1.1 変更の概要¹

1.1.1 はじめに

全球数値予報システム(全球モデル・全球解析)は、 明日、明後日の天気予報、台風予報、週間天気予報を 一元的に支援する重要な役割を担っており、数値予報 課では全球数値予報の精度向上へ向けて様々な開発を 行っている。

2014年3月18日00UTC初期値の実行から、これま で開発を進めてきた全球モデル(GSM)および全球解 析についての改良を現業運用システムへ導入した。今 回の変更では、GSMの鉛直層数を増強するとともに、 積雲・重力波・放射・境界層・陸面等の物理過程を中 心に多くの改良を行った(Yonehara et al. 2014)。さら に、この改良を契機に、全球解析についても、GNSS (Global Navigation Satellite System)掩蔽観測の利用 高度化やマイクロ波サウンダ AMSU-Aの未利用チャ ンネルの追加利用、地上GNSS 天頂大気遅延量データ の新規利用を開始した。本節では、GSMの改良および 衛星データ利用についての概要を説明する。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。今回の変更前後の バージョンはそれぞれ GSM1304, GSM1403 である。

1.1.2 鉛直層数増強

表 1.1.1 に今回の変更前後の仕様をまとめる。 GSM0711以来、GSMの鉛直層数は60層、モデルトッ プは0.1 hPaであったが、GSM1403では鉛直層数を 100層へと増強するとともに、モデルトップを0.01 hPa へ引き上げた。鉛直層数を増強した目的は、モデル大 気の成層圏・対流圏における鉛直構造の表現の精緻化 や、人為的な上部境界の影響の低減、衛星観測データ のさらなる利用である。また、鉛直層間隔が小さくなっ たため、時間積分間隔も合わせて600秒から400秒へ と短くしている。

図 1.1.1 に、60 層と 100 層で比較した鉛直層の配置 を示す。モデルトップの引き上げには4 層を用いてお り、これまでのモデルトップである 0.1 hPa 以下では

|--|

	GSM1304	GSM1403	
水平格子間隔	約 20 km		
鉛直層数	60 層	100 層	
モデルトップ	0.1 hPa	$0.01 \ hPa$	
時間積分間隔	600 秒	400 秒	
フポンジ扇	水平4次拡散の	水平2次拡散	
スホノク層	強化		

-¹ 米原 仁



図 1.1.1 60 層 (左半分)と100 層 (右半分)の鉛直層配置。 縦軸は気圧 [hPa]。実線は層を代表し気温や水平風等の物 理量が定義されるフルレベル、点線は層間の境界にあたる ハーフレベルであり、フルレベルは10 層毎に太線で表示 している。

層数が 1.6 倍に増加している。鉛直方向の分解能は全 ての高度で向上しているが、特に対流圏中上層から対 流圏界面において分解能が向上している。

また、モデルトップの引き上げに伴いスポンジ層の 見直しを行った。スポンジ層は、人為的な上部境界からの波の反射を抑える目的で導入しており²、従来は4次拡散を上層で強化して使用していたが、強化をやめて2次拡散を使用することとした。拡散の強さを調整するとともに、その影響範囲をより上部のみにとどめたことにより、反射波がより適切に抑えられ、成層圏から対流圏界面の表現が改善した。

今回の変更では、格子点数が 1.67 倍、時間積分回数 が 1.5 倍に増加し計算量が大幅に増加するため、デー 夕通信や計算手法の改善等の計算機資源をより効率的 に利用する改良も同時に行った。また、鉛直層数増強 と物理過程の改良により GSM の予測特性が変化した

² モデルトップ付近におけるスポンジ層の役割や、他の全球 モデルでの手法については Lauritzen et al. (2011) に解説が ある。現業用の全球モデルにおいては、反射波を抑えるため に拡散強化や 2 次拡散の追加が使われることが多い。

ため、全球解析で利用する背景誤差も新しい予測誤差 特性に合わせて更新した。

1.1.3 物理過程の改良

GSM1403 においては、複数の物理過程を改良した。 ここではその変更内容について概略のみを説明する。 GSM1304 で採用されていた物理過程やその詳細につ いては JMA (2013) を参照していただきたい。

(1) 放射

2 方向吸収近似を用いた長波放射スキーム (Yabu 2013)を導入した。この変更では、透過関数の計算の 精緻化等により大気中層の長波放射過程の精度が向上 するとともに、放射計算に必要な計算時間が短縮した。 計算時間が短縮されたため、長波放射計算において時 間間引き間隔を3時間から1時間へ短縮し、また地表 面気温の取扱いを精緻化した。また、砂漠・半砂漠での 裸地アルベドの計算手法を、全球一様のパラメーター から場所ごとの気候値パラメーターを利用する手法に 変更したことにより、砂漠域で見られていた大きな晴 天放射のバイアスが軽減された。そのほかにも、1 hPa より上層のオゾン気候値の改良等、いくつかの改良を 行った。

(2) 境界層

陸上での接地境界層におけるバルク係数の計算手法 および境界層過程で安定時における熱・水蒸気や運動 量の輸送を求める手法を改良した。この結果、夜間な ど大気の成層状態が安定なときに、過剰な輸送が原因 で生じる地上気温の高温バイアス等を改善した。

(3) 重力波

非地形性の重力波を表現するパラメタリゼーション として、レイリー摩擦の替わりに Scinocca (2003) に よるパラメタリゼーションを導入した。これにより中 層大気の気候場が改善するとともに、準2年振動など の長周期振動の表現が向上した。

(4) 積雲対流

エネルギー収支補正方法を、新しい鉛直層分布に合わせて修正した。GSMの積雲対流過程では、降水の相変化の扱いや、雲底における湿潤静的エネルギーを境界層内の平均値より大きくしていることに伴って生じているエネルギー収支の不整合を、従来は対流圏で乾燥静的エネルギーの変化率が正となる層に配分して補正していた。この補正は、気温では主に冷却、比湿では減少(乾燥)方向に作用する。新しい鉛直層配置において、この補正方法では対流圏上層の比湿を過度に減少させてしまうことが分かった。このため今回、補正を行う層を気温が-5°Cより高い層に限定する変更を行った。この変更により、鉛直層配置の変更に伴い発生した対流圏上層での乾燥バイアスの強い拡大が収まるとともに、大気をやや安定化することにより熱帯

域を中心に降水分布が改善し、全球スケールでの収束 発散場や流線関数の誤差が減少した。

(5) 陸面

陸面過程で用いられる、土壌水分飽和度の初期値作 成手法を改良した。現在、土壌水分飽和度は土壌水分 気候値から変換式を用いて作成しているが、その変換 式の修正を行うとともに、これまで行われていた森林 の土壌水分を増加させる調整を廃止した。この変更の 影響は比較的小さいが、土壌水分飽和度の初期値の変 化が大きかった森林領域の縁辺部で、下層気温の精度 向上が見られた。

1.1.4 データ利用の改良

(1) GNSS 掩蔽データの利用手法の変更

これまでは、GNSS 掩蔽データとして屈折率を利用 していたが、より直接的な観測量であり変換誤差の小 さい屈折角を利用するように変更した。また同時に、 30 km (約 10 hPa) から 60 km (約 0.2 hPa) へ利用高 度上限を引き上げて利用データ数を増やすとともに、 間引き手法等の改良を行った。

(2) AMSU-A の未利用チャンネルの追加利用

AMSU-A のこれまで利用していなかったチャンネル 14 による輝度温度データの利用を開始した。このチャ ンネルは感度のピークが2hPa付近にあり、GSM1403 より前のバージョンではモデルトップの高度不足や第 一推定値の誤差特性に問題があり利用していなかった。

(3) 地上 GNSS 天頂大気遅延量データの新規利用

日本のほか、欧州や米国を中心に展開されている地 上GNSS 天頂大気遅延量データの利用を開始した。こ れについては、第1.6節でその内容と予測精度への影響を説明する。

1.1.5 業務化試験と準ルーチン

第1.2節から第1.4節までの検証に用いている試験は 共通であり、個別に詳細を書くことを避けるため、そ の構成をここで記しておく。今回の変更を現業化する にあたって、室井(2012)に示されたモデル改良手順・ 手続きの見直しに基づき、夏冬それぞれ3か月間につ いて業務化試験を行っている。試験の対象は、全球サイ クル解析、速報解析、全球予報(12UTCの延長予報を 含む)とした。夏期試験は2013年7月から9月、冬期 試験は2012年12月から2013年2月を統計検証の対象 期間とし、全球予報はそれぞれ6月20日00UTCから 10月11日18UTC初期値、11月20日00UTCから翌 年3月11日18UTC初期値までを実施した。また、最 終確認として 2014 年 2月 13 日から 3月 18 日の約1か 月間について準ルーチンによる並行運用を行い、ルー チン運用の結果と予測精度を比較している。本章の検 証では、業務化試験における変更された実験や並行運 用の結果を TEST と呼び、対照実験となる業務化試験 における変更前の実験やルーチン運用の結果を CNTL と呼ぶ。

1.1.6 まとめ

2014年3月18日00UTCから全球数値予報システムに適用された、鉛直層数増強と物理過程およびデー タ利用の改良についてその概略を示した。これらの変更についての、予測精度検証の結果は第1.2節、事例 検証は第1.3節、留意すべき予測特性の変化は第1.4節 で解説する。

今回の改良内容には、砂漠域や熱帯域等の日本付近 以外を主な対象としたものが多く含まれている。全球 数値予報システムの開発においては、日本付近にのみ 着目するのではなく、全球スケールで見て問題を解決 していくことを積み重ねて、全球的な予測精度向上を 通じて日本付近の改善につなげることが重要である。 今後も数値予報システム全体としての総合的な精度向 上を目指した開発を継続して進めていきたい。

参考文献

- 室井ちあし、2012: 概要. 平成 24 年度数値予報研修テ キスト 第2部,気象庁予報部,69-71.
- JMA, 2013: Global Spectral Model (JMA-GSM1212). Outline of the Operational Numerical Prediction at JMA, 43–61.
- Lauritzen, P.H., C. Jablonowski, M. A. Taylor, and R.D. Nair, (Eds.), 2011: Numerical Techniques for Global Atmospheric Models. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 427 pp.
- Scinocca, J. F., 2003: An Accurate Spectral Nonorographic Gravity Wave Drag Parameterization for General Circulation Models. J. Atmos. Sci., 60, 667–682.
- Yabu, S., 2013: Development of longwave radiation scheme with consideration of scattering by clouds in JMA global model. CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell., 4.7–4.8.
- Yonehara, H., M. Ujiie, T. Kanehama, R. Sekiguchi, and Y. Hayashi, 2014: Upgrade of JMA's Operational NWP Global Model. CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell., 6.19–6.20.

1.2 統計検証¹

1.2.1 全球の検証

(1) はじめに

ここでは、2014年3月に現業化された全球数値予報 システムについて、全球の予測に関する検証結果を解 説する。実験設定は第1.1.5項に示した通りで、変更 後の数値予報システムをTEST、変更前をCNTLと呼 ぶ。本項では夏期を中心とした図を示すこととし、冬期 については解説にとどめる。改良の概要とその影響に 関しては、第1.1節を参照していただきたい。また、こ こでは、特に断らない限り264時間予報を行う12UTC 初期値の予測についての検証結果を示す。検証領域は、 北半球が20°N以北、熱帯が20°Sから20°Nまで、南 半球が20°S以南とする。

(2) 平均解析場の変化

第1.1節で示したように、TEST と CNTL は数値予 報モデルのみならず利用する観測データや背景誤差の 設定など解析システムにも違いが存在する。対初期値 検証では TEST と CNTL それぞれが自身の解析値に 対して検証されており、予測の対初期値誤差の大小や 分布の違いを単純に比較するだけでは予測結果の良し 悪しを判断することはできない。そのため、統計検証 の結果を議論する前に、TEST と CNTL の解析値の特 性の違いを議論しておく必要がある²。

図 1.2.1 は、夏期平均解析場の TEST と CNTL の差 分である。海面更正気圧は、南極やグリーンランドな ど、植生が氷床として表現される領域を中心に、TEST の方が高くなった。海面更正気圧はモデルの予報変数で はないため地表面気圧と地上気温から求められる。今 回の変更では、地表面気圧には大きな変化はなく、主 に境界層過程の改良により安定時の過剰な熱輸送が緩 和され、接地境界層内の気温が低くなった結果、海面 更正気圧が高くなった。

850 hPa 面気温は熱帯域を中心に TEST の方が低く なった。500 hPa 面高度は、下層の低温化により熱帯域 と中高緯度の海上を中心に TEST の方が低くなった。 一方で、南極域では TEST の方が高くなった。これら 高度場の変化は、積雲対流過程の変更と、GNSS 掩蔽 データ利用手法の改良による寄与が大きかった。個別 の実験からは、積雲対流過程の変更により、エネルギー 収支補正が適用される領域が従来よりも下層に限定さ れるようになった結果、積雲対流の活動が活発な領域 を中心に下層が低温化し、500 hPa 面高度場も低くな ることが分かっている(第1.4節)。GNSS 掩蔽データ 利用手法の改良では、中緯度で高度場が低く、南極域 では高度場が高くなり、それにより解析値の対ラジオ ゾンデ観測検証で改善が見られた。

可降水量を見ると、北半球、熱帯を中心に TEST の 方が広範囲で減少しているが、陸上の一部では増加が 見られる。可降水量が増加している領域のうち、北米や 日本付近、欧州に関しては地上 GNSS 天頂大気遅延量 の同化利用(第1.6節)による影響が大きく、一方で、 可降水量の減少は積雲対流過程の変更による影響が大 きい。冬期については、概ね夏期と同様の傾向である が、可降水量の減少は北半球ではなく南半球に見られ るようになり、また、極域で高度場が高くなる変化は 南極域に加え北極域でも見られるようになる(図略)。

(3) 予報スコアの比較

次に、対初期値スコアの改善率について、夏期平均 の結果を図 1.2.2 に示す。TEST, CNTL ともにそれぞ れの解析値を基準としている。TEST は平方根平均二 乗誤差 (RMSE)、アノマリー相関係数 (ACC) のどちら も、熱帯を除く全ての領域で、ほぼ全ての要素、予報時 間について CNTL よりも良い結果となっており、改善 していることが分かる。熱帯ではRMSE で見ると海面 更正気圧の FT=48 までは有意な改悪、500 hPa 面高度 の FT=72 までは改悪となり、850 hPa 面気温は予報期 間全体にわたって改悪、特にFT=120までとFT=240, 264 では有意に悪化しているが、それ以外の要素、予 報時間については改善している。北半球について詳細 に見てみると、RMSE では予報前半と予報後半の海面 更正気圧の改悪と850 hPa 面気温のほぼ予報期間全て に及ぶわずかな改悪が見られるものの、ほかは概ね中 立から改善となっている。ACC では、統計的に有意で はない場合もあるものの全項目において改善となって いる。なお、北半球の海面更正気圧は RMSE で見ると FT=24 が有意に改悪となっているが、これは予報値、 解析値ともに場の変動を詳細に表現できるようになっ た結果であり、ACC は改善されているため、見かけ上 の改悪である。冬期は、850 hPa 面気温の FT=72 ま では改悪傾向が見られるが、その他については夏期に 比べると改善幅は小さいが概ね改善している(図略)。 以上のように、総じて TEST は CNTL よりも良好な 結果となっており、顕著に改善していることが分かる。

次に対ラジオゾンデ観測スコアの夏期鉛直プロファ イルの RMSE の差を図 1.2.3 に示す。東西風、気温と もに南半球ではゾンデ観測が得られる全層にわたって 改善が顕著である。北半球では対流圏を中心に予報初 期から中盤にかけて RMSE が小さくなっており改善傾 向である。一方、予報後半ではやや改悪となった。熱帯 を見てみると、まず、東西風は対流圏の予報初期では上 層でやや改悪であるが、予報後半にかけて中、上層で やや改善となっている。成層圏では 20 hPa までは予報 時間の全てにおいて改善している。気温では、対流圏

¹ 第 1.2.1 項 金浜 貴史、第 1.2.2 項 木南 哲平、第 1.2.3 項 山田 和孝、第 1.2.4 項 米原 仁

² TEST と CNTL では同化に使われる観測データも異なる ため、対観測値検証の際にも基準の違いに気をつける必要が あるが、本項で取り上げるラジオゾンデについては TEST と CNTL で利用状況にほとんど差はない。



図 1.2.1 TEST(黒) CNTL(緑)の 2013 年夏期平均解析場と CNTL に対する TEST の差(塗り潰し)およびその帯状平 均。海面更正気圧(左上)、500 hPa 面高度(右上)、850 hPa 面気温(左下)、可降水量(右下)、単位は図中に記載。地面 より下となる領域を茶色で塗り潰した。



図 1.2.2 2013 年夏期平均の対初期値スコア。RMSE の改善率(上段)と、ACC の CNTL からの TEST の差(下段)であり、 横軸は予報時間。改善率の定義は (CNTL-TEST)/CNTL である (付録 C.2.1)。要素は左列から海面更正気圧 [hPa]、850 hPa 面気温 [K]、500 hPa 面高度 [gpm]、850 hPa 面風速 [m s⁻¹]、250 hPa 面風速 [m s⁻¹] である。線はそれぞれ全球(緑) 北 半球(茶) 熱帯(赤) 南半球(青)を表し、点は95%で統計的に有意であることを示す。RMSE 改善率については95%信 頼区間も示す。TEST が CNTL より改善(改悪)している領域は背景を黄色(灰色)にしてある。



図 1.2.3 2013 年夏期平均の対ラジオゾンデ観測 RMSE の鉛直プロファイルの差 (TEST-CNTL)。FT=264 まで予報時間 24 時間毎に表示。縦軸は気圧 [hPa] で、100 hPa から 10 hPa までは対数軸である。左 3 枚は東西風 [m s⁻¹]、右 3 枚は気温 [K] であり、それぞれ左から南半球、熱帯、北半球である。TEST の方が RMSE が小さくなる領域の背景を桃色にしてある。

下層の低温バイアスの拡大(図略)に対応して RMSE も改悪となっている。成層圏では予報初期はやや改善 しているものの、予報後半にかけて 20 hPaより下層 で改悪となっている。冬期は、熱帯下層の低温バイア スが拡大している点をはじめとして、夏期とほぼ同様 の傾向を持ち、北半球、南半球の傾向は夏期における 南半球、北半球の変化傾向と類似している(図略)。

最後に、全球モデルの長年の課題の1つである中層の 乾燥バイアスについて確認したい。夏期における北半 球の対ラジオゾンデ観測の比湿バイアスの鉛直プロファ イルを図1.2.4 に示す。TEST, CNTL ともに700hPa を中心として乾燥バイアスが見られ、バイアスの大き さも同程度である。CNTL では予報初期から後半にか けてゆるやかな乾燥バイアスの拡大が見られる一方で、 TEST ではFT=0 を除きほぼ同程度のバイアスの大き さとなっている。したがって、中層の乾燥バイアスに 関しては今回の改良ではあまり変化がないと言ってよ く、今後もこれを解消するための開発が必要であると 言える。

(4) 全球の降水量と循環場

図 1.2.5 に、2013 年 8 月平均の FT=264 における TEST, CNTL の前 24 時間降水量と GPCP (Global Precipitation Climatology Project; Huffman et al. 2001)³ による降水量の解析値を示す。CNTL は熱帯収 束帯の東太平洋側とインド洋で GPCP と比較して降水 を過剰に予測しているが、TEST ではそれが緩和され ており、GPCP に近くなっている。海洋大陸⁴ 付近を 見ると、CNTL では GPCP と比較して過少となって いるが、TEST では GPCP と同程度かやや過大傾向で

Score Profile of Q against Sonde 2013/07/01 – 09/30



図 1.2.4 北半球における 2013 年夏期平均のラジオゾンデ観測 に対する比湿 [g kg⁻¹]の ME。左が TEST、右が CNTL。 縦軸は気圧。線の色は予報時間を表す。

ある。ここで挙げた CNTL の傾向は予報時間が進むに つれて顕著に見えてくるが、TEST では予報初期から の変化が小さく、予報時間の後半に至るまで全球の降 水分布を維持できている (図略)。

降水分布が改善されていることに対応して、対流圏 下層や上層の収束・発散場も変化した。2013 年 8 月平 均の FT=264 における 200 hPa 面速度ポテンシャル、 流線関数⁵の図をそれぞれ図 1.2.6 と図 1.2.7 に示す。

200 hPa 面速度ポテンシャルを見ると、CNTL では 北西太平洋域で予報が進むにつれて発散が弱まる傾向

³ 全球の降水の時空間分布を把握することを目的とし、雨量 計や種々の衛星による観測値を基に全球の降水量を解析して いるプロジェクト。http://precip.gsfc.nasa.gov/

⁴ フィリピン、インドネシア付近の領域を指して海洋大陸 (maritime continent) と呼ぶ。

⁵ 2 次元の流れの場 (v) は回転成分 (\mathbf{v}_{ψ}) と発散成分 (\mathbf{v}_{χ}) に 分解することができ ($\mathbf{v} = \mathbf{v}_{\psi} + \mathbf{v}_{\chi}$)、それぞれ回転成分は流 線関数 (ψ)、発散成分は速度ポテンシャル (χ) の微分として 表現することができる ($\mathbf{v}_{\psi} = \mathbf{k} \times \nabla \psi$, $\mathbf{v}_{\chi} = \nabla \chi$ 、ただし k は鉛直上向き単位ベクトル)。速度ポテンシャルは収束(正 値)、発散(負値)と対応し、流線関数は近似的に地衡風に 対応するため、大規模な流れの場を見るときに有用である。



図 1.2.5 2013 年 8 月平均の日平均降水量 [mm/day]。左から、FT=264 の CNTL、TEST と、GPCP 解析値。



図 1.2.6 2013 年 8 月平均の 200 hPa 面速度ポテンシャル $[m^2 s^{-1}]$ 。左から CNTL, TEST。等値線は予報値であり、塗り潰しは解析値からの予報値の差を表す。正値が収束、負値が発散を示す。見やすくするため、 10^6 で除してある。



200hPa Stream Function $[m^2/s] \times 10^{-6} 2013/08/01-31 FT=264$

図 1.2.7 2013 年 8 月平均の 200 hPa 面流線関数 [m² s⁻¹]。図の見方は図 1.2.6 と同じ。

があったが、TESTでは発散場が維持できるようになっ た。北西太平洋域はアジアモンスーンや台風予測に関 して重要な領域であるため、この領域で改善されたこ との意義は大きい。一方で、TESTでは東部太平洋で 収束が過大となる傾向や、インド洋で発散が強まる傾 向が見られるなど、CNTLと比較して悪化していると ころも見られる。冬期の速度ポテンシャルは、南北半 球でパターンが反転するが、北西太平洋域の発散場が 弱まる傾向が緩和される一方、インド洋で発散が強ま る傾向がさらに強まるなど、夏期と概ね同様な傾向が 見られた(図略)。

流線関数を見ると、CNTL では中央アジアから南ア ジアにかけて負バイアスが見られるが、TEST では概 ね解消されており、強風軸の表現が改善されたことが 分かる。南半球では、オーストラリアの南側の負バイ アスや南アンデス付近の負バイアスなど、負バイアス がやや拡大しているものの、オーストラリア付近の正 バイアスは緩和されている。この傾向は冬期にも同様 に見られた(図略)。

(5) まとめ

本節では、改良された全球モデルの全球予報の検証 結果を紹介した。統計スコアは熱帯下層の気温を除く ほぼ全ての要素、領域で改善した。また、スコアの鉛 直プロファイルからは、南北両半球で気温、東西風が 中立から改善傾向にあることが分かった。一方で、全 球モデルの短所として長らく指摘されている熱帯下層 を中心とした低温バイアスはさらに拡大した。また、 中層の乾燥バイアスには大きな変化が見られなかった。 全球降水分布では、予報後半でも降水量を維持できる ようになり、その結果、北西太平洋域を中心に収束・発 散場が改善された。これは大規模な循環場の表現が改 善されたことを示している。

総合性能としては大きく改善した。しかし、その一 方で、熱帯下層を中心とした低温バイアスなど、今回 の変更で改悪となった点もあり、今後も継続的に開発 を行っていく必要がある。

1.2.2 日本付近の検証

(1) はじめに

本項では、日々の予報業務に対する影響が大きい日本付近の予測特性の変化を統計的検証スコアを通じて 解説する。第1.2.1 頃と同様に、第1.1.5 頃に従い、変 更された数値予報システムによる実験結果を TEST、 対照実験の結果を CNTL と呼ぶ。検証の対象期間も夏 期、冬期ともに第1.1.5 項の通りである。対象領域は 20°N~50°N および 110°E~160°E である。

(2) 平均解析場の変化

図 1.2.8 は TEST と CNTL の期間平均解析場とその 差分である。夏期の 500 hPa 面高度が低下しているこ とや可降水量が増加していることを除けば、日本の陸

上では TEST と CNTL の差は小さい。第 1.2.1 項でも 述べられているように、500 hPa 面高度場の低下は主 に積雲対流過程の変更の効果である。対流活動が活発 なほど高度の差も大きくなるため、日本付近では冬期 よりも夏期で差が大きく、また日本の南東海上で差が 大きい。積雲対流過程の変更は可降水量にも影響を与 え、対流活動が活発な時期、領域の可降水量を減少さ せている。その一方で、第1.6.3 項でも述べられている ように、地上 GNSS データの同化利用開始の効果によ り、離島を含む日本の陸上で解析値の可降水量が大き く増加する。この2つの効果により、TESTの可降水 量の夏期平均解析値は、CNTL と比べて、地上 GNSS データを同化した地点とその周辺では増加し、その他 の領域では減少している。また、大陸の内陸部で海面 更正気圧に比較的大きな差が生じているが、これは主 に境界層過程の改良の効果により、夜間安定時におけ る地上気温の高温バイアスが軽減された結果であると 考えられる。

(3) 予報スコアの比較

次に予報スコアの検証を行う。対象は対初期値と対 ラジオゾンデ観測の平方根平均二乗誤差(RMSE)改 善率やアノマリー相関係数(ACC)改善幅である。

図 1.2.9 は夏期、冬期の予報値の対初期値スコアを 要素、予報時間別に比較した図である。RMSE 改善率 に注目すると、ほとんどの要素、予報時間で TEST は CNTL よりも改善している傾向が見られる。しかし、 夏期の海面更正気圧と 850 hPa 面気温の FT=48 まで は統計的に有意な改悪となっている。これらはどちら も、CNTL でも存在していた海面更正気圧と下層気温 の負バイアスが、TEST でさらに拡大した結果である。 TEST の 850 hPa 面気温の負バイアスは日本の南東海 上を中心に拡大しており、500 hPa 面高度でもこれに 対応する領域で負バイアスの拡大が見られる(図略)。 図 1.2.8 より、夏期の 500 hPa 面高度については日本 の南東海上を中心に解析値自体が低くなっていること から、この領域の TEST の 500 hPa 面高度の予報場は CNTL と比べてかなり低くなる特性があることが分か る。500 hPa 面高度の RMSE 改善率で見ても、統計的 に有意ではないものの夏期の FT=72 までは改悪傾向 が見えている。一方、ACC 改善幅で見た場合には、統 計的に有意な範囲ではないものの、概ね中立から改善 傾向である。ただし、前述したように予報値のバイア ス傾向が大きく変化しているため、RMSE と ACC の 定量的な関係についての議論は慎重に行う必要がある。

続いて、図 1.2.10 に対ラジオゾンデ RMSE の領域平 均した鉛直プロファイルを比較した図を示す。まず対流 圏に注目すると、冬期の高度場を除き、予報時間の後半 で大きな改善が見られる。これは、TEST では CNTL に比べて、予報時間とともに進むバイアスの拡大傾向 が多くの要素で緩和されたためである。特に、CNTL



図 1.2.8 期間平均解析値の差(TEST-CNTL)。夏期(上段) 冬期(下段)それぞれについて、左から海面更正気圧、500 hPa 面高度、850 hPa 面気温、可降水量であり、実線は平均解析場(TEST(黒)、CNTL(緑)) 塗り潰しは TEST と CNTL の差を表している。



図 1.2.9 日本付近における対初期値スコア。上 2 段が夏期、下 2 段が冬期で、それぞれについて RMSE 改善率と ACC 改善幅 を示す。左から海面更正気圧、850 hPa 面気温、500 hPa 面高度、850 hPa 面風速、250 hPa 面風速である。TEST が CNTL よりも改善していれば正値(黄色の領域)となる。エラーバーで表されている統計的に有意な範囲(95%信頼区間)の全域で 改善あるいは改悪と見なせる場合は丸印で表している。



図 1.2.10 日本付近で領域平均した対ラジオゾンデ観測のバイアスおよび TEST と CNTL の RMSE 差分(鉛直プロファイ ル)。夏期(上2段)、冬期(下2段)のそれぞれで左上が気温、右上が高度、左下が東西風速、右下が比湿である。RMSE 差分が負値(桃色の領域)であれば、TEST が CNTL に比べて改善したことを示している。100 hPa 面を境として縦軸は対 数軸となり、横軸の範囲も異なる点に注意。

では夏期の 200 hPa 面付近を中心として見られた高度 場の負バイアスの拡大が、TEST では大幅に軽減され ている。しかし、300 hPa 面より下層では、FT=48 頃 までは対初期値検証と同様に高度場の負バイアスが拡 大し、改悪が目立つ。また、夏期の 700 hPa 面比湿の RMSE 改善率は中立程度であり、第 1.2.1 項でも触れ た中層の乾燥バイアスにも目立った変化はない。一方、 成層圏でも多くの要素で改善傾向が顕著である。とり わけ、10 hPa 面付近の気温に見られる正バイアスが、 TEST では大幅に軽減されている。ただし、70 hPa 面 より上層の気温場と夏期の高度場の負バイアスの拡大 傾向は、TEST の方が CNTL よりも強い。

以上のように、全体として TEST は CNTL よりも改善している。しかし、夏期の予報前半では改悪も見られる。これに伴う予測特性の変化については、第1.4節において解説を行っているので参照していただきたい。



- 図 1.2.11 12UTC 初期値の全球予報値に対するアメダス降 水検証。左が 12 時間降水量の閾値別 BI 比較、右が ETS 比較で、それぞれ赤線が TEST、青線が CNTL である。 閾値毎に付加したエラーバーは 95%信頼区間を表す。
- (4) アメダス降水検証

続いてアメダス降水量データを用いた検証結果につ いて述べる。アメダス降水量はデータ同化で利用して おらず、予報値に対して独立なデータである。ここで は降水表現に大きな差が現れた夏期について説明を行 う。図 1.2.11 はアメダス降水量に対するモデル降水量 のバイアススコア(BI)とエクイタブルスレットスコ ア(ETS)である。比較するモデル降水量は、アメダ ス観測地点に 4 点内挿したものである。まず BI に注 目すると、CNTL にも見られた比較的弱い降水の予測 頻度が実況よりも多い傾向が、TEST ではさらに強く なっていることが分かる。この傾向は予報時間が短い ほど強い。図 1.2.12 に、最も差が大きい FT=12、閾 値 0.5 mm/12h の各スコアの大きさを観測地点別に示 す。降水の予測頻度の過多傾向が強くなっている地点 が、関東以南の海沿いを中心に広く分布していること が分かる。また図 1.2.11 の BI からは、逆にある程度 強い降水の予測頻度の過少傾向が TEST で強くなって いる様子も見て取れる。多くは統計的に有意な範囲で は重なっているものの、TEST は CNTL に比べ ETS も全体に小さくなっており、降水の予測精度はわずか



図 1.2.12 12UTC 初期値の 12 時間予報値に対するアメダ ス地点別降水量バイアススコア(閾値 0.5 mm/12h)と エクイタブルスレットスコア。それぞれ左が TEST、右が CNTL である。

ながら悪化していると言える。

弱い降水表現の変化は、第1.6.3 項で述べられてい る地上 GNSS 観測の同化利用開始の影響と整合的であ る。初期値において可降水量が増加したことにより、 TEST では予報時間のごく初期に弱い降水を広げやす くなったと考えられる。その一方で、地上 GNSS 観測 の同化は、5 mm/12h 以上の降水の過少予測傾向を改 善させている(図1.6.6)。そのため、TEST で見られ る強い降水の過少予測傾向の強まりには物理過程の変 更などが関係している可能性がある。

(5) まとめ

本項では、2014年3月に現業化された全球数値予報 システムについて、日本付近の予測特性の変化を統計 的検証手法を用いて調査した結果を述べた。

対初期値、対ラジオゾンデ観測スコアでは、多くの 要素について改善が見られた。しかし、日本の南東海 上を中心とする下層の低温バイアスの拡大に起因して、 FT=72頃までの850hPa面気温や500hPa面高度に は悪化が見られる。また、降水予測についても夏期を 中心に予測精度が悪化している傾向も見えている。今 回の改善傾向を維持しつつ、改悪傾向を修正すること が今後の課題である。

1.2.3 台風検証

(1) はじめに

北西太平洋域において試験期間内に発生した台風は、 冬期試験期間(2012年11月20日から2013年3月11 日)にT1224⁶,T1225およびT1301,T1302の計4個、 夏期試験期間(2013年6月20日から10月11日)に T1304からT1326の22個⁷であった。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)に対して検証を実施した。また、北 西太平洋域の台風以外の熱帯低気圧についても検証を 実施するとともに、全球的な熱帯低気圧の存在予測に ついても検証を行った。

なお、業務化試験の設定は第1.1.5項の通りであり、 変更後の数値予報システムによる実験結果をTEST、 変更前をCNTLと呼ぶ。

(2) 北西太平洋域の検証結果

図 1.2.13 は、期間内全ての台風について平均した予 報時間毎の進路予測誤差である。統計的に有意ではない が、概ね 84 時間までの全ての予報時間について改善が 見られる。個別の台風について確認したところ、170°E 以東の事例および CNTL で誤差が非常に小さかった事 例を除く、全ての事例で改善が見られた(図略)。ただ し、日付変更線付近で発生して南西進した T1316 にお いて、TEST では実際の進路とは逆方向(東北東)に 大きく移動する予測になっていた。この台風による事 例だけで大きな誤差を生み出しており、1 事例ではあ るものの、平均誤差に与えた影響は大きく、結果とし て図 1.2.13 の改善幅が小さくなったと考えられる。

次に、進路予測の系統誤差について、期間を転向前、 転向中、転向後の3つに分けて検証を行った。区分分 けについては、梅津・森安(2013)と同様に、ベストト ラックにおける6時間前の位置からの進行方向によっ て分類した。さらに、進路予測誤差を、ベストトラッ クの進行方向に沿った成分(along track error)と直交 する成分(cross track error)に分解した。48時間およ び72時間予報の台風相対予測位置を図1.2.14に示す。 特に転向前の相対予測位置のばらつきがCNTLよりも TEST が小さくなっており、北上バイアスを示す直交 成分の正偏差も小さくなっている。図1.2.14を詳しく 見ると、48時間予報のTESTの相対予測位置で左後方 に大きい誤差がある事例が数例見られる。これは前述 したT1316の事例によるものであった。

また、強度予測についても調査を行った。図 1.2.15 は、解析(ベストトラック)の72時間における中心気 圧の変化から発達期、成熟期、衰弱期に分類し、それ ぞれについて解析と予測の初期時刻から72時間予報 までの台風中心気圧の変化傾向を散布図で示したもの



図 1.2.13 試験期間に発生した 26 個の北西太平洋域の台風を 予測対象とした進路予測誤差 [km] (実線、左軸)とサンプ ル数(点、右軸)。赤が TEST、青が CNTL。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。図上部の三角は上段が相関考慮、下段が独立 仮定で計算した有意判定結果を示し、緑は有意、黒は有意 でないことを示す。

である。解析と予測の変化傾向を散布図で見ることで、 発達、衰弱の傾向が予測できているか、また発達の予 測が過剰かどうかについても分かる。

発達期においては、CNTL では過剰な発達をする例 が見られていたが、TEST ではそうした例が少なくな り、改善が見られている。また、CNTL, TEST ともに 平均的には台風を浅めに予測する傾向がある。一方で、 成熟期と衰弱期については、72時間予報まで依然とし て発達を予測する事例が存在するなど強度予測が難し いことが分かる。

(3) その他の領域の熱帯低気圧

(2) では、北西太平洋域の台風について位置誤差と強 度予測について検証を行った。その他の領域の熱帯低 気圧についても、図 1.2.16 に領域毎で計算した予報時 間毎の進路予測誤差を示す。解析位置は米国海洋大気 庁 (NOAA) 作成のベストトラック B-decks を用いた。 TEST では、CNTL と比較して大西洋域、北東太平洋 域、南半球いずれにおいても改善傾向が見られ、特に 北東太平洋域と南半球では 84 時間までの予報期間の後 半で有意な改善が見られた。

(4) 熱帯低気圧の存在予測

熱帯低気圧の存在予測について、TEST と CNTL で 比較を行った。熱帯低気圧の存在予測の検出手法につい ては、WGNE-29 (Working Group on Numerical Experimentation) において実施した熱帯低気圧検証と同 様の手法で行った (Ota et al. 2014)。すなわち、30°S ~ 30°N の範囲において、半径 500 km 以内で海面更正 気圧の最小となる点が、半径 500 km 以内の海面更正 気圧の平均値より 0.5 hPa 以上低く、半径 300 km 以 内の 850 hPa 面の相対渦度の平均値が 30 × 10⁻⁶ s⁻¹ 以上(南半球では逆符号)を満たすとき、熱帯低気圧

⁶ ここでは、国際的な台風の識別番号(発生年の西暦下2桁 と発生順の番号2桁をつなげたもの)に、頭文字Tを付け たものを台風の表記として用いる。

⁷日付変更線の西側で発生直後に熱低化した T1314 を除く。



図 1.2.14 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。縦軸は台風の進行方向の誤差、横軸は進行方向に直交する 方向の誤差を示す。目盛りは 500 km 間隔。上段が 48 時間予報、下段が 72 時間予報。それぞれ左側が CNTL、右側が TEST の結果を示す。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。

の存在を予測したとする。

検証は四分割表を用いて行った。熱帯低気圧存在予 測の「適中」は、予測の中心位置とベストトラックの 熱帯低気圧の位置が500km以内であった場合とする。 また、熱帯低気圧の存在を予測したが解析に存在しな かった場合や位置が500km以上離れていた場合を「空 振り」、熱帯低気圧が解析されたが予測されなかった場 合を「見逃し」とし、スレットスコア、バイアススコ アを計算した。

図 1.2.17 に、夏期試験期間の北西太平洋域における 熱帯低気圧の存在予測のスレットスコア、バイアスス コアの予報時間変化を示す。北西太平洋域では熱帯低 気圧の存在予測のスレットスコア、バイアススコアとも TEST の方が改善している。また、北西太平洋以外の 領域でも、いずれのスコアにも改善が見られた(図略)。

(5) まとめ

台風および熱帯低気圧の予測について CNTL と TEST の比較を行った。北西太平洋域の台風進路予測 については、有意ではないが TEST の方が 84 時間ま での多くの予報時間について改善しており、特に転向 前の予測が改善していた。また、北西太平洋域以外の 領域の熱帯低気圧の予測位置についても改善が見られ た。台風の強度予測についても発達期については過発 達事例が少なくなるなど改善が見られた一方で、成熟 期や衰弱期については依然として発達を予測してしま うなど課題がある。さらに、熱帯低気圧の存在予測の 精度にも改善が見られた。



図 1.2.15 台風中心気圧の初期時刻(赤)から 72 時間予報(青)の変化傾向。横軸は解析(ベストトラック) 縦軸は予測。左が CNTL、右が TEST の結果。上から、解析における発達期、成熟期、衰弱期をそれぞれ示す。



図 1.2.16 領域毎の熱帯低気圧進路予測誤差 [km]。青が CNTL、赤が TEST。左から、北東太平洋域(夏期試験)、大西洋域 (夏期試験)、南半球(冬期試験)。図の見方は図 1.2.13 と同様。



図 1.2.17 夏期試験期間の北西太平洋域における熱帯低気圧の存在予測のスレットスコア(左)とバイアススコア(右)。

1.2.4 日本周辺域での平均誤差の検証

(1) はじめに

本項では、代表的な予報要素についてラジオゾンデ 観測を参照値とした平均誤差(ME)の統計検証結果を 示す。検証には業務化試験(第1.1.5項)の結果を用い ており、統計を取った領域(以下、日本周辺域)は図 1.2.18 である。ここではこれまで紹介された統計検証 とは異なり、検証対象をFT=84 までとし、1日4初期 値(00,06,12,18UTC)の予測を利用している。この 領域でのラジオゾンデ検証では、検証対象地点リスト のうち領域内の観測で、かつ品質管理を通過したもの を使用しており、観測サンプル数は、事例によるが1 時刻あたり概ね60 地点程度である。

(2) 夏期試験の結果

図 1.2.19 に日本周辺域についての、夏期試験期間に おける予報時間毎の MEの検証結果を示す。気温 T は 500,850 hPa 面ともに概ねバイアスが減少しており、 CNTL で見られた予報時間が進むにつれて ME が拡大 する傾向が緩和している。高度場 Z は 500 hPa 面で FT=84 まで負バイアスが拡大している。負バイアスは FT=0(解析値)から1m程度大きくなっており、特に FT=12 から FT=36 の間で差が大きく最大で 4 m 程 度である。同様に、負バイアスが拡大する傾向が850 hPa 面の高度場でも見られるが、500 hPa 面とは異な リFT=0 での差は小さい。水平風速 VW については、 850, 500, 250 hPa 面ともに明瞭な違いは見られず、弱 風バイアスがゆっくりと拡大していく傾向は同じであ る。相対湿度 RH は、500 hPa 面では乾燥バイアスが 改善し、予報時間が進むにつれ ME が拡大する傾向が 緩和している。850 hPa 面では、拡大傾向はないが乾 燥バイアスがやや大きくなっている。相対湿度のバイ アス変化には主に比湿の変化が寄与している。

これらの要素の中では、500 hPa 面高度 (Z500) の変 化が特に顕著で、解析値の時点からその差が大きい。こ



図 1.2.18 日本周辺域の定義。赤い領域で統計検証に用いる 領域を示している。この検証領域は旧領域スペクトルモデ ル (RSM)の領域と対応しており、継続的な検証に利用さ れている。



図 1.2.19 日本周辺域での夏期試験についてのラジオゾン デ観測を参照値とする ME。横軸は予報時間 [h]。青線が CNTL、赤線が TEST についての結果。Z は高度、T は 気温、VW は水平風速、RH は相対湿度で、数字は気圧面 [hPa] である。



図 1.2.20 日本周辺域についての、夏期試験の期間での各ラ ジオゾンデ観測を参照値とした Z500 の ME [m]。上図が CNTL、下図が TEST の結果である。

の変化は主に積雲対流過程の変更による気温プロファ イルの変化が関係している。詳細は第1.4節を参照し ていただきたい。

図 1.2.20 に各観測点における FT=48 での Z500 の ME 分布を示す。予報時間毎の検証の結果では、Z500 の ME は FT=48 においては CNTL でほぼ 0 m であ る一方で、TEST では -3 m の負バイアスとなってい る。 35° N 以北の観測点においては、バイカル湖の南 から東にかけてなどで ME が改善した地点も見られる が、 35° N から 20°N の領域では多くの点で負バイアス が拡大しており、特に海上および沿岸部で顕著である。 CNTL では、大まかには西の大陸側の正バイアスと東 の太平洋側の負バイアスが打ち消し合い、領域平均の ME はほぼ 0 m となっている。一方で、TEST では大 陸側の正バイアスがやや改善し、かつ南側の海上およ び沿岸部で負バイアスの拡大が大きいため、領域平均 した ME は CNTL に比べて負バイアスが大きく拡大 している。

Z500 Mean Error [m] vs Sonde / lat20-35 lon100-150



図 1.2.21 100°E から 150°E, 20°N から 35°N の範囲で領 域平均した、夏期試験期間での各ラジオゾンデ観測を参照 値とした Z500 の ME [m]。青線が CNTL、赤線が TEST の結果である。

35°N から 20°N の領域での、各予報時間による ME の変化を見るために、100°E から 150°E, 20°N から 35°N の範囲で領域平均した Z500 の ME 時系列を図 1.2.21 に示す。この領域で見ると、FT=0 から FT=84 までのどの予報時間でもバイアスの大きな拡大が見ら れる。TEST は CNTL に比べて、FT=0 では 2 m 程度、 FT=24 以降では 4~5 m 程度高度場が下がっている。

(3) 冬期試験の結果

図 1.2.22 に日本周辺域についての、冬期試験期間に おける予報時間毎の MEの検証結果を示す。気温 Tは 500 hPa 面では予報時間とともに低温バイアスが拡大 していく傾向が緩和され改善している。一方、850 hPa 面では FT=48 までは改善か同程度だが、それ以降の 予報時間では高温バイアスとなっている。850 hPa 面 が高温化したのは、境界層過程の下向きの過剰な熱輸 送が改善されたことと関係している。高度 Z は、500 hPa 面では夏期と似た傾向が見られるがその変化幅は かなり小さく、あまり目立った変化にはなっていない。 一方 850 hPa 面では概ねバイアスは小さくなっている。 水平風速 VW は 850, 250 hPa 面ともに明瞭な違いは 見られず、弱風バイアスがゆっくりと拡大していく傾 向は同じである。500 hPa 面では弱風バイアスがやや 拡大したが、500 hPa 面だけ特性が異なった原因は不 明である。相対湿度 RH は気温が高くなったことによ り、概ね湿潤バイアスが減少した。

(4) 対解析値検証の留意点

図 1.2.8 で示されたように、今回の変更では平均解析 値が大きく変わっているため、解析値を参照値に用い た ME 検証結果の解釈には注意が必要である⁸。この

⁸ 中緯度における検証では、平方根平均二乗誤差は予報時間 とともに大きくなり、参照値の持つ差は相対的に小さくなっ ていくが、ME は必ずしも予報時間に伴って大きくなってい くわけではないため、参照値の持つ差は予報時間が進んでも 無視できない場合がある。



図 1.2.22 日本周辺域での冬期試験期間についてのラジオ ゾンデ観測を参照値とする ME。縦軸の表示幅以外は図 1.2.19 と同じ。



図 1.2.23 日本周辺域での予報時間毎の Z500 の ME [m]。 上図が対解析値検証、下図が対ラジオゾンデ観測検証の結 果である。青線が CNTL、赤線が TEST についての結果。

ため本項では、参照値にラジオゾンデ観測を用いた検 証結果のみを示したが、最後に参照値によってどの程 度 ME が異なって見えるかの例として、図 1.2.23 に夏 期の Z500 について、日本周辺域で統計を取った予報 時間毎の ME を、CNTL, TEST についてそれぞれの 解析値およびラジオゾンデ観測を参照値として示す。

TEST と CNTL の ME の差の時間変化傾向は、参 照値が解析値・観測のどちらであるかにはよらず、大 まかに一致する。一方で、両者の ME の差自体は大き く異なり、対観測検証の方が両者とも負方向へ大きく スライドする。TEST の方がより大きくスライドした 結果、両者の ME の差自体は大きくなっている。この MEの負方向へのスライドにより、TESTではFT=36 以降、参照値によって ME の符号の逆転が見られ (ME の絶対値は大きい)、例えば FT=60 では対解析値で2 mの正バイアス、対ラジオゾンデ観測で2mの負バイ アスとバイアスの方向が逆になって見える。対観測検 証ではFT=0での値が大きく異なり、平均解析値の差 が検証結果に大きく寄与していると考えられる。この 例は統計検証の結果であるが、個別の事例においても、 参照する値によってバイアスの符号すら反転してしま うことがある。予報作業や事例検証等で検証を行うと きは、観測との比較を十分に行い、解析値との比較で

はその面的分布に注目するなど、ご留意いただきたい。

(5) まとめ

日本周辺域について、ラジオゾンデ観測を参照値とし て ME を CNTL と TEST で比較した。夏期では、850 hPa 面や 500 hPa 面の気温で改善が見られた一方、高 度場や相対湿度で改悪が見られた。冬期では 500 hPa 面の気温や、850 hPa 面の高度場、相対湿度で改善が みられた。850 hPa 面の気温では、FT=0 から FT=36 までで改善、FT=48 から FT=84 までで高温バイアス の拡大が見られた。夏期の 35°N 以南では、解析値の 段階から 500 hPa 面高度場の負バイアスの拡大が見ら れた。これら特性の改善は今後の課題である。

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 59 号, 気象庁予報部, 98-111.
- Huffman, G. J., R. F. Adler, M. M. Morrissey, D. T. Bolvin, S. Curtis, R. Joyce, B. McGavock, and J. Susskind, 2001: Global precipitation at onedegree daily resolution from multisatellite observations. J. Hydrometeorol., 2, 36–50.
- Ota, Yoichiro, K. Ochi, and T. Kanehama, 2014: WGNE intercomparison of Tropical Cyclone Track forecast 2012. Twenty-ninth session of the WWRP/WCRP Working Group on Numerical Experimentation (WGNE-29), URL http://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/ new/documents/TC_verif_2014_cmuroi.pdf.

1.3 事例検証¹

1.3.1 はじめに

本節では、2014年3月に現業化された全球数値予報 システムの改良について、改良前のシステム(以下、 CNTL)と改良後の現在のシステム(以下、TEST)に よる業務化試験や準ルーチン(第1.1.5項)から事例を 挙げて、数値予報への効果を紹介する。

1.3.2 総観場

本項では南岸低気圧の事例で、CNTLとTESTによ る予測の違いを示す。図 1.3.1 は、CNTLとTESTに よる、2012年12月17日06UTCを対象とした海面更 正気圧と500hPa面高度場(以下、Z500)の72時間予 報値と対応する全球解析値および予報値の誤差(予報 値-解析値)を示したものである。この日は日本の南を 低気圧が通過し、西~東日本の所々で弱い雨が降った。

CNTL と TEST を比較すると、どちらの誤差が小 さいかは領域により異なるものの、全体としては特に Z500 で TEST の方が誤差が小さくなっていると言え る。一方で、CNTL と TEST のどちらにおいても、解 析と比べて予測の方が日本の南にある地上の低気圧の 進行が遅い、また対応する上空のトラフの位相が遅れ ているといった誤差が共通して見られる。同様に大陸 上や海上においても、誤差のパターンはよく似ている。 このように、概ね TEST の方が CNTL より予測精度が 改善しているものの、日本付近で誤差のパターンは大 きく変化していないという傾向は、業務化試験を行っ た 2013 年の夏期と 2012~2013 年の冬期の両方で、特 定の気圧配置によらず多くの事例で見られた。

1.3.3 下層雲

CNTL と TEST の予測に差が見られた例として、下 層雲の事例を示す。図 1.3.2 は、CNTL と TEST によ る、2014 年 2 月 26 日 00UTC を対象とした 12 時間予 報のお天気マップ² と、対応する衛星赤外 4 画像であ る。このとき日本海に高気圧がある一方、九州には低 気圧が接近していた。

CNTLとTESTのお天気マップを日本海中部や黄海 について比較すると、CNTLは快晴となっているのに対 し、TESTでは広い範囲に曇りを予測している。TEST のお天気マップに表現された曇天域は主に下層雲によ るものであるものの、ウルルン島周辺を除き、925 hPa やそれより上層には対応する湿数が小さい領域は見ら れなかった(図略)。日本海中部でTESTの鉛直断面 を見ると、950 hPa以下のごく下層で相対湿度が高く なるとともに雲が生成され、その上には逆転層ができ ていた(図略)。これは主に、全球モデル(GSM)の境 界層スキームの改良(第1.1.3 項)によって熱や水蒸気 の過剰な拡散が抑制されたことに伴い、CNTLでは維持されにくかった雲や逆転層といった境界層の構造が、 TESTでは維持されやすくなった結果であると考えられる³。なおこのときのメソモデル(MSM)によるお天気マップを見ると、CNTLと同様に、日本海中部や黄海では快晴から薄曇りの予測となっていた(図略)。

対応する時刻の衛星画像からは日本海中部から黄海 にかけては下層雲があったと見られる。またウルルン 島では、地上観測による全雲量・下層雲量はともに十 分比で8であった。これらより、本事例ではTESTの 予測の方が実況と整合していたと考えられる。一方で、 今回の業務化試験や準ルーチンでは、TESTが下層雲 を予測した範囲が広すぎたと思われる事例も見られ、 全ての事例で改善しているわけではなかった。

2012年12月の層積雲スキーム改良以前は、日本海 や大陸上で層積雲スキームにより過剰な下層雲が予測 される事例があることが報告されていた(小野田 2008; 下河邉・古河 2012)。一方、今回の業務化試験や準ルー チンでは、下層雲が層積雲スキームにより生成された 事例と、雲スキームにより生成された事例のどちらも 見られた。小野田(2008)や下河邉・古河(2012)が示し た事例では水蒸気量が不十分な領域でも層積雲スキー ムが発動してしまうことが過剰に下層雲を予測する原 因となっていたのに対し、今回の事例では境界層の構 造が維持されやすくなった結果、層積雲スキーム(逆 転層の存在と高い相対湿度が寄与)や雲スキーム(高 い相対湿度が寄与)の発動が増えたことが下層雲が増 加した原因となっており、原因や高度が異なる。

1.3.4 台風強度予測

CNTLとTESTによる台風強度予測の違いとして、 TESTの方が台風が過剰に発達することが少なくなる とともに、平均的には台風を浅めに予測する傾向があ る(第1.2.3項)。本項では、差が顕著であった2013年 台風第7号の事例を示す。この台風は7月8日00UTC にマリアナ諸島で台風となり、西北西~西に進んで12 日15UTC頃に与那国島付近を通過した後、台湾に上陸 した。7月10日00~12UTCには最大風速が100ノッ トと解析(ベストトラックによる)された非常に強い 台風であった。

図 1.3.3 は、台風第7号に対する 2013 年7月9日 12UTC 初期値の CNTL と TEST による進路、中心気 圧、最大風速の予測と、解析されたベストトラックで ある。台風の進路は CNTL と TEST のどちらも比較 的よく予測できており、両者の差は小さいことが分か る。これに対し強度を中心気圧と最大風速から見ると、 CNTL と TEST のどちらも予報初期はベストトラック と比べて弱く、その後は台湾に上陸するまで、ベスト トラックでは衰弱期に入ってからも、発達を予測して

¹ 中川 雅之

² お天気マップのアルゴリズムは安藤 (2007) を参照。

³境界層の全体で安定でなくても、局所的に安定であれば改良の効果が現れる。



図 1.3.1 2012 年 12 月 17 日 06UTC を対象とする 72 時間予報(2012 年 12 月 14 日 06UTC 初期値、黒線)と対応する全球 解析(緑線)、両者の差(塗りつぶし)。左列:海面更正気圧、右列:500 hPa 面高度場、上段: CNTL、下段: TEST。



図 1.3.2 2014 年 2 月 26 日 00UTC を対象とした 12 時間予報 (2014 年 2 月 25 日 12UTC 初期値)のお天気マップ (左: CNTL、 中: TEST)と、対応するひまわり赤外 4 (3.8 µm 帯)画像(右)。



T1307(D0008) Typhoon Forecast and Analysis (Track and Intensity) - 2013/07/09 12UTC -

図 1.3.3 2013 年 7 月 9 日 12UTC 初期値の台風第 7 号の予測(FT=84 まで)と、解析されたベストトラック。青: CNTL、 赤: TEST、黒: ベストトラック。左は進路、右上は中心気圧、右下は最大風速。

いる。特に CNTL では、FT=36 以降でベストトラックよりも発達する予測となっている。

GSM の水平格子間隔は約 20 km であり、台風中心 付近の構造を表現するには十分でない。したがって、特 に中心付近で気圧傾度が大きい台風では、強度を適切 に予測する⁴ ことは困難である。本事例の予報初期に おいて台風をベストトラックより弱く予測していたの は、これが原因である⁵ と考えられる。

一方でGSMによる台風の予測については、予報時間 が進むと強度過大になる事例が増える、それも強い台 風や強風半径が大きい台風で顕著であることが過去に 報告されており(例えば中川ほか(2013)など)、CNTL の予測に見られる台風第7号の過剰な発達はこの特性 と一致する。過去の調査では台風中心付近での雲スキー ムによる加熱の大きさが発達に影響している可能性が 指摘されており、TESTの予測で台風の過剰な発達が 緩和されたのは、物理過程の改良によるものと考えら れる。図1.3.4 は、CNTL と TEST による積雲対流ス キームと雲スキームが生成した降水とその合計、および 対応する解析雨量の分布である。CNTL では雲スキー ムによる降水が台風中心から南側に集中し、その強度 も最大で 224 mm/6h (積雲対流スキームによる降水と の合計では 296 mm/6h) と大きい。これに対し TEST では雲スキームによる降水の集中が緩和され、最大で 112 mm/6h (合計では 136 mm/6h) となっていた。 雲 スキームが働いて対流圏下層で強い凝結加熱が発生し、 格子スケールの上昇流と下層の収束が起き、さらに雲 スキームが働くというフィードバックが、TEST では CNTL と比べ抑止されているものと思われる。これは 主に積雲対流スキームの改良に伴い、大気の不安定な 状態が積雲対流スキームでより強く解消されるように なったことによると考えられる。また解析雨量との比 較からも、CNTL では降水を台風中心から南側に集中 させ、中心より北側にはほとんど降水を予測していな いのに対し、TEST では降水を予測する範囲が広くなっ ており、改善していると言える⁶。

1.3.5 台風進路予測

(1) 西進する台風

図 1.3.5 左は、2013 年台風第 7 号に対する 2013 年 7 月 9 日 00UTC 初期値の CNTL と TEST による進路 の予測と、解析されたベストトラックである。図 1.3.3 に示した事例の 12 時間前の初期値に対応する。CNTL と TEST とも比較的よく台風の進路を予測できている

⁴ 水平分解能が低いモデルでどの程度の強度の台風を予測す れば適切であるかは明らかでない。なお全球解析・メソ解析 で使用する台風ボーガスでは、ボーガスが表現する気圧分布 の変動スケールがインナーモデルの格子間隔よりも小さくな らないよう調整している(岡垣 2010)。

⁵ 全球解析のインナーモデルの水平格子間隔が約55 km と、 GSM より水平分解能が低いことも影響していた可能性があ る。

⁶ なお衛星観測によると、このときの降水は台風の南側の方 が北側より強かった(図略)。



図 1.3.4 2013 年 7 月 9 日 12UTC 初期値の FT=60 における前 6 時間降水量の予測と、対応する解析雨量。左 3 列が予測で、 上: CNTL、下: TEST。左から積雲対流スキームによる降水、雲スキームによる降水、その合計。一番右が対応する解析 雨量で、20°N 以南と灰色の領域は値がない。× は 7 月 12 日 00UTC における CNTL と TEST それぞれの予測とベストト ラックの台風中心位置を表す。



図 1.3.5 CNTL (青)と TEST (赤)による台風進路予測 (FT=84 まで)とベストトラック(黒)。左: 2013 年 7 月 9 日 00UTC 初期値の台風第 7 号の予測、右: 2013 年 10 月 6 日 00UTC 初期値の台風第 24 号の予測。

ものの、CNTLでは予報後半にベストトラックよりも やや北寄りの進路を予測しているのに対し、TESTで は改善していることが分かる。

台風が転向前に西進しているときに、進行方向に対 して右側(北)に予測の進路がずれる事例が多く見ら れることはこれまでにも報告されており(梅津・森安 2013;中川ほか 2013)、初期場、台風の構造、太平洋高 気圧の表現など、様々な要因が可能性として指摘され ている。今回の改良により、多くの事例でこの傾向が 改善しており(第1.2.3項) 個々の事例について精査 はしていないものの、大規模な循環場の表現が改善し たこと(第1.2.1項)が影響している可能性が考えら れる。

(2) 転向して日本に接近する台風

図 1.3.5 右は、2013 年台風第 24 号に対する 2013 年 10月6日 00UTC 初期値の CNTL と TEST による進路 の予測と、解析されたベストトラックである。この台風 は、10月4日06UTCにマリアナ諸島で台風になって 北西進し、東シナ海で転向して進路を北東に変え、8日 12UTC頃に対馬付近を通過した。本事例では、CNTL は経路は適切に予測できていたものの、転向後に北東 進する速度がベストトラックと比べて遅かった。一方 TESTは、転向時の台風中心位置がベストトラックよ りもやや東寄りだったものの、その後の北東進する速 度は CNTLより速くなり、改善していた。

GSM に台風が転向した後の速度をベストトラックよ りも遅く予測する傾向があることはこれまでにも報告 されており(梅津・森安 2013;中川ほか 2013)、中緯度 のトラフや太平洋高気圧の表現などが原因として考え られている。今回の変更にあたり行った業務化試験で は、このような傾向が改善される事例と、逆に悪くな る事例のどちらも見られた。

1.3.6 まとめ

本節では5つの事例から、2014年3月の全球数値予 報システムの改良による数値予報への影響について解 説した。

総観場に関しては、全体的には改善しているものの、 特定の気圧配置や季節によらず、日本付近で誤差のパ ターンに大きな変化はなかった。

影響が大きかった点として、下層雲の増加がある。天 気ガイダンスとお天気マップ、あるいは GSM と MSM で曇りを予測する範囲に差があったり、GSM が下層雲 を予測していても 925 hPa 面に対応する湿数が小さい 領域がなかったりする場合には、衛星画像と比較する など、注意が必要であろう。

台風強度予測も改良による影響が見られた点の1つ である。物理過程の改良により、台風の過剰な発達が 緩和された。しかしながら図1.3.3 や第1.2.3 項から分 かるように、台風強度予測の精度はまだ十分よいとは 言えず、今後もモデルの改良を続けていく。

台風進路予測については、転向前の事例を中心に、 平均的には改善が見られた。今後さらに誤差を小さく していくためには、初期値やモデルの物理過程など幅 広く改良し、数値予報システム全体の総合的な精度を 向上させることが必要であると考えられる。

参考文献

- 安藤昭芳, 2007: お天気マップ. 平成 19 年度数値予報 研修テキスト, 気象庁予報部, 94-97.
- 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.
- 岡垣晶, 2010: 全球解析における台風ボーガスの改良. 平成 22 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 48-52.
- 小野田浩克, 2008: 事例検証. 平成 20 年度数値予報研 修テキスト, 気象庁予報部, 19-22.

- 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.
- 中川雅之、檜垣将和、氏家将志、2013: 気象庁現業全球モデルによる台風予報の現状と課題. 第6回気象庁数値モデル研究会, http://pfi.kishou.go.jp/material/modelkenkyukai2012/20130306-nakagawa.pdf.

1.4 留意すべき日本付近での予測特性の変化¹

1.4.1 はじめに

実施した試験とその検証を通じて把握された、日本 付近の予測特性の変化について特徴的なものを以下に 示す。

- 1. 傾圧帯での高度場・気温場の大きな誤差パターン はほぼ変わらないが、誤差の大きさが多くの事例 で小さくなった(第1.3節参照)。
- 2. 夏期において、FT=0 から FT=24 付近までの降 水量が増加した(第1.6節参照)。
- 太平洋高気圧の影響下にある領域では、対流圏下 層の弱い乾燥化と中下層の低温化、高度場の低下 等の変化が見られた。

これらの中で3は特に変化が大きく、平均予測誤差の 悪化が見られる要素も存在するため、その変化に注意 が必要である。本節ではこの点に注目し、太平洋高気圧 縁辺の予測特性の変化について、業務化試験(第1.1.5 項参照)における夏期試験の期間3か月間の検証結果 を用いて説明する。

(1) 500 hPa 面高度場と気温の鉛直プロファイル

まず、日本付近での 500 hPa 面高度場(以下、Z500) の平均解析値・予報値の変化について原因とともに解 説する。第 1.2.4 項で述べたように、Z500 は変化が大 きく、35°N 以南の海上および沿岸部で負バイアスが拡 大した。

この変化は天気図上でも明瞭に見えるため、実例で高 度場の違いを見ていく。まず、事例の紹介として 2013 年8月5日 06UTC の速報天気図を図 1.4.1 に示す。こ の日、日本の南海上の高気圧はほとんど停滞し、暖か く湿った空気が流入して大気の状態が不安定となった 西日本を中心に、広い範囲で局地的な雨や雷となって いた。

図1.4.2に、2013年8月3日06UTC初期値のFT=48 の結果をCNTLとTESTについて示す。5640 mから 5760 mの流れを見ると、CNTLと比較してTESTで はバイカル湖西や朝鮮半島ではトラフが浅い誤差が改 善しているが、カムチャツカ半島西付近ではリッジの 北への張り出しが弱い誤差がやや拡大している。ただ し、大きな誤差のパターンとしてはカムチャツカ半島 西、中国東北区付近、バイカル湖西と概ね似ていると 言える。第1.3節で解説された全体的な傾向と同じく、 この事例でも40°Nから北のトラフやリッジが西から進 行する緯度帯で、解析と比べて予報の方がトラフが浅 く位相が遅れているといった誤差が共通して見られる。

一方で日本の南海上では様相が異なり、解析値の段階 から CNTL と TEST の Z500 の分布がかなり異なる。 TEST の解析では 5880 m で囲まれる領域が CNTL に 比べて縮小し、予報値ではその差はさらに大きくなって



図 1.4.1 2013 年 8 月 5 日 06UTC の気象庁速報天気図。





図 1.4.2 500 hPa 面高度場 [m] についての、2013 年 8 月 5 日 06UTC を対象とする GSM の FT=48(2013 年 8 月 3 日 06UTC 初期値、黒線)と対応する全球解析(緑線)、両 者の差(色)。上段: CNTL、下段: TEST。

¹ 米原 仁



図 1.4.3 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で、00,12UTC の 両方の観測を用いている。上段:CNTL、下段:TEST。数 字を表示する都合もあり描画領域は着目する場所に絞って いる。

いる。緯度別の平方根平均二乗誤差 (RMSE) で見ると、 35°N から 60°N では TEST の方が小さいものの、35°N 以南では平均誤差 (ME) の拡大の寄与により RMSE が 大きくなっている (図略)。

次に、違いの大きい日本の南側の領域について統計 的な検証結果を見る。図 1.4.3 に FT=48 でのラジオゾ ンデ観測を参照値とした ME の比較を示す。図から、 本州でも西日本と東日本の太平洋側で 5 m 程度、台湾 では 10 m 近く Z500 の負バイアスが拡大していること が分かる。この負バイアスは FT=18 から FT=48 の間 で最も大きく、その後やや小さくなるが、大まかなパ ターンは FT=72 まで同一である(図略)²。統計的に 見られるこの Z500 の低下は、それぞれの事例では図 1.4.2 の様に主に太平洋高気圧に伴う形で現れる。事例 によってその低下量の大小はあるが、概ね夏期試験の どの事例でも傾向は同じである。

南海上を中心に現れたこの変化は、主に積雲対流過 程の特性の変化と関係している。第1.1.3項で積雲対流 過程の改良について簡単に説明したが、この変更の作 用として、対流活動が活発な領域では、気温が –5°C 付近より下層で乾燥化と低温化、それより上層から対 流圏上層までで高温化が見られた。この変化の原因は、 エネルギー収支の補正は基本的に冷却・乾燥側に働く ため、補正を行う層を –5°C より下層に限定したこと により下層に冷却・乾燥が集中したことが主要なもの と考えられる³。

図 1.4.4 に、解析値の気温および高度の鉛直プロファ イルについて TEST と CNTL の差を示す。CNTL に 対する TEST の気温変化のパターンを見ると、TEST の解析値は概ね 600 hPa 面以下で低温、それより上で 高温になっている。低温化と高温化の境目はおおよそ -5°C 付近であり、積雲対流過程の変更で導入した閾 値と対応している。低温化のピークは 700 hPa 付近に 存在し、対流活動が活発になる熱帯側へ近づくほどそ の差は大きくなっている。

高度場は概ね地表面の気圧から仮温度を積み上げた ものであり、600 hPa 面以下での低温化が Z500 の低下 に寄与している。また相対的には小さいが、600 hPa 面以下での乾燥化も Z500 を下げる方向に働いている (図略)。高度場の鉛直プロファイルは、これらの変化 に対応して 850 hPa 面付近から差が目立ち始め、750 hPa 面付近から上では低緯度側に行くにつれて TEST の方が急激に低くなっている。解析値で見られるこれ ら鉛直プロファイルの変化は、FT=0以降でも傾向は 同じである(図略)。気圧の変化も当然影響するが、第 1.2.2 項の図 1.2.8 を見ると、この領域では海面更正気 圧はあまり大きくは変わっていない。積雲対流過程の 改良は加熱率・加湿率の鉛直層間の分配を変えるだけ で、収支補正の総量は直接的には変えていないため、 海面更正気圧への影響は間接的なものになることと整 合的である⁴。

この 600 hPa 面以下の低温化は従来から GSM が持っ ている「下層低温バイアス」を拡大させるものであり、 対流圏中下層全体で見ると ME は悪化している。ただ し、日本付近では CNTL の領域平均気温の ME は概ね、 925 hPa, 850 hPa 面で低温バイアス、700 hPa 面でや や高温バイアス、600 hPa 面から上で低温バイアスで あり(図略), 700 hPa 面付近では低温化により ME は バイアスが小さくなった地点も見られる。図 1.4.5 に、 日本の南側の領域を中心に FT=48 でのラジオゾンデ

² 第 1.2.4 項の図 1.2.21 も参照。

³ 単純な条件下で比較した話であり、実際には層配置の変更によるエネルギー収支補正の変化や大気循環を通じた影響等もある。特に予報時間が進んだ時の変化は単純ではない。
⁴ 定量的な見積りは FT=0 以降を対象としたものも含めて後述する。



図 1.4.4 気温(上図)および高度(下図)の、TESTとCNTL の解析値の差(TEST-CNTL)。120°Eから170°Eまでの 東西平均を、18°Nから35°N、1000hPa面から500hPa 面までの範囲で示している。図は左側が南、右側が北方向。 統計には夏期試験の各日4時刻を使用。

観測を参照値とした 700 hPa 面気温の ME の比較を示 す。ほとんどの点で低温化が確認できるが、ME が改 善・改悪のどちらかは地点によって異なる。大まかに は、30°N 以北では高温バイアスが改善しているが、以 南では同程度の高温バイアスが低温バイアスに変わっ たか、低温バイアスが悪化している。沿岸部でも多く の地点で高温バイアスが改善している。一方、700 hPa 面以下の高度では、沿岸部から海上では概ね低温バイ アスが悪化している(図略)。

(2) 解析値のバイアスと利用時の留意点

今回の変更では解析値のバイアスも変化しており、その点に注意が必要である。図1.4.6 に、CNTL と TESTの解析値をそれぞれ参照値として検証した、Z500のTESTのME について水平分布図を示す。図を見ると、同じ予報値の検証結果であるにもかかわらず、両者で大きく異なっているのが分かる。TESTの予報値を TESTの解析値で検証した TF-TA では日本から朝鮮半島、中国大陸東岸、およびその南海上で負バイアスとなって



図 1.4.5 FT=48 での 700 hPa 面気温のラジオゾンデ観測 地点での ME [K] の比較。図 1.4.3 と同様。上段: CNTL、 下段: TEST。

いる、一方、TEST の予報値を CNTL の解析値で検証 した TF-CA では負バイアスの地点が大きく広がって おり、ラジオゾンデ観測地点があまり存在しない南海 上で TF-TA との違いが特に大きい。50°N 以北でも違 いが見られるが、南海上での変化に比べるとかなり小 さい。

50°N 以北での解析値の違いは、主に GNSS 掩蔽観 測利用の高度化によるデータ同化を通じた精度向上と、 その他 GSM の改善による解析値・予報値の精度向上 によるものである。この緯度帯では解析値・予報値の 対観測検証を見ると ME や RMSE は中立かやや改善 であり(図略)解析値としては概ね改善している。個 別の事例でもこの領域では解析値は概ね中立からやや 改善したものと考えてよい。

一方で、南の海上では解析値の対観測バイアス自体 が拡大している。図 1.4.7 に、CNTL と TEST それぞ れのラジオゾンデを参照値とする Z500 の ME 検証の



図 1.4.6 夏期試験における FT=48 での Z500 [m] につい て TEST の ME を参照値を変えて比較。上段は TEST の 予報値を TEST の解析値で検証したもの (TF-TA)、下 段は TEST の予報値を CNTL の解析値で検証したもの (TF-CA)。

結果を示す。沿岸部を中心に概ね負バイアスは拡大し ており、この変化が予報値の ME の違いに強く影響し ていることが分かる。観測の少ない海上等の領域では、 解析値といえども十分な精度があるわけではなく、バ イアス特性は数値予報システム、特に GSM の予測特 性に大きく依存する。

GSM の予測特性の変化に応じて解析値も大きく変 化しており、それは日々の結果でも見られるため、こ れまでの知見等を用いる場合にはその差に注意が必要 である。夏期では、おおよそ 35°N 以南の高度場につ いては、解析値と比較して誤差が小さくても、観測と の比較では負バイアスが存在する可能性がこれまで以 上に高くなっている。そのため、夏の南海上の高度場 について予測結果の答え合わせをする場合、解析値だ けを参照値としてしまうと解釈を誤る可能性がこれま でより高くなっている。

解析値の変化の影響について事例で見てみる。図1.4.8 に、2013 年 8 月 3 日 06UTC 初期値の FT=48 の結果 について、TEST の予報を TEST, CNTL それぞれの



図 1.4.7 Z500 解析値 (FT=0) のラジオゾンデ観測地点での ME [m] の比較。図 1.4.3 と同様。上段:CNTL、下段: TEST。

解析値と比較したものを示す。35°N以北では、誤差に 違いはあるがその大まかな分布は同じであり、変化は 系統的ではない。他の事例についても、あまり変化傾 向は一般化できず事例に依存する。一方で台湾からフィ リピンにかけての東側海上では、図1.4.6 で見られた 差が大体同じように見えている。これは他の事例で見 ても、太平洋高気圧の縁辺の対流活動が活発な場所で 差が大きいという特徴はほぼ同じである。

(3) 予測特性の変化

ここまで 500 hPa 高度場と気温の鉛直プロファイル や、その解析値の変化を中心に説明してきた。以降そ の他の要素も含めて留意すべき予測特性の変化を解説 していく。

図 1.4.9 に、FT=0 から FT=48 までの、海面更正気 圧 (PSEA)、850 hPa 面気温 (T850)、700 hPa 面気温 (T700)、Z500 各要素の平均予測場について、TEST と CNTL の差を示す。



図 1.4.8 図 1.4.2 と同じ事例、時刻を対象とする FT=48(黒 線)と対応する全球解析(緑線)、両者の差(色)の Z500。 上段:図 1.4.2 の下段と同じ図、下段:TF-CA(TEST の 予報値を CNTL の解析値で検証したもの)。

海面更正気圧と高度場の変化の関係

まず、気圧場の予測特性の変化を、高度場の変化と の関連から見ていく。理想的な条件を仮定して、気圧 場の違いの高度場への影響を大まかに評価する。静力 学平衡の下で等温大気(水蒸気は無視する)を考える と高度場の解析解が求まる。この解の下で、地上気圧 1000 hPa で温度 290 K の状態を考えて、地上気圧 0.1 hPaの摂動と気温 0.1 Kの摂動の Z500 への影響を見積 もると、地上の気圧の影響は気温の影響の半分以下で ある。図 1.4.9 の FT=0 を見ると、日本の南側の領域 では PSEA の変化は 0.1 hPa 以下である一方で、T700 は0.1 K以上の領域が広がっており、大まかな見積り のもとでは気温の変化の影響が卓越していると考えら れる。実際、FT=0 での Z500 の変化分布は概ね T700 の変化分布によく対応している。予報時間が進むと、 PSEA の変化が大きい領域も見られるが、本州付近や その南海上では気温の変化の影響が概ね卓越している。 ただし PSEA の変化が大きい東の海上では、その変化 は無視できず、気圧が上がる効果により下層の低温化 の効果はある程度打ち消される。このため、FT=0 で 日本の南東側がZ500の変化が最も大きいのに対して、 FT=48では南西側の台湾付近が最も変化の大きい領域 となっている。

東の海上で PSEA に差が見られるのは、CNTL に見 られた予報時間が進むと PSEA が低下する変化傾向が、 TEST では改善し相対的に CNTL から見た TEST の PSEA が高くなったためである。この点は北太平洋域 で予報時間が進んでも降水量や降水分布がより維持さ れるようになったことと関連していると考えられる(第 1.2 節)。一方で、図 1.4.9 の PSEA を見ると、FT=12 から FT=24 では、およそ本州からその西で平均気圧の 低下が見られる。この変化は大陸と日本では成因が異 なるが、日本のものは地上 GNSS 天頂大気遅延量デー タによって降水量が増加したことと関係している。解析 値で見られる可降水量の増加はFT=12程度でほぼ消え るが、降水量の増加の影響はそれ以降も残る。PSEA の変化で見ると本州から九州およびその南海上では、 FT=12 で一番差が大きく、FT=36 までで差がやや小 さくなり、その後は日本の東海上のように、大きなス ケールの変化の影響を強く受け、全体的に高くなって いく。

南海上の高気圧という点では、Z500 と PSEA の変 化の関係には系統立ったものが見られない。平均場で 見てZ500 が低下し、またほとんどの事例で高度場が低 くなっていても、平均場で PSEA は低くなっていない。 図 1.4.10 に、2013 年 7 月 24 日 06UTC を対象とする FT=48 の例を示す。この例では、東シナ海付近の 5880 m の等高度線で覆われた領域は TEST の方が狭く、南 海上では全般的に高度場が下がっているが、PSEA の 1010 hPa の線で見られるように地上気圧は高くなって いる領域が広い。このように、今回の変更による Z500 と PSEA の変化はあまり連動していない。

梅雨前線上の低気圧

低気圧の発達について見ていく。第1.2.2項で、今回 の変更により弱い降水のバイアススコアが増加したこ とが述べられているが、本州付近について日々の予測 を見ると、多くの事例で不安定性降水の領域が広がり 降水量が増加している(第1.6節参照)。また、梅雨前 線上の低気圧、本州やその南岸を通過して東海上へ抜 ける低気圧についても、FT=24付近まででCNTLに 比べて雨量が増え、やや発達する事例が見られた。梅 雨期の PSEA の変化を見るため、6月21日から7月 10日までの期間で平均を取ったFT=24での PSEA 平 均予測場について、TEST と CNTL の差を図 1.4.11に 示す。この期間では、図 1.4.9 と比較して全期間よりも 大きめの気圧の低下となっていることが分かる。

この PSEA の低下の原因は、CNTL に比べてやや 低気圧が発達した事例が、TEST では複数見られたた めである。TEST の方が低気圧がより発達した事例と して、梅雨前線上の擾乱の例のうち 2013 年 6 月 23 日



図 1.4.9 夏期試験期間の FT 毎の平均予測場の差 (TEST-CNTL)。上の段から FT=0, 12, 24, 36, 48 についての結果で、左 列から PSEA, T850, T700, Z500。色の示す値は、PSEA, T850, T700 がカラーバー (a)、Z500 がカラーバー (b) に対応し ている。



図 1.4.10 2013 年 7 月 24 日 06UTC を対象とする FT=48 (2013 年 7 月 22 日 06UTC 初期値)の比較。上段:Z500 [m]、下段:PSEA [hPa]。赤線が TEST で青線が CNTL。

18UTC 初期値の予測を、図 1.4.12 に示す。この事例 では解析値の違いは小さく、CNTL, TEST 両者の解析 値の違いを考慮したとしても、TEST がやや発達過剰 で CNTL がやや弱い表現であり、両者の誤差の絶対値 が大きく異なっているわけではない。試験期間ではや や発達した事例が多かったが、その傾向が全ての事例 で見られたわけでなく、変化の方向は事例に依存して いる。今回の変更により発達傾向が強まった可能性は あるが、CNTL の発達は適正だが TEST が明瞭に過発 達したという例は見られなかった。

降水の変化については、地上GNSS 天頂大気遅延量 データ利用の効果によりFT=12までの降水量が大き く増加したことが大きいが、それに加えて積雲対流過 程の変更によっても特性が変化している。第1.3.4項 で台風事例について、積雲対流過程の変更により積雲 対流スキームによる降水、雲スキームによる降水の割 合が変化し加熱のプロファイルが変わったことが示さ れているが、第1.2.3項で示されたように、今回の変 更では熱帯擾乱の発生予測が改善しており、これまで 発生初期で十分に渦がまとまらなかった問題が改善し ている。日本の南岸においても、擾乱周辺で積雲対流 スキームによる降水量が増加している事例も見られる。



図 1.4.11 6月 21 日から 7月 10 日までの期間での、FT=24 での PSEA 平均予測場の差 (TEST-CNTL)。

ここで述べた低気圧の変化について、積雲対流スキー ムの変更が関係している部分もあると考えられる。今 回の試験期間では事例が少ないこともあり、発達の傾 向については十分に確認できていないが、特性の変化 として今後注意する必要があるだろう。

気温・相当温位

図 1.4.9 を見ると、FT=0 から FT=24 までの間と比 べて FT=24 から FT=48 の気温差の変化幅は小さく なっている。FT=48 以降 FT=72 にかけても、予報時 間が進むにつれて徐々に差の拡大が収まっていき(図 略)また差の空間分布自体はあまり変化しない。この 変化は南西諸島や日本の南海上で顕著であり、それら の地域で下層の気温に関する過去の知見を利用する場 合は、0.5 K 程度の修正が必要な可能性がある。平均 場としては、南側ほど気温が下がっており、南海上の 温度傾度は小さくなっている。個別の事例では、高気 圧縁辺を中心に広い範囲で気温が低下しているが、等 温度線の集中帯の表現は系統的には目立って変わって いない。

対流圏下層の低温化・乾燥化に対応して相当温位も低 めに予測されるようになった。図1.4.13 に、FT=48 で の925 hPa,850 hPa 面の相当温位(EPT925,EPT850) について散布図検証を示す。ここでは、参照値にはラ ジオゾンデ観測の日本の観測点のみを用いている。

EPT850 を見ると、およそ 335 K より高温側では TEST の負バイアス傾向の拡大が見られる一方で、予 測値と観測値が一致する線から大きく離れた点の数は TEST の方が少ない。EPT850の予測はRMSE で見る と負バイアスの増加もありやや悪化傾向で(図略)、特 に 340 K 以上では低温化と乾燥バイアスの拡大が大き いため、数値予報資料の解釈においては留意する必要 がある。一方で、925 hPa では 850 hPa に比べると差



図 1.4.12 2013 年 6 月 24 日 18UTC を対象とする FT=24 (2013 年 6 月 23 日 18UTC 初期値、黒線)と対応する全 球解析(緑線)、両者の差(色)の 500 hPa 面高度場。上 段: CNTL、下段: TEST。

が小さい印象であるが、355 K を超える高い EPT が 予測されにくい点では特性がやや悪化している。

図 1.4.14 に、2013 年 8 月 5 日 06UTC を対象とす る FT=48 の EPT925 について、CNTL と TEST を比 較したものを示す。南の海上に注目すると、全体的に EPT925 の低下が見られるが、高気圧の縁辺付近では 風の場があまり変わってないこともあってか、EPT925 のパターンはそう大きくは違わない。対応する前 6 時 間降水量を図 1.4.15 に示す。本州の不安定性降水の表 現はおおまかには変わっていない。九州の西海上から 豊後水道南の海上に広がる強雨域については、CNTL と TEST ともほとんど表現できていない点でもあまり 差がない。その他の降水量が多かった事例でも、系統 的な特性の違いはあまり見られなかった。

風

図 1.4.16 に、FT=48 までの 925 hPa および 700 hPa 面での水平風 (WV925, WV700)の平均予測場につい て TEST と CNTL の比較を示す。本州付近の海上で は平均風の変化は概ね 0.2 m/s 程度かそれ以下であり、



図 1.4.13 夏期試験期間についての、FT=48の相当温位散 布図。上図が 850 hPa で下図が 925 hPa、横軸がラジオ ゾンデ観測値で縦軸が予報値。検証には日本の観測点を用 いている。赤が TEST で青が CNTL。

風の特性は目立って変化はしていない。一方、25°N以 南の領域では、700 hPa 面で台湾の南から東の海上に おいて解析値から差が見られる。例えばFT=24 で両者 の風を比較すると(図1.4.17 に拡大図を示す)、TEST では風速が若干大きくなり、風が反時計回りにわずか に回転し、概ね南風成分が小さくなり東風成分が増加 している。この変化は積雲対流過程の改良による、モ ンスーン循環の改善と対応しており、TEST ではこの 領域を西進する熱帯低気圧の北上バイアスが改善した (第1.2.3 項参照)。CNTL ではフィリピン東の対流活動 を維持できず、時間が進むにつれバイアスが拡大して いくため、TEST と CNTL の差が広がっていく。925 hPa 面で見ると、高気圧の縁辺を回り西日本に湿った 大気を運ぶ風には大きな違いは見られないが、詳細に



図 1.4.14 2013 年 8 月 5 日 06UTC を対象とする FT=48 (2013 年 8 月 3 日 06UTC 初期値)の EPT925 [K]の比 較、矢印は水平風。上段:CNTL、下段:TEST。図 1.4.2の 事例。

見ると東シナ海の西側で南風がやや強まっている。一方、25°N 以南の領域では TEST では東風が弱まって いる様子が見えるが、この変化も積雲対流過程の変化 によるものである。

図 1.4.18 に、925 hPa 風の予測について、2013 年 8 月 3 日 06UTC 初期値の FT=48 (図 1.4.2 参照)の結 果を CNTL と TEST について示す。日本付近の差と しては、東シナ海での南西風の強まりや、日本海での 南西風の強まりが見られる。このとき中国東北区付近 にはトラフが位置しており、日本海での違いは傾圧帯 の流れの違いに対応していると思われる。平均場で見 られた東シナ海での南西風の強まりがこの事例でも現 れているが、個別の事例で見るとその傾向は一貫した ものではなく事例によって異なっている。



図 1.4.15 2013 年 8 月 5 日 06UTC を対象とする FT=48 (2013 年 8 月 3 日 06UTC 初期値)の前 6 時間降水量 [mm/6h]。上段:CNTL、中段:TEST、下段:解析雨量。図 1.4.2 の事例。解析雨量はモデルの出力に合わせて格子平 均している。



図 1.4.16 夏期試験期間の FT 毎の平均予測場の差 (TEST-CNTL)。上の段から FT=0, 24, 48 についての結果で、左列から WV925, WV700。矢印は水平風ベクトルでそれぞれ 1 m/s 以上のものだけを描画している。赤が TEST、青が CNTL であ り、CNTL の上に TEST を描画しているため、CNTL が見えない場合は概ね重なっていることを意味する。色は水平風ベ クトル差の大きさを表す。



図 1.4.17 図 1.4.16 の FT=24, WV700 について台湾付近 の海上に領域を限定し、矢印の表示を拡大したもの。

1.4.2 まとめ

数値予報課では2014年3月に、全球数値予報システムについて、鉛直層数増強と物理過程改良およびデー タ利用の改良を行った。本節では、今回の変更による 予測特性の変化のうち、夏期に太平洋高気圧の直接的 影響下にある領域で、対流圏下層の弱い乾燥化と中下 層の低温化、高度場の低下が見られること着目して、 留意すべき点を解説した。解説した内容を以下に簡単 にまとめる。

- ・ 対流圏下層はやや乾燥化し、中下層は低温化した。
- 500 hPa 面高度は太平洋高気圧の縁辺部で低下し、
 5880 mのコンターなどでこれまでの天気図とパターンが異なる。
- ・ 地上高気圧の系統的な差は小さい。
- 本州やその南岸を通過し東海上へ抜ける低気圧については、これまでよりやや発達する可能性がある。
- 日本付近では、高い 850 hPa, 925 hPa 面相当温位 が若干出現しにくくなった。
- 対流圏下層風の日本付近での特性はあまり変わって いない。ただし、東シナ海の西側で南風が若干強 まった。
- 解析値自体のバイアスも変化し、観測値との比較の 重要性が高まった。

これまでの予報作業上の知見を利用する時にこれらの 変化を考慮していただければと思う。

全球予報の精度向上には初期値やモデルの物理過程 など幅広い改良が必要であるため、今後も数値予報シ ステム全体の総合的な精度向上に向けた開発を行って いく。また、今回解説した予測特性の改善のためには、 特に全球モデルの物理過程の改良が重要である。現在、 下層の低温バイアスの改善に向けて積雲対流過程を中 心に物理過程の開発を行っているところである。



図 1.4.18 2013 年 8 月 5 日 06UTC を対象とする FT=48 (2013 年 8 月 3 日 06UTC 初期値)の WV925 の比較。上 段: CNTL、中段: TEST、下段: TEST-CNTL。矢印は 水平風ベクトルであり、色は風速。2 m/s 以下の風は表示 していない。TEST-CNTL については 1 m/s 以下の差は 表示していない。図 1.4.2 の事例。

1.5 ガイダンス資料への影響¹

本節では、2014年3月の全球モデル(GSM)の変更 に伴うガイダンスへの影響およびこれに対して行った 対策について説明する。GSMの鉛直層数増強および 物理過程の改良によりモデルの予測特性が変化するこ とで、ガイダンスの予測精度に影響が出る可能性があ り、ガイダンスもこれに応じた係数の最適化が必要で ある。このため、GSMの予測特性の変化によるガイダ ンスへの悪影響を軽減することを目的に、全球数値予 報システムの業務化試験および追加実施した予報実験 で作成した 2013年3月~2014年3月までの予報デー タを用いて、降水量ガイダンスなど逐次学習型のガイ ダンスについて事前学習を行い新モデルの予測特性に ガイダンスを適応させた。その結果、多くのガイダン スでは GSM 改良による予測精度への大きな影響はな かった。

その中でモデルの変更による大気の鉛直プロファイ ル変化が予測精度に大きく影響した、予測係数が固定 型である発雷確率ガイダンスについて、係数の作成手法 を修正して再作成を行った。その内容と結果を第1.5.1 項で説明する。また、降水量ガイダンスおよび GSM 視程分布予想についても、モデル変更の予測精度への 影響が比較的大きかったため、その内容をそれぞれ第 1.5.2 項および第1.5.3 項にて説明する。

MSM ガイダンスについても、GSM の予測値で与え られる MSM の側面境界の影響を受けて予測精度に影 響を受ける可能性があるため、変更前の GSM を側面 境界としたものと変更後の GSM を側面境界としたも のの予測精度の検証を行ったが大きな違いはなかった。

1.5.1 発雷確率ガイダンスへの影響と対応

(1) はじめに

GSM 発雷確率ガイダンスの予測係数について、GSM の改良に併せて再作成を行った。これは、GSMの改良 による影響を調査した結果、従来の予測係数を使い続け た場合に大幅な予測精度の低下が見られたためである。

発雷確率ガイダンス(以下、PoT)は、前3時間に 発雷する確率をロジスティック回帰を用いて20km格 子毎に予測するガイダンスである。GSM発雷確率ガイ ダンスでは、このロジスティック回帰の係数を約2年間 の予報値と雷の観測値から決定しており、その値は固 定である。係数が固定であるガイダンス(係数固定型) は、ユーザーがその予測特性を経験的に把握しやすい 点に優れている一方で、カルマンフィルターやニュー ラルネットワークを用いて係数を逐次学習するガイダ ンス(逐次学習型)のように、数値予報モデルの変更 などの予測特性の変化に追随して予測係数が最適化さ れることはない。このため、GSM発雷確率ガイダンス については、GSMの改良によって生じた予測特性の変化の影響が、ガイダンスの予測精度の低下として現れたと考えられる。

本項では、GSM の改良が GSM 発雷確率ガイダンス に与えた影響と実施した対応策について説明する。な お、発雷確率ガイダンスの仕様については高田 (2007) や高田 (2009)を、ガイダンス作成に用いる予測手法に ついては松下 (2012)を参照していただきたい。

(2) GSM の改良による影響

図 1.5.1 に、従来の予測係数を用いて改良前の GSM (CNTL)から計算した PoT(以下、CNTL-PoT) お よび改良後の GSM (TEST)から計算した PoT(以下、 TEST-PoT)のエクイタブルスレットスコア(UTS)、 バイアススコア(BI)、予報時間別のブライアスキルス コア(BSS)を示す。検証期間は、夏実験が2013年7月 1日~9月30日、冬実験が2012年12月1日~2013年 2月28日、検証対象時刻は12UTC初期値のFT=12~ 33 である。本項で示す各実験の設定は表1.5.1を、各 指標については付録 C.3 を参照していただきたい。

夏・冬実験ともに、低確率の閾値を除いていずれの閾 値でもTEST-PoT(緑色)の方がCNTL-PoT(青色) よりETSが小さくなっており、予測精度が下がってい る。これはBIや捕捉率(図略)の変化から、TEST-PoTの方が予測する確率値が小さくなったことや、発 雷実況の捕捉が悪くなったことが原因と考えられる。 特に夏実験でこの傾向が強く、予報時間別のBSSから は日中の予測精度の低下が著しいことが分かる。また、 同じ予報時間別のBSSで予報時間の前半と後半を比較 した場合には、前半ではTEST-PoTがCNTL-PoTに 比べて悪くなっているのに対して、後半ではほぼ同じ か逆転してTEST-PoTの方が良い場合もある。このよ うに、GSMの改良による影響を受けて、ガイダンスの 予測精度や特性が大きく変化した。

これら TEST-PoT の予測精度や特性の変化は、第1.4 節で示されたように、GSM の改良によってモデルが予 測する大気の気温や水蒸気のプロファイルの特性が変 わったためと考えられる。図 1.5.2 に、PoT への寄与が 大きい大気の安定度を表す指数である CAPE と SSI²の 2013 年 8 月 1 か月間の 15JST における TEST, CNTL それぞれの平均値とその両者の差分を示す。CAPE は その値が大きくなるほど PoT に対して正の寄与を、逆 に SSI は値が小さくなるほど PoT に対して正の寄与 を持つ。この差分図に注目すると、CAPE, SSI ともに TEST の方が CNTL より平均して小さくなっており、 このことは、CAPE については TEST-PoT を CNTL-PoT より小さくする方向に、SSI は逆に大きくする方 向に働いていることを意味している。(1) で述べた通

¹ 第 1.5 節 松下 泰広、第 1.5.1 項 白山 洋平、第 1.5.2 項 飯 塚 義浩、第 1.5.3 項 井藤 智史

² CAPE (Convective Available Potential Energy):対流有 効位置エネルギー、SSI (Showalter's Stability Index):ショ ワルター安定指数

表 1.5.1 各実験の設定			
実験名又は実験概要	全球モデル	予測係数	
TEST-PoT	改良後 GSM(TEST)	従来の予測係数	
CNTL-PoT	改良前 GSM(CNTL)	従来の予測係数	
再作成した予測係数を用いた PoT	改良後 GSM(TEST)	再作成した予測係数	



図 1.5.1 TEST-PoT (緑線)、CNTL-PoT (青線) および再作成した予測係数による PoT (図中は再作成-PoT、赤線)の検 証結果。夏実験は 2013 年 7 月 1 日 ~ 9 月 30 日、冬実験は 2012 年 12 月 1 日 ~ 2013 年 2 月 28 日、ともに 12UTC 初期値、 FT=12 ~ 33。赤線の再作成した予測係数による PoT のみクロスバリデーション法 (CV 法)による検証結果である。(a), (b), (c) はそれぞれ夏実験の ETS, BI, BSS、(d), (e), (f) はそれぞれ冬実験の ETS, BI, BSS である。グラフの縦軸は各種スコ ア、横軸は (a), (b), (d), (e) は確率の閾値を、(c), (f) は予報時間を表す。エラーバーは 95%信頼区間を表す。

り、PoT は係数固定型のガイダンスであり、モデルの 予測特性の変化に追随して予測係数が最適化されない。 このため、GSM の予測特性が変化したことで生じた 説明変数の変化によって、予測式内の各項のバランス が崩れ、これが確率値の大小の変化、ひいてはガイダ ンスの予測精度の低下につながったと考えられる。ま た、予報前半と後半で TEST-PoT と CNTL-PoT の予 測精度の優劣が変化していた点も、GSM が改良によっ て予報後半ほどその予測精度が改良前より改善してい たことの現れと考えられる。この点も、GSM の予測特 性の変化がガイダンスの予測特性に影響したことを表

している。

このような GSM 発雷確率ガイダンスの予測精度の 悪化や特性の変化を軽減するために、改良された GSM の予報値を用いて予測係数の再作成を行った。



図 1.5.2 TEST と CNTL の GSM (06UTC 初期値の FT=0)から作成した、2013 年 8 月 1 か月間の 15JST の CAPE [10³J/kg] と SSI [K] の平均値とその両者の差分。(a) TEST の CAPE, (b) CNTL の CAPE, (c) CAPE の TEST-CNTL, (d) TEST の SSI, (e) CNTL の SSI, (f) SSI の TEST-CNTL。

(3) 予測係数の再作成に用いたデータ

(1) で述べた通り、GSM 発雷確率ガイダンスの予測 係数の作成には約2年間のデータを必要とする。しか し、GSM の改良のために作成された TEST のデータ は夏・冬実験を合わせても6か月程しかなく、これだ けでは係数の再作成には不十分であった³。そのため、 GSM 発雷確率ガイダンスの係数再作成を目的に TEST の実験期間を延長し、2012年12月から2014年1月ま での14か月の TEST のデータを用意した。これに、改 良前の GSM の2011年12月から2012年11月までの データを加えた合計約2年間の GSM の予測値を開発 用データとした。改良前の GSM のデータを混ぜるこ とは、数値予報ルーチンの予測時と異なる特性のデー タを用いることになるため、予測精度に影響があると 考えられる。しかし、開発用データの期間が十分でな いことと予測特性の異なる期間を混ぜて係数を作成す ることでは、前者の方が予測精度に対する影響が大き く、実際に本対応の過程で行った実験でも、約2年間 のデータで作成した予測係数の方が14か月のTEST のデータのみで作成した係数よりも予測精度が高いこ とを確認している。

(4) ガイダンスの仕様変更

予測係数の再作成に際して1点だけガイダンスの仕様を変更した。PoTは、予報時間や-10°C高度(気温が-10°Cとなる高度)および20km格子を地域毎にまとめた区域⁴によって用いる予測係数を層別化している。予報時間についてはFT=0~12,12~24,...,72~84の7通りに、-10°C高度については3km未満、3~5km、5km以上(午前または午後)の4通りに、区域については図1.5.3に示す1~9,a~zの記号を割り振った35の区域に分割し、これらを組み合わせて層別化に用いている。係数の再作成に際しては、(-10°C高度が3km未満または3~5kmの場合の、区域v,w,x,y,zの予測係数は同じ」とするように変更した。この区域v,w,x,y,zは、おおよそ九州南部の海

³ 事前調査として、GSM 発雷確率ガイダンスの予測係数の 作成に使用するデータ量(年数)と、その予測精度の関係を 調べている。調査は、改良前のGSMについて2年間の開発 用データと1年間の検証用データを用意し、開発用データ1 年間分で係数作成(用意した2年間を1年間ずつに分けた2 通り)と2年間分で係数作成の計3通りを試し、その予測精 度を数値予報ルーチンの結果と比較した。結果は、「係数の 作成に2年間分のデータを用いれば数値予報ルーチンと同等 の予測精度を有した係数を作成可能」だが、「1年間分の場 合には数値予報ルーチンより予測精度が劣る、または層別化 の区域によっては予測係数が求められない場合が生じる」と いうものであった。この結果を受けて、数値予報ルーチンと 同等の予測精度を有した係数の再作成のためには約2年間の データが必要という前提で再作成を進めた。

⁴ 区域の分割は、格子毎に作成した予測式から計算した発 雷確率の格子点値を階層型クラスター分析の1手法である ウォード法で分割して作成している(高田 2009)。つまり、統 計的に発雷特性が似通った格子の集まりが1つのクラスター (区域)に分割される。



図 1.5.3 発雷確率ガイダンスの予測式の作成区分。青線は 区域の境界を表す。35 区域(1~9, a~z)に分割されてい るが、本変更により赤丸で囲った v, w, x, y, z では、-10 °C 高度によっては同じ予測式を使用する場合がある。

上から奄美、沖縄地方の区域に対応する。これら以外 の場合(-10°C高度が5km以上のv,w,x,y,zや残 りの区域1~9,a~u)は、従来どおりに予測係数を層 別化して発雷特性の違いを予測に反映する。

この仕様変更は次の理由による。PoT はその予測特 性として、予報モデルが同程度の大気の安定度や降水 量の予測をすれば、予報時間が短くなるほど確率値が大 きくなるように予測係数が定まっている(高田 2009)。 これは数値予報の予報時間に対する不確実性を表現す るため、予報時間毎に予測係数を層別化することで実 現している特徴である。予測係数を再作成する過程で、 前述の区域 v, w, x, y, z については、この関係を表現 するように予測係数が適切に定まらなかったり、そも そも予測係数を決定することができない区域が発生し たりした。これは、開発用データの期間にこれらの区 域で -10 °C 高度が低い(秋から春にかけて寒気が十 分南下するような気象場)状況で発雷する事例が少な かったことが原因と考えている。

この問題を回避するため、これら5区域については 1つの大きな区域とみなして予測係数を作成し予測に 用いるよう仕様を変更した。この変更により、予測係 数が適切でない場合や係数を作成できないという問題 は回避できているが、区域毎の細かな発雷特性の違い を変更前のガイダンスほどは表現できなくなっている 可能性がある。 (5) 検証結果

(3) で述べた約2年間の開発用データを用いて、また (4) で述べた仕様の変更を施して作成した予測係数で TEST から計算した PoT の検証結果を示す。前述の通 り、TEST のデータは限られており、開発期間と独立 な期間で精度検証を行うことが困難である。そこでク ロスバリデーション法(CV法)による検証を実施し た。ここでは夏実験および冬実験期間について、次の 方法で作成した予測係数を用いた GSM 発雷確率ガイ ダンスの検証結果を示す。

- 開発用データからある 5 日間⁵ を除いて予測係数 を作成する。
- 2. 作成した予測係数を 1. で除いた 5 日間に適用して 予測値を作成する。
- この5日間を夏・冬実験期間について5日ずつ移 動しながら予測係数の作成、予測値の作成と検証 を繰り返す。

なお、数値予報ルーチンに適用した予測係数は、この 5日間を抜かずに作成した係数であり、ここで示す予 測精度とは厳密には一致しない。

図 1.5.1 に、TEST-PoT、CNTL-PoT および再作成 した予測係数を用いた TEST による PoT(赤色)の 検証結果を示す。再作成した予測係数による PoT のみ CV法による検証結果である。ここで示す、12UTC初 期値、FT=12~33 という検証設定は、係数作成には 用いていない期間の検証にするための設定である。図 1.5.1 によると、再作成した予測係数による PoT は、 TEST-PoT よりも ETS や日中の BSS は改善している ものの、CNTL-PoT と同等と言えるまでには至ってい ない。これは、開発用データの約半分が改良前の GSM であり、再作成した予測係数が改良後の GSM に完全 には適応していないことが原因と考えられる。このた め、今後、改良された GSM のデータの蓄積を待って 再度、予測係数の作り直しを行う必要があると考えて いる。冬実験については、再作成した予測係数を用い た CV 検証の予測精度は TEST-PoT とほぼ同様であ り、夏実験ほどは予測係数の再作成による大きな変化 は見られなかった。

⁵ 例えば、開発期間の約2年間の中から8月1日~5日の5 日間を除いて予測係数を作成し、この5日間に係数を適用し て予測値を作成する。次は8月6日~10日の5日間を除いて 係数、予測値を作成する。これを夏・冬実験の合計6か月分 について行い、作成した予測値を検証した。なお、5日間と することの妥当性を調査するため、同様の作業を1か月また は1日の場合について試している。1か月の場合には、例え ば2013年8月を除いて作成した予測係数には改良版 GSM の8月の予測値の情報が含まれていないため、8月など盛夏 期に対する予測精度を過小に評価することにつながると考え られる。1日の場合には気象場が前日、前々日と似ている場 合には逆に予測精度を良い方向に過大評価すると考えられ、 実際に1日の場合には従属資料による検証に近い結果が得ら れている。これらを勘案して5日毎に行った CV 法の検証結 果を用いている。

(6) まとめと利用上の留意点

GSM の改良に併せて GSM 発雷確率ガイダンスの予 測係数を再作成したものに変更した。また、区域の層 別化について、予測精度の観点から –10 °C 高度が 3 km 未満または 3 ~ 5 km の場合の九州南部の海上から 奄美、沖縄地方の区域(区域 v, w, x, y, z)では同じ予 測係数を使用するよう変更した。

これらの変更によって、従来の予測係数を用い続け た場合に比べて、予測精度の低下は軽減できているも のの、GSM 改良前と同等の予測精度とはなっていな い。また、同じ係数を用いるように仕様を変更した区 域については、区域毎の細かな発雷特性を表現できて いない可能性があるため留意が必要である。

今後は、改良された GSM のデータの蓄積を待って 予測係数の再作成を再び行うことにより、予測精度の 改善を図る必要があると考えている。

1.5.2 降水ガイダンスへの影響

本項では GSM の更新による、GSM 降水ガイダンス への影響について述べる。なお、降水ガイダンスの作 成手法については小泉 (2009); 小泉・蟻坂 (2010); 蟻 坂 (2013) を参照していただきたい。

(1) スコアの比較

GSM 更新前後の降水ガイダンスの予測精度の変化を 調べるため、夏期・冬期のそれぞれに対し検証を行っ た。検証期間は、夏期(以下、夏実験)が2013年6月 20日~2013年10月11日、冬期(以下、冬実験)が 2012年11月20日~2013年3月11日、対象時刻は 00UTC 初期値の FT=6~24 である。要素は 3 時間平 均降水量(以下、MRR3)と3時間最大降水量(以下、 RMAX33)、さらに GSM の 3 時間積算雨量(以下、 FRR3)についてもガイダンスとの比較のため検証を 行った。検証の対象となる参照値は解析雨量を用いた。 検証格子は GSM 降水ガイダンス格子と同様の 20 km 格子で、解析雨量についてはその格子内の平均値と最 大値を利用している。実験開始期間は冬実験の検証開 始と同じく 2012 年 11 月 20 日であり、事例数確保の ため事前学習期間は設けなかった。これは、降水ガイ ダンスは学習対象となる現象の発生頻度が風や気温な どに比べ少なく、係数が最適化されるまでに長い期間 を要するためである。以下、更新前の GSM による結 果を CNTL、更新後の GSM による結果を TEST と表 記する。

図 1.5.4、図 1.5.5、図 1.5.6 にそれぞれ MRR3, RMAX33, FRR3 のバイアススコア (BI) とエクイタ ブルスレットスコア (ETS)の検証結果を示す。各スコ アについての説明は付録 C.3 を参照していただきたい。

まず MRR3 について述べる。冬実験の BI は CNTL, TEST ともに全般的に過大傾向であり、これは実況に 比べてガイダンスの予測頻度が大きいことを示してい る。TEST では 30 mm/3h 以上でその傾向が顕著であ るが、事例数が少ないためばらつきが大きい。冬実験 のETS は全般的に差は小さい。夏実験のBI は低閾値 では CNTL は 1 前後であるが TEST は過小傾向であ り、高閾値では CNTL が過小傾向で TEST は適切か 過大傾向で、いずれも有意な差がある。夏実験のETS は低閾値で CNTL>TEST、高閾値では CNTL<TEST であり、高閾値では有意な差が見られる。TEST では 高閾値ほどスコアが上昇しているが、通常、高閾値の 降水現象ほど捕捉は難しいため、特定の事例の予測結 果に依存している可能性が考えられる。

次に RMAX33 について述べる。冬実験の BI は 10~ 30 mm/3h 前後の閾値でそれぞれ過大傾向ではあるが TEST の方が 1 に近い。一方 40 mm/3h 以上では、ば らつきが大きいものの TEST が過大傾向になっており、 それぞれ有意な差がある。冬実験の ETS は全般的に差 は小さい。夏実験の BI は全般的に過小傾向で、低閾値 では TEST がより過小で、80 mm/3h 以上の閾値では CNTL がより過小であり、いずれも有意な差がある。夏 実験の ETS は MRR3 同様、低閾値で CNTL>TEST、 高閾値で CNTL<TEST となっている。これは、BI の 傾向も踏まえると、低閾値では見逃し率が増え、高閾 値では捕捉率が増えていることを示している。

FRR3 の BI を見ると、冬・夏実験の高閾値で は CNTL<TEST という傾向が顕著であり、MRR3, RMAX33 の高閾値での BI の傾向は FRR3 によると ころが大きいと推測できる。しかし、夏実験の MRR3, RMAX33 の低閾値における TEST のバイアスの過小 傾向は FRR3 からでは説明できない。

他の初期値についても MRR3, RMAX33 ともに、低 閾値の BI と ETS、高閾値の ETS では概ね同様の傾向 が見られた(図略)。

(2) ルーチンとの比較

(1)では対照実験である CNTL に対して検証を行ったが、ここではガイダンスの現業利用を考慮し、実際の数値予報ルーチンによる降水ガイダンス(以下、RTN)に対する検証を行う⁶。要素は(1)と同様 MRR3, RMAX33, FRR3であり、検証の期間等は(1)と同様である。図1.5.7、図1.5.8、図1.5.9 に MRR3, RMAX33, FRR3の検証結果を示す。

まずは MRR3 について述べる。冬実験については TEST の BI, ETS の傾向はほぼ RTN と同様であるが、 ETS の 30 mm/3h 前後ではやや TEST が上回ってい る。夏実験について、まず BI を見ると、CNTL の低 閾値で CNTL>TEST という関係があったが、RTN に ついては 10 mm/3h の閾値で RTN>TEST という有 意な差があるほかは概ね TEST と同様の傾向である。 RTN の高閾値では CNTL と同様の傾向で、TEST は

⁶ CNTL は TEST の直前のバージョンの GSM による結果で あり、それに対し RTN は逐次アップデートされている GSM の日々の結果である。



図 1.5.4 MRR3 の BI と ETS のスコア図。左図が冬実験 (2012/11/20~2013/03/11)、右図が夏実験(2013/06/20~ 2013/10/11)のもの。横軸が降水量、左縦軸が BI、右縦軸 が ETS を示す。エラーバーは 95%信頼区間を示す。



図 1.5.5 RMAX33 の BI と ETS のスコア図。期間などは図 1.5.4 と同じ。





RMAX33 については、冬実験、夏実験ともに RTN の BI の傾向は MRR3 と同様の傾向で、全般的に TEST との差は小さい。また、ETS については概ね TEST と



図 1.5.7 RTN に対する MRR3 の BI と ETS のスコア図。期 間などは図 1.5.4 と同じ。



図 1.5.8 RTN に対する RMAX33 の BI と ETS のスコア図。 期間などは図 1.5.4 と同じ。



図 1.5.9 RIN に対する FRR3 の BIと ETS のスコア図。期間 などは図 1.5.4 と同じ。

同程度かまたは TEST が上回っており、TEST のスコ アの向上が認められる。最後に FRR3 を見ると、TEST に対する RTN の大まかな傾向は MRR3, RMAX33 と 同様であり、やはりガイダンスの結果は FRR3、つま りモデルの表現の影響が大きいことが分かる。

(3) まとめと利用上の留意点

GSM 更新により、更新前の数値予報ルーチン結果 と比べて夏期の高閾値で予測頻度が過大になる傾向が 見られるほかは、概ね予測特性は変わらないことが分かった。また、ルーチンに比べ全体的にエクイタブルスレットスコアが向上したが、これはGSMの予測特性の変化による影響と考えられる。特に、3時間平均降水量、3時間最大降水量では、夏期の高閾値において大幅なスコアの向上が見られたが、これは台風などの特定の顕著現象の予測結果に依存している可能性が考えれられるため、異なる検証期間で同様の結果が得られるとは限らない。

以上のことを念頭に、現業の予報作業においてはこ れまで通り利用していただきたい。

1.5.3 GSM 視程分布予想への影響

GSM 視程分布予想(以下、視程G)は、診断的な 手法を用いて視程を計算しており、予測式は固定であ るため、モデルの予測特性の変化の影響を受けやすい。 本項ではGSMの改良により、視程Gにどのような影 響があったのかを述べる。なお視程Gの作成手法の詳 細については、井藤(2013)を参照していただきたい。

(1) 統計検証

海上での視程の予測精度を見るために、船舶観測で 降水が観測されなかったときの視程観測値を用いて、 視程 G の検証を行った。検証期間は 2013 年の 1 年間 で、ここでは初期時刻が 00UTC について検証した結 果を示す⁷。検証領域は GSM のアジア領域予報に含 まれる海上($0^{\circ} \sim 60^{\circ}$ N, 100° E ~ 180°)で、予報時間は FT=3~24 としている。検証スコアは、エクイタブル スレットスコア (ETS) とバイアススコア (BI)で、予測 または観測の視程がある閾値未満となった場合に「予 測あり」または「実況あり」としてスコアを算出する。

図 1.5.10 に、視程が 4000, 2000, 1000, 500 m 未満



図 1.5.10 視程 G の閾値別のエクイタブルスレットスコア (ETS、左図)とバイアススコア(BI、右図)。青が CNTL、 赤が TEST のスコアである。検証期間は 2013 年の 1 年間 で、船舶観測で降水が観測されなかったときの視程観測値 を用いた。右図中の白丸は観測数(右軸)、エラーバーは 95%信頼区間を表す。

となる場合を閾値とした検証結果を示す。青が改良前 のGSMから計算した視程G(以下、CNTL)のスコ ア、赤が改良後のGSMから計算した視程G(以下、 TEST)のスコアである。ETSを見ると、TESTは、 全ての閾値でCNTLより精度が高いことが分かる。し かし、BIを見ると、TESTは1000m以上の閾値では 1より大きな値となっているため、予測頻度が過大と なっていることに注意が必要である。

図 1.5.11 は海域別の、視程が 1000 m 未満となる場合の ETS(左)とBI(右)である。それぞれの海域の 色分けは図 1.5.12 に対応している。ETS を見ると、概 ねどの海域も TEST の方が精度が高くなっていること が分かる。BI も全ての海域で予測頻度が大きくなって いる。特に日本周辺の海域(下)では、CNTL は予測 頻度過小であったが、TEST では予測頻度過大となっ ており、予測特性が変化していることに注意が必要で ある。

これらの特性の変化は、GSM の境界層スキームの 改良により、下層の雲水量が増加したためである(第 1.3.3 項)⁸。

(2) 事例検証

2013 年 5 月 31 日に、オホーツク海から日本の東海 上にかけての広い範囲で濃霧が観測された事例を紹介 する。図 1.5.13 に、2013 年 5 月 30 日 00UTC 初期値 の FT=30 における、CNTL の予測(左上)、TEST の 予測(右上) 2013 年 5 月 31 日 06UTC の、船舶等の 視程観測値(左下)、衛星可視画像(右下)を示す。オ ホーツク海から日本の東海上の TEST と CNTL の予測 は 2000 m 以下の悪視程を予測している点で大きくは 変わらず、観測とも概ね一致している。しかし、黄海や 日本海では、CNTL で予測されていない領域に TEST は悪視程を予測している⁹。黄海に予測されている悪 視程域(図青丸)は、船舶観測から概ね適切であると 思われるが、日本海の悪視程域(図赤丸)は、衛星観 測から過大であることが分かる。

この事例のように、CNTLで予測されていない領域に TEST が悪視程を予測する例はほかにもあり、TEST は CNTL に比べて悪視程域を広めに予測する傾向が ある。

(3) まとめと利用上の留意点

GSM の改良による GSM 視程分布予想への影響を調 査した。その結果、GSM の改良により、GSM 視程分 布予想の予測精度は高くなっていることが分かった。し かし、1000 m 以上の閾値では、予測頻度が過大傾向と なっており、悪視程域を広めに予測する可能性がある ことに注意が必要である。

⁷ 他の初期時刻に関しても検証を行ったが、結果は大きくは 変わらない。

⁸ 視程 G では、下層の雲水量を説明変数としており、雲水量 が多くなるほど視程を悪く予測する。

⁹ ともに、TEST で雲水量が増加したためである。



図 1.5.11 海域別の、視程が 1000 m 未満となる場合の ETS (左)と BI (右)。検証期間等は図 1.5.10 と同じ。それぞれの海 域の色分けは図 1.5.12 に対応している。





図 1.5.13 2013 年 5 月 30 日 00UTC 初期値の、FT=30 の CNTL の予測(左上)、TEST の予測(右上) 2013 年 5 月 31 日 06UTC の、船舶等の視程観測値(左下)、衛星可視画像(右下)。

参考文献

- 蟻坂隼史, 2013:24 時間最大降水量ガイダンスの改良.
 平成25年度数値予報研修テキスト,気象庁予報部, 42-48.
- 井藤智史, 2013: GSM 視程分布予想の開発. 平成 25 年 度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 58-62.
- 小泉友延,2009:最大降水量ガイダンス.平成21年度 数値予報研修テキスト,気象庁予報部,21-26.
- 小泉友延, 蟻坂隼史, 2010: 降水ガイダンスの改良. 平成 22 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 42-48.
- 高田伸一,2007: 発雷確率ガイダンス. 平成 19 年度数 値予報研修テキスト,気象庁予報部,90-93.
- 高田伸一, 2009: 発雷確率ガイダンス. 平成 21 年度数 値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 39-43.
- 松下泰広, 2012: ガイダンス作成に用いる予測手法. 平成 24 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 44-48.

- 1.6 全球解析における地上 GNSS 天頂大気遅延量の同化利用¹
- 1.6.1 はじめに

地上設置型 GNSS² (Global Navigation Satellite System) 受信機で得られた観測データ(以下、地上 GNSS データ)は、2009年10月からメソ解析で同化利用が 開始されている。メソ解析では、国土地理院が運用す る GNSS 連続観測システム (GEONET: GNSS Earth Observation NETwork system)の地上 GNSS データ を用い、全国約1,200 地点で推定される可降水量を同 化利用することによる降水予測精度の改善が報告され ており(石川 2010)、全球解析での利用も期待されて きた。

全球解析で地上 GNSS データを利用するためには、 国内だけでなく全球的にデータがあることが望ましい。 近年では、国際 GNSS 業務 (IGS: International GNSS Service) が展開している GNSS 観測点を含め、欧州や 米国を中心に各国の地上 GNSS データの配信が始まっ ている。その結果、2013 年 8 月時点で図 1.6.1 に示す 観測地点 (3,552 地点)のデータを全球解析で利用する ことが可能になった。

本節では、2014年3月からGSMの鉛直層数増強と 同時に同化利用を開始した地上GNSSデータについて、 導入に向けて行った全球サイクル実験の結果を述べる。 なお、地上GNSSデータの同化手法に関する詳細につ いては、石川(2008)を参照していただきたい。また、 地上GNSSデータの詳細については辻(1998)、地上 GNSSデータから推定される可降水量については大谷・ 内藤(1998)を参照していただきたい。

1.6.2 天頂大気遅延量

地上 GNSS データの同化手法としては、観測された 天頂大気遅延量を直接同化する手法と、天頂大気遅延 量から地上気圧等を用いて推定した可降水量を同化す る手法(メソ解析で採用)の2つが考えられ、全球解 析では天頂大気遅延量を直接同化する手法を採用した。 ここでは、天頂大気遅延量の観測原理の概要を紹介し、 可降水量に対する天頂大気遅延量の直接同化の利点に ついて述べる。

地上 GNSS の受信機では、衛星から発射される電波 を受信しているが、電波の発射時刻と受信時刻との差 には衛星と受信機間の距離による遅延に加え、大気状 態による伝播遅延も含まれている³。この大気状態に

1 吉本 浩一 (気候情報課) 石川 宜広



図 1.6.1 2013 年 8 月に取得した地上 GNSS データのカバ レッジマップ(3,552 地点)。図中の色は、観測地点におけ る標高である。

よって伝播遅延した距離が天頂大気遅延量である。天頂 大気遅延量は、地上気圧から推定することができる天 頂静水圧遅延量 (ZHD: Zenith Hydrostatic Delay) と、 水蒸気量の情報を持つ天頂湿潤遅延量 (ZWD: Zenith Wet Delay) を足し合わせた量である。天頂大気遅延量 全体は 2,400 mm 程度であるが、このうち湿潤遅延量 はその 2 割に及ぶこともある (大谷・内藤 1998)。

天頂大気遅延量から可降水量を抽出する手順は、以 下のようになる。

- 1. 観測地点の地上気圧から ZHD を推定
- 2. 天頂大気遅延量と ZHD の差から ZWD を算出
- 3. ZWD と可降水量は比例関係にあるため、あらか じめ統計により求めた比例係数により可降水量を 推定

可降水量は、大気状態を表す物理量であるため天頂 大気遅延量に比べて直感的に分かりやすく、また同化 利用が簡単になる。その反面、可降水量の同化では、 可降水量を推定するためにある仮定(ここでは比例係 数)をおいて計算を行っているため、誤差が混入して しまう。さらに、海外においては、地上 GNSS 受信機 の近傍に地上気圧観測データが少ないだけでなく、低 品質観測データの混入により推定した可降水量の精度 が悪化する事例もあり、常に高い品質を保った可降水 量を推定することが困難となる。一方、天頂大気遅延 量は、その値から地上気圧や水蒸気量といった大気状 態の把握が困難であり、また可降水量の同化に比べて 高度な同化手法(詳細については、石川(2008)を参照 のこと)が必要になる。しかし、天頂大気遅延量は、水 蒸気量の情報を持つ ZWD だけでなく、地上気圧に関 する情報を持つ ZHD も含まれるため、水蒸気量と地 上気圧に関する情報を同時に初期値に反映させること ができ、初期値のさらなる精度向上が見込まれる。以 上のことから、全球解析では天頂大気遅延量の直接同 化を採用することとした。

² 全球衛星測位システムの総称。これまでは、米国が運用している GPS (Global Positioning System) と呼称されるこ とが多かったが、近年では様々な衛星測位システムがあるこ とから、ここでは総称して GNSS とする。

³ 実際の観測データには、これ以外にも受信機や衛星の時計 誤差、電離層による遅延量等の誤差が含まれている。詳細に ついては、辻 (1998)を参照していただきたい。

1.6.3 全球サイクル実験

全球解析における地上 GNSS 天頂大気遅延量の同化 による解析・予報精度の評価を行うため、2013年1月 (冬実験)および2013年8月(夏実験)のそれぞれ1 か月程度の解析・予報サイクル実験を行った。冬実験 におけるデータ同化サイクル実行期間は、2012年12 月10日~2013年2月11日、予報実行期間は2012年 12月20日~2013年1月31日の各12UTCである。ま た、夏実験におけるデータ同化サイクル実行期間は、2013 年7月20日~8月31日の各12UTCである。以下で は、全球解析に地上GNSS 天頂大気遅延量を同化した 実験をTEST、この変更を行っていない実験をCNTL とする。なお、本実験では、2014年3月18日00UTC から現業運用を開始したGSM を利用している。

(1) 平均解析場

天頂大気遅延量の同化による解析場のバイアスの傾向を確認するため、図1.6.2 に可降水量の平均解析場におけるTESTとCNTLの差(TEST-CNTL)を示す。 冬実験の結果では南アフリカ周辺、夏実験の結果では 欧州、日本および北米で可降水量に顕著な差が見られ る。これらの領域は、図1.6.1のカバレッジマップ上の 観測地点が密な領域と対応している。一方、地上気圧 については、解析場のバイアス傾向に変化は見られな かった(図略)。各初期値においては天頂大気遅延量 の同化により解析場へのインパクトは確認できるもの の、平均解析場においてはSYNOPや船舶等のデータ を同化利用した効果が支配的であることが原因の1つ として考えられる。

以上から、地上 GNSS 天頂大気遅延量を同化することにより、解析場のバイアス傾向としては水蒸気の多い季節の観測地点が密な領域において、インパクトが大きい結果となった。

(2) 対初期値検証

地上 GNSS データは観測地点に粗密があり、平均解 析場においてもインパクトがある領域が限られてしま う。そこで、全体的な予測精度に与える影響について 確認するため、全球サイクル実験における海面更正気 圧、850 hPa 面気温および 500 hPa 面高度における平 方根平均二乗誤差 (RMSE) の改善率について、冬実験 の結果を図 1.6.3 に、夏実験の結果を図 1.6.4 に示す。 冬実験では、南半球の海面更正気圧および 500 hPa 面 高度でわずかに改善する傾向が見られるものの、TEST と CNTL の RMSE の差は統計的に有意でないことか ら、中立の結果となっている。夏実験においても、850 hPa 面気温の FT=48 で北半球が有意に改善し、北半 球の海面更正気圧が改善傾向にあるものの有意な差で ないことから、全体的に中立となっている。これらの ことから、地上 GNSS 天頂大気遅延量を同化すること により、全体的な予測精度は中立である。



図 1.6.2 TEST と CNTL における可降水量の平均解析場の 差 (TEST-CNTL)。

(3) 対高層観測検証

GSM には、夏期の対流圏中層に乾燥バイアスがある ことが知られている (宮本ほか 2009)。地上 GNSS 天 頂大気遅延量を同化することにより、特に観測地点が 密な領域で解析場の水蒸気量が増加することから、高 層観測データを用いて比湿の検証を行った。夏実験に おける図 1.6.5 は、850 hPa 面比湿の結果について、国 内ラジオゾンデに対する日々の RMSE および平均誤 差 (ME、バイアス)をそれぞれ図 1.6.5 (a), (b) に示 す。解析値(図 1.6.5 の 1 段目)では、地上 GNSS 天 頂大気遅延量を同化することにより、ほぼ期間を通し てバイアスが軽減し、RMSE も改善していることが分 かる。この傾向は、国内だけでなく観測地点の多い欧 州周辺および米国付近においても同様の結果であった (図略)。したがって、地上 GNSS 天頂大気遅延量を 同化することにより、TESTの解析場は CNTL に比べ て高層観測との整合性が高くなっている。予報の結果 (図1.6.5の3段目から6段目)を確認すると、FT=24 までは TEST の方が RMSE および ME ともに改善し、 解析値の優位性が保たれているものの、FT=36以降は TEST と CNTL で大きな差が見られない。以上の結果 から、初期値の水蒸気場については、地上 GNSS 天頂 大気遅延量を同化することにより高層観測との整合性 が改善し、その効果は少なくとも FT=24 まで持続す ることが分かる。



図 1.6.3 2013 年 1 月(冬実験)における CNTL に対する TEST の RMSE 改善率 [%]。縦軸が RMSE 改善率 [%]、横軸は予 報時間 (FT=0~264)。線の色は領域毎の検証結果を表し、緑線が全球、黄線が北半球(20°N~90°N)、赤線が熱帯(20°S ~20°N)、青線が南半球(20°S~90°S)の結果であり、信頼度 95%の区間を併せて表示している。



図 1.6.4 2013 年 8 月(夏実験)における CNTL に対する TEST の RMSE 改善率 [%]。図の見方は図 1.6.3 と同じ。図中の 丸印(T850 の北半球における FT=48)は、有意水準 0.025 で片側検定を行った結果、RMSE の差が統計的に有意であった ことを示している。



図 1.6.5 夏実験における国内ラジオゾンデに対する TEST および CNTL の時系列図。(a) は 850 hPa 面比湿の RMSE、(b) は 850 hPa 面比湿の ME、(c) は 500 hPa 面高度の RMSE であり、上段から順に、解析値、第一推定値、FT=12、FT=24、 FT=36、FT=48 である。また、赤線が TEST、細赤線が期間平均値、青線が CNTL、細青線が期間平均値である。RMSE においては、赤色のハッチが TEST で改善、緑色のハッチが TEST で悪化、ME においては、赤色のハッチが TEST の方 がバイアスが小さい、緑色のハッチが TEST の方がバイアスが大きいことを表す。

また、図 1.6.5(c) に示す国内ラジオゾンデに対する 500 hPa 面高度の日々の RMSE を確認すると、500 hPa 面高度についても TEST では改善が見られた。この改 善は、欧州付近や米国付近においても同様の結果であっ た(図略)。高度の計算においては、仮温度を用いて算 出するため、水蒸気の表現が改善した結果が現れてい ることが考えられる。

(4) 日本域における降水検証

日本域の降水に与える影響について確認するため、 夏実験における前 12 時間降水量について、アメダス に対する降水閾値毎のバイアススコア (BI) およびエク イタブルスレットスコア (ETS) の結果を図 1.6.6 に示 す。BI では、TEST の方が FT=12 で顕著に大きく、 予報時間が進むにつれてこの差が小さくなることが分 かる。ETS では、FT=12 において 5 mm/12h 未満の 降水では悪化するものの、5 mm/12h から 20 mm/12h では改善している。FT=24 以降は、BI と同様に ETS においても TEST と CNTL で明瞭な差は見られない。 以上のことから、地上 GNSS 天頂大気遅延量の同化に より、特に予報初期において、5 mm/12h 未満の降水 では空振りが増加、これよりも強い降水では若干精度 が改善するものの、FT=24 以降ではほぼ中立になって いる。

FT=12 において弱い降水が増加する原因の1つと して考えられることは、地上 GNSS 天頂大気遅延量を 同化することにより、初期値の水蒸気が増加した結果、 特に予報初期で降水の領域が CNTL に比べて広がった ことが挙げられる。日々の降水分布を確認すると、特 に不安定性降水において、TEST は CNTL に比べて弱 い降水域が広がっており(図略) この結果空振りが増 えたことが考えられる。また、FT=24以降で降水スコ アがほぼ中立になる原因の1つとして考えられること は、初期値において増加した水蒸気量を数値予報モデ ルが FT=24 までに降水として落下させている可能性 が考えられる。上述した 850 hPa 面比湿の高層観測と の比較において、比湿はFT=24まで改善しているが、 これ以降は改善が持続していない。さらに、図 1.6.7 に 示す予報初期24時間の平均降水量の差を見ると、日本 周辺では TEST の降水量が増加しており、この増加し た降水量は、数値予報モデルが地上 GNSS 天頂大気遅 延量を同化することによって増加した水蒸気量を降水 として落下させた可能性が考えられる。これについて は、事例数も少ないため、今後もさらなる調査を行う 必要がある。

(5) 事例検証

図 1.6.8 に 2013 年 8 月 23 日 12UTC 初期値における FT=6 の例を示す。この日は、停滞前線に流れ込む暖 湿気により、西日本を中心に大雨となった。実況では、 島根県付近に非常に強い降水があり(赤丸印) TEST の予報では CNTL に比べて強い降水を予報できてい



 図 1.6.6 降水閾値毎の降水検証スコア(対アメダス)。左は バイアススコア、右はエクイタブルスレットスコアであり、 上段から順に FT=12, FT=24, FT=36 である。また、赤 線が TEST、青線が CNTL である。



図 1.6.7 予報初期 24 時間平均降水量の差 (TEST-CNTL)。

ることが分かる。この予報初期値における可降水量の TEST と CNTL の差を確認(図1.6.9)すると、TEST では地上 GNSS 天頂大気遅延量を同化することにより、 山陰から対馬海峡付近で可降水量が増加している。こ の結果、TEST では島根県付近の降水予報が改善され たと思われる。

一方、紀伊半島付近の弱い降水(青丸印)に着目する と、TEST は CNTL に比べて弱い降水の領域が広がっ ており、上述の降水スコアはこのような影響も受けて いると思われる。



図 1.6.8 2013 年 8 月 23 日 12UTC 初期値の FT=6 の結果。(a) は TEST の予報結果(海面更正気圧、地上風、3 時間積算降 水量)、(b) は CNTL の予報結果(海面更正気圧、地上風、3 時間積算降水量)、(c) は予報対象時刻における解析雨量(3 時 間積算)である。

1.6.4 まとめと今後の課題

本節では、GSM の鉛直層数増強に併せてルーチンで の同化利用を開始した地上 GNSS 天頂大気遅延量につ いて、同化利用の概要とその効果を述べた。サイクル 実験の結果では、海面更正気圧、850 hPa 面気温およ び 500 hPa 面高度の初期値検証は中立となったが、以 前のルーチンで確認されていた初期値の乾燥バイアス が改善し、FT=24 までは 850 hPa 面比湿が改善する ことが分かった。降水スコアでは予報初期の弱い降水 において空振りが増加するものの、5 mm/12h 以上の 降水では改善する傾向が見られた。予報結果を利用す る際には、予報初期の弱い降水の広がりに注意してい ただきたい。

今後の課題として、まず挙げられることは、天頂大 気遅延量の直接同化をメソ解析においても採用するこ とである。第1.6.2項で述べた通り、天頂大気遅延量を 直接同化することにより、水蒸気量以外の情報を同化 することが可能になるだけでなく、可降水量への変換 誤差が混入することがないため、初期値のさらなる精 度向上が見込まれる。

今回のサイクル実験の結果では、地上 GNSS 天頂大 気遅延量を同化することにより、初期値の水蒸気場は 改善するものの、この効果は予報が進むと徐々に薄れ ていく傾向が見られた。地上 GNSS データは、観測地 点には粗密があるものの、時間分解能が高く、全天候 型のセンサーである。この利点を活かし、データ同化 の結果だけでなく地上 GNSS データを用いた予報モデ ルの検証を通じ、モデル開発者との連携を進めていく ことによるさらなる効果的な利用方法を検討していく 必要がある。

地上 GNSS データ数は、今後さらに増加していく可 能性がある。この増加は、陸上の観測点だけでなく、船 舶やブイに搭載された GNSS 受信機のデータも含まれ ている。船舶やブイといった海洋上のデータの利用に ついては、現在研究段階であり、観測データの精度も



図 1.6.9 2013 年 8 月 23 日 12UTC 初期値における可降水 量の差 (TEST-CNTL)。

含めて今後さらなる精度検証が必要となる。さらに、 現在利用している地上GNSSデータは受信機の真上と なる天頂方向のデータであるが、将来的には衛星方向 の大気遅延量も利用できる可能性がある。今後もこれ らの動向に注意しつつ、開発を行っていく予定である。

参考文献

- 石川宜広,2008: 地上設置型 GPS 大気遅延量の利用. 平成 20 年度数値予報研修テキスト,気象庁予報部, 53-57.
- 石川宜広, 2010: 地上 GPS データのメソ解析での利用. 数値予報課報告・別冊第 56 号, 気象庁予報部, 54-60.
- 大谷竜,内藤勲夫,1998: GPS 可降水量の物理と評価. 気象研究ノート,192,15-33.

辻宏道, 1998: GPSの原理. 気象研究ノート, 192, 1-13.

宮本健吾,中川雅之,中村貴,北川裕人,小森拓也,2009: 対流.数値予報課報告・別冊第55号,気象庁予報部, 68-82.