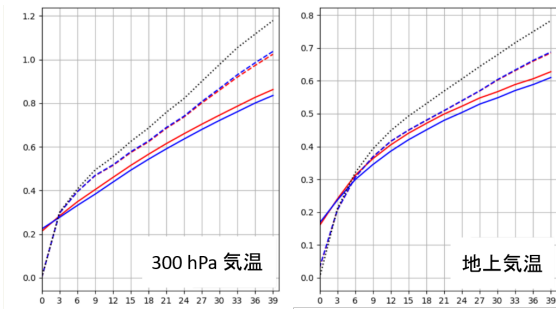


図 4.3.4 スプレッド（実線）およびアンサンブル平均の RMSE（点線）の予報時間別の夏期間検証結果。青線が CNTL、赤線が TEST。黒点線はコントロールランの RMSE。検証領域は日本域。（左）300 hPa の気温 [K]、（右）地上気温 [K]。横軸は予報時間 [h]。

改善した。弱雨に比べ閾値 30 mm/3h 等の強雨予測で改善幅が大きい。冬実験については、気候値予測よりもスキルがある閾値（15 mm/3h 以下）において、ほぼ中立であったが（図略）、予報時間別にみると、弱雨の予報初期（FT=6 まで）において BSS が改悪となった（図 4.3.6）。これは、初期摂動の振幅を小さくしたことが影響したためと考えられる。

今回の実験では初期摂動の振幅は 95% の大きさに調整しているものの、摂動の構造などは変更していないため、各メンバーの降水分布は CNTL と大きく変わらないことが多い。その中で、積雲対流過程に摂動を与えたことにより、積雲対流過程が寄与する領域付近の降水分布の表現のばらつきが大きくなる事例が見られている。降水確率予測の改善につながったと考えられる典型的な事例として、2020 年 7 月 7 日の九州付近の降水事例を挙げる。MSM や MEPS では、積雲対流過程に起因するモデル地形に沿った降水域が表現されることがあり、この事例においてもその傾向が見られている（図 4.3.7 左下）。この事例では、SPPT 法の導入により、この表現にばらつきが生じ、地形に沿った降水を表現するメンバーが減少し地形風下の降水を表現するメンバーが増加した。その結果、30 mm/3h の超過確率で見て、CNTL（右上）に対し TEST（右下）では、黒破線の楕円で示した地形風下の超過確率の増加が見られ、解析雨量との対応が向上した。この事例に見られるように、積雲対流過程の摂動を考慮したことによって降水表現のばらつきが増加したことが、降水確率予測の改善に寄与していると考えられる。

4.3.4 局地数値予報システムへの影響

局地解析における Hybrid-3DVar（第 3.4 節 注:3.5 項）では、気候学的背景誤差と MEPS の予報値から作成した背景誤差を混ぜて用いている。本項では、今回の MEPS の変更が局地数値予報システムへ与える影響を評価するために行った実験結果について述べる。現ルーチン局地数値予報システム相当の設定の実験をコントロール（CNTL）とし、変更した MEPS をアンサ

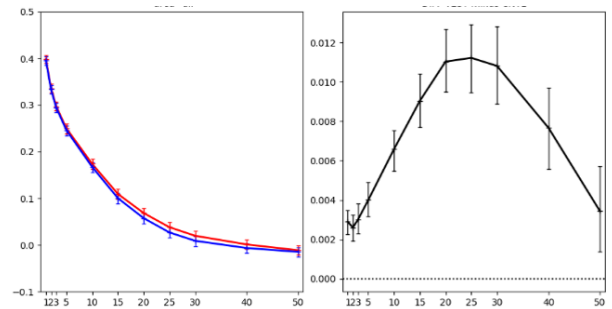


図 4.3.5 夏期間の 3 時間降水量の（左）ブライアスキルスコア、（右）TEST と CNTL の差。青線が CNTL、赤線が TEST。横軸は閾値 [mm/3h]。

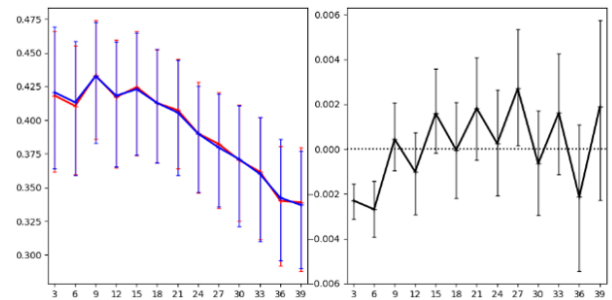


図 4.3.6 冬期間の閾値 2 mm/3h の（左）ブライアスキルスコア、（右）TEST と CNTL の差。青線が CNTL、赤線が TEST。横軸は予報時間 [h]。

ンプル摂動として用いた実験をテスト（TEST）とする。実験期間は夏:2020 年 7 月 2 日-7 月 8 日、冬:2020 年 1 月 11 日-1 月 21 日、それぞれ 1 時間毎の初期値から予測を実行した。

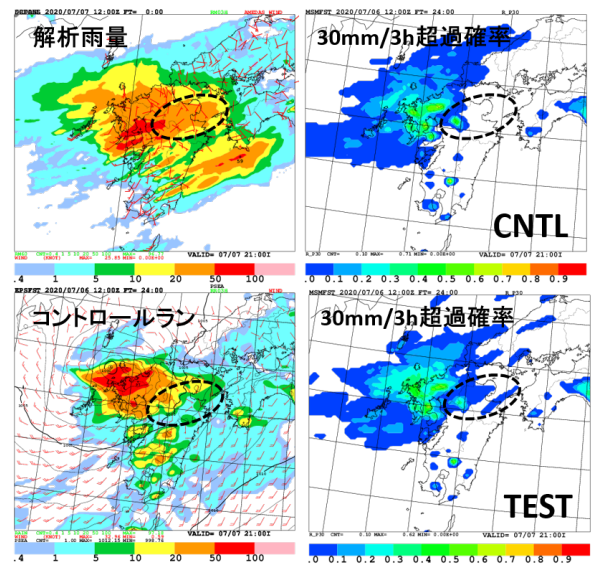


図 4.3.7 2020 年 7 月 7 日 21JST の 3 時間降水量について（左上）解析雨量、（左下）コントロールラン、（右上）CNTL の 30 mm/3h 超過確率、（右下）TEST の 30 mm/3h の超過確率。予報値は 2020 年 7 月 7 日 12UTC 初期値の FT=24。

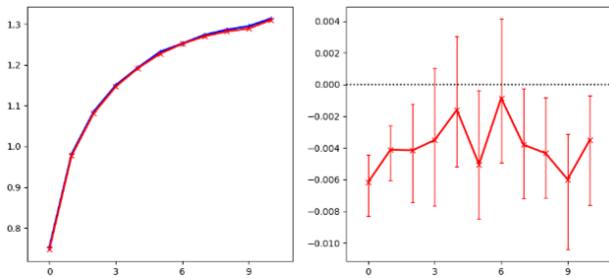


図 4.3.8 局地数値予報システムの夏期間における対地上観測検証の地上気温 [K] の (左) RMSE、(右) TEST と CNTL の差。横軸は予報時間 [h]。青線が CNTL、赤線が TEST。

夏実験、冬実験ともに地上要素で第一推定値と観測値の整合性の向上 (図略) や、予報スコアに有意な改善が見られた。図 4.3.8 に夏期間の地上気温の RMSE、図 4.3.9 に冬期間の地上比湿の ME の改善を示す。地上気温の改善は、MEPS の変更によりスプレッドの増加した領域 (主に北海道など) においてインクリメントが増加した (局地解析のハイブリッド同化において、MEPS のスプレッドの増加により気象場に依存する背景誤差が大きくなり、観測データのインパクトがより大きくなった) ことにより、より地上気温の観測情報が適切に初期値に反映されたことによるものである。地上比湿の改善は、偽相対湿度³と温位の負の誤差共分散が増加したため、地上気温観測が地上比湿のインクリメントに与える影響が大きくなったことの結果とみられる。対ラジオゾンデ検証では北海道や大陸側の地点において初期値の下層の気温、高度場の RMSE が改善した (図略)。これは今回の MEPS の変更で下層気温のスプレッドが北海道や大陸等で増加したことにより下層気温のインクリメントが増加したためと考えられる。しかし、925 hPa の気温予測では FT=3 で改悪となった。MEPS の変更による 925 hPa の気温スプレッドは過大であることから、背景誤差の見積もりが過大となった可能性がある。これらの変化は、いずれも MEPS の変更によるスプレッドの変化との対応が見られる結果と言える。

4.3.5 まとめ

初期摂動と側面境界摂動のみを考慮している MEPS において、新たに数値予報モデルの不確実性を考慮するため、SPPT 法の導入に向けた開発を進めてきた。SPPT 法を導入し、初期摂動の振幅を抑えたシステムにおいて、降水確率予測の悪化を抑えつつ、スプレッドの空間分布が適正化することを確認した。このスプレッドの変化は、MEPS 摂動に基づく背景誤差を通して局地数値予報システムに影響するが、その影響がスプレッドの変化と対応することを確認した。この結果を踏まえ、2023 年に MEPS に本変更を導入する計画

³ asuca-Var の解析変数の一つで、(水蒸気の混合比) / (第一推定値の飽和水蒸気の混合比) で定義される。

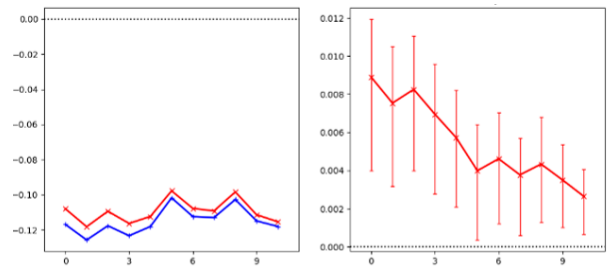


図 4.3.9 局地数値予報システムの冬期間における対地上観測検証の地上比湿 [g/Kg] の (左) RMSE、(右) TEST と CNTL の差。横軸は予報時間 [h]。青線が CNTL、赤線が TEST。

である。現在、同時期に計画される全球モデル、メソモデルの変更と組み合わせた実験を実施し、2023 年の MEPS 更新に向けた準備を進めている。

今後の開発に向けて、今回適用できなかった物理過程 (雲物理、境界層、地表面等) の不確実性を捕捉する手法の検討や、不確実性が小さいと考えられる晴天放射の時間変化率に摂動を与えない修正 (Lock et al. 2019)、等が SPPT 法の改良課題として挙げられる。また、他のモデルアンサンブル手法との併用なども考えられ、MEPS における数値予報モデルの不確実性のより適切な表現を考えていく必要がある。さらには初期摂動や側面境界摂動の改良、下部境界摂動の導入も今後の MEPS の改良課題として重要であり、これらの課題の優先度等を検討しながら引き続き MEPS の改良に取り組んでいく。

参考文献

- Buizza, R., M. Miller, and T. N. Palmer, 1999: Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF ensemble prediction system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **125**, 2887–2908.
- 川田英幸, 欠畑賢之, 河野耕平, 2021: 気象庁メソアンサンブル予報システムへの確率的物理過程強制法の導入に向けた開発. 第 24 回非静力学モデルに関するワークショップ予稿集.
- 気象庁, 2021: メソ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 2 年), 気象庁 数値予報開発センター, 66–73.
- 気象庁, 2022: メソアンサンブル予報システムの鉛直層増強と物理過程の改良. 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, 100–101.
- 國井勝, 小野耕介, 2020: メソアンサンブル予報システム. 数値予報課報告・別冊第 66 号, 気象庁予報部, 85–115.
- Lock, S. J., S. T. Lang, M. Leutbecher, R. J. Hogan, and F. Vitart, 2019: Treatment of model uncertainty from radiation by the Stochastically Perturbed Parametrization Tendencies (SPPT) scheme

and associated revisions in the ECMWF ensembles.

Quart. J. Roy. Meteor. Soc., **145**, 75–89.

西本秀祐, 2020: 境界層. 数值予報課報告・別冊第 66 号, 気象庁予報部, 69–78.

Palmer, T. N., R. Buizza, F. Doblas-Reyes, T. Jung, M. Leutbecher, G. J. Shutts, and M. Steinheimer A. Weishemer, 2009: Stochastic parametrization and model uncertainty. *ECMWF Tech. Memo*, **598**, 42pp.

氏家将志, 2020: 雲過程. 数值予報課報告・別冊第 66 号, 気象庁予報部, 45–55.

4.4 局地モデルの改良

4.4.1 はじめに

局地モデルは、時空間スケールの細かな現象の予測を迅速に提供することを目的とした予報モデルで、防災気象情報・航空気象情報の作成を支援する重要な基盤モデルと位置付けられている。2022年12月時点で、水平解像度2 km、鉛直76層の予報モデルとなっており、1日24回（毎正時初期値）予報時間10時間で運用している。今般、予測精度向上のために格子平均標高の作成元データを高精度・高解像度のMERIT DEM(Yamazaki et al. 2017)に置き換えるとともに、物理過程を改良し、2022年度末に局地モデルを更新する計画である。本節では、これらの改良項目の概略と物理過程の変更による予測特性の変化について述べる。

4.4.2 変更の概要

本項では、2022年度末に予定している局地モデルの変更の概要と、個々の変更を適用したときの予測特性の変化を報告する。モデルで用いる格子平均標高の作成元データを、米国地質調査所のGTOPO30（約1 km解像度）から約90 m解像度のMERIT DEMに置き換えるとともに、物理過程について以下の変更を適用する計画である。

- 雲物理過程について、メソモデルで用いているスキームの導入に加え、混相雲の扱いの変更、雲氷の質量-粒径関係の変更等の改良
- サブグリッドスケールの地形の起伏によって生じる乱流による抵抗の効果（Turbulent Orographic Form Drag; TOFD）の新規導入
- 放射過程で用いる微量気体濃度（CO₂, N₂O, CH₄）を2020年全球気候値に基づいて更新
- 境界層乱流スキームであるMYNNスキームで用いられる、乱流混合や乱流エネルギー散逸を特徴づける長さスケール定式化の改良

境界層乱流スキームの変更については、2022年3月に現業化されたメソモデルで導入された項目と同一であるため、変更の詳細については数値予報開発センター年報（令和3年）第4.4節（気象庁2022）を参照いただきたい。

各項で示す比較実験について、2022年8月時点のルーチン相当の設定とした実験をコントロール（CNTL）とし、個別の変更を適用した設定の実験をテスト（TEST）と表記する。統計検証では以下の実験期間を対象とした。

- 夏期間：2020年7月2日～7月15日
- 冬期間：2020年1月11日～1月21日

雲物理の改良

局地モデル・メソモデルの雲物理はいずれも1モーメントバルク法に基づくスキームを採用しているが、仕様の詳細が大きく異なる。メソモデルの雲物理は基

盤モデルを2017年2月にこれまで運用してきたJMA-NHM(Saito et al. 2006)から新しい気象庁非静力学モデル asuca(Ishida et al. 2022)に置き換えた際に、JMA-NHMの雲物理スキームから大幅な改良がなされた。さらに、2020年3月のメソモデル更新の際にも改良が加えられており、新しい科学的知見が多く取り込まれている（以下、2020年3月以降メソモデルで用いている雲物理をMPascと表記する）。他方、局地モデルについてはJMA-NHMの雲物理スキームが用いられている。今年度の局地モデル更新では、雲物理スキームを従来のものからMPascに置き換えるのに加え、以下に述べる変更を適用する計画である。なお、MPascの詳細については、数値予報開発センター年報（令和2年）第2.2.8項（気象庁2021a）を参照いただきたい。

MPascを局地モデルにそのまま適用した場合、衛星シミュレータ（RTTOV）を用いた調査から、冬季の日本海上等の混相雲で過冷却水滴（雲氷）が過少になることが開発の過程で明らかとなった。そこで、観測に基づく混相雲の雲量診断の見直し（Abel et al. 2017）を行うことで固相の成長による雲氷の消費を軽減した。また、MPascでは雪と雲氷で同じ質量-粒径関係（Brown and Francis 1995）を使用しているが、この関係式は粒径が100 [μm]以上を想定したものであり、粒径の小さな雲氷に適用するのは適切でないと考えられる。そこで、雲氷の質量-粒径関係を100 [μm]以下についても考慮しているMitchell et al. (2010)の関係式に変更した。その他、局地モデルの水平格子間隔に応じた臨界相対湿度の調整や、昇華・蒸発・融解過程の定式、雲氷の落下速度計算、雪と雲氷の衝突併合過程、部分雲過程に関連する見直しを行った。

以下に、MPascへの置き換えおよび改良を加えた雲物理の予測への影響を示す。ただし、TESTでは上記雲物理の変更に加えて境界層スキームの変更も適用した。これは、境界層スキームの変更により乱流統計量が適正化された効果が部分雲の表現に影響することを前提として、今般の雲物理の開発を実施したためである。図4.4.1に夏季の低気圧による降水事例について、GPM主衛星二周波降水レーダー（DPR）のKu帯レーダーの反射強度を、衛星シミュレータによってモデル出力から算出した反射強度と比較した結果を示す。MPascの導入および上述の改良により、高度5 km付近に見られる融解層の上層・下層ともにTESTで改善が見られた。まず、融解層より上層に着目すると、CNTLでは過大であった反射強度が、TESTでは観測に近づいていることが分かる。CNTLの方が雪の平均粒径が大きいことが上層の反射強度が高くなる原因となっているが、TESTで雪の粒径分布が変わることで、CNTLで過大であった雪の平均粒径が小さくなったこと、また、質量-粒径関係の変更により、粒径が大きくなると共にバルク密度が小さくなる効果を考慮するようになった結果である。次に、融解層より下層に着目すると、高度約

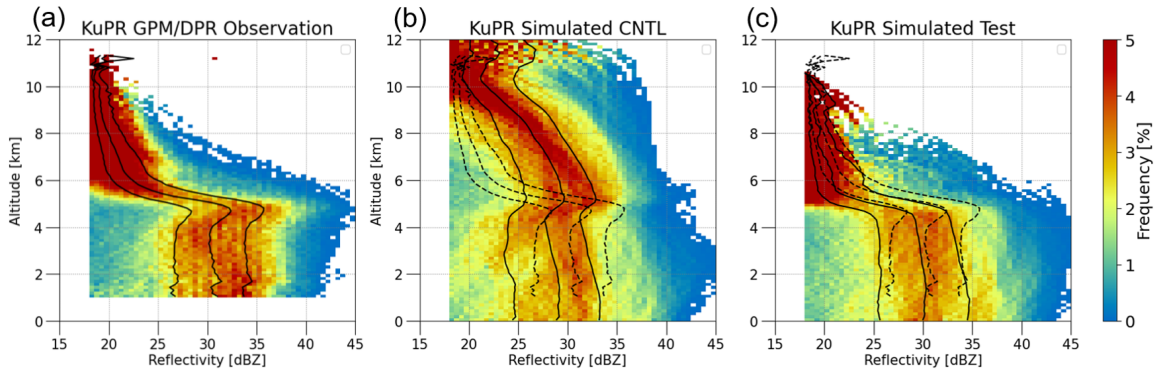


図 4.4.1 2020 年 7 月 13 日 01UTC における GPM/DPR の Ku 帯レーダーの反射強度 [dBZ] の CFADs (Contoured Frequency by Altitude Diagrams: レーダー反射強度の高度別頻度分布)。(a) は観測値、(b),(c) はそれぞれ CNTL, TEST の予測結果 (FT=10) を表す。実線は、(a)-(c) それぞれの 25・50・75 % タイル値を、(b),(c) の破線は観測値による値を表す。

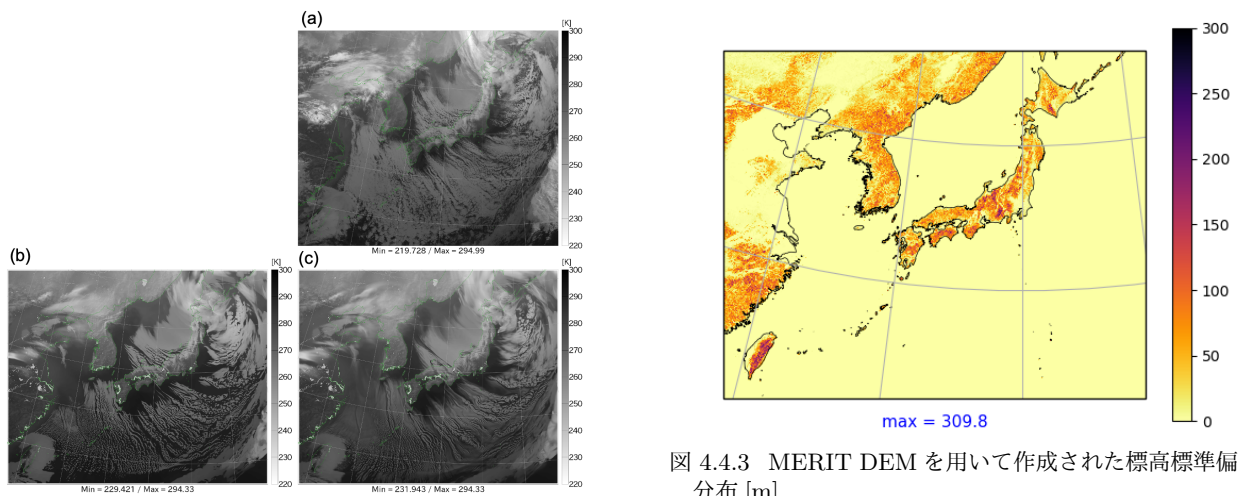


図 4.4.2 2022 年 1 月 12 日 06UTC におけるひまわり 8 号バンド 13 の輝度温度 [K]。(a) は観測値、(b),(c) はそれぞれ CNTL, TEST の予測結果 (FT=9) を表す。(b),(c) はそれぞれのモデル出力から衛星シミュレータを用いて得られた結果を示している。

2-4 km 付近の反射強度の頻度は、CNTL よりも TEST の方が観測に近い。雨の粒径分布は CNTL, TEST で同じ関数形を用いるため、この差は雨水混合比の差に起因する。部分雲過程の導入、霰の生成が多くなったことによる融解の増加、雪の粒径分布変更による雪の融解の増加により雨の生成が多くなったことに加え、雨の落下速度-粒径関係の変更により、雨の落下が少し遅くなり大気中に残りやすくなったことによるものと考えられる。

図 4.4.2 に冬型事例におけるひまわり 8 号バンド 13 の輝度温度の分布を示す。TEST は、北陸沖における雲が過剰ではあるものの、寒気吹き出しの上流側における雲や日本の南海上における雲に着目すると、CNTL は雲域が狭い一方、TEST では雲域の広がり観測に近づく。これは、部分雲過程の導入により、格子平均値で飽和に達していても、雲が存在できるように

図 4.4.3 MERIT DEM を用いて作成された標高標準偏差の分布 [m]

なった影響と考えられる。このような部分雲過程の導入による改善は、夏季の海上の弱い降水を伴う対流の表現においても確認された。

地形性乱流による形状抵抗導入

メソモデルや局地モデルでは、統計検証の結果から対流圏下層や地上において強風バイアスがあることがわかっている。その原因の一つとして、サブグリッドの地形起伏の影響を考慮していないことが考えられる。このような問題意識から、サブグリッドスケールの地形性乱流による抵抗の効果を表現するために、Beljaars et al. (2004) が提案した TOFD スキームを新たに局地モデルに導入する計画である¹。

Beljaars et al. (2004) の TOFD スキームでは、サブグリッドの標高標準偏差に応じてパラメタライズした形状抵抗を下層水平風の時間変化率に与える。したがって、サブグリッドの標高標準偏差を適切に算出するためには、局地モデルの水平解像度 (2 km) よりも十分に高解像度の標高データが欠かせない。そこで、平均

¹ 全球モデルでは TOFD スキームが 2020 年 3 月に導入された (気象庁 2021b)。

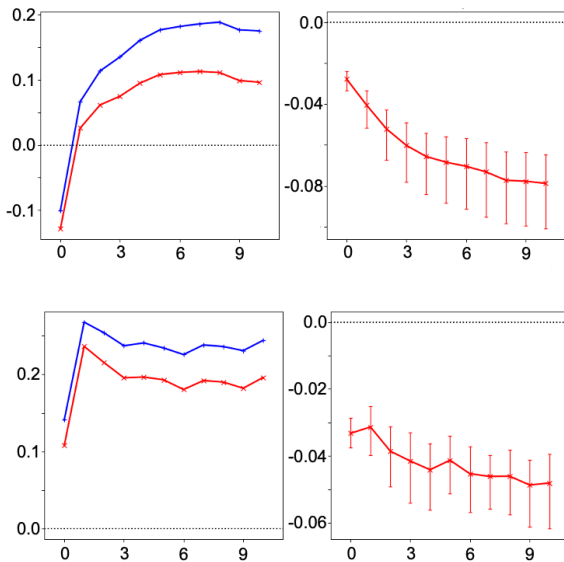


図 4.4.4 地上風速の対アメダス平均誤差 [m/s] (左) と TEST の CNTL からの差 (右)。横軸は予測時間 [h] を表し、上段が夏期間、下段が冬期間の検証結果である。左図において CNTL、TEST の結果はそれぞれ青線、赤線に対応する。

標高の元データと同様に、約 90 m 解像度の MERIT DEM (Yamazaki et al. 2017) から標高標準偏差データを作成した。標高標準偏差を算出する前段階で、地形データにバンドパスフィルタを適用し、TOFD で対象とする水平スケールの起伏を抽出した。取り出す水平スケールは、Beljaars et al. (2004) では GTOPO30 の利用を想定して 2 km–20 km としているが、MERIT DEM では微細な地形構造を反映できることから、局地モデルの解像度で適切に利用する目的で 400 m–4 km とした。合わせて、地形フィルタ幅に依存する TOFD の係数も修正した。この設定で算出した標高標準偏差の分布を図 4.4.3 に示す。分布の特徴として、標高は高いが砂漠域が広がる大陸奥地などでは標準偏差が比較的小さい一方、日本の中部山岳や台湾などでは大きいことが挙げられる。

TOFD を導入した実験²を TEST とした統計検証結果として、地上風速の対アメダス平均誤差を図 4.4.4 に示す。夏期間の初期値を除き地上風速は強風バイアスが見られるが、TEST では夏冬ともにバイアスが軽減していることが分かる。また、地上だけでなく下層大気の強風バイアスも、対ラジオゾンデ検証、対ウインドプロファイラ検証のいずれでも軽減する結果が得られた。地上風速の弱体化は地表面からの顕熱・潜熱を減らす要因になるため、気温や比湿にも影響を及ぼす。統計検証結果からは、夏期間を中心に地上気象要素の全般的な改善が確認できた。

夏季の降水についても、対解析雨量の統計検証でも弱～中程度の雨量を中心に空振り率・見逃し率がとも

² 本実験では平均標高は CNTL と同じ GTOPO30 を用いた。

に低下しており、改善が確認された。降水で改善がみられた事例を図 4.4.5 に示す。この事例では梅雨期で南西風が卓越しており、CNTL では解析雨量と比較して中部山岳の風下で過大な降水がみられる (図の破線内)。一方、TEST では山地を中心に下層の風速が低下し、山岳風下の過大な降水が減少した。地形に対応したこのような特性変化が、弱から中程度の雨量の階級での空振り率の減少に寄与していると考えられる。

微量気体濃度定数更新 (放射)

放射計算で用いられる温室効果気体については、CO₂、N₂O、CH₄ の濃度として通年の気候値を領域一様に与えている。これまで局地モデルで使われているこれらの微量気体濃度は 2000 年前後の全球平均値を用いており、近年の値と比べて過小であった。今年度のモデル更新で、微量気体濃度の値を WMO が算出している温室効果気体の 2020 年全球平均値に変更する。この変更により温室効果気体の寄与が増加することから、対流圏の気温が上昇する。

更新前後の地上下向き長波を基準地上放射観測網 (BSRN) の観測値と比較した結果を図 4.4.6 に示す。定数更新により、どの地点でも夏冬ともに地上下向き長波は増加し、夏期間に 0.15 [W/m²]、冬期間に 0.4 [W/m²] 程度の影響があることが分かる。札幌では夏期間に正バイアスであるためバイアスが拡大するが、それ以外では観測と比べ過小であり、定数更新によりバイアスが軽減する。地上下向き短波については、CO₂ の透過率が低下した結果、0.1–0.2 [W/m²] 程度減少することを確認した。

4.4.3 まとめ

本節では、2022 年度末に予定している局地モデルの更新について、物理過程の改良に向けた開発とそれによって得られた効果を概観した。雲物理において、メソモデルで用いているスキームはより新しい知見が取り込まれていることから、局地モデルにも同じスキームを導入したことに加え、いくつかの改良にも取り組んだ。今般導入する雲物理スキームでは、レーダー反射強度や衛星シミュレータを用いた検証において、より観測に近づくことが確認できた。地形性乱流による形状抵抗を今回新たに導入することで、地上および下層大気の強風バイアスが軽減するだけでなく、地上気象要素の全般的な誤差軽減や地形に起因する降水表現の改善にも寄与した。また、放射で用いる微量気体濃度定数を近年の値に更新することで、地上下向き長波の平均誤差が軽減した。今後、2023 年度末に局地モデルの予測時間延長、2025 年度に水平分解能の高解像度化を予定している。これに合わせ、予測精度の向上に資するため物理過程の改良にも継続して取り組む計画である。

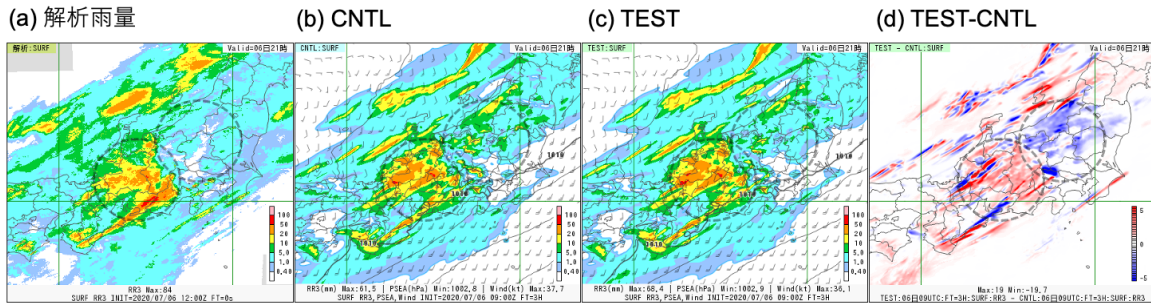


図 4.4.5 2020 年 7 月 6 日 12UTC (2020 年 7 月 6 日 09UTC 初期値) の前 3 時間降水量 [mm]。(a) 解析雨量、(b)CNTL、(c)TEST、(d)TEST の CNTL からの差にそれぞれ対応しており、(b) と (c) の等値線は海面更正気圧 [hPa]、矢羽根は地上風 [kt] を示す。

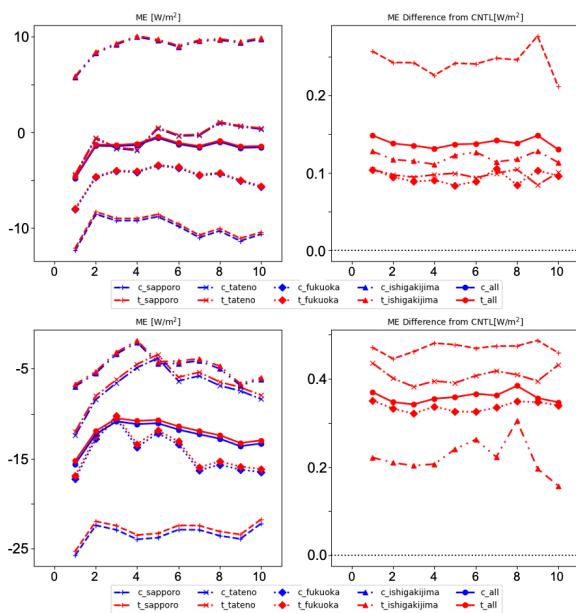


図 4.4.6 地上上下向き長波の基準地上放射観測網 (BSRN) 各地点での平均誤差 [W/m^2] (左) と TEST の CNTL からの差 (右)。+ : 札幌、× : 館野、◆ : 福岡、▲ : 石垣島、● : 4 地点の平均にそれぞれ対応する。横軸は予測時間 [h] を表し、上段が夏期間、下段が冬期間の検証結果である。左図において CNTL, TEST の結果はそれぞれ青線、赤線に対応する。

参考文献

Abel, S. J., I. A. Boutle, K. Waite, S. Fox, P. R. A. Brown, R. Cotton, G. Lloyd, T. W. Choullarton, and K. N. Bower, 2017: The Role of Precipitation in Controlling the Transition from Stratocumulus to Cumulus Clouds in a Northern Hemisphere Cold-Air Outbreak. *J. Atmos. Sci.*, **74**, 2293–2314.

Beljaars, A. C. M., A. R. Brown, and N. Wood, 2004: A new parametrization of turbulent orographic form drag. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **130**, 1327–1347.

Brown, P. R. and P. N. Francis, 1995: Improved Measurements of the Ice Water Content in Cirrus Using

a Total-Water Probe. *J. Atmos. and Oceanic Technol.*, **12**, 410–414.

Ishida, J., K. Aranami, K. Kawano, K. Matsubayashi, Y. Kitamura, and C. Muroi, 2022: ASUCA: the JMA operational non-hydrostatic model. *J. Meteor. Soc. Japan*, **100**, 825–846.

気象庁, 2021a: メソ解析とメソモデルの改良. 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, 48–55.

気象庁, 2021b: 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, 2022: メソ数値予報システムの鉛直層増強、予報時間延長、物理過程の改良. 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, 92–99.

Mitchell, D. L., P. Robert, and R. P. Lawson, 2010: Inferring Cirrus Size Distributions through Satellite Remote Sensing and Microphysical Databases. *J. Atmos. Sci.*, **67**, 1106–1125.

Saito, K., T. Fujita, Y. Yamada, J. Ishida, Y. Kumagai, K. Aranami, S. Ohmori, R. Nagasawa, S. Kumagai, C. Muroi, T. Kato, H. Eito, and Y. Yamazaki, 2006: The operational JMA nonhydrostatic mesoscale model. *Monthly Weather Review*, **134**, 1266–1298, doi:10.1175/MWR3120.1.

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.

4.5 観測データの新規導入と利用方法の改良

4.5.1 はじめに

気象庁の数値予報システムでは、初期値解析において様々な観測データが同化されている。初期値精度の向上は予測精度向上に重要であり、新規観測データの導入や観測データの利用方法の改良が継続的に進められている。

本節では、新規観測データの導入や観測データの利用方法の改良に関して、現在進められている主な開発の進捗を報告する。

4.5.2 放射伝達モデル RTTOV の更新

(1) RTTOV 更新の概要

衛星により観測された輝度温度の同化では、観測演算子として放射伝達モデルを用い、計算した輝度温度を観測された輝度温度と比較している。放射伝達モデルは、数値予報モデルが出力する気温・水蒸気のプロファイル及び地表面情報を入力として輝度温度を計算する。気象庁では、全球解析への輝度温度同化開始(計盛・岡本 2004; 計盛ほか 2005; 岡本 2007)以来、放射伝達モデルとして、EUMETSAT の NWP-SAF で開発された RTTOV(Eyre 1991) を用いている。

RTTOV は計算精度向上や機能追加、新規衛星への対応など、常に改良が行われており、数年ごとに新しいバージョンがリリースされている。RTTOV を最新版に更新することにより、最新の技術開発成果を取り込むことができるほか、バグ修正や新たに打ち上げられた衛星への対応といったサポートも受けられる。そのため、継続的に輝度温度データを利用する上で RTTOV の更新が必要である。

現在、RTTOV-10.2 から RTTOV-13(Saunders et al. 2020) への更新作業を行っている(気象庁 2022f)。RTTOV-13 への更新による主な変更点に、以下のものがある。

- 最新の気体吸収データベースに基づく放射伝達計算用の係数(以下「係数」とする)の更新
- マイクロ波における雲や降水域の輝度温度計算の高度化
- 赤外波長帯における雲域の輝度温度計算の精緻化
- 陸域の射出率データベースの更新
- 海面射出率モデルの更新(赤外: IREMIS、マイクロ波: FASTEM-6)

輝度温度データは、全球解析、メソ解析、局地解析システムでそれぞれ同化利用されており、これらすべてにおいて RTTOV の更新作業が必要となるほか、輝度温度を観測する利用中のセンサすべてに関して、変更による影響の確認が必要となる。変更箇所が多岐にわたる大規模な変更となり、予期せぬ変化や異常が生じる可能性があるため、導入に向けた更新作業は、以下のように 2 段階に分けて確実に実施した。まずは、

システムへの組み込みとして、モジュールの差し替えや定数ファイル名の変更など、RTTOV-13 が動作するために必要な最低限の(科学的に新しい機能の利用を含まない)変更を行い、大規模な更新を確実に実施する。次に、RTTOV-13 で導入された科学的に新しい機能を利用するため、計算アルゴリズムの変更や最新の分光学に基づいた高精度なシミュレーションが可能となる、放射伝達計算用の係数の更新を中心とした変更を実施する。

第一段階のシステムへの組み込みは、全球解析およびメソ解析については 2022 年 6 月 30 日に、局地解析については 2022 年 8 月 9 日に、それぞれ実施した。現在、第二段階の新機能の利用に向けた変更について作業を進めている。以下、第一段階および第二段階についてそれぞれ概要を述べる。

(2) RTTOV-13 のシステムへの組み込み

大規模な変更を確実に実施するための第一段階として、RTTOV-13 が動作するための必要最低限の実装を行った。実装の内容は、モジュールの更新の他、RTTOV-10.2 とは互換性がなく RTTOV-13 での導入が必須となる、陸域の射出率データベースの更新および、マイクロ波における雲や降水域の輝度温度計算の高度化である。係数については、フォーマットのみ RTTOV-13 に対応する変更をし、RTTOV-10.2 で利用していた係数の内容を変更せず、輝度温度の計算結果を大きく変えないようにした。組み込み作業では着手時点での最新バージョン 13.0 を利用して RTTOV ライブラリを作成し、RTTOV の外部仕様等の変更に合わせて RTTOV を使用するモジュール類やテーブル等を変更した。全球解析、メソ解析および局地解析の各システムにおける実装の変更箇所と更新内容の対応を表 4.5.1 に示す。

陸域の輝度温度の計算では、一部のセンサを除き、陸域の射出率として RTTOV 付属の射出率データベースの値を入力としている。マイクロ波サウンダ AMSU-A、MHS および ATMS では、マイクロ波の陸面射出率として CNRM データベース¹(Karbou et al. 2006, 2010) を利用している。RTTOV-13 では CNRM データベースの内容が 2015 年の観測に基づく気候値に更新されるとともに、ファイルフォーマットが変更され、従来のファイルは利用できなくなった。このことから、内容の更新された新しいデータベースを利用することとした。ただし、新しいデータベースではサンプリングの影響と思われる空間的な欠損が点在するため、元のデータベース(解像度 0.25°)を格子点毎に 0.5°×0.5°の領域で平均して欠損値を補完したファイルを作成して利用した。また、チャンネルによって欠損の状況が異

¹ フランス気象局の国立気象研究センター(Centre National de Recherches Météorologiques)で作成されたデータベース。

なることへの対応等、必要に応じた処理の修正も行った。なお、赤外センサについては、赤外の陸面射出率データベース UWIREMIS(Borbas and Ruston 2010)を静止気象衛星の CSR の同化で利用している。このデータベースについては、フォーマットのみ変更されたファイルが提供されており、これを利用することから、輝度温度の計算結果には影響はない。

全球解析では、衛星に搭載されたマイクロ波イメージャやマイクロ波水蒸気サウンダを、雲・降水域も含めた全天同化により利用している(気象庁 2021a, 2022e)。RTTOV を用いて雲や降水域を含む輝度温度を計算するには、雲や降水粒子の散乱特性を定義する散乱定数ファイルが必要である。RTTOV-13 では、雲氷、雪、霰の非球形粒子による散乱を考慮するように計算が高度化され(Geer et al. 2021)、散乱定数ファイルが更新された。これにより、RTTOV-10.2 で用いていた従来の散乱定数ファイルは利用できなくなることから、RTTOV-13 における高度化を適用する必要性が生じた。RTTOV-13 用に提供されている散乱定数ファイルには雲氷、雲氷、雨、雪、霰の散乱定数が含まれている一方、RTTOV-10.2 を用いた雲や降水域の輝度温度の計算では、RTTOV に雲氷、雲氷、降水フラックス、降雪フラックスを与えており、霰に関するパラメータは与えていない。霰に関するパラメータの扱いを RTTOV-10.2 と揃えるため、RTTOV-13 用に提供されている散乱定数ファイルから、霰に関する定数を除いたファイルを作成して利用するようにした²。図 4.5.1 に RTTOV-10.2 と RTTOV-13.0 で計算したマイクロ波イメージャ GMI のチャンネル 13 (183.31±7 GHz) の輝度温度の例を示す。対流雲の周辺において計算された輝度温度はいずれも観測より低いバイアスを持つ傾向にあるものの、RTTOV-13 ではバイアスが緩和され、観測に近い輝度温度が計算されている。結果として、品質管理で弾かれる観測データが減少し、利用される観測データがやや増加した。

ここまで述べたシステムへの組み込みと変更について、いくつかのステップで動作確認を行った。まず、解析予報サイクルをせずに、変更前のシステムと同一のモデル第一推定値を利用した品質管理処理のみの実験を行い、品質管理処理における基本的な実装に不備がないかを確認した。この実験を全球解析、メソ解析および局地解析の各システムにおいて一定期間行い、変更による輝度温度の計算値の統計的な特性を確認した。その結果、どのセンサについても、輝度温度の計算値と観測値の差や標準偏差について変更前後の差異は小さく、確認された差異についても、マイクロ波センサで射出率データベースを変更したことなど、加えた変

表 4.5.1 各システムにおける変更箇所と変更内容。表内の(1)~(3)は以下の通り。(1):モジュールの更新、(2):陸域の射出率データセットの更新、(3):マイクロ波における雲や降水域の輝度温度計算の高度化。

システム	変更箇所	変更内容
全球	解析前処理 (解析本体用、LETKF 用)	(1)、(2)、(3)
	解析本体、LETKF	(1)、(3)
メソ、 局地	解析前処理	(1)、(2)
	解析本体	(1)
	解析後処理	(1)、(2)

更に対応する変化であった。全球解析において全天同化を行うマイクロ波センサについては、輝度温度の計算値と観測値の差異の統計的性質に基づき雲や降水の影響に応じた観測誤差を設定していることから、雲や降水域を含む輝度温度の計算の高度化が、観測誤差の設定に与える影響について着目した。その結果、統計的性質の変化は小さく、観測誤差の設定に変更の必要はないことを確認した。

次に、解析本体を含めたシステムの実装を確認するため、解析予報サイクルをせずに解析処理までを行う実験を一定期間行った。その結果、全球解析、メソ解析および局地解析の各システムにおいて、解析インクリメントや解析コストが意図通りほとんど変わらないことを確認した。さらに、解析予報サイクル実験により予測精度が概ね中立であることを確認し、ここまで述べたシステムへの組み込みによる顕著な変化は起きておらず、想定通りの動作をしていることを確認した。全球解析においては、全天同化マイクロ波センサで利用される観測数が増加することにより、LETKF でスプレッドが減少するとともに、それ対応して共分散膨張係数が大きくなっており、想定通りの結果が得られたことを確認した。

これらの結果を踏まえ、全球解析、メソ解析および局地解析の各現業システムに、RTTOV-13 の組み込みを適用した。

(3) RTTOV-13 の新機能の利用

現在、RTTOV-13 のシステムへの組み込みによって利用可能となった新しい係数や海面射出率モデルの導入に向けて、開発を進めている。これらの更新では、RTTOV による輝度温度の計算精度が変化するため、計算された輝度温度の統計に基づいて作成されるパラメータ等(固定値によるバイアス補正量、観測誤差、品質管理に必要な定数等)は、いずれも確認や見直しが必要となる。

これまでの調査では、新しい係数や海面射出率モデルの導入により輝度温度の計算精度自体は向上し、観測値に近づくことを確認した。一方で、解析予報サイクル実験を行ったところ予測精度に改悪が見られ、調査や対応が必要となっている。原因として、更新によって

² 提供されている散乱定数ファイルを利用して霰を 0 として与えることも可能であるが、散乱定数ファイルから霰に関する定数を除いたファイルを利用した場合と比べてアジョイントの計算結果がわずかに異なるため、この対応とした。

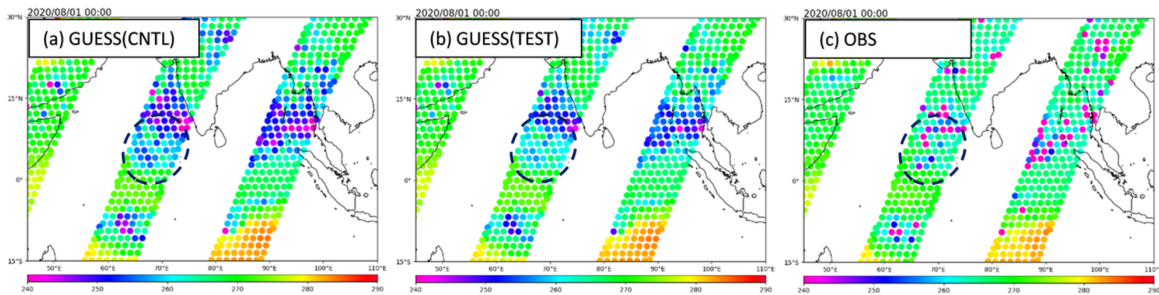


図 4.5.1 RTTOV-10.2 と RTTOV-13.0 で計算された GMI のチャンネル 13 (183.31±7 GHz) の輝度温度の比較 (解析時刻 2020 年 8 月 1 日 00UTC におけるデータ分布の例)。(a)GUESS(CNTL) と (b)GUESS(TEST) はそれぞれ RTTOV-10.2 と RTTOV-13.0 により計算された輝度温度。(c)OBS は観測された輝度温度。単位はいずれも [K]。

品質管理処理の結果が変化することが考えられる。例えば、マイクロ波気温サウンダ AMSU-A の品質管理で用いる雲水量を輝度温度から推定する際に、新たな係数で再作成されたスキャンバイアス補正值を用いると、雲水量の複数衛星間の差異は解消することから、推定した雲水量の精度自体は向上していると考えられるが、既存の閾値をデータの不使用の判定に用いると、衛星によってはこれまでより利用データ数が減少し、予測精度の悪化の一因となっていることが分かった。そのため、品質管理に用いている従来の様々な閾値や、品質管理処理自体についての見直しが必要である。現在、センサごとに予測精度の改悪の原因を調査し、品質管理処理の変更の可否を検討しているところである。

RTTOV-13 には、システムへの組み込みの際に利用するようにした射出率データベース以外にも、いくつかの射出率データベースが追加されている。CNRM データベースには、マイクロ波センサ SSMIS の射出率が新しく利用可能となった。また赤外の射出率データベースとして、2000 年から 2016 年の気候値である CAMEL climatology(Borbis and Feltz 2019) が利用可能である。今後、これらの新しい射出率データベースの利用を検討する。

(4) まとめと今後の課題

現在利用中の放射伝達モデル RTTOV について、最新バージョンである RTTOV-13 をシステムへ実装した。これにより、全天同化など衛星データの先進的な技術を取り込むことができるようになるほか、バグ修正や新しい衛星への対応といったサポートが可能になるなど、輝度温度データの利用高度化に向けて大きく前進した。

係数の更新や射出率モデルの更新など、RTTOV-13 の新機能を利用することで、輝度温度の計算精度が向上することを確認した。一方で、品質管理処理の結果が変化することで予測精度が悪化し、輝度温度の計算結果の向上が単純に予測精度の向上につながらないことが確認された。品質管理処理の結果が変化する原因として、品質管理に用いている閾値等が、必ずしも精度向上した計算結果に適合していない可能性がある。

RTTOV-13 の新機能を最大限活用できるよう、更新による品質管理処理への影響の調査や対処についての検討を引き続き行う。

4.5.3 ハイパースペクトル赤外サウンダの全球解析における利用改良およびメソ・局地解析における新規利用

(1) ハイパースペクトル赤外サウンダ利用の概要

ハイパースペクトル赤外サウンダ (以下「赤外サウンダ」) は、赤外の波長帯において高い波長分解能の多数のチャンネルで観測することにより、大気中の温度や水蒸気量の鉛直分布を得ることのできるセンサである。当庁においては現在全球解析でのみ利用中であるが、メソ解析において導入を目指して開発を進めている (気象庁 2022b)。

現在全球解析では、気温に感度のあるチャンネル (以下「気温チャンネル」) のみを利用している。水蒸気に感度のあるチャンネル (以下「水蒸気チャンネル」) の利用には、気温チャンネルと比較してチャンネル間誤差相関が強いことや、気温にも感度があることから水蒸気の情報に気温に反映され気温の情報が損なわれる恐れがある (エイリアシング問題) といった難点があり、これまで利用できていなかった (岡垣 2015)。また、メソ解析では、独自のバイアス補正を行っていなかったことや、メソモデルの上端の高度が全球モデルと比較して低く輝度温度の計算に誤差が生じるなど課題があり、利用に向けた開発が進んでいなかった (岡本ほか 2020)。

今般、全球解析においては、互いに誤差相関の小さい複数の水蒸気チャンネルを選択し、気温チャンネルに追加して利用する。またメソ解析については、2020 年の asuca-Var 導入 (Ikuta et al. 2021) により独自にバイアス補正ができるようになった他、メソモデルの上端の高度が衛星観測データの利用拡充を主な目的として引き上げられるなど (気象庁 2022d)、システムの改善により赤外サウンダの利用がより進めやすくなったことを受け、気温チャンネルおよび水蒸気チャンネルを新規に利用する。局地解析については、モデル上端高度が低い問題は依然としてあるものの、水蒸気チャ

ンネルについてはモデル上端より上部の大気プロファイルへの感度が小さいため、全球解析での利用で選択した水蒸気チャンネルを新規に利用する。

以下では、2022年度末の現業利用開始に向けて現在開発を進めている、全球解析における水蒸気チャンネルの利用および、メソ・局地解析における赤外サウンダの新規利用について、概要を述べる。

(2) 全球解析における水蒸気チャンネルの利用

RTTOVによる Jacobian (各高度における気温や水蒸気量などの変化に対する輝度温度への感度) を元に、水蒸気チャンネルの候補を選択した。候補となったチャンネルの数はIASIで64個、CrISで27個となった。

すべての水蒸気チャンネルの候補を同化した予備実験を実施し、Desroziers et al. (2005) の手法を用いてチャンネル間誤差相関を診断し、互いに誤差相関の少ない複数チャンネルを選択した。最終的にIASI、CrISともに9個のチャンネルが選択された。その他の品質管理や変分法バイアス補正の説明変数は気温チャンネルと同等で、水蒸気チャンネルのために新たに加えた品質管理手法はない。水蒸気チャンネルの観測誤差はグロスエラーチェック以外の品質管理を施した後の観測値と第一推定値の差の標準偏差をもとに設定し、観測誤差の膨張係数は気温チャンネルと同様の3倍とした。

2021年12月時点の現業全球数値予報システム相当の実験システムを用い、赤外サウンダの水蒸気チャンネルを同化する性能評価試験を実施した。特に水蒸気に感度のある衛星観測データ(マイクロ波イメージャ、マイクロ波水蒸気サウンダ、静止衛星晴天放射輝度温度データ)において、観測値と第一推定値との整合性が向上していることが確認された。これは第一推定値の水蒸気場の予測精度向上を示唆している。また、外国センターの解析値を用いた予測値の検証では、水蒸気場を中心にRMSEが減少することを確認した。

(3) メソ解析における赤外サウンダの新規利用

メソ解析で利用するチャンネルは全球解析で使用している気温チャンネルおよび、使用開始を予定している前述の水蒸気チャンネルを候補とし、モデル上端高度よりも上部の大気に感度のあるチャンネルは利用しないこととした。

2022年3月時点の現業メソ数値予報システム相当の実験システムを用い、赤外サウンダ同化の性能評価試験を実施した。主に水蒸気に感度のある衛星観測において、観測値と第一推定値との整合性の向上が確認された。またラジオゾンデ観測を用いた予測値の検証では、対流圏中層付近における乾燥バイアスが改善することを確認した。

(4) 局地解析における赤外サウンダの新規利用

局地解析のモデル上端高度はメソモデルよりもさらに低く、全球解析で利用している気温チャンネルは利用

できない。そのためモデル上端高度より上空への感度が小さい水蒸気チャンネルのみを利用するようにした。

2022年8月時点の現業局地数値予報システム相当の実験システムを用い、赤外サウンダ同化の性能評価試験を実施した。主に水蒸気に感度のある衛星観測において、観測値と第一推定値との整合性の向上が確認された。

(5) まとめと今後の課題

全球解析における赤外サウンダの水蒸気チャンネルの利用および、メソ・局地解析における赤外サウンダの新規利用について開発を進めている。それぞれの数値予報システムでの性能評価試験では、水蒸気場の予測精度の改善が得られた。特に今回全球解析で新たに利用を開始する水蒸気チャンネルは、モデル上端高度の低いメソ・局地数値予報システムにおいても利用しやすく、精度改善への寄与が大きかった。

赤外サウンダ利用に関する今後の課題としては、チャンネル間誤差相関の考慮、チャンネル選択の最適化、雲判定の高度化、全天同化への移行などが挙げられる。赤外サウンダから得られる情報をより適切に解析値に反映できるように着実に開発していく必要があると考えている。また近年では衛星データ等から得られる観測データ量の増大によって、解析処理に必要な計算機資源が増大している。今後も観測機器の高度化によって更なるデータ量の増大が予想されるため、より効率よく赤外サウンダの情報を取り込むための開発にも取り組んでいく必要があると考える。メソ・局地数値予報システムにおける赤外サウンダの課題としては、モデル上端高度が低いことへの対処の方法を引き続き検討する必要がある。現在はモデル上端高度より上空への感度があるチャンネルを排除しているが、より多くのチャンネルの情報を活かすためには、1D-Varでリトリブした気温や水蒸気のプロファイルを同化する方向性もあるため検討したい。

4.5.4 二重偏波化された釧路・種子島・室戸岬・大阪 DRAW のレーダーデータの利用再開

全国20地点の一般気象レーダーの反射強度とドップラー速度、9地点の空港気象ドップラーレーダー(DRAW)のドップラー速度は、メソ解析、局地解析でデータ同化に利用されている³。

2022年6月時点における気象庁の一般気象レーダーとDRAWの二重偏波レーダーへの更新状況を表4.5.4に示す。更新が完了し運用を再開したレーダーの観測データは、いったん数値予報での利用を中止してデータ品質及び数値予報システムへのインパクトを確認した後、利用を再開している(気象庁2021b, 2022a)。

2021年7月以降に更新された釧路・種子島・室戸岬・大阪DRAW(以下、新規更新レーダーとする)の反射

³ ドップラー風速については毎時大気解析、三十分大気解析でも利用されている。

強度とドップラー速度のメソ・局地数値予報システムでの利用を再開するため、メソ・局地それぞれの数値予報システムにおいてデータ品質の調査及びこれらのデータが解析値及び予測値に与えるインパクトを調査した。なお、レーダーデータの同化手法及び品質管理 (Quality Control:QC) 処理は更新前 (石川 (2015)、幾田 (2015) などを参照されたい) と同様である。

局地解析における新規更新レーダーの疑似相対湿度⁴とドップラー速度の D 値⁵平均及び D 値標準偏差をそれぞれ表 4.5.3 と表 4.5.4 に示す。新規更新レーダーの疑似相対湿度とドップラー速度のデータ品質は、更新後に数値予報システムでの利用が再開されている福岡レーダーのデータ品質と概ね同等であり、問題がないことを確認した。同様にメソ解析においても新規更新レーダーのデータ品質に問題がないことを確認した。

図 4.5.2 は局地数値予報システムにおいて新規更新レーダーの疑似相対湿度とドップラー速度を同化に利用しない実験と利用した実験の 5 mm/h の降水予測スコア (10 km 平均) を示している⁶。図から、バイアスコアについては新規更新レーダーありの方がなしに比べてやや悪化する傾向が見られるが、空振り率と見逃し率が予測時間全体で改善したことにより、ETS は新規更新レーダーありの方がなしに比べて予測時間全体で改善していることが確認できる。メソ解析においても、15 mm/3 h より弱い雨で新規更新レーダーありの方がなしに比べて ETS が改善することを確認した。

他にも、メソ解析において対流圏中・下層を中心にラジオゾンデ、航空機等による風の観測値と第一推定値の整合性の改善⁷等が確認できたことから、令和 4 年

表 4.5.2 気象庁の一般気象レーダーと DRAW の二重偏波レーダーへの更新状況。赤字で示されているレーダーは本報告においてメソ解析、局地解析での利用を再開したレーダーである。「-」は未更新であることを示す。

一般気象レーダー				DRAW	
地点名	二重偏波運用開始日	地点名	二重偏波運用開始日	地点名	二重偏波運用開始日
札幌	-	福井	2020.11.05	新千歳	2020.10.29
釧路	2021.12.23	大阪	2020.12.18	成田	2016.12.01
函館	-	松江	-	羽田	2016.03.01
秋田	-	広島	2021.02.26	中部	2019.11.28
仙台	2021.06.11	室戸岬	2022.06.02	関西	2016.03.03
新潟	-	福岡	2021.01.14	大阪	2022.03.10
長野	-	種子島	2022.04.28	福岡	2020.03.19
東京	2020.03.05	名瀬	-	鹿児島	-
静岡	-	沖縄	-	那覇	2018.12.13
名古屋	2021.02.26	石垣島	-		

⁴ 反射強度から推定した相対湿度。

⁵ 観測値 - 第一推定値。

⁶ 新規更新レーダーの観測データを同化した実験は、データの追加に加えて第一推定値と境界値についても新規更新レーダーの観測データを同化したメソ予報のデータを使用している。

⁷ 観測には様々な誤差が含まれており、また、観測値が正し

表 4.5.3 局地解析における新規更新レーダーと福岡レーダーの疑似相対湿度の D 値統計。統計期間は 2022 年 06 月 23 日から 2022 年 7 月 6 日。

サイト名	平均 (%)	標準偏差 (%)	サンプル数
釧路	-0.156	7.76	185014
室戸岬	-0.349	5.68	118119
種子島	0.427	6.66	131667
福岡	0.387	8.15	56983

表 4.5.4 局地解析における新規更新レーダーと福岡レーダーのドップラー速度の D 値統計。統計期間は 2022 年 06 月 23 日から 2022 年 7 月 6 日。

サイト名	平均 (m/s)	標準偏差 (m/s)	サンプル数
大阪 DRAW	-0.121	1.92	54576
釧路	-0.156	2.04	80664
室戸岬	-0.010	2.09	74137
種子島	-0.176	2.06	86017
福岡	-0.068	2.28	48707

11 月にメソ数値予報システム及び局地数値予報システムにおいて新規更新レーダーの利用を再開した。

令和 5 年度についても二重偏波レーダーへの更新が予定されており、更新が完了したレーダーについてはデータ品質及びメソ数値予報システム、局地数値予報システムに与える影響を確認したうえで順次現業利用を再開する。また、レーダー更新に伴う観測データの品質向上に基づいた観測誤差の変更に関する調査・開発や、将来的な課題である偏波パラメータのデータ同化での利用に向けた調査を進める。

4.5.5 データ同化での船舶 GNSS 利用に関する開発

(1) 冬季におけるメソ解析での船舶 GNSS 可降水量の利用

令和 3 年 8 月からメソ数値予報システムにおいて船舶に設置した GNSS 受信機によって観測された可降水量 (以下、船舶 GNSS 可降水量とする) の利用を開始した (気象庁 2022c)。しかしながら、リアルタイムで入電した船舶 GNSS 可降水量の冬季におけるデータ品質とメソ数値予報システムに与える影響を確認出来ていなかったため、令和 3 年 11 月から船舶 GNSS 可降水量の利用を中断した。

冬季におけるメソ解析での船舶 GNSS 可降水量の利用にむけて、船舶 GNSS 可降水量のリアルタイムデータの品質の調査を行ったところ、D 値統計において夏季に比べて D 値平均の負バイアス傾向が強くなった。

この原因を確認するため、船舶 GNSS 可降水量と同等の海上の観測とみなせる船舶のラジオゾンデ観測や離島のラジオゾンデ観測から計算した可降水量とメソ解析の第一推定値とを比較して調査したところ、これらの観測値に対して第一推定値が大きくなる傾向があ

くても代表性誤差 (露木 2002) の観点から解析値を観測値に近づけることが必ずしも数値予報システムにおける解析値の精度向上を意味するとは限らない。そのため、第一推定値の精度向上を解析値の精度向上の目安の 1 つとしている。

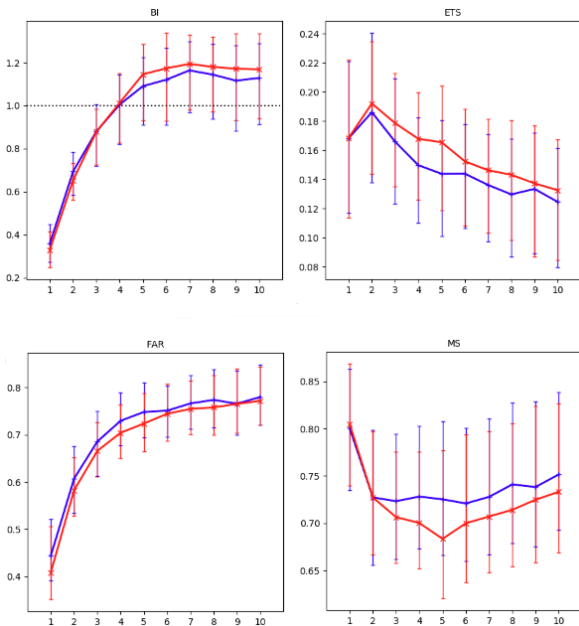


図 4.5.2 解析雨量を参照値とした予測時間別の 5 mm/h の降水予測スコア (10 km 平均)。上段左: バイアスコア、上段右: ETS、下段左: 空振り率、下段右: 見逃し率。青線は新規更新レーダーなし、赤線は新規更新レーダーありのスコアを示しており、エラーバーは有意検定 95%信頼区間を示す。横軸は予測時間 [hour]。統計期間は 2022 年 6 月 23 日から 2022 年 7 月 6 日。

ることがわかった (図 4.5.3)。特にメソモデルでは可降水量が小さい場合に水蒸気の予測値が観測値に対して大きくなる傾向が見られることから、冬季における船舶 GNSS 可降水量の D 値統計の負バイアス増大は、夏季に比べて冬季の可降水量が小さくなることによって、日本周辺の海上で水蒸気量が過大となるバイアスが冬季において顕在化し、可降水量の第一推定値が観測値より大きくなる頻度が増加した結果と考えられ、船舶 GNSS 可降水量の観測データの品質に問題はないと判断した。

更に船舶 GNSS 可降水量の利用がメソ数値予報システムに与える影響を確認するために性能評価試験を行ったところ、事例調査において改善事例が確認された。また、統計検証結果から予測精度についてもこれまでと同等であることが確認されたことから、令和 4 年 4 月から船舶 GNSS 可降水量の通年での利用を開始した。

(2) メソ解析における船舶 GNSS に対する QC 処理の改良及び局地解析での利用に向けた開発

メソ数値予報システムでの利用開始以降の船舶 GNSS 可降水量のデータ特性を調査した結果、陸に近い海域において異常値が通報される事例⁸が散見されたことから、これらの低品質データの利用を避けるため、地上 GNSS を船舶 GNSS より優先して利用するよう、QC

⁸ 周囲の建築物等からの反射 (マルチパスの効果) などが原因として考えられる。

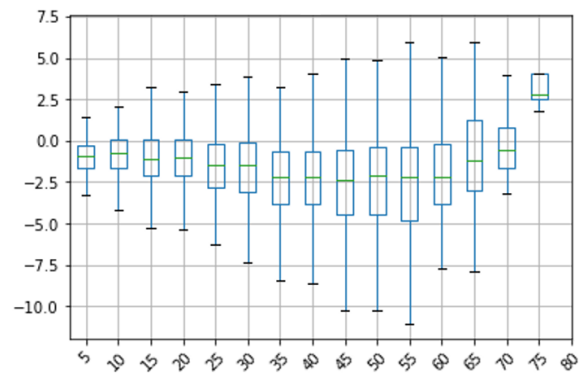


図 4.5.3 離島のラジオゾンデの相対湿度観測から算出した可降水量とメソ第一推定値の可降水量の比較調査。横軸はラジオゾンデの可降水量 [mm]、縦軸は D 値 [mm]。統計期間は 2021 年 1 月 1 日から 2021 年 12 月 31 日。八丈島、名瀬、石垣島、南大東島、父島、南鳥島のラジオゾンデ観測を使用。

処理の変更を検討している。

船舶 GNSS では、QC に利用可能な各種パラメータも観測データとともに通報されている。現業のメソ数値予報システムでの利用開始以降の船舶 GNSS 可降水量観測値とこれらのパラメータを比較して調査することにより新たな QC 処理を実装し、影響評価を行っている。

また、可降水量の空間変化や時間変化が大きい場合に第一推定値と実況とのずれが大きくなり、観測データの品質が良いにもかかわらず QC 処理の 1 つであるグロスエラーチェックで排除されてしまい、同化に利用されないことがしばしばある (気象庁 2022c)。このため、船舶 GNSS 可降水量への Dynamic QC (大野木ほか 1997) の導入に向けた開発を進めている。これらを合わせた船舶 GNSS の QC 処理の改良を令和 4 年度末に現業導入する予定である。

さらに、メソ解析に実装した QC 処理を局地解析での利用に合わせて変更し、局地解析での船舶 GNSS 可降水量の利用を目指して開発を進めている。性能評価試験の結果、局地数値予報システムの予測精度向上のインパクトが確認出来たことから、令和 4 年度末の現業導入を目指して開発を進めている。

4.5.6 局地数値予報システムにおけるマイクロ波散乱計の新規利用

マイクロ波散乱計は、地球に向かってマイクロ波を放射し、地表面での後方散乱強度を測定する能動型の測器であり、海面の状態を介して海上の風ベクトルを推定することができる。海上では直接観測データが少ないため、マイクロ波散乱計による観測データは海上の風の貴重な情報源となる。マイクロ波散乱計はマイクロ波を用いて観測しているため、得られる観測データは雲の減衰を受けにくい、強雨領域では減衰する、強風域では算出が難しいといった性質を持っている。散

表 4.5.5 局地解析におけるマイクロ波散乱計の東西風、南北風に関する D 値統計。統計期間は 2021 年 7 月 1 日 00UTC から 2021 年 7 月 15 日 21UTC。

統計量	東西風 (m/s)	南北風 (m/s)
平均	-0.134	-0.272
標準偏差	1.24	1.31
サンプル数	33986	33986

表 4.5.6 局地解析におけるマイクロ波散乱計の東西風、南北風に関する D 値統計。統計期間は 2022 年 1 月 1 日 00UTC から 2022 年 1 月 15 日 21UTC。

統計量	東西風 (m/s)	南北風 (m/s)
平均	-0.083	-0.391
標準偏差	1.44	1.56
サンプル数	36128	36128

乱計の詳細な観測原理については太原 (1999) を参照されたい。

気象庁では、EUMETSAT が運用する極軌道衛星 Metop シリーズに搭載されている ASCAT 海上風プロダクトを全球解析、メソ解析で利用している (守谷 2016) が、局地解析では同化に利用されていないため、局地解析での新規利用に向けた開発を進めている。

局地解析におけるマイクロ波散乱計データの利用を早期に開始するために、まずは QC 処理や観測誤差をメソ解析と同様の設定にして局地解析用のマイクロ波散乱計海上風のデータ同化システムを構築した。構築したシステムを用いてマイクロ波散乱計の東西風速、南北風速の D 値平均、D 値標準偏差 (夏期間及び冬期間における東西風、南北風の D 値統計結果を表 4.5.5 及び表 4.5.6 に示す。) や同化に使用されるデータの分布などを調査し、同化処理の設定に問題がないことを確認した。令和 4 年度末の現業導入を目指して開発を実施している。

4.5.7 全球解析における Suomi-NPP,NOAA-20 の VIIRS AMV の利用

第 3.8.2 項で述べた通り、近い将来全球解析で利用する極域 AMV の利用数の減少が想定されているため、令和 4 年 6 月に極域での Dual-Metop AMV の利用を開始した。さらなる極域 AMV の拡充を目的に、令和 5 年 3 月の現業化に向けて、米国の極軌道衛星 Suomi-NPP と NOAA-20 に搭載された VIIRS によって算出される AMV の利用に関する調査、開発を進めている。

参考文献

Borbas, Eva E and Benjamin C Ruston, 2010: *The RTTOV UWiremis IR land surface emissivity module*. EUMETSAT Darmstadt.

Borbas, Eva and Michelle Feltz, 2019: Updating the CAMEL surface emissivity atlas for RTTOV.

Rep. Visit. Sci. Mission NWP_AS18_01, EUMETSAT Numerical Weather Prediction Satellite Applications Facility.

Desroziers, G., L. Berre, B. Chapnik, and P. Poli, 2005: Diagnosis of observation, background and analysis error statistics in observation space. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 3385–3396.

Eyre, JR, 1991: A fast radiative transfer model for satellite sounding systems. *ECMWF Tech. Memo* 176.

Geer, Alan J, Peter Bauer, Katrin Lonitz, Vasileios Barlakas, Patrick Eriksson, Jana Mendrok, Amy Doherty, James Hocking, and Philippe Chambon, 2021: Bulk hydrometeor optical properties for microwave and sub-millimetre radiative transfer in RTTOV-SCATT v13. 0. *Geoscientific Model Development*, **14**, 7497–7526.

幾田泰醇, 2015: レーダー反射強度. 数値予報課報告・別冊第 61 号, 気象庁予報部, 40–42.

Ikuta, Yasutaka, Tadashi Fujita, Yukinari Ota, and Yuki Honda, 2021: Variational Data Assimilation System for Operational Regional Models at Japan Meteorological Agency. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **99**, 1563–1592.

石川宜広, 2015: ドップラーレーダーのドップラー速度データの数値予報での利用. 数値予報課報告・別冊第 61 号, 気象庁予報部, 29–35.

Karbou, Fatima, Élisabeth Gérard, and Florence Rabier, 2006: Microwave land emissivity and skin temperature for AMSU-A and-B assimilation over land. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography*, **132**, 2333–2355.

Karbou, Fatima, Elisabeth Gérard, and Florence Rabier, 2010: Global 4DVAR assimilation and forecast experiments using AMSU observations over land. Part I: Impacts of various land surface emissivity parameterizations. *Weather and Forecasting*, **25**, 5–19.

計盛正博, 岡本幸三, 2004: ATOVS 輝度温度の直接同化. 数値予報課報告・別冊第 50 号, 気象庁予報部, 93–104.

計盛正博, 大和田浩美, 福田和代, 2005: ATOVS レベル 1C 輝度温度の直接同化. 数値予報課報告・別冊第 51 号, 気象庁予報部, 82–89.

気象庁, 2021a: マイクロ波輝度温度全天同化とアウトグループの全球解析への導入. 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, 23–28.

- 気象庁, 2021b: レーダー更新に伴う品質調査. 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, 105.
- 気象庁, 2022a: メソ解析・局地解析における二重偏波レーダーの利用. 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, 112–116.
- 気象庁, 2022b: メソ解析におけるハイパースペクトル赤外サウンダの利用. 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, 111.
- 気象庁, 2022c: メソ解析における船舶 GNSS 可降水量の利用. 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, 61–65.
- 気象庁, 2022d: メソ数値予報システムの鉛直層増強、予報時間延長、物理過程の改良. 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, 92–99.
- 気象庁, 2022e: 全球解析における全天同化マイクロ波水蒸気サウンダデータ利用の拡充. 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, 40–43.
- 気象庁, 2022f: 放射伝達モデル RTTOV の更新. 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, 110.
- 守谷昌己, 2016: マイクロ波散乱計の全球解析での利用方法の変更及びメソ解析での利用開始. 平成 28 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 55–57.
- 岡垣晶, 2015: ハイパースペクトル赤外サウンダ. 数値予報課報告・別冊第 61 号, 気象庁予報部, 43–46.
- 岡本幸三, 2007: ATOVS 直接同化. 数値予報課報告・別冊第 53 号, 気象庁予報部, 58–70.
- 岡本幸三, 大和田浩美, 藤田匡, 別所康太郎, 高橋昌也, 太田芳文, 計盛正博, 大塚道子, 瀬古弘, 石田春磨, 上清直隆, 石元裕史, 林昌宏, 安藤昭芳, 横田寛伸, 2020: ひまわり 8・9 号後継衛星検討のためのハイパースペクトル赤外サウンダの数値予報インパクト調査. 測候時報, **87**, 99–150.
- 大野木和敏, 高田伸一, 小室肇, 1997: データ品質管理と解析前処理. 数値予報課報告・別冊第 43 号, 気象庁予報部, 17–44.
- Saunders, R, J Hocking, E Turner, S Havemann, A Geer, C Lupu, J Vidot, P Chambon, C Köpken-Watts, L Scheck, and others, 2020: RTTOV-13 science and validation report. Tech. rep., EU-METSAT NWP SAF, 0 pp. https://nwp-saf.eumetsat.int/site/download/documentation/rtm/docs_rttov13/rttov13_svr.pdf.
- 太原芳彦, 1999: マイクロ波放射計. 数値予報課報告・別冊第 45 号, 気象庁予報部, 27–43.
- 露木義, 2002: 変分法によるデータ同化の基礎. 数値予報課報告・別冊第 48 号, 気象庁予報部, 1–16.