

## 4.12 波浪モデル

### 4.12.1 はじめに

現在、気象庁では波浪注意報・警報のための基礎となる波浪予測を行うための決定論波浪モデルとして、全球波浪モデル (GWM) と沿岸波浪モデル (CWM) を運用している (竹内ほか 2012)。これら波浪モデルの精度向上に向け、気象庁では GWM の  $0.5^\circ$  (約 55km) から  $0.25^\circ$  (約 27km) への水平解像度高解像度化と、264 時間先までの延長予報の頻度を 1 日 1 回 (12UTC 初期値) から 1 日 2 回 (00, 12UTC 初期値) に増強するための開発を行ってきた。前者は、「波浪モデルは、沿岸域などの高波をより精緻に表現するため、高解像度化などによる改善を図っていく必要がある」とした「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」に示された目標の一つである。

2022 年度にはこれらの開発課題について業務化試験と精度検証を実施した。その結果、高解像度化により島嶼・海峡等の周辺での波高表現に改善が認められたこと等を踏まえ、2023 年 1 月末にこれらの改善を現業化予定である。本節では、これらの改善について報告する。

### 4.12.2 改良項目概要

2022 年度の波浪モデルの改良項目の概要について以下に述べる。

#### (1) GWM の高解像度化

GWM の水平解像度をこれまでの  $0.5^\circ$  (約 55km) から  $0.25^\circ$  (約 27km) に高解像度化する。これにより島嶼、海峡等の海陸分布がより現実的に表現できるようになる (図 4.12.1)。

#### (2) 延長予報の頻度増強

GWM ではこれまで 12UTC 初期時刻のみ 264 時間の延長予報を実行しており、他の初期時刻 00, 06, 18UTC では予測時間は 132 時間であったが、00UTC 初期時刻も GSM の 264 時間延長予報が利用可能であることから、これを用いて 00UTC の GWM についても 264 時間予測を行う。

### 4.12.3 業務化試験の結果

#### (1) GWM の高解像度化

2021 年 6 月 20 日～10 月 11 日を夏実験期間、2021 年 11 月 20 日～2022 年 3 月 11 日を冬実験期間として業務化試験を実施した。本節ではこの業務化試験結果を TEST と呼ぶ。コントロール実験 (CNTL) としては現業 GWM 予測結果を用いた。業務化試験の精度確認のため、衛星波高観測を真値とみなした有義波高の対観測検証を行った。各予測対象時刻での全球域、日本近海の Scatter Index<sup>1</sup>は、図 4.12.2 の通り暖候期、寒

<sup>1</sup> Scatter Index は誤差の標準偏差を観測平均値で正規化した指標。波浪モデル検証で良く用いられる指標であり、WMO

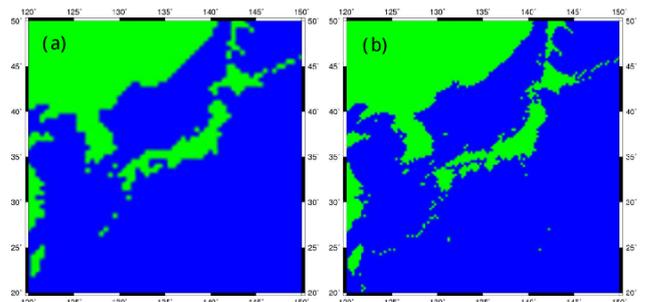


図 4.12.1 GWM の日本付近の海陸分布。(a) 現行 GWM (水平解像度  $0.5^\circ$ )、(b)  $0.25^\circ$  GWM。緑は陸、青は海格子。

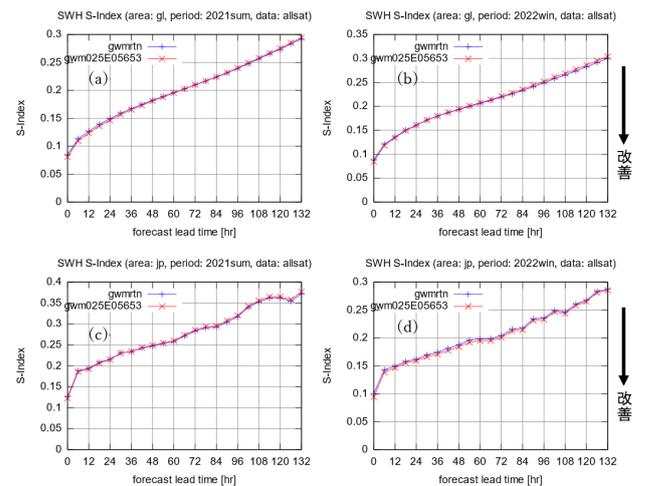


図 4.12.2 GWM 対衛星観測検証 Scatter Index。図中、青は CNTL ( $0.5^\circ$  GWM)、赤は TEST ( $0.25^\circ$  GWM)。(a) 全球 (極域除いた  $75^\circ\text{S} \sim 75^\circ\text{N}$ ) 暖候期 (2021 年 6～10 月)、(b) 全球 寒候期 (2021 年 11 月～2022 年 3 月)、(c) 日本近海 ( $120 \sim 150^\circ\text{E}$ 、 $20 \sim 50^\circ\text{N}$ ) 暖候期、(d) 日本近海 寒候期

候期いずれも CNTL に対してほぼ中立であった。

Scatter Index の平面分布 (図 4.12.3) を確認したところ、日本周辺、東南アジア、南太平洋、中米の島嶼部等 (図 4.12.3(c) 中の緑枠の領域) で Scatter Index が低下しており、高解像度化によって島等による波浪の遮蔽の表現が改善されたと考えられる。

事例検証でも高解像度化により波浪の表現が改善されている事例を確認した。図 4.12.4 に 2021 年 9 月 10 日 06UTC を初期時刻とした GWM の 24 時間予測での波高を示した。CNTL では解像度の制約から先島諸島や久米島等が表現されておらず、そのため太平洋から東シナ海に波浪が高いまま伝わる予測となっていた (図 4.12.4(a))。衛星観測の波高 (図 4.12.4 中丸で示された点) と比較すると、CNTL では東シナ海にて約 2m の波高を予測しており観測波高約 1.5m に対して過大傾向であった (図 4.12.4(a) 中、赤丸で囲んだ領域)。一方、TEST では高解像度化により地形がより正確に表現されるようになったことから、東シナ海での波高予

国際波浪予報相互比較でも用いられている。

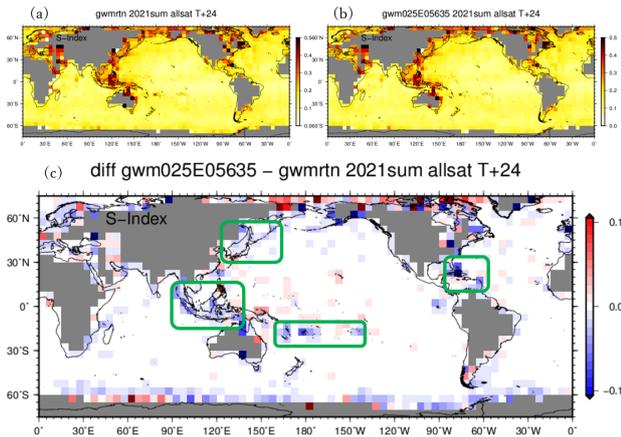


図 4.12.3 GWM 暖候期 24 時間予測 対衛星観測検証 Scatter Index。(a) CNTL (0.5°GWM)、(b) TEST (0.25°GWM)、(c) TEST-CNTL 差。青が TEST での改善を示す。

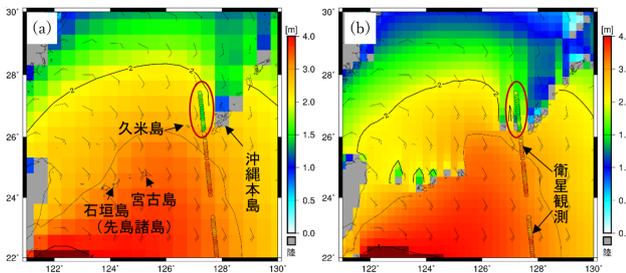


図 4.12.4 南西諸島周辺での GWM 24 時間予測波高 (単位 [m])。(a) CNTL、(b) TEST。初期時刻は 2021 年 9 月 10 日 06UTC。図中の丸は衛星による波高観測値。灰色の格子は波浪モデルでの陸を示す。台湾の南東に 2021 年台風第 14 号が存在している。

測も衛星観測と整合する結果となった (図 4.12.4(b))。

## (2) 後続モデル (沿岸波浪モデル、波浪アンサンブル) の影響評価

GWM 自体の評価に加えて、GWM を側面境界条件として用いる CWM、全球波浪解析を初期値として用いる波浪アンサンブル予報システム (WENS) についても、GWM 高解像度化に伴う影響の評価を行った。ここでのコントロール実験 (CNTL) はそれぞれ現業 CWM、現業 WENS である。CWM の CNTL と TEST の差はバイアス、Scatter Index いずれでも小さく、精度は中立であることを確認した (図略)。WENS についてはコントロールラン、アンサンブル平均についてバイアス、Scatter Index 等のスコアで比較して、TEST は CNTL に対しほぼ中立であることを確認した (図略)。

## (3) 延長予報の頻度増強

264 時間予測の統計検証を 00,12UTC 初期時刻それぞれに対して行い、00UTC-12UTC 間の差を確認した (図 4.12.5)。00UTC 264 時間予測の精度 (図 4.12.5 中、橙色線) は 12UTC (図 4.12.5 赤線) と同等であることを確認した。

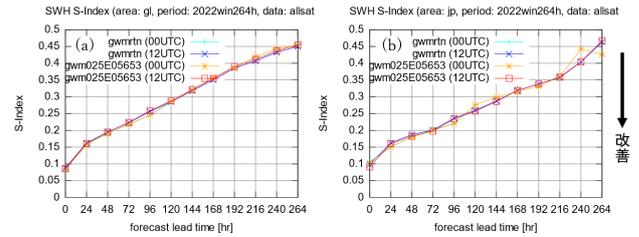


図 4.12.5 GWM 寒候期 264 時間予測の Scatter Index。(a) 全球、(b) 日本近海。図中、水色は CNTL 00UTC、青は CNTL 12UTC、橙色は TEST 00UTC、赤は TEST 12UTC のスコア。CNTL 00UTC は 132 時間まで。

## 4.12.4 まとめ

2022 年度に GWM の高解像度化および延長予報の頻度増強の開発を行い、業務化試験を実施した。統計検証の比較では概ね中立だが、地形が高解像度化されることで島嶼・海峡等の周辺での波高表現に改善が認められた。GWM の後続の CWM、WENS についても影響評価を行い、精度は概ね中立であった。また、延長予報の頻度増強については、今回追加予定の 00UTC 延長予報は 12UTC と同様の精度であることを確認した。これらの結果を踏まえ、GWM 改善の現業化を 2023 年 1 月末頃に行う予定である。

また、今後は GWM に引き続いて CWM の水平高解像度化による予測精度改善等に取り組む予定である。

## 参考文献

竹内仁, 高野洋雄, 山根彩子, 松枝聡子, 板倉太子, 宇都宮忠吉, 金子秀毅, 長屋保幸, 2012: 日本周辺海域における波浪特性の基礎調査及び波浪モデルの現状と展望. 測候時報, 79, S25-58.

#### 4.13 高潮モデル

2022年度、高潮モデル関連では第3章で報告したように

- 日本域高潮モデルの予報時間延長（第3.5節）
- 日本域台風時高潮確率予報システムの導入（第3.6節）
- アジア域高潮アンサンブル予報システムの導入（第3.7節）

の改善を8～9月にかけて行った。

その後は台風ボーガス手法の改善等に取り組んでいる。日本域高潮モデル、アジア域高潮EPS共に、GSMやMSM等大気モデルの解析・予測の風・気圧場で駆動するが、台風中心付近には台風予報に基づく台風ボーガス手法で作成したパラメトリックな風・気圧場を埋め込んでいる。この際、大気モデル中の台風予測位置と熱帯低気圧情報での台風位置が大きく異なる場合には、あたかも台風が二つ存在するような気象場になることがありえる。これを避けるために vortex relocation (Kurihara et al. 1993, 1995) と呼ばれる手法の利用を検討している。この手法では、大気モデルの風・気圧等の場に対してフィルタ処理等を適用し台風を除去した後、台風ボーガスを埋め込む。これにより上述のような偽の二つ玉台風ができるのを防ぐことができる。現在この手法を高潮モデルの台風ボーガスに導入するための開発を進めているところである。

他には次期スーパーコンピューターシステム上での高潮モデル改善に向けて、水平高解像度化、高速化等の開発も進めている。

#### 参考文献

- Kurihara, Y., M.A. Bender, and R.J. Ross, 1993: An Initialization Scheme of Hurricane Models by Vortex Specification. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 2030–2045.
- Kurihara, Y., M.A. Bender, R.E. Tuleya, and R.J. Ross, 1995: Improvements in the GFDL Hurricane Prediction System. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 2791–2801.

## 4.14 日本沿岸海況監視予測システムの開発

### 4.14.1 はじめに

数値予報課では、日本周辺の詳細な海況・海水情報提供のため令和2年10月から日本沿岸海況監視予測システム（以下、JPNシステム）を現業運用している（JMA 2022）。現在、海面高度偏差（SLA: Sea Level Anomaly）同化での高度計衛星 Sentinel-3A/B、HaiYang-2B の追加、領域平均 SLA 補正値の診断手法変更、海洋モデル更新（時間積分スキーム変更や NuSDaS 直接出力など）と、北海道野付湾の定着氷の流出軽減のための実利的な対処を計画している。今般、これらの変更を合わせた JPN システム業務化試験（遅延解析、速報解析、予測実験）を行った。ここでは、その概要を報告する。

### 4.14.2 改良・変更項目

解析システムと予測モデルに対する改良・変更項目の概要は、以下の通りである。

#### 解析システムの改良

- SLA 同化で利用する高度計衛星として Sentinel-3A/B、HaiYang-2B を追加（現ルーチンでは Cryosat-2、Jason-3、SARAL を利用）
- 海水質量変動等に対応する領域平均 SLA 補正値を直近の観測データによって診断（現ルーチンでは、再解析実験で使用した月別補正値を時間外挿して求めた値を利用しており、現実の値との乖離が懸念された）

#### 予測モデルの改良

- 使用している予測モデルのバージョンを現在の MRI.COM v4.6 から v5.0 に上げる。これにより、時間積分スキームとして3次の Leap-frog Adams-Moulton 法 (LFAM3) を採用することが可能となり、予報モデルの実行時間が現ルーチンと比較して約 42%短縮される。また、従来はモデル出力 (4byte バイナリ) を後処理で NuSDaS に変換していたが、モデル実行時に NuSDaS を直接出力することで後処理ジョブが不要となり、維持管理コストを下げると共に、当該ジョブにかかっていた実行時間（約3分）が短縮される。
- 日本近海モデルの海水予測において、北海道野付湾の定着氷の流出軽減のための実利的な対処（粘性増加）を導入

### 4.14.3 試験結果

2021年6月～2022年7月を対象期間として、JPNシステムの遅延解析、速報解析、予報の業務化試験（以下、TEST）を実行した。対照実験（CNTL）として現行のルーチン結果を使用したところ、TESTはCNTLに対して以下の改善および特性の変化が見られた。

- SLA 同化で利用する高度計衛星の追加によって、TESTでは観測データ数が適切に増えることが確

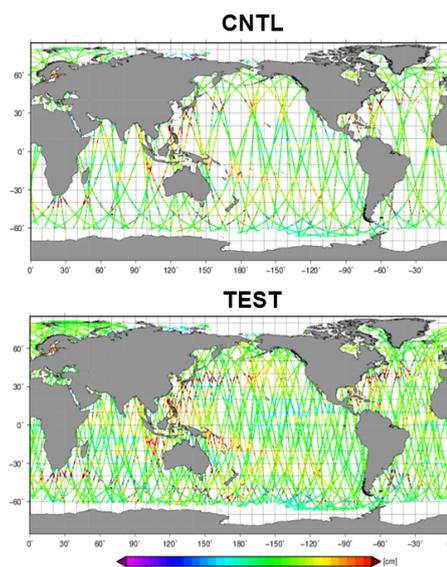


図 4.14.1 SLA 同化で利用する高度計衛星の観測値（2022年7月21日）：（上）CNTL、（下）TEST。線は衛星の軌道、色は SLA[cm] を表す。

認できた（図 4.14.1）。

- 北海道野付湾での粘性を増加させることで、定着氷の流出が多少軽減した（図 4.14.2）。
- 現場観測水温を真値とする速報解析の精度検証の結果、100m 深水温の月別 RMSE 時系列での TEST の改善傾向が確認できた（図 4.14.3）。また、鉛直プロファイルで比較すると、100m 以深でも改善しており、領域平均 SLA 補正値の診断方法変更が寄与していると推測された（図省略）
- 10日予測値の 100m 深水温に対する対現場観測検証の結果、TEST では初期値改善によってバイアスの絶対値と RMSE が改善していることを確認できた（図 4.14.4）。なお、日本近海モデルでは概ね中立の結果であった（図省略）。
- 10日予測値の対現場観測検証による鉛直プロファイル（北太平洋全域平均）を比較すると、6月・12月ともに概ね 100m 以深の低温バイアスが TEST で改善されていることが確認できた（図 4.14.5）。
- 対初期値による統計検証では、黒潮続流域・北太平洋全域ともにバイアスや RMSE に寄与するような変化傾向が見られず、CNTL と TEST で共通した海洋前線上の誤差成長が見られた（図省略）。この結果は、10日目まで現場観測に対して見られた予測の改善には、予測モデル更新よりも解析システムの改良が寄与していることを示唆している。

### 4.14.4 まとめ

JPN システムに対して、SLA 同化での高度計衛星の追加、領域平均 SLA 補正値の診断手法変更、海洋モデル更新と、北海道野付湾の定着氷の流出への対処を行った結果、現ルーチンと比べて同程度以上の精度で

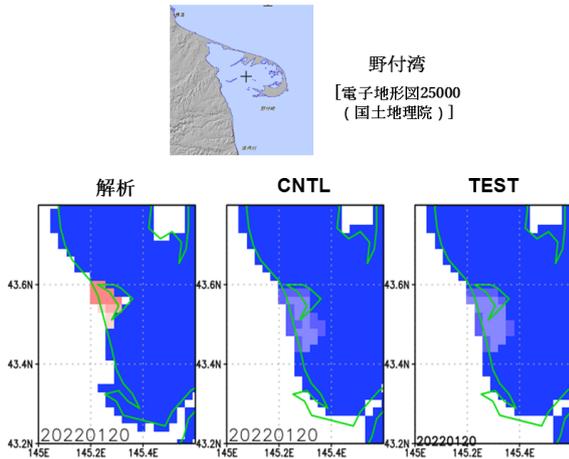


図 4.14.2 北海道野付湾における海水密度度の3日予測値 (2022年1月20日を対象): (左) 海水解析、(中) CNTL、(右) TEST。色は密度度 [0-1] を表す。

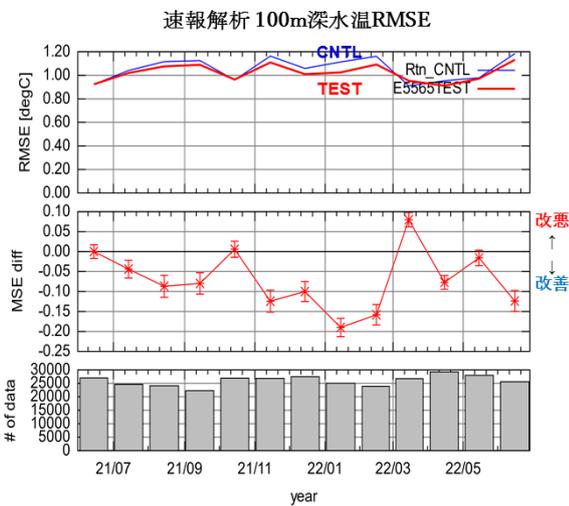


図 4.14.3 JPN システム速報解析の対現場観測検証: 100m 深水温度の月別 RMSE 時系列 (2021年6月~2022年6月): 北太平洋全域平均に対する (上) RMSE (青が CNTL、赤が TEST)、(中) MSE の差 (TEST - CNTL)、(下) 検証データ数。

あることが確認され、また計算コストを低減することで将来の開発へ向けた資源も確保できた。このことから、上記の改良の現業化を令和4年度中に行う予定である。

#### 参考文献

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, 246 pp., Available online at <https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline2022-nwp/index.htm>.

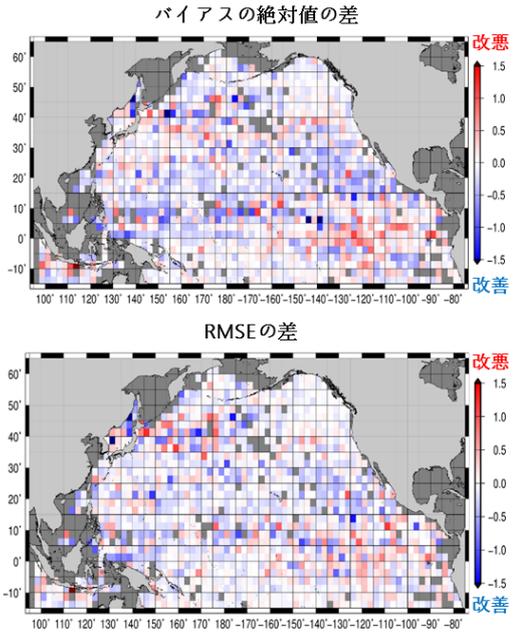


図 4.14.4 JPN システム 10 日予測値の対現場観測検証 (100m 深水温度): (上) 各メッシュ (2.5 度× 2.5 度) 内平均バイアスの絶対値の差 (TEST - CNTL)、(下) RMSE の差 (TEST - CNTL)。図中の青色は TEST が改善傾向であることを示す。

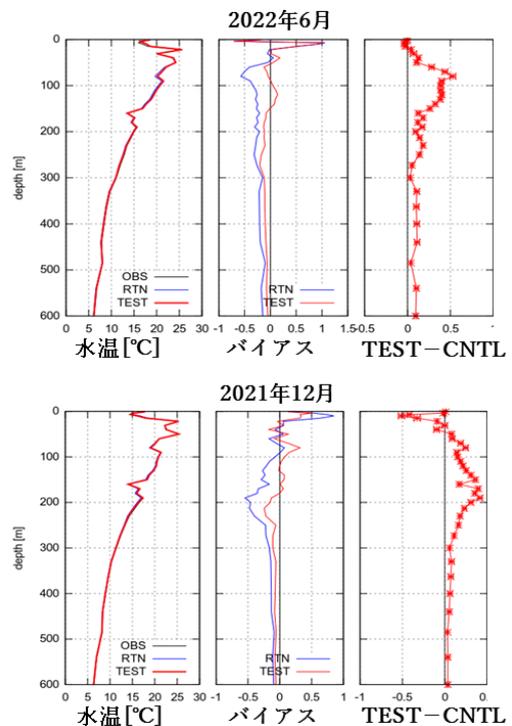


図 4.14.5 JPN システム 10 日水温予測値 対現場観測 バイアスプロファイル (北太平洋全域平均): (上) 2022 年 6 月、(下) 2021 年 12 月の結果。黒線は観測、青線は CNTL、赤線は TEST を示す。

## 4.15 物質循環システムの開発

### 4.15.1 高解像度版領域化学輸送モデルへのデータ同化導入

はじめに

当庁の大気汚染気象予報業務のため運用・開発している大気汚染気象予測システムにおいては、アジア域を対象とした領域化学輸送モデル（20km 版モデル）、東日本～西日本域を対象とした高解像度版領域化学輸送モデル（5km 版モデル）の2つのモデルを運用している（JMA 2022）。現在、維持管理の効率化等のため、20km 版モデルの機能をカバーできるよう5km 版モデルを整え、5km 版モデルに一本化することを計画している。具体的には、5km 版モデルにおいて

1. 20km 版モデルと同様のデータ同化手法導入
2. 計算領域の拡張
3. 境界値について20km 版モデルから全球化学輸送モデルへの切り替え

を行う（図 4.15.1、図 4.15.2）。今般、上述の1を実施し業務化試験を行った。ここでは、その概要を報告する。

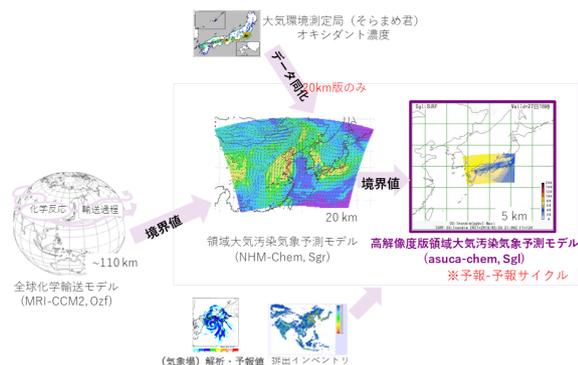


図 4.15.1 5km 版モデルへ一本化する前の大気汚染気象予測システム概念図：5km 版モデルではデータ同化は行わず、東日本～西日本のみを対象として予測を行い、境界値は20km 版モデルから与えられる。

#### 変更項目

5km 版モデルに導入したデータ同化手法は、20km 版モデルと同じくナッジングである。観測値は12UTCから18UTCの環境省大気汚染物質広域監視システム（そらまめくん）による地上オゾン濃度を同化に用いた。なお、ナッジング計算は各モデル格子点上で行われるため、あらかじめ観測値も測定局数を分母とする算術平均で格子点値化しておく。

#### 試験結果

2019年4月から5月の春季と2019年6月から9月の夏季を対象期間として、5km 版モデル（2022年3月時点の現業システム）を利用した予報-予報サイクルの対照実験（CNTL）と5km 版モデルに20km 版モデルと同様のナッジング処理を追加した予報実験（TEST）

を業務化試験として実施した。検証用観測値は、同化に使用していない時間帯のそらまめくんによる地上オゾン濃度とした。その結果、TESTはCNTLに対して以下のような特徴が見られた。

- 前日20時（JST）過ぎまで高濃度が持続し夜遅くに濃度が低下した2019年5月28日の事例では、不自然な高濃度領域が発生していない（図 4.15.3）。
- 測定局別の検証では、RMSEはFTの小さい範囲では改善したが、概ね12時間予報以降は改善の効果が小さくなっていった（図 4.15.4）。
- 府県予報区別の検証では、日中に最も濃度が上昇する時間帯である13-15時（JST）を対象に120 ppb以上、80 ppb以上を閾値としてスレットスコアを算出した。一部改善がみられる地域もあったが、スレットスコアは春季、夏季とも概ね中立の結果であった（図 4.15.5）。

#### まとめ

20km 版モデルと同様のデータ同化手法を5km 版モデルに適用する業務化試験を行った結果、予測精度は予測時間の短い範囲では改善した。改善の効果は予測時間が長くなるにつれて小さくなり、現業で着目する日中（16～18時間予報）では中立であった。改善とは言えないものの5km 版モデルへのデータ同化導入について問題ないことが確認されたことから、大気汚染気象予測システムの5km 版モデル一本化への第一段階として、この改良の現業化を2022年6月16日に実施した。

### 4.15.2 高解像度版領域化学輸送モデルの領域拡張と境界値変更

はじめに

第4.15.1項で述べた通り、現在、ルーチンシステム維持管理の効率化等のために大気汚染気象予測システムのモデル一本化を計画しており、次の開発ステップとして、20km 版モデルの役割を担えるよう5km 版モ

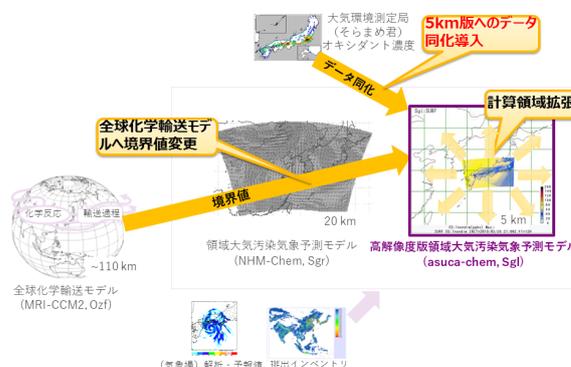


図 4.15.2 5km 版モデルへ一本化した後の大気汚染気象予測システム概念図：20km 版モデルと同様のデータ同化手法を5km 版モデルに適用し、計算領域を拡張して、全球化学輸送モデルから境界値を与える。

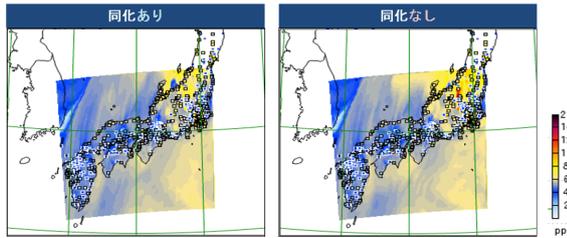


図 4.15.3 2019 年 5 月 28 日 15UTC (2019 年 5 月 28 日 12UTC 初期値) での TEST (左図)、CNTL (右図) の地上オゾン濃度 (陰影) 解析値及びそらまめくん観測値 (四角)。

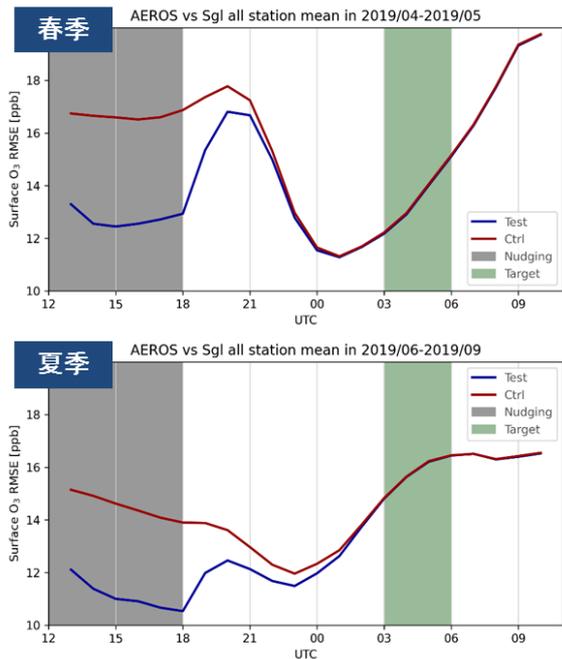


図 4.15.4 計算領域に含まれる 1016 測定局における地上オゾン濃度測定局別 RMSE の全国平均値: (上段) 春季、(下段) 夏季。赤線が CNTL、青線が TEST の結果。12-18UTC はナudging期間 (TEST のみ)、03-06UTC はカテゴリ検証対象期間を示す。

デルの計算領域を拡張し、5km 版モデルに必要な境界値を 20km 版モデルに替わって全球化学輸送モデルから与える必要がある。今般、それらの改良及び排出インベントリやモデルの改良を適用した業務化試験を行った。ここでは、その概要を報告する。

### 変更項目

5km 版モデルの改良について、予測結果に影響する変更項目は以下のとおり。

- 領域拡張：東日本～西日本域を対象とした計算領域から、大気汚染気象予報業務に必要な地域及び大気汚染物質の排出源となる大陸を含む計算領域へと拡大する (図 4.15.6)。
- 境界値変更：境界値を与えるモデルを 20km 版モデルから全球化学輸送モデルに変更する。

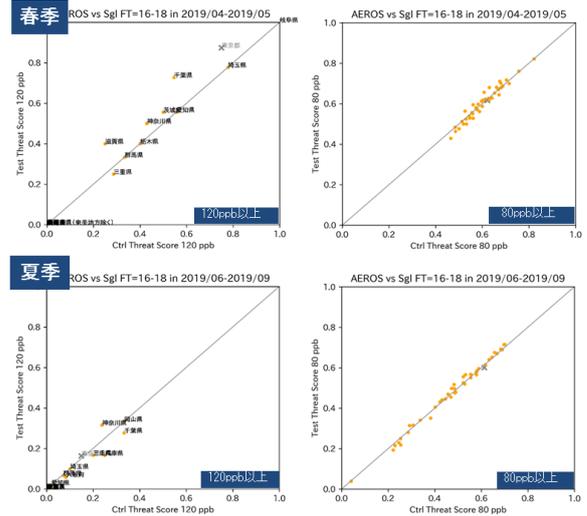


図 4.15.5 (上段) 春季と (下段) 夏季の地上オゾン濃度府県予報区別最大値に対する 120ppb 以上 (左図)、80ppb 以上 (右図) のスレットスコア: 縦軸は TEST、横軸は CNTL を示し、左上にプロットされている府県は改善を意味する。各府県予報区に含まれる格子点値及び観測値 (1 時間値) のうち最大の値を府県予報区別最大値とした。なお、東京都は府県予報区で島嶼部が含まれ特殊な処理を必要とするため検証対象外とした。

- 排出インベントリ変更：アジア域排出インベントリ REAS の更新 (バージョン 2.1 から 3.2.1: Kurokawa and Ohara (2020))、全球火災排出データベース GFED の更新 (バージョン 3 から 4: Randerson et al. (2018))、東アジア大気汚染物質排出量グリッドデータベース EAGrid (Kannari et al. 2007; 福井ほか 2014) の利用高度化 (週日値のみの利用から週日/週末値の利用) を行う。
- モデル更新：MPI 計算領域分割の袖領域における値の更新タイミングの修正、鉛直渦拡散係数の修正、エーロゾル熱力学平衡計算の省略、エーロゾル関連パラメータの変更 (エーロゾルの粒子半径と標準偏差、草地、低木地のダスト排出量) を行う。
- その他：出力の高速化、メモリ使用量の削減などを実施する。計算領域の格子点数が約 8 倍となるため、予報計算に必要な計算資源は現行の 16 ノード × 15 分から 40 ノード × 45 分に増加する。

### 試験結果

業務化試験として、前述の改良を適用した 5km 版モデルの予測実験 (Sgl.TEST) を実施した。対照実験は 5km 版モデル (Sgl.CNTL) と 20km 版モデル (Sgr.CNTL) の現業の実行結果とした。検証対象期間は 2022 年 4 月から 9 月とし、そらまめくんによる地上オゾン観測値に対して検証を行った。なお、2022 年 6 月 15 日以前の初期日の Sgl.CNTL には、地上オゾン観測値同化 (ナudging) の導入が未適用である。その影響が見られるのは予報初期のみで、それ以降の予

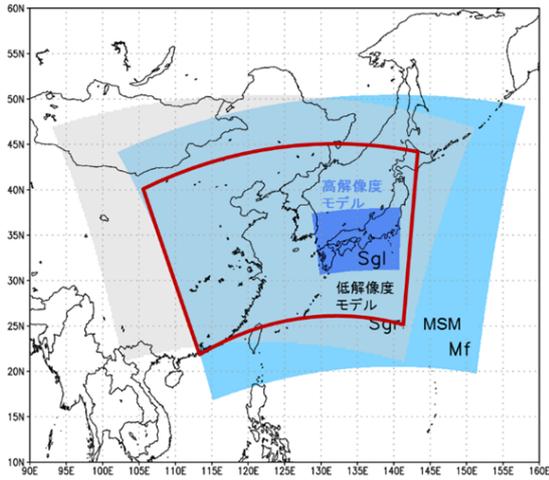


図 4.15.6 領域拡張後の 5km 版モデルの計算領域（赤枠）。塗りつぶした領域は 20km 版モデル（灰色）、現行の 5km 版モデル（濃い青色）、5km 版モデルの入力となるメソモデル（薄い青色）。

報時間（夏期間）では Sgl\_TEST と Sgl\_CNTL の実験結果の違いは前項の改良による影響が支配的である。Sgl\_TEST は Sgl\_CNTL と Sgr\_CNTL に対して以下のような特徴が見られた。

- 関東地方でスモッグ気象情報が発表された 2022 年 6 月 30 日の事例では、Sgr\_CNTL の予測は観測に対して過少であるのに対して、Sgl\_CNTL と Sgl\_TEST では高濃度を予測した（図 4.15.7）。総じて高濃度事例では、Sgl\_CNTL と同等の分布を予測できていた。
- 統計検証では対照実験に対し予測精度は概ね中立であった（春期間は改善（図 4.15.8）、夏期間は中立からやや改悪（図 4.15.9））。春期間の夜間では、Sgl\_TEST は Sgl\_CNTL より RMSE が概ね減少し改善した。夏期間の日中では、都市内陸部で Sgr\_CNTL より過大予測傾向が強まり、都市沿岸部で Sgl\_CNTL より過少予測傾向が弱まる特性変化が見られた（図省略）。

まとめ

20km 版モデルの役割を担えるよう 5km 版モデルの計算領域を拡張し、境界値を全球化学輸送モデルから与える業務化試験を行った結果、20km 版モデルや現行の 5km 版モデルに対して予測精度は概ね中立であり、スモッグ気象情報の発表がされるような顕著事例では現行の 5km 版モデルと同等、20km 版モデルに対しては改善が見られた。このことから、上記の改良の現業化を 2022 年度中に行う予定である。

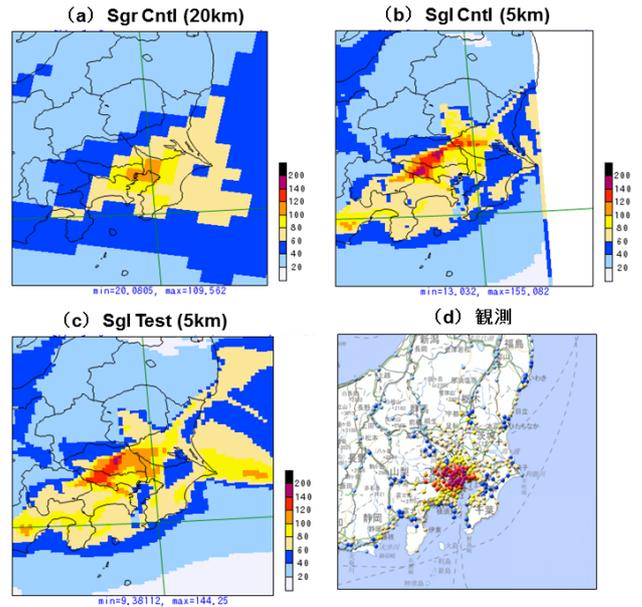


図 4.15.7 2022 年 6 月 30 日 15 時 (JST) の地上オゾン濃度分布の 18 時間予測値と観測値：(a) Sgr\_CNTL、(b) Sgl\_CNTL、(c) Sgl\_TEST、(d) 観測値（データはそらまめくん、地図の出典は「地理院タイル」）。

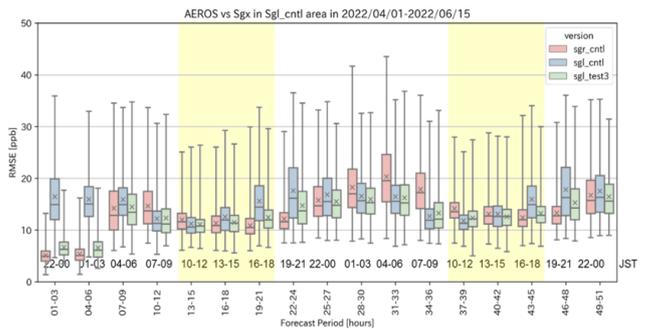


図 4.15.8 春期間（2022 年 4 月 1 日～6 月 15 日初期日予測）の地上オゾン濃度予測の RMSE（3 時間毎）。横軸は予報時間で、図中には対象時刻の JST と日中を表す黄色の塗りつぶしも示す。Sgl\_TEST は緑、Sgl\_CNTL は青、Sgr\_CNTL は赤の箱ひげ図。ひげは 0-100 パーセンタイル値、箱は 25-75 パーセンタイル値、横線は 50 パーセンタイル値、x は平均値を示す。

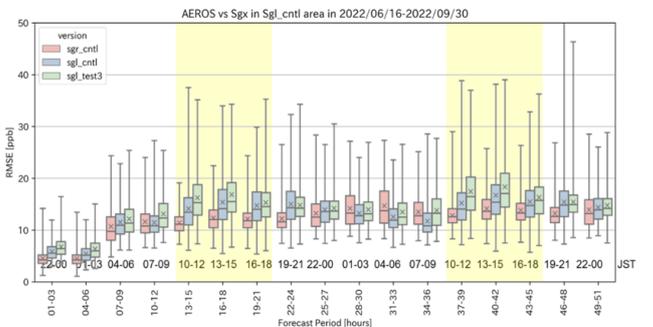


図 4.15.9 図 4.15.8 と同様。ただし、夏期間（2022 年 6 月 16 日～9 月 30 日初期日予測）の結果。

### 4.15.3 全球化学輸送モデルの同化利用衛星切り替え

はじめに

数値予報課では、紫外線情報の作成などを目的として、オゾン量の解析・予測を行う紫外線予測システムとして全球化学輸送モデルを運用している (JMA 2022)。全球化学輸送モデルでは、衛星観測データを利用してオゾン全量データ同化を行っているが、現在利用している衛星 (Suomi-NPP) は設計寿命が過ぎていることから、同シリーズの後継衛星 (NOAA-20) への切り替えに向けて準備を進めている。今般、衛星切り替えと同時に適用予定の軽微な変更を加えて業務化試験を実施した。ここでは、その概要を報告する。

#### 変更項目

- 同化利用衛星切り替え
  - － Suomi-NPP/OMPS から NOAA-20(JPSS-1)/OMPS<sup>1</sup>へ変更。同時に、バックアップ衛星を、Aura/OMI から Suomi-NPP/OMPSへ変更。
  - － ノイズ除去のための品質管理 (QC) 処理を強化
- モデル変更
  - － JRA-3Q 向け再解析で先行して適用した2点 (オゾン全量データ同化時の化学成分取扱い精緻化、短波放射過程での非現実的な加熱率対応) の改修
  - － モデル内の時刻管理の見直し (瞬間値出力タイミング、オゾン全量出力タイミング、エロゾル月別気候値の更新タイミングずれの修正)
- 維持管理コスト低減のための変更
  - － 数値予報ルーチン上流で行っていた衛星データデコード・QC処理の取り込み
  - － JRA-3Q 向けオゾン解析との統合に向けた出力の追加

#### 試験結果

2020年3月～2021年2月を対象期間として、全球化学輸送モデルの業務化試験 (以下、TEST) を実行した。対照実験 (CNTL) として現行のルーチン結果を使用したところ、TESTはCNTLに対して以下の特性が見られた。概要を以下に示す。

- 新規利用する NOAA-20 は現ルーチンの Suomi-NPP よりも線状に入るノイズの幅が広いので、QC処理を強化する必要がある。このQC強化により Suomi-NPP と概ね同程度にノイズを除去することができた (図 4.15.10)。

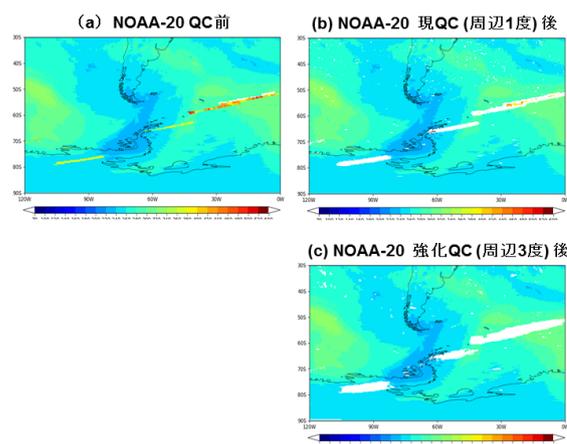


図 4.15.10 NOAA-20 衛星に対する QC 処理変更の効果: (a) QC 処理前、(b) 現ルーチンと同じ QC 処理後、(c) 強化した QC 処理後の結果。図中の「周辺〇度」は QC 処理における空間整合性チェックの範囲の大きさを示す。

- 東西平均オゾン全量の解析値を比較すると、(主に JRA-3Q 向けオゾン解析に先行導入した改修の適用により) TESTはCNTLよりも一様に若干増加する。また、東西平均オゾン全量の O-B を比較すると、現ルーチン使用で見られていた O-B の正バイアス (第1推定値の負バイアス) が緩和されていることが確認できた (図 4.15.11)。
- 対オゾンゾンデ検証による領域平均オゾン分圧バイアスを比較すると、CNTLと比べてTESTでは成層圏でわずかにオゾン濃度が増加するものの、バイアス傾向はほぼ変わらないことが確認できた (図 4.15.12)。
- 12～36 時間予測値の対分光光度計検証結果から、CNTLと比べてTESTではバイアスがわずかに正方向にシフトし、RMSDはバイアスの変化と対応するが、変化の大きさは小さく同程度の結果であることが確認できた (図省略)。
- 全球化学輸送モデルの計算結果を利用する紫外線情報や全球解析の特性が変わらないことも確認できた (図省略)。

#### まとめ

全球化学輸送モデルで利用している衛星の切り替えに軽微なモデル変更を加えて業務化試験を行った結果、オゾン全量としてはわずかに増加する傾向が見られたが、検証結果は中立であった。また、全球化学輸送モデルの計算結果を利用する紫外線情報や全球解析の特性が変わらないことも確認できた。このことから、上記の改良の現業化を 2022 年度中に行う予定である。

<sup>1</sup> [https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/omps\\_nadir](https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/omps_nadir)  
<https://www.eoportal.org/satellite-missions/noaa-20>

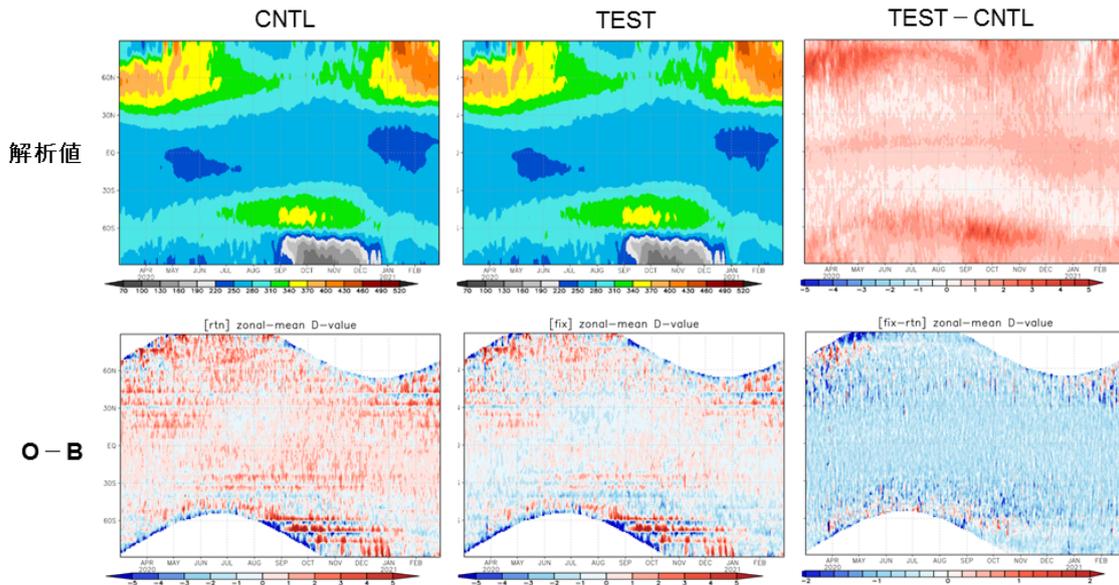


図 4.15.11 東西平均オゾン全量の（上）解析値と（下）O-B の時系列：左から CNTL、TEST、TEST - CNTL の結果。

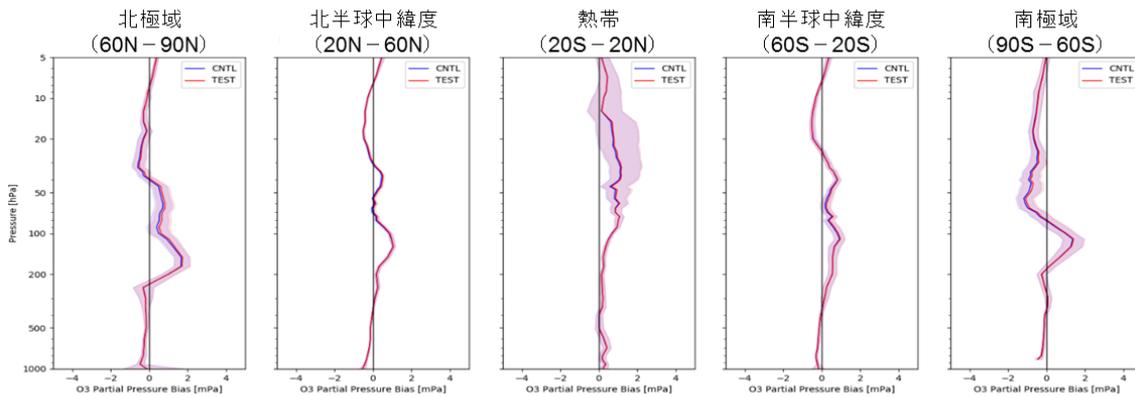


図 4.15.12 対オゾンゾンデ検証結果：領域平均オゾン分圧解析値のバイアス [mPa]（全 26 地点：北極域 2 地点、北半球中緯度 19 地点、熱帯 1 地点、南半球中緯度 3 地点、南極域 1 地点）、黒線は観測値、青線は CNTL、赤線は TEST、赤陰影と青陰影はそれぞれブートストラップ法で見積もられた 95%信頼区間。

#### 4.15.4 全球エアロゾルモデルのひまわり切り替え対応

##### はじめに

数値予報課では、黄砂情報の作成などで利用される黄砂解析予測システムとして、全球エアロゾルモデルを運用している (JMA 2022)。全球エアロゾルモデルでは、気象衛星ひまわりの観測（可視・近赤外）でリトリーブされたエアロゾル光学的厚さ（AOT: Aerosol Optical Thickness）のプロダクト (Yoshida et al. 2021; 北島ほか 2021) を 2 次元変分法で同化している。静止気象衛星ひまわり 8 号は、2022 年 12 月 13 日に待機運用中であったひまわり 9 号へと運用交代された。その運用交代に先立ち、ひまわり 8 号から 9 号への切り替えに伴うエアロゾルプロダクトの品質評価を行った。

##### 比較結果

ひまわり 8 号と 9 号で作成されたエアロゾルプロダクトを用いて、複数初期値で解析値と予測値の動作確認を日々実施した。同化して得られた解析値の例として、図 4.15.13 に 2022 年 10 月 23 日 06UTC での比較結果を示す。ひまわり 8 号と 9 号のエアロゾル解析値の差は日々の変動と比べて十分小さなものであり、大きな違いは見られなかった。なお、これらの解析値を利用したエアロゾル予測値にも大きな違いは見られなかった (図 4.15.14)。

##### まとめ

静止気象衛星ひまわり 8 号から 9 号への運用交代に伴い、全球エアロゾルモデルで利用しているエアロゾルプロダクトの品質評価を行った。8 号と 9 号のエアロゾルプロダクトを同化した解析値の差は日々の変動と

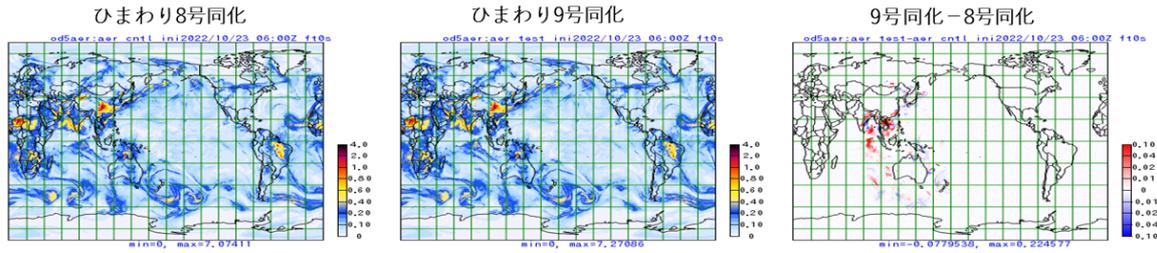


図 4.15.13 2020 年 10 月 23 日 06UTC におけるエアロゾル光学的厚さ (550nm) の解析値 : (左) ひまわり 8 号のエーロゾルプロダクトを同化、(中) ひまわり 9 号のエーロゾルプロダクトを同化、(右) ひまわり 9 号とひまわり 8 号による解析値の差。

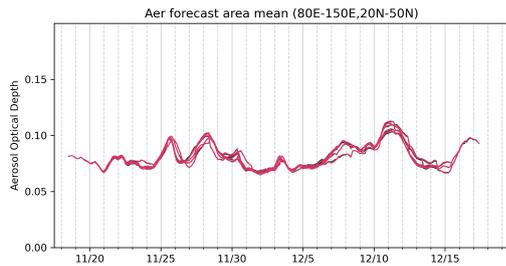


図 4.15.14 ひまわり 8 号 (黒線) とひまわり 9 号 (赤線) のエアロゾルプロダクトを用いた予測結果の差。

比べて十分小さいものであり、予測値にも大きな違いは見られなかったことから、2022 年 12 月 13 日に予定通りひまわり 9 号の利用に移行した。なお、全球エアロゾルモデルに対しては現在、2022 年度末に予定している GSM の水平高解像度化に伴う対応も準備を進めている。

#### 参考文献

- 福井哲央, 國領和夫, 馬場剛, 神成陽容, 2014: 大気汚染物質排出インベントリ EAGrid2000-Japan の年次更新. 大気環境学会誌, **49**, 117–125.
- 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, 246 pp., Available online at <https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline2022-nwp/index.htm>.
- Kannari, A., Y. Tonooka, T. Baba, and K. Murano, 2007: Development of multiple-species 1km × 1km resolution hourly basis emissions inventory for Japan. *Atmospheric Environment*, **41**, 3428–3439.
- 北島俊行, 吉田真由美, 村上浩, 2021: ひまわり 8 号・9 号可視・近赤外エアロゾルプロダクトのアルゴリズム更新. 測候時報, **88**, 19–28.
- Kurokawa, J. and T. Ohara, 2020: Long-term histor-

ical trends in air pollutant emissions in Asia: Regional Emission inventory in ASia (REAS) version 3. *Atmos. Chem. Phys.*, **20**, 12761–12793.

Randerson, J.T., van der G.R. Werf, L. Giglio, G.J. Collatz, and P.S. Kasibhatla, 2018: *Global Fire Emissions Database, Version 4.1 (GFEDv4)*. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA, <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1293>.

Yoshida, M., K. Yumimoto, T. M. Nagao, T. Y. Tanaka, M. Kikuchi, and H. Muakrami, 2021: Satellite retrieval of aerosol combined with assimilated forecast. *Atmos. Chem. Phys.*, **21**, 1797–1813.

## 4.16 線状降水帯予測の2022年事例における検証

### 4.16.1 はじめに

線状降水帯による被害は近年、毎年のように発生しており、その予測精度向上は喫緊の課題となっている。線状降水帯は、暖湿流の流入が持続し、局地前線や地形などの影響で空気塊が持ち上げられ、不安定な大気状態で積乱雲や積乱雲群が発生し、上空の風の影響でそれらが線状に並ぶことで形成される<sup>1</sup>。線状降水帯の予測が難しい理由として、

1. 線状降水帯の発生メカニズムに未解明な点がある
2. 線状降水帯周辺の大気の3次元分布が正確にはわかっていない
3. 数値予報モデルに課題がある

ことが挙げられている<sup>1</sup>。数値予報の観点では、特に観測データが不足している海上の気象状態に不確実性があり、数値予報の初期値が十分でないことや、個々の積乱雲の発生、発達の詳細には未解明な点も多く、数値予報モデルでの解像度の限界や、積乱雲の表現手法が十分でないことなどが課題となっている。

気象庁では、線状降水帯の予測精度向上に向けた取り組みを強化・加速化し、新たな水蒸気観測機器の整備や予測技術の開発等を継続的に実施している。2022年の取り組みとして、

1. 「線状降水帯による大雨の半日程度前からの呼びかけ」<sup>2</sup>（6月1日から）の開始、
2. 線状降水帯のメカニズム解明研究のための高密度な集中観測（気象研究所を中心とした、大学等の14機関と連携）<sup>3</sup>（6月から10月）
3. スーパーコンピュータ「富岳」を活用したリアルタイムシミュレーション実験<sup>3</sup>（6月から10月）
4. 民間船舶GNSSによる可降水量データのメソ解析への利用（6月3日から随時追加）
5. 線状降水帯の予測精度向上等を早期に実現するためのスーパーコンピュータシステムの整備（令和3年度気象庁補正予算）（2023年3月より部内運用開始予定）

などを実施している。

数値予報開発センター年報（令和3年）（気象庁2022）では線状降水帯の検出手法、評価手法などについて報告した。本節では2022年の線状降水帯事例に対して、MSMだけでなく、LFMでの線状降水帯の予測精度について、昨年度開発した手法に基づいて検証した結果を報告する。

<sup>1</sup> [https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yohokaisetu/senjokousuitai\\_oame.html](https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yohokaisetu/senjokousuitai_oame.html)

<sup>2</sup> [https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/bosai/kishojoho\\_senjokousuitai.html](https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/bosai/kishojoho_senjokousuitai.html)

<sup>3</sup> [https://www.jma.go.jp/jma/press/2205/31a/SLMCS\\_AllJapan20220531.html](https://www.jma.go.jp/jma/press/2205/31a/SLMCS_AllJapan20220531.html)

### 4.16.2 検証対象事例と検証手法

本調査の対象とする線状降水帯事例を表4.16.1に示す。線状降水帯の検出手法（数値予報開発センター年報（令和3年）（気象庁2022））は、

1. 解析雨量（5 km メッシュ）において前3時間積算降水量が100 mm以上の分布域の面積が500 km<sup>2</sup>以上
2. 1.の形状が線状（長軸・短軸比2.5以上）
3. 1.の領域内の前3時間積算降水量最大値が150 mm以上

とした。しかし、この条件で検出された2022年の線状降水帯事例は4事例と例年の十数事例より少なく、MSMとLFMの違いが十分に検証できなかったため、3.の条件を外して緩和した。なお、気象庁が発表している「顕著な大雨に関する情報」の発表実績<sup>4</sup>と比較すると、3.の条件だけでなく、オリジナルの1 km メッシュ解析雨量から5 km メッシュへの変換手法が異なることや、検出する時間間隔が、本調査では3時間毎であるが、「顕著な大雨に関する情報」は10分毎に検出しているなどの仕様の違いにより異なっている。例えば、8月3日から4日にかけて、山形県、新潟県、福井県で発生した線状降水帯事例は、00, 03, ..., 21 UTCの前3時間積算降水量で基準に達していない、もしくは、面積、長軸・短軸比の基準を満たしていない理由で、本調査事例には含まれていない。このように線状降水帯の検出手法には課題があり、発表された基準に合わせることを検討している。

検証手法についても以前と同様に、実況の線状降水帯の領域から100 km以内にMSMやLFMそれぞれで検出された線状降水帯があった場合を「線状降水帯を適中した」とする。本調査では、MSMの3, 6, 9, 12, 15, 18時間予測、LFMの3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10時間予測に対して、線状降水帯を適中できたか検証した。

### 4.16.3 検証結果

線状降水帯対象事例における、MSM、LFMでの検証結果一覧を表4.16.1に、分布を図4.16.1に示す。冒頭で示したように、現状の数値予報システムでは線状降水帯の予測が難しく、MSMでは4事例しか線状降水帯を適中できていなかった。一方、LFMではより多くの事例で線状降水帯を適中していた。短時間降水予報や直近の防災情報を目的としたLFMでは、計算機資源の制約もあり、現状の予測時間は10時間までと半日前からの防災情報として用いることはできないが、短時間予測を含めてMSMでは全く適中できなかった事例でも、LFMでは適中できている時間があった。また、予測頻度に注目すると、3時間毎のMSMと比較して、LFMは1時間毎に予測計算することから、ある事例では適中された予測時間が多くなっていた。この

<sup>4</sup> <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/jirei/index.html>

表 4.16.1 線状降水帯発生日時と MSM、LFM での線状降水帯の検証結果。適中した時間での「X」はどの時間も適中できなかったことを指す。

通番	線状降水帯発生日時	MSM で適中した 予測時間 (hour)	LFM で適中した 予測時間 (hour)
1	06/19 09UTC	X	10
2	07/04 18UTC	X	X
3	07/05 18UTC	6, 9, 12	4
4	07/16 09UTC	X	6
5	07/18 06UTC	X	6, 9
6	07/18 09UTC	X	3, 5
7	07/18 12UTC	X	3
8	07/18 15UTC	X	3, 5, 6, 7, 10
9	07/22 12UTC	X	X
10	08/03 00UTC	12	8, 10
11	08/13 12UTC	12	3, 5, 7
12	09/18 09UTC	X	X
13	09/23 06UTC	X	4
14	09/23 09UTC	3, 15, 18	4, 6, 8

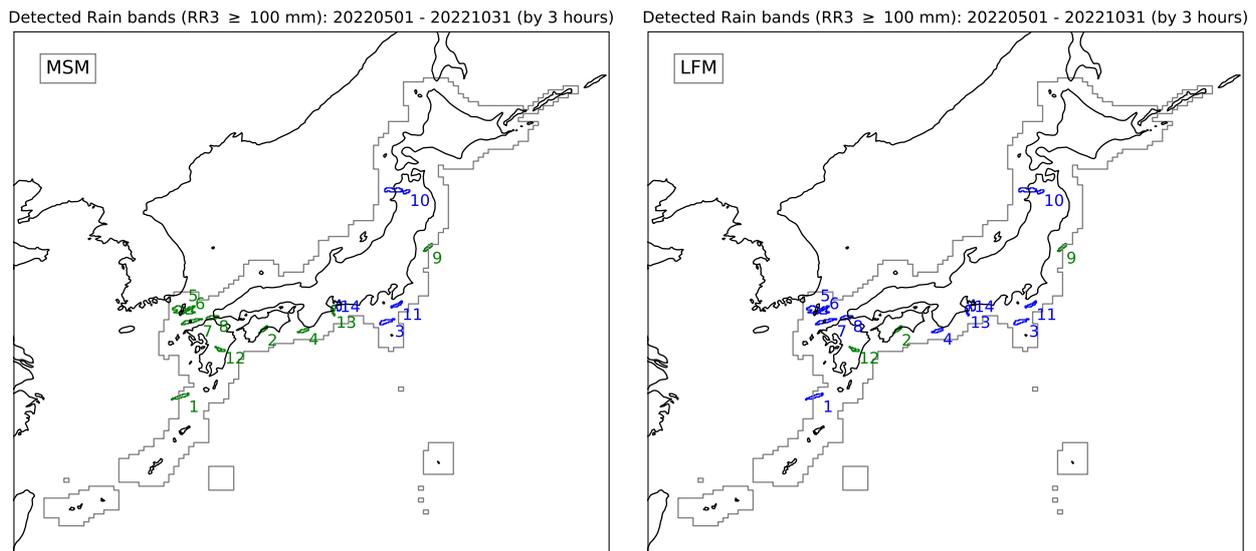


図 4.16.1 線状降水帯の分布図。図中では実況で線状降水帯が発生した場所を示し、その場所から 100 km 以内に MSM (左図) または LFM (右図) で線状降水帯を適中した場合 (捕捉) を青色、適中できなかった場合 (見逃し) を緑色で示す。図中の番号は表 4.16.1 の通番と対応した事例である。

ことから、LFM は短時間の複数初期値を利用することで、アンサンブル的に線状降水帯が起こる可能性を把握することができる。

最後に、LFM で線状降水帯を適中した事例 (表 4.16.1 の通番 8 に対応) の降水分布を図 4.16.2 に示す。この事例では、黄海から日本海に進む低気圧や、前線に向かって暖かく湿った空気が九州を中心に流れ込んだ影響で、7 月 18 日夜遅くに山口県から福岡県沖にかけて線状降水帯が発生した。MSM では降水の集中帯が島根県沖にずれており、そこでの降水量も実況で線状降水帯が発生した場所の降水量と比較して少なかった。

LFM では、降水域が実況よりもやや北東に位置がずれているが、山口県に線状降水帯が発生しており、降水量も実況と同程度であった。しかし、その周辺では、実況にはない過剰な強雨域もあった。今回の検証の対象外ではあるが、他にも LFM は線状降水帯の空振り事例が多く見られた。

#### 4.16.4 まとめ

2022 年に発生した線状降水帯に対して、MSM や LFM での線状降水帯予測の検証を行った。数値予報開発センター年報 (令和 3 年) (気象庁 2022) で調査し

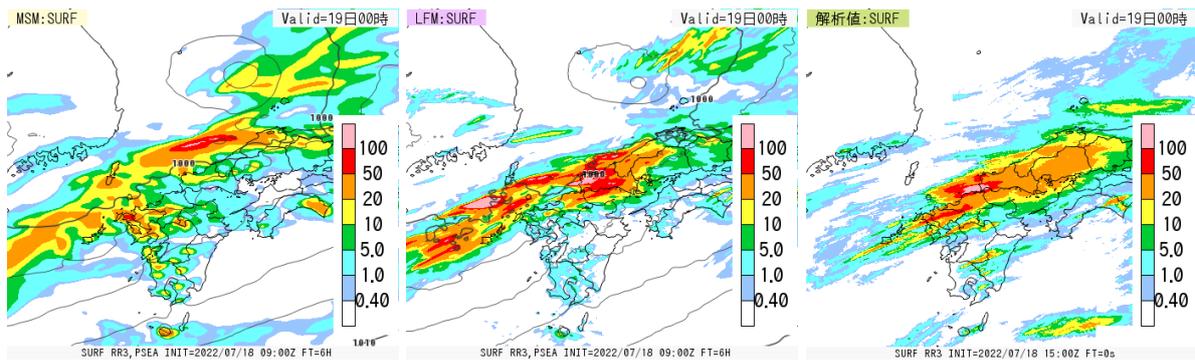


図 4.16.2 線状降水帯予測事例。2022 年 7 月 18 日 09UTC 初期値の 6 時間予測。左が MSM、中が LFM、右が対応する時刻の解析雨量 [mm/3h]。加えて、MSM と LFM に地上気圧 [hPa] を等値線で示す。

た時の線状降水帯検出基準では、2022 年の線状降水帯事例がかなり少なくなったことから、最大降水量の基準を外して緩和した状態で検証した。MSM と LFM で線状降水帯の予測を比較したところ、LFM の予測がより線状降水帯を適中していた。一方で、LFM では過剰な強雨域も予測しており、線状降水帯の空振りも多くなっていた。

線状降水帯は事例数が少ないこともあり、その予測精度の評価は難しい。今回調査をした決定論予測以外にも、線状降水帯予測の不確実性を把握するために、MEPS などアンサンブル予測による確率的検証も取り組む必要がある。また、線状降水帯の発生メカニズムに着目した、下層収束や水蒸気量などに対する検証も重要である。このように、線状降水帯予測の精度を様々な観点で評価・検証し、予測精度向上に資する調査を継続する必要がある。

#### 参考文献

気象庁, 2022: 線状降水帯予測の評価. 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, 145–147.

## 4.17 台風進路予測の現状と誤差分析

### 4.17.1 はじめに

気象庁は「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」の台風防災において、台風に伴う災害発生の数日前からの広域避難を確実に実行することを目標として掲げている。特に台風の進路予測は、その後の降水量や風の予測に大きく影響することから、その改善は最優先事項である。進路予測の精度向上のためには、進路予測誤差の現状把握から誤差の要因分析を通じて、数値予報システムでの問題点や改善点を見出すことが重要である。本節では、GSMでの台風進路予測の現状と進路誤差の分析手法の一つである最適指向流を用いた調査結果を簡単に報告する。

### 4.17.2 台風進路予測の現状

台風進路予測の現状として、数値実験作業部会(WGNE)の枠組みの中で、気象庁が1991年から実施している現業数値予報センターの全球モデルによる熱帯低気圧予測の国際相互比較検証の結果を取り上げる。WGNEの熱帯低気圧予測の国際相互比較検証の仕様や検証手法などについては、梅津・森安(2013)、Yamaguchi et al. (2017)などを参照願いたい。また、2018年と2019年に対する検証結果は数値予報開発センター年報(令和2年)(気象庁2021)で報告した。

まず、台風3日予測に対する台風進路誤差の2021年までの経年変化を図4.17.1に示す。数値予報システムの絶え間ない改良によって、長期的には進路誤差が減少している。ただし、進路誤差の経年変化には年変動があり、特に2021年は、ほとんどの数値予報センターで3日予測の進路誤差が増大していた。また、ここ10年ほどに注目すると、一番進路誤差が小さいECMWFでも3日予測で200kmを切る程度で近年は誤差減少が鈍化している傾向が見られた。

次に、台風の転向状態に区分化し、ベストトラックでの進行方向成分で分解(図4.17.2)した位置誤差の分布を図4.17.3に示す。転向状態はベストトラックでの進行方向によって、図4.17.4のように区分している。経田・越智(2014)など、以前から指摘されている通り、転向後でのスローバイアス(図中の左下での青色)や転向前での台風西進時での北上バイアス(図中の右側での赤色)が近年においても見られる。外国数値予報センターにおいても同様の傾向が見られる(図略)ことから、各数値予報センターでの共通の課題となっている。

### 4.17.3 台風進路予測誤差の分析

台風の進路誤差をより詳細に分析するために、台風を移動させる環境場(指向流)に注目し、吉村ほか(2020)と同様の手法で最適指向流による分析を行った。最適指向流の手法について簡単に説明すると、台風の進路

は台風以外の上空の風によって流されることを前提として、台風の渦を除いた周辺の平均風を環境場の風とし、それと実際の台風の速度が合致する条件を診断するものである。手法はGalarneau and Davis(2013)に基づき、Miller and Zhang(2019)に従って実装した。GSM予測値と参照値(ここでは全球解析値)それぞれの最適指向流の結果から、台風移動速度の誤差要因が環境風・台風の渦の大きさ・下端を850hPa固定とした指向流を受ける深さ・残差の4成分に分解される。

最適指向流で分析した事例として、2021年台風第19号を取り上げる。この台風は進路誤差が2021年で比較的大きい台風であった。転向して北東進するタイミングが遅れた2021年10月12日00UTC初期値からの予測値(図4.17.5)と、それに対応する時刻の解析値に対して最適指向流を求めた。その結果、指向流を受ける深さに違いが見られた。図4.17.6に予測値と解析値の指向流が受ける深さの上端を示す。48時間予測にかけて、予測値では700hPa程度が上端となっており、解析値と比べて上層の流れに感度がないことが示されている。下層ほど東風成分が卓越していたことから、この上端の低さによって台風の西進誤差が生じたと考えられる。吉村ほか(2020)においてもGSM予測値は深さの上端が低い傾向があるとしており、この事例でも進路誤差のひとつの要因になっていることを示唆している。

### 4.17.4 まとめ

GSMの台風進路予測について調査した。長期的には誤差は減少していたが、転向後のスローバイアスや転向前の台風西進時の北上バイアスは、今年の台風に対しても見られ、程度の差はあれども長年残っている誤差であることを確認した。

続いて、最適指向流手法を導入することによって、台風を移動させる環境場を診断した。GSMでの進路誤差の要因として、台風を動かす環境風の深さに解析値との違いがある事例を紹介した。最適指向流には、様々な前提条件があることや、台風の移動の説明がつかない事例も見られたことから、より詳細な分析や、他の分析手法の調査も必要である。台風進路予測の精度向上に資するよう今後とも調査を継続していきたい。

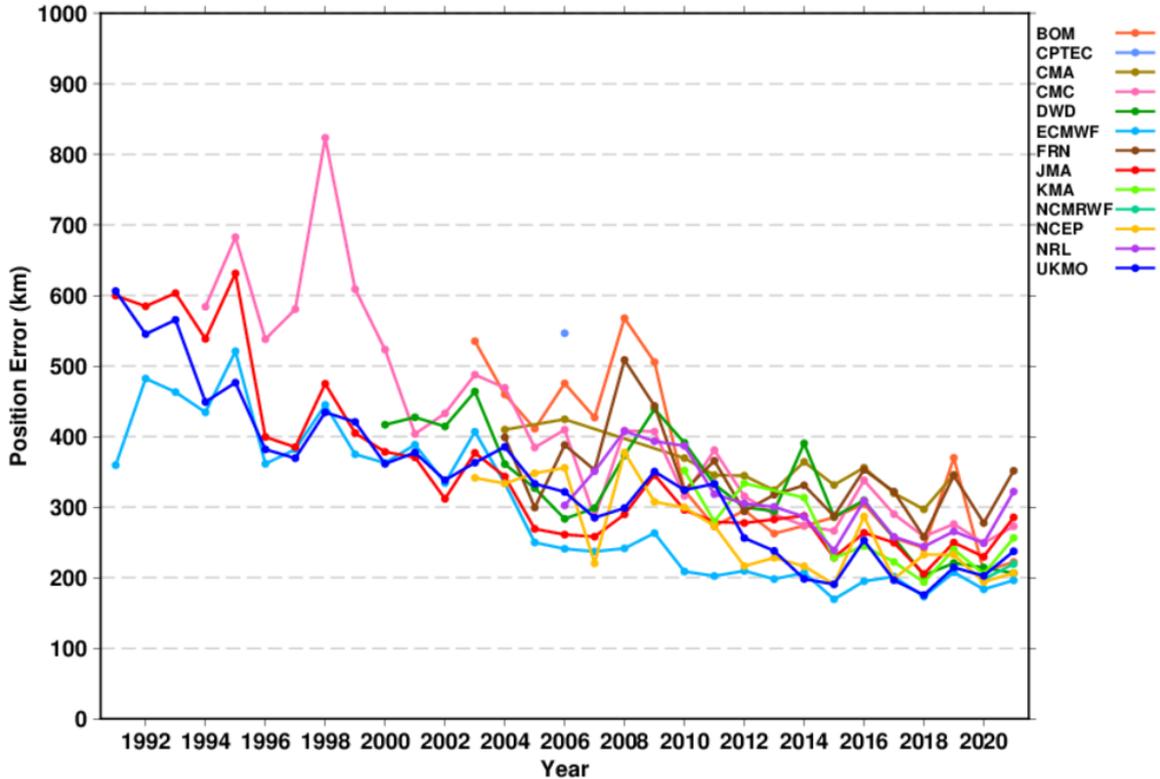


図 4.17.1 台風の3日予測での進路誤差の経年変化。

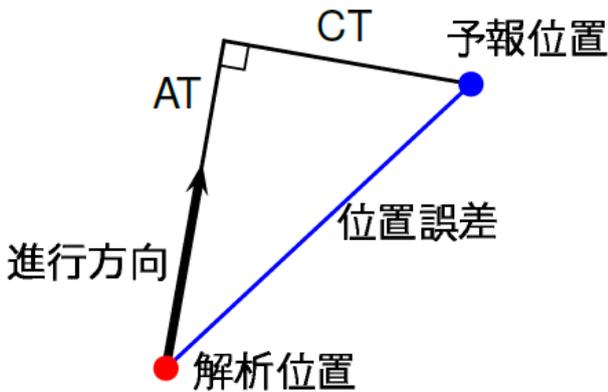


図 4.17.2 ベストトラックでの台風の進行方向で分解した、進路予測誤差の取り方。進路予測誤差は進行方向に沿った方向の誤差(AT)と進行方向に直行する方向の誤差(CT)に分解される。

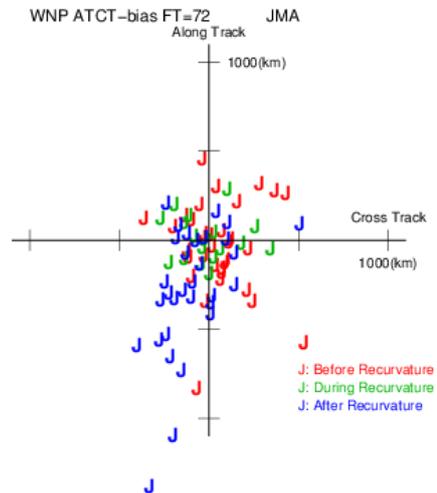


図 4.17.3 台風の進行方向成分で分割した GSM 進路誤差の分布。2021 年台風事例に対する 3 日予測。ベストトラックでの中心位置から進行方向の進路誤差を縦軸に、進行方向と直行する進路誤差を横軸にプロットしている。また、赤色は転向前、緑色は転向中、青色は転向後の事例を示す。

参考文献

Galarneau, T. J. and C. A. Davis, 2013: Diagnosing Forecast Errors in Tropical Cyclone Motion. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 405–430.  
 気象庁, 2021: WGNE 熱帯低気圧検証. 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, 130–132.

経田正幸, 越智健太, 2014: 台風アンサンブル予報システム. 平成 26 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 62–71.  
 Miller, William and Da-Lin Zhang, 2019: Understanding the Unusual Looping Track of Hurricane

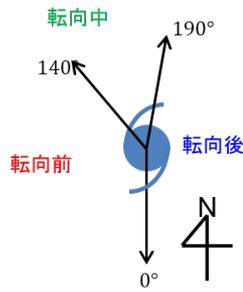


図 4.17.4 台風の進行方向に応じた転向前、転向中、転向後の区分。南進を0°として、時計回りに、0°-140°を転向前、140°-190°を転向中、190°-360°を転向後と定義する。

値予報課報告・別冊第59号, 気象庁予報部, 98-111.  
 Yamaguchi, M., J. Ishida, H. Sato, and M. Nakagawa, 2017: WGNE Intercomparison of Tropical Cyclone Forecasts by Operational NWP Models: A Quarter Century and Beyond. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **98**, 2337-2349.

吉村裕正, 中川雅之, 杉正人, 和田章義, 大西領, 那須野智江, 中野満寿男, 後藤浩二, 坂内健大, 佐々木亘, 2020: 複数の次世代非静力学全球モデルを用いた高解像度台風予測実験. *Annual Report of the Earth Simulator 2019*, 4-1-4-5.

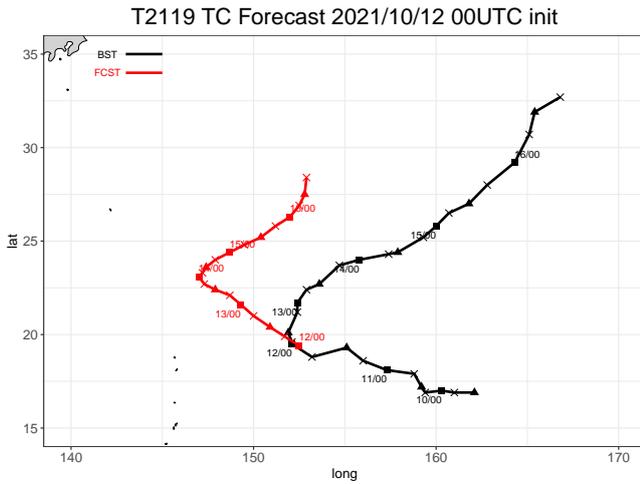


図 4.17.5 2021 年台風第 19 号の進路予測。2021 年 10 月 12 日 00UTC 初期値。赤が予測値、黒がベストトラックの進路。

Joaquin (2015) and Its Forecast Errors. *Mon. Wea. Rev.*, **147**, 2231-2259.

梅津浩典, 森安聡嗣, 2013: WGNE 熱帯低気圧検証. 数

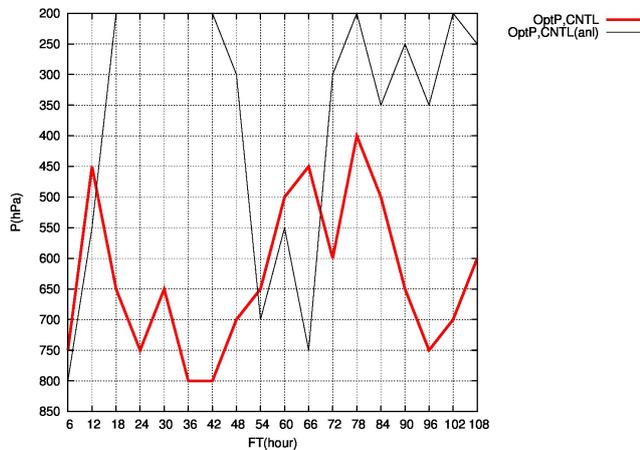


図 4.17.6 最適指向流によって導かれた指向流が受ける深さの上端の気圧。横軸は 2021 年 10 月 12 日 00UTC 初期値からの予測時間 [hour]。赤が予測値、黒が対応する時刻の解析値での上端の気圧。