

## 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 2022 年 1 月から 2022 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	運用開始日
年報（令和3年） 4.15	海況監視予測システムの改良	1月18日
年報（令和3年） 4.11	季節予報アンサンブル予報システムの改良	1月12日（システム更新） 2月14日（配信開始）
3.2	全球アンサンブル予報システムの改良	3月15日
3.3	メソモデルの鉛直層増強、予報時間延長	3月22日（鉛直層増強） 6月9日（予報時間延長）
3.4	局地解析のハイブリッド同化の導入、局地モデルの物理過程改良	3月22日
3.5	日本域高潮モデル予報時間延長	8月4日（システム更新） 9月8日（運用開始）
3.6	日本域台風時高潮確率予報システムの導入	8月4日（システム更新） 9月8日（運用開始）
3.7	アジア域高潮アンサンブル予報システムの導入	8月4日
3.8	全球解析における観測データの利用手法改良	6月29日
3.9	メソ解析および局地解析におけるマイクロ波サウンダ ATMS データ利用	6月30日（メソ解析） 8月9日（局地解析）
3.10	メソモデルガイダンスの改良と予報時間延長	6月9日（システム更新） 6月16日（配信開始）
3.11	局地モデルによる気温、降雪量、風、視程ガイダンス	2月24日（気温、降雪量） 10月17日（風、視程ガイダンス）

## 3.2 全球アンサンブル予報システムの改良

### 3.2.1 変更の概要

2022年3月15日に全球アンサンブル予報システム(GEPS: Global Ensemble Prediction System)の改良を行った。本稿では、その改良内容と予測精度の評価結果、予測特性の変化について報告を行う。

GEPSは、台風進路予報、週間天気予報、2週間気温予報、早期天候情報及び1か月予報に使用しているアンサンブル予報システム(EPS: Ensemble Prediction System)である。このシステムは数値予報課が運用していた週間・台風EPSと気候情報課が運用していた1か月EPSを統合したもので、2017年1月19日に週間・台風EPSに代わって運用を開始し、同年3月23日に1か月先までの延長予報を開始した(山口 2017; 新保 2017)。

以下に今回の変更の各項目の概要を記す。変更内容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4.3節(気象庁 2022c)に記載があるので参照いただきたい。

#### モデルの更新と水平高解像度化

GEPSでは、予報モデルに気象庁全球モデル(GSM: Global Spectral Model)の低分解能版を用いている。今回の改良では使用するモデルについて、数値予報開発センター年報(令和3年)第4.1節(気象庁 2022d)に記述された物理過程の改良を採用するとともに、解像度を、18日先までの予測については約40 kmから約27 kmに、34日先までの予測については約55 kmから約40 kmにそれぞれ向上させた。

#### SVによる初期摂動の振幅調整

GEPSの初期摂動としては、特異ベクトル(SV: Singular Vector)法(Buizza and Palmer 1995)とLETKF(Local Ensemble Transform Kalman Filter; Hunt et al. 2007)を利用した初期摂動を組み合わせて<sup>1</sup>用いている。両手法はお互いに補い合う関係にあり、SV法では予測時間が長くなるにつれて誤差の中で支配的になる成長率の高い摂動を捉え、LETKFでは予測時間の初期で特に重要な解析値のもつ不確実性を捉える。

SVによる摂動の振幅をどのような値にするかには理論的な制約はない。一般にアンサンブル予報システムでは、アンサンブル平均予報の二乗平均平方根誤差(RMSE)とスプレッドが同程度の値となることが望ましいので、本システムではこれを実現するための調整パラメタとしてSVによる摂動の振幅を用いている。今回は、アンサンブル平均予報の誤差が減少傾向となったことを反映し、スプレッドも小さくなるよう、SVによ

<sup>1</sup> SVを混ぜ合わせた50個(25個+逆符号の25個)の摂動と、LETKFのアンサンブルから抽出した50個の摂動を重みを付けて足し合わせて使用。

る摂動の振幅をより小さな値へと調整した。具体的には北半球と南半球<sup>2</sup>のSVによる摂動の振幅について、これまで500 hPa付近の気温の平均的な振幅が0.23 Kとなるように設定していたものを、0.21 Kへと変更した。

#### 2段階SST法における参照システムの変更と適用期間の拡大

GEPSでは、限られた計算機資源で海洋の変動を考慮するため、(予測初期は偏差固定SSTのまま)で予測途中からは季節アンサンブル予報システム(CPS)で事前に予測された海面水温(SST)を用いる2段階SST法(高倉・小森 2020)を導入している。今回の変更では参照するSSTを、CPS2の予測結果から、令和4年2月の発表情報から運用が始まったCPS3(気象庁 2022a)の予測結果に変更した。さらに、この変更により予測SSTの精度が向上することから、偏差固定SSTからSST予測値への緩和期間を11-18日から6-11日へと変更した。

### 3.2.2 業務化試験

変更の効果については、令和3年の数値予報開発センター年報(気象庁 2022c)で総合性能評価試験の結果について報告した。ここでは、実際の現業利用に即した設定での試験(業務化試験)の結果について記す。総合性能評価試験では(1)コントロールメンバーを計算する初期値をサイクル解析から作成、(2)初期時刻は12UTCのみ、(3)メンバー数は13としていたのに対し、業務化試験では(1)速報解析から作成、(2)1日4初期時刻(00, 06, 12, 18UTC) (3)メンバー数は51としている。なお、以下の文章および図説におけるCNTLは比較対象となるGEPS2103(気象庁 2022b)による予測実験、TESTは変更を加えたシステムによる予測実験を表す。

#### (1) 連続初期日型実験

##### 実験の設定

- 実験期間
  - 2019年11月22日から2020年3月11日(冬)
  - 2020年6月22日から10月21日(夏)
- 検証対象: 00UTCと12UTCを初期時刻とする264時間予測(台風検証については06UTCと18UTC初期値を加えて132時間までの検証を行う)
- メンバー数: 51
- 初期値に用いる解析: 2021年6月に現業化されたシステムによる全球速報解析<sup>3</sup>。これはCNTLとTESTで同じである。

<sup>2</sup> 全球アンサンブル予報システムでの北(南)半球とは緯度20度より高緯度の領域を指す。

<sup>3</sup> 総合性能評価試験では解析に用いるモデルにも高解像度化と物理過程改良を加えていたが、ここではそれは行っていない。

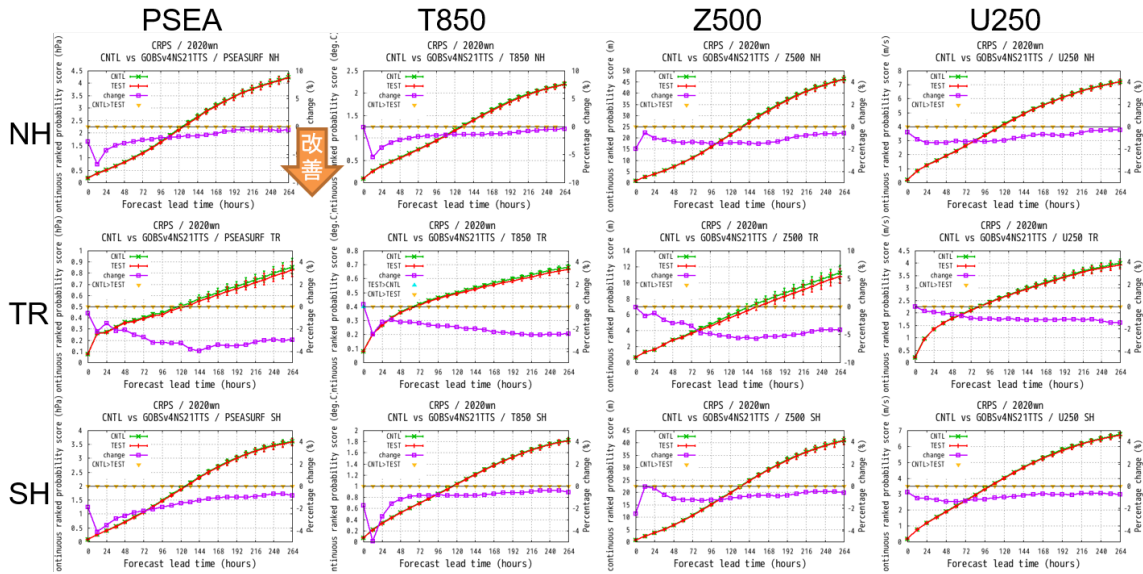


図 3.2.1 冬期間における、主要要素に対する領域別の CRPS。要素は左から順に海面更正気圧 [hPa]、850hPa 気温 [K]、500 hPa 高度場 [m]、250 hPa 東西風 [m/s]。領域は上から順に北半球 (20°N - 90°N)、熱帯 (20°S - 20°N)、南半球 (20°S - 90°S)。CNTL 実験は緑線、TEST 実験は赤線。紫線は変化率 ((TEST-CNTL)/CNTL[%]、右縦軸)。差に統計的な有意性がある場合に ▽(CNTL>TEST) ないし △(TEST>CNTL)(本図には無し) をプロットしている。

### 主要要素の確率予測

図 3.2.1 に冬期間について 11 日先までの予報時間ごとの CRPS<sup>4</sup> を示す。海面更正気圧、850 hPa 気温、500 hPa 高度、250hPa 東西風について多くの検証領域で統計的に有意な改善が確認できる。夏期間についても同様のことが言える (省略)。モデルの改良と高解像度化が寄与している。

### 日本の降水予測

図 3.2.2 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。ブライアスキルスコア (BSS:Brier Skill Score) は 1 mm/24hr 及び 5 mm/24hr の閾値について、冬期間、夏期間とも中立から改善傾向である。これもモデルの改良と高解像度化によるものである。

高解像度化による降水予測の改善例を図 3.2.3 に示す。本実験では 5 mm/24hr よりも多い降水を高確率で予測する領域が拡がり、解析雨量に見られる降水域とよく合っている。高解像度化によって地形の表現が改善し、冬型の気圧配置による地形性降水がより適切に表現されるようになったためである。

### 台風進路予測

図 3.2.4 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 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。図に示す通り、アンサンブル平均の台風進路予測の平均誤差に大きな変化はなかった。ま

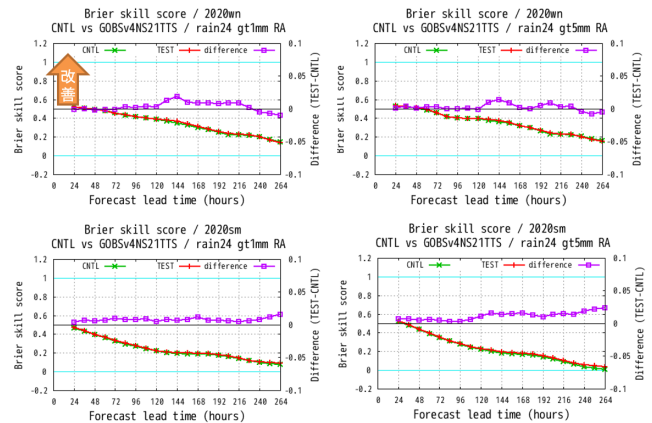


図 3.2.2 対解析雨量による降水の確率的予測のブライアスキルスコア。上段は冬期間、下段は夏期間。左列は閾値 1mm/24h、右列は閾値 5mm/24h の降水事例に対するもの。CNTL は緑線、TEST は赤線。紫線は差 (TEST-CNTL、右縦軸)。

た、台風接近確率の BSS はわずかに改善したが、信頼度曲線や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 日以降の評価のための実験として、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 2 回 (15 日と月末の 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。なお、再予報の大気初期値を JRA-55 から JRA-3Q へ更新することによって、全般的に改善効果がもたらされることを別途確認している。

<sup>4</sup> 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。

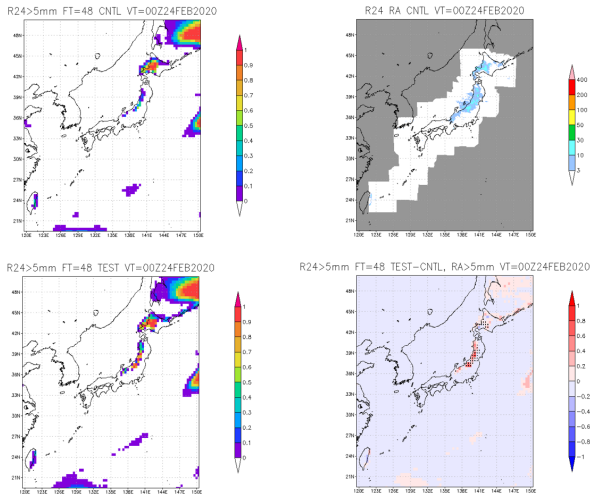


図 3.2.3 左列：2020 年 2 月 24 日 00UTC の前 24 時間降水量が 5mm より多くなる確率の分布。初期時刻は 2020 年 2 月 22 日。上段は CNTL の予測、下段は TEST の予測。右列：上段は 2020 年 2 月 24 日 00UTC の前 24 時間で積算した解析雨量。下段は確率値の TEST-CNTL の値。黒点は解析雨量が 5mm より多かった点を表す。

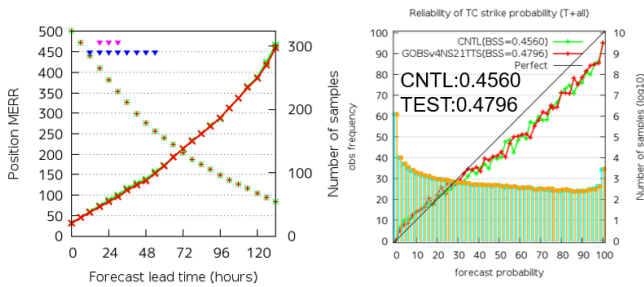


図 3.2.4 アンサンブル平均の台風進路予測平均誤差 (左) と台風接近確率の信頼度曲線とブライアスキルスコア (右)。CNTL は緑、TEST は赤。左図は × と実線が平均誤差 [km] (左縦軸) で + がサンプル数 (右縦軸) を示しており、ピンクの三角と青の三角はそれぞれサンプル間の相関を考慮する場合としない場合に 5% の有意水準で差が有意であることを示す。右図は実線が信頼度曲線 (左縦軸)、水色とオレンジの棒グラフで CNTL と TEST の予報頻度 (右縦軸) を示す。また、CNTL と TEST のブライアスキルスコアの値を図中に示した。

### アンサンブル平均予測

図 3.2.5 と図 3.2.6 にアンサンブル平均のアノマリー相関係数の差 (TEST - CNTL) を示す。全球平均では予測精度が改善しており、特に予測後半ほどその改善傾向が明瞭であることが分かる。また熱帯では、SST と熱帯波動の予測表現改善を受けて (図省略)、下層気温や循環場を中心に大きく改善した。北半球では熱帯ほど顕著ではないが中立～改善傾向であり、北西太平洋域では予測前半で中立、後半で改善傾向が見られた。個別事例では、SST と熱帯波動の予測表現改善に合わせて、中緯度の下層気温や 500hPa 高度が改善している様子も確認できた (図省略)。

### 3.2.3 おわりに

GEPS について、予報モデルを更新すると共に、高解像度化した。また、初期摂動の振幅調整を行ったほか、SST を参照する季節予報システムの更新と予測 SST を参照する期間を拡大した。これらの変更は 2022 年 3 月 15 日に現業システムへ導入されている。この改良により、確率予測情報については日本の降水予測を含め、多くの要素で改善が見られた。また、台風進路予測の精度は中立であるが、接近確率には若干の改善が見られた。さらに 30 年間の再予報型実験では、特に熱帯域を中心に SST や熱帯波動の表現改善によって、予測後半ほど大きな改善が見られた。

### 参考文献

Buizza, R. and T. N. Palmer, 1995: The singular-vector structure of the atmospheric global circulation. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 1434–1456.

Hunt, B. R., E. J. Kostelich, and I. Szunyogh, 2007: Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: a local ensemble transform Kalman filter. *Physica. D.*, **230**, 112–126.

気象庁, 2022a: 季節アンサンブル予報システムの改良. 数値予報開発センター年報 (令和 3 年), 気象庁 数値予報開発センター, 122–132.

気象庁, 2022b: 全球アンサンブル予報システムの改良 (第 3.3 節). 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, 25–28.

気象庁, 2022c: 全球アンサンブル予報システムの改良 (第 4.3 節). 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, 84–91.

気象庁, 2022d: 全球モデルの水平解像度向上、物理過程改良に向けた開発. 数値予報開発センター年報 (令和 3 年), 気象庁 数値予報開発センター, 66–75.

新保明彦, 2017: 全球アンサンブル予報システムの概要. 平成 28 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 1–8.

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.

山口春季, 2017: 全球アンサンブル予報システムの導入. 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 35–41.

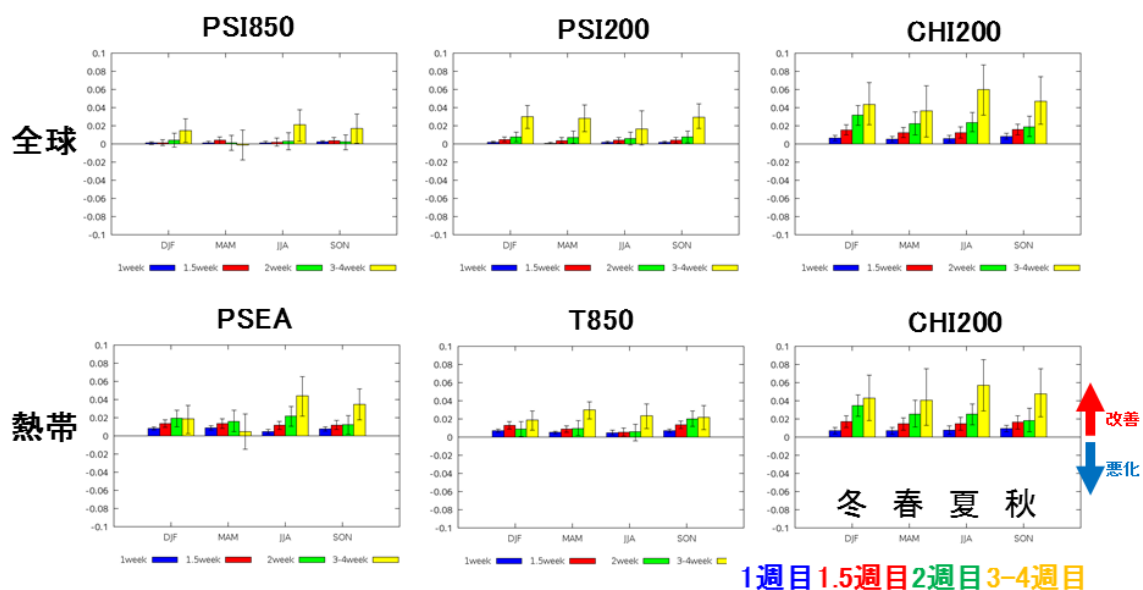


図 3.2.5 再予報 (1991~2020 年) による 13 メンバーアンサンブル平均のアノマリー相関係数の差 (TEST - CNTL)。上から、全球、熱帯 (20°S - 20°N) でのバイアス補正なしの検証結果で、上段は左から 850hPa 及び 200hPa の流線関数、200hPa の速度ポテンシャル、下段は左から海面更正気圧、850hPa 気温、200hPa の速度ポテンシャル。それぞれの図は左から順に冬、春、夏、秋の並びとなっており、青は 1 週目 (予測 3~9 日)、赤は 1.5 週目 (予測 6~12 日)、緑は 2 週目 (予測 10~16 日)、黄は 3~4 週目 (予測 17~30 日) を表す。

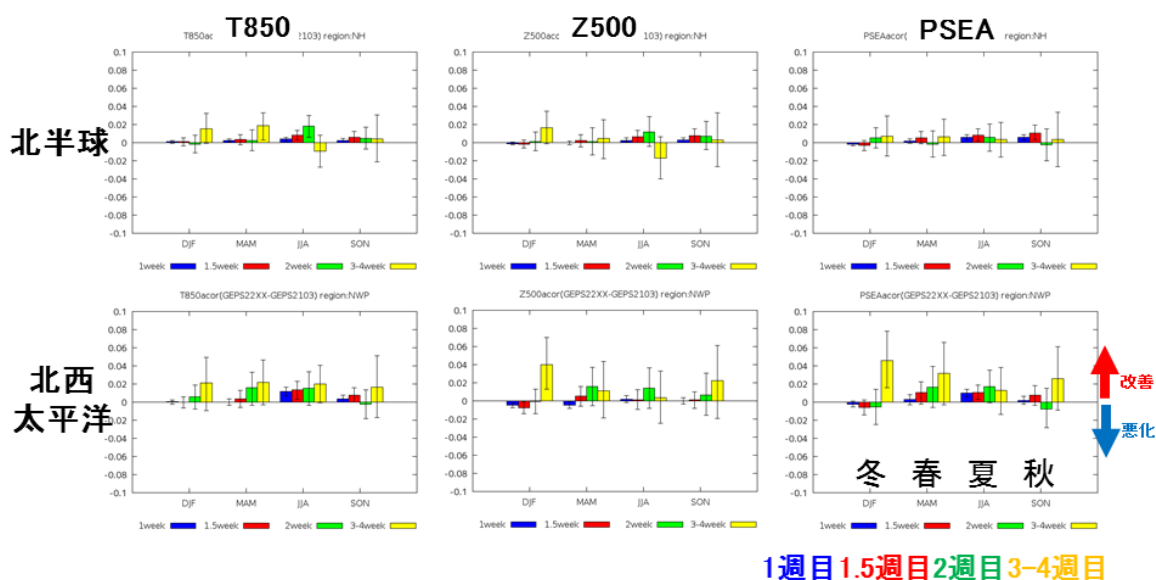


図 3.2.6 領域、要素を除き図 3.2.5 と同じ。領域は北半球 (上段、20°N 以北) と北西太平洋 (下段、100°E~180°E, 0°~60°N)、要素は上下段共に左から 850hPa 気温、500hPa 高度、海面更正気圧。

### 3.3 メソモデルの鉛直層増強、予報時間延長

#### 3.3.1 はじめに

メソモデル (MSM: Meso-Scale Model) は防災気象情報や航空気象情報の作成支援、降水短時間予報への入力を主な目的とした基盤モデルの一つと位置付けられている。日本域を予報領域とした水平解像度 5 km の予報モデルとなっており、2022 年 6 月より予報期間 78 時間 (00, 12UTC 初期値) または 39 時間 (03, 06, 09, 15, 18, 21UTC 初期値) で運用している。2001 年 3 月にメソ数値予報システムの現業運用が開始 (萬納寺 2000) されて以降、非静力学モデルの導入などシステム面の高度化がなされるとともに、予報時間の延長や計算領域の拡張が段階的に行われた。

2022 年の開発成果として、衛星観測の利用拡充を主な目的としてメソモデルの鉛直層数を 76 から 96 層に増強し、モデル上端高度を 21.8 km から 37.5 km に引き上げた。あわせて、予測精度改善のために海洋混合層モデルの導入等物理過程の改良を行い、2022 年 3 月に現業化した。また、「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」では、台風が日本に接近する可能性がある場合等に 3 日先までの総雨量予測情報を提供することとしていることから、2022 年 6 月に 00, 12UTC 初期値の予報期間を 51 時間から 78 時間に延長した。本節では、2022 年に現業化したメソモデルの変更点の概要を紹介するとともに、業務化試験における検証結果について報告する。

#### 3.3.2 変更の概要

2022 年のメソモデル更新における仕様上の変更は、前項で示した通り、モデルの鉛直層数を 76 から 96 層 (メソ解析のインナーモデルを 38 層から 48 層) としモデル上端高度を 21.8 km から 37.5 km に引き上げたことと、00, 12UTC 初期値の予報期間を 51 時間から 78 時間に延長したことである。地上から 76 層の層配置は更新前とほぼ同様とし、上部対流圏から下部成層圏にかけて感度のある衛星データの活用を目的に、鉛直層数の増強分はモデル上端高度の引き上げに充てた。モデル上端高度引き上げによる衛星データの新規活用については、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。

以下に、仕様上の変更とあわせて実施したメソモデルの物理過程の改良項目を挙げる。改良項目には 2021 年 3 月に更新した局地モデルの改良をメソモデルに適用したものも含む。個別の詳細については、数値予報開発センター年報 (令和 3 年) 第 4.4 節 (気象庁 2022) を参照されたい。

- 放射過程の短波水蒸気吸収係数を更新
- 雲物理の雲量診断で用いる臨界相対湿度の下限値を変更 (計算式の不具合修正も含む)
- 境界層モデルで用いる長さスケール診断方法を改良

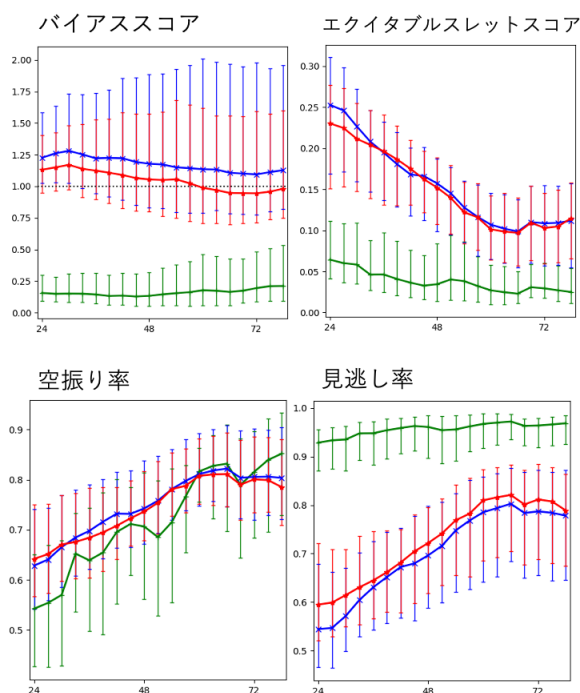


図 3.3.1 夏期間における前 24 時間積算降水量 (閾値 100 mm、検証格子 20 km) の予測時間別検証結果。バイアススコア (左上)、エクイタブルスレットスコア (右上)、空振り率 (左下)、見逃し率 (右下) で、横軸は予測時間、エラーバーは 95% 信頼区間を表す。緑線が 2021 年 3 月現業化時仕様の GSM、青線が CNTL、赤線が TEST の結果に対応する。

- 地表面フラックス診断で用いる安定時の接地層普遍関数を変更
- 陸面の蒸発散フラックス定式を改良
- 土壌水分初期値 (気候値) および地表面パラメータを更新 (地表面アルベド、熱粗度、LAI(Leaf Area Index) の導入、植生・都市被覆率の導入)
- 1 次元海洋混合層モデルとして PWP(Price-Weller-Pinkel) モデル (Price et al. 1986, 1994) を導入
- 海面の潜熱フラックスにおいて海塩による蒸発抑制効果を考慮

#### 3.3.3 検証結果

本項では、現業化に向けて実施した業務化試験の検証結果について述べる。以下では、2020 年 3 月現業化相当の設定で 00, 12UTC 初期値を 78 時間予測に延長した実験をコントロール (CNTL) とし、前項で述べた改良を適用した設定の実験をテスト (TEST) と記す。境界値はいずれも 2021 年 3 月現業化時の GSM を用いる。実験期間は以下の通り。数値予報開発センター年報 (令和 3 年) 第 4.4 節 (気象庁 2022) で示した結果とは夏期間の実験期間が異なる。

- 夏期間: 2020 年 7 月 1 日~9 月 15 日
  - 冬期間: 2019 年 12 月 23 日~2020 年 2 月 29 日
- まず、降水特性の変化について大雨の予測に着目し

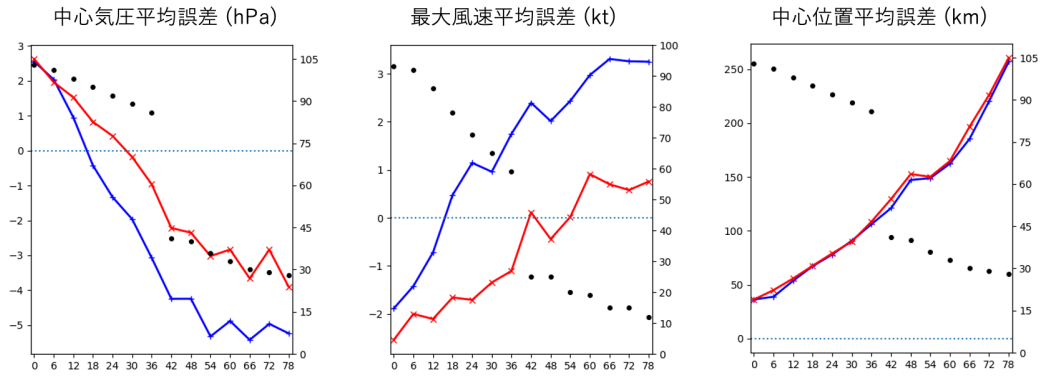


図 3.3.2 台風を中心気圧平均誤差 (左)、最大風速平均誤差 (中央)、中心位置平均誤差 (右) 予測時間別検証結果。黒点は検証事例数 (右側の縦軸) であり、42 時間以降は 00, 12UTC 初期値のみを検証対象としている。青線が CNTL、赤線が TEST の結果に対応する。

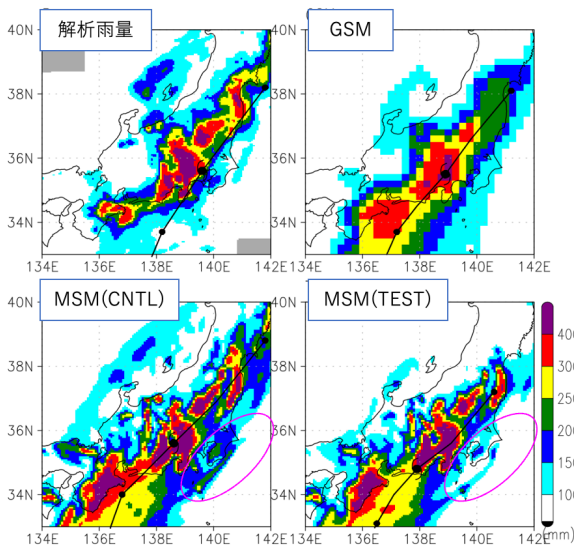


図 3.3.3 令和元年台風第 19 号を対象とした前 72 時間積算降水量 (シェード) および台風進路 (黒線)。左図は解析雨量およびベストトラックの結果を示す。対象時刻は 2019 年 10 月 12 日 15UTC (FT=75)。

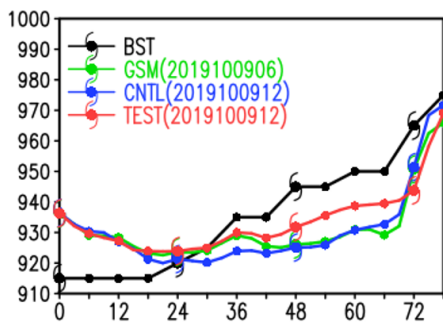


図 3.3.4 図 3.3.3 と同初期値 (2019 年 10 月 9 日 12UTC) の予測時間別台風中心気圧。黒線がベストトラック、緑線が GSM、青線が CNTL、赤線が TEST の結果にそれぞれ対応する。

て統計検証を行った。図 3.3.1 に夏期間を対象に閾値 100 mm とした前 24 時間降水量の検証結果を示す。こ

こでは全球モデル (GSM: Global Spectral Model) のみが参照可能だった 3 日先の降水に着目するため、GSM との比較に注目する。GSM ではバイアスコアが 1 より大幅に小さく大雨を十分に捕捉できていないのに対し、メソモデルでは 1 に近い値となっている。また、TEST は CNTL と比較してもバイアスコアが 1 に近づくことがわかる。空振り率は GSM よりも増えるものの見逃し率は大幅に下回っており、エクイタブルスレットスコアは MSM が GSM を上回る。エクイタブルスレットスコアについては、TEST と CNTL とでほとんど差は見られず中立である。これらの特性は 72 時間先でも変わらないことから、予報時間延長を実現したことで GSM のみが提供していた 3 日先の降水について MSM に基づく有益な情報を提供できるようになったといえる。

図 3.3.2 に本実験期間での台風の統計検証結果を示す。中心気圧を見ると、予測後半になるにしたがって負のバイアス (過発達バイアス) が拡大する傾向がある。TEST でもこの傾向は残るものの、CNTL と比べると軽減することが確認できる。また、最大風速で見ても、CNTL は台風の過発達バイアスに対応した強風バイアスがあるが、TEST ではそれが改善する。CNTL では海面水温 (SST) は初期値に固定され時間変動しない仕様となっていたが、海洋混合層モデルの導入により、強風時に海水が鉛直混合する効果が表現できるようになり SST が低下するようになったことが台風過発達バイアスの軽減に寄与した。それに加え、海塩による蒸発抑制効果を考慮したことにより海面からの潜熱フラックスが減ったことも改善に寄与したと考えられる。一方、中心位置平均誤差は TEST は CNTL に対して中立であり、進路予測の改善は見られない。

2022 年のメソモデル更新の主要な目的である 3 日先までの総雨量予測情報の提供の観点から、業務化試験とは別に実施した令和元年台風第 19 号の事例を図 3.3.3 および図 3.3.4 に示す。解析雨量では前 72 時間積算降水量で 400 mm を超える地域が確認できるが、

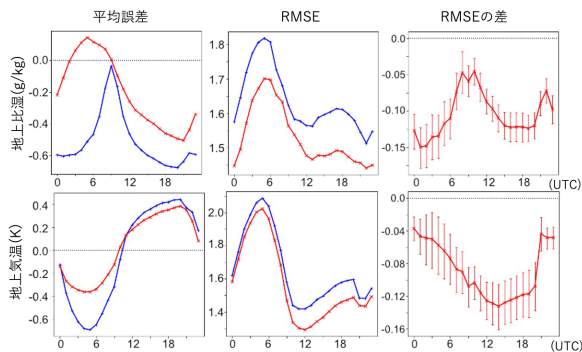


図 3.3.5 夏期間における地上比湿 (上段)・気温 (下段) の対象時刻別 (横軸、UTC) 検証結果。検証は全ての予測時間を対象とした。左から平均誤差、二乗平均平方根誤差 (RMSE)、RMSE の TEST から CNTL の差。平均誤差、RMSE の線種は図 3.3.2 と同様。

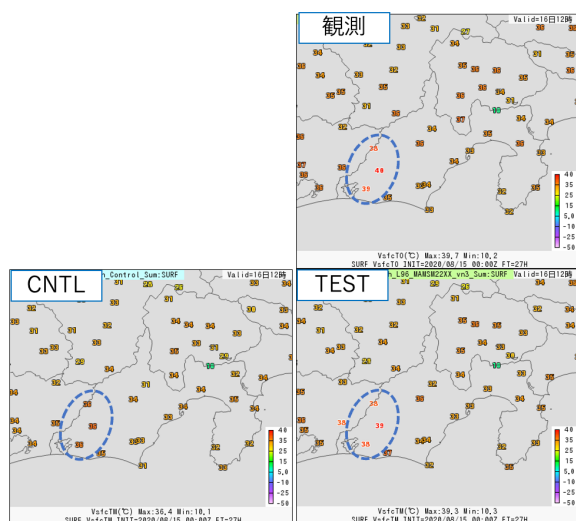


図 3.3.6 対象時刻 2020 年 8 月 16 日 12 時 (JST) における地点別地上気温。上段が観測値、左下が CNTL、右下が TEST で、FT=27 (2020 年 8 月 15 日 00UTC 初期値) の結果を示す。

GSM では全般的に雨量が過少で積算降水量 400 mm 以上の降雨域はほとんど表現できていない。CNTL では 400 mm を超える領域が見られるものの、全般的に降水域が実況よりも広く、房総半島で実況や GSM では見られない降水 (図 3.3.3 中の楕円で囲まれた領域) が生じている。TEST では強雨域は CNTL と同様に見られる一方、CNTL と比べると降水域は狭く、房総半島の降水も実況に近い。CNTL・TEST とともに、紀伊半島の降水は過剰であることや、台風の進路がベストトラックと比較して西にずれているなど、予測精度上の課題も残る。台風中心気圧をベストトラックと比較すると (図 3.3.4)、FT=24 以降の台風の衰弱が GSM、MSM とともに十分に表現できていないが、統計検証結果 (図 3.3.2) でも見られたように TEST は CNTL と比べると中心気圧が高くなっており、ベストトラックにより近い予測となった。

最後に、本更新による地上気象要素の改善について示す。図 3.3.5 は夏期間の地上比湿・気温の対象時刻別で見た対アメダス検証結果である。CNTL では地上比湿は全体的に乾燥バイアス、地上気温は日中に低温バイアス、夜間に高温バイアスであり、日較差が観測より小さい傾向にあることが確認できる。TEST ではこれらのバイアスが縮小しており、二乗平均平方根誤差 (RMSE) で見ても全ての対象時刻で有意に改善する。これらの地上気象要素の改善は冬期間においても確認された。数値予報開発センター年報 (令和 3 年) 第 4.4 節 (気象庁 2022) にあるように、更新前のメソモデルでは土壌水分量が過少であったが、単に土壌水分量を増やすと日中の低温バイアスが拡大する特性があった。2022 年のメソモデル更新において、土壌水分量を見直すとともに蒸発散フラックス定式の改良を行うことで、地上比湿・気温双方のバイアスを軽減することが可能となった。

日中の地上気温の低温バイアスが改善した例として、浜松市で 41.1°C の最高気温を観測した 2020 年 8 月 16 日の事例を図 3.3.6 に示す。図に示した 12 時 (JST) 時点では浜松 (図中楕円で囲んだ地点の南端に対応) で 39°C を観測しているのに対し、CNTL では 36°C と観測よりも低温となっている。他方 TEST では同地点で 38°C となり観測に近づくとともに、観測で見られる高温域 (図中楕円) がよく再現されている。これまで、メソモデルで 35°C を超える地上気温を予測することが困難であったが、今般のモデル更新によりこのような高温域が表現できるようになった。このことは他の事例でも確認された。

### 3.3.4 まとめ

2022 年のメソモデル更新では、台風等を想定した 3 日先の総雨量予測や台風中心気圧・最大風速等の量的予測の向上を主な目的として、メソモデルの鉛直層増強によるモデル上端高度引き上げ、予報時間の延長を実施するとともに、予測精度向上のために物理過程を改良した。3 日先においても対 GSM で強雨予測が改善することが確認され、予報時間の延長は 3 日先予測の情報改善に資するものといえる。物理過程の改良を通じて台風過発達バイアスの軽減や地上気象要素の誤差の縮小が確認できた。ただし、台風の過発達傾向が依然として見られることや、台風進路予測において改善は見られなかったことは今後の課題である。下部境界だけでなく、台風の構造等をモデルが適切に表現できることが重要であり、そのためには積雲過程・雲物理など物理過程の全般的な改良が欠かせない。モデルバイアス軽減の観点から引き続き物理過程等の改良に取り組む計画である。



## 参考文献

- 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.
- 萬納寺信崇, 2000: 領域モデル (RSM, MSM, TYM). 平成 12 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 23–27.
- Price, J. F., T. B. Sanford, and G. Z. Forristall, 1994: Forced Stage Response to a Moving Hurricane. *J. Phys. Ocean.*, **24**, 233–260.
- Price, J. F., R. A. Weller, and R. Pinkel, 1986: Diurnal cycling: Observations and models of the upper ocean response to diurnal heating, cooling. *J. Geophys. Res.*, **91**, 8411–8427.

### 3.4 局地解析へのハイブリッド同化手法の導入、局地モデルの物理過程改良

#### 3.4.1 はじめに

局地数値予報システム<sup>1</sup>は、集中豪雨などの局地的な現象を主な予測対象として、水平格子間隔 2 km・10 時間予報のシステムとして運用されており、防災気象情報・航空気象情報の作成を支援する重要な数値予報システムと位置付けられている。

2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画では、豪雨防災を重点目標の一つに掲げており、線状降水帯に代表される集中豪雨の発生前に、明るいうちからの避難等、早期の警戒・避難を実現するため、局地モデルによる集中豪雨の予測精度向上が求められている。そのためには局地解析の改良による初期値の精度向上、局地モデルの改良による予測精度向上を積み重ねていく必要がある。

本システムは 2012 年 8 月に運用を開始した後、局地解析と局地モデルそれぞれに継続的に改良を加えてきており、2021 年 3 月には局地モデルの鉛直層増強と物理過程改良を行った(気象庁 2022b)。その後、2022 年 3 月には、局地解析の背景誤差共分散のハイブリッド化、メソ数値予報システムの更新(第 3.3 節)に伴う予報モデルの物理過程の改良を行った。本節では、2022 年 3 月の局地数値予報システム更新の概要と、改良による予測特性の変化について報告する。

#### 3.4.2 局地数値予報システム改良の概要

本項では、局地数値予報システムの改良項目の概要を述べる。まず、局地解析について説明する。局地解析へのハイブリッド同化手法の導入に合わせて、気候学的背景誤差の修正、メソ解析との解析モジュール統一化のための変更を行ったので、合わせて 3 項目ある。続いて 4 つ目の項目として予報モデルの物理過程の改良の概要を述べる。局地解析の改良項目については数値予報開発センター年報(令和 3 年)第 4.6 節(気象庁 2022c)も参照されたい。

##### (1) ハイブリッド同化手法の導入

局地解析は、メソモデルの予報値(解析時刻 3 時間前)を出発点に、3 次元変分法(3DVar)による解析と 1 時間予報(水平格子間隔 5 km)を初期時刻を更新しながら 3 回繰り返した後、解析時刻で 3DVar を行う。改良前は、それぞれの 3DVar において、第一推定値の誤差を表現する背景誤差として、NMC 法(Parrish and Derber 1992)で作成された気候学的な背景誤差共分散行列  $\mathbf{B}_c$  のみを利用していった。今回の改良では、解析時刻毎の場の流れに依存した背景誤差として、メソアンサンブル予報システム MEPS(水平格子間隔 5 km、摂動メンバー数 20)の予報値のアンサンブル平均からの

<sup>1</sup> 局地解析と局地モデル(予報モデル)を合わせて局地数値予報システムと表記する。

差(以下、MEPS 摂動)を用いて作成した誤差共分散行列  $\mathbf{B}_e$  と  $\mathbf{B}_c$  を混ぜて用いるハイブリッド同化(Lorenc 2003)を局地解析に導入した。

今回導入したハイブリッド化した 3DVar (Hybrid-3DVar) は、下記の評価関数を最小化することによって解析インクリメント  $\delta \mathbf{x}$  を得る。

$$J(\mathbf{v}) = \frac{1}{2} \mathbf{v}^T \mathbf{v} + \frac{1}{2} (\mathbf{H} \delta \mathbf{x} - \mathbf{d})^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{H} \delta \mathbf{x} - \mathbf{d}) + J_{bc}$$

$$\delta \mathbf{x} \equiv \mathbf{B}^{1/2} \mathbf{v} \equiv \begin{pmatrix} \beta_c \mathbf{B}_c^{1/2} & \beta_e \mathbf{B}_e^{1/2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{v}_c \\ \mathbf{v}_e \end{pmatrix} \quad (3.4.1)$$

ここで  $\mathbf{d} = \mathbf{y}^o - H(\mathbf{x}^b)$  は観測値  $\mathbf{y}^o$  の第一推定値  $\mathbf{x}^b$  からの差(イノベーション)、 $H$  と  $\mathbf{H}$  は観測演算子とその接線形、 $\mathbf{R}$  は観測誤差共分散行列、 $\mathbf{B}_c$  は気候学的な背景誤差共分散行列、 $\mathbf{B}_e$  は MEPS 摂動から作成された誤差共分散行列、 $\mathbf{v}_c$  と  $\mathbf{v}_e$  は制御変数、 $J_{bc}$  はバイアス補正項である。 $\beta_c$  と  $\beta_e$  はハイブリッドの重みであり、 $(\beta_c^2, \beta_e^2) = (0.5, 0.5)$  とした。

$\mathbf{B}_e$  の作成にあたっては、誤差分散を  $\mathbf{B}_c$  と同程度の大きさにするために高度 5.5 km の温位の「(気候学的な誤差分散) / (MEPS 摂動の分散の水平平均)」を  $\mathbf{B}_e$  に乗じる誤差共分散膨張を導入した。さらにサンプリング誤差を軽減するために 5 つの異なる初期時刻の MEPS 摂動を用いてメンバー数を 100 にした上で、 $\mathbf{B}_e$  には水平方向と鉛直方向の距離によってガウス型に減衰する関数に乗じる空間局所化を行った。空間局所化のスケール(局所化関数が  $e^{-0.5}$  になる距離)は水平 100km、鉛直 0.5km とした。

##### (2) 気候学的背景誤差の修正

局地解析は、メソモデルの予報値を第一推定値とすることから、その気候学的背景誤差はメソモデル予報値を統計サンプルとして作成している<sup>2</sup>。この気候学的背景誤差について、 $x$  方向の風と  $y$  方向の風の誤差分散の大きさがメソ解析と比較して大きく異なっていた(メソ解析の誤差分散と比べて、 $x$  方向の風については過大、 $y$  方向の風については過小)ことを把握したことから、その修正を行った<sup>3</sup>。

今回は大気中の制御変数(風、温位、地上気圧、偽相対湿度)の誤差分散を 2022 年 3 月に更新したメソ解析の気候学的背景誤差の誤差分散<sup>4</sup>に置き換えることとした。この変更で局地解析の性質(高解像度の解析イ

<sup>2</sup> その上で、下層の水平誤差相関を狭める等の調整を行っている(藤田・倉橋 2010)。

<sup>3</sup> 作成手法がほぼ共通であるメソ解析の背景誤差と比較して、 $x$  方向と  $y$  方向の風の誤差分散の大きさのバランスに極端な差があることから、本来の意図とは異なるものと判断した。

<sup>4</sup> 2022 年 3 月に更新したメソモデルの予報値を統計サンプルとして作成したもの(気象庁 2022a)。

ンクリメントが入る)が大きく変わらないように、水平誤差相関と鉛直誤差相関は変えない。また、 $\mathbf{B}_c^{1/2}$  の定義を  $\mathbf{B}_c^{1/2} = \mathbf{B}_v^{1/2} \mathbf{B}_h^{1/2}$  からメソ解析の設定に合わせて  $\mathbf{B}_c^{1/2} = \mathbf{B}_h^{1/2} \mathbf{B}_v^{1/2}$  に変更する ( $\mathbf{B}_h$  と  $\mathbf{B}_v$  はそれぞれ水平、鉛直方向の気候学的な背景誤差共分散行列)。

### (3) 局地解析とメソ解析の解析モジュール統一化のための変更

asuca-Var(Ikuta et al. 2021) のメソ解析への導入時に、局地解析に導入している asuca-Var モジュールは更新しなかったため、今回更新した。予測精度をほぼ変えない仕様変更である。例えば、観測演算子において観測相当量へ変換してから空間内挿していたところを、空間内挿してから観測相当量に変換するように変更する、 $x, y$  方向の風の制御変数の配置をスカラポイントからそれぞれ  $x, y$  方向に半格子ずれた  $u, v$  ポイントに変更する、といった点である。いずれもメソ解析と同じ仕様にするもので、幾田 (2014) から Ikuta et al. (2021) への更新にあたる。

### (4) 予報モデルの物理過程の改良

メソモデルの物理過程改良 (第 3.3 節) に合わせて、その改良の一部を局地数値予報システムの予報モデルに反映する。具体的には、以下の項目である。

- (a) 陸面の蒸発散フラックス定式を改良
- (b) 土壌水分初期値 (気候値) および地表面パラメータを更新 (地表面アルベド、熱粗度、LAI の導入、植生・都市被覆率の導入)
- (c) 放射過程の短波水蒸気吸収係数の更新

局地解析がメソモデルの予報値 (解析時刻 3 時間前) を第一推定値とすることを述べたが、局地数値予報システムとメソモデルとで用いる予報モデル設定や定数の性質等の違いが大きい場合、その差に起因して解析や予報の精度が悪化することがある。今回、メソモデルにおける (a),(b) の陸面過程の改良によって、局地解析の土壌水分量の第一推定値が大幅に増加し、従来の定式のままでは潜熱フラックスが過多となり予報精度が悪化することが分かった。そこで、局地数値予報システムにおいてもメソモデルにおける陸面過程の改良を反映することとした。また、(c) については、対流圏下層気温の予測精度向上に寄与することが確認できたことから局地モデルに反映した<sup>5</sup>。物理過程の個々の改良項目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 2022a) を参照いただきたい。

#### 3.4.3 本改良による予測特性の変化

前項の改良による局地数値予報システムの予測特性の変化を述べる。改良前のルーチン相当の設定の実験をコントロール (CNTL) とし、改良を適用した現ルー

チン設定の実験をテスト (TEST) とする。実験に与える初期値・境界値は、CNTL では 2021 年 5 月時点のルーチン設定のメソモデルから作成し、TEST では第 3.3 節の改良を行った 2022 年 3 月時点のルーチン設定のメソモデルから作成した。実験期間は、夏は 2020 年 7 月 2 日-7 月 8 日、冬は 2020 年 1 月 11 日-1 月 21 日 (1 時間毎) である。数値予報開発センター年報 (令和 3 年) 第 4.6 節 (気象庁 2022c) で報告した実験と異なる点は、

- TEST の初期値・境界値として第 3.3 節の改良を行った 2022 年 3 月時点のルーチン設定のメソモデルを用いたこと、
  - メソモデルの改良に対応して、予報モデルの物理過程改良を行ったこと、
  - 検証期間を変えて 1 時間毎の実行としたこと、
- である。

図 3.4.1 は夏期間における地上比湿と地上気温の予報時間別の統計検証結果である。地上乾燥バイアスは縮小し、RMSE は改善した。地上気温についても RMSE が改善した。ハイブリッド同化の導入による効果に加え、予報モデルの物理過程の改良の効果が大きい。冬期間でも同様の改善が見られた (図略)。

図 3.4.2 には夏期間における閾値 10 mm/h の降水の検証結果を示す。予報前半を中心に空振りと見逃しが減少し、エクイタブルスレットスコア (ETS) が改善した。強雨を中心に閾値に依らず同様の改善が見られたが、閾値 1mm/h 程度の雨についてはバイアスコアが過小傾向となり、ETS は概ね中立の結果となった (図略)。基本的には数値予報開発センター年報 (令和 3 年) 第 4.6 節 (気象庁 2022c) で報告と同様の改善傾向となっており、ハイブリッド同化の導入による効果と考えられる。冬期間では弱い雨について予報前半を中心に改善が見られた (図略)。

図 3.4.3 に示す、2020 年 7 月 3 日 12UTC 初期値の FT=7-10 の 3 時間降水量の予測では、TEST は CNTL に比べて、熊本県を中心とする線状降水帯をより実況に近い位置に表現することができた。図 3.4.4 に示すように、この初期値を作成するための解析では、ハイブリッド同化の導入によって、CNTL に比べて流れに依存した解析インクリメントが入るようになっていた。同図の黒丸で囲った領域では、第一推定値において線状降水帯付近へ暖気が流入しており (図略)、ハイブリッド同化の導入により線状降水帯付近への暖気の流入を強めていた。

#### 3.4.4 まとめ

2022 年 3 月に更新された局地数値予報システムでは、局地解析について、MEPS 摂動を用いて作成した誤差共分散行列と気候学的な誤差共分散行列を混ぜて用いるハイブリッド同化を導入し (Hybrid-3DVar)、気候学的背景誤差の修正、メソ解析との解析モジュー

<sup>5</sup> 今回導入した以外のメソモデルの物理過程改良 (第 3.3 節) の一部の項目についても、局地モデルに反映する開発に取り組んでいる (第 4.4 節)。

比湿(g/kg)の対地上観測誤差

気温(K)の対地上観測誤差

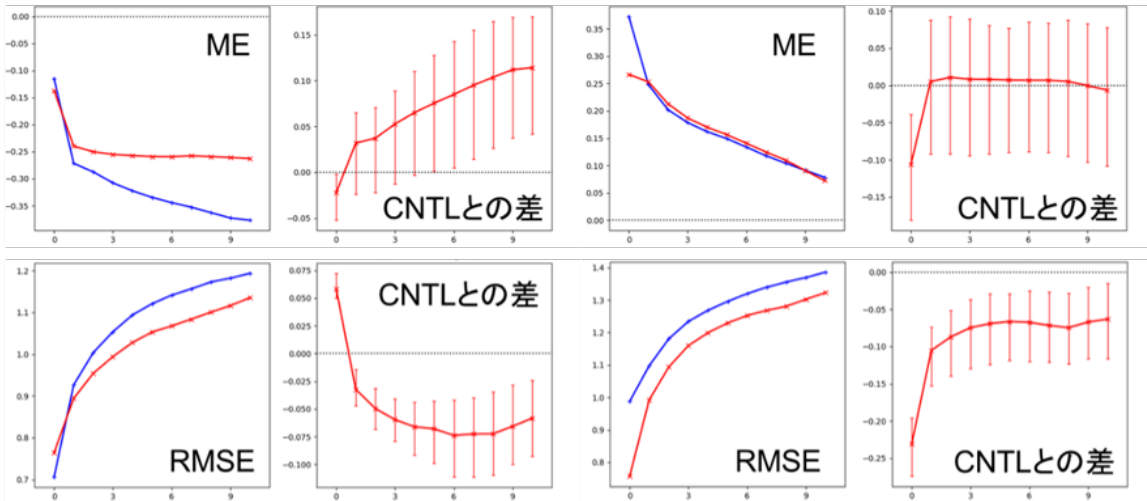
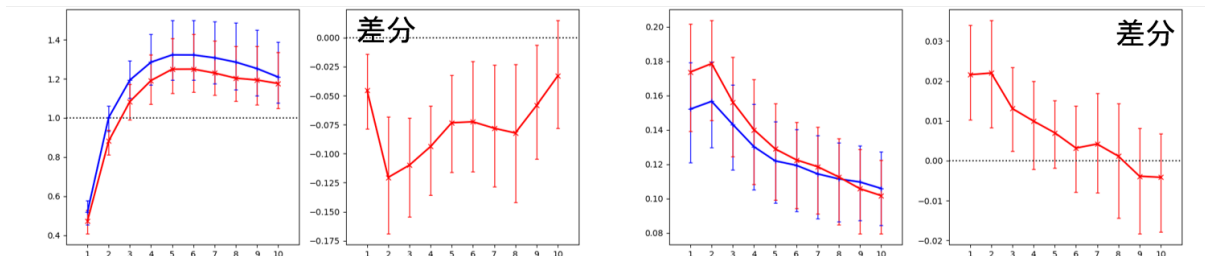


図 3.4.1 夏期間における（左）地上比湿、（右）気温の対地上観測検証結果。それぞれ上段に ME とその CNTL との差、下段に RMSE とその CNTL との差を示す。横軸は予報時間 [h]。青線は CNTL、赤線は TEST の結果を示す。

バイアスコア

エクイタブルスレットスコア



空振り率

見逃し率

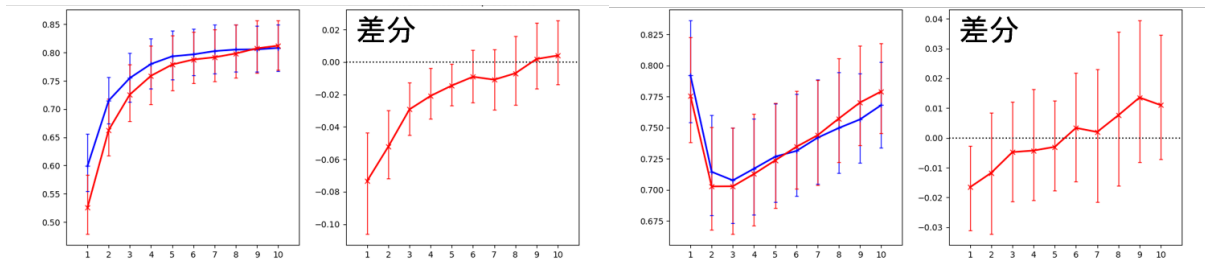


図 3.4.2 夏期間における 1 時間降水量 [mm/h]（検証格子 10 km）の閾値 10 mm/h の対解析雨量検証結果と TEST と CNTL の差。（左上）バイアスコア、（右上）エクイタブルスレットスコア、（左下）空振り率、（右下）見逃し率。横軸は予報時間 [h]。青線は CNTL、赤線は TEST の結果を示す。

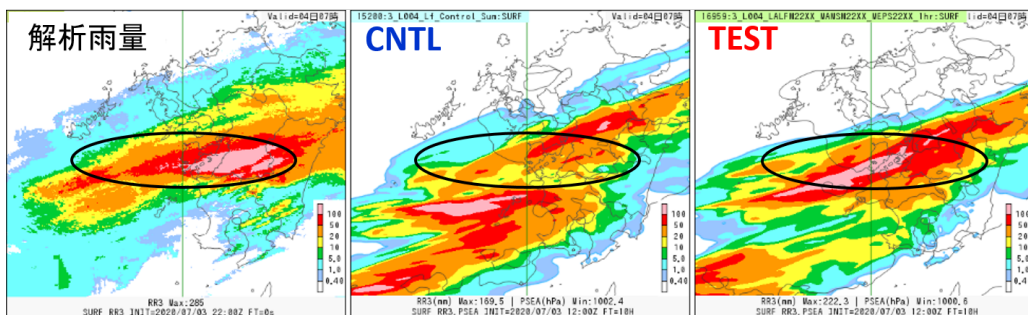


図 3.4.3 2020 年 7 月 3 日 22UTC の 3 時間降水量 [mm/3h] について、解析雨量（左）と CNTL（中）、TEST（右）の予測結果（2020 年 7 月 3 日 12UTC の FT=7-10）。

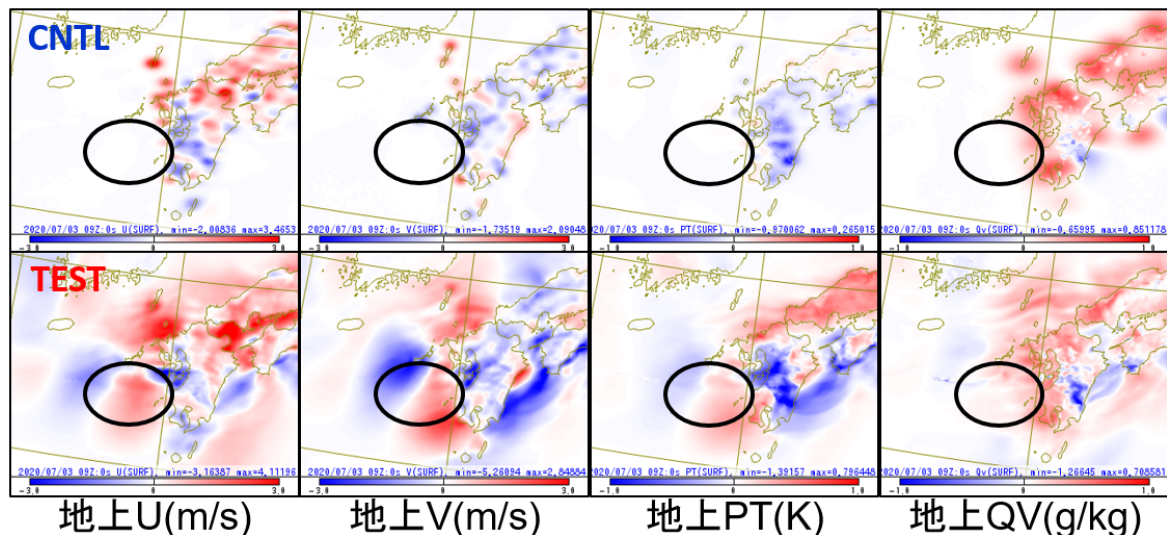


図 3.4.4 2020 年 7 月 3 日 12UTC の初期値作成までの 4 回の解析のうちの最初の解析 (09UTC) における解析インクリメント。上段に CNTL、下段に TEST を示し、それぞれ左から地上の  $x$  方向の風 [m/s]、 $y$  方向の風 [m/s]、温位 [K]、比湿 [g/kg] について示す。

ル統一化のための変更も合わせて行った。また、メソ数値予報システムの更新 (第 3.3 節) に伴う予報モデルの物理過程の改良を行った。前ルーチンとの比較実験により、地上気象要素と予報前半の強雨を中心に予測精度が向上すること、強雨事例において流れに依存した解析インクリメントが得られ、それにより強雨の予測が改善していることを確認した。数値予報開発センター年報 (令和 3 年) 第 4.6 節 (気象庁 2022c) では、前ルーチンのメソモデルを初期値・境界値として用いた実験結果を示したが、本節では 2022 年 3 月に更新したメソモデルを用い、それに対応した物理過程の改良を合わせた実験結果を示した。実験設定の違いはあるものの、両者の比較では、ハイブリッド同化手法の導入による予測特性の変化は共通して確認された。また、物理過程改良により期待される効果も合わせて見られた。

はじめに述べたとおり、2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画では豪雨防災を重点目標の一つに掲げており、線状降水帯に代表される集中豪雨の発生前に、明るいうちからの避難等、早期の警戒・避難を実現するため、局地モデルによる集中豪雨の予測精度向上が求められている。そのためには今後も局地解析および局地モデルの改良を継続して進めていく必要がある。今年度実施しているこれらの開発の進捗については第 4 章の各節を参照いただきたい。

#### 参考文献

藤田匡, 倉橋永, 2010: 局地解析. 数値予報課報告・別冊第 56 号, 気象庁予報部, 68–72.  
 幾田泰醇, 2014: asuca 変分法データ同化システム. 数値予報課報告・別冊第 60 号, 気象庁予報部, 91–97.

Ikuta, Y., T. Fujita, Y. Ota, and Y. Honda, 2021: Variational Data Assimilation System for Operational Regional Models at Japan Meteorological Agency. *J. Meteor. Soc. Japan*, **99**, 1563–1592.  
 気象庁, 2022a: 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, 2022b: 局地モデルの鉛直層増強と物理過程改良. 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, 29–33.  
 気象庁, 2022c: 局地解析へのハイブリッド同化手法の導入. 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, 102–105.  
 Lorenc, A. C., 2003: The potential of the ensemble Kalman filter for NWP—a comparison with 4D-Var. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **129**, 3183–3203.  
 Parrish, D. F. and J. C. Derber, 1992: The National Meteorological Center’s spectral statistical-interpolation system. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 1747–1763.

### 3.5 日本域高潮モデルの予報時間延長

#### 3.5.1 概要

気象庁は、高潮注意報・警報等の防災情報提供のために、台風や発達した温帯低気圧によって引き起こされる高潮を予測する日本域高潮モデル(林原 2011)を運用している。日本域高潮モデルではこれまで1日8回39時間予測を行っていたが、気象庁が「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」で掲げている、台風が日本に接近する可能性がある場合等に3日先までの高潮予測情報を提供するとの目標<sup>1</sup>に資するために、予報時間の延長が望まれていた。第3.3節で報告されているように、2022年6月に00, 12UTC初期時刻のMSMの予報時間が78時間に延長されたことから、この成果も活用し日本域高潮モデルの00, 12UTC初期時刻の予報時間を78時間に延長するための開発を進めてきた。高潮モデル78時間予測の業務化試験を行ったところ、78時間予測の精度はこれまでの39時間までの予測の精度から大きな乖離はなく、一定の精度があることを確認した。このことから2022年9月に日本域高潮モデルの予報時間延長を行った。本節では、今回の日本域高潮モデルの変更点及び業務化試験の検証結果について報告する。

#### 3.5.2 日本域高潮モデルの改良項目

上で述べたように今回の主な改良項目は、00, 12UTC初期時刻の予報時間を78時間に延長にする点であるが、これに加えて以下の変更を適用した。

##### (1) 初期値作成時のMSMの大気要素の時間内挿方法を改善

日本域高潮モデルでは初期値を作成する際にデータ同化は行わず、MSMによる海上風、海面気圧を用いて前回初期値から高潮モデル計算を行い、初期値を作成している。これをハインドキャストと呼ぶ。これまで、MSMの3時間おきの解析による海上風、海面気圧を用いて、その間は時間方向に線形内挿を行っていた(図3.5.1上段)。この方法だと台風や低気圧の移動が速い場合などに気象の場の変化が十分に高潮モデル内で再現されず、ハインドキャストでの高潮の表現が過小となる場合があった。これを改善するために、ハインドキャストを行う際にMSMの3時間おきの解析値だけでなく、MSMの前回初期時刻での0~2時間予測も用いるように変更した(図3.5.1下段)。本手法導入によりハインドキャストでの高潮の再現精度は改善することを確認した(図略)。本変更は予測精度への影

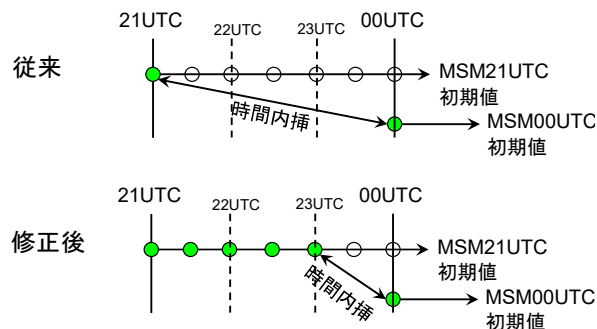


図 3.5.1 日本域高潮モデル初期値作成(ハインドキャスト)時のMSM大気要素時間内挿概念図。上段は従来の内挿方法、下段は改善後の内挿方法。この例では、00UTC初期時刻の日本域高潮モデルで初期値を作成する際のMSM大気予測の参照方法を示している。

響は小さいものの、ハインドキャスト結果は高潮モデル自体の精度の評価にも使用されることから、今回この改善を導入した。

##### (2) 台風ボーガス計算での台風位置内挿手法を球面スプラインに変更

日本域高潮モデルでは大気外力としてMSMを用いたメンバーに加えて、台風ボーガスを用いた予測計算も行う。この際、台風の位置・強度として気象庁が発表する熱帯低気圧情報を使用する。従来の台風ボーガス手法では、台風中心位置を時間内挿する際に二次元平面を仮定した3次スプライン内挿法を用いていた。予報時間が短く台風の影響を受ける範囲が狭い場合は二次元平面の仮定はある程度有効であるものの、今回のように予報時間を延長しようとする場合、球面との差が大きくなりえる。特に台風が高緯度にあるほど、二次元平面の仮定は球面からの乖離が大きくなる。このことから、今回高潮モデルでの台風中心位置の内挿手法を、より正確に球面上の曲線を内挿できる四元数(quaternion)を用いた球面スプライン(Nielson 2004)に更新した。

##### (3) 海面気圧平年値をJRA-25からJRA-3Qに変更

日本域高潮モデルでは、気圧による吸い上げ効果を計算する際に、各格子上で海面気圧予測値から海面気圧平年値を差し引いた気圧偏差を用いている。この海面気圧平年値としてこれまでではJRA-25長期再解析(Onogi et al. 2007)の結果を用いていたが、より新しい気象庁第3次長期再解析(JRA-3Q; 第4.11節参照)が利用可能になったことから、JRA-3Qの海面気圧平年値を用いるように変更した。

### 3.5.3 日本域高潮モデル78時間予測の精度

日本域高潮モデルでの78時間予測の精度を確認するために、2019~2021年の6~11月の台風事例を対象とした業務化試験を実施した。業務化試験では大気外力として第3.3節のMSM業務化試験の結果を用いた。コ

<sup>1</sup> [https://www.jma.go.jp/jma/press/1810/04b/nwp\\_strategic\\_plan\\_towards\\_2030\\_2body.pdf](https://www.jma.go.jp/jma/press/1810/04b/nwp_strategic_plan_towards_2030_2body.pdf)

「3.2 台風防災メソモデル、メソアンサンブル予報システム及び高潮モデルについても、延長予測により3日先までの予測を可能にし、台風に伴う大雨や高潮などをより高い精度で予測する必要がある。」

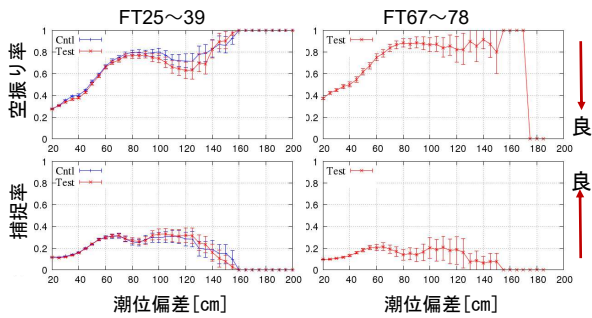


図 3.5.2 日本域高潮モデル検証結果。上段は空振り率、下段は捕捉率、左列は 25～39 時間予測、右列は 67～78 時間予測。横軸は潮位偏差の閾値、縦軸は各スコアを表す。図中、青線は CNTL、赤線が業務化試験 (TEST) を示す。

ントロール (CNTL) 実験としては、第 3.5.2 項の改良を適用前の高潮モデルに当時の現業 MSM 予測結果を与えた予測結果を用いた。また、上述の通り台風ポーガス進路の内挿手法の変更も行ったことから、MSM を外力としたメンバーに加えて台風ポーガス (予報円中心メンバー) の試験も行っている。業務化試験結果の精度検証では、気象庁をはじめ国・地方自治体等が運用している日本国内 207 の潮位観測点で観測された潮位偏差を真値として使用した。67～78 時間予測 (図 3.5.2 右列) は 25～39 時間予測 (図 3.5.2 左列) と比較して、空振り率の増加、捕捉率の低下等、検証スコアの若干の悪化は認められたものの、大きく乖離してはならず一定の精度が確保できている (図 3.5.2)。また、改善前の MSM で駆動した CNTL 実験結果と比較すると改善傾向が認められる。これは第 3.3 節の MSM の改善による効果も反映していると考えられる。台風ポーガスを用いたメンバーでの 78 時間予測のスコアについても予報時間の増加に伴う若干の悪化傾向はあるものの大幅な悪化はないことを確認した (図略)。

また、温帯低気圧による高潮の事例として 2021 年 2 月 16 日頃に発生した根室での高潮の例を図 3.5.3 に示す。この事例では根室にて 2 月 16 日 03JST (15 日 18UTC) 頃に警報基準に達する潮位が観測されている。2 日半 (約 60 時間) 前の 2 月 13 日 12UTC 初期時刻の日本域高潮モデルでは若干のピーク時刻の違いなどはあるものの警報基準程度の潮位を予測している。このように日本域高潮モデルの予報時間を延長することで、より長いリードタイムでの高潮の予測情報提供が可能となり、防災活動に資することが期待される。

### 3.5.4 まとめ

日本域高潮モデルの予報時間延長に向けた開発を行い、業務化試験を実施し精度を確認した。その結果、一定の精度が確認できたことから、2022 年 9 月に日本域高潮モデルの予報時間延長を現業化し、気象庁内での利用を開始した。また、気象庁外向けにも 78 時間延長予測期間の日本域高潮モデル GPV を気象業務支援セ

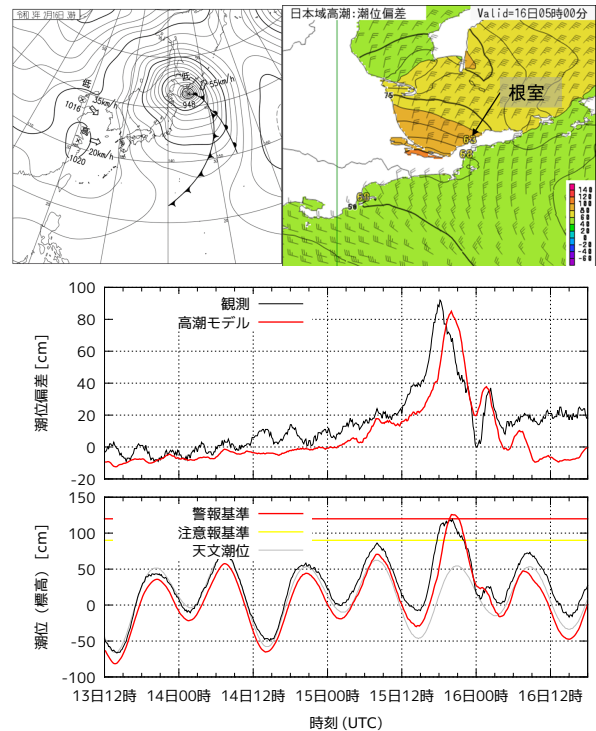


図 3.5.3 2021 年 2 月 16 日の根室の高潮事例 (上段左) 2 月 16 日 03JST の地上天気図。(上段右) 2 月 13 日 12UTC を初期時刻とした高潮モデル 56 時間予測 (予測対象時刻 2 月 16 日 05JST) 平面分布。値は潮位偏差。(中段) 潮位偏差時系列。図中黒線が観測、赤線が高潮モデル予測値。(下段) 潮位時系列。赤、黄の横線はそれぞれ高潮警報、注意報基準。

ンターを通じて提供する方向で現在準備中である。

### 参考文献

- 林原寛典, 2011: 気象庁の高潮数値予測モデルについて. 天気, **58**, 235–240.
- Nielson, G. M., 2004:  $\nu$ -Quaternion splines for the smooth interpolation of orientations. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, **10**, 224–229.
- Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K. Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji, and R. Taira, 2007: The JRA-25 Reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 369–432.

### 3.6 日本域台風時高潮確率予報システムの導入

#### 3.6.1 概要

気象庁は、警報級の現象が5日先までに予想されるときにはその可能性を「早期注意情報（警報級の可能性）」として発表している（杉本・木下 2016）。早期注意情報はこれまで雨、雪、風、波を対象に発表されており、高潮についても対応が望まれていた。この高潮の早期注意情報に必要な5日先までの台風予報の信頼度も考慮した確率的高潮予測を行うため、気象庁では日本域台風時高潮確率予報システム（日本域高潮 PFS<sup>1</sup>）の開発を行い、2022年9月に運用を開始した。本節では、日本域高潮 PFS の概要について述べる。

#### 3.6.2 日本域高潮 PFS の概要

高潮の発生は台風進路のわずかな違いによって大きく異なることから、早期注意情報に求められる5日先の高潮予測を行うためには台風進路予報の不確実性を適切に考慮する必要がある。日本域高潮 PFS の開発においては、米国 NOAA ハリケーンセンターがハリケーン接近時の高潮確率予測を行うために運用している P-Surge (Taylor and Glahn 2008; Gonzalez and Taylor 2018) の手法を参考とした。P-Surge では、ハリケーンの進路・強度予報を元にハリケーンの進路・強度を少しずつ変えたアンサンブル高潮予測を行う。具体的には、台風進行方向に対して横方向 (cross track) に沿った位置、進行方向 (along track) に沿った位置、ハリケーン の大きさ、強度それぞれに摂動を与える。

日本域高潮 PFS では、P-Surge を参考にしつつ、以下のような予測システムの構成とした。

- 気象庁が発表する台風予報に沿った高潮予測情報とするため、高潮モデルの外力として気象モデルの風・気圧の予測値は用いず、台風予報に基づいて作成される台風ボーガス (林原 2011) の風・気圧により高潮モデルを駆動する。
- 気象庁が発表する台風予報円の情報を元に、台風進行の横方向 (cross track) に進路を等間隔にずらした計 21 通りの台風進路を作成する (図 3.6.1)。予報円内に台風中心が入る確率は約 70% なので、予報円外に台風が進行する可能性も考慮し、予報円の外側にも左右 2 コースずつ進路計算を配置する。
- 上述の 21 通りの台風進路上に台風ボーガスを配置して 21 通りの高潮予測計算を実行する (図 3.6.2)。
- 台風進行速度の不確実性に伴う高潮予測への影響も考慮するため、21 メンバーの高潮モデル計算後の後続処理にて、それぞれの高潮予測結果の時間を台風進行速度に応じてずらす処理を実施する。この時間をずらす処理も cross track の各メンバーに対して 21 通りのメンバーを生成する。結果、cross track 方向 21 通り × along track 方向 21 通り = 441

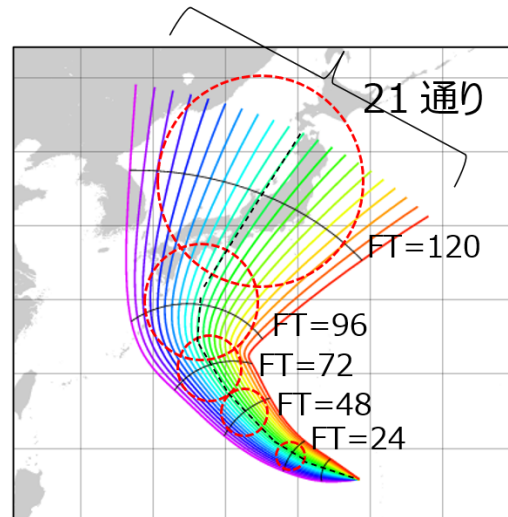


図 3.6.1 日本域高潮 PFS での 21 通りの台風進路の例。初期時刻は 2018 年台風第 21 号が日本に接近中の 2018 年 8 月 31 日 00UTC。図中赤い円は 24, 48, 72, 96, 120 時間台風予報の予報円。

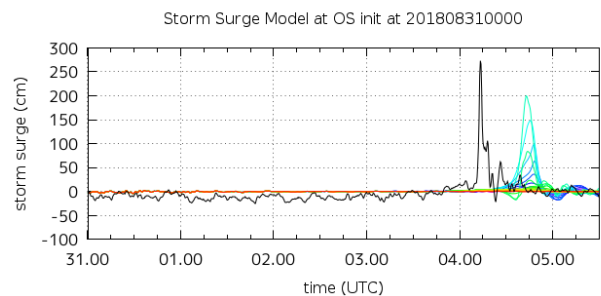


図 3.6.2 日本域高潮 PFS での 21 通りの高潮予測の例。大阪での高潮予報結果。初期時刻は 2018 年 8 月 31 日 00UTC。黒線は検潮所での潮位観測値、他の線は各進路に対応する予報であり、色は図 3.6.1 の台風進路の線と対応している。

通りの高潮予測が計算される。

- これら 441 通りの高潮（潮位偏差）予測に別途予測した天文潮位 (高佐ほか 2011) を加算し、標高を基準とした潮位予測値を得る (図 3.6.3)。
- この 441 通りの高潮予測から、警報などの基準値を超過する確率や、潮位予測パーセンタイル値等の確率予測を求めるためには、各メンバーの確率密度の値が必要である。日本域高潮 PFS においては、台風予報円に対して台風中心位置が取りうる確率密度分布として、図 3.6.4 のように二次元正規分布を仮定して、各メンバーの確率密度を計算する。
- この確率密度分布を、441 通りの高潮予測それぞれに与えることで、図 3.6.5 に示したような高潮警報基準超過確率等の確率予測プロダクトを作成する。

その他の高潮 PFS の仕様は以下の通りである。日本域高潮 PFS の予測時間は、早期注意情報の期間

<sup>1</sup> Probabilistic Forecast System



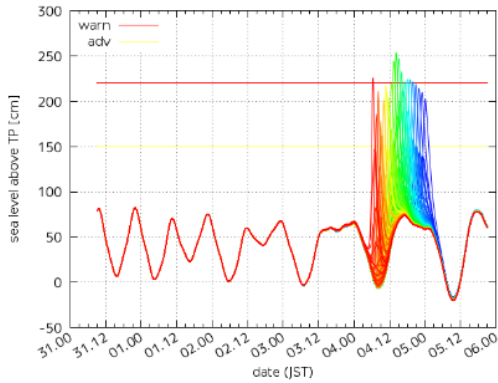


図 3.6.3 日本域高潮 PFS で台風進行速度の不確実性も考慮した 441 通りの予測例。地点、初期時刻は図 3.6.2 に同じ。図中、赤系統の色は台風の進行速度が速い場合、青系統の色は台風の進行速度が遅い場合に対応する。

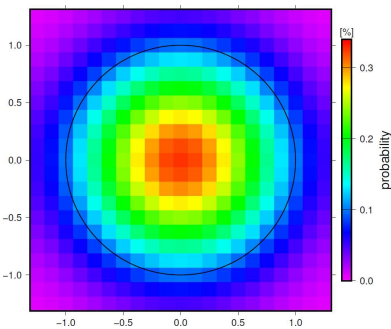


図 3.6.4 日本域高潮 PFS で仮定する台風予報円に対する台風中心通過位置の確率密度分布。図中の黒い円は台風予報円を表す。x 軸、y 軸のスケールは予報円半径で正規化した距離。予報円中心付近を通過するメンバーに高めの確率、円外では低い確率を与える。

5 日をカバーするため、台風 5 日予報が発表される 00,06,12,18UTC 初期時刻では 132 時間とした。加えて、24 時間先までの台風予報が更新される 03,09,15,21UTC 初期時刻では、最新の台風情報を高潮予測に反映するために 39 時間予測を実行する。同システムの実行条

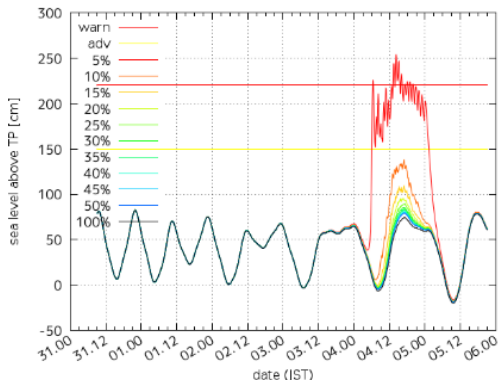


図 3.6.5 日本域高潮 PFS の 441 通りの高潮予測結果から予測潮位パーセンタイルを計算した例。地点、初期時刻は図 3.6.2 に同じ。図中、赤の横線は大阪における高潮警報基準、黄色の横線は高潮注意報基準を表す。

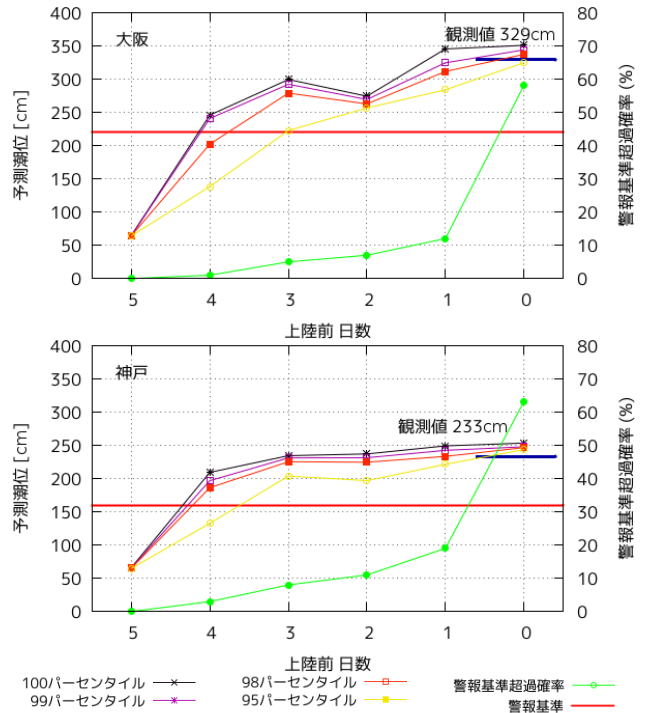


図 3.6.6 日本域高潮 PFS を 2018 年台風第 21 号に適用した場合の大阪・神戸での予測結果。上段が大阪、下段が神戸。横軸は台風上陸前の日数、縦軸は日最大予測潮位。黒、紫、赤、黄の線は 100, 99, 98, 95 パーセンタイル値を、緑線は警報基準を超過する確率を表す。赤の横線は高潮警報基準、紺色の横線は観測潮位。

件は、予測期間内に日本沿岸に暴風域がかかる可能性がある熱帯擾乱がある場合とし、条件を満たさない初期時刻では高潮 PFS は実行されない。高潮予測計算には、日本域高潮モデルと同じ高潮モデル（水平解像度沿岸域 1km～沖合 16km）を使用する。

### 3.6.3 日本域高潮 PFS の予測例

日本域高潮 PFS を用いて過去の実際の台風事例に適用した結果を以下に示す。ここでは顕著な高潮が発生した 2018 年台風第 21 号での大阪湾を例として、100, 99, 98 等のパーセンタイル潮位予測値を計算した結果を図 3.6.6 に示した。本結果では 100, 99 パーセンタイルなどの最悪想定シナリオが台風上陸の約 4 日前から大阪・神戸で警報基準を超過する可能性を予測しており、日本域高潮 PFS が高潮の警報級の可能性の捕捉に有効であることを示していると考えられる。

### 3.6.4 まとめ

高潮の早期注意情報（警報級の可能性）のための予測情報を提供するため、日本域高潮 PFS の運用を 2022（令和 4）年 9 月に開始した。今後は、P-Surge で考慮されているような台風強度、台風の大きさの摂動を導入する等の改善を検討していく予定である。

## 参考文献

- Gonzalez, T. and A. Taylor, 2018: Development of the NWS' Probabilistic Tropical Storm Surge Model. *Proceedings of the 33rd Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Ponte Vedra, FL, USA*, **11**.
- 林原寛典, 2011: 気象庁の高潮数値予測モデルについて. *天気*, **58**, 235-240.
- 杉本悟史, 木下信好, 2016: 「警報級の可能性」の経緯と目的. 量的予報技術資料 (平成 27 年度予報技術研修テキスト), 気象庁予報部, 61-62.
- 高佐重夫, 近澤昌寿, 森裕之, 2011: 面的天文潮位の予測手法とその精度. *測候時報 (海洋気象特集)*, **78**, S33-42.
- Taylor, A. and B. Glahn, 2008: Probabilistic guidance for hurricane storm surge. *19th Conference on probability and statistics*, Vol. 74.

### 3.7 アジア域高潮アンサンブル予報システムの導入

#### 3.7.1 概要

気象庁は、WMO の高潮監視スキーム (Storm Surge Watch Scheme) の枠組みで ESCAP/WMO 台風委員会加盟国気象機関に高潮予測情報を提供するため、2011 年よりアジア域高潮モデルを運用してきた (Hasegawa et al. 2012, 2017)。このモデルの予測結果は RSMC 東京台風センターの Numerical Typhoon Prediction (NTP) ウェブサイトを通じて、図情報として台風委員会加盟国へ提供されている。

台風委員会からは従来より高潮予測改善への期待があったことから、気象庁ではこのアジア域高潮モデルの改善に向け、水平高解像度化、アンサンブルメンバー数増強、予報時間延長等の様々な開発を行ってきた。特に高潮防災に有効な数日前からの高潮確率予測プロダクト提供に向けて、アンサンブルメンバー数を従来の 6 から 52 に増強する取り組みを行ってきた。これによって本格的なアンサンブル予報が可能となることから、システムの名称もこれまでの「アジア域高潮モデル」から「アジア域高潮アンサンブル予報システム (アジア域高潮 EPS)」に変更した。2022 年度にはこれらの開発成果を合わせた業務化試験を行い予測精度の改善が確認できたことから、2022 年 8 月にアジア域高潮 EPS の現業化を行った。本節ではこれらの改良について報告する。

#### 3.7.2 アジア域高潮 EPS の改良項目

本項では従来のアジア域高潮モデルに対してのアジア域高潮 EPS の改良点を述べる。表 3.7.1 に新旧仕様比較表を示した。

##### (1) モデル高解像度化

従来のアジア域高潮モデルでは水平解像度は全域緯度経度 2' (約 4km) であったが、今回沿岸域での解像度を約 1.5km に高解像度化した。これによりモデル内での海陸分布の表現がより正確になり、高潮予測の精度向上につながる。

##### (2) モデル領域の拡張

今回のシステム更新では図 3.7.1 のようにモデル領域の拡張も行った。従来のモデル東側境界は東経 160°であったが、これを今回 180°まで拡張した。これにより、これまでモデル領域に含まれていなかったマーシャル諸島等が領域に含まれるようになり、RSMC 東京台風センター責任領域のほぼ全域をカバーできるようになった。

##### (3) アンサンブルメンバー数の増強

アジア域高潮モデルでは、RSMC 東京台風センターの責任領域に台風が存在する場合には、台風進路・強度予報の不確実性を考慮した高潮予測を行うために、全球モデル (GSM) と全球アンサンブル予報システム

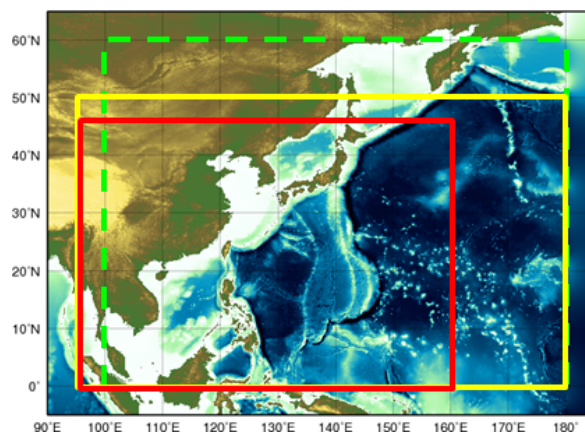


図 3.7.1 アジア域高潮 EPS モデル領域。黄色線がアジア域高潮 EPS のモデル領域、赤線が従来のアジア域高潮モデルの領域、緑破線は RSMC 東京台風センター責任領域。

(GEPS) の風・気圧予報結果を用いた複数シナリオの計算を行う。従来のアジア域高潮モデルでは計算機資源節減のため、GEPS の 51 アンサンブルメンバーから台風進路予報のクラスター解析により代表的な 5 メンバーを選び、これに GSM も加えて 6 通りの高潮予測を行っていた (Hasegawa et al. 2017)。この 6 メンバー予測では台風進路予報の不確実性に伴う高潮予測の不確実性をある程度知ることが可能であるものの、顕著な高潮の発生確率やパーセンタイル値といった定量的な確率の高潮予測情報を提供するには不十分であった。そこで今回の改良では、台風時には GEPS の 51 メンバー全てと GSM の予測結果を用いた計 52 メンバーの高潮アンサンブル予報を実行するように変更した。これにより、以下第 3.7.4 項で述べるような確率の高潮予測情報の提供が可能となった。

##### (4) 予報時間延長

上述の通り、従来のアジア域高潮モデルではメンバー数が 6 と限定されており数日先の高潮発生の不確実性を捉えるには十分とは言えなかった。そのことを考慮し、予報時間も 72 時間までと限定していた。今回アンサンブルメンバー数を増強することによって確率的予測情報が提供できるようになることから、それに合わせて予報時間も 132 時間に延長した。

##### (5) 台風ボーガス手法の改善

日本域高潮モデルでは、台風ボーガス手法に陸域の影響による風の減衰の効果 (Westerink et al. 2008) を 2021 年 4 月に導入することで、それまでの高潮予測の過大傾向を軽減させ、予測精度を改善した (気象庁 2022)。アジア域高潮 EPS でも同じ手法を今回導入し、これまで認められていた高潮予測の過大傾向を軽減させる改善を図った。

表 3.7.1 従来のアジア域高潮モデルと新アジア域高潮 EPS の仕様比較

システム	アジア域高潮モデル	アジア域高潮 EPS
水平解像度	2分 (約 4km)	約 1.5km (沿岸域) ～約 50km (外洋域)
モデル領域	0°～46°N, 95°～160°E	0°～50°N, 95°E～180°
予報時間	72 時間	132 時間
アンサンブルメンバー数	台風時 6 (GSM+GEPS×5 <sup>※</sup> ) 非台風時 1 (GSM)	台風時 52 (GSM+GEPS×51) 非台風時 1 (GSM)
実行頻度	1日4回 (00,06,12,18UTC)	同左

※ 大気外力として GEPS 全メンバーからクラスター解析により選択した 5 メンバーと GSM を使用

### 3.7.3 アジア域高潮 EPS 業務化試験精度検証結果

アジア域高潮 EPS の精度を評価するため、2018～2020 年の 6～11 月を対象として業務化試験 (TEST) を実施した。アジア域高潮 EPS の利用用途を考えると本来は海外での高潮事例について精度検証を行うのが望ましいが、外国地点の潮位観測データは入手できる地点数が少なく、モデルの精度検証に十分な事例数が得られない。そのため、ここでは第 3.5 節と同様に日本の潮位観測データを用いて日本の高潮事例を対象に以下の検証を行った。対照実験 (CNTL) としては現業アジア域高潮モデルの結果を用いた。CNTL となる従来のアジア域高潮モデルは上述の通り 6 メンバーであり確率予測プロダクト作成は行っていなかったことから、ここでの TEST-CNTL 比較検証では GSM を外力として用いた決定論的予測同士の比較のみを行った。TEST は CNTL と比較して空振り率が減少する一方で、捕捉率は増加する等、各スコアにて改善傾向であることが確認された (図 3.7.2)。これらの改善は、前項で述べたモデル水平高解像度化や台風ボーガス手法改善の効果と考えられる。

### 3.7.4 アジア域高潮 EPS による確率予報プロダクト

従来のアジア域高潮モデルはメンバー数 6 と確率予測情報を提供するにはメンバー数が少なかったため、台風委員会加盟国向けに提供する資料では 6 つのシナリオの図情報を提供していた (図 3.7.3、図 3.7.4)。今回の改善で、台風時には 52 メンバーの高潮アンサンブル予報を行うことから、予測の信頼度を示す確率予測情報を提供することが可能となった。具体的には、図 3.7.5 のように最大潮位、1m 以上の高潮が発生する確率、第三四分位、アンサンブルスプレッドの平面図や、図 3.7.6 のように地点毎の時系列図として潮位予測の箱ひげ図や 1,2,3m 以上の高潮が発生する確率等を提供する。

### 3.7.5 まとめ

本節では、2022 年 8 月に現業化したアジア域高潮 EPS について説明した。従来のアジア域高潮モデルから、水平解像度の高解像度化、モデル領域の拡張、アンサンブルメンバー数増強、予報時間延長、台風ボー

ガス手法等の数多くの改善を行った。これにより、予測精度の改善と新たな確率的な高潮予測情報の提供が可能となった。

### 参考文献

- Hasegawa, H., N. Kohno, and H. Hayashibara, 2012: JMA's Storm Surge Prediction for the WMO Storm Surge Watch Scheme (SSWS). *RSMC Tokyo-Typhoon Center Technical Review*, **14**.
- Hasegawa, H., N. Kohno, M. Higaki, and M. Itoh, 2017: Upgrade of JMA's Storm Surge Prediction for the WMO Storm Surge Watch Scheme (SSWS). *RSMC Tokyo-Typhoon Center Technical Review*, **19**.
- 気象庁, 2022: 日本域高潮モデル予報時間延長と台風ボーガス利用手法改善. 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, 32-35.
- Westerink, J. J., R. A. Luettich, J. C. Feyen, J. H. Atkinson, C. Dawson, H. J. Roberts, M. D. Powell, J. P. Dunion, E. J. Kubatko, and H. Pourtaheri, 2008: A basin- to channel-scale unstructured grid hurricane storm surge model applied to southern Louisiana. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 833-864, doi:10.1175/2007MWR1946.1.

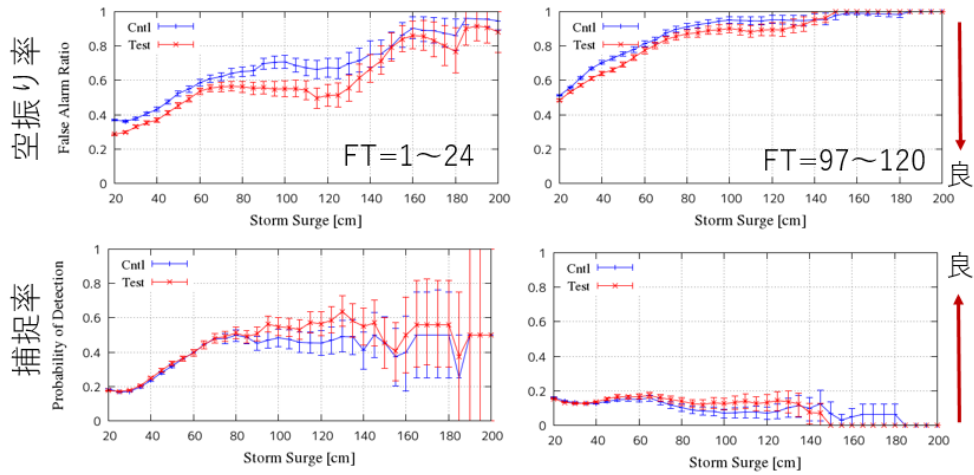


図 3.7.2 アジア域高潮モデル検証結果。上段は空振り率、下段は捕捉率、左列は1~24時間予測、右列は97~120時間予測。横軸は高潮の閾値、縦軸は各スコアを表す。図中、青線はCNTL、赤線がTESTを示す。

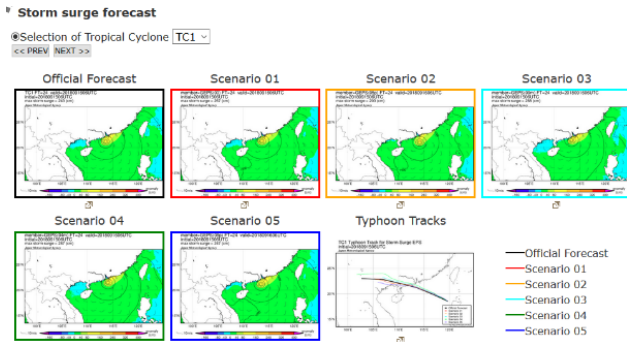


図 3.7.3 従来提供していた高潮予測平面図の例。6メンバーの高潮予測平面図を6枚並べて表示している。

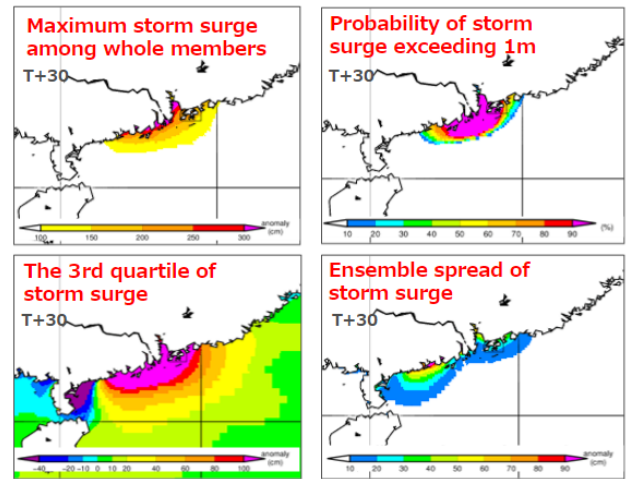


図 3.7.5 アジア域高潮 EPS 導入後の高潮予測平面図情報の例 (左上) 全メンバー中最大の高潮予測値 (左下) 第三四分位 (75パーセントイル) 高潮予測値 (右上) 1m以上の高潮が発生する確率 (右下) アンサンブルスプレッド

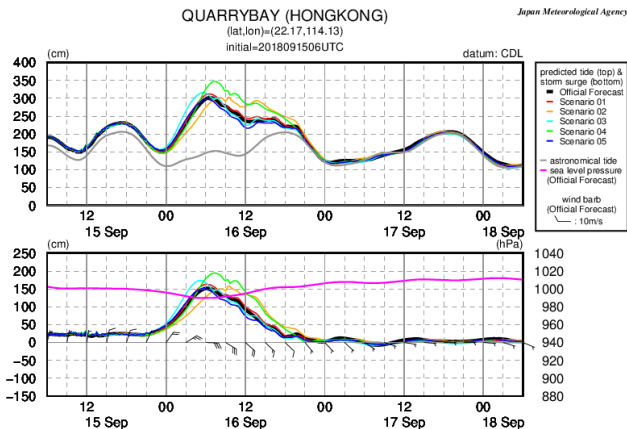


図 3.7.4 従来提供していた高潮地点時系列予測図の例。地点時系列の例。この例は香港 Quarry Bay 地点での高潮予測。上段に6メンバーの潮位予測値、下段に6メンバーの潮位偏差 (平常の潮位からの差) の時間変化を示している。

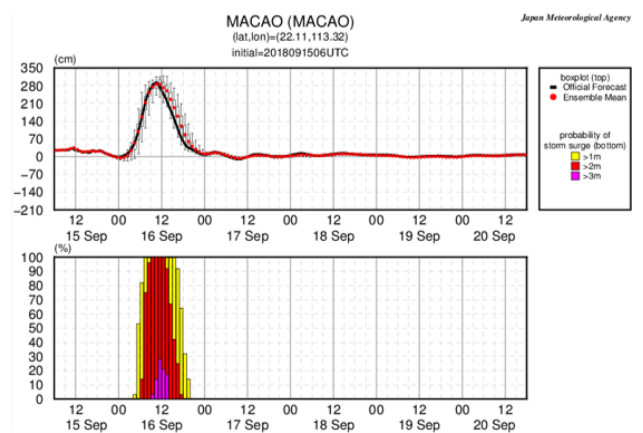


図 3.7.6 アジア域高潮 EPS 導入後の高潮地点時系列図情報の例 (上段) 地点時系列。赤線でアンサンブル平均、箱ひげ図でアンサンブルによる予測の幅を示している。(下段) 基準以上の高潮が発生する確率の時系列図。黄、赤、紫はそれぞれ 1m, 2m, 3m 以上の高潮が発生する確率を示す。

### 3.8 全球解析における観測データ利用手法の改良

#### 3.8.1 はじめに

大気追跡風 (AMV) は気象衛星から撮影された時間的に連続する複数の画像から雲や水蒸気のパターンの追跡を行い、風向、風速を算出するプロダクトである。

本節では、EUMETSAT の AMV プロダクトである Dual Metop global coverage wind (EUMETSAT (2016)、以降、Dual-Metop AMV とする) の全球解析での新規利用に関する開発について報告する。また、Dual-Metop AMV の全球解析での新規利用と、全球解析において衛星により観測された輝度温度データの同化に利用されている放射伝達モデル RTTOV(Eyre 1991) をバージョン 10.2 からバージョン 13 へ更新する開発とを組み合わせた業務化試験の結果についても報告する。なお、RTTOV 更新については第 4.5.2 項を参照頂きたい。

#### 3.8.2 全球解析における Dual-Metop AMV の利用に関する開発の背景

全球解析では、Terra 衛星や Aqua 衛星に搭載された MODIS、NOAA 衛星や Metop 衛星に搭載された AVHRR から算出される極域の AMV をデータ同化に利用している。

Terra 衛星や Aqua 衛星は、設計寿命を超えて運用されており、近い将来 MODIS による AMV の配信終了が予想される。また、NOAA 衛星や Metop 衛星に搭載されている AVHRR による AMV は、米国環境衛星・資料情報局 (NOAA/NESDIS) による現行の算出システムでの配信終了が予定されているため、今後極域 AMV の利用数の減少による解析精度の悪化が懸念される。

このような状況から、EUMETSAT の AMV プロダクトの 1 つである Dual-Metop AMV の全球解析での利用に向けて開発を進めてきた。

#### 3.8.3 EUMETSAT の Metop/AVHRR の AMV プロダクト

EUMETSAT が運用する Metop 衛星に搭載された AVHRR によって算出される AMV には以下のプロダクトがある。

- Single Metop polar wind  
Metop-B,-C それぞれの約 100 分間隔の連続する 2 枚の画像を使用して算出されるプロダクトで、高緯度において算出可能である。
- Dual Metop global coverage wind(Dual-Metop AMV)  
Metop-B,-C 2 機による約 50 分間隔の連続する 2 枚の画像から作成されるプロダクトであり、極域に限らず全球領域で AMV を算出可能である。
- Triplet mode polar wind  
Metop-B,-C 2 機による画像で作成されるプロダク

トで、約 50 分間隔の連続する 3 枚の画像から作成される。高緯度において算出可能なプロダクトである。

このうち、Metop-B の Single Metop polar wind に対応する気象衛星共同研究所<sup>1</sup>(CIMSS) の AVHRR による AMV は現在同化に利用しているため、それに加えて 2 機の Metop を利用した Dual-Metop AMV を全球数値予報システムで新たに利用することにした。

Dual-Metop AMV は全球領域で算出されるプロダクトであるが、中・低緯度についてはより高頻度・多波長帯の画像を用いて算出される静止気象衛星の AMV をデータ同化に利用しており Dual-Metop AMV の新規利用による利点が少ないため、静止気象衛星の AMV が利用できない北 (南) 緯 50°以北 (南) の高緯度域でのみ利用する<sup>2</sup>。

#### 3.8.4 Dual-Metop AMV の品質管理処理の検討

AMV の品質管理 (QC: Quality Control) 処理は山下・今井 (2007)、山下 (2015) に基づいて実行されているが、Dual-Metop AMV の観測値と第一推定値の差 (O-B) の統計結果 (図 3.8.1) から、最適な QI(Quality Indicator)<sup>3</sup> 閾値の検討、及び同化に適さないデータ品質の悪い領域の調査を行い、Dual-Metop AMV に対して新たに以下の QC 処理を導入することとした。

- QI 閾値 85 以上のデータを利用  
予報値チェックあり QI による QC により、負バイアスが大きな対流圏上層や、正バイアスの大きな対流圏下層のデータを排除する。図 3.8.1(a)、(c) 及び (b)、(d) の比較から、QI 閾値 85 以上のデータのみを利用した場合、これらのバイアスが軽減していることがわかる。
- 300 hPa より下層のデータを利用  
図 3.8.1(a)、(b) から中・高緯度の 300 hPa より上層では 第一推定値に対して西風の弱風バイアスが見られる。図 3.8.1(c)、(d) から QI 閾値 85 以上のデータによる統計でもバイアスが見られ、QI による QC のみではこれらのバイアスを持ったデータを除去しきれないため、300 hPa より上層のデータは利用しない。
- 陸域では 700 hPa より上空のデータを利用  
同様に、陸域の対流圏下層では QI による QC で除去しきれない、バイアスの大きなデータが存在するため、陸域では 700 hPa より下層のデータは利用しない。

<sup>1</sup> NOAA/NESDIS、米国航空宇宙局 (NASA)、米国ウィスコンシン大学により共同で運営されている。

<sup>2</sup> カナダ気象局や ECMWF では Dual-Metop AMV は MODIS 等の極域 AMV と静止気象衛星の AMV が利用できない北 (南) 緯 40°から 60°の緯度帯で利用されている。

<sup>3</sup> 気象庁では、EUMETSAT で開発された予報値チェックあり QI を QC に利用している。

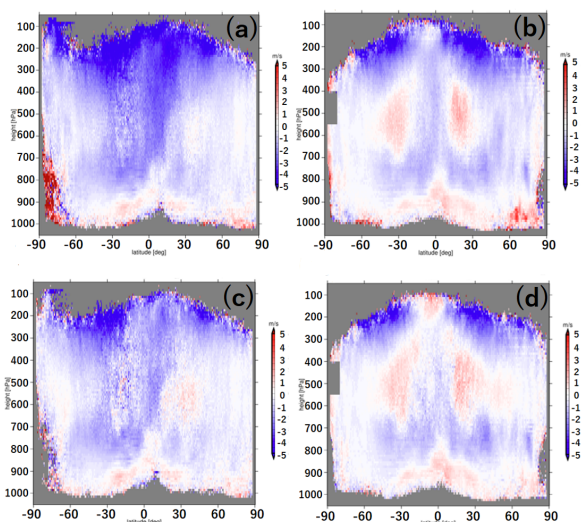


図 3.8.1 東西風速 U[m/s] の O-B 緯度帯平均。それぞれの図の縦軸は気圧高度 [hPa]、横軸は緯度 [°] である。(a)、(b) は予報値チェックあり QI 閾値 0 以上、(c)、(d) は予報値チェックあり QI 閾値 85 以上のデータの統計。(a)、(c) の統計期間は 2019 年 7 月 10 日から 2019 年 8 月 19 日、(b)、(d) の統計期間は 2019 年 12 月 10 日から 2020 年 1 月 31 日である。

なお、同じ領域に複数の極域 AMV が存在した場合、① MODIS、② LEOGEO<sup>4</sup>、③ Dual-Metop、④ AVHRR の順で優先してデータ同化に利用する。

### 3.8.5 Dual-Metop のデータ分布

図 3.8.2 に全球サイクル解析と全球速報解析<sup>5</sup>における極域 AMV のデータ分布を示す。全球サイクル解析では MODIS (灰色)、Dual-Metop (赤色) とともに多くのデータが観測データ打ち切り時間<sup>6</sup>に間に合うが、MODIS の優先度を Dual-Metop より高く設定しているため、Dual-Metop は MODIS による観測がない領域での利用となっている。一方、全球速報解析では観測データ打ち切り時間に間に合う MODIS は少ないが、多数の Dual-Metop が観測データ打ち切り時刻に間に合うため、Dual-Metop の利用により対流圏中層を中心に極域における AMV のデータ利用数が大幅に増加する。

### 3.8.6 Dual-Metop AMV 利用の影響評価

2020 年 9 月時点の現業に相当する全球数値予報システムから極域 AMV をすべて排除した実験 (CNTL) と、CNTL に Dual-Metop AMV を追加した実験 (TEST) を比較することにより他の AMV を利用しないという条件下で Dual-Metop AMV が全球数値予報システム

<sup>4</sup> 低軌道衛星 (LEO) と静止衛星 (GEO) の合成画像から算出される AMV。

<sup>5</sup> 気象庁のデータ同化システムの詳細については佐藤 (2011) を参照。

<sup>6</sup> 解析時刻からデータ同化処理を開始するまでの時間。

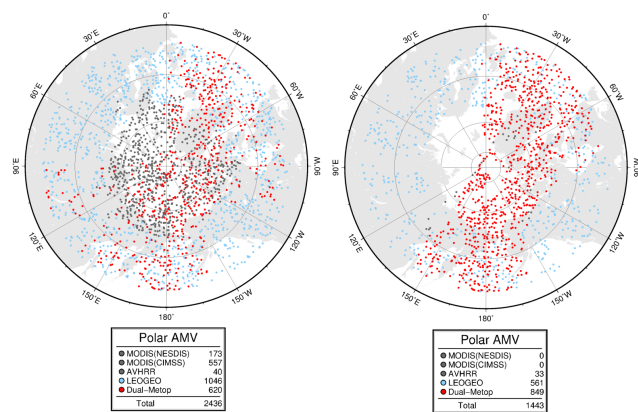


図 3.8.2 全球サイクル解析 (左図) 及び全球速報解析 (右図) における極域 AMV の利用状況。点は観測データの位置を表し、赤色、灰色、水色はそれぞれ、Dual-Metop、MODIS・AVHRR、LEOGEO による AMV を示す。解析時刻は 2020 年 7 月 1 日 00UTC。

に与える影響を調査した。統計検証期間は 2019 年 8 月と 2020 年 1 月である。

図 3.8.3 は 500 hPa のジオポテンシャル高度と 850 hPa の気温の平均解析場の TEST-CNTL の差分を示す。Dual-Metop AMV を利用することで北極域の対流圏中層を中心に西風を弱める変化が見られた。この変化によって、解析システム内の制御変数間の相関を通じて間接的に対流圏下層における南北の温度勾配が小さくなる方向に変化し、北極域では CNTL に比べて TEST の 850 hPa の気温が上昇し、500 hPa の高度が高くなった。これによって、ECMWF など、複数の海外数値予報センターの予測初期値との差が減少することを確認しており、極域における解析場の改善が示唆される結果である。

更に、Dual-Metop AMV の利用により、マイクロ波サウンダの輝度温度観測値と第一推定値の整合性の改善、及び海外数値予報センターの予測初期値を参照値とした予測精度検証において、極域における温度場や風速場の改善を確認した。

### 3.8.7 RTTOV 更新と合わせた業務化試験の結果について

Dual-Metop AMV の利用、及び第 4.5.2 項に示すように RTTOV 更新に関する変更の問題がないことが確認できたため、これら 2 つの変更を合わせて現業利用に向けた業務化試験を実施した。業務化試験では、2021 年 12 月時点の現業全球数値予報システムをベースにした実験をコントロール実験 (CNTL) とし、CNTL に Dual-Metop AMV の新規利用と RTTOV 更新の 2 つの開発成果を導入した実験をテスト実験 (TEST) とし、これらを比較することにより影響評価を行った。評価期間は、2020 年 7 月から 2020 年 9 月と 2020 年 12 月から 2021 年 2 月の夏冬それぞれ 3 か月間である。以下では業務化試験の主な検証結果について紹介する。

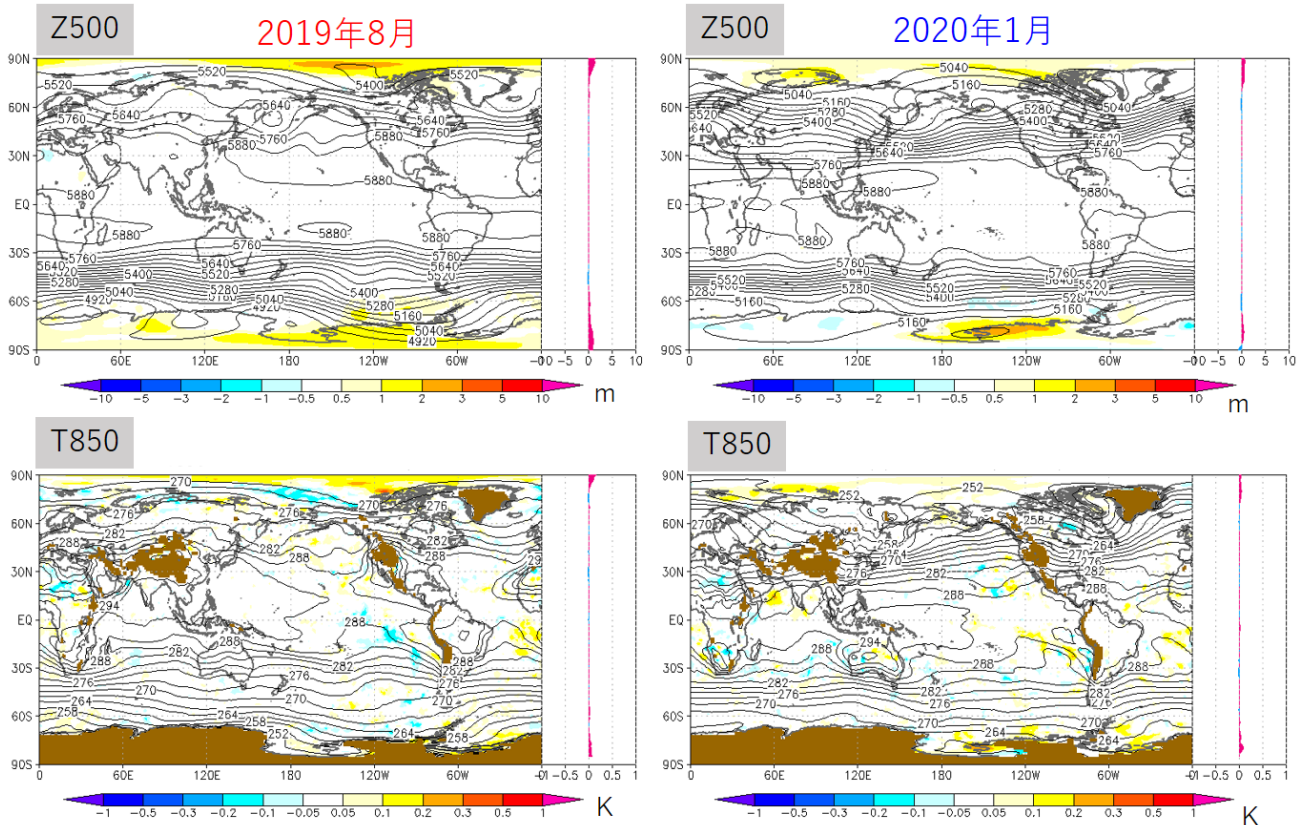


図 3.8.3 500 hPa のジオポテンシャル高度及び 850 hPa の気温の平均解析場の TEST-CNTL の差分。上段は 500 hPa のジオポテンシャル高度の差分、下段は 850 hPa の気温の差分であり、左列は夏実験、右列は冬実験の結果を示す。それぞれの図の右に帯状平均値を示している。

### (1) 予測初期値に対する予測精度の変化

図 3.8.4 に ECMWF と気象庁の予測初期値を参照値とした東西風予測場の二乗平均平方根誤差 (RMSE) の改善率を示す。どちらの予測初期値を参照値とした場合でも、南北高緯度領域において改善が確認できる。NCEP や UKMO など、他の複数の海外数値予報センターの予測初期値を参照値とした場合でも同様の結果が見られた。気温の予測場の RMSE の改善率についても同様に改善傾向であった。これらの改善は Dual-Metop AMV の利用、RTTOV 更新のそれぞれの性能評価試験で得られた実験結果との比較から主に Dual-Metop AMV 利用の効果であると考えられる。

### (2) 500 hPa のジオポテンシャル高度予測への影響

北半球の 500 hPa のジオポテンシャル高度予測に与える影響を図 3.8.5 に示す。観測データ利用の効果が大きい 1 日目予測では、統計的に有意な改善が見られる。2 日目予測以降に関しては、統計的に有意ではないが改善傾向となっている。南半球でも同様であるが、夏実験については 3 日目予測以降、統計的に有意ではないが改悪傾向であった。対ラジオゾンデ検証では中立であった。

### (3) 台風進路予測への影響

北西太平洋領域における台風進路予測の誤差統計検証結果を図 3.8.6 に示す。図から台風進路予測への影響は全体としては中立である。FT=120 以降の予測精度悪化は特定の事例の進路予測誤差の増大が影響していた。なお、他の海域の熱帯低気圧進路予測への影響について確認したところ、東太平洋域、大西洋域ではそれぞれ改悪、改善の傾向が見られた。今回の実験期間ではどちらの海域においても主に 30° N 以南の低緯度において熱帯低気圧の予測に変化が見られたが、高緯度域の Dual-Metop AMV の利用がこれらの熱帯低気圧に与える直接的な影響を確認することは出来なかった。

### (4) 予測改善の事例

図 3.8.7 に 2020 年台風第 4 号の進路予測の改善事例を示す。この事例では、上流にあたる北緯 50 度付近のトラフ周辺で Dual-Metop AMV が利用されたことで、TEST の予測では CNTL に比べて中国東北部付近のトラフの東進速度が速くなった。その結果、図に示す日本海を通過して北東進する地上低気圧が上空のトラフの影響を受ける時刻が早ることによって地上低気圧の東進速度が加速され、より現実に近い進路予測となった。



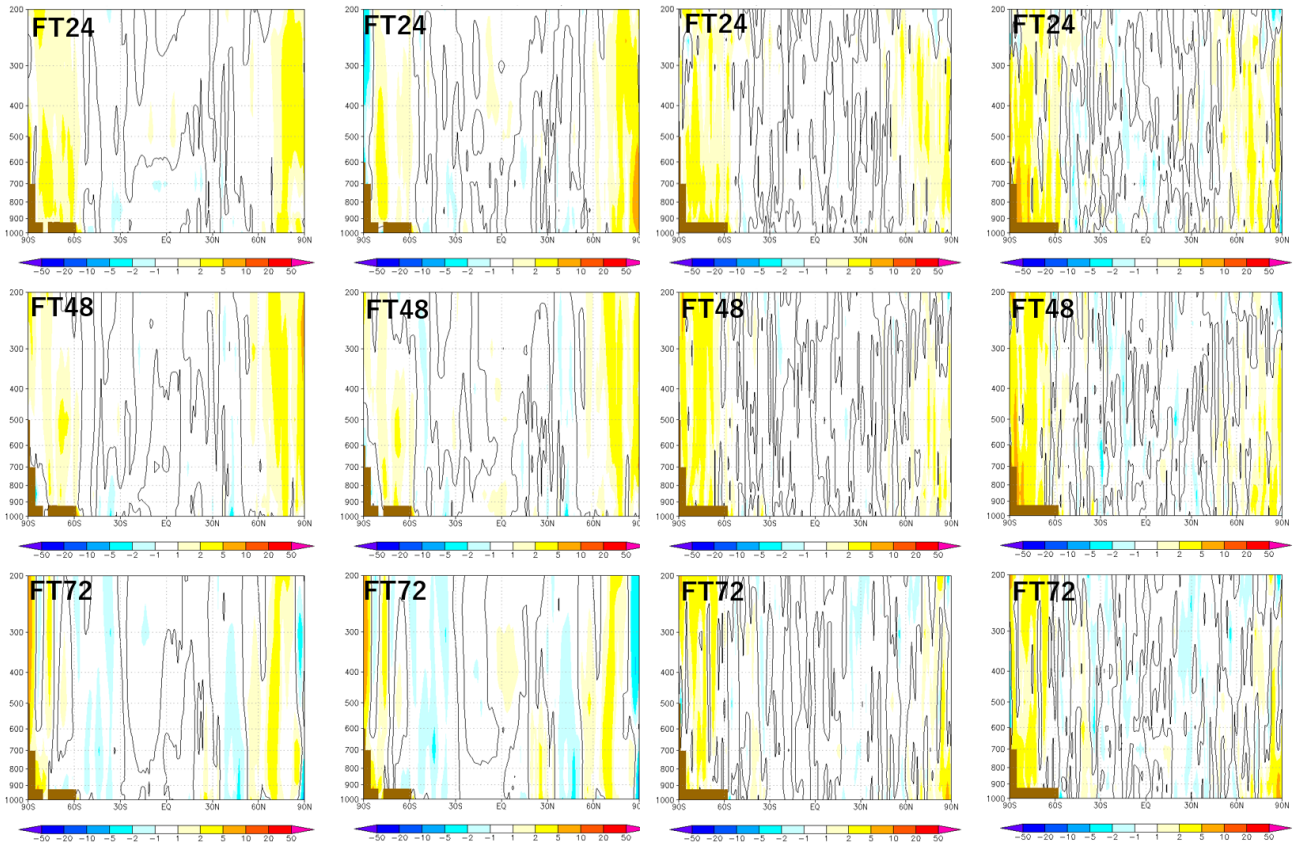


図 3.8.4 予測初期値を参照値とした東西風予測場の RMSE 改善率 [%] の緯度帯平均。それぞれの図の縦軸は気圧 [hPa]、横軸は緯度 [°] である。左側の 2 列は 2020 年 7 月から 9 月、右側の 2 列は 2020 年 12 月から 2021 年 2 月の 3 か月平均の対初期値検証の図であり、それぞれのパネルの左は ECMWF、右は JMA の予測初期値を参照値としている。上から 1 段目、2 段目、3 段目はそれぞれ、1 日目、2 日目、3 日目の予測精度の変化を示す。暖色系は改善、寒色系は改善を示す。

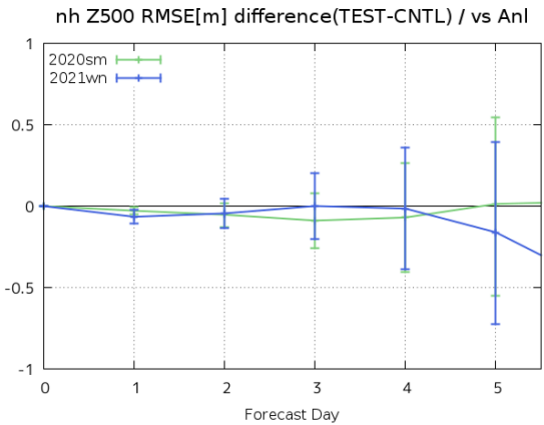


図 3.8.5 全球解析値を参照値とした、北半球の 500 hPa のジオポテンシャル高度予測精度の変化。縦軸は RMSE の TEST-CNTL の差分 [m]、横軸は予測時間 [日] である。青線は冬実験、緑線は夏実験を示す。エラーバーは有意検定 95%信頼区間を示している。

### 3.8.8 まとめと今後

MODIS や AVHRR による極域 AMV の配信終了が予定されていることから、全球解析で利用する極域 AMV を速やかに補充する必要があるため、極域において Dual-Metop AMV を利用する開発を進めてきた。

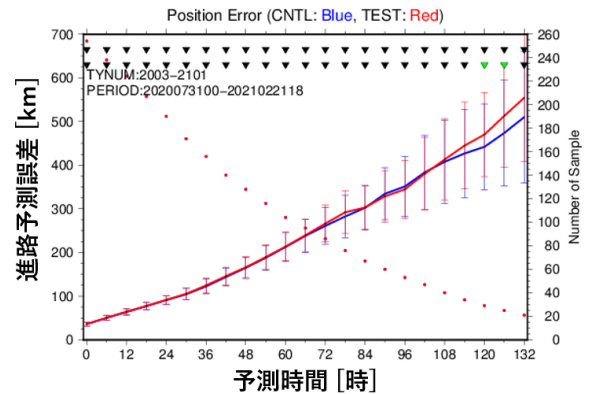


図 3.8.6 北西太平洋領域の台風進路予測の気象庁ベストトラックに対する誤差。青線は CNTL、赤線は TEST、赤点はサンプル数を示す。エラーバーは誤差の発生が正規分布に従うと仮定した場合の 95%信頼区間を表す。CNTL、TEST 両実験で熱帯低気圧の中心位置を追跡出来たものだけを検証サンプルとしている。左の縦軸は、進路予測誤差 [km]、右の縦軸はサンプル数である。図上部の▽は予測誤差の差の統計的な有意性を示すもので、上段が時間方向の相関を考慮した場合、下段は時間方向の相関を考慮せず独立と仮定した場合の有意判定結果を示し、緑は統計的に有意であること、黒は統計的に有意ではないことを示す。夏実験期間、冬実験期間に含まれるサンプルを統計対象としている。

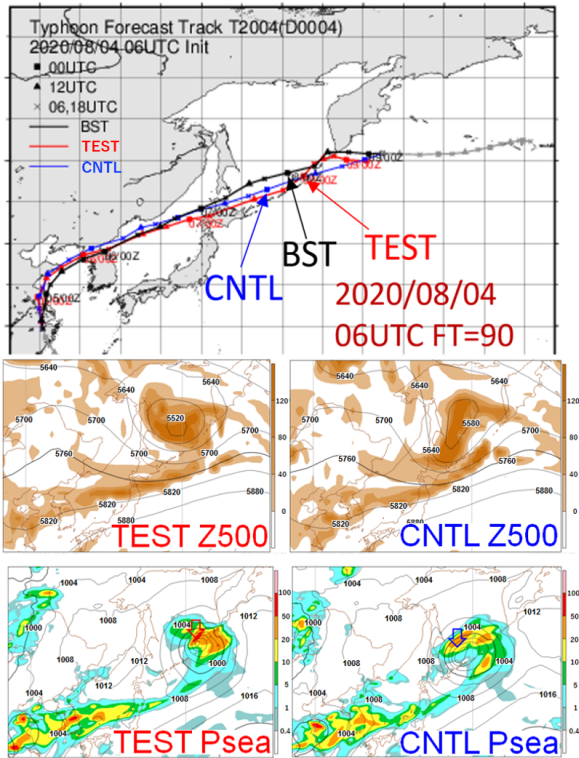


図 3.8.7 2020 年 8 月 4 日 06UTC 初期値における 2020 年台風第 4 号の 90 時間後の予測の比較。上段は TEST (赤線) と CNTL (青線) の進路予測を示している。BST (黒線) は気象庁ベストトラックである。中段は 500 hPa の FT=90 におけるジオポテンシャル高度 (等値線, 単位:m) と渦度 (カラー, 単位: $s^{-1}$ ) の予測、下段は海面更正気圧 (等値線, 単位:hPa) と前 6 時間降水量 (カラー, 単位:mm) の予測を示す。矢印は台風中心位置を示す。中段、下段ともに左は TEST、右は CNTL である。

また、第 4.5.2 項に示すように RTTOV を更新する開発を進めてきた。これら 2 つの開発を合わせて業務化試験を実施したところ、それぞれの個別の性能評価試験で得られたインパクトを反映し、想定通り全球数値予報システムの予測精度を向上させる結果が得られたため、2022 年 6 月に全球解析での現業利用を開始した。

極域衛星風については、さらなるデータ拡充を目指し、Suomi-NPP や NOAA20 に搭載されている VIIRS による極域 AMV の利用に関する開発を進めている。

#### 参考文献

- EUMETSAT, 2016: AVHRR L2 Wind product ATBD. Tech. rep. <https://www.eumetsat.int/media/44490/>.
- Eyre, JR, 1991: A fast radiative transfer model for satellite sounding systems. *ECMWF Tech. Memo* 176.
- 佐藤芳昭, 2011: 概論. 数値予報課報告・別冊第 57 号, 気象庁予報部, 1-6.
- 山下浩史, 今井崇人, 2007: 大気追跡風 (AMV). 数値予報課報告・別冊第 53 号, 気象庁予報部, 36-56.