

第1章 全球数値予報システムの改良に伴う各種システムの特性変化

1.1 全球数値予報システムの物理過程改良の概要¹

1.1.1 はじめに

気象庁は、2016年3月に全球数値予報システムに対して、新規観測データの利用開始や全球モデル(GSM)の改良など大幅な変更を行った。まず、2016年3月17日00UTC初期値の実行から、全球解析において、ひまわり8号の観測データから算出される大気追跡風及び晴天放射輝度温度の利用を開始した。さらに、2016年3月24日00UTC初期値の実行から、改良された積雲・雲・陸面・放射・海面などの物理過程を全球数値予報システムへ導入した。またこの改良と同時に、全球降水観測計画(GPM)主衛星のマイクロ波イメージャ(GMI)輝度温度の新規利用を開始した。

これらの改良の結果、全球数値予報システムの予測について、台風進路予測の精度向上など多くの点で改善が見られた。また、その予測結果を境界値として利用するメソモデル(MSM)でも降水予測精度などが改善した。本章では、2016年3月の全球数値予報システムの改良における、GSMの改良内容(本節)や予測特性の変化(第1.2節)、MSM・ガイダンスでの予測精度と特性の変化(第1.3節、第1.4節)について解説する。観測データ利用の改良については、第2章に解説されているので参照いただきたい。

1.1.2 全球モデルの改良

全球数値予報システム(GSM・全球解析)は、天気予報・週間天気予報、台風予報、航空気象予報や海上警報・予報などの、気象庁の発表する各種防災気象情報や天気予報を一元的に支援する重要な役割のみならず、メソ数値予報システムの境界値提供や波浪モデルなどへの大気側の入力提供なども同時に担っている。このように多くの役割、特に短期予報の支援を受け持ったのは、GSMの水平分解能を約55kmから約20kmに大幅に高分解能化した2007年11月に、同時に運用を終了した領域数値予報モデル(RSM)と台風数値予報モデル(TYM)がそれまで担っていた役割を引き継いで以降である(北川2006)。これまで気象庁では、これら多くの役割を持つ全球数値予報システムの発展のため様々な開発を行ってきた。

表1.1.1に2007年11月以降のGSMの変更履歴をまとめる。以下では、GSMの各バージョンを、改良を導入した西暦の下二桁と月をGSMの後ろに付けて呼ぶ(07年11月ならGSM0711となる)。今回の変更前後でのGSMのバージョンはそれぞれGSM1403、GSM1603である。表1.1.1に示すように、GSM0711以降様々な改良を実施している。

本節では、GSM1603で導入された変更内容について

表 1.1.1 GSMの変更履歴 (GSM0711以降)

	主な変更内容
GSM0711	水平格子間隔約20 km、鉛直層60層、モデルトップ0.1 hPaへ仕様変更(北川2007)
GSM0801	積雲過程の改良(気象庁予報部2007)
GSM0808	力学過程の改良、適合ガウス格子の採用(岩村2008)
GSM1011	入出力システムの刷新による高速化
GSM1108	出力専用ジョブ統合による高速化
GSM1212	層積雲スキームの改良(下河邊・古河2012)
GSM1304	放射過程(エーロゾル気候値、水蒸気吸収係数)の改良
GSM1403	物理過程改良(放射・境界層・重力波・積雲・陸面)、鉛直層100層とモデルトップ0.01 hPaへ仕様変更、および入出力システムなどの高速化(米原2014a)
GSM1603	物理過程改良(積雲・雲・陸面・放射・海面)および力学過程の高速化

て説明する。この変更では、GSMの積雲・雲・放射・陸面・海面などの物理過程が多くの点で大幅に改良されており、様々な点について予測精度が大きく向上すると同時に、予測特性の観点からもGSM0711以降最大の変化となっている。そのため、次節では統計的精度だけでなく、日本付近の予測特性にも注目してその変化を解説する。

また、GSM1603では物理過程の改良により増加した実行時間を短縮するため、力学過程の球面調和変換などで高速化も同時に行っている。

1.1.3 物理過程の改良

GSM1603における、物理過程改良の狙いと変更内容の概略を説明する。GSM1212の時点で採用されていた物理過程やその詳細についてはJMA(2013)を、GSM1403での変更は米原(2014a)を参照していただきたい。

(1) 開発の狙い

GSM1603についての一連の開発では、「数値予報モデル由来の予測誤差は、モデルの諸過程が持つ問題が複雑に絡み合った結果生じている」という認識のもと、それぞれの開発項目ごとの実験・評価・議論に加えて、開発の途中で各項目を組み合わせた実験・評価・議論を段階的に行い、その結果から各項目を見直し、GSM全体としてブラッシュアップしていく方針を取ってい

¹ 米原 仁

る。その中でも特に、GSM1403 の開発経験から得られた知見や問題意識に基づき (米原 2014b)、長年の課題であった中層乾燥バイアスや下層低温バイアスなどの予測特性改善に取り組んだ。

また、GSM1603 後も更なる精度向上を効率的に行っていくために、開発項目の選定時においては、各項目が科学的に正しい方向性を持ち、今後の開発において基盤となりうることを重視した。GSM1403 時点での物理過程の大きな問題点として、数値計算手法に不適切な部分があることや、モデリングが簡素過ぎる部分があることが挙げられる。これらは予測誤差の原因となるだけでなく、物理過程を変更したインパクトの再現性を低下させ、問題の切り分けを困難にしていた²。今後の効率的な開発基盤を作るため、それら問題を改善することも大きな目的である。

(2) 積雲・雲

積雲過程と雲過程についての変更内容は互いに強く関連しており、結果として生じた予測特性の変化は不可分であるためまとめて記述する³。

積雲過程においては、エネルギー収支補正方法⁴の適正化に端を発して様々な点を修正した。主要な点だけでも、エネルギー収支補正により簡便に扱われていた固体降水についての融解過程の導入、それと合わせてエネルギー収支補正での -5°C 制限の廃止、対流性上昇流域での雲水から降水への変換過程の導入、雲底の静的エネルギー見積り方法の変更および、雲底以下の上昇流域にエントレインされる気塊への $+0.5\text{ K}$ の摂動付加など多岐に渡る。

雲過程については、雲水の落下計算において、モデルの積分時間間隔への依存性を減らすことを主な目的に改良を行った。これまで用いられていた、雲水の連続系での落下方程式は、積分時間間隔の値を陽に含む不自然なものであったが、より自然な方程式を時間離散化の影響が小さい手法で解く方法へ変更した。この変更により、GSM1603 においては、結果として雲水はよりゆっくり落下するようになり、主に中高緯度で上層雲量が増加した。この結果、地表面での長波放射収支が改善され、衛星観測から推定されたものに近づいている。

また、積雲過程に依存する比湿ゆらぎ幅の調整を廃止した。比湿ゆらぎ幅とは、雲過程において 1 格子内の全水量分布がどれだけ平均値から揺らいでいるかを表す量であり、この値が大きくなれば格子平均値の湿度がより低く乾燥していても、格子内で部分的に飽和

している領域が存在でき、水蒸気が雲水に変換されやすくなる。GSM1403 では、積雲過程の中で積雲が存在すると判定された場合には、雲過程で使われるこの揺らぎ幅を調整しており、その格子では比湿ゆらぎ幅がかなり大きく設定されていた。大まかに言うと、これまでは雲水が相対湿度が 60% 程度でも生成されることがあったが、調整の廃止により 80% 程度まで雲水は生成されない様になっている。この変更は降水特性の変化に特に大きく影響している。

これら積雲・雲過程変更の影響は広範囲に渡り、対流活動域を中心とした中下層低温バイアスの改善と 500 hPa 高度場のバイアス改善、中下層の乾燥バイアスの改善、擾乱の表現の変化など大きな改善の原因となっている。また、特にゆらぎ幅調整の廃止により、対流活動域において雲過程による降水⁵は大幅に減少し、降水の不自然に局所的な表現が減り、なめらかな空間分布になった。GSM1603 においては、特に夏期の降水予測精度の向上が顕著であり、日々の降水の予測特性にも大きな変化が見られる。

(3) 陸面

GSM1403 で利用されていた陸面過程の歴史は古く 1989 年まで遡り、この間 GSM1603 まで大幅な改良は行われていなかった。今回の改良は、大泉・保坂 (2000) や平井・堀田 (2009) などで報告された開発を引き継いだ全面的な刷新となる。変更は多岐に渡り、熱・水分共通の 7 層の土壌層の導入、最大 4 層の積雪モデル導入など基本的スペックの大幅な向上、キャノピー、土壌、アルベドの取り扱いの精緻化、大気とのフラックス交換スキームの改良、植生分布や植生・土壌に関連する各種定数値の更新、土壌水分初期値として用いる気候値の更新などが含まれる。これら今回の陸面過程の変更によって、地表面付近の予測特性は大きく変わっている。

地上気温の改善としては、積雪域での夜間の高温バイアスが解消されたことや、日変化の表現が改善されたことなどが特に挙げられる。これは、積雪モデルを刷新し、熱伝導率や熱容量などが適正化されたことや、土壌過程を強制復元法から熱伝導を解く方式に改良したことにより、大気からの強制力に対する土壌の応答が良くなったことが理由である。

(4) 放射

短波放射 (太陽放射) 過程における雲の取扱いについて、1 格子内に複数の雲層の重なりを考慮する手法として、これまでの曇天域でのランダムオーバーラップに代えて、マキシマム・ランダムオーバーラップを導入した (Nagasawa 2012)。また、水雲粒の光学特性をパラメタライズする手法をより正確なものへ見直した。その他に、放射過程で利用する成層圏の水蒸気量

² 計算手法やモデリングの簡素化が原因で、ある変更を適用した場合に、モデルの分解能や時間積分間隔によって、他の過程との組み合わせ次第で、変化が想定されるものから異なる例が見られた。

³ GSM においては、大まかな役割分担として積雲過程は対流性の降水を、雲過程は層状性の降水と雲を扱っている。

⁴ 解説は米原 (2014a) を参照。

⁵ GSM の降水は積雲過程によるものと雲過程によるものの合計である。

や温室効果ガスの気候値更新、これまで黒体として扱われていた地表面射出率を見直すなどの変更を行っている。放射過程の変更により、厚い雲が存在するカラム大気の変更前と比べて短波放射に対して光学的に薄くなったため、地表面に入射する短波放射は熱帯域を中心に増加した。その結果、対流活動域を中心に、地表面への入射短波が過小なバイアスが改善している。

(5) 海面

GSM の海面過程では、開水面 (open water surface) と海水の両方が考慮されている。今回の変更では、両者の接地境界層における輸送係数の計算手法を Monin-Obukhov 則に直接基づくものに改良した。また、海水について、これまでは氷 1 層で表面 (skin layer) の取扱無しであったものを変更し、氷 4 層に加え表面を取り扱う新しいスキームを導入した。加えて、ひとつの格子は開水面か海水かどちらかしか取り得なかったものを、海水密接度に応じて混在した状態を取り得るように接地境界層スキームの陰的解法を精緻化した。

GSM1403 では、極域で大気下層の低温バイアスが大きく、特に海水域では予測時間が進むにつれてそれがより顕著になっていたが、海面過程の改良により低温バイアスは大きく緩和した。また、この変更および陸面過程の変更により、高緯度の擾乱について地上気圧場や高度場などの予測精度の改善が見られた。

1.1.4 まとめ

2016 年 3 月 24 日 00UTC から全球数値予報システムに適用された物理過程の改良について、その狙いと概略を示した。今回の変更では様々な点について大きく予測精度が向上している。これらの変更に伴う予測特性の変化について次節で解説する。

最後に、GSM1603 における変更内容一覧を、ここまでに紹介していないものも含めて表 1.1.2 に示す。今後も、今回の開発経験から得られた知見や問題意識に基づき、引き続き予測性能の向上に努めていく。

参考文献

- 岩村公太, 2008: 高解像度全球モデルの改良. 平成 20 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1–6.
- 大泉三津夫, 保坂征宏, 2000: 陸面過程. 数値予報課報告・別冊第 46 号, 気象庁予報部, 48–64.
- 気象庁予報部, 2007: 全球数値予報モデル (GSM) の積雲対流スキームの改良. 配信資料に関する技術情報 (気象編) 第 275 号.
- 北川裕人, 2006: 高解像度全球モデル. 平成 18 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 7–8.
- 北川裕人, 2007: 変更の概要. 平成 19 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1–4.
- 下河邊明, 古河貴裕, 2012: 層積雲スキームの改良. 平成 24 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 92–96.
- 平井雅之, 堀田大介, 2009: 陸面過程. 数値予報課報告・

表 1.1.2 GSM1603 の変更内容

過程	変更内容
積雲	エネルギー補正式の修正
	固体降水の融解の導入
	上昇流域での雲水から降水への変換の導入
	雲底の静的エネルギー導出方法の変更、また 0.5 K の摂動を与える
	雲氷の鉛直再配分の廃止
雲	積雲由来の比湿揺らぎ幅調整の廃止
	雲氷落下手法を積分時間間隔に直接依存しない方法へ変更
陸面	層数などのスペックを大幅向上
	独立した積雪モデルの導入
	アルベド・キャノピー・土壌の精緻化
	フラックス交換スキームの改良
	植生分布および各種定数値の更新
	土壌水分初期値として用いる気候値の更新
放射	短波放射への雲のマキシマム・ランダムオーバーラップ導入
	水雲粒光学特性パラメタリゼーションの見直し
	放射過程で利用する吸収気体の気候値更新 (成層圏の水蒸気量、温室効果ガス)
	地表面射出率の見直し
海面	4 層海水モデルの導入
	接地境界層スキームの更新
	開水・海水混在格子の導入
	強風時のフラックス交換スキームの修正
他	ルジャンドル変換の高速化
	非地形性重力波スキームの計算負荷軽減

別冊第 55 号, 気象庁予報部, 99–108.

- 米原仁, 2014a: 変更の概要. 平成 26 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1–3.
- 米原仁, 2014b: 留意すべき日本付近での予測特性の変化. 平成 26 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 24–34.
- JMA, 2013: Global Spectral Model (JMA-GSM1212). *Outline of the Operational Numerical Prediction at JMA*, 43–61.
- Nagasawa, R., 2012: The Problem of Cloud Overlap in the Radiation Process of JMA's Global NWP Model. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, **42**, 4.15–4.16.

1.2 全球数値予報システムの特性の変化¹

1.2.1 はじめに

本節では、第 1.1 節で概観した 2016 年 3 月の全球数値予報システムの改良について、導入に際し実施した試験の結果に基づいて、解析値や予測値の特性変化を報告する。

今回の変更を現業的に運用するにあたって、夏冬それぞれ 3 か月間を検証対象とする比較試験を行っている。試験の対象は、全球サイクル解析、全球速報解析、全球予報²とした。全球予報はそれぞれ 2015 年 6 月 20 日 00UTC から 10 月 11 日 18UTC 初期値、2014 年 11 月 20 日 00UTC から翌年 3 月 11 日 18UTC 初期値までを実施した。夏期試験は 2015 年 7 月から 9 月、冬期試験は 2014 年 12 月から 2015 年 2 月を統計検証の対象期間とする。ただし、台風検証については事例数を多くとるため、6 月 20 日 00UTC から 10 月 11 日 18UTC 初期値の全ての予測を検証の対象としている³。実験期間の都合上、冬期試験にはひまわり 8 号のデータは解析で利用されておらず、夏期と冬期で試験の内容が異なるが、本節で解説する予測特性の変化については、概ね 2016 年 3 月に実施した変更によるものと同じと考えている。以降、比較試験における変更された実験を TEST もしくは GSM1603 と呼び、対照実験となる変更前の実験の結果を CNTL もしくは GSM1403 と呼ぶ。

CNTL から TEST へのシステムの変更点は非常に多く、その結果生じた予測特性の変化項目も多い。本節では、日本付近の予測精度および予測特性の変化について、大きな変化が見られた、利用上注目すべき点を中心に説明する。以降、台風、高度や気温などの大きなスケールの場合、降水、地表面付近の予測について、テーマごとにそれぞれ統計検証の結果と事例を示しながら解説する。

1.2.2 台風予測

夏期試験の約 4 か月の期間内に存在した台風⁴は、T1508 から T1523 の 16 個であり、初期値 456 事例のうち 359 初期値で台風追跡の対象となる熱帯擾乱が存在した。期間に含まれる全ての台風予測について、気象庁の事後解析データ（ベストトラック）を参照値として検証を実施した。

(1) 進路予測精度

図 1.2.1 に、期間内全ての台風について平均した予測時間毎の進路予測誤差を示す。統計的な進路予測誤

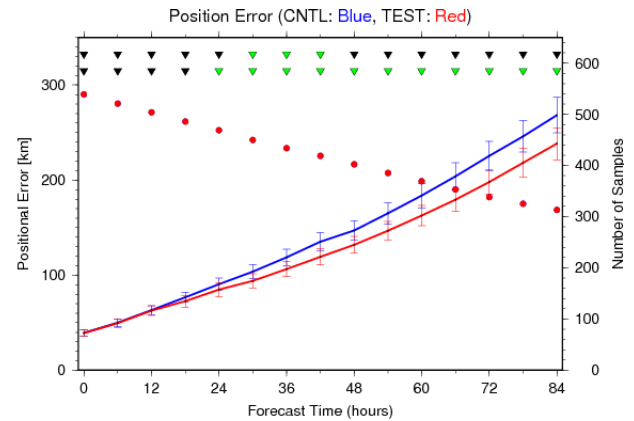


図 1.2.1 夏期試験期間に存在した 16 個の台風を予測対象とした進路予測誤差 [km] (実線、左軸) とサンプル数 (丸、右軸)。赤線が TEST で青線が CNTL、線に付属したエラーバーは誤差の発生が正規分布に従うと仮定した場合の 95%信頼区間を表す。サンプルは TEST と CNTL で揃えてあり、両者で追跡できたものだけを検証対象としている。このため、サンプル数を表す丸は TEST と CNTL で重なっている。図上部の三角は差の有意性を示すもので、上段が相関考慮、下段が独立仮定で計算した有意判定結果を示し、緑色は有意、黒色は有意でないことを示す。

差については、FT=12 以降の予測で改善が見られており、その改善幅は予測時間が進むにつれて大きくなっている。この改善は、ひまわり 8 号データの利用および GSM の物理過程改良の両者の効果によるものである。物理過程改良のみの試験の結果では、概ね期間の前半 FT=36 までは中立、それ以降から FT=84 まで改善が見られた。単純にインパクトの分解はできないが、事前に行った個別の試験結果から、予測の前半ではひまわり 8 号データ利用の効果が大きく、予測の後半では物理過程改良の寄与が大きいと考えられる。特に予測の前半では、単純に両者の改善量を合計した以上に大きな改善が得られており、良い相乗効果が見られた。

台風進路予測の誤差は台風事例ごとの依存性が強く、検証期間が異なれば改善・改悪の傾向も異なる可能性がある。しかし、GSM1603 の開発途中における、他の期間の実験においても改善傾向は一貫してみられており、2013 年の 8 月や 2014 年の 7, 8, 9 月と幅広い事例を含む検証で誤差の減少傾向が確認されているため、今後の予測においても改善した進路予測が得られる可能性が高いと考える。

5 日目までの進路予測誤差を確認するため、夏期試験の全期間について、FT=132 まで進路予測誤差を検証した結果を図 1.2.2 に示す（軸の表示範囲が図 1.2.1 と異なる点に注意）。この検証では、FT=132 までの予測が存在する 12UTC 初期値の予測のみを対象としている。このため、全初期値を対象とした場合と比較してサンプル数は約 4 分の 1 に減っており、結果の線にはやや滑らかさを欠くものの、FT=84 までで確認された進路予測の改善傾向は、FT=132 まで同様にみら

¹ 米原 仁

² 実際の運用と同様に、00, 06, 18UTC の初期値に対しては 84 時間予測、12UTC については 264 時間予測。

³ 全球解析や検証の都合上、検証対象期間の前後でも実験は行われている。

⁴ 今後、台風の識別は T の後に台風番号を付けたもので記す。

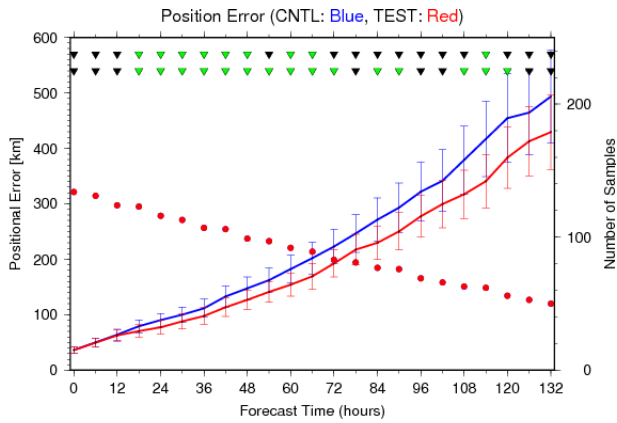


図 1.2.2 夏期試験期間の全期間について、FT=132 まで進路予測誤差を検証したもの。図の表示要素は目盛表示範囲を除けば図 1.2.1 と同様。FT=132 までの予測が存在する 12UTC 初期値の予測のみを検証対象としている。

れていることが確認できる⁵。

(2) 進路予測の成分別検証

台風位置の誤差を速度と方向に分けてより詳しく比較するため、誤差を進行方向に沿った成分と直交する成分に分解し、転向前・転向中・転向後に期間を区別して比較する（図 1.2.3）。各ステージの定義や成分の分解の詳細については梅津・森安（2013）の解説を参照いただきたい。

図を見ると、転向前後のどの期間でも改善しているが、進行の遅れすぎ・進みすぎの改善、つまり進行速度についての改善が顕著であり、これらの寄与が統計的な誤差の減少につながっていることが分かる。一方で、進行方向に直行する成分については、差は大きくないがやや悪化しており、特に転向中のステージが目立つ。検証の結果として、CNTL と TEST の違いが最も明瞭なのは転向中の期間である。転向中の期間では、進行の遅れ成分が大きかったものが、進行方向に直行する成分の方が大きくなり、誤差の特性が変わっている。台風の位置誤差が非常に大きくなるケースとしては、CNTL, TEST とともに転向前ステージの図の第 4 象限に位置する事例、つまり進行が非常に遅く北進誤差を伴う場合である点は変わっていない。

(3) 進路予測精度が悪化した期間

夏期試験の期間について、FT=84 までの検証結果を事例別に分類すると、16 事例の中で改善とみなせるものが 9 事例、中立が 3 事例、改悪が 4 事例であった（図略）。

改善した事例を個別に調査すると、太平洋高気圧の縁辺流など台風周辺の環境流の誤差が減少している事例や、台風周辺の降水表現や風の非軸対称構造が異なっ

⁵ 一般に、事例数が少ない場合、有意性判定の印はつきにくくなるが、今回の改良では 12UTC 初期値のみの検証でも有意な改善が見られる。

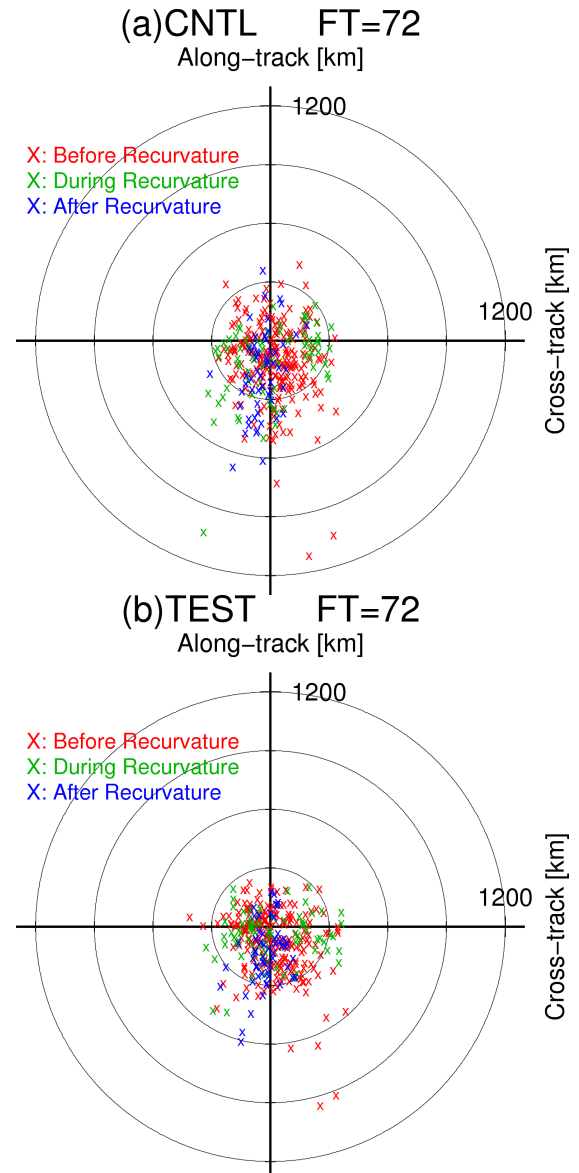


図 1.2.3 台風の解析位置に対する相対的な進路予測誤差の分布図。期間は図 1.2.1 と同じ。縦軸は台風進行方向の誤差、横軸は進行方向に直交する方向の誤差を示す。同心円は 300 km 間隔。上段が CNTL のもので下段が TEST のもの。予測時間は FT=72 を対象にしている。図中、赤色は転向前、緑色は転向中、青色は転向後をそれぞれ表している。

ていることが、進路予測誤差の低減に寄与していると考えられる事例が見られた。統計的な検証結果においても、北西太平洋領域での風の場合の予測精度が向上していることや、降水予測精度が改善していることが確認されており、これらの改善が進路予測の精度向上につながっていると考えられる。

一方、改悪は 4 か月のうち 6 月下旬から 7 月中旬の間の 4 事例に集中していた。特に、2015 年 7 月に北西太平洋の北緯 25 度以南で相次いで発生し、連なって西進した 3 つの台風 T1510, T1509, T1511（図 1.2.4）のうち T1510 と T1511 について、TEST において進行

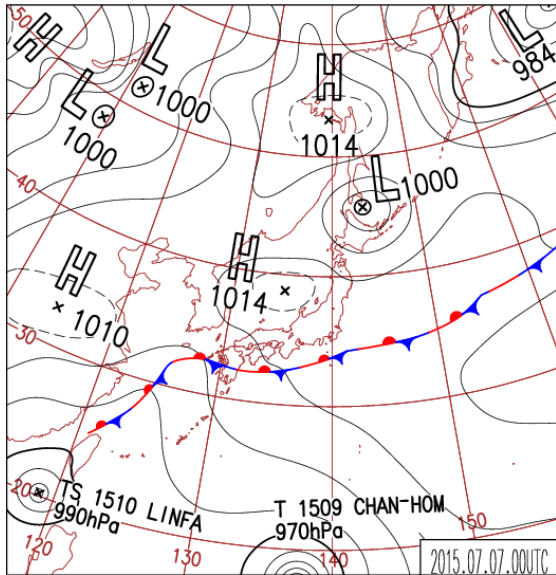


図 1.2.4 2015 年 7 月 7 日 00UTC の気象庁天気図。アジア太平洋地上天気図の日本と台風周辺を拡大して表示。

が遅れる誤差の増加や、北上・南下などの進行方向のずれが目立つ結果となった。

それらの悪化事例を調査したところ、中下層風速の変化から、台風間の相互作用がより働くようになったことが一因と推察された。今回の変更により、統計的には GSM における台風はより中心気圧が低く、強風半径が大きく表現される様に変化しており、その変化と T1510 や T1511 での誤差の増加の関連が疑われる（これらの点には後で触れる）。台風間の相互作用が強く働くような状況においては、進路予測は大気場の細かい違いの影響を受けやすく、その予測はより難しいと考えられる。今回の試験内での少ない事例からの判断であるため推測の域を出ないが、この 3 つの台風のケースのように、台風間の相互作用が存在する可能性のある事例では、相互作用が現実よりも強く表現されてしまった場合に誤差が増加する可能性があるため、台風が近接している場合の予測結果については、これまで以上に不確実性を高く見積もる必要がある。

TEST の特性変化により予測が難しくなっただと考えられる期間を除いた場合の結果を確認し、その他の台風についての改善を明瞭にするため、これら 3 つの台風が存在する期間を除いた、7 月下旬以降の期間についての検証を行った。図 1.2.5 に、夏期試験期間のうち 7 月 20 日 00UTC 以降の予測結果についての、T1512 から T1523 までの台風 12 事例について平均した予測時間毎の進路予測誤差を示す。この 7 月下旬以降の期間での改善幅は図 1.2.1 よりも大きく、その傾向は明瞭である。

(4) 強度予測

図 1.2.6 に、夏期試験期間の全台風の中心気圧予測について、横軸にベストトラックの解析値（以下 BST）、縦軸に GSM の予測値を取った散布図を予測時刻別に示す。

FT=0 の初期値で CNTL と TEST を比較するとほ

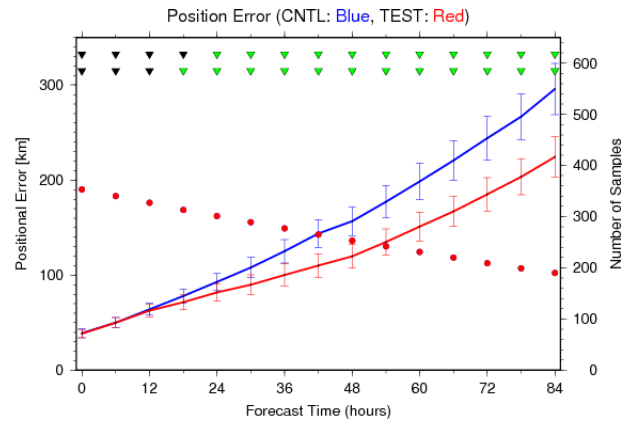


図 1.2.5 夏期試験期間のうち、7 月 20 日 00UTC 以降に期間を絞って検証した進路予測誤差 [km]（実線、左軸）とサンプル数（点、右軸）。この期間には T1512 から T1523 までが含まれる。図の表示は図 1.2.1 と同様。

とんど揃っており、初期時刻においては台風ボーガスによる修正が強く効いていることを示唆している。台風ボーガスの役割として、モデルの分解能に合わせて台風のシャープさを適切にする効果があり、初期値の段階で BST より低い中心気圧はほぼ表現されていない⁶。FT=24 まで進むと、TEST では予測が 940 hPa を下回り BST より発達しすぎた事例が CNTL よりやや増えており、一方で予測が浅すぎる事例がやや減っている。FT=48, 72 でも傾向は同様で、BST ではある程度発達しているが、予測が浅すぎる事例の減少がより目立つ。今回の GSM 変更により、北西太平洋領域に限らず、熱帯低気圧はより発達しやすい方向に予測特性が変化している。また、図に示した FT=0 から FT=72 までの予測時間でも確認できるが、GSM1603 には予測時間が進むにつれて熱帯低気圧の発達が強まる傾向がこれまでよりも見られた。今回の試験期間においては、特に 5 日目以降で顕著な事例が存在した。

BST と比較した場合、予測が強すぎるかどうかは発達ステージに依存する。例として図 1.2.7 に 2015 年台風第 13 号の予測結果の比較を示す。この台風は期間前半で急速に発達している。GSM は CNTL, TEST とともに急発達を予測できていないが、TEST は CNTL に比べるとかなり気圧を下げる予測となっており、期間前半で見ると中心気圧が浅い予測誤差は改善していると言える。一方で、その後台風中心気圧の変化が停滞もしくは衰弱する期間では、TEST の方がより気圧を低く予測する分、深すぎる誤差は悪化している。ただし、停滞を予測できない点では CNTL も同じである⁷。

⁶ 台風ボーガスの改良が平成 28 年 9 月 28 日の 00UTC 以降導入されており（気象庁予報部 2016）、変更後は初期値でもやや深い中心気圧が解析されるようになる。

⁷ 熱帯低気圧の強度予測については、各数値予報センターのモデルについてある程度共通した誤差傾向が見られるようである（梅津・森安 2013）。台風に関係する物理プロセスへの理解不足、海洋を同時に予測していないこと、サブグリッド・パラメタリゼーション手法が前提としている条件の破綻、モ

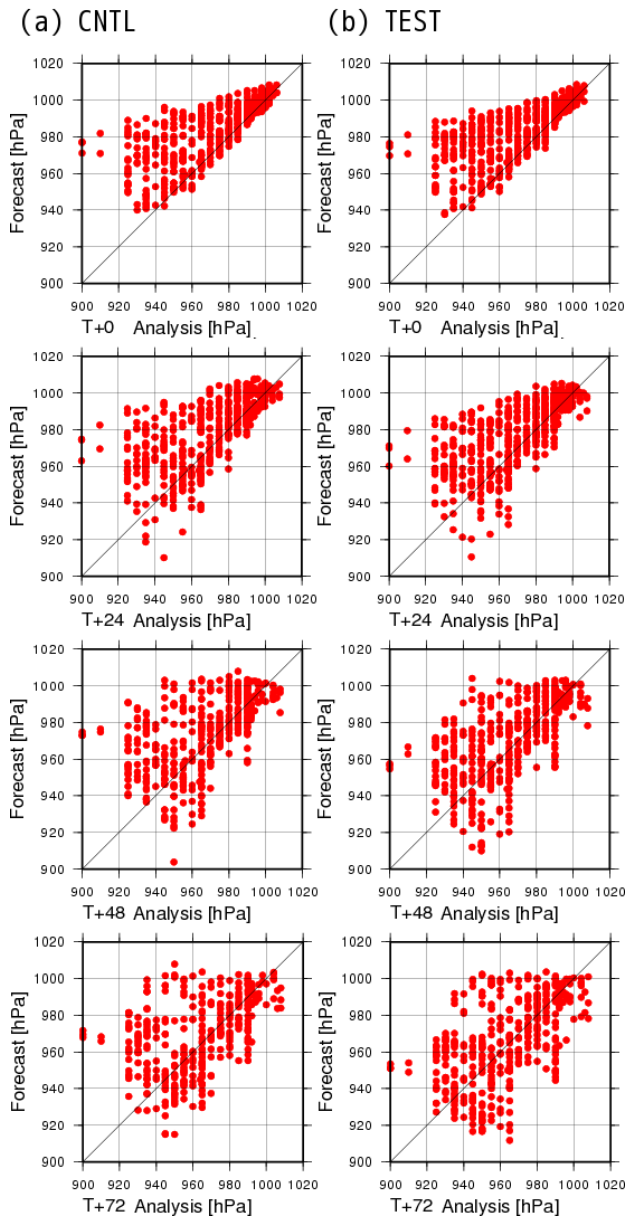


図 1.2.6 夏期試験期間の全台風の予測について、ある予測時刻の中心気圧を横軸がベストトラックの解析値、縦軸が予測値で散布図にしたもの。左列 (a) が CNTL、右列 (b) が TEST についてのもので、上段から FT=0, 24, 48, 72 についてのもの。サンプルは揃えておらず、両者それぞれ追跡できたものを対象としている。

この事例のように、中心気圧予測の誤差傾向は発達ステージに依存する。統計的にみても発達期で BST ほどは深めにく⁸、停滞期・衰弱期に逆に発達させてしまう傾向⁹は TEST と CNTL で基本的に同じである。ただし、どのステージでも TEST は CNTL よりも中心気圧を深く予測する傾向であるので、その誤差

デルの分解能の不足など、多くのモデルに共通する課題が多数存在していると思われる。

⁸ 特に急速に発達する場合 (Rapid Intensification) はほぼ再現できていない。

⁹ もちろん全ての事例に当てはまるわけではない。

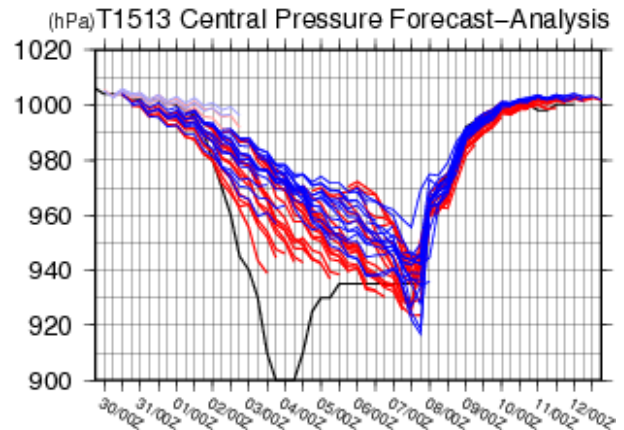


図 1.2.7 T1513 について、中心気圧の予測結果の比較。赤線が TEST で青線は CNTL。黒線がベストトラックによる解析値である。横軸が予測対象時刻、縦軸が中心気圧。

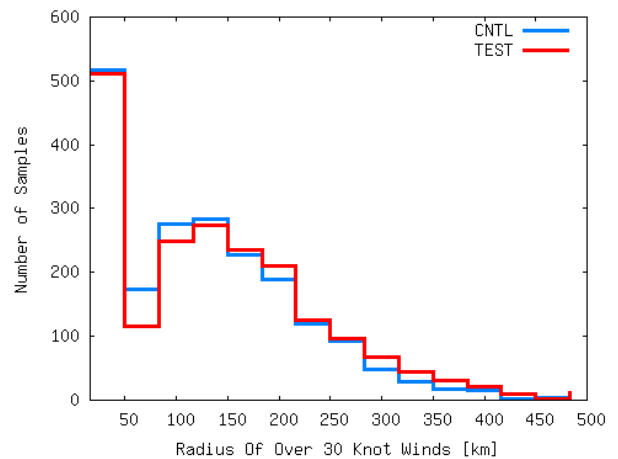


図 1.2.8 夏期試験期間の全台風の FT=48 の予測について、追跡された中心から東西南北それぞれの方向の地上風速 30 ノット半径 [km] について出現数を比較したもの。赤線が TEST で青線が CNTL。横軸が地上風速 30 ノット半径で縦軸が出現したサンプル数。半径 0 km から 50 km のビンには強風域を持たなかった事例も含む。

は、発達期では CNTL よりも BST に近い中心気圧を予測する事例が増加し、停滞期や衰弱期では CNTL より更に発達させてしまう事例が増加した。停滞期や衰弱期を適切に予測しにくい傾向については、台風の通過に伴い海面水温が低下する効果などが取り扱われていない点などの影響も考えられるため、台風の進行速度や海洋の貯熱量などに注意が必要である点はこれまでと変わらない。

(5) 強風域の半径

次に、台風の大きさについての予測特性の違いを示すため、その一つの目安として地上風速 30 ノット半径を用いた比較を行う。図 1.2.8 に、夏期試験期間の全台風の FT=48 の予測について、追跡された中心から東西南北それぞれの方向の地上風速 30 ノット半径について出現数を比較したものを示す。

概ね、半径 150 km 以下では CNTL の出現数が多く、それ以上では TEST の出現数が多くっており、この指標では台風がより大きく表現されていることを示唆する結果となっている。この比較は地上風速が強い領域の広がりに基づくものであるが、実際に個別の事例について地上気圧や 500 hPa 高度場でみても、台風がやや広がっているように見える事例が多い。数値実験に基づくベータ効果による熱帯低気圧の移動（ベータドリフト）の議論から、強風域の半径が大きいほど移動速度は速くなることが知られている (Fiorino and Elsberry 1989)。今回の変更により強風域の半径が広がったことは、台風の進行遅れ誤差が減ったことに関連している可能性が考えられる。

TEST で強風域の半径が広がった要因として、積雲過程と雲過程の変更が考えられる (第 1.1.3 項)。CNTL では、積雲過程による比湿ゆらぎ幅調節の結果、対流活動域において雲過程による降水量を多めに表現していた。これは、熱帯での中層乾燥バイアスの拡大をもたらし、また台風周辺でレインバンドが自然な分布にならず、細切れ状の降水域表現になる問題を生んでいた。改良の結果 TEST では、熱帯での中層乾燥バイアスが改善し、台風付近での降水量が増加しやすくなるとともに、より自然なレインバンドを表現するようになっている。

これら中心気圧・強風半径についての比較結果から、変更後には台風の強度が強くなり、強風域が大きく表現される事例が増加する可能性が高い。

(6) 台風事例

台風に関連する事例についていくつか紹介する。

関東・東北地方での豪雨事例

台風進路予測が改善した結果、降水予測が改善した例として、2015 年 9 月 10 日 00UTC を対象時刻とする、関東から東北にかけての強い雨の予測の比較を図 1.2.9 に示す。このとき、台風第 18 号から変わった日本海の低気圧に向かって南から流れ込む湿った風と、日本の東海上を北上していた台風第 17 号の周辺から流れ込む湿った風の影響により、南北にのびるライン状の降水域が次々と発生し、関東・東北地方に強い雨をもたらした¹⁰。

CNTL では、関東地方に強めの降水を予測しているものの、FT=36 でもライン状の降水域は表現できておらず、初期時刻ごとの降水分布の変化（初期値変わり）も大きくなっている。一方 TEST では、FT=48 の段階から、実況よりは 5 mm/3h の領域をやや北までのばしてしまっているものの、ライン状の降水域を良く表現しており、その点を予測する傾向については、異なる初期値の予測間でのぶれも小さい。

FT=60 において、日本海側の低気圧を見ると、CNTL では TEST と比べて中心が大きく南西に逸れ

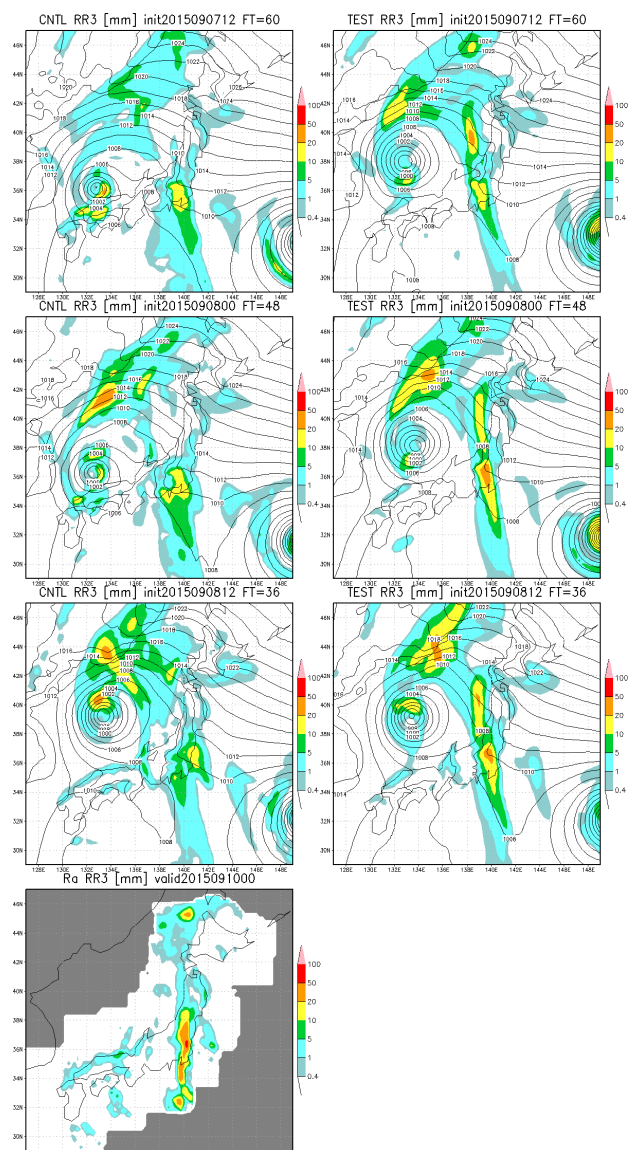


図 1.2.9 関東地方で豪雨となった、2015 年 9 月 10 日 00UTC を対象時刻とする GSM の降水予測（前 3 時間積算降水量 [mm/3h]）および海面更正気圧 [hPa] の比較。左列が CNTL（および解析雨量）、右列が TEST。上段から FT=60, 48, 36 の予測で、左列の最下段は解析雨量。

ていることが分かる。同じ予測対象時刻のものでも、FT=48, 36 と予測時間が短くなるにつれその位置は実況に近づいているが、TEST の予測は一貫している。図 1.2.10 に、FT=48 の初期時刻にあたる、2015 年 9 月 8 日 00UTC を初期値とする台風（低気圧）予測の比較図を示す。このとき、CNTL は上陸前から西に逸れ始め、中心位置の予測誤差が大きくなってしまっている一方で、TEST はベストトラックに近い非常に良い進路予測となっている。この事例は特に低気圧周辺の風系とそれに伴う下層収束の予測が降水予測に重要であり、低気圧が西に逸れると降水域も実況より西に表現されてしまうことがメソモデルの予測結果の分析などから示唆されている。

図 1.2.9 に示した比較は FT=36 以降であるが、TEST

¹⁰ 平成 27 年 9 月関東・東北豪雨 (気象庁 2015)

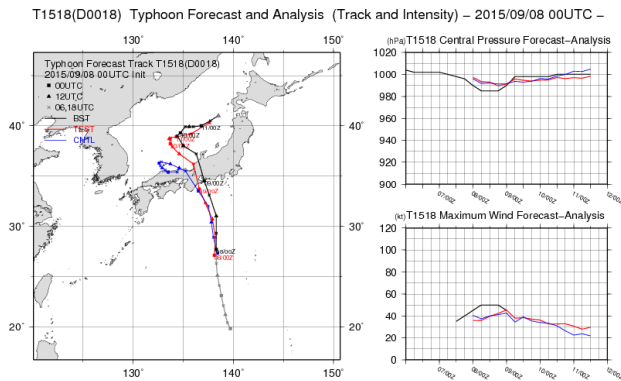


図 1.2.10 2015 年 9 月 8 日 00UTC を初期値とする T1518 の予測の比較図。図 1.2.9 の FT=48 の初期値に対応する。左側の図が進路予測図で、右側上段の図が予測時間に対する中心気圧の予測、下段が最大風速の予測である。赤が TEST、青が CNTL、黒線がベストトラックである。

の方が降水表現が実況に近い点については予測時間がさらに短い初期値についても同じである。台風（低気圧）の中心位置が概ね揃ってきた FT=6 や FT=12 においても、TEST は CNTL に比べて関東北部でのライン状の降水域の表現が良い（図略）。今回の改良により台風進路予測の精度が向上しただけでなく、積雲・雲過程の改良による降水予測特性の改善も、この事例での改善につながったと考えられる。

台風間の相互作用が強く表現された事例

台風間の相互作用が強く表現され、進路予測誤差が悪化したと思われる事例として、2015 年台風第 11 号 (T1511) の予測を紹介する。この時期の天気図は図 1.2.4 で示したものであり、西から T1510, T1509, T1511 と並んだ台風がいずれも概ね西進していた。図 1.2.11 に T1511 の予測結果（2015 年 7 月 6 日 06UTC を初期値）の比較を示す。この初期値では、予測時間が進むと CNTL, TEST とともにベストトラックに比べると北に逸れる傾向は同じであるが、TEST は CNTL よりも進行が遅く、また FT=24 以降ではより北に進む結果であった。

図 1.2.12 に、2015 年 7 月 6 日 06UTC 初期値の FT=24 での予測について、T1509 と T1511 の周辺の環境風の違いを見るため、鉛直平均した水平風を比較した図を示す。この初期値では T1509 の進路誤差は CNTL と TEST の差があまりなかったが、T1511 の進路は TEST の方が誤差が大きかった。赤いベクトルで TEST と CNTL の風の差（TEST から CNTL を引いたもの）を示しているが、両台風の間領域においては大きな差があることが分かる。この差は概ね、進行前面の T1509 から後面の T1511 へ向かう成分が強くなり、そして T1511 の周辺ではやや北向きの成分が強くなり、その進行を遅らせて北に逸らす風の差分となっている。等値線で表示した中心気圧を見ると、この時すでに TEST はやや進行が遅れており、この後の予測時

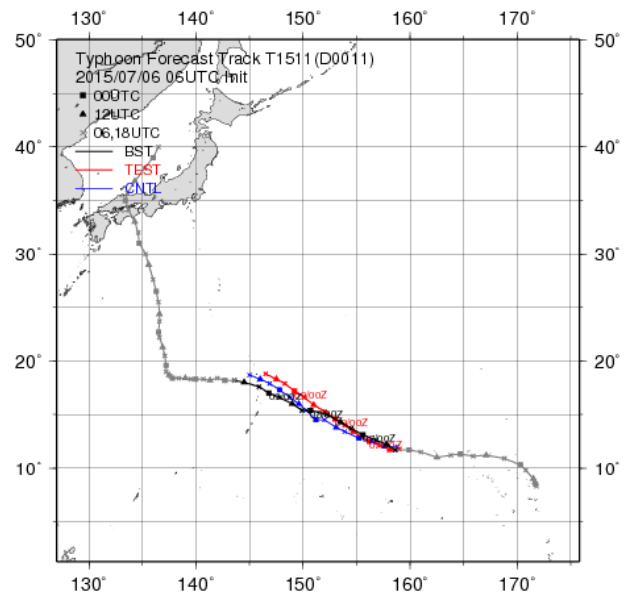


図 1.2.11 2015 年 7 月 6 日 06UTC を初期値とする T1511 の進路予測の比較図。赤線が TEST、青線が CNTL、黒線がベストトラックである。

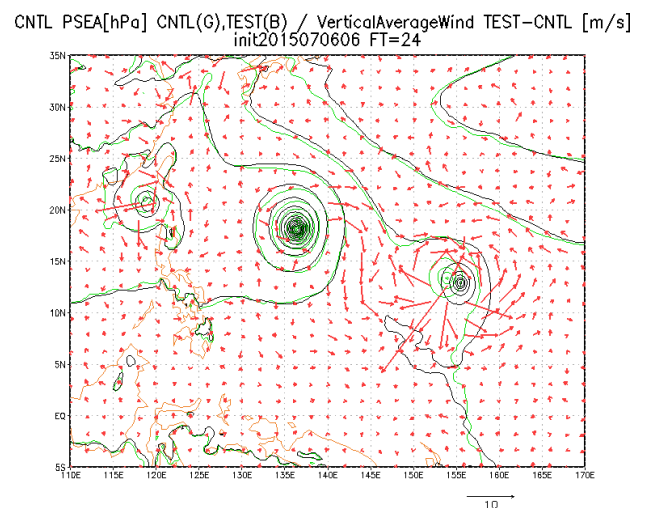


図 1.2.12 2015 年 7 月 6 日 06UTC を初期値とする FT=24 での予測について、T1509 と T1511 の周辺の風を比較したもの。風速は 850 hPa, 700 hPa, 500 hPa それぞれの面の風を平均したものである。緑線は CNTL、黒線は TEST の海面更正気圧。TEST と CNTL の風の差を赤いベクトルで表示している。図の擾乱は西から T1510, T1509, T1511 である。

間でも進行の遅れおよび北進傾向は拡大していく。

この初期時刻における T1511 だけでなく、T1510, T1509, T1511 の 3 事例については、TEST において、CNTL と比べて誤差や初期値変わりの拡大が見られた。これらの事例でも TEST では CNTL に比べ台風の強度が強く、強風域が広く表現されており、相互作用が強まっていると考えられる。相互作用だけが誤差の要因というわけではないだろうが、相互作用の強まりが誤差を拡大させた可能性が考えられる。

TEST における相互作用の強まり自体が良いか悪い

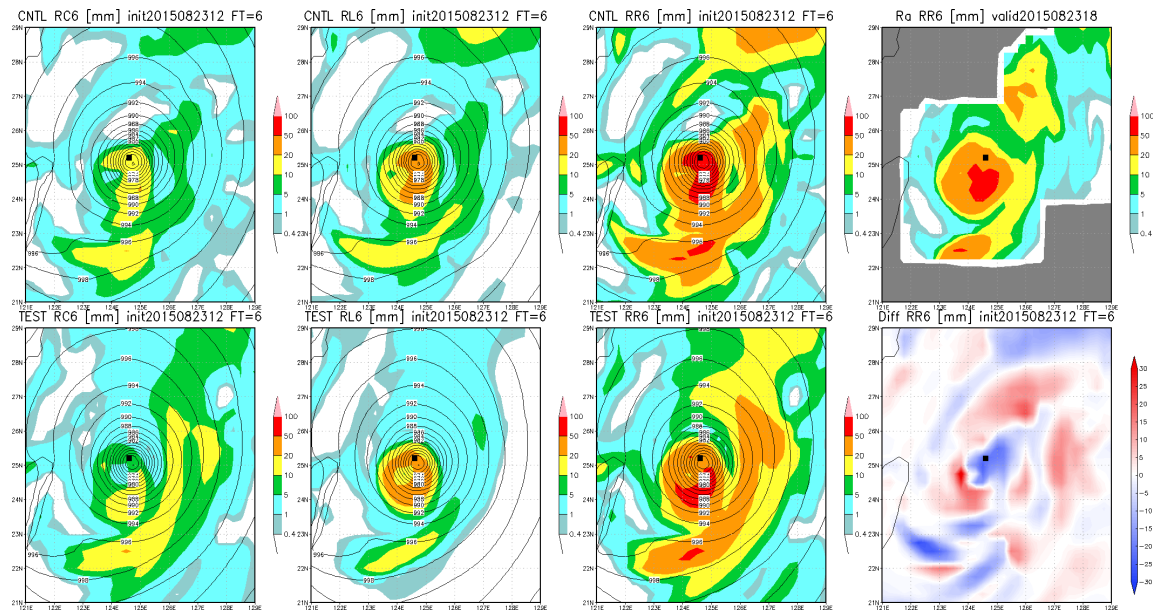


図 1.2.13 2015 年 8 月 23 日 12UTC を初期値とする FT=6 予測について、T1515 周辺の降水（前 6 時間積算値 [mm/6h]）を比較したもの。上段は左から CNTL の積雲過程 (RC: Rain by Convections) による降水量、雲過程による降水量 (RL: Rain by Large scale condensations)、合計した全体の降水量、解析雨量。下段は左から TEST の積雲過程による降水量、雲過程による降水量、合計した全体の降水量、TEST から CNTL の全降水量を引いた差分。黒点で解析された台風の中心位置を示している。また、解析雨量は予測の出力格子間隔に合わせて平均している。

かは、現状では検証材料が不十分であり判断できていない。事例によっては、CNTL で相互作用がうまく表現できなかったものが、TEST では改善される可能性はある。そもそも、複数の台風が存在し相互作用している状況では、進路予測の不確実性は大きく、わずかな差異が大きな違いを生みやすい状況と言える。現状では、台風間の相互作用について、統計的に十分な事例で試験を行うことは困難である。

台風付近の降水分布

海上における、台風付近の降水分布の変化の例として、沖縄付近を通過し解析雨量と比較可能な T1515 周辺の降水（前 6 時間積算値 [mm/6h]）を、2015 年 8 月 23 日 12UTC を初期値とする FT=6 での予測について図 1.2.13 に示す。GSM の降水は、積雲過程によるものと雲過程によるものに分解できるため、それぞれの結果も示している。

台風の南側の降水量を多く表現している点では TEST と CNTL は共通しており、解析雨量と比較してもある程度実況には合っている。しかし、CNTL はごく中心付近に強いピークを予測しており、解析雨量でみられる中心の南側にあるピークの表現については TEST の方が良い。この台風の中心付近での降水量の違いには、積雲過程による降水量の違いが主に寄与している。一方、台風周辺のレインバンドに相当する部分を見ると、TEST では CNTL と比べて積雲過程による降水量が増加し、雲過程による降水量が減少している。これは、第 1.1.3 項で解説した雲過程の変更のうち、比湿ゆらぎ幅調整の廃止の寄与が大きく、対流活動に合わせて雲過

程で降水を降らせやすくする調節を行わなくなったためである。この図ではあまり明瞭ではないが、今回の変更により台風周辺の S 字状のレインバンドがより明瞭に表現される事例が TEST では増えている。

事例ごとに変化の違いはあるが、本試験期間について台風の中心付近での総降水量はやや増える傾向である。これは、これまで台風からやや離れた場所で不自然に多かった雲過程による降水が今回の変更で解消された結果、より台風付近への水蒸気の流入が増加して降水になるためと考えられる。

(7) 台風予測に関する利用上の注意点

2016 年 3 月の全球数値予報システムの改良によって、台風進路予測の精度は大きく向上したと考えられる。ただし、予測特性についてその発達が強くなった点には注意が必要であろう。詳しくは記載しないが、発生の初期から発達度合いが強まり、全球でみれば熱帯擾乱は発生しやすくなっている。GSM の海面水温は初期偏差固定の気候値予測¹¹であり、海水の鉛直混合による温度低下を表現できない点は変わっていない。実況で海面水温低下の効果が重要になる事例では、これまで以上に過発達する可能性が高い。また、今期間の北西太平洋領域では見られなかったが、南半球では実況にない熱帯低気圧を表現してしまう事例が見られた。一旦出来てしまった熱帯擾乱は、観測データによる修正で消すことが難しいため、次の解析を跨いでも

¹¹ 海面水温については、初期値には解析されたものを用いるが、時間変化は直接予測せず、気候値の時間変化量のみを考慮する。

残存してしまう可能性がある。また、より発達し、広がった台風を表現しやすくなったため、これまで以上に台風間の相互作用や上層のジェットに流されるタイミングなどにおいて、過剰な相互作用を表現する可能性が高まった。これまでの GSM は、予測時間が進むと台風の大きさが実況よりも小さく予測される事例が見られ、相互作用が働きにくかった面があったことを考えると、今回の特性変化は良い方向と考えられるが、一方で相互作用が過剰となる事例も増えると考えられる。CNTL の特徴として、下層主導で強い加熱を表現し、500 hPa 付近で見ると暖気核を十分に表現しないまま台風を急発達させる例が稀に見られた。このような事例は実況と比較して過発達である場合が多く、暖気核の有無が過発達を見分ける一つの指標であったが、GSM1603 では加熱率の鉛直プロファイルが大きく変わっており、必ずしも同様の判断が可能かどうかは不明である。この点を含めて、今後の運用を通じて台風予測の特性について調査を進めていきたい。

1.2.3 スケールの大きな場の予測

日本付近でのスケールの大きな場の予測について、その精度や注意すべき特性の変化について解説する。

(1) 日本付近の統計的予測精度の変化

まずはじめに、日本付近の統計的な予測精度について FT=264 まで比較したものを図 1.2.14 に示す。参照値としてはそれぞれの解析値およびラジオゾンデの観測を用いている。対解析値検証では平方根平均二乗誤差 (RMSE) 改善率とアノマリー相関係数 (ACC) の TEST と CNTL の差、対ゾンデ検証では RMSE 改善率と相関係数 (CC) の TEST と CNTL の差を指標としている。

図に示したように、予測精度は予測時間や要素によって改善改悪の違いが大きい。まず、3 日目までに着目すると、この予測時間の範囲では RMSE と相関係数ともに概ね改善傾向である。夏期では対ゾンデの 850 hPa 気温 (T850) 以外は概ね中立から改善傾向である。特に対解析の T850 の改善幅は大きい。対ゾンデの T850 の悪化は、大陸内部での低温バイアスの拡大が主に寄与しており、検証対象を日本のラジオゾンデに限ればほぼ中立である¹²。T850 についての対解析と対ラジオゾンデでの結果の違いは、主に海上と陸上での予測特性の変化の違いに起因している。海上では改善した領域が多いが、陸上の特に内陸山岳部では、活動度の増加とともに RMSE が増えた領域が見られた。冬期では海面更正気圧 (PSEA) が悪化傾向であるが、その他は中立からやや改善がみられる。PSEA で悪化となった原因には FT=36 程度までは解析活動度の増加や、地上低気圧の表現が解析値でやや深く、予測値では予測時間が進むと CNTL より浅く表現するようになった点

が主に寄与しており、個別事例で見るとあまり違いは目立たないが、FT=48 以降は低気圧の位相ずれや浅い誤差の増加が目立ってくる。

4 日目以降に着目すると、夏期で一旦 5 日から 7 日目に悪化のピークが存在し、特に PSEA で顕著である。このスコアの悪化には、個別の事例の気圧分布を確認すると、台風および陸面での日変化の寄与が大きい。TEST では台風がこれまでより発達するようになり、CNTL と TEST の差は予測時間が進むにつれて大きくなる。特に解析値を参照値とした場合、解析の水平分解能¹³が十分でない問題もあり、ベストトラックなどの実況と比較して解析値では浅く台風が表現されることが多く、予測時間が進み台風が発達するほど解析値との大きな差が生じてしまう。また、陸面過程の改良により、太陽放射に対する地表面の気象要素の応答がより良く表現されるようになったが、日射量の予測が外れた場合は PSEA も大きな誤差を持つようになっている。図 1.2.15 に、PSEA についての Taylor 図¹⁴を示すが、FT=0 の段階では TEST の活動度は CNTL よりもかなり低下している一方で¹⁵、予測時間が進むにつれて過活動になり、ほぼ一定値を保っている CNTL を追いついてしまう。この点が TEST の予測精度にかなり悪影響を与えている。TEST では予測時間が進むにつれて活動度が大きくなりすぎてしまう問題が熱帯を中心に他の要素でも起きている。現時点では、陸域での放射収支の誤差や海上での対流活動の誤差が原因ではないかと考えているが、活動度の改善は今後の課題の一つである。

(2) 500 hPa 高度場のバイアス

GSM1403 では、それ以前の GSM と比較して、日本の南側の海上など対流活動が活発な領域を中心に 500 hPa 高度場 (Z500) の負バイアスが拡大した (米原 2014)。これは、そのとき実施した積雲過程の変更により、700 hPa から 600 hPa を中心として低温バイアスが拡大したことが要因であった。

図 1.2.16 に、夏期試験について、FT=48 における Z500 のラジオゾンデ観測地点での平均誤差 (ME) を示す。図を見ると TEST では、太平洋側の観測地点において、Z500 の負バイアスが減少していることが分かる。今回、TEST では積雲過程の改良により GSM1403 で拡大した低温バイアスが改善し、Z500 の負バイアスが減少した。一方で、北海道や東北など北緯 40 度以北で、これまで正バイアスであった地点では正バイアス

¹² ラジオゾンデ観測は大陸の内陸部が多い。

¹³ 全球解析による修正量は約 55 km の格子間隔で作成され、予測モデル (GSM) よりも粗い。

¹⁴ 予測の RMSE、ACC、活動度の変化が 1 枚の図で確認できるのが特徴である。見方の詳細については梅津ほか (2013) を参照いただきたい。

¹⁵ 初期値における活動度の変化は季節依存性がある。陸面過程の変更により、冬期では活動度は増加し、夏期では大幅に減少していることを確認している。

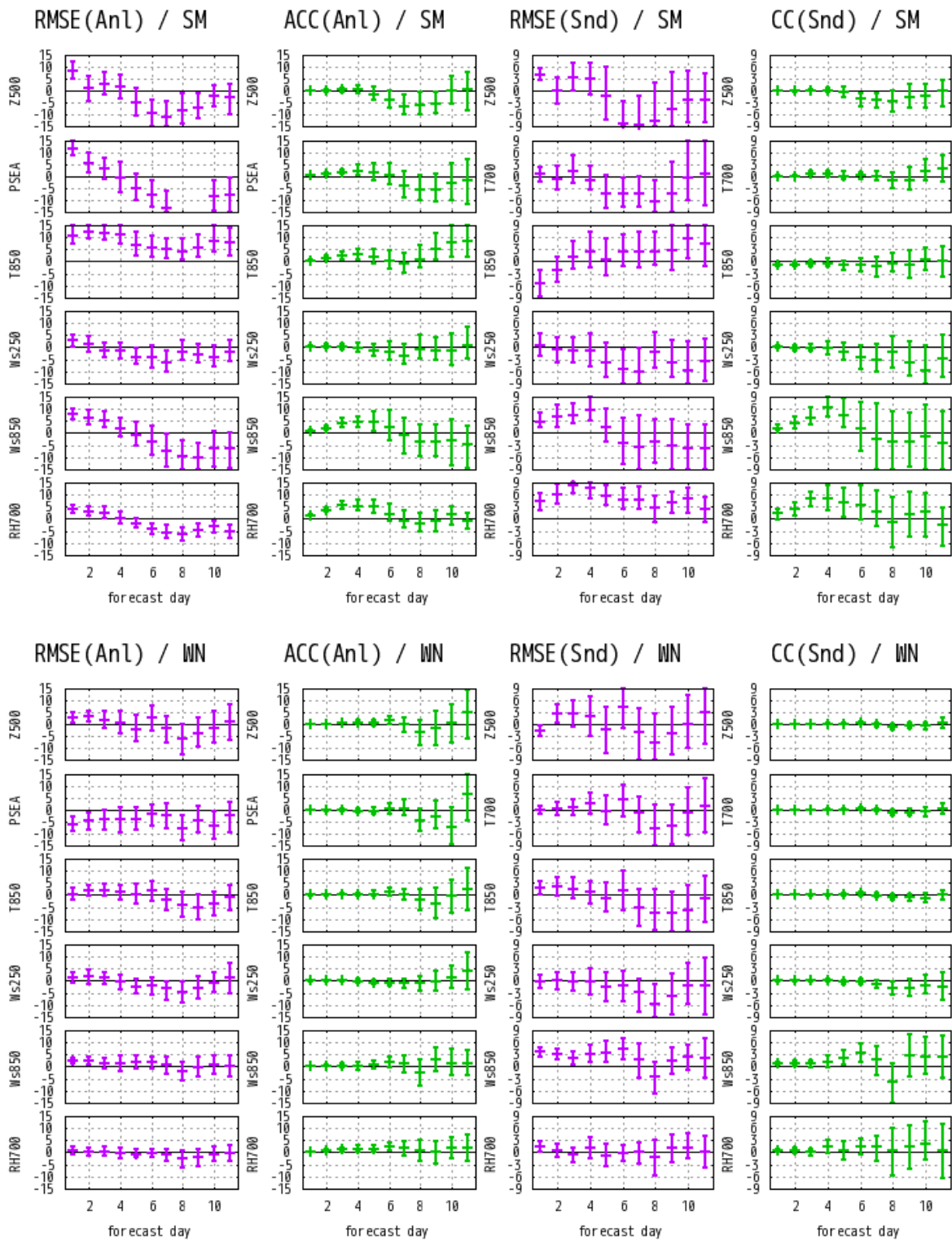


図 1.2.14 日本付近の予測時間ごと (FT=264 まで) の予測精度の比較。紫線が RMSE についての改善率 ((CNTL-TEST)/CNTL) で緑線が ACC または CC の差 (TEST-CNTL) であるため、それぞれのグラフにおいて中央より上側に線があれば改善を意味する。目盛の単位は RMSE 改善率が%で、ACC と CC の差分は 100 分の 1 である。図の上半分は夏期試験の結果 (SM) で、下半分は冬期試験の結果 (WN) である。検証領域は東経 110 度から 150 度、北緯 20 度から 50 度の領域である。対解析 (Anl) は CNTL, TEST それぞれの解析値を参照値として、対ゾンデ (Snd) は両方の試験で解析に利用されたゾンデ観測値を参照値として用いている。対解析は 500 hPa 高度 (Z500)、海面更正気圧 (PSEA)、850 hPa 気温 (T850)、250 hPa 風速 (Ws250)、850 hPa 風速 (Ws850)、700 hPa 相対湿度 (RH700) を対象とし、対ゾンデではそのうち 2 段目の PSEA の代わりに 700 hPa 気温 (T700) が対象となっている。エラーバーはブートストラップ法による 95%信頼区間を表す。

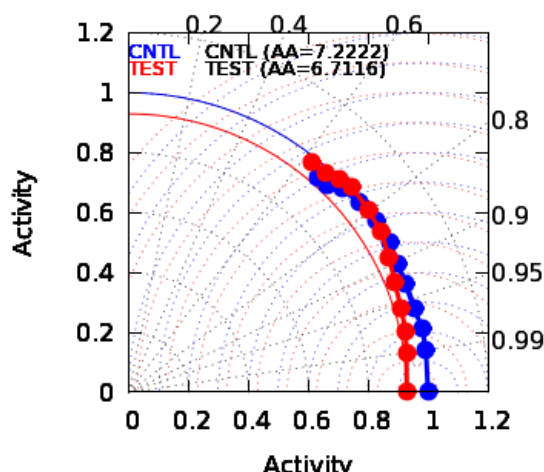


図 1.2.15 夏期試験での東アジア領域についての海面更正気圧の Taylor 図。青が CNTL で赤が TEST で、それぞれ一番下の点が FT=0 である。原点から各点への距離が活動度 (Activity) であり、予測の活動度が解析での活動度と同じであれば細線で描いた円周に乗る。FT=0 の点からそれぞれの点への距離が対解析値の RMSE になり、バイアスが無視できる場合には FT=0 の点と原点と予測値の点がなす角度の余弦が ACC に相当する。図中の AA は解析活動度 (Analysis Activity) であり、数値でそれぞれの値を示している。活動度は CNTL の AA で規格化してある。

が若干拡大してしまっている。元々、日本付近で GSM の 700 hPa 気温は南海上で低温バイアス、陸上で高温バイアスであり、南北の温度傾度が弱いバイアスを持っているが、今回の変更でその傾度が弱い問題は十分には解消できていない。ここでは FT=48 の結果について示したが、この差は解析値の段階から現れており、予測時間で FT=72 程度までは同様の傾向である。

図 1.2.17 に示す、日々の予測事例で Z500 を確認すると、太平洋高気圧の目安となる 5880 m の等高度線がかなり異なっていることが分かる。ほとんどの事例で 5880 m の等高度線はより広く張り出すように変化しており、天気図上でも CNTL と TEST の見た目は大きく異なる。一方で、地上で見た高気圧は TEST がやや強くなる事例が増えたものの、Z500 で見るほど明瞭に強く張り出すようになったわけではない (図略)。

(3) 中下層乾燥バイアスの減少

700 hPa 付近を中心とした中下層の乾燥バイアスの改善は GSM の長年の課題である。これまでは、熱帯など対流活動域を中心に大気中の水蒸気が降水になりやすく、中層が乾燥しすぎる傾向があったが、TEST では積雲・雲過程の改良により降水量が減少し、より水蒸気を保ちやすくなった結果、乾燥バイアスが CNTL の 3 分の 2 から半分程度に減少した。

図 1.2.18 に、夏期試験について FT=48 における 700 hPa 面比湿 (Q700) のラジオゾンデ観測地点での ME を示す。700 hPa は平均比湿の変化量が最も大きい高度である。図に示したように、TEST では日本の

南側の海上・太平洋側を中心に多くの地点で乾燥バイアスが改善している。ここでは FT=48 の結果について示したが、この差は解析値の段階から現れている。CNTL では予測時間が進むにつれて日本付近はより乾燥してしまう時間変化傾向を持っていたが、GSM1603 では始め一旦乾燥した後で、時間が進むとともに逆に湿っていく方向へ変化した。日本のラジオゾンデに対する検証結果に着目すると、FT=120 付近から正バイアスとなる地点が現れ始める。

この変化は、天気図でも明瞭に湿域の増加として現れる。図 1.2.19 に 2015 年 7 月 17 日 00UTC 初期値の予測について、700 hPa 相対湿度 [%] の比較を示す。図を見ると、FT=0 の解析値の段階から相対湿度が大きく異なっていることが分かる。一方的に湿るわけではなく、乾燥領域も広がるなどメリハリをよりつける変化となっている。特に太平洋高気圧の縁辺で水蒸気量が増加しており、南海上から日本付近への水蒸気供給が増えている。また、図の右下に見られる台風の周辺に注目すると、湿度の高い領域が広く分布するようになっており、その発達にも影響があることが予想される。この湿り域の変化は湿数で見ても同様であり、日々の FAX 天気図においても違いが見られると考えられる。

対流圏下層の低温バイアスと乾燥バイアスの改善の結果、相当温位などのバイアスも改善している (図略)。今回、陸面過程の改良により地表面温度が上昇しやすくなったことや (後述)、積雲・雲過程の改良により中層の乾燥バイアスが減少したことにより、大気安定度が不安定な状態を表現しやすくなった。これはショワルター安定指数 (SSI) など大気安定度を表す指標に影響を与えらると思われる。また、予測される可降水量も大きく増加している。湿りの変化は 700 hPa が最も大きく、その付近の高度の水蒸気量に感度のある指標は、これまでと表現が大きく変わることになる。そのため、予報作業において GSM が予測した指標に基づく判断基準を利用しており、特にそれが湿りに関係している場合は、その見直しを検討していただく必要があるかもしれない。

ここで見た中層乾燥バイアスの減少は、側面境界を通じてメソモデルの予測特性にも大きな影響を与えている。特に日本の南海上において、GSM から供給される大気の水蒸気量が増加し、大気の静的安定性が低くなった影響は大きい。

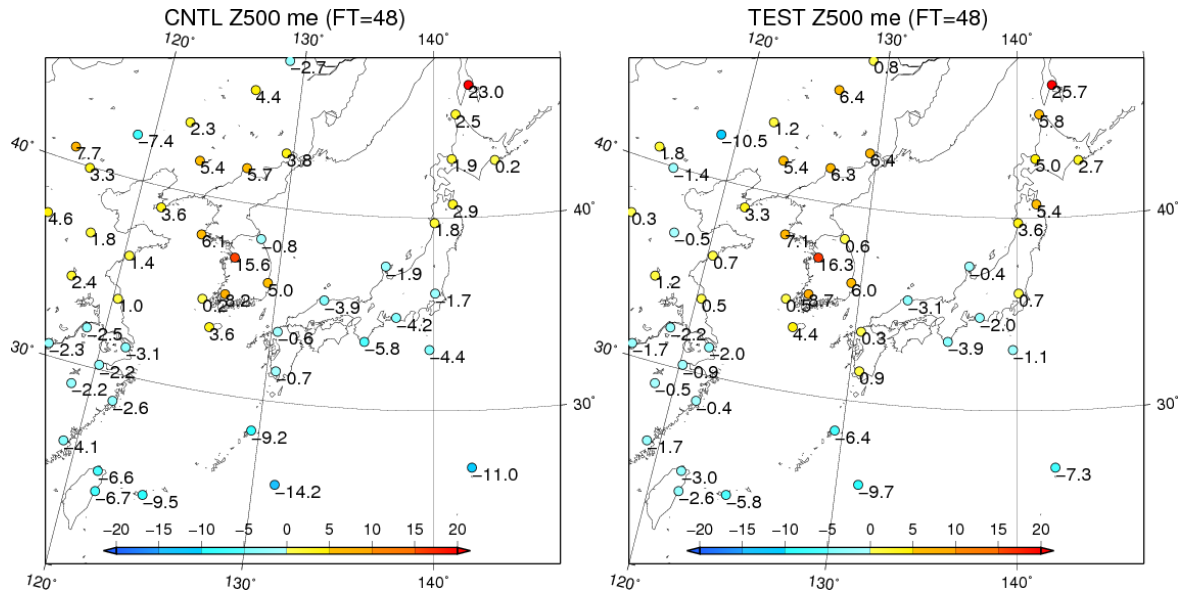


図 1.2.16 FT=48 での Z500 のラジオゾンデ観測地点での ME [m] の比較。検証期間は夏期試験の期間。上段：CNTL、下段：TEST。

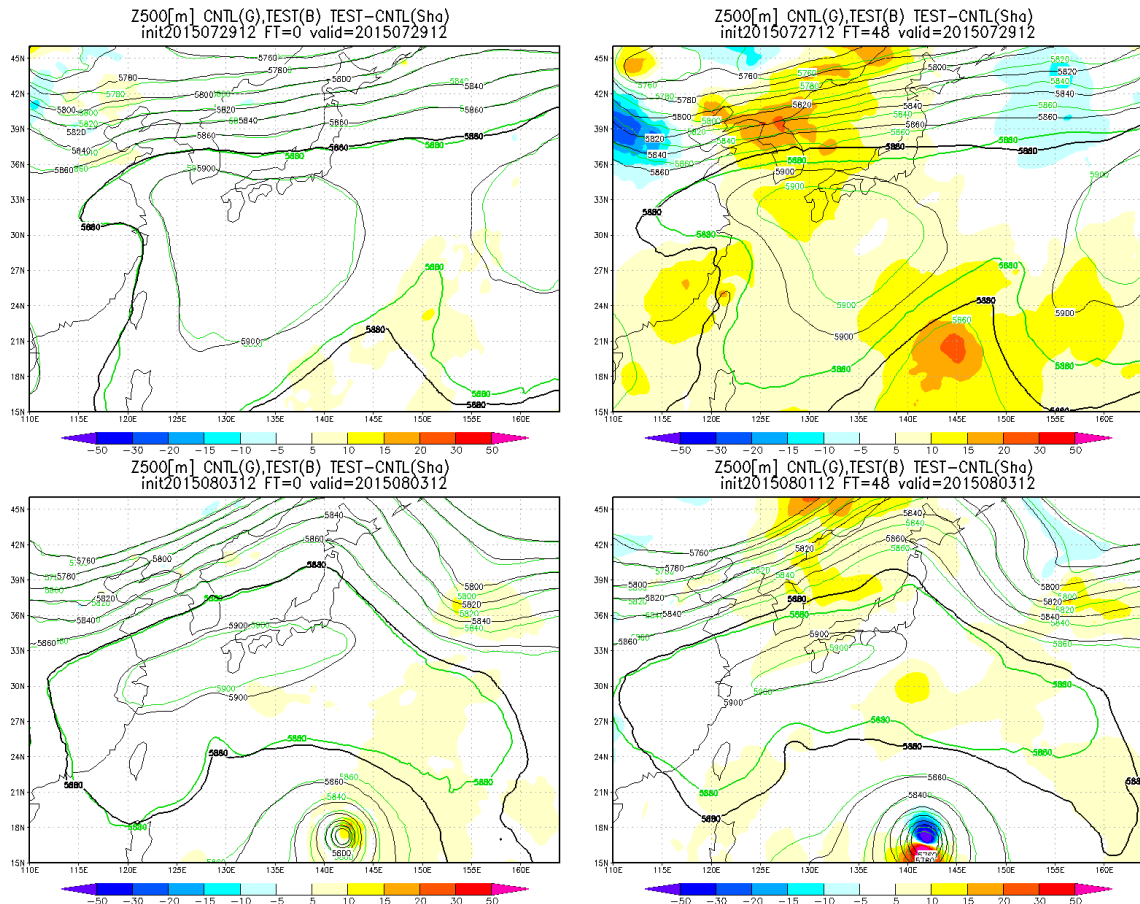


図 1.2.17 ある時刻を対象とする、FT=0, 48 での Z500 [m] 予測の比較。上段：2015 年 7 月 29 日 12UTC 対象、下段：2015 年 8 月 3 日 12UTC 対象。左列が FT=0、右列が FT=48 の予測図で、緑線が CNTL、黒線が TEST、色でその差分 (TEST-CNTL) を表示している。5880 m の等値線は他のものより太く示している。

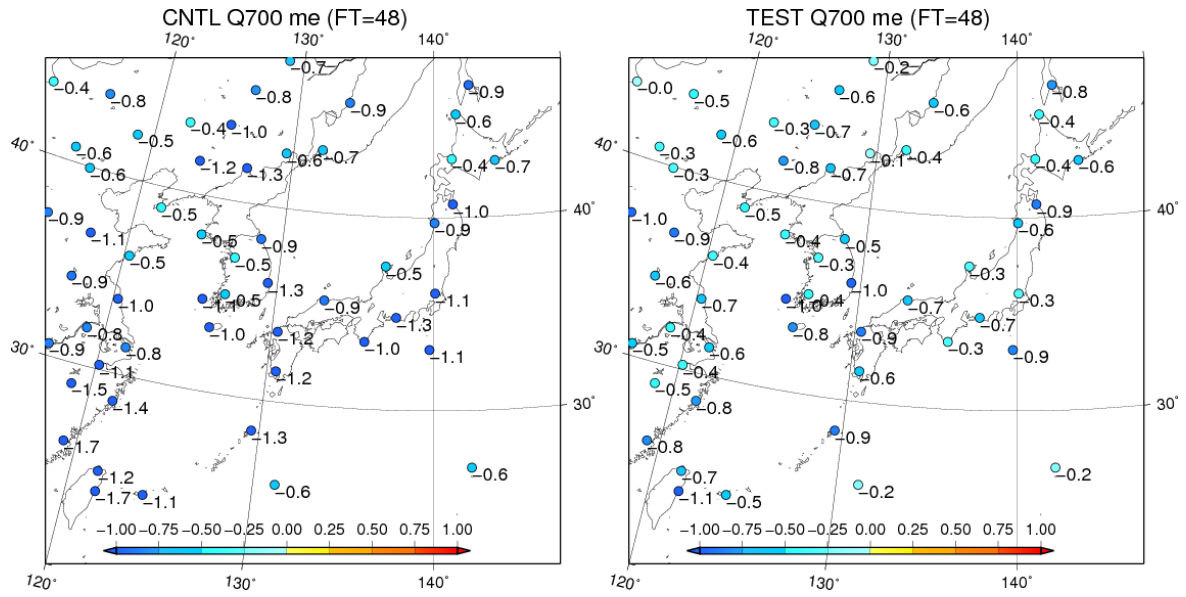


図 1.2.18 FT=48 での 700 hPa 面比湿 [g/kg] のラジオゾンデ観測地点での ME の比較。検証期間は夏期試験の期間。上段：CNTL、下段：TEST。

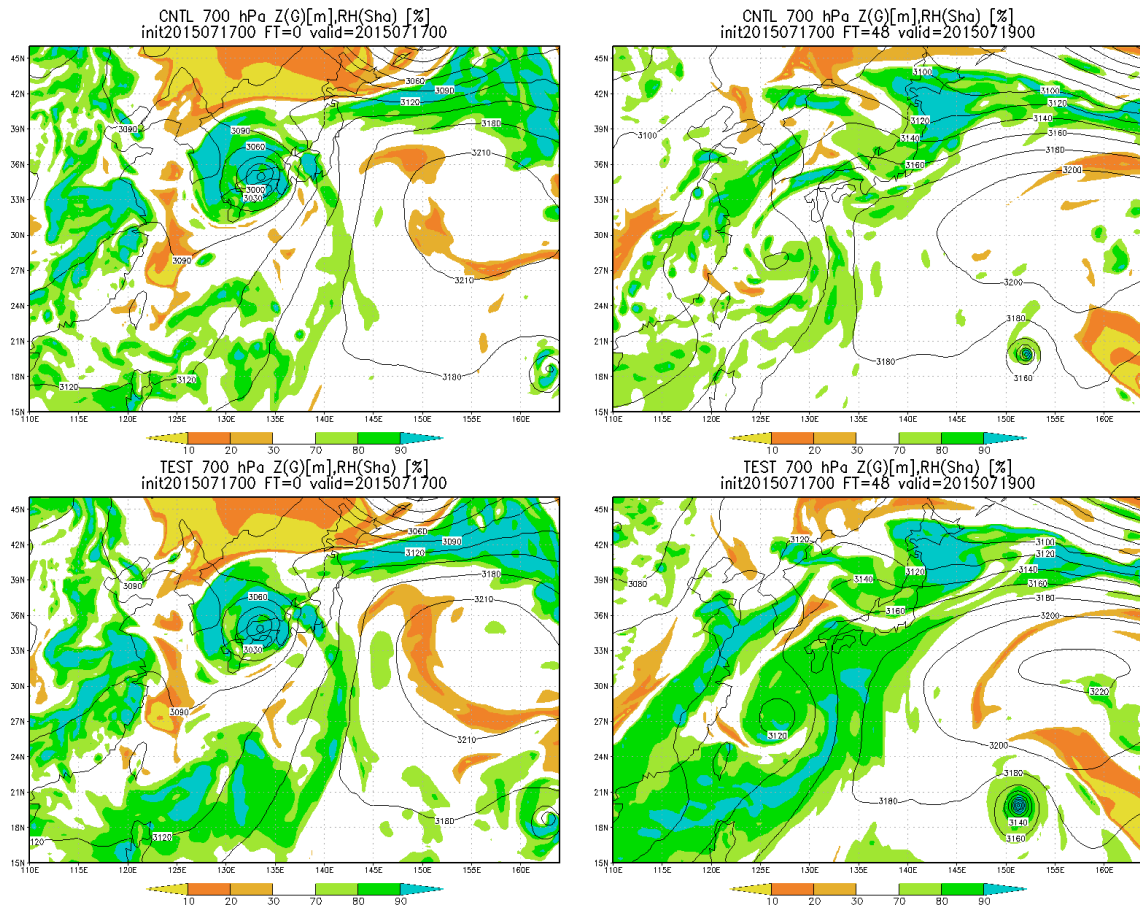


図 1.2.19 2015 年 7 月 17 日 00UTC 初期値での 700 hPa 相対湿度 [%] 予測の比較。上段：CNTL、下段：TEST。左列が FT=0、右列が FT=48 の予測図で、黒線がそれぞれの 700 hPa の高度 [m] を示している。

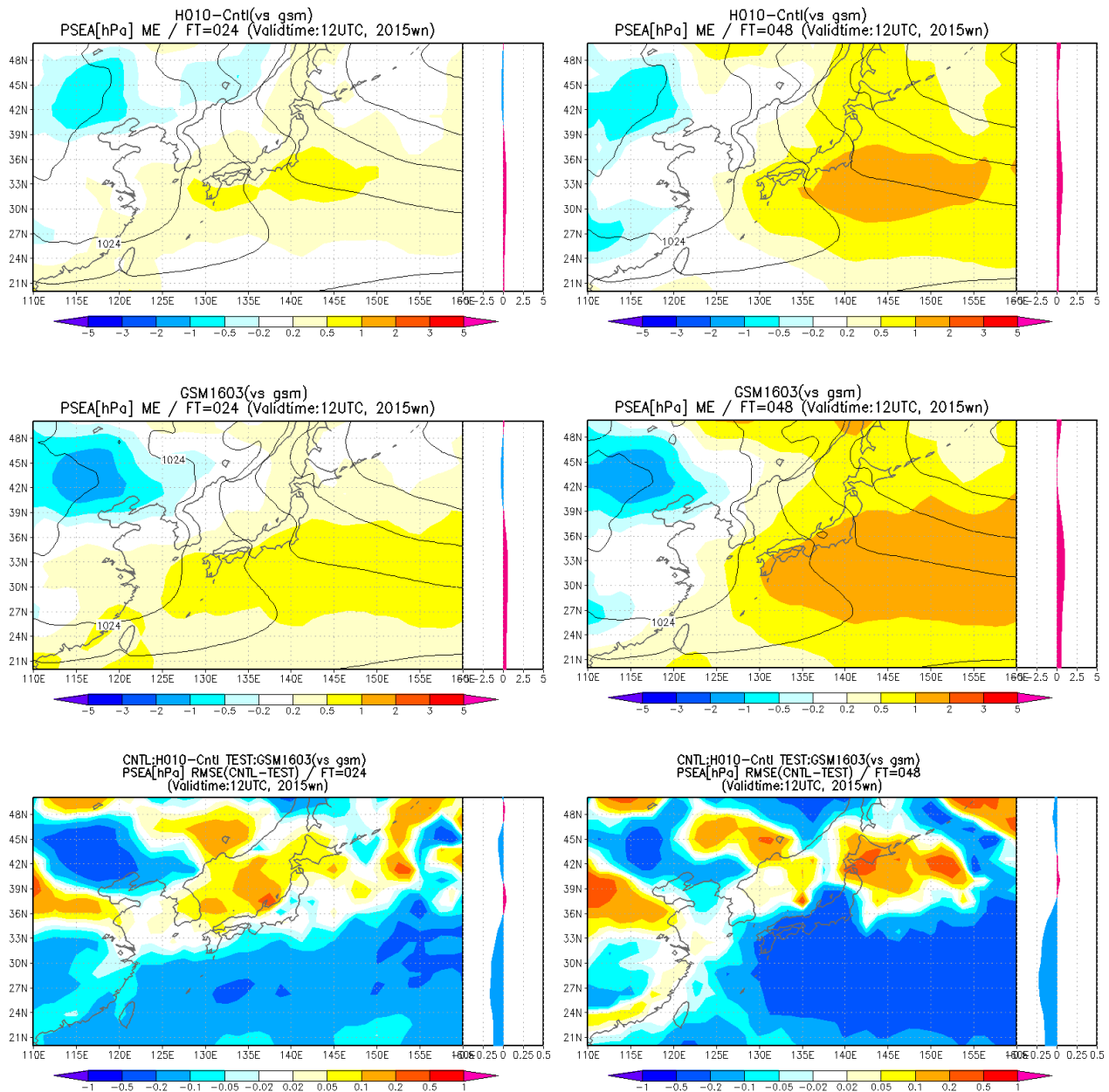


図 1.2.20 冬期試験についての、それぞれの解析値を参照値とした、日本付近の CNTL, TEST それぞれの ME および RMSE の差 (PSEA)。左列は FT=24、右列は FT=48 の結果である。各列の図は、上から CNTL の ME、TEST の ME、RMSE の差 (CNTL-TEST) である。ME の図中の黒線はそれぞれの海面更正気圧月平均値で、各図の右側に ME、RMSE の差についての帯状平均値を示す。

(4) 冬期の南岸低気圧の予測精度

TEST での問題点として、冬期の南岸低気圧の海面更正気圧で見た予測精度が悪化してしまったことが挙げられる。スコアで見ると予測時間の初期から悪いが、事例で見ていくと低気圧表現が天気図上で悪くみえる事例が増えるのは FT=48 付近からである。この予測時間付近から、擾乱が浅い、規模が小さいものを表現しない、進行速度が遅れるといった事例が増えてくる。

図 1.2.20 に、冬期試験についての、それぞれの解析値を参照値とした、日本付近の PSEA の ME および RMSE それぞれの、CNTL と TEST の差を示す。

ME を見ると、日本の南側沿岸部から東海上にかけて、CNTL でも存在した正バイアスがかなり拡大していることが分かる。この正バイアスには、解析値では TEST の方が深い低気圧を表現するようになったことと、低気圧の表現が予測時間が進むにつれて浅くなっていく傾向が強まったことの両方が効いている。

また、陸面過程の変更により、これまで冬期のユーラシア大陸北部に広くみられた夜間の大きな高温バイアスが解消し、低温バイアス傾向へ変化した結果、大陸からのシベリア高気圧の張り出しが強くなった影響も考えられる。RMSE の増加については、特に FT=24 まで

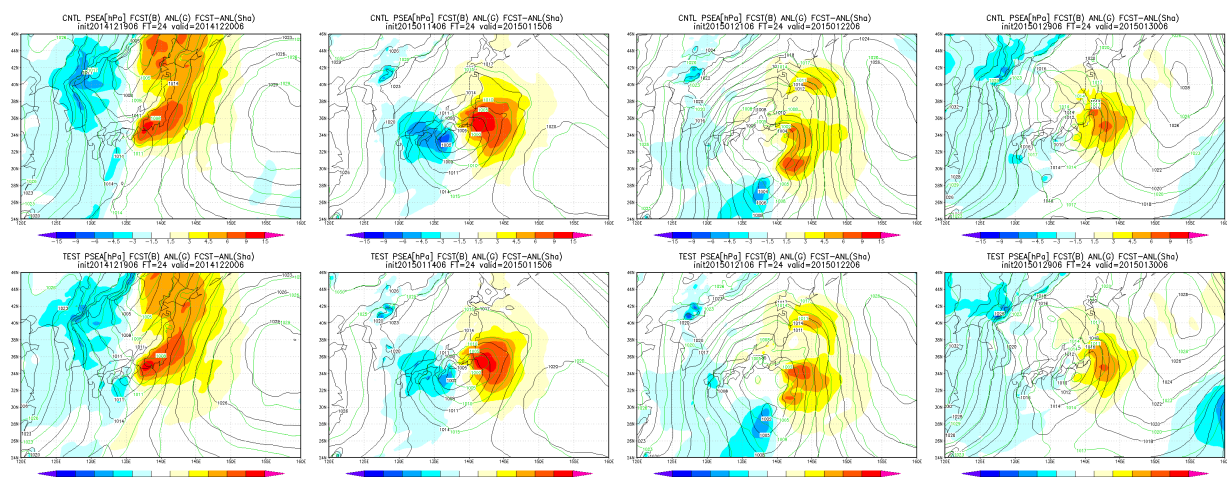


図 1.2.21 冬期試験期間内において、CNTL と TEST の違いが目立った南岸低気圧事例での海面更正気圧の比較 (FT=24)。上段: CNTL、下段: TEST。左から対象時刻が 2014 年 12 月 20 日 06UTC、2015 年 1 月 15 日 06UTC、2015 年 1 月 22 日 06UTC、2015 年 01 月 30 日 06UTC。黒線で予測値、緑線でそれぞれの解析値、色で予測値から解析値を引いた誤差を表示している。

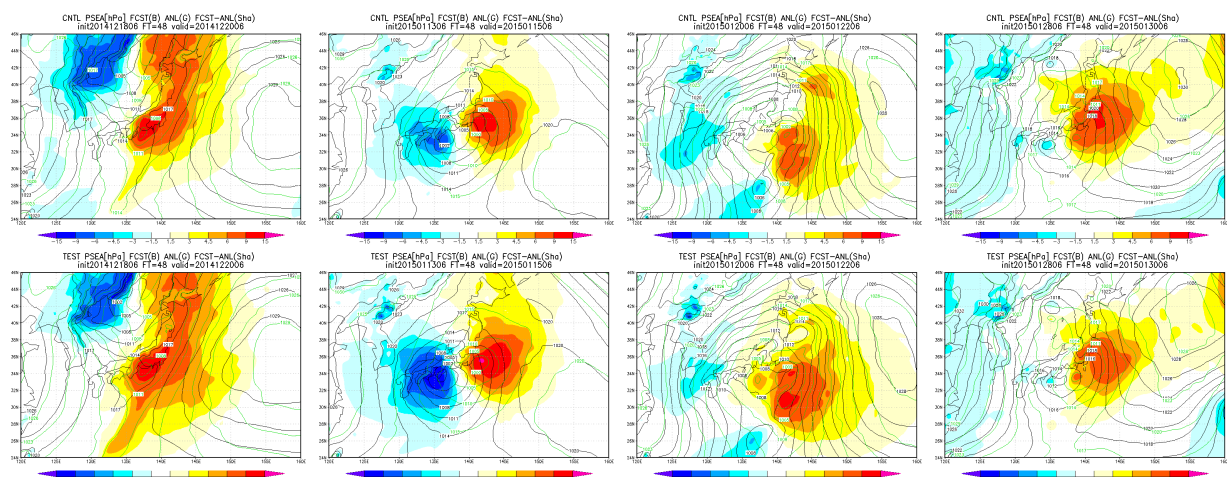


図 1.2.22 図 1.2.21 と同様。ただし FT=48 についてのもの。

は ME の増加が大きく寄与している。一方で、FT=48 まで進むと擾乱の位置ずれなどが見え始め、そちらの寄与も大きくなる。図 1.2.21 および図 1.2.22 に、FT=24、48 それぞれの予測時間について、海面更正気圧の解析値を参照値とする誤差を、南岸低気圧事例について比較したものを示す。FT=24 と FT=48 の結果の両方で、低気圧が浅く表現される、進行が遅れるといった定性的な誤差パターンは CNTL、TEST で共通である。

FT=24 では TEST の誤差の大きさはあまり CNTL と変わらず、事例と場所によっては改善している。降水予測を比較すると、TEST の方が改善している事例が多く、PSEA の RMSE で見えた精度の悪化は、擾乱の予測の観点では問題になりにくいと思われる (図略)。一方で、FT=48 以降では地上低気圧について、より浅くなる誤差の拡大や、進行遅れの拡大が事例によってはやや目立つようになり、特に位相の遅れについてはそれに対応した降水予測の差が見られる。

1.2.4 降水予測

この項では、解析雨量を参照値として、TEST での降水予測特性の変化について説明する。第 1.2.2 項の (6) で台風事例の一つとして降水予測が大幅に改善された結果を紹介したが、今回の改良では台風に限らず、降水予測が夏期を中心に非常に大きく改善している。

(1) 夏期の降水予測の統計検証

夏期の降水予測について、統計検証の結果から変化の傾向を解説する。図 1.2.23 に、夏期試験における、事例ごとの FT=6 の、降水量の閾値 1 mm/3h でのエクイタブルスコア (ETS) の差 (TEST-CNTL) を示す。参照値は解析雨量である。図を見れば改善は明瞭であり、ETS が改善した事例が卓越している。この期間では CNTL の期間平均値が 0.3 程度に対し、図の一目盛は 0.05 とかなり大きく、事例ごとに見ても改善幅は大きい。FT=6 ではバイアススコア (BI) で見た予測頻度も改善しており、CNTL、TEST とも 1 より大

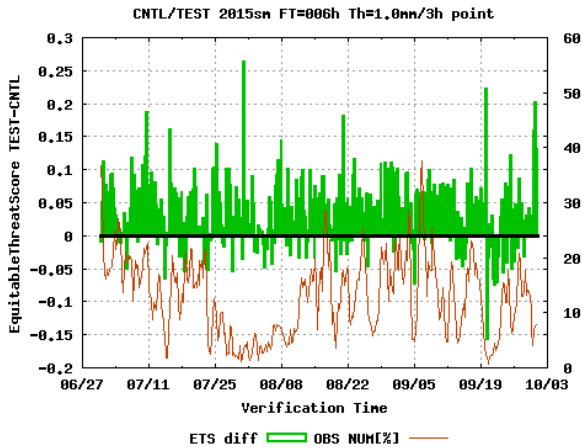


図 1.2.23 夏期試験期間について、事例ごとの FT=6 におけるエクイタブルスレットスコアの差 (TEST-CNTL)。参照値は解析雨量である。前 3 時間降水量の閾値 1 mm/3h で、緑の棒でスコアの差 (左軸) を、茶線で全検証格子数に対する降水あり格子の率 (右軸) を表示している。緑の棒が上 (正側) にあれば改善。

きく過剰ではあるものの TEST の方が小さい (図略)。この予測時間では CNTL と TEST の気温・比湿・風についての表現の違いは、予測時間が進んだ先と比較すると小さく、積雲過程や雲過程の改良による降水予測の改善をより直接的に見ていることになる。予測時間が進むに連れて事例ごとの改善・改悪のばらつきは増えていくが、改善傾向は維持される。

図 1.2.24 に、夏期試験の検証期間 (7, 8, 9 月) について、予測時間ごとの ETS を比較したものを示す。降水量の閾値 1 mm/3h を見ると FT=3 から FT=84 までの全ての予測時間で ETS による予測精度は大幅に改善している。期間中に改善事例が卓越していることもあり、TEST と CNTL の差に対して 95%信頼区間は狭く非常に明瞭な差となっている。このような大幅な改善は、GSM の開発において同等の検証を行うようになって以来前例がなく、降水予測の精度に対する物理過程、特に積雲・雲過程の重要性を示している。また、閾値 10 mm/3h では ETS は FT=84 まで小幅な改善となっている。

FT=24 および FT=48 に予測時間を固定して、閾値別の変化傾向を議論する。図 1.2.25 に降水量の閾値ごとの ETS の比較を示す。閾値別に見ると、1 mm/3h から 5 mm/3h までは改善、10 mm/3h と 20 mm/3h では弱い改善の結果であり、FT=24, 48 の両者において同じである。

夏期について、BI の変化から降水頻度の特性変化を見ていく。図 1.2.26 に、夏期試験の検証期間についての、予測時間ごとの BI を示す。まず CNTL, TEST に共通する予測時間に対する変化を見ると、両方の閾値で予測時間が進むにつれて BI は概ね減少傾向である。BI が一定せず変化し続けていることから分かるよう

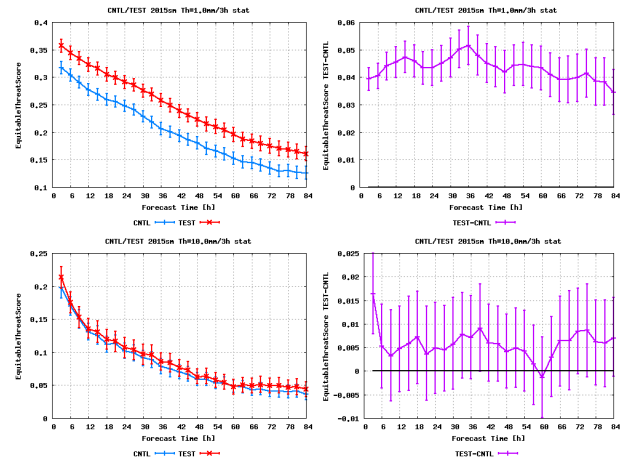


図 1.2.24 夏期試験の検証期間 (7, 8, 9 月) についての、予測時間ごとのエクイタブルスレットスコアの比較。左列の赤が TEST で青が CNTL、右列の紫は TEST と CNTL の差分 (TEST-CNTL) を表す。上段が降水量の閾値 1 mm/3h、下段が 10 mm/3h。エラーバーはブートストラップ法による 95%信頼区間を表す。

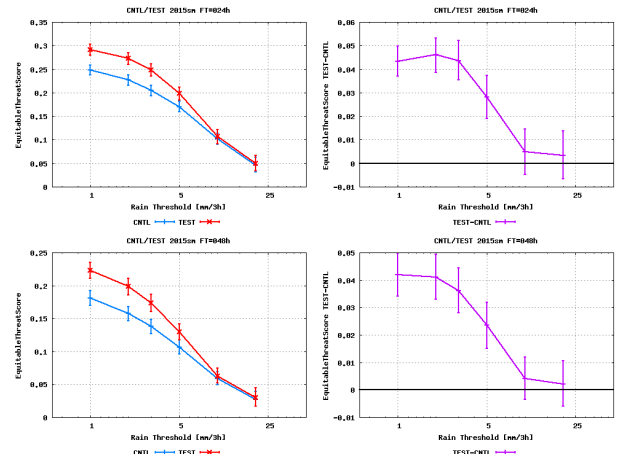


図 1.2.25 夏期試験の検証期間についての、ある FT における降水量の閾値ごとのエクイタブルスレットスコアの比較。左列の赤が TEST で青が CNTL、右列の紫は TEST と CNTL の差分 (TEST-CNTL) を表す。横軸の閾値は対数で表示している。上段が FT=24、下段が FT=48 についてのもの。エラーバーはブートストラップ法による 95%信頼区間を表す。

に、FT=0 から FT=84 の範囲は GSM にとってスピンアップの時間になっており、降水の予測頻度は安定しておらず、特に FT=12 までの間で降水頻度の減少が激しい。つまり、解析値ではデータ同化によって大気中に水蒸気が解析されるものの、GSM が水蒸気を保持できず実況で雨のない場所で雨を降らせ、それが予測開始直後の過剰な降水頻度として現れている。平均的には、その調整は FT=12 までは急激に進行し、一旦落ち着いた後、それ以降ゆるやかとなる。

この傾向は CNTL, TEST とともに大きくは変わらないが、TEST では FT=12 以降では両方の閾値について傾向がより緩やかになっている。また、10 mm/3h では FT=12 までの変化も緩やかになっている。降水頻

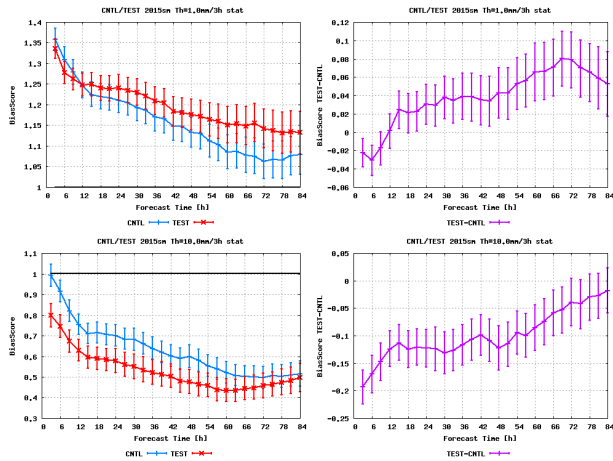


図 1.2.26 夏期試験についての、予測時間ごとのバイアスコアの比較。左列の赤が TEST で青が CNTL、右列の紫は TEST と CNTL の差分 (TEST-CNTL) を表す。上段が降水量の閾値 1 mm/3h、下段が 10 mm/3h。エラーバーはブートストラップ法による 95%信頼区間を表す。

度が予測時間によって変化することは利用上望ましくない特性であり、その点 TEST は CNTL を改善している。しかし、その頻度が観測と合っているかという観点では、FT=12 以降 TEST では弱い降水は多すぎ、強い降水は少なすぎる傾向を示している。

降水頻度について、FT=24 および FT=48 に予測時間を固定して、閾値別の変化傾向を議論する。図 1.2.27 に降水量の閾値ごとの BI の比較を示す。閾値別に見ると、その変化傾向は好ましいものではなく、これは FT=24, 48 の両者において 4 mm/3h 付近で変化傾向が入れ替わり、それより弱い雨側では過剰な頻度が更に過剰に、強い雨側では不足している頻度が更に減少する結果であった。この弱い雨が増えて強い雨が減った原因は、これまで比湿ゆらぎ幅調節 (第 1.1.1 項) を通じて雲過程により強い降水を表現していたものが減り、積雲過程によって弱い降水をより表現するようになったためと考えられる。

弱い雨については、ETS が大幅に増加している一方で、BI も増えて頻度は過剰になっている。この点について、降水予測精度が改善していると考えて良いかを考察するため、ETS と BI ではなく捕捉率と誤検出率で確認してみる¹⁶。図 1.2.28 に、予測時間ごとの捕捉率 (Hr) と誤検出率 (Fr) の比較結果を示す。1 mm/3h については、捕捉率は FT=84 まで全ての予測時間で大幅に向上し、誤検出率も FT=60 までは改善しその後は中立となっている。この結果から、少なくとも 2 日目程度までは実況を非常によく捕捉するようになったと同時に、誤検出を大きく減らしており、大きい改善と言える。ただし、捕捉 (FO) の上昇に対して誤検

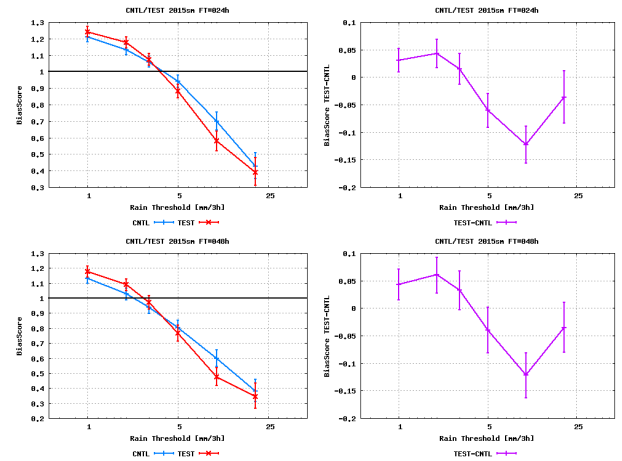


図 1.2.27 夏期試験についての、ある FT における降水量の閾値ごとのバイアスコアの比較。左列の赤が TEST で青が CNTL、右列の紫は TEST と CNTL の差分 (TEST-CNTL) を表す。横軸の閾値は対数で表示している。上段が FT=24、下段が FT=48 についてのもの。エラーバーはブートストラップ法による 95%信頼区間を表す。

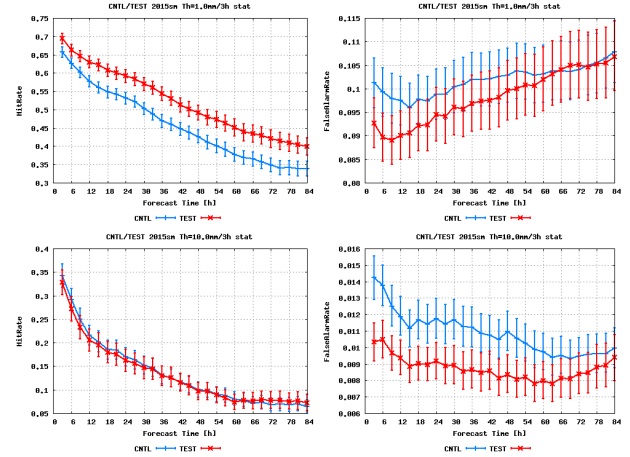


図 1.2.28 夏期試験についての、予測時間ごとの捕捉率 (左図) と誤検出率 (右図) の比較。赤が TEST で青が CNTL。上段が降水量の閾値 1 mm/3h、下段が 10 mm/3h。エラーバーはブートストラップ法による 95%信頼区間を表す。

出 (FX) の減少がつりあっていないため BI が増加してしまっている。3 日目についても誤検出率は中立と言える範囲であり、捕捉率が大きくなった分予測精度は良くなっている。各スコアに見られるこの時間変化には、予測時間が進むとそもそも擾乱の位置や発達程度自体の不確実性が大きくなっていく影響もあると考えられる。一方で、10 mm/3h では捕捉率が予測時間の短いところほど低下してしまっている。ただし、誤検出率も減少しているため、ETS で見た予測精度は全体として中立にとどまっている。

ここまでの統計検証をまとめる。5 mm/3h 以下の弱い雨についての予測精度は TEST において大きく向上し、日々の実況比較の観点でも精度は良い。一方、それ以上の強い雨については、BI はやや下がったものの、予測精度は中立で捕捉率・誤検出率ともに減少し

¹⁶ 4 分割表による降水検証では、4 つの値に対して検証期間を決めると自動的に決まる全事例数と降水ありの事例数が存在するので自由度は 2 である。この見方は同じ情報を別の観点で見ているだけである。

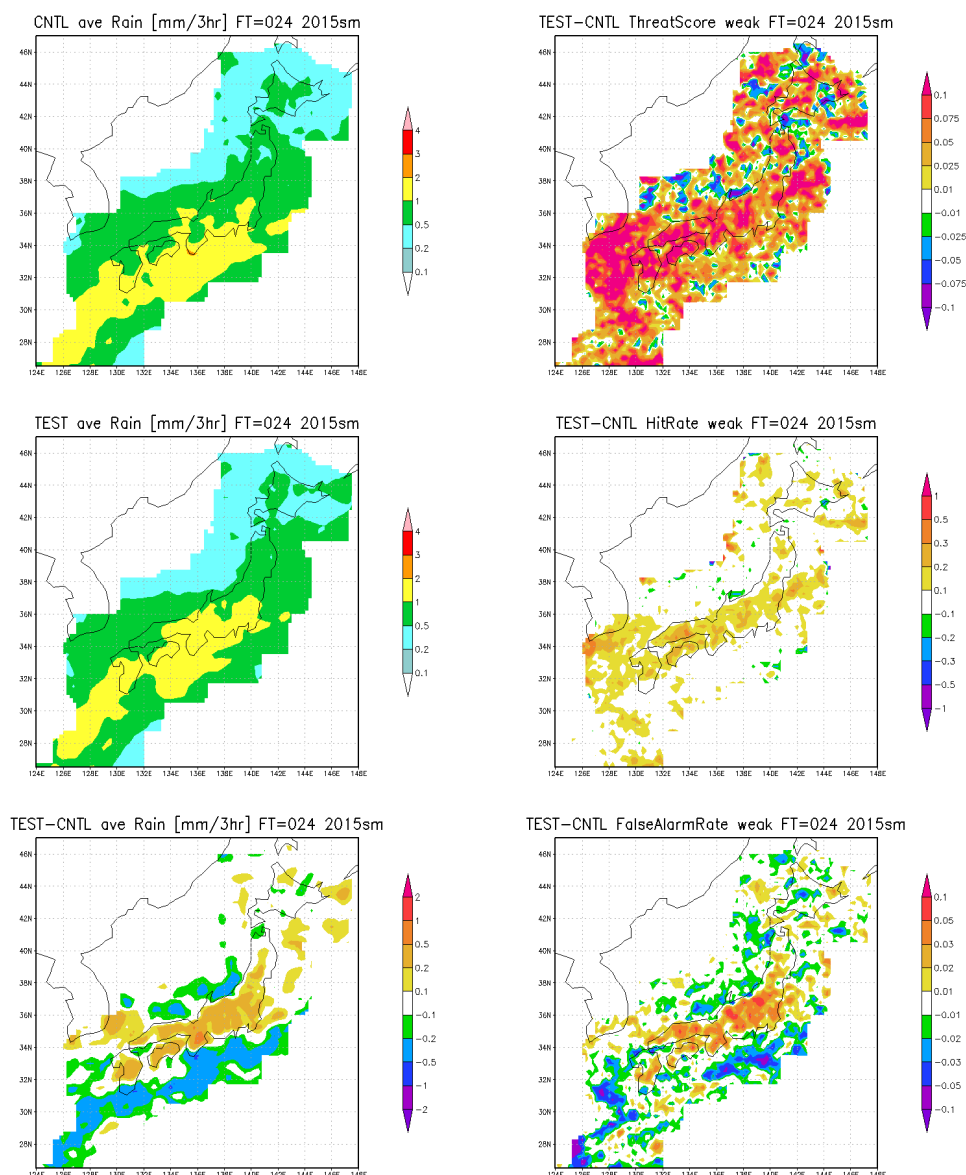


図 1.2.29 夏期試験での FT=24 の予測について、降水特性を面的に比較したもの。左列は上から CNTL の期間平均降水量 [mm/3h]、TEST の期間平均降水量 [mm/3h]、両者の差分 (TEST-CNTL)。右列は全て 1 mm/3h を閾値とした指標の差分 (TEST-CNTL) で、上からスレツスコア、捕捉率、誤検出率。

ている。

(2) 降水検証結果の空間分布

これまでは格子点平均をとった後のスコアを比較したが、ここではその空間分布を確認する。図 1.2.29 に、FT=24 について降水特性を面的に比較したものを示す。

まず、期間平均降水量とその差分を見ると、陸上と海上で明瞭に傾向が異なる。陸上では北海道を除き概ね降水量が増え、海上では日本の東海上を除き概ね減少しており、特に東日本から西日本の太平洋側で差が大きい。日々の事例を見ると、陸上での増加は、日中の不安定性降水の増加と、海上から侵入する降水系において、陸側に降水を表現しやすくなったという 2 つの特性の変化によるものであり、海上での減少は降水系が陸側に入るようになった結果である。

スレツスコアの差を見ると、ほぼ全域で大きくなっておりその改善は場所に依らない。捕捉率も全体的に中立から改善であるが、北海道を除く陸上、日本の東海上と九州の西の海上で向上している。特に九州の西海上で捕捉率が向上しており、降水量が減っている地域であることを考えると非常に良い変化である。誤検出率は海上で減少、陸上で増加となっており、残念ながら単純に改善したわけではない。陸上の増加は主に日中の不安定性降水による降水量と降水域の面積が増えていることが原因である。個別の事例で見ると、実況がない場所で目立って雨を降らせるようになったというわけではなく、降水をやや多く、広めに予測するようになった。実況と比較すると、改善・改悪のどちらかは事例によりまちまちである。

(3) 夏の事例紹介

統計検証で見られた変化を含め、降水予測特性の変化を事例で確認していく。

低気圧の進行に伴う降水

降水系の表現で見られた変化の中で顕著であった点は、降水系がより組織化することになったことおよび、海上で過剰に降らせず陸上での降水を表現しやすくなったこと¹⁷である。これらの変化を事例で確認する。組織化することになった例としては、第1.2.2項の(6)で触れた関東での豪雨事例も含まれる。

図1.2.30に2015年8月12日00UTCの気象庁天気図を示す。この日、西日本は2015年台風第13号から変わった低気圧が接近し、九州を中心に大雨となった。また、低気圧から前線が西日本にのびており、暖気側で強い雨が降っている状況であった。

図1.2.31に、2015年8月10日12UTCを初期値とするFT=42の降水予測比較を示す。予測対象時刻は図1.2.30の6時間後である。

このとき実況ではおよそ東経128度から129度付近に低気圧中心が存在しているが、低気圧の進行はCNTLでやや遅く、TESTではさらに遅れている。5mm/3h以上の降水表現を見ると、進行の程度は両者であり異なっていないが、CNTLでは強雨域が分散しているのに対して、TESTではまとまっている。ただし、この事例では必ずしもTESTの方が実況の特徴を良く表しているわけではない。

このように、CNTLでは海上でややスケールの小さい強雨域が表現されていたものが、TESTではより組織化されて表現されるようになった点は、試験期間中の多くの事例で共通する変化である。また、5mm/3h以下の降水域を見ると、CNTLは温暖前線に伴う降水が広がらず、陸上で実況と比べてかなり狭いが一方で、TESTでは中国地方から四国にかかる降水域をある程度表現している。

別の事例として、図1.2.32に2015年8月31日00UTCの気象庁天気図を示す。この日、西日本から東日本の南岸に前線が停滞し、広い範囲で雨となった。前線上の低気圧が東へ進み、低気圧に近い九州・四国を中心に激しい雨が降った。

図1.2.33に2015年8月29日12UTCを初期値とするFT=36の降水予測比較を示す。予測対象時刻は図1.2.32と同じである。この事例では、CNTL、TESTともに低気圧の進行を進めすぎているが、TESTと比べてCNTLは更に東に進めすぎている。降水域の表現を見ると、CNTLでは九州の東部分や四国において不自然な無降水域を表現している。特に四国では、南から水蒸気が供給されるものの海上で降水として落とし、陸上へ降水系を侵入させることができていない。CNTLではこのように陸上で不自然に降水域が抜

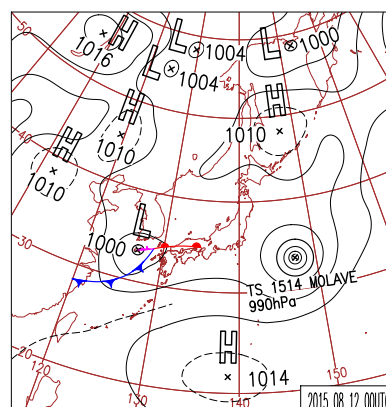


図 1.2.30 2015 年 8 月 12 日 00UTC の気象庁天気図

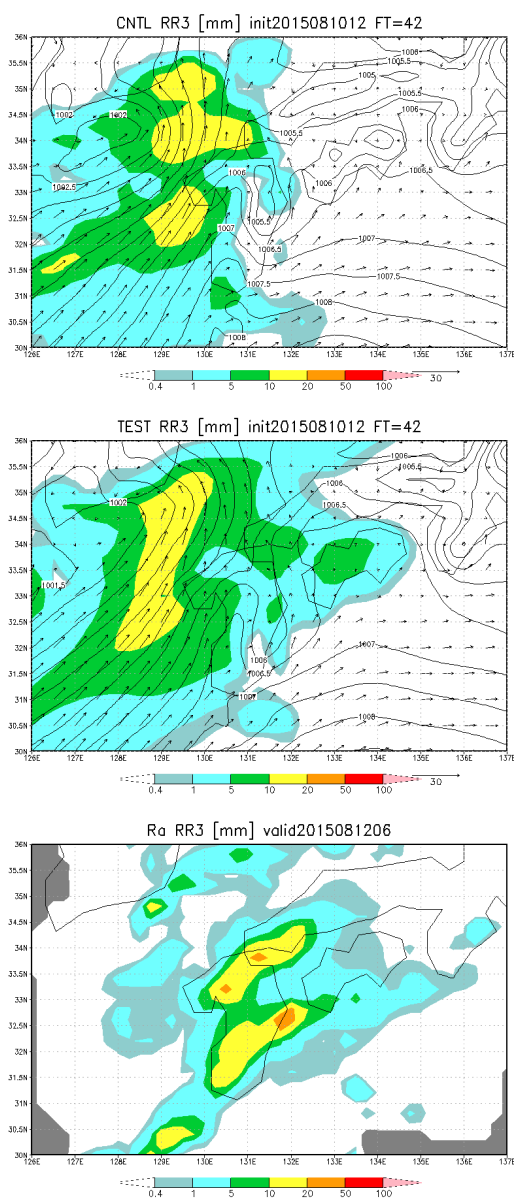


図 1.2.31 2015 年 8 月 10 日 12UTC を初期値とする FT=42 の降水予測比較。表示は前 3 時間積算降水量 [mm/3h] (色)、海面更正気圧 [hPa] (黒線)、地上風速 [m/s] (ベクトル)。上から CNTL、TEST、解析雨量。対象時刻は図 1.2.30 と同じである。

¹⁷ 風下でも降水をより表現しやすくなった。

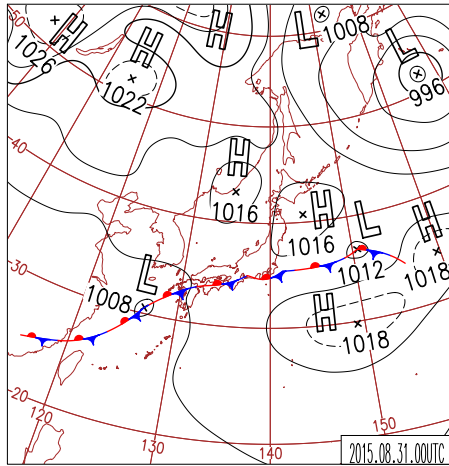


図 1.2.32 2015 年 8 月 31 日 00UTC の気象庁天気図

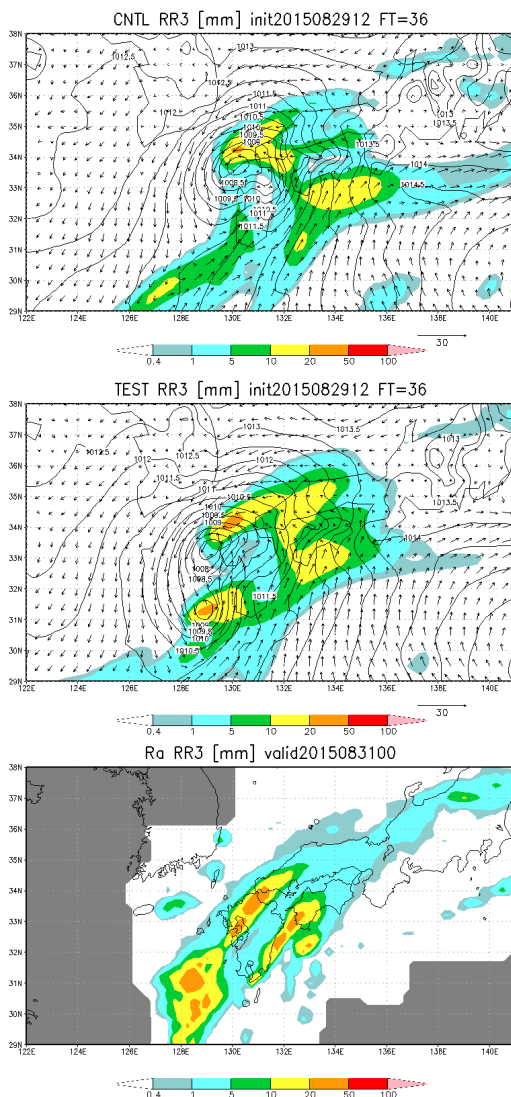


図 1.2.33 2015 年 8 月 29 日 12UTC を初期値とする FT=36 の降水予測比較。図の構成は図 1.2.31 と同様。対象時刻は図 1.2.32 と同じである。

ける事例が見られたが、TEST ではそういった事例は減少し、全体的に降水表現が改善している。

上空寒気による不安定性降水

第 1.2.3 項の (3) で、TEST では大気安定度が低下し、また可降水量が増加することを説明した。このことは不安定性降水の表現にも違いを生んでいる。

図 1.2.34 に 2015 年 8 月 2 日 00UTC の気象庁天気図を示す。この日、日本付近は高気圧に覆われて全国的に概ね晴れて地上気温が上昇した。上空に寒気が入り、午後には大気の状態が不安定となり、山沿いを中心に広い範囲でわか雨や雷雨が発生した。

図 1.2.35 に 8 月 1 日 12UTC を初期値とする FT=18 の降水予測および FT=15 の地上気温予測の比較を示す。降水予測の対象時刻は図 1.2.34 の 6 時間後である。CNTL でもある程度は不安定性降水を表現しているが、TEST の方がより広くそれを捉えている。ただし、九州や近畿地方南部ではより実況に近いが、中国地方や近畿地方北部ではやや過剰になっている。しかし、全国的にどこでも増えているわけではなく、北海道では CNTL が実況にはない降水域を表現していたものが TEST では表現されないようになり実況に近づいている。対象時刻の 3 時間前の地上気温比較を見ると、陸上の多くの場所で気温が高く予測されていたことが分かる。陸面過程の変更により、午前中の地上気温の上昇がより速くなったことが、不安定性降水の発生が増加した一つの原因となっている。この事例だけでなく、多くの事例で不安定性降水は CNTL より TEST が強め、広めに表現されている。

アメダスを参照値として 12UTC 初期値の予測のみを検証した統計結果を見ると、BI が特徴的な日変化をしており、日中でより過剰になってしまったものの夜間はほぼ BI が変わっていないことが確認できた（図略）。一方で、ETS の改善幅についての日変化依存性はあまり強くなかった（図略）。日中の降水頻度増加が、陸上での誤検出率増加に寄与しているためと考えられる。

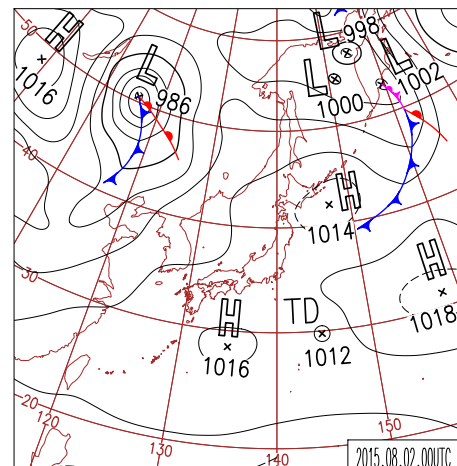


図 1.2.34 2015 年 8 月 2 日 00UTC の気象庁天気図

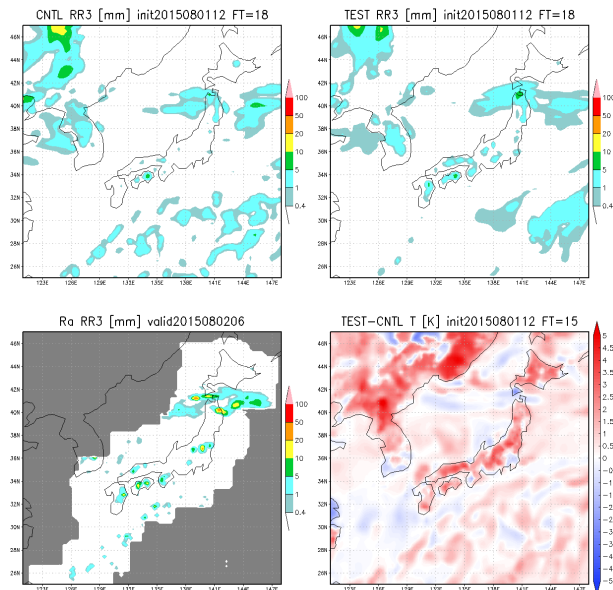


図 1.2.35 2015 年 8 月 1 日 12UTC を初期値とする降水予測 (FT=18) および地上気温予測 (FT=15) の比較。表示は前 3 時間積算降水量 [mm/3h] について上段左が CNTL、右が TEST、下段左が解析雨量。下段の右図は、降水を表示した時刻の 3 時間前 (FT=15) の地上気温予測の差 (TEST-CNTL)。降水予測の対象時刻は図 1.2.34 と同じである。

太平洋高気圧縁辺

図 1.2.36 に 2015 年 7 月 21 日 00UTC の気象庁天気図を示す。この日、西日本は日本の南海上の太平洋高気圧後面にあたり、暖湿気が流入しやすくなっており、南西諸島から四国は断続的な雨となった。日本海から津軽海峡をぬけて三陸沖に停滞前線が位置し、高気圧の南には台風第 12 号が存在している。

図 1.2.37 に 7 月 19 日 12UTC を初期値とする FT=36 の降水予測の比較を示す。九州およびその南海上に着目すると、この事例でも CNTL は九州の西岸で強い雨を表現する一方で実況では九州の東に存在した降水を表現できていない。一方で TEST は九州の南海上の雨量が少なめであるものの、九州の東部にも降水を表現しており実況と対応が良い。ただし、実況より降水系が西にずれている点や、紀伊半島での降水予測ができていない点は同じである。

第 1.2.3 項の (2) で示したように、500 hPa 高度場の負バイアスが大きく減ったこともあり、500 hPa 高度場では太平洋高気圧がこれまでより広がって見える事例が増加した。一方で、地上気圧ではその変化はあまり明瞭ではなく、やや張り出しが強くなった事例が見られる程度である。統計的には、月平均場の太平洋高気圧周辺において、下層風の予測精度はやや向上しているが、事例別では明瞭な傾向が見られるわけではない。

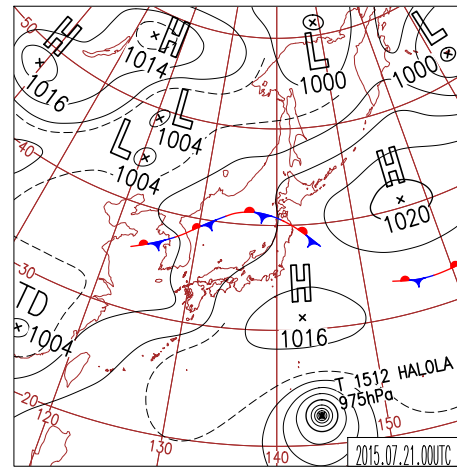


図 1.2.36 2015 年 7 月 21 日 00UTC の気象庁天気図

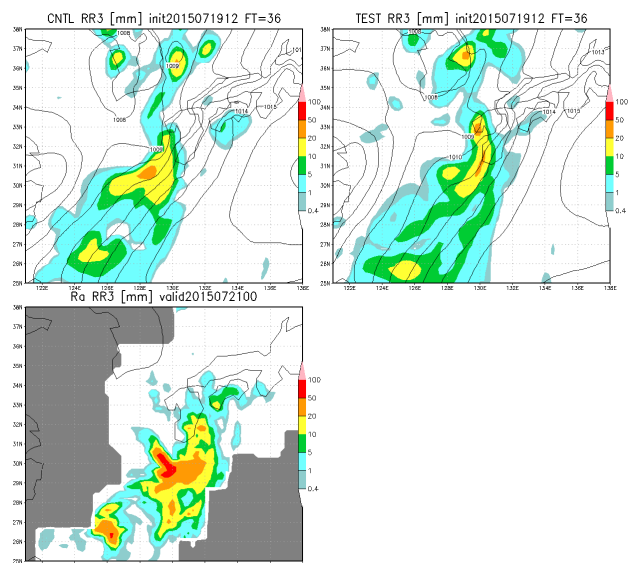


図 1.2.37 2015 年 7 月 19 日 12UTC を初期値とする FT=36 の降水予測比較。表示は前 3 時間積算降水量 [mm/3h] (色)、海面更正気圧 [hPa] (黒線)。上段左が CNTL、右が TEST、下段は解析雨量。対象時刻は図 1.2.36 と同じである。

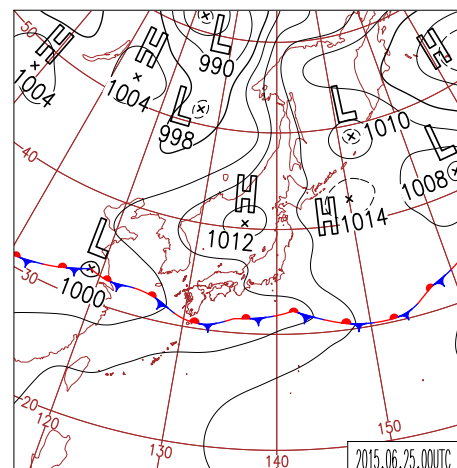


図 1.2.38 2015 年 6 月 25 日 00UTC の気象庁天気図

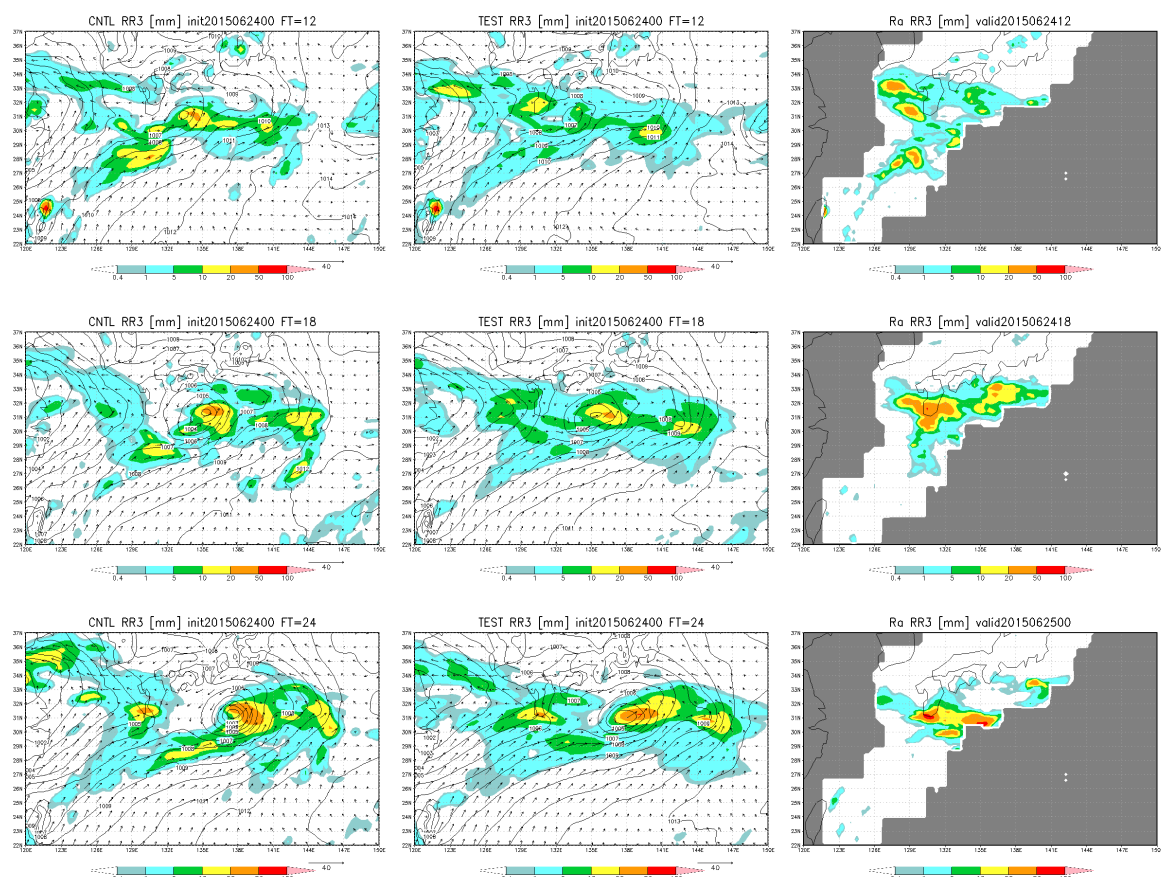


図 1.2.39 2015 年 6 月 24 日 00UTC を初期値とする FT=12 から FT=24 までの降水予測と海面更正気圧の比較。表示は前 3 時間積算降水量 [mm/3h] (色)、海面更正気圧 [hPa] (黒線)。左列が CNTL、中列が TEST、右列が解析雨量。上から FT=12, 18, 24 の予測である。FT=24 の対象とする時刻は図 1.2.38 と同じである。

梅雨前線上の偽の擾乱

図 1.2.38 に 2015 年 6 月 25 日 00UTC の気象庁天気図を示す。この日、日本の南海上には梅雨前線があり、東シナ海で前線が北上傾向で、九州から四国にかけて雨となった。また、前線上には関東の南海上で弱い波動が表現されているものの、低気圧は発生していない。

図 1.2.39 に 2015 年 6 月 24 日 00UTC を初期値とする FT=12 から FT=24 までの降水予測と海面更正気圧の比較を示す。GSM による予測では梅雨前線上に実況より強い降水を表現して、その結果低気圧性の循環が生じてしまうことがある。この事例でも CNTL, TEST とともに実況にはないと思われる低気圧を予測してしまっているが、TEST ではその表現は CNTL に比べて弱い。FT=12 から順番に降水表現を追っていくと、CNTL では四国の南で実況より強く降水を予測しており、この時点ですでに存在した低気圧をさらに発達させてしまっている。また、FT=18 を見ると TEST は九州の南の降水を、実況より弱いものの、良く表現する一方で、CNTL では陸上で降水が表現されておらず、陸上への降水系の侵入の違いがこの事例にも現れている。

この事例のように、夏期試験の期間の梅雨前線上に

おいて実況にない偽の低気圧が表現される回数を調べると、TEST では CNTL よりやや少なく、表現されていても CNTL より弱い傾向が見られた。これは、これまで比湿ゆらぎ幅調節により降らせていた降水量が減少したことが関係していると考えられる。

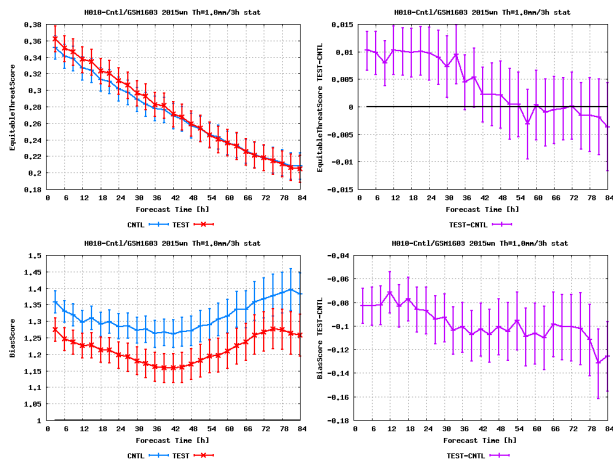


図 1.2.40 冬期試験の検証期間（2014 年 12 月、2015 年 1 月、2 月）についての、予測時間ごとの ETS（上段）および BI（下段）の比較。降水量の閾値は 1 mm/3h、左列の赤が TEST で青が CNTL、右列の紫は TEST と CNTL の差分 (TEST-CNTL) を表す。エラーバーはブートストラップ法による 95%信頼区間を表す。

(4) 冬期の降水予測の統計検証

冬期の降水予測について、統計検証の結果から変化の傾向を説明する。今回の積雲・雲過程の変更による降水への影響は、日本付近では冬期より夏期の方が影響が大きい。南岸低気圧では比湿ゆらぎ幅調節廃止による影響と考えられるそれらの特性変化が夏期と同様にある程度現れている。また、冬型の気圧配置時の日本海側の降水特性の変化には、陸面過程の変化によりシベリア高気圧が強めに表現されるようになったことや、500 hPa 面での北系の流れの予測精度が良くなっていることなどの影響も見られる。

図 1.2.40 に、冬期試験の検証期間（2014 年 12 月、2015 年 1 月、2 月）についての、予測時間ごとの ETS および BI の比較を示す。降水量の閾値は 1 mm/3h である。冬期において ETS は、FT=3 から FT=33 付近まで改善、それ以降 FT=84 まで中立となっている。同時に、BI は FT=84 までの全予測時間で減少して 1 に近くなっており、頻度は改善している。

図 1.2.41 に、図 1.2.40 と同様の 4 分割表による検証を、捕捉率と誤検出率で示す。捕捉率はどの予測時間においても低下傾向で、その低下幅は予測時間が進むにつれて大きくなっている。誤検出率はどの予測時間でも減少傾向で、減少幅の予測時間依存性は小さい。この捕捉率が予測時間が進むにつれてより悪化してしまう傾向が、ETS で見た時に予測時間後半で改善が見られなくなってしまう理由である。冬期では FT=48 付近から、TEST では CNTL に比べて PSEA で見た擾乱の位置ずれや誤差振幅が増加する事例が増え始め、FT=72 ではそれら誤差が増加する事例が卓越する傾向が見られる。予測が進むにつれて捕捉率が低下し、ETS で予測時間後半に改善が見られなくなるのは、この擾乱に関する予測誤差の拡大が影響していると考えられる。

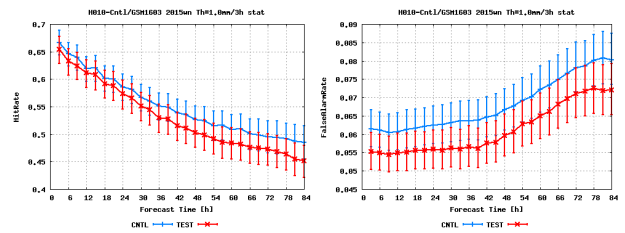


図 1.2.41 冬期試験についての、予測時間ごとの捕捉率（左図）と誤検出率（右図）の比較。左列の赤が TEST で青が CNTL。降水量の閾値は 1 mm/3h。エラーバーはブートストラップ法による 95%信頼区間を表す。

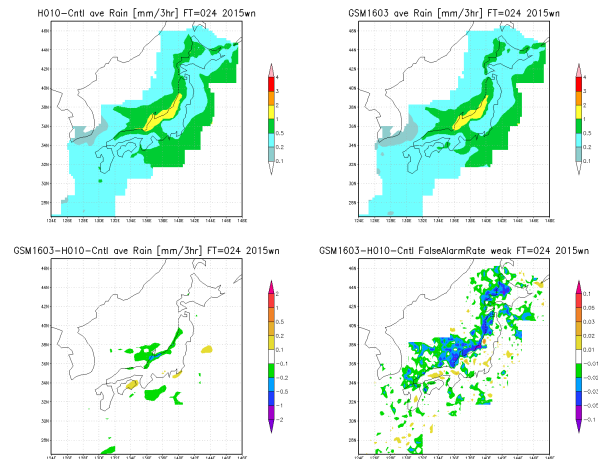


図 1.2.42 冬期試験での FT=24 予測について、降水特性を面的に比較したもの。上段は左が CNTL の期間平均降水量 [mm/3h]、右が TEST の期間平均降水量 [mm/3h]。下段は左が両者の平均降水量の差分 (TEST-CNTL)、右が 1 mm/3h を閾値とする誤検出率の差 (TEST-CNTL)。

図 1.2.42 に、冬期試験での降水特性を面的に比較したものを示す。全統計の BI で見られた弱い雨の頻度が減る傾向は夏期間と逆であったが、この図を見ると降水が減ったのは主に冬型の気圧配置時の日本海側が中心であり、太平洋側ではわずかではあるが降水頻度は増えている。日本海側の降水量の減少は海上よりも陸上で大きい一方で、誤検出率の減少は海上で大きい。冬型の気圧配置時には降水系がより内陸に入り込むようになったわけではなく、陸側では降水量が減っている。

(5) 冬期の事例紹介

冬期試験期間について、降水特性の変化が見られる事例を紹介する。

冬型の気圧配置

冬型で日本海側に雪または雨が降った事例の予測比較を図 1.2.43 に示す。東北地方の日本海側を見ると、CNTL では実況より広めの降水が予測されていたが、TEST では降水量が減り概ね適切になっている。また、日本海側の沿岸海域で 5 mm/3h 以上のやや強めの降水がある領域などについて比較すると、より強弱のメリハリのある予測となっている（図略）。

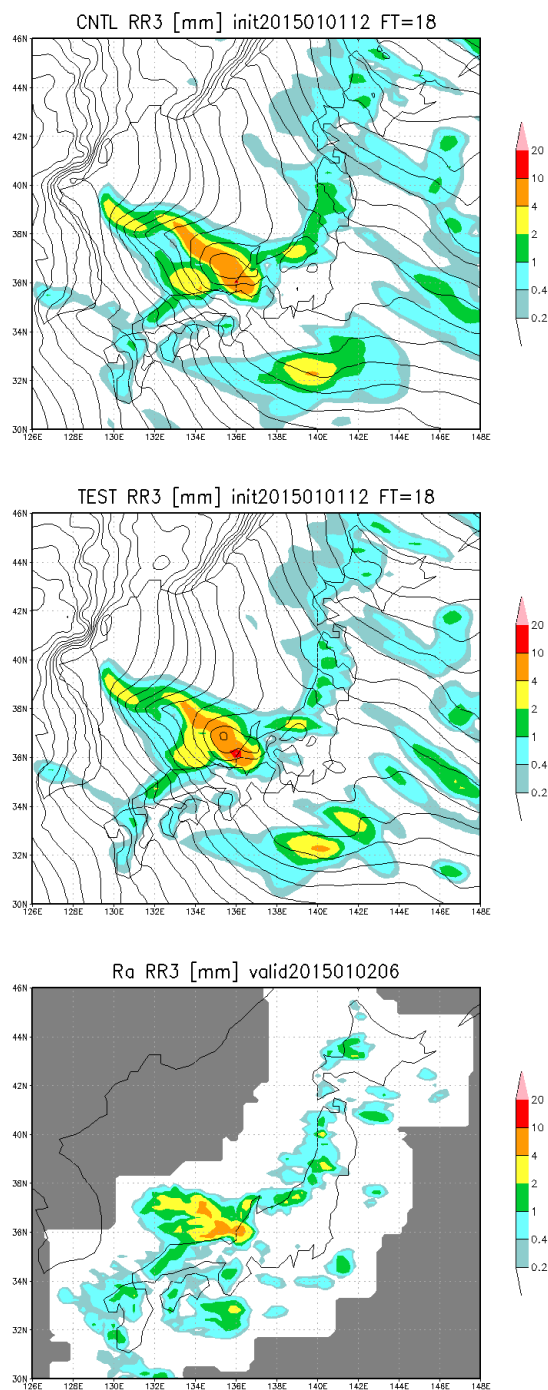


図 1.2.43 2015 年 1 月 1 日 12UTC を初期値とする FT=18 の降水予測比較。表示は前 3 時間積算降水量 [mm/3h] (色)、海面更正気圧 [hPa] (黒線)。上段が CNTL、中段が TEST、下段は解析雨量。

低気圧

図 1.2.44 に 2014 年 12 月 20 日 00UTC の気象庁天気図を示す。この日、日本付近には二つの低気圧が存在し、南岸を通過する低気圧は南海上を東進して夜には三陸沖へ、日本海の低気圧は日本海北部へそれぞれ進み、これらに伴う降水域が日本付近を東進した。

南岸を通過した低気圧に伴う降水予測比較を図 1.2.45

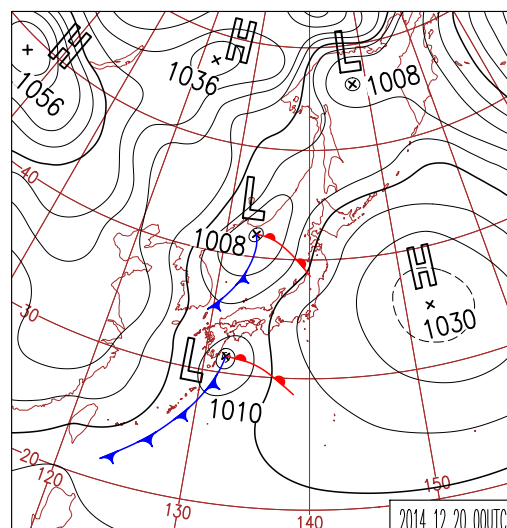


図 1.2.44 2014 年 12 月 20 日 00UTC の気象庁天気図

に示す。CNTL では紀伊半島の南の海上で強い降水を予測し、その周辺に低気圧の中心を表現している。一方、実況ではほぼ陸に掛かる位置に低気圧中心が解析され、降水のピークも紀伊水道や紀伊半島が中心である。TEST では、CNTL よりも降水域全体を北に表現している。また、強い降水域も陸側に表現しており、実況との対応は CNTL よりも良く、夏期試験の事例で見られた降水系がより風下の陸上に予測される特性の変化が、冬期の低気圧の事例でも見られている。

(6) 降水に関するまとめ

2016 年 3 月の変更により、降水表現は大きく変わった。これは特にモデルの積雲・雲過程の変更が大きく寄与している。日々の検証スコアでも見られるように、ほとんどの降水事例でその表現に変化が見られる。その変化をまとめる。

- これまで孤立した強雨域を表現しがちであったものが、より組織化した表現をしやすいになった。
- 海上から風下の陸上へ降水系が侵入しやすくなった。
- 夏期の不安定性降水はより表現されやすくなった。
- 冬期の日本海側では、より空間分布にメリハリのある降水表現をする事例が増えた。

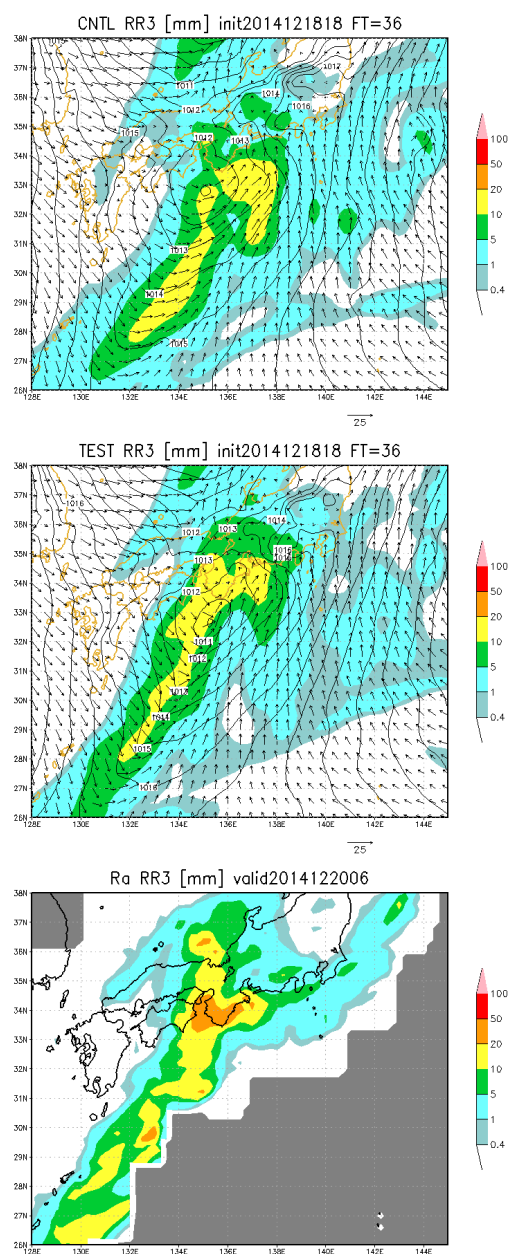


図 1.2.45 2014 年 12 月 18 日 18UTC を初期値とする FT=36 の降水予測比較。表示は前 3 時間積算降水量 [mm/3h] (色)、海面更正気圧 [hPa] (黒線)。上段 CNTL、中段が TEST、下段は解析雨量。ベクトルで地上風 [m/s] を示している。

1.2.5 地表面付近の予測

今回の変更においては、陸面過程が大幅に変更されたことにより、地上気温・相対湿度・風速など地表面付近の気象要素についての予測特性も大きく変化している。ここでは、その特性変化について簡単に説明する。地上気象要素については、第 1.4 節のガイダンスについての解説も参考にして頂きたい。

(1) 不自然な下層雲予測の減少

GSM の地表面付近では相対湿度は湿潤バイアスをもつことが知られており (高桑 2015)、実況では見られない雲が、モデル面最下層のみで非常に薄く発生し、その

後鉛直方向に成長していく事例が見られる。GSM1603 では、積雲・雲過程の変更による境界層内の気温や水蒸気量の変化、陸面・海面過程改良による地表面付近の予測特性の変化の影響で、変更前にはしばしば見られていた不自然な下層雲を表現することが大きく減った。図 1.2.46 に CNTL と TEST の下層雲の比較と静止衛星画像 (MTSAT の可視画像) を示す。CNTL では赤丸で囲った関東付近に実況には見られない下層雲を表現しているが、TEST には存在しない。CNTL で表現されている下層雲は、およそ 5 m から 10 m 程度の高さに位置する、モデル面最下層およびそれを含む層で表現されているものであり、地面に接しているため大気現象としての分類は霧である。下層の雲や湿度の表現が向上した結果、湿度ガイダンスと視程分布予測の精度が向上している (第 1.4 節)。

(2) 地上風速予測特性の変化

陸上については、GSM1603 において地上風速の診断方法を変更した。GSM1403 まで利用されていた方法は、GSM の鉛直層数が少なく水平格子間隔が大きかった古い時代から使われていたもので、植生がある場合の高度補正に使う参照高度のとり方や、鉛直成層のプロファイルに中立を仮定する点などが、近年の鉛直分解能には適合しないものになっていた。それらの点を改良した結果、これまで (高さのとり方により) 過小に見積もられていた 10 m 風速が適切に診断されるようになった。

一方で、粗度など陸面過程のその他の部分の変更により、地上風速の診断に使われるモデル面最下層の風速自体は小さく表現されるように変化した。この変化と比べると診断方法の変更による影響の方が大きく、地表面にごく近い気圧面で CNTL に比べ風速が減少している場合でも、診断された地上風速が大きくなっているケースがみられた。これらを総合すると、地上風速は月平均でも 1 m/s から 2 m/s 程度増加する。この特性の変化は、風ガイダンスにも強い影響を与えたが、第 1.4 節で示されているように、係数の最適化により最終的な影響はなかった。

図 1.2.47 に地上風速の大きさを月平均し CNTL と TEST を比較したものを示す。陸上では概ね風速は大きくなっており、平均で見ても 1 m/s から 2 m/s 程度強くなっていて、もともとの風速が大きい冬期で差が大きい。また、安定度中立を仮定しなくなったため、これまでより大気の状態が不安定な場合に風速が強く、安定な場合に弱く表現されやすくなっている。海上についても海面過程の変更により変化が見られるが、海面については診断方法を変更していないこともあり、差はあまり大きくない。

今回の変更によって、気圧面やモデル面で見える GSM の地表面付近の風は弱くなったが、診断される地上風速は強くなった。GSM が予測した指標に基づく判断基

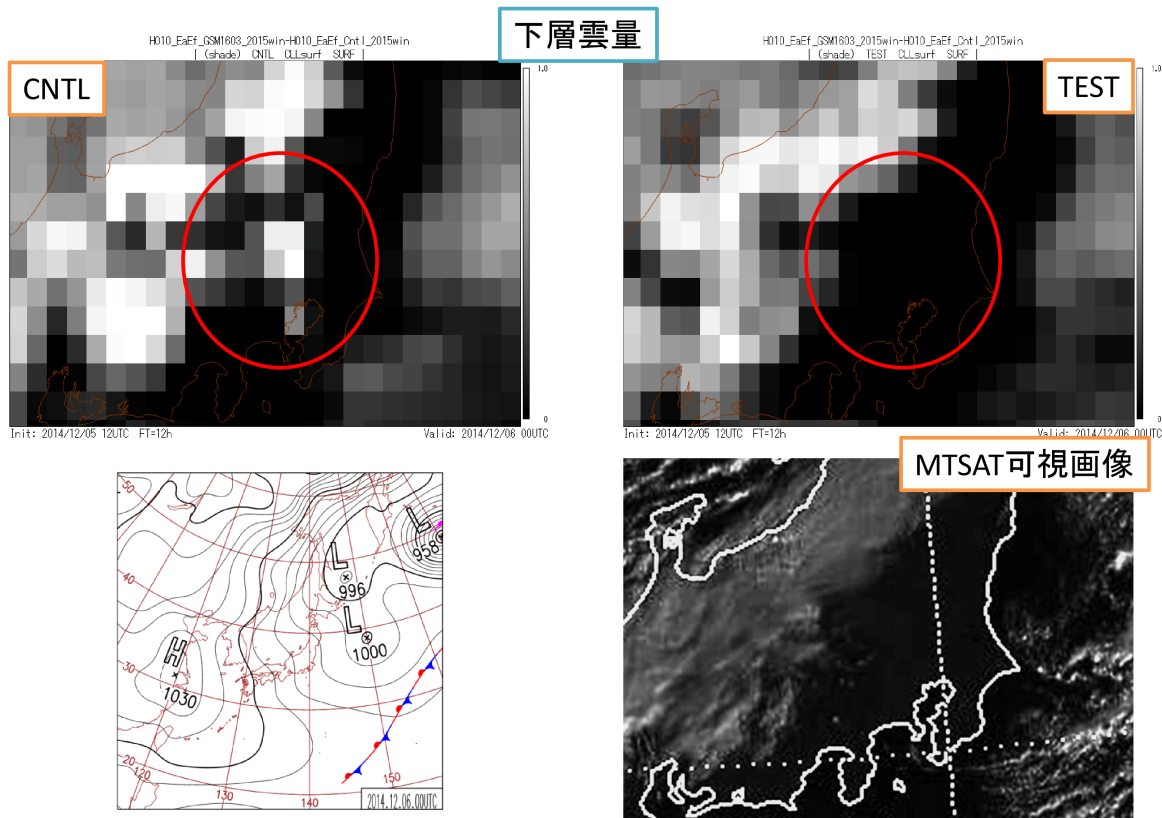


図 1.2.46 2014 年 12 月 6 日 00UTC を対象時刻とする下層雲量の比較。上段の CNTL, TEST はともに FT=12 予測の下層雲量を示している。下段の左図は気象庁天気図で、右図は MTSAT による可視画像。可視画像では関東に雲は見られない。

準を利用している場合、地表面付近の風や、地表面付近の風を見積りに用いる運動量・熱フラックスを利用する場合と、診断された地上風速を利用する場合では、変化傾向が異なるので、変更の影響を考察する場合にはご留意いただきたい。

(3) 地上気温予測の特性の変化

草開 (2015) に解説されているように、現実では積雪がある場合大気が冷えやすくなる。しかし、GSM1403 までの陸面過程では、アルベドと融解による効果は表現されているものの、熱容量・熱伝導率が小さい効果は十分に表現されておらず、積雪面表面の温度は下がらない仕様になっていた。これは、かつて大気側の予測精度が十分でなかった時代に、地表面温度が非現実的な（放射平衡に近い）低温を予測するのを防ぐ役割を果たしていた。一方で、近年では冬期に日射が少ないユーラシア大陸北部などで、夜間における地上気温が月平均で 7 K 程度もの高温バイアスを持つ原因にもなっていた。

今回、陸面過程における積雪モデルが大幅に精緻化され、積雪の熱容量・熱伝導率も適正なものに変更された。また、土壌の熱容量やキャノピー・大気との熱交換も適正化されている。その結果、これまでは表現されなかった夜間の放射冷却による急激な気温の低下が TEST では表現されるようになり、気象場の予測（特

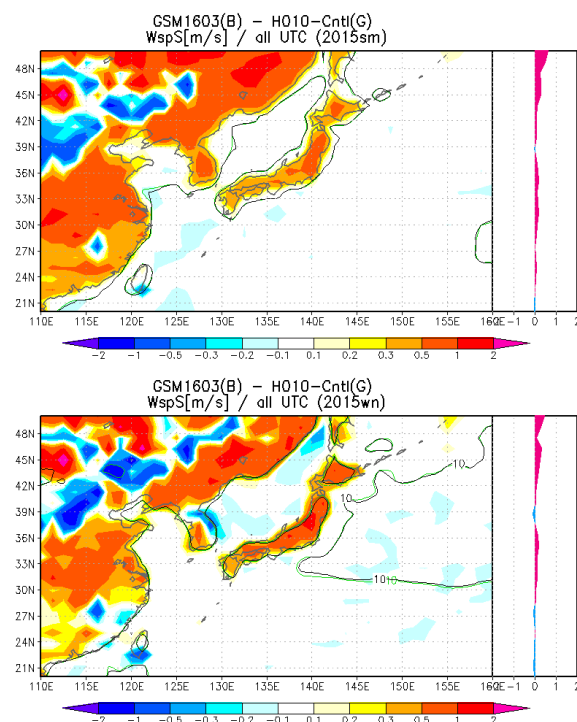


図 1.2.47 診断された地上風速 [m/s] の大きさを期間平均し、CNTL と TEST で比較したもの (Shade:TEST-CNTL)。黒線は TEST、緑線は CNTL。図の右側はそれぞれの緯度での帯状平均。上段：夏期試験期間、下段：冬期試験期間。

に雲と地上風速)が実況と合っている場合には、適切な気温変化を予測できるようになった。一方で、モデルの気象場の予測が実況と異なってしまった場合、新しい陸面過程は従来の GSM より大きな誤差を持ってしまうおそれがある。この特性の変化は、気温ガイダンスにも強い影響を与えており、特に山間部での予測スコアの悪化につながっている。ただし、これまでと比べると、実況の天気と GSM 予測の天気の違いがより直接的に地上気温の予測誤差に表現されるようになっているため、予測結果の理解をする観点では解釈しやすいものになっている。

積雪域での変化が最も大きいのが、積雪が関係しない場合でも地上気温予測の特性は変化している。陸面過程における日変化は、基本的には入射する短波放射エネルギーの変化にตอบสนองして起こる。土壌の地表面付近の温度変化は、放射・乱流輸送・水の相転移、地中への熱伝導などのエネルギー変化に対して、熱容量をもつ物質が内部エネルギーを蓄える、収支方程式に支配される。今回の陸面過程の変更においては、土壌・下草の持つ熱容量が適正化され小さくなった。また、キャノピーと大気、土壌・下草と大気間のエネルギー・水蒸気交換に関する計算式が改良された。これら変更により、地上気温の予測には以下の変化が見られる。

- 日中の温度上昇・下降には、これまで時間方向に位相が遅れる誤差がみられたが、それが改善している。ただし、ピーク温度自体はまだ観測と比較して低い。この傾向は特に日射の強い夏期で顕著である。
- 夏期の夜間にみられた低温バイアスが減少した。これまでの GSM ではキャノピーと大気間の熱交換が強く、下草・土壌に対してキャノピー・大気が一方向的に冷えてしまう場合があったが、その問題が改善し地表面付近の大気が冷えにくくなった結果と考えられる。
- 冬期の夜間では、計算手法の問題により夜間に不自然な 2 回の低温ピークが見られることがあったが解消している。
- 山間部では予測誤差 (RMSE) が大きくなったが、沿岸部や平野部に多い SYNOP 観測に対する検証では RMSE は減少している。

1.2.6 まとめ

2016 年 3 月の全球数値予報システムの改良について、試験の結果から把握することができた日本付近での予測特性の変化について、利用上注意すべき点を中心に説明した。今回の変更では、変化が多岐にわたるため、利用上注意すべき点も多い。GSM1603 では物理過程の改良により、予測特性の変化は GSM が 20 km に高分解能化して以降で最大のものとなった。総観場の誤差パターンはこれまでと共通した部分も多いが、大気場の予測、降水予測の特性や地表面付近の予測などは

大幅に変わり、これまでの知見に見直しが必要な点も多い。過去の GSM の予測特性に基づいて調査された知見を利用する場合は、その特性が変わっていないか確認をお願いしたい。

最後に、特に留意すべき点についてまとめる。

- 台風はこれまでより、強度が強く、大きく表現される事例が増加する。進路については改善するが、熱帯擾乱間の距離が近い場合、これまでより相互作用が強まり予測の不確実性が大きい。
- GSM の長年の問題点であった、対流圏中下層の乾燥バイアスが減少する。日々の予測事例で見ても湿域が明瞭に増加し、大気の安定度も低下する。
- 暖湿気の流入に伴う降水域の表現は、これまでより海上で過剰に降水を降らせる事例が減り、内陸まで降水系を表現する事例が増えた。
- 冬期に放射冷却により、気温が下がりすぎることがある（特に積雪域や山間部）。雲や地上付近の風速等の気象場が適切に予測できていれば、実況のような気温の低下を表現できるが、気象場が実況と異なると大はずししやすくなる。
- 冬期の南岸低気圧について気象場の予測精度が FT=48 以降悪化する。FT=72 では誤差の空間分布自体は大きくは変わらないものの、誤差幅が増加した事例が多い。

参考文献

- 梅津浩典, 森安聡嗣, 2013: WGNE 熱帯低気圧検証. 数値予報課報告・別冊第 59 号, 気象庁予報部, 98-111.
- 梅津浩典, 室井あし, 原旅人, 2013: 検証指標. 数値予報課報告・別冊第 59 号, 気象庁予報部, 6-15.
- 気象庁, 2015: 平成 27 年 9 月関東・東北豪雨及び平成 27 年台風第 18 号による大雨等. 災害時気象報告.
- 気象庁予報部, 2016: 全球数値予報システムの改良について. 配信資料に関する技術情報 (気象編) 第 435 号.
- 草開浩, 2015: 積雪域解析の高度化. 平成 27 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 44-49.
- 高桑健一, 2015: 時系列湿度ガイダンスの開発. 平成 27 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 73-78.
- 米原仁, 2014: 変更の概要. 平成 26 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1-3.
- Fiorino, M. and R.L. Elsberry, 1989: Some aspects of vortex structure related to tropical cyclone motion. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 975-990.

1.3 メソ数値予報システムの特性の変化¹

1.3.1 はじめに

全球モデル (GSM) が GSM1403 から GSM1603 へと更新されたことを受けて、メソ数値予報システムに与えられる境界値も GSM1603 の予測値へと変更された。本節では、この変更によるメソ解析値およびメソモデル (MSM) の予測値への影響を述べる。

1.3.2 領域モデルにおける境界値

数値予報モデルの大きな役割の一つは大気の流れを未来にわたって予測することであり、地球上の一部の領域を予測対象としている領域モデルである MSM や局地モデル (LFM) においては、予報変数が表す物理量の予測領域外から予測領域内への流入や、予測領域内から予測領域外への流出、すなわち境界面におけるフラックスを境界条件（あるいは「境界値」と呼ばれる）として与える必要がある（詳しくは河野・荒波 (2014) などを参照）。

領域モデル内の大気には下部、側面、上部の3つの境界がある。下部境界については、MSM や LFM の地表面モデル（地表面過程）によって地表面と大気との運動量、熱、水蒸気の流入・流出（地表面フラックス）が与えられる。一方、側面境界については、MSM では GSM の予測値、LFM では MSM の予測値を境界条件に利用し、これらを用いて境界面におけるフラックスを計算している。また、上部境界については、境界面におけるフラックスはゼロであること、すなわち上部境界面を通じて予測領域内外での流入・流出がないことを仮定している。

それに加え、側面境界や上部境界の一定の幅（MSM では側面は境界から 180 km、上部は高度約 15 km より上空）の領域に、レイリーダンピングを適用している（原 2007）。レイリーダンピングは、予測値をある時定数²（境界面から離れるほど大きい）で境界値に近づける強制力を加えるものである。境界値は異なるモデルの予測値から与えられることから、境界値から計算される境界面のフラックスが予測領域内部のフラックスと連続的につながる保証はなく、不連続が生じた場合には人為的な現象をモデルで表現してしまう。たとえば、境界面とそのすぐ内部との間に大きなフラックスの差があると、そこで収束や発散が生じてしまい、不自然な上昇流など本来は存在しない現象を表現してしまう可能性がある。このように境界付近の領域内部の予測値と境界値が大きく乖離した場合に、その結果として生じる現実大気にはない表現を抑制することがレイリーダンピングの目的の一つである。

また、レイリーダンピングは音波、重力波などの波

の境界面での人為的な反射を抑制している。波は一般に媒質が急激に変化するとその境界で反射を起こす。上部境界は境界面でフラックスがゼロであることを仮定しているが、これは大気に人工的に蓋をしたのと同じ状態であり、上向きに伝搬した波がその蓋で下向きに反射される。この反射は明らかに人為的な境界条件の設定によって生じた人工的なものであり、除去する必要がある。レイリーダンピングは、このような反射を抑制している。

以上のように、境界面でのフラックス、レイリーダンピングを通じて境界値の情報が入力され、その情報は時間の経過とともに領域内部に移流していく。

1.3.3 境界値の変化による解析値への影響

境界値がもたらす領域モデルの予測への影響については、これまでも原 (2007)、越智・石井 (2013) などで紹介されている。また、本テキストの第 4.1 節でも、境界から流入する渦位に着目して境界値による影響を具体的な事例で論じている。

一方、境界値はモデル予測値だけではなく、モデルの初期値となる解析値にも影響を与える³。室井・佐藤 (2012) でも説明されているように、一般に解析では、前回の解析値を初期値とした解析時刻までのモデル予測値（メソ解析では3時間予測値）を第一推定値として、その第一推定値を観測データで修正して解析値が得られる。修正するための観測データがない場合には、第一推定値がそのまま解析値となる。そして、得られた解析値を初期値とするモデル予測値が次の時刻の第一推定値となり、同様の操作が繰り返される。

メソ解析における解析予報サイクルでは、第一推定値の計算や解析（4次元変分法）におけるインナーモデルの繰り返し計算の際に領域外からの流入、流出の計算が必要であるため、予測と同様に境界値が必要となる。境界値の特性は側面境界からの流入やレイリーダンピングを通じて第一推定値に反映されるが、それが観測によって修正されない場合には、境界値の特性を反映した第一推定値がそのまま解析値として採用されることになる。

また、境界値の特性の変化により解析予報サイクルを通じて解析値、第一推定値が変化することで、同化に用いられる観測データの選択が変化して、その結果、解析値も変化する。

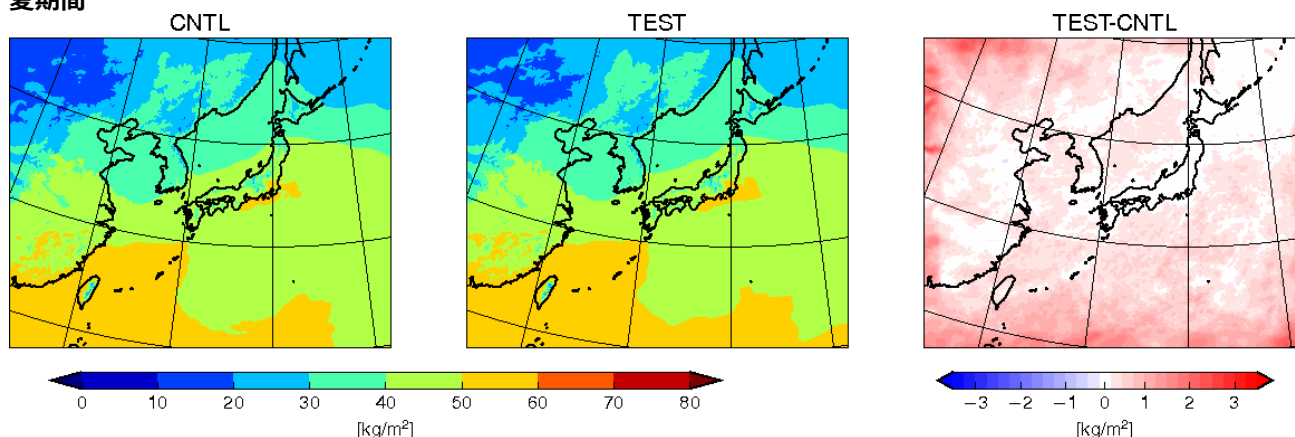
このように境界値の特性の変化は、解析予報サイクルを通じて、解析値の特性も変化させる。解析値への具体的な影響については、モデル予測値の影響と合わせて次項で示す。

³ 原 (2007) では明示的に記していないが、2007 年 11 月に行われた当時の領域スペクトルモデル (RSM) から 20 km GSM への境界値の変更の際に見られた MSM の予測特性の変化は、境界値の変更に伴う解析値の特性の変化による部分も大きい。

¹ 原 旅人

² 時定数が τ であるとき、時間が τ だけ経過すると、予測値と境界値の差は e^{-1} (e は自然対数の底) に減衰する。

夏期間



冬期間

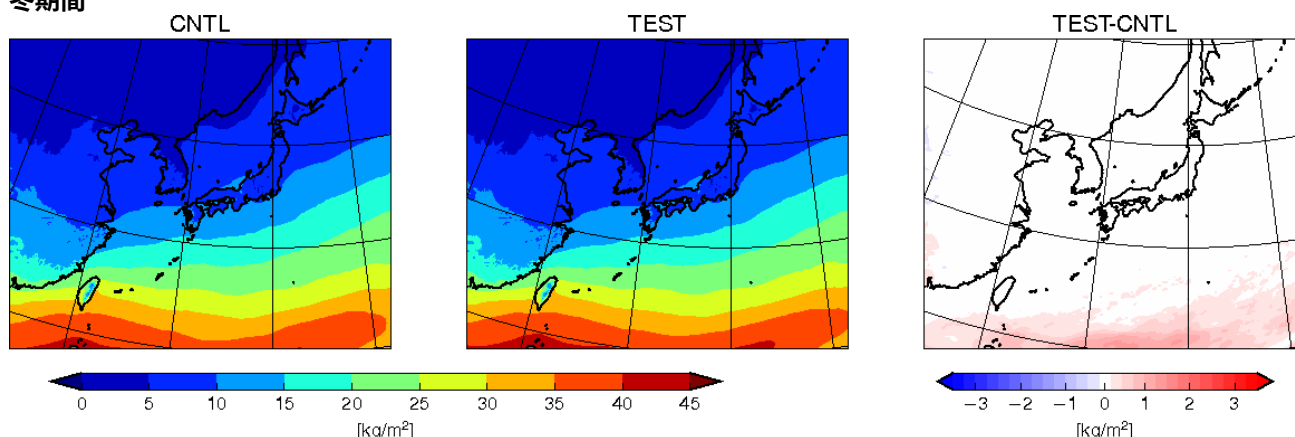


図 1.3.1 夏期間（上段）および冬期間（下段）におけるメソ解析による可降水量の解析値の期間平均値（単位： kg m^{-2} ）。各段、左から CNTL, TEST, TEST-CNTL。夏期間と冬期間で塗り分け色のカラースケールが異なることに注意。

1.3.4 境界値変更によるメソ解析値・MSM 予測値へのインパクト

夏期間（2015 年 8 月 7 日～9 月 11 日）、冬期間（2014 年 12 月 10 日～2015 年 1 月 14 日）それぞれについて、GSM1403, GSM1603 それぞれを境界値に用いた 2 つの解析予報サイクル実験を行った。以下、GSM1403, GSM1603 を境界値に用いた実験をそれぞれ CNTL, TEST と呼ぶ。その結果から、境界値を変更した際の MSM の解析値、予測値へのインパクトを示す。ここで用いる統計検証手法は瀬川（2005）で紹介されているものと同じである。

(1) 可降水量・比湿の解析値および予測値

図 1.3.1 に夏期間、冬期間それぞれについて、CNTL, TEST それぞれの可降水量の解析値の期間平均値、およびその期間平均値の TEST と CNTL の差を示す。夏期間に注目すると、予測領域の広い範囲にわたって可降水量の解析値が大きくなっていることがわかる⁴。こ

れは GSM1603 の方が GSM1403 よりも水蒸気量が大きくなっていることに対応している。このように、境界値の変更は解析値に大きな影響を与えている。

ここで見られた解析値の変化の観測との整合性を検討するために、図 1.3.2（左図）に MSM の予測領域内にあるゾンデ観測と比較したときの比湿の解析値の平均誤差 (ME) を示す。CNTL では下層の比湿に大きな負バイアス、すなわち大きな乾燥バイアスがあったが、TEST ではそのバイアスが大きく縮小していることがわかる。このことから、境界値を変更したことによる解析値の比湿、さらには可降水量の変化はより観測と合致する変化であることがわかる。

なお、図 1.3.1 に示したのは、あくまでも可降水量の解析値の期間平均の変化であることに注意したい。期間平均では最大 1 kg m^{-2} 程度の増加が予測領域に広がっているが、個別の事例で見ると、CNTL と TEST の差が非常に大きい事例が見られる。図 1.3.3 は南の境界から台風が領域内に入ってきた事例における CNTL, TEST それぞれの可降水量の解析値、およびその解析値の TEST と CNTL の差である。台風周辺では CNTL よりも TEST の方が可降水量がかなり大きくなってい

も可降水量が多い予測特性があることが分かる。

⁴ 図 1.3.1 の上段の一番右の図で、可降水量の解析値の TEST と CNTL の差が側面境界付近で顕著であるのはレイリーダンピングによるものである。レイリーダンピングは解析でも予測でも強制的に境界値に近づけようとするため、境界値の特性の変化が出やすい。この図からも GSM1603 は従来より

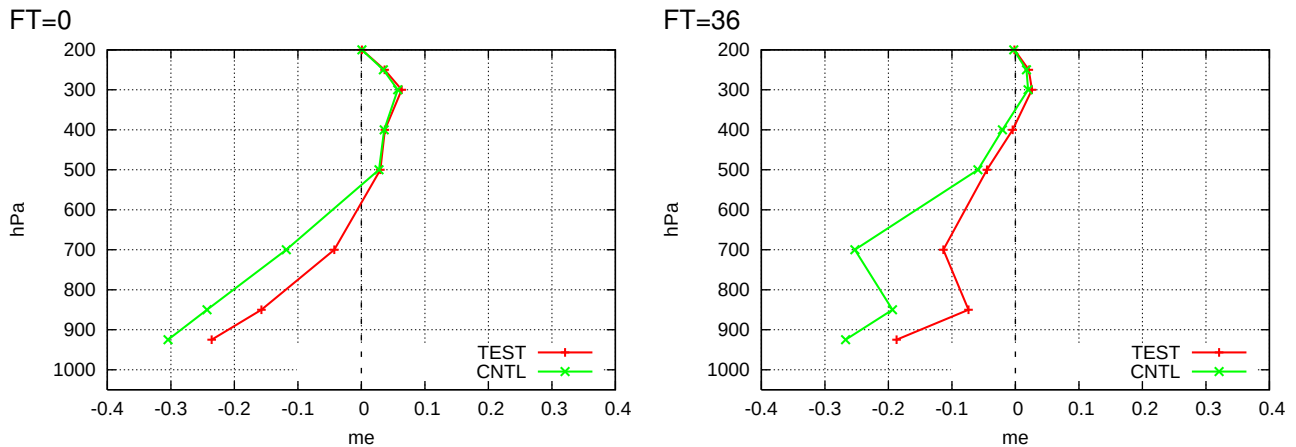


図 1.3.2 夏期間のメソ解析による比湿の解析値（左）および MSM による比湿の 36 時間予測値（右）のゾンデに対する平均誤差。横軸が比湿の平均誤差（単位： 10^{-3}kg kg^{-1} ）で、縦軸が気圧（単位：hPa）を示す。緑線：CNTL、赤線：TEST。

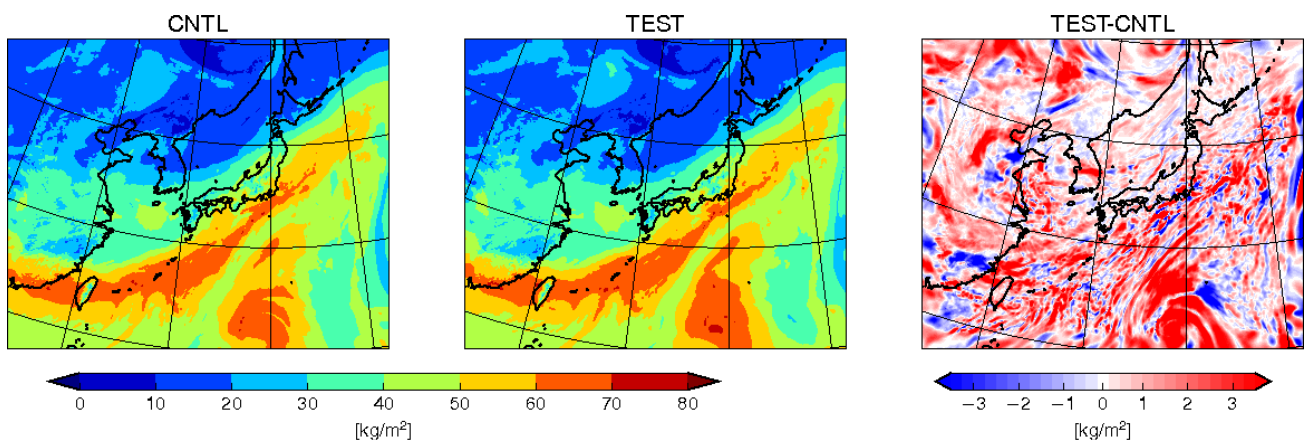


図 1.3.3 2015 年 9 月 7 日 00UTC におけるメソ解析による可降水量の解析値（単位： kg m^{-2} ）。左から CNTL, TEST, TEST-CNTL。塗り分けのカラースケールは図 1.3.1 上段と同じである。

ることがわかる。これは、GSM1603 で台風の表現が変化して、それが南の境界を通じて流入したためである。

以上のように、特に夏期間について、モデルの初期値から水蒸気量が大きくなっていることが今回の境界値変更によるメソ解析値の特性の大きな変化の一つである。そして、比湿の初期値に見られた下層の乾燥バイアスの改善傾向は予測でも見られる（図 1.3.2 の右図）。

冬期間は、南側境界付近での可降水量の解析値がやや増加しており（図 1.3.1 の下段）、熱帯での GSM の予測特性の変化を反映していると考えられるが、夏期間に比べると MSM の予測領域内での変化は限定的であり、予測への影響もあまり大きくない。

(2) 降水予測の統計検証

解析値から下層の乾燥バイアスが改善された結果、TEST では CNTL よりも成層安定度が小さくなりやすくなる⁵。そのことや可降水量の変化が降水予測の特性も変化させている。図 1.3.4 は検証格子を 20 km としたときの 3 時間降水量予測について、スレツスコ

ア、バイアススコアを閾値ごとに夏期間、冬期間それぞれについて示したものである。CNTL と TEST を比較したとき、夏期間はスレツスコアに改善が見られるが、バイアススコアで見ると CNTL にも存在した強い降水の予測頻度過大傾向が TEST で拡大しているのがある。これは、上で見たように、成層安定度が小さくなったことや水蒸気量が増えたことで、強い降水がより予測されやすくなったことが一因であると考えられる。

冬期間についても、15, 20 mm/3h の閾値でスレツスコアの改善が見られるが、10 mm/3h 以上の閾値では、予測頻度過大傾向が拡大している。

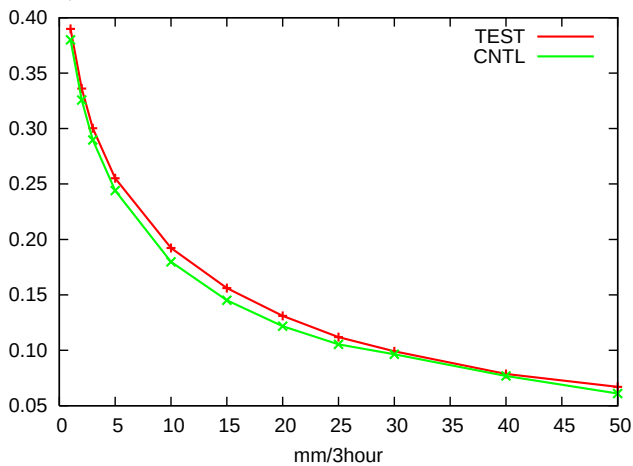
これらのスレツスコア、バイアススコアの変化を解釈するために、スレツスコア、バイアススコアに加えて、捕捉率、空振り率も合わせてみるができる POD-SR ダイアグラムを夏期間、冬期間それぞれについて図 1.3.5 に示す（POD-SR ダイアグラムの見方は付録 D.3.13 を参照）。

夏期間については、CNTL に比べて TEST の方が点が上に移動しているのがある。これは、空振り率は変

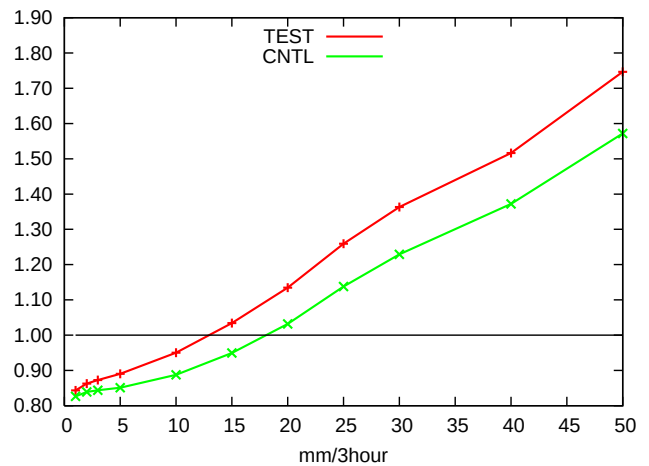
⁵ 下層の比湿が大きくなると、下層の相当温位が高くなり、成層安定度は小さくなる。

夏期間

スレツスコア

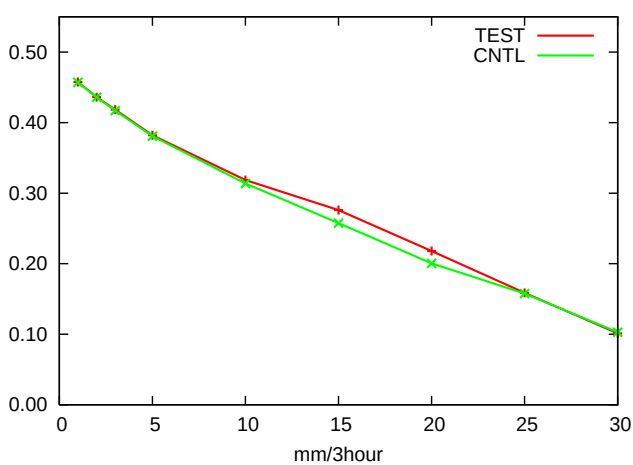


バイアススコア



冬期間

スレツスコア



バイアススコア

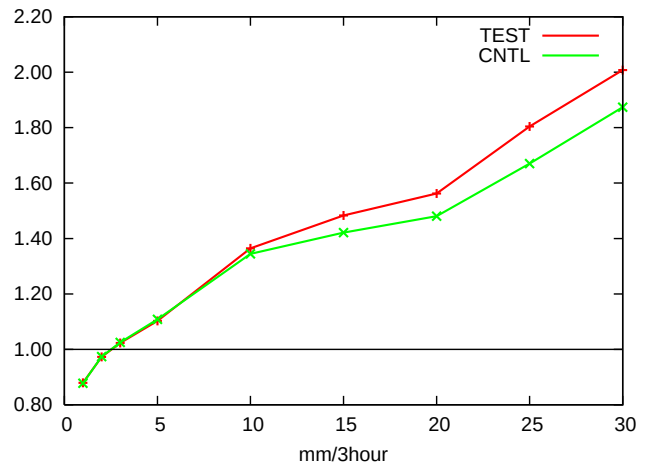
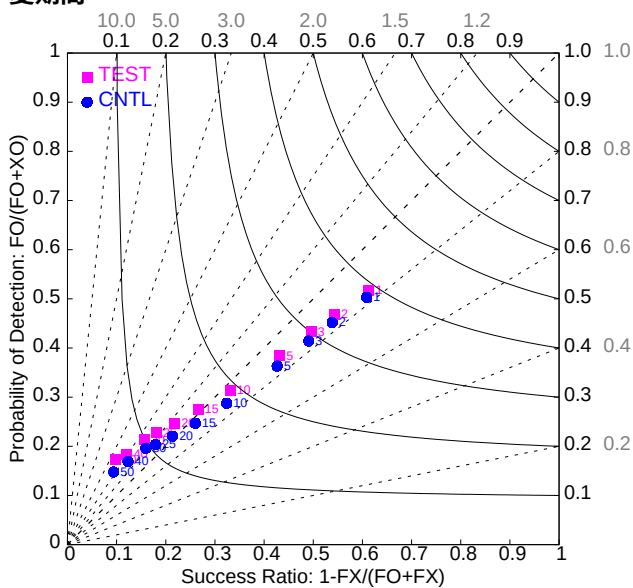


図 1.3.4 夏期間（上段）、冬期間（下段）の 3 時間降水量予測の閾値別スレツスコア（左列）およびバイアススコア（右列）。横軸は 3 時間降水量の閾値（単位：mm/3h）。緑線：CNTL、赤線：TEST。

夏期間



冬期間

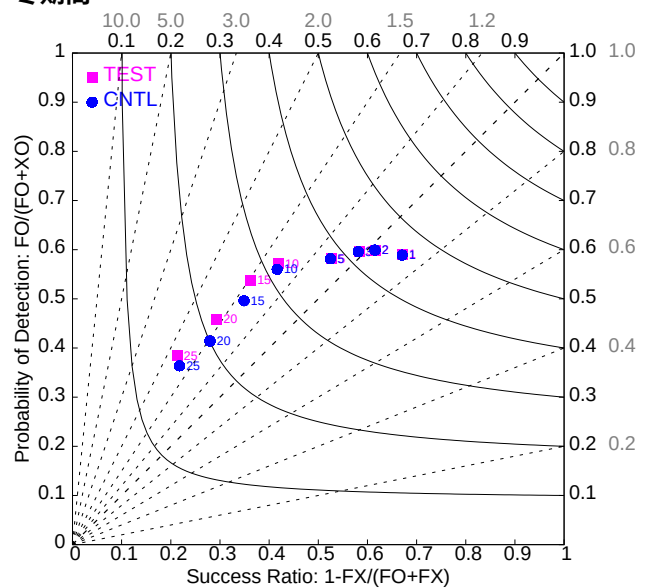


図 1.3.5 夏期間（左）、冬期間（右）の 3 時間降水量予測の閾値別スコアについての POD-SR ダイアグラム。CNTL は青丸、TEST は赤四角で示し、図中の各点付近の数字は閾値（単位：mm/3h）を示す。

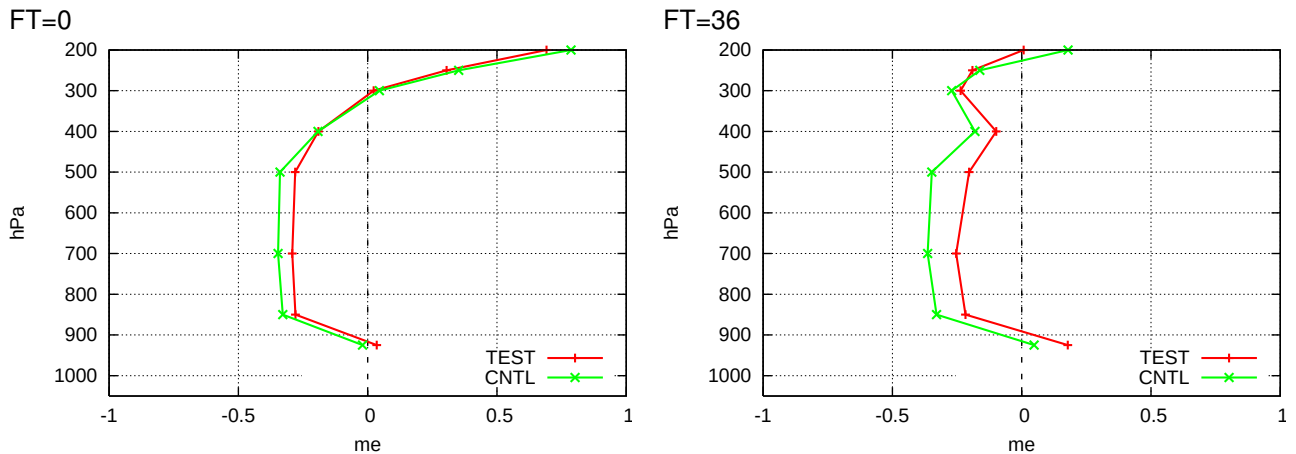


図 1.3.6 夏期間のメソ解析による気温の解析値（左）および MSM による気温の 36 時間予測値（右）のゾンデに対する平均誤差。横軸が気温の平均誤差（単位：K）で、縦軸が気圧（単位：hPa）を示す。緑線：CNTL、赤線：TEST。

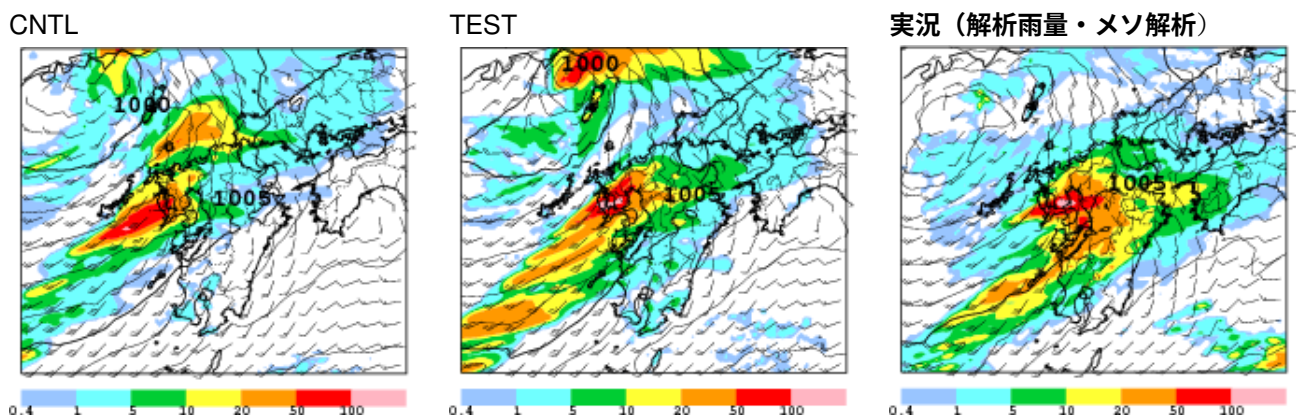


図 1.3.7 2015 年 8 月 11 日 03UTC を初期時刻とした CNTL, TEST それぞれの 8 月 12 日 03UTC に対する前 3 時間降水量（塗り分け）、海面更正気圧（黒等値線、単位：hPa）、水平風（黒矢羽根、短い矢羽根が 5 m/s）の予測（FT=24）と、同時刻の同要素の解析。左：CNTL の予測、中：TEST の予測、右：実況（降水量は解析雨量、海面更正気圧および矢羽根はメソ解析の解析値。）

化しないが、捕捉率が向上していることを示している。

冬期間については、10~20 mm/3h では各点が右上に移動している。これは、捕捉率を高めるとともに空振り率が減っていることを示している。ただし、空振りの減少よりも捕捉の増加が大きいために、バイアスコアは大きくなっている。

以上より、夏期間についてはほぼ全部の閾値で、冬期間については 10 mm/3h 以上の閾値で予測頻度の増大が見られ、その結果、捕捉率の増加にはつながっているものの、空振り率の減少幅は小さいことがわかる。すなわち、実況にはない偽の降水予測を減らすことはできていないが、従来は予測できていなかった降水の一部を予測できるようになった場合が多いことを示している。

(3) その他の統計検証

既述の比湿以外の高層検証、地上要素（地上風速、地上気温など）の検証結果では、気温の鉛直プロファイルの解析値、予測値両方の改善が夏期間において顕著であった（図 1.3.6）。これも比湿同様に境界値を与え

る GSM の予測特性が変わり、それが境界値を通じて解析値、さらには予測値に及ぼしたものとと言える。

その他の検証要素には大きな変化はなかった。

(4) 事例

今回の境界値の変更の影響を端的に表す事例を示す。取り上げるのは、2015 年 8 月 12 日に九州の北西にある低気圧からのびる前線の暖域内で強い降水が観測された事例である。

図 1.3.7 にその事例の実況、および CNTL と TEST それぞれの予測を示す。CNTL と TEST を比較したときに、TEST の方が降水域が広い事が分かる。特に九州内陸への降水の広がり方が TEST の方が大きく、CNTL よりは実況との対応がよい。実況で長崎県から熊本県北部にのびる強い降水帯についても、TEST のほうが実況のように内陸まで表現している。

統計検証結果から、降水の予測頻度は CNTL よりも増える傾向にあり、従来は予測できていなかった降水を捕捉できる事例が多くなったことが示唆されるこ

とをすでに述べたが、この事例においてもその傾向を示していることが分かる。

1.3.5 まとめと利用上の留意点

GSM1603 の予測値を境界値に用いたメソ数値予報システムの特徴を、従前の GSM1403 の予測値を境界値に用いたものと比較しながら述べた。大きな特性の変化の一つは、夏期間において解析値（モデルの初期値）の下層の乾燥バイアスが改善し、従来より比湿や可降水量の増加が見られることである。この解析値における水蒸気量の変化は予測にも反映され、予測においても下層の乾燥バイアスが改善する。

解析および予測における下層の湿潤化によって、夏期間では降水の予測頻度が増える傾向が見られる。このことは、空振り率は大きく減らないものの、捕捉率が大きく改善しているという統計検証にもあらわれている。

このように、従来より多くの降水実況を捕捉できるようになっている点では改善していると言えるが、一方で、空振り率の減少が小さいことから、予測頻度の過大傾向がやや拡大して、従来よりも降水の予測が多くなりやすいことに留意していただきたい。

参考文献

- 越智健太, 石井憲介, 2013: 予報時間を 39 時間に延長した MSM の初期時刻別統計検証. 平成 25 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 14-17.
- 河野耕平, 荒波恒平, 2014: 側面・上部境界条件. 数値予報課報告・別冊第 60 号, 気象庁予報部, 57-61.
- 瀬川知則, 2005: 統計検証. 平成 17 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 18-26.
- 原旅人, 2007: モデルの変更点の概要. 平成 19 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 29-31.
- 室井ちあし, 佐藤芳昭, 2012: データ同化. 平成 24 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 18-22.

1.4 ガイドンスの特性の変化¹

1.4.1 はじめに

本節では、物理過程が改良された GSM (GSM1603) への変更に伴う GSM ガイドンスへの影響について説明する。一般的にモデルの変更はガイドンスの特性や精度にも影響を与えるため、必要に応じて予測式の最適化を行わなければならない。過去の 2014 年 3 月に行われた鉛直層数の増強や物理過程が改良された GSM (GSM1403) においてガイドンスへの影響調査と予測式の最適化を行った (松下ほか 2014)。今回の改良でも GSM の予測特性が大きく変わったため、ガイドンスへの影響調査を実施した。

業務化試験の予測値を利用して 2015 年 7 月～9 月 (以下「夏実験期間」) 及び 2014 年 12 月～2015 年 2 月 (以下「冬実験期間」) における GSM ガイドンスの精度の変化を確認した²。その結果、降水や湿度、視程分布予想など多くの要素で改善が確認された一方、冬実験期間の気温については改悪となった。以下の項では特に特性・精度の変化が大きかったガイドンスについて、スコアと事例を示しながら説明する。

- 降水量ガイドンス (第 1.4.2 項)
- 降雪量ガイドンス (第 1.4.3 項)
ともにモデルの降水量予測の精度向上をうけて改善
- 気温ガイドンス (第 1.4.4 項)
陸面過程の変更によってモデルの気温の予測特性が変化し、冬期に限り RMSE の観点で改悪
- 発雷確率ガイドンス (第 1.4.5 項)
予測精度への影響を緩和するため、
GSM1603 も利用して予測式を再作成し、中立

なお、GSM の特性の変化は、それを側面及び上部境界条件として用いる MSM にも影響を及ぼし、MSM ガイドンスや航空気象予報ガイドンスについても影響を与える。しかし、精度の確認を行ったところ、特性の変化は小さくほぼ同等の精度であったため、本節では説明を省略する。また本節では、GSM1403 を入力としたガイドンスを CNTL、GSM1603 を入力としたガイドンスを TEST と記述する。

¹ 後藤 尚親

² 夏実験期間の検証は、逐次学習型ガイドンス (降水や気温など) について GSM1603 の特性に最適化した際の精度検証を行うために、冬実験期間を延長し、夏実験期間まで予測式の最適化を続けたガイドンスを用いて検証している。また夏実験期間から業務化された 2016 年 3 月までについても GSM1603 の予測値を用意し、予測式の最適化を継続した。この結果、業務化されたガイドンスは本稿で示した結果よりも GSM1603 の特性によく適合していたと期待できる。

1.4.2 降水量ガイドンス

図 1.4.1 に 3 時間平均降水量ガイドンス、図 1.4.2 に 1 時間最大降水量ガイドンスの、閾値別のエクイタブルスレットスコア (ETS) 及びバイアススコア (BI) を示す。夏実験期間及び冬実験期間ともに ETS が大きく改善している。この ETS の改善は主にモデルの降水表現が大きく改善したことが影響していると考えられる (第 1.2.4 項)。予測頻度については、BI から読み取れるように夏実験期間の 1 時間最大降水量ガイドンスでの過少傾向は改善しているが、冬実験期間や 3 時間及び 24 時間最大降水量ガイドンス (図略) ではやや過剰となっている。

大雨の予測の事例として、図 1.4.3 に 2015 年 9 月 10 日 03JST を対象とする GSM の 3 時間降水量と 3 時間最大降水量ガイドンスの予測と、対応する解析雨量を示す (平成 27 年 9 月関東・東北豪雨の事例)。CNTL と TEST のモデルの予測を比較すると、TEST では関東から東北にかけて南北に伸びる降雨域をより実況に近く予測できている。これに対応して、TEST の GSM ガイドンスの降水分布も実況に近づいたと考えられる。

図 1.4.4 に、2015 年 9 月 10 日 12JST を対象とする 24 時間最大降水量ガイドンスの予測と、対応する解析雨量を示す。3 時間最大降水量ガイドンスと同様に、GSM の変更によって降水分布が実況に近づいており、改善していることがわかる。

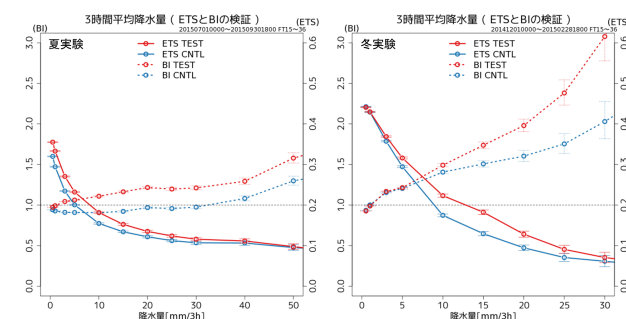


図 1.4.1 夏実験期間 (左) 及び冬実験期間 (右) における GSM3 時間平均降水量ガイドンスの対解析雨量の ETS (実線、右軸) 及び BI (破線、左軸)。青線は CNTL、赤線は TEST の結果をそれぞれ示す。エラーバーは 95% の信頼区間を表す。FT=15~36 時間までの予測値を検証に用いた。検証は 0.25 度格子の領域で行い、検証格子の中の平均値を対象とした。

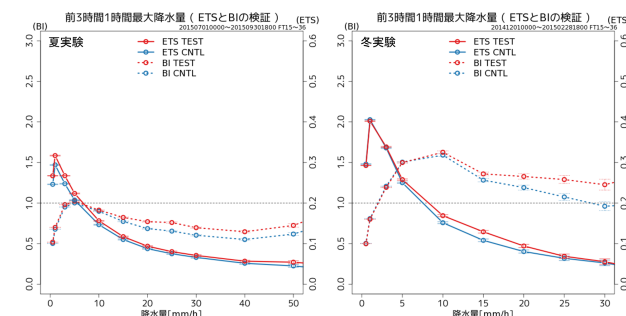


図 1.4.2 図 1.4.1 と同じ。ただし検証対象は 1 時間最大降水量ガイドンス。

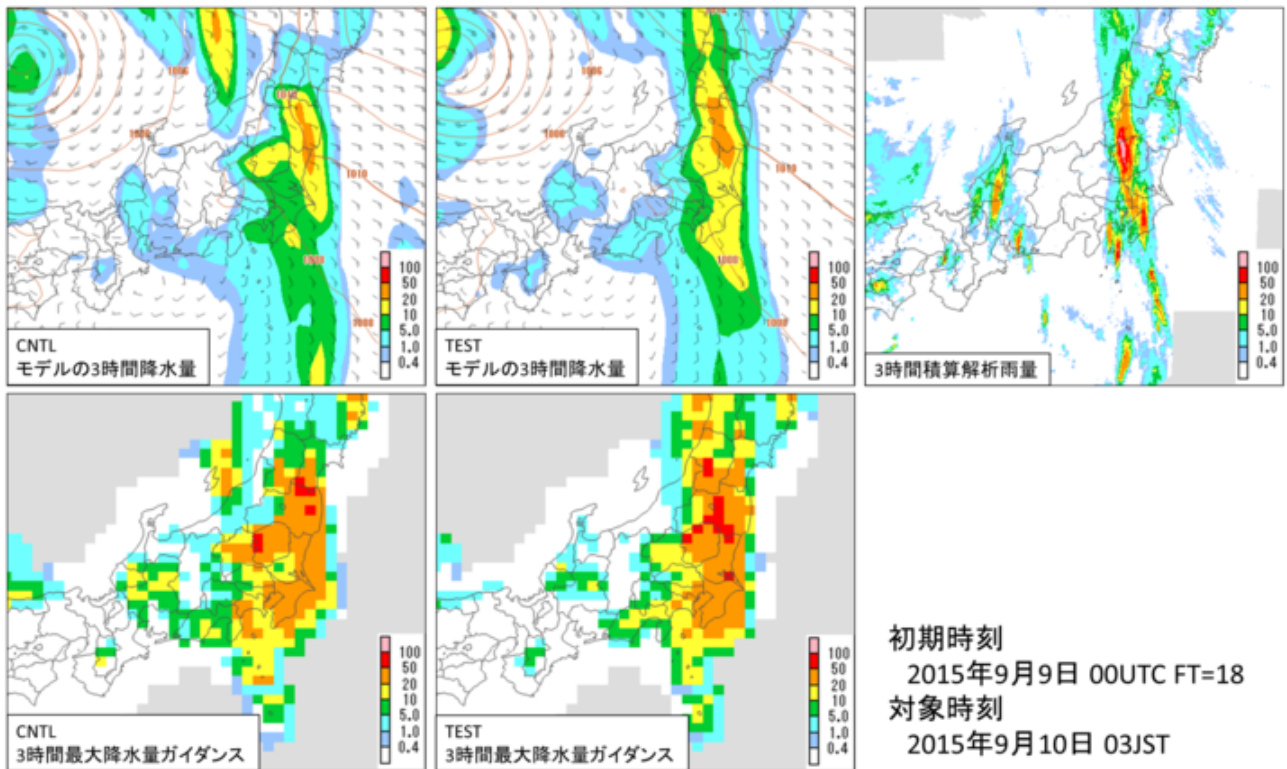


図 1.4.3 2015 年 9 月 10 日 03JST を対象とするモデルの 3 時間降水量と解析雨量（上段）と 3 時間最大降水量ガイダンス（下段）による予測 (FT=18)。左列は CNTL、中列は TEST の予測をそれぞれ示す。色は 3 時間積算降水量 [mm/3h]、等値線は海面更正気圧 [hPa]、矢羽は地上風 [kt] を表す。

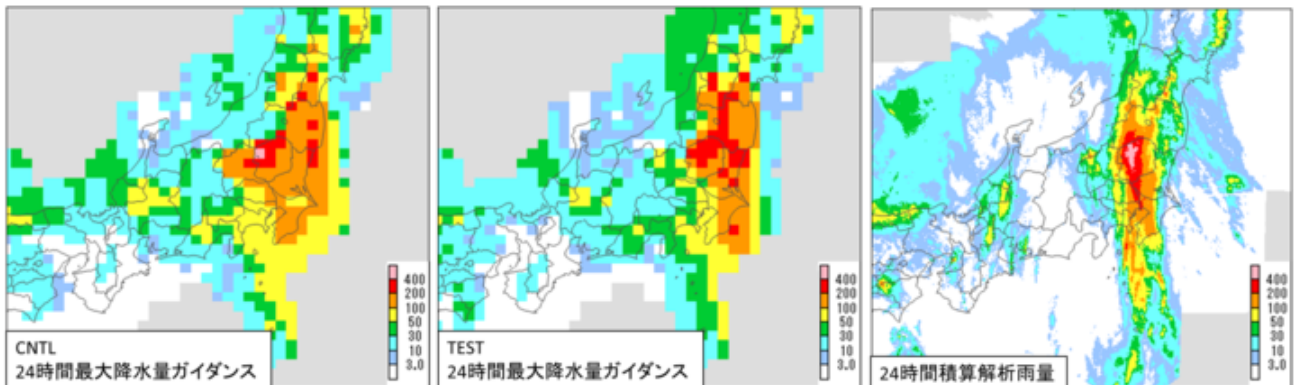


図 1.4.4 2015 年 9 月 10 日 12JST を対象とする 24 時間最大降水量ガイダンス（左：CNTL、中：TEST）による予測 (FT=27) と、対応する解析雨量（右）。色は 24 時間積算降水量 [mm/24h] を表す。

1.4.3 降雪量ガイダンス

図 1.4.5 に、6 時間及び 12 時間最大降雪量ガイダンスについて、降雪量の閾値別の ETS と BI を示す。ETS から、6 時間、12 時間最大降雪量ガイダンスともにやや予測精度が改善していることがわかる。また BI についても、多くの閾値で 1 に近くなり、予測頻度が実況に近くなっている。

降雪量ガイダンスの事例として、急速に発達しながら関東地方南岸を通過し、関東地方平野部でも積雪を観測した南岸低気圧について、図 1.4.6 に 2016 年 1 月 18 日 09JST を対象とする 3 時間最大降雪量ガイダンスの予測と、対応する観測値を示す。CNTL では関東地方平野部北部にほとんど降雪を予測していないが、

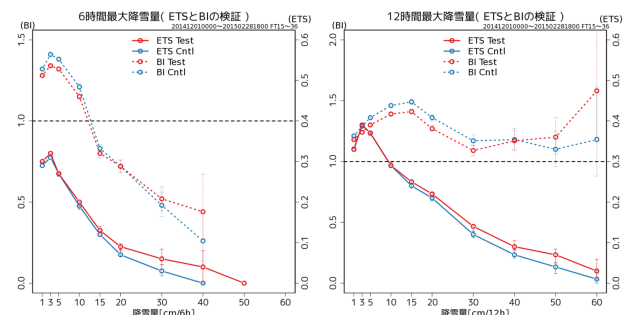


図 1.4.5 冬実験期間における GSM6 時間最大降雪量ガイダンス（左）と 12 時間最大降雪量ガイダンス（右）の ETS（実線、右軸）及び BI（破線、左軸）。青線は CNTL、赤線は TEST の結果をそれぞれ示す。エラーバーは 95% の信頼区間を表す。FT=15~36 時間までの予測値を検証に用いた。

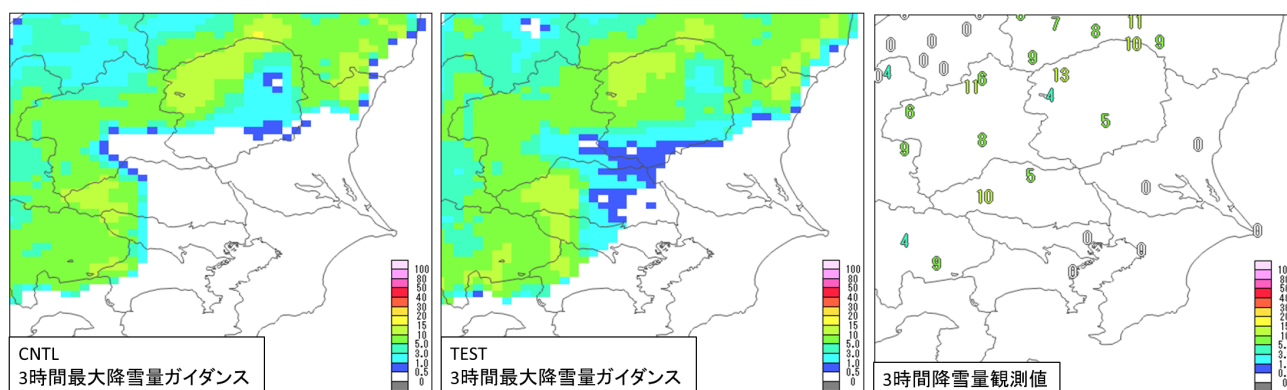


図 1.4.6 2016 年 1 月 18 日 09JST を対象とする 3 時間最大降雪量ガイダンス（左：CNTL、中：TEST）による予測（FT=48）と、対応する観測値（右）。色は 3 時間降雪量 [cm/3h] を表す。

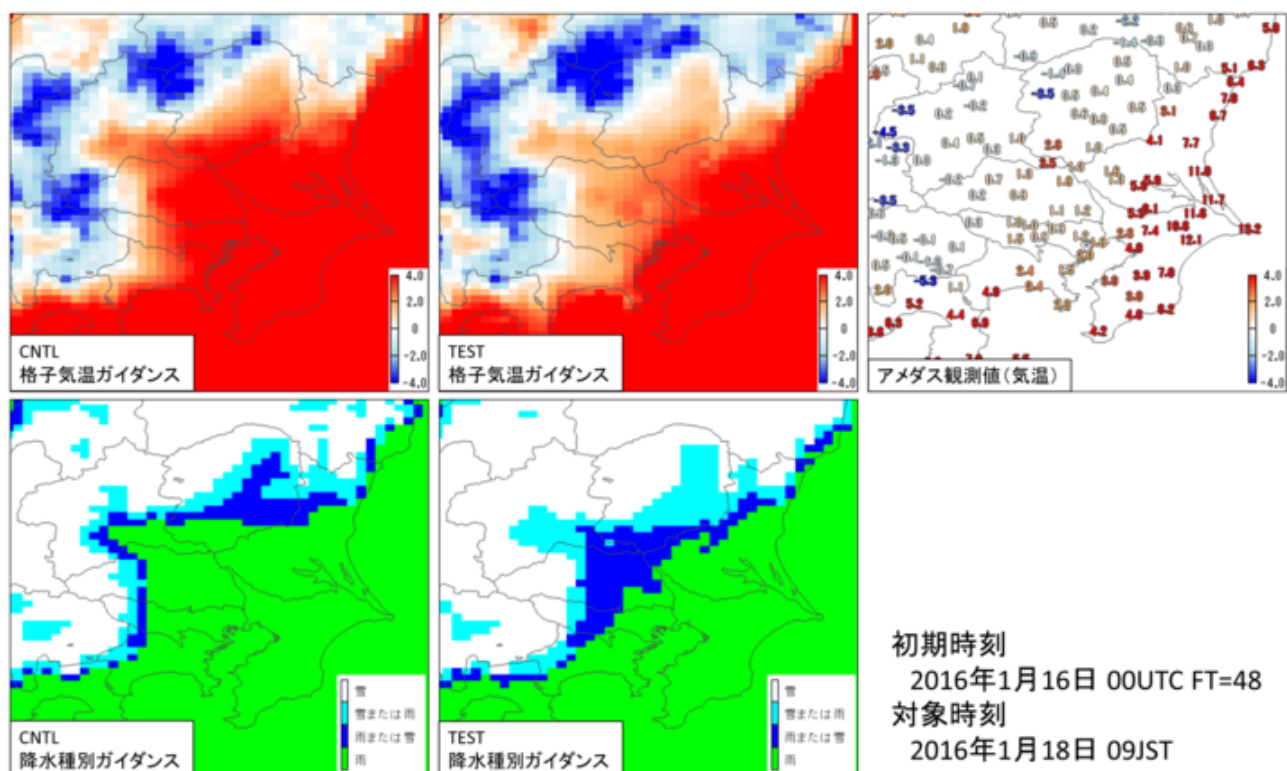


図 1.4.7 2016 年 1 月 18 日 09JST を対象とする格子気温ガイダンスとアメダス気温観測値 [°C]（上段）と降水種別ガイダンス（下段）による予測（FT=48）。左列は CNTL、中列は TEST の予測をそれぞれ示す。降水種別ガイダンスは緑が雨、青が雨または雪、水色が雪または雨、白が雪をそれぞれ示す。

TEST では降雪を予測する範囲が広がり、実況に近づいている。

この要因を確認するため、同じ時刻における格子気温ガイダンスと降水種別ガイダンスによる予測を図 1.4.7 に示す。なお、CNTL, TEST とともに降水は関東地方に広く予測されており、降雪量の予測に与えた影響は小さかった（図略）。CNTL に比べ、TEST では関東地方の平野部で格子気温ガイダンスが予測する気温が低くなり実況に近づいている。この影響で降水種別が「雨または雪」と予測される範囲が広がり、降雪量予測に差が出たものと考えられる。

1.4.4 気温ガイダンス

図 1.4.8 に、気温ガイダンスについて、予報対象時刻別の平方根平均二乗誤差 (RMSE) と平均誤差 (ME) を示す。夏実験では CNTL, TEST 間で大きな違いは見られないものの、冬実験期間の夜間では RMSE がやや大きくなり、負バイアス傾向がやや強くなるなど TEST の予測精度低下が見られる。

この要因を確認するため、図 1.4.9 には、冬実験期間における 00UTC を初期値とする翌日の最低気温の散布図とその回帰直線を示す。モデルの地上気温予測とそれを入力とするガイダンスのどちらも、CNTL には実況で -10°C を下回るような低温時に高温バイアスがあり、特に -20°C より低い気温はほとんど予想されていない。これに対し TEST のモデルでは、後述のように予測を大きく外す事例の増加により RMSE は大きく

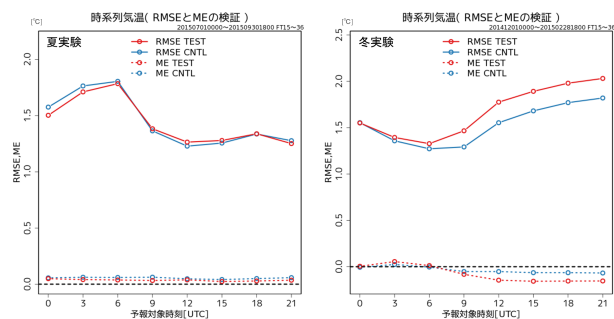


図 1.4.8 夏実験期間 (左) 及び冬実験期間 (右) における GSM 気温ガイダンスの対アメダス気温の予報対象時刻別の RMSE (実線) 及び ME (破線)。青線は CNTL、赤線は TEST の結果をそれぞれ示す。FT=15~36 時間までの予測値を検証に用いた。

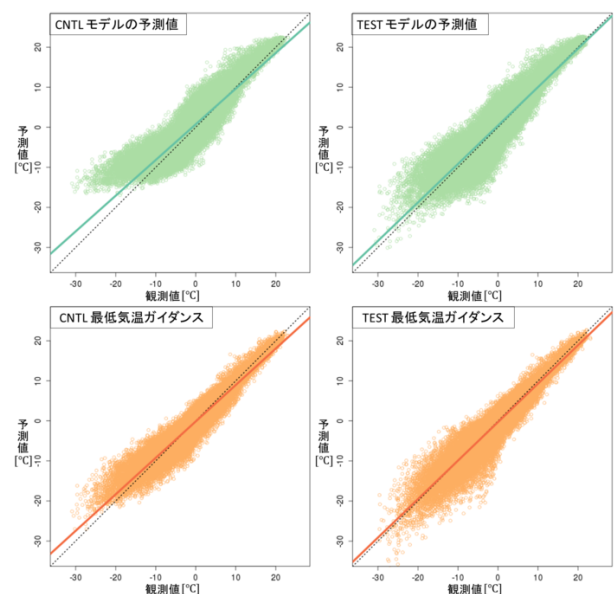


図 1.4.9 冬実験期間・全予測地点における、00UTC を初期値とする翌日の最低気温の散布図と回帰直線。横軸がアメダス観測値で縦軸がモデル (緑、上段) とガイダンス (橙、下段) による予測値。左列は CNTL、右列は TEST の結果をそれぞれ示す。

なったものの、低温時の高温バイアスが解消されており、改善している面も確認出来る。これらは図中に示した回帰直線でも確認でき、CNTL に比べ TEST の方が回帰直線が対角線に近づいていることがわかる。この予測特性の変化は陸面過程の変更によって、従前は十分に表現できていなかった夜間の放射冷却による気温低下がある程度表現可能となったことが主要因である (第 1.2.5 項)。その結果、従前に比べ天気 (晴れ・曇り) の外れによる気温の誤差への影響が大きくなり、結果的に RMSE は大きくなったと考えられる。

更に地点ごとの精度変化を確認するために冬実験期間における 00UTC を初期値とする翌日の最低気温ガイダンスの地点毎の ME を図 1.4.10 に、RMSE を図 1.4.11 に示す。CNTL に比べ、TEST では主に放射冷

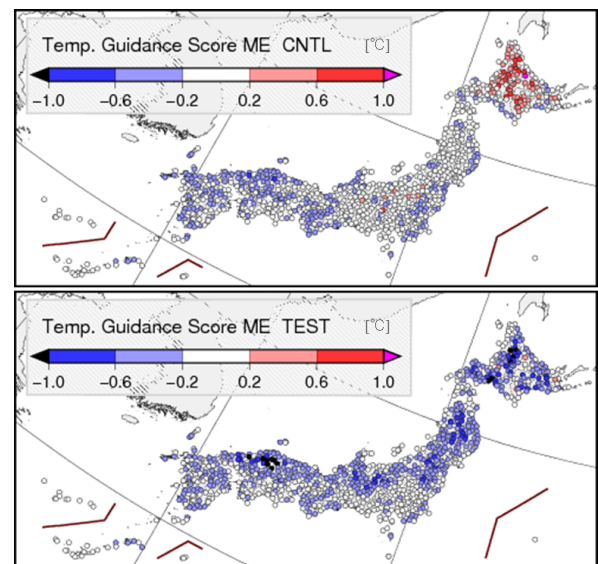


図 1.4.10 冬実験期間における 00UTC を初期値とする翌日の最低気温ガイダンスの地点毎の ME。上は CNTL、下は TEST の結果をそれぞれ示す。

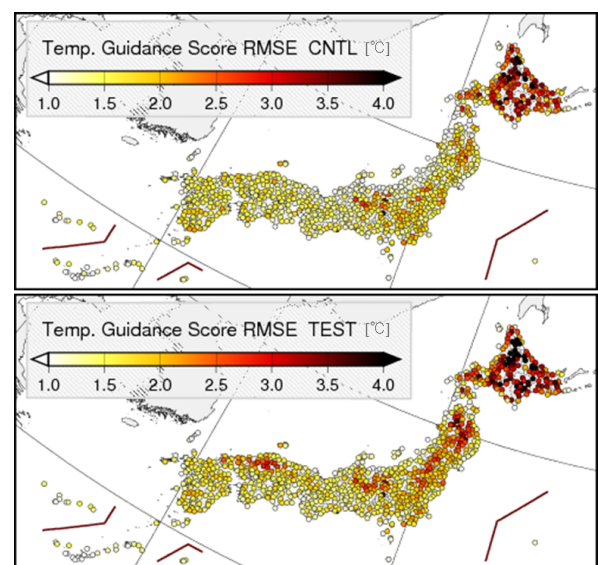


図 1.4.11 図 1.4.10 に同じ。ただし RMSE を表す。

却により低温となりやすい内陸の山間部で負バイアスの拡大と RMSE の増加が見られ、これが予測精度を低下させていることが確認出来る。

今回の変更に伴い気温の予測が大きく変化した例として、図 1.4.12 に松本における 2015 年 1 月 31 日 00UTC 初期値の気温の予測値と観測値を示す。このとき実況では夜間に放射冷却が起きたことで気温が大きく低下した。CNTL のモデルでは放射冷却による気温低下や日変化を表現できず、これを入力とするガイダンスでも同様の傾向であった。これに対し TEST では、モデルで放射冷却による気温低下や日変化を表現できるようになり、さらにモデルのバイアスを補正することによりガイダンスで気温を適切に予測できている。

放射冷却に伴う気温低下をモデルが表現するようになったことで気温の予測が改善した事例がある一方で、モデルの予測する天気の外れにより実況にはない過剰な放射冷却が表現され、誤差が大きくなる事例も見られた。図 1.4.13 に青森における 2015 年 2 月 3 日 00UTC 初期値の気温の予測値と観測値を示す。4 日明け方は地上観測で雲量は 6～9、風速 5 m/s ほどであり、放射冷却が起きやすい典型的な環境場ではなく、地上気温の低下は小さかった。しかしモデルでは、CNTL、TEST ともに「雲量は約 0 でほぼ無風」と放射冷却が起きやすい環境場を予測していた。CNTL では本来なら放射冷却で気温低下が予測されることが期待されるにも関

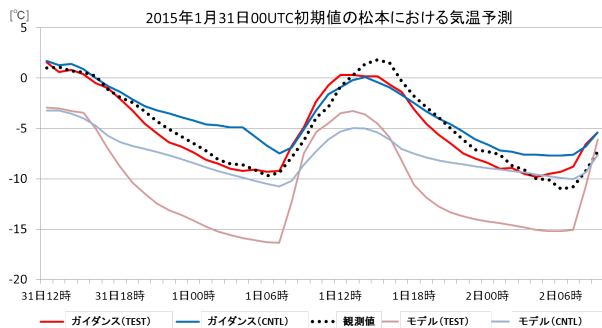


図 1.4.12 松本における 2015 年 1 月 31 日 00UTC 初期値の気温の予測値(実線)と観測値(黒点線)。青線は CNTL、赤線は TEST の結果、濃い色の線は気温ガイダンス、薄い色の線はモデルの予測値を表す。

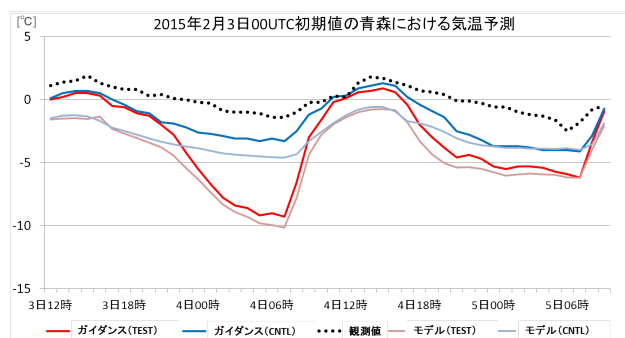


図 1.4.13 図 1.4.12 に同じ。ただし青森における 2015 年 2 月 3 日 00UTC 初期値の気温の予測と観測値。

わらず、それがほとんど表現されなかった結果、気温低下の緩やかな実況とガイダンスの差はあまり大きくならなかった。これに対し、TEST ではモデルが放射冷却に伴う気温低下を素直に予測し、それ故にガイダンスが大外しとなった。このように、天気(晴れ・曇り)の外れ等によって誤差が大きくなることもあるので、利用の際には留意願いたい。なお MSM 気温ガイダンスについては大きく特性が変化していないことを確認している。後藤 (2014) にあるように GSM 気温ガイダンスより MSM 気温ガイダンスの方が統計的には精度が良いことは変わらないので、両者を併せて利用願いたい。

1.4.5 発雷確率ガイダンス

GSM1603 ではモデルが大気安定度の低下を今までより精度よく表現するようになったため、不安定性降水を良く予測する・CAPE が大きくなる等の変化が見られた。この影響で発雷確率ガイダンスは既存の予測式を利用すると確率値が高く変化し、精度が下がることが確認されたため、2014 年 3 月の GSM1403 への変更(松下ほか 2014)と同様に予測式の再作成を行った。新しい予測式の作成には、2014 年 1 月から 11 月 19 日までは GSM1403 で作成されたデータを、2014 年 11 月 20 日から 2015 年については GSM1603 の現業化前の試験データを用いて計 2 年分のデータを利用した。

ここでは TEST として、再作成を行った予測式を利用し、2015 年の予報値について 1 か月抜きクロスバ

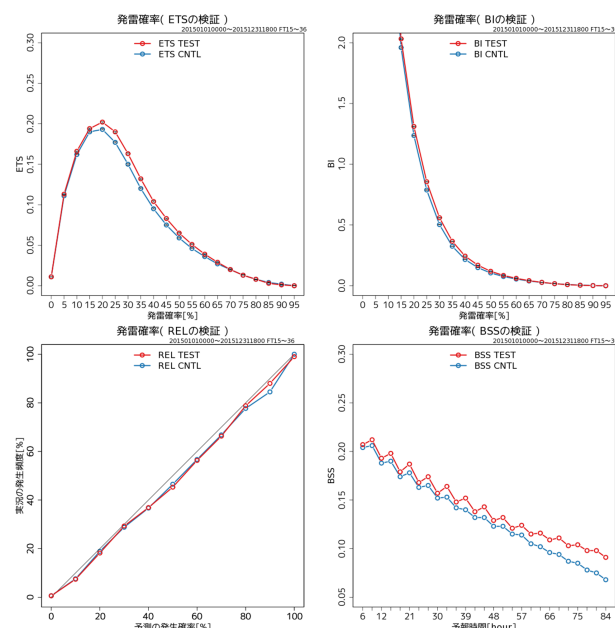


図 1.4.14 2015 年における発雷確率ガイダンスの閾値別の ETS (左上)、BI (右上)、信頼度曲線 (左下) 及び予報時間別の BSS (右下)。青線は CNTL、赤線は TEST の結果をそれぞれ示す。FT=15～36 時間までの予測値を検証に用いた。

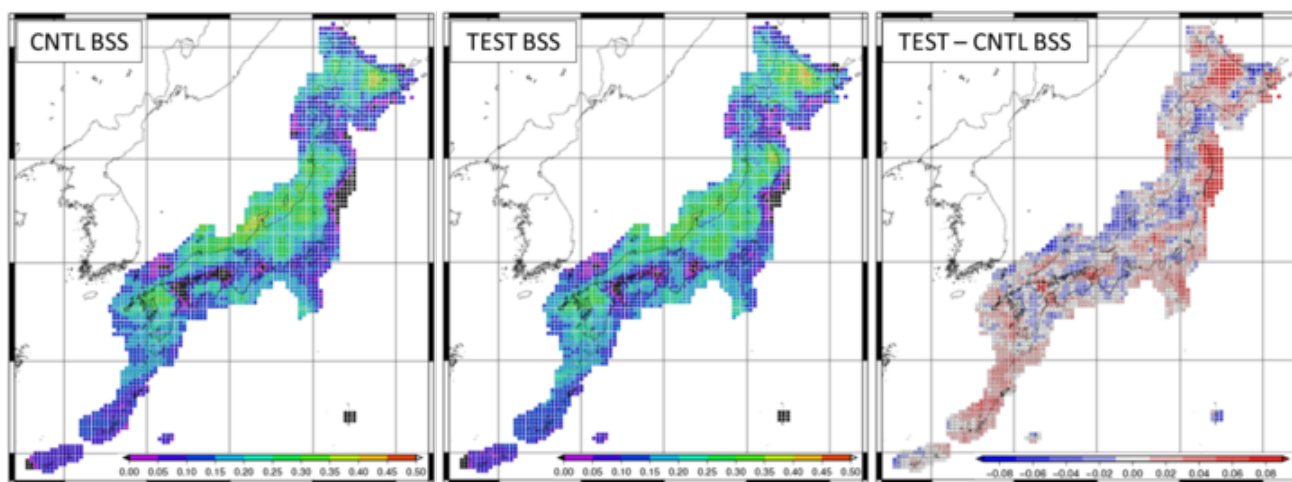


図 1.4.15 2015 年における発雷確率ガイダンスの BSS 分布図。それぞれ CNTL の検証結果（左図）、TEST のクロスバリデーションの検証結果（中図）、TEST と CNTL の BSS の差分（右図）。

リレーション検証³を行った結果を示す。図 1.4.14 は CNTL と TEST について確率の閾値別に見た ETS、BI、信頼度曲線、予報時間別に見たブライアスキルスコア（BSS）、図 1.4.15 は CNTL と TEST の格子別 BSS とその差分図である。予測式の再作成により BI はやや大きくなるが、ETS も全体的に向上している。なお、ETS が最大値をとる確率は変わらず、信頼度曲線の変化も小さいため予測特性として大きな差はなく、予報作業で利用する閾値などは従前のものがそのまま利用できるだろう。また予報時間前半に比べ後半で改善が顕著であるが、これはモデルの改善が精度向上に寄与しているものと考えられる。一方、図 1.4.15 から読み取れるように、BSS の改善は海上が主体であり、陸上では CNTL と同程度となっているところが多い。

1.4.6 その他のガイダンス

これまでの項では取り上げなかったガイダンスについて簡単に紹介する。風ガイダンスと日照率ガイダンスは概ね同等、視程分布予想と夏期の湿度ガイダンスはモデルの下層の湿りの表現が向上した影響で精度が向上した。図 1.4.16 に夏実験期間の視程分布予測の検証結果を示す。松下ほか（2014）で示されていた予測頻度の過大傾向が部分的に解消され、ETS も改善していることがわかる。

1.4.7 まとめ

2016 年 3 月に行われた GSM の変更に伴うガイダンスへの影響を表 1.4.1 にまとめた。本節で示した通り、予測式の最適化や再作成を実施したことで多くのガイダンスで CNTL と精度が同等以上の結果となった。しかし、冬期の最低気温予測についてはモデルの陸面過程の変更により、従前に比べ天気を外れた際の誤差が大きくなる傾向が確認されている。これについての詳細は第 1.4.4 項で示したので参考にしていただきたい。

³ 詳細については松下ほか（2014）の 1.5.1（5）を参照。

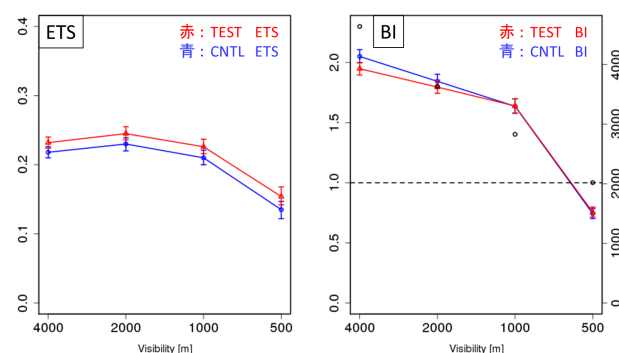


図 1.4.16 夏実験期間における視程分布予想の閾値別の ETS（左図）、BI（右図、左軸）及び事例数（右図、右軸、白丸）。青線は CNTL、赤線は TEST の結果をそれぞれ示す。FT=15～36 時間までの予測値を検証に用いた。

表 1.4.1 夏実験期間（左）及び冬実験期間（右）における、GSM の変更に伴う GSM ガイダンスへの影響。◎、－、× はそれぞれ、GSM の変更に伴うガイダンスの精度の変化が改善、中立、改悪であったことを示す。

種別	夏実験期間	冬実験期間
降水量	◎	◎
発雷確率	－	－
気温	－	×
風	－	－
湿度	◎	－
日照率	－	－
視程分布	◎	◎
降雪量	対象外	◎

参考文献

- 後藤尚親, 2014: 気温ガイダンスの改良. 平成 26 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 72–79.
- 松下泰広, 白山洋平, 飯塚義浩, 井藤智史, 2014: ガイダンス資料への影響. 平成 26 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 35–43.