4.1 モデルの変更点1

4.1.1 はじめに

防災気象情報の発表支援を目的とするメソ数値 予報は、2004年9月に数値予報モデルをそれまで の静力学モデルから非静力学モデルへ変更し(藤 田 2004)、2006年3月の計算機システムの更新時 に、水平解像度を5kmに高解像度化、予報回数を 1日8回に高頻度化するなど(石田 2005)、一層の 精度向上と支援強化に向けた開発が続けられてき ている。防災気象情報発表の支援情報をさらに充 実させるため、2007年5月より1日4回の予報(初期 時刻03,09,15,21UTC)について、予報時間を15時 間から33時間に延長することを計画している。予 報時間が33時間に延長されることで、任意の時刻 でMSMによる24時間降水量を利用することがで きる²。また、TAF-Lガイダンスを計算する元にな るGPVにMSMを用いることができる(第1.2.2項 参照)。あわせて、力学・物理過程の改良と、解析 システムの変更により、一層の精度向上を図る。

本節では、2006年3月に現業化されたメソ数値 予報モデル(以下、現MSM)と、2007年度中に 現業化される予定のメソ数値予報モデル(以下、 新MSM)について、仕様の違いを説明する。非 静力学メソ数値予報モデルについては、Saito et al.(2006)や藤田(2004)に、現MSMについては石田 (2005)に詳しく述べられているので、適宜参照し ていただきたい。また、統計検証結果については 第4.2節を、物理過程と降水予測の改良については 第4.3節と第4.4節を、GPV利用上の注意点につい ては第4.5節をそれぞれ参照していただきたい。

4.1.2 新MSMと現MSMの仕様の違い

(1) 格子間隔、格子数、投影法、座標系

新MSMでは、格子間隔、格子数、投影法と水 平方向の座標系については、現MSMから変更し ない。鉛直方向の座標系については、(4)で述べる 地形に沿うハイブリッド鉛直座標を採用する。

(2) 初期值、側面境界值

初期値については、現MSMと同じく静力学モ デルに基づくメソ4次元変分法による解析値を利

1 荒波 恒平、原 旅人

用する。現MSMでは、メソ解析における4次元変 分法の反復計算の後に、水平解像度10kmの静力 学MSMによる6時間予報を実行して作成した解 析値を初期値としている (図4.1.1)。 新MSMでは、 静力学MSMによる6時間予報のうち、後半3時間 を水平解像度5kmの非静力学MSMによって実行 した状態を初期値とすることにする(図4.1.2)³。 現MSMでは、水平解像度5kmメッシュ化に伴い、 地上気温の予報特性が改善し、予報値のバイアス が小さくなったために、初期値のバイアスが際立 つようになったことが指摘されている(瀬川 2005)。これは、メソ解析の中で利用されている 静力学MSMと、予報モデルである非静力学MSM の精度の差が大きくなっていることを示している。 非静力学MSMで予報する時間を3時間前倒しす ることで、予報時間FT=-3からFT=0の間にこの差 を吸収し、FT=0の時点での大気状態が非静力学







図 4.1.2 変更後のメソ解析とメソ予報の処理手順。 00UTC 初期値の例。

² GPVの配信スケジュールは、初期時刻から約2時間10分 後であるため、05UTCの時点では、06UTC~06UTCの24 時間降水量を求める際に、03UTC初期値のMSMの結果は 利用できないが、21UTC初期値のFT=09-33を利用するこ とで、24時間降水量を求めることができる。

³ データ同化サイクルに変更はなく、解析値はこれまでと同 じである。なお、実際の運用ではT=-3からT=15(33)まで続 けて非静力学MSMで計算する。



図 4.1.3 更新前の MSM と境界値を提供するモデルの関係。黒丸が初期時刻、横矢印は予報時間、縦矢印は側面 境界値の提供関係を示す。また、"RSM00"は"00UTCを初 期値とする RSM"をあらわす。

MSMにとって、よりバランスのとれた場になる と考えられる⁴。

現MSMの側面境界値には1日2回実行される RSMの予報値を用いているが(図4.1.3)、新MSM では1日4回実行される高解像度GSMの予報値を 用いる計画である(図4.1.4)。1日2回のRSMを境 界値に用いる実験では、09,21UTCを初期値とす る予報の予報時間後半で、境界値が「古い」影響 があることがわかっている(第4.2.4項参照)。1日 4回の新しいGSMの予報値を側面境界値に利用す る⁵ことで、より新しい情報を予報に反映させるこ とが可能になり、予報時間後半での精度の向上が 期待される。

(3) モデル地形、海陸分布、地表面パラメータ

モデル地形、海陸分布の作成手法に変更はない。 ただし側面境界値を提供するモデルがRSMから GSMに変更されるため、領域の境界付近で地形や 海陸分布がわずかに異なる場合がある⁶。地表面パ ラメータについては、現MSMでは積雪面が全て 雪で覆われていることを仮定して、熱容量などの パラメータを決定していたが、新MSMでは積雪 域でも森林や人工構造物など雪で覆われていない 部分もあることを考慮して決定する。これにより、 冬の夜間に積雪面上で気温が下がりすぎる点が改 良される。



図 4.1.4 更新後の MSM と境界値を提供するモデルの関係。図 4.1.3 と同様。

(4) 力学過程

カ学過程では、前述のように鉛直座標として地 形に沿うハイブリッド鉛直座標を採用する。現 MSMでは地形に沿った座標系を用いており、対 流圏中上層にまで地形の凹凸による水平面の変形 が存在する。しかし、現実の大気の大規模な運動 は中上層では地形の影響をあまり受けず概ね水平 面に沿っていると考えられるため、中上層でも水 平面の変形がある座標系では計算誤差が大きくな る。そこで、下層では地形に沿うが中上層では水 平面になるハイブリッド鉛直座標を用いることで 計算誤差の縮減を図る7。図4.1.5は変更前後での 鉛直層の違いを示したもので、新MSMでは高度 11000mより上層で地形の影響をほとんど受けな いことがわかる。

斉藤(2003)の移流のスプリットでは、リープフ ロッグの後半のみで移流と重力波をスプリットし ているが、計算安定性を高めるため、これに加え



図4.1.5 現MSMの鉛直座標(左半面)と新MSMの鉛直座 標(右半面)。地形として3000mの山岳を想定した。フル レベルの高さを結んだもので、太線は5層おきに引いて いる。縦軸の単位はm。

⁴ 水平解像度 5kmの非静力学MSMで計算する時間が 3 時 間増えるので、計算に要する時間が増える。

⁵境界値の更新直後の 03, 09, 15, 21UTCを初期値として 33時間予報を行う。

⁶ モデルの計算領域の境界付近において、地形や海陸分 布について、側面境界値を提供するモデルのそれらと按分 をおこなっている。

⁷ 高度16000m付近で水平に水蒸気を移流させる理想実験 では、z*座標系では山を越えたところで形が大きく変形して しまうが、ハイブリッド座標では形が維持されたまま移流す ることを確認している(石田、私信)。

てリープフロッグの前半において、重力波をスプ リットして計算するように変更する。

(5) 乱流過程

乱流過程では、改良Mellor-Yamada Level 3ス キーム(以下MY3、Nakanishi 2001; Nakanishi and Niino 2004, 2006) とその出力を用いた部分 凝結スキーム(Sommeria and Deardorff 1977)を 導入する(原 2006)。MY3の導入により、ノンロ ーカルの効果(本田 1999)が自然に考慮され、 乱流による運動量や熱、水蒸気等の輸送が精緻化 され、地上降水や、境界層の気温、風の表現が改 善される。部分凝結スキームは、格子平均値が飽 和していない場合にもサブグリッドスケールの飽 和を考えるもので、MY3の計算の中で乱流の生成 に部分凝結によって生じる浮力の効果を考慮して いるほか、部分凝結スキームの中で計算される雲 量や雲水量を次に述べる放射過程で利用する。

(6) 放射過程

現MSMの放射スキームには、北川(2000)のスキ ームを導入しているが、このスキームで用いられ ている晴天放射スキームは、長波放射加熱率が対 流圏中層で正バイアス、対流圏下層で負バイアス を持つことが知られている(藪ほか 2005)。そこで、 60kmGSM(現在のGSM)に実装されている晴天 放射スキーム(藪ほか 2005)を導入し、晴天放 射スキームの改善をはかる。

放射過程において利用する雲量と雲水量は、従 来、雲量は相対湿度から、雲水量は可降水量⁸から の診断によって計算していた。この方法では実況 と比較して雲量を過大に見積もるため、地上に到 達する短波放射が少なくなり、日中の地上気温の 上昇が小さすぎるという問題があった。前述の部 分凝結スキームから求めた雲量および雲水量は雲 物理過程で予報している水蒸気量、雲水・雲氷量 と乱流を反映したものになっており、これを利用 することによって雲量が過大に評価される問題が 緩和され(第4.3.2項参照)、地上気温の日変化が より実況に近くなり(第4.2.7項参照)、気温の鉛 直プロファイルが改善される。

また晴天放射計算において、オゾンの3次元気 候値を用いることで、現MSMでは考慮されてい なかったオゾンの効果を、新MSMでは考慮する。

現MSMでは当初、放射過程で用いられる太陽の天頂角の計算に不具合があった(均時差⁹の補正

の正負が逆であった)。これにより日の出・日の入 りの時間が変わるため、この時間帯に従来の予報 に比べて最大2℃程度地上気温に差が出る場合が ある。この不具合の修正により日の出・日の入り の地上気温予報の誤差が小さくなること、降水予 報に大きなインパクトがないことを確認した上で 2006年9月1日に修正を行った。

(7) 雲物理過程、対流パラメタリゼーション

雲物理過程では、雲氷落下スキームを導入する。 現MSMにおいては、雲氷の落下が考慮されてお らず、予報時間が進むにつれて雲氷が上層に蓄積 される問題があったが、これが改善される(第 4.3.1項参照)。

対流パラメタリゼーションでは、Kain-Fritsch スキーム(以下、KFスキーム)のトリガー関数に 相対湿度に依存する摂動を追加する改良を行う (成田 2006)。これによって、格子スケールの対 流による過剰な降水や、地形や地表面粗度に過度 に応答した降水が軽減される(第4.4節)。

(8) 地上物理量診断手法

モデル面の最下層と地表面の物理量から地上 10m風、1.5m気温や湿数を算出する地上物理量診 断の手法は現MSMと同じである。物理過程の更 新に伴って地表面付近の予報値の特性が変化して いるのに合わせて、より誤差の小さい地上予報値 になるように診断に用いる粗度長の調整を行う。

4.1.3 今後のメソ数値予報

2004年9月の非静力学モデルの現業化にはじま り、2006年3月のモデルの高解像度化および計算 機システムの更新、2007度中に予定されている予 報時間の延長と、システムの変更を伴う比較的大 きな変更が行われてきている。以下では、新MSM の現業化以降に計画されている開発課題について 簡単に述べる。

2007年度中には、初期値の作成手法を、現在の 静力学モデルに基づく4次元変分法から、非静力 学モデルに基づく4次元変分法に変更する予定で ある(Honda et al., 2005)。

現在、飛行場予報や都市気象予測等に利用可能 な水平格子間隔2km程度の高分解能局地モデル の開発を行っている。300km四方の限定的な領域 で予報実験を行い、性能のチェックを行っている ところである。

力学過程においては、鉛直差分の高精度化を検 討している。現在は鉛直差分を2次精度の差分式 を用いて計算しているが、これを4次精度にして 差分誤差を軽減する。現在、基礎的な実験を行っ

⁸ 水蒸気量を鉛直積算したものである。

⁹ 均時差は、視太陽と平均太陽(天球上の赤道を一定速 度で移動する仮想天体)の時差角であり、2月と11月に 特に大きくなる。

ているところである。

積雲対流パラメタリゼーションとして、現在の MSMではKFスキームを用いている。KFスキーム を用いることでこれまでに一定の精度が得られて いるが、水平分解能5kmのモデルに対してKFスキ ームが最適かどうかは現時点ではわかっておらず、 今後も継続的な調査が必要である。

陸面過程においては、植物圏モデル(以下、SiB) の導入を計画している。SiBは植生などによる地 表面フラックスへの影響を扱うものであり、さら に土壌水分の変化や積雪の変化についても取り扱 うことができる。SiBを利用することで地表面に おけるフラックスの扱いが精緻化され、地表面物 理量の予測精度だけでなく、大気への影響を通じ て降水予測精度の向上につながると期待される。

放射過程においては、短波放射で考慮されてい る雲の光学特性を精緻化することで、短波放射の 改善を目指す。また、現在全領域一様で与えてい るエアロゾルデータ¹⁰を、格子毎に変化させる拡 張を行うことで、晴天放射の改善を目指す。

このほか、次期計算機システムで力学的短時間 予報やメソアンサンブル予報に用いられるモデル は、現在のMSMをベースに開発される計画であ る。これらの新しいモデルの開発には、水平解像 度の変更とこれに対応する物理過程の開発、アン サンブル予報の初期値の作成、さらにこれらの出 力の利用方法(アプリケーション)など、多岐に わたって開発すべき事項がある。これらの開発を 着実に進めて精度向上に努めていきたい。

参考文献

- 石田純一,2005:新しいメソ数値予報モデル.平 成17年度数値予報研修テキスト,気象庁予報部, 14-17.
- 北川裕人,2000: 放射過程.数値予報課報告・別冊 46号,気象庁予報部,16-31.
- 小泉耕,2005: データ同化システム. 平成17年度 数値予報研修テキスト,気象庁予報部,33-37.
- 斉藤和雄,2003:時間積分法.数値予報課報告・別 冊第49号,気象庁予報部,26-35.
- 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.
- 成田正巳,2006: 気象庁非静力学モデルに組み込 んだKain-Fritsch対流スキームの改良について. 第8回非静力学モデルに関するワークショップ 予稿集,印刷中.
- 原旅人,2006: 気象庁非静力学モデルへの改良 Mellor-Yamada Level 3スキームと部分凝結スキ

ームの導入について.第8回非静力学モデルに 関するワークショップ予稿集,印刷中.

- 藤田司,2004: 非静力学メソ数値予報モデルの概 要.平成16年度数値予報研修テキスト,気象庁 予報部,1-9.
- 本田有機, 1999: NON-LOCAL境界層スキームの 導入. 平成11年度数値予報研修テキスト, 気象 庁予報部, 43-51.
- 藪将吉,村井臣哉,北川裕人,2005:晴天放射スキ ーム.数値予報課報告・別冊第51号,気象庁予 報部,53-64.
- Honda, Y., M. Nishijima, K. Koizumi, Y. Ohta, K. Tamiya, T. Kawabata and T. Tsuyuki, 2005: A pre-operational variational data assimilation system for a nohhydrostatic model at Japan Meteorological Agency: Formulation and preliminary results. *Q.J.R.Meteorol. Soc.*, 131, 3465-3475.
- Nakanishi, M. 2001: Improvement of the Mellor-Yamada Turbulence closure model based on large-eddy simulation data. *Bound. -Layer Meteor.* 99, 349-378.
- Nakanishi, M. and H. Niino, 2004:An improved Mellor-Yamada level 3 model with condensation physics : Its design and verification. *Bound. -Layer Meteor.*, **112**, 1–31.
- Nakanishi, M. and H. Niino, 2006: An improved Mellor-Yamada level-3 model: Its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog. *Bound. -Layer Meteor.*, **119**, 397-407.
- Saito, K., T. Fujita, Y. Yamada, J. Ishida, Y. Kumagai, K. Aranami, S. Ohmori, R. Nagasawa, S. Kumagai, C. Muroi, T. Kato, H. Eito and Y. Yamazaki, 2006: The Operational JMA Nonhydrostatic Mesoscale Model. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 1266–1298.
- Sommeria, G. and J. W. Deardorff, 1977: Subgrid-scale condensation in models of nonprecipitating clouds. *J. Atoms. Sci.*, **34**, 344-355.

¹⁰ 全領域一様であるが、海と陸では異なる値になっている。

4.2.1 はじめに

本節では、まず現業メソ数値予報モデル(MSM)の降水予報成績について、運用開始からこれまでの推移を述べる。続いて、2007年に運用開始が計画されている新MSMの降水量、地上気象要素、高層気象要素の予報特性について、第4.1節で述べられた改良による特性や予報時間を延長したときの特性を把握するために、現MSMや領域モデル(RSM)と比較しながら述べる。また、降水については二次細分区域ごとのスコアや降水の空間分布を考慮した検証手法による評価を試みる。

検証で用いる各種スコアについて、本文中で説明を 省略したものは巻末付録Aを参照していただきたい。本 節では特に説明がない限り、「閾値が3時間積算降水量 で1mm以上」を「閾値1mm」、「予報時間3時間目」を 「FT=03」などと省略して記す。

4.2.2 MSMの降水予報の統計的検証

図4.2.1に、2001年3月(MSM運用開始)から2006年 10月までのMSMの降水予報について、スレットスコア、 バイアススコア、見逃し率、空振り率の経年変化を示す。 ここでは陸上の格子のみを対象とし、閾値10mm、 FT=06~09の予報結果について限定して述べる。 MSMの予報値について、2006年2月28日以前は水平 解像度が10km、1日4回予報であり、2006年3月1日以 降は水平解像度が5km、1日8回予報である。また、観 測値に用いたレーダー・アメダス解析雨量(R/A)の水平 分解能は、2006年2月28日以前が2.5kmであり、2006 年3月1日以降が1kmである。検証格子の降水量には 10km検証格子内の平均降水量を用いる。検証格子の 大きさを10kmに設定した場合、2006年2月以前の水 平解像度10kmのMSMに対しては、モデル格子の大き さと同じ検証格子を用いることになり条件が厳しいが、 検証方法を簡単にするため、およびモデルの特性を把 握するために10km検証格子にそろえて検証を行った。

2001年3月の運用開始以降、MSMはメソ解析への4 次元変分法(4D-Var)導入(2002年3月)、MSMの静力 学モデルから非静力学モデル(NHM)への変更(2004 年9月)、およびMSMの水平解像度5kmメッシュ化 (2006年3月、以下"5kmメッシュ化"と略す)の主な 変更がなされている。

これらの変更による降水予報の改善をみるために、 4D-Var導入前(2001年3月~2002年2月)、4D-Var導 入後(2002年3月~2004年8月)、NHM導入後(2004 年9月~2006年2月)の期間に分けて、各月の4分割表 の値を期間ごとに合算しスコアを求めた。なお、5kmメッ シュ化後は期間が半年程度と短いため合算を省略した。 図4.2.1の黒細線(直線)はこれらの期間ごとに4分割表 の値を合算してから求めたスコアであり、各グラフの上 下にその値を括弧書きで示した。どのスコアも、主な変 更によって改善されていることが明らかである。特に、バ イアススコアは4D-Var導入後はあまり変化が顕著でな かったが、NHM導入後に予報過剰が改善され1に近 づいた2。田中(2004)は、NHMの性能評価試験結果か ら、NHMでは積雲対流パラメタリゼーションの改良や雲 微物理過程の導入により、暖候期、寒候期とも静力学 モデルでみられた予報過剰が改善されバイアススコア が1に近づいたことを述べており、図4.2.1はNHM導入 による改善がよく表現されている。

次に毎月のスコアの推移を見るために、月ごとに集計 したスコアについて述べる(灰太線)。どのスコアにも月 ごとに大きな変動が見られた。夏はバイアススコアから、 予報過少であり見逃し率も高くなる傾向があることがわ かる。これは、夏の熱雷などによる不安定降水がモデル で表現されにくいためと考えられる。一方、冬はバイアス スコアから、予報過剰であり空振りが多く見逃しが少な い傾向が見られた。冬の各スコアには年による差が見ら れたが、これは事例数の差が影響している³。

季節変動を取り除いた月ごとのスコアの推移を見るた めに、2001年3月を始まりとする前12ヶ月の4分割表の 値を合算し各スコアを求めた(図4.2.1の黒太線)。 NHMに変更した2004年9月以降に、スレットスコアは 大きく改善しバイアススコアも1に近づいており、予報成 績が向上していることがわかった。空振り率も低くなった が、見逃し率は僅かしか低くなっていない。

さまざまな改良が加えられた結果、運用開始以降の MSMの降水予報成績は、着実に改善されていることが わかる。

4.2.3 新MSMの検証の仕様

新MSMの性能を評価するための検証期間は、暖候 期が2006年7月1日から7月20日まで、寒候期が2005 年12月24日から2006年1月12日までと設定した。各期 間について、新MSMは初期時刻を00,06,12,18UTC (00シリーズ)とする15時間予報と、初期時刻を 03,09,15,21UTC(03シリーズ)とする33時間予報の予 報値を用いた。現MSMは、1日8回、FT=15までの予 報であり、RSMの初期時刻は00,12UTCである。新 MSMおよび現MSMについて、1日8回予報を用いた 場合、暖候期および寒候期における初期値の数はそれ ぞれ160であり、03シリーズの予報のみ用いた場合の初

^{1 4.2.1~4.2.3, 4.2.6~4.2.9} 瀬川 知則

^{4.2.4, 4.2.5} 三浦 大輔

² もともと冬の閾値 10mm については観測数が少ないため、 集計値は夏の観測数に依存しまう。また、冬の各月のスコアは 大きな擾乱などの事例数に依存して大きく変動する。

期値の数はそれぞれ80である。RSMの初期値の数は 40である。本節では検証の目的によって、03シリーズだ けの検証や特定の初期時刻や予報時間のみを用いた 検証を行ったので、詳しくは各項の説明を参照してほし い。

第4.2.2項で述べたように、降水予報検証において観 測値として用いられるR/Aは、2006年3月1日より水平分 解能が2.5kmから1kmへ高解像度化された。そのため 検証期間における観測値は、暖候期に1km-R/A(等緯 度経度座標)、寒候期に2.5km-R/A(斜軸ランベルト等 角円錐図法)を用いたが、検証格子に変換する際に格 子の条件をそろえて検証した。

新MSMは高解像度全球モデル(20kmGSM)を側面 境界値に使用する計画だが、本稿執筆時点では 20kmGSMを境界値に用いた実験ができないため、本 節ではRSMを側面境界値に用いた予報を検証した結 果について述べる。なお、20kmGSMによる側面境界 値は更新頻度が1日4回に高頻度化されるため、RSM を側面境界値とするときよりも予報精度が同等以上とな ることが期待される。

4.2.4 降水の検証

この項では、33 時間予報の対象となる 03,09,15, 21UTC 初期値の新 MSM の降水予報について、レー ダー・アメダス解析雨量(R/A)に対する統計的検証結果 を示す。比較のために、現 MSMを現在の15時間予報 の設定で33時間先まで予報したものと、00,12UTC 初 期値の RSM についても検証する。検証格子の大きさは 20km、降水量は前3時間降水量の検証格子内平均値 を用いた。検証領域は瀬川(2005)と同様に陸上及び海 岸から 40km 以内の海域、検証期間は第4.2.3 項に示 した期間とした。

(1) 新 MSM と現 MSM の比較

ここでは、新MSMと現MSMを比較し、前節で述べられている力学・物理過程等の改良による降水の予報特性の違いについて述べる。

(a) 暖候期の特徴

図 4.2.2 は、FT=33 までの全予報時間を対象に閾値 別に計算したスコア(閾値ごとのスコア)で、以下の点が 見てとれる。



 スレットスコアは、どの閾値でも、新 MSM が現 MSM をやや上回るか同等である。

図 4.2.1 MSM の降水予報成績の経年変化。スレットスコア(左上)、バイアススコア(左下)、見逃し率(右上)、空振り率(右下)を示す。対象期間は 2001 年 3 月~2006 年 10 月。陸上の格子のみを検証対象とし、検証格子は 10km、降水量は検 証格子内平均降水量、閾値は 10mm、FT=06~09を用いた。灰太線は月毎に集計したスコア、黒太線は前 12ヶ月の4分 割表の値を合算して求めたスコア、黒細線(直線)は 4D-Var 導入前、4D-Var 導入後、NHM 導入後の各期間について 4 分割表を合算し求めたスコアを示す(図中の括弧書きはその数値を示す)。バイアススコアの図中にある破線は 1.0 を示 し、範囲外となった値は A が 6.1(2002 年 2 月)、B が 4.9(2003 年 12 月)および 12.3(2004 年 1 月)である。

 バイアススコアは、両モデルともに1に近いが、高い 閾値においては新 MSM の予報頻度が現 MSM と 比べてやや過少である。

次に、図 4.2.3 に閾値 1,25mm の FT ごとのスコアを示 す。

- スレットスコアは、閾値 1mm ではほぼ全ての FT で、
 新 MSM が現 MSM を上回っているが、閾値
 25mm では同等である。
- FT=03 のバイアススコアは、閾値 1,25mm ともに、
 新 MSM が現 MSM を改善している。
- バイアススコアは、閾値 1mm ではほぼ同等である。
 閾値 25mm では、予報期間前半は両モデルともに

やや予報頻度過少である。後半は現 MSM は予報 頻度が実況頻度に近づく(やや過剰気味)が、新 MSM は後半引き続き過少である。

FT=03 のバイアススコアの改善については、新 MSM で用いる初期値について、静力学 MSM による 6 時間 予報のうち、後半 3 時間を非静力学 MSM によって実 行した状態を初期値として用いたことが反映されている とみられる(第 4.1 節)。また、図 4.2.2 において、新 MSM が現 MSM と比べて予報頻度がやや過少なのは、 予報期間後半の傾向が異なるためである。ただし、新 MSM のスレットスコアが現 MSM よりもやや向上してい ることから、予報頻度の減少は適中を減らしたわけでは



図 4.2.2 暖侯期における新 MSM (MSM-NEW)と現 MSM (MSM-RTN)の閾値ごとのスコア。20km 検証格子内 の平均降水量を使用。左:スレットスコア、右:バイアススコア、横軸:閾値(mm/3hour)。



図 4.2.3 暖候期における新 MSM(MSM-NEW)と現 MSM (MSM-RTN)の閾値別、予報時間ごとのスコア。 20km 検証格子内の平均降水量を使用。上段:閾値 1mm、下段:閾値 25mm、左:スレットスコア、右:バイアス スコア、横軸:FT。



図 4.2.4 寒候期における新 MSM(MSM-NEW)と現 MSM (MSM-RTN)の閾値ごとのスコア。20km 検証格子内の 平均降水量を使用。左:スレットスコア、右:バイアススコア、横軸:閾値(mm/3hour)。



図 4.2.5 寒候期における新 MSM (MSM-NEW)と現 MSM (MSM-RTN)の予報時間ごとのスコア。20km 検証格 子内の平均降水量を使用。 閾値は 1mm。 左: スレットスコア、右: バイアスコア、横軸: FT。

なく空振りを減らしたためと考えられる。以上から、暖候期における新MSMの予報精度は、現MSMよりもやや向上しているといえる。

(b) 寒候期の特徴

図 4.2.4 は寒候期における閾値ごとのスコアで、以下 の点が見てとれる。

- スレットスコアは、低い閾値では新 MSM が現 MSM をやや上回っているが、高い閾値では下回 っている。
- バイアススコアは、両モデルともに予報頻度過剰であるが、新モデルの方が1に近い。

次に、閾値1mmのFTごとのスコアを図4.2.5に示す。

- ・ スレットスコアは、両モデルで同程度である。
- バイアススコアは、FT=09 以降は現 MSM の方が 過剰である。

以上から、寒候期は 10mm 未満の降水では新 MSM の方が精度がよい。それ以上の降水強度では、現 MSM のスレットスコアが高いものの、バイアススコアが かなり大きいため、現 MSM の精度が良いとはいえない。 新 MSM はバイアススコアを 1.5 程度まで抑えており、現 MSM の予報頻度過剰の性質を改善しているといえる。

(2) 新 MSM と RSM の比較

ここでは新 MSM と RSM を比較し、予報時間が 33 時間に延長された新 MSM と RSM の降水予報特性の 違いについて述べる。

まず、閾値ごとの暖候期のスコアを図 4.2.6 に、寒候 期のスコアを図 4.2.7 に示す。ただし、RSM は 00,12UTC 初期値のFT=03~33 を対象にしている。こ のような初期時刻、予報時間のとり方をしたのは、 05(17)JST発表の予報に利用するのは 12(00) UTC初 期値のRSMであるが、その際参考にする最新の新 MSMが 15(03) UTC初期値のデータであるためで、ま たその際に予報対象時刻を合わせて同じ事例を検証 するためである³。

- ・ 暖候期について、スレットスコアは、どの閾値でも新 MSM が RSM を上回っている。また、バイアススコ アは、RSMと比較すると新 MSM はほとんど1に近 く、RSM を大きく改善している。
- ・ 寒候期について、スレットスコアは閾値 15mm 以下

³ 03UTC 初期値の MSM と 00UTC 初期値の RSM の解析 データ同化ウィンドウはともに 21UTC~03UTC であり、利用さ れる観測データという条件からは、最も公平な比較といえる。



図 4.2.6 暖候期における新 MSM (MSM-NEW03-15Z)と RSM(RSM-00-12Z)の閾値ごとのスコア。新 MSM は 03,15UTC 初期値の FT=03~33、RSM は 00,12UTC 初期値の FT=06~36を対象とする。 左: スレットスコア、右: バイアススコア、横軸:閾値(mm/3hour)。



図 4.2.7 寒侯期における新 MSM(MSM-NEW03-15Z)とRSM(RSM-00-12Z)の閾値ごとのスコア。予報対象は図 4.2.6と同様。 左: スレットスコア、右: バイアススコア、横軸: 閾値(mm/3hour)。

では新 MSM が RSM を上回っているものの、それ 以上だと下回っている。バイアススコアは両モデル とも予報頻度過剰だが、新 MSM の方が、実況頻 度に近い。

以上から、新 MSM は、暖候期においては RSM よりも 精度が良いといえる。寒候期においては、閾値 15mm 以下の降水では、新 MSM の予報精度が良い。それ以 上の強度では、スレットスコアは RSM を下回るものの予 報頻度の過剰は改善されている。

最後に、図 4.2.8、図 4.2.9 に各初期時刻の予報について、暖候期は閾値 1,10mm、寒候期は閾値 1mmの 予報対象時刻ごとのスコアを示す。

- ・ 暖候期のスレットスコアについて、閾値 1,10mm と もに、ほぼ全ての予報対象時刻で最新初期時刻の 新 MSM が RSM を上回っている。
- ・ 暖候期のバイアススコアについて、全体的に新 MSMの方がRSMよりも予報頻度が実況頻度に近い。
- 両モデルともに日変動が見られる。深夜にバイアス スコアが高くスレットスコアが低い、明け方にバイア ススコアが低くスレットスコアが高くなるという傾向が ある。

- 寒候期のスレットスコアについては RSM、新 MSM ともに予報対象時刻、初期時刻によらずほぼ 0.3 程 度で一定である。
- ・ 寒候期のバイアススコアは全体的に新 MSM の予報頻度が RSM よりも実況頻度に近い。

以上から、最新の新 MSM が RSM よりも予報精度が高い、または同等であるといえる。

また、09UTC初期値の新MSM(以下MSM09 等と呼ぶ)のスレットスコアは、予報対象時刻後半において MSM03 と同程度、同様にMSM21 のスレットスコアは 予報対象時刻後半においてMSM15 と同程度である。 新MSMにおけるRSM境界値について、MSM03 と MSM15 は FT=03 ~ 36、MSM09 とMSM21 は FT=09~42 のものを利用している。MSM09 とMSM21 は のスコアが後半でやや悪くなった原因は、境界値が古 いためであると考えられる4。現業化の際は、境界値は1 日4回の20kmGSMが利用され常に新しいデータが利 用される計画であるため、MSM09 とMSM21 の予報精 度も向上すると期待される。

⁴ 20kmGSM とRSM の予報特性が異なるため、新 MSM の 予報特性も境界値の変更で多少変わる可能性がある。



図 4.2.8 暖候期における新 MSM と RSM の閾値別・初期時刻別の予報対象時間ごとのスコア。20km 検証格子内 均降水量を使用。上段:閾値 1mm、下段:閾値 10mm、左:スレットスコア、右:バイアススコア、横軸:予報対象時 刻、03UTC 初期値の新 MSM を MSM03 などと表示。



図 4.2.9 寒候期における新 MSM と RSM の初期時刻別の予報対象時間ごとのスコア。20km 検証格子内平均降 水量を使用。閾値は 1mm。左:スレットスコア、右:バイアススコア、横軸:予報対象時刻。03UTC 初期値の新 MSM を MSM03 などと表示。

(3) まとめ

新 MSM は現 MSM と比較して、暖候期については、 ほぼ全ての閾値・予報時間においてスレットスコアがや や向上しているか同等である。また予報頻度に関しては 大きな差はない。以上から新 MSM の予報精度は、全 体的には向上しているといえる。ただし、閾値の大きな 降水について、予報頻度がやや実況頻度より小さいた め注意が必要である。寒候期については、閾値 10mm 以上の降水に関してスレットスコアが悪化したが、予報 頻度に関しては新 MSM が現 MSM を大きく改善して いる。 閾値 10mm 未満では予報精度は向上している。 新 MSM は、RSM と比較すると、暖候期については、

ネレットスコア、バイアススコアともに大きく改善しており、 予報精度は向上している。寒侯期については、閾値の 高い降水について若干スレットスコアが悪化したものの、 予報頻度は大きく改善している。また、各初期時刻、予



図 4.2.10 新 MSM の閾値 30mm における予報中枢区ごとのスコア。二次細分区域内の最大降水量を使用。左: ETS・観測数率(折れ線)、右:バイアススコア。

報対象時刻ごとのスコアから、最新の新 MSM が RSM よりも精度が高いか同等であるとわかった。

4.2.5 予報二次細分区域ごとの検証

第4.2.4項では、20km×20km検証格子内の平均降水量を用いて、新MSMの一般的な降水特性について検証を行った。一方、MSMは防災情報の発表支援が主な目的の一つであることから、防災上重要な強雨の予想を、防災情報とより密接に結びついた形で評価できるような検証方法も必要である。そこで、注警報等実際の防災情報の発表単位である二次細分区域を一つの検証単位として、主に領域内の最大降水量を用いて検証を行うことにした。今回は、各二次細分区域の検証スコアを地図上に表示したスコアマップを示す。注目している二次細分区域の予報精度や、スコアの広がりから予報の地域特性を把握することができると期待される。

各二次細分区域の面積は、全国平均でおよそ 33km ×33km 格子の面積に相当し、第 4.2.4 項の検証単位 である 20km×20km 格子の面積よりも広い。したがっ て、予報と実況における降水域の位置ずれを緩和した 検証となっていると考えられる。モデルが高解像度化さ れると、強い降水域をシャープに表現するなど主観的な 評価ではよく予報できるようになるが、その降水域が時 空間的にずれると、見逃し・空振りの両方をカウントして しまう。一方で、低解像度モデルで強い降水を表現しな かった場合は、見逃しのみのカウントになる。結果として、 客観的な統計スコアで見ると、低解像度モデルが高解 像度モデルよりも有利になるといわれている(ダブルペ ナルティの問題、石田・成田 2003)。第4.2.4項(2)にお ける新 MSM と RSM の比較では、高解像度の新 MSM の予報精度が RSM よりも良いという結果であったもの の、新MSMはダブルペナルティの影響を受けて、主観 的な違いほどスコアに差が表れていないと考えられる。 そこで、やや面積の広い二次細分区域ごとの検証によ り、20km×20km 格子での検証とどのような違いが表

れるかについて述べる。また、二次細分区域はその境 界が山地の尾根であるなど、ある程度地形の影響や気 象の特性が考慮されているため、地形性降水の影響も 反映できることが期待される。

(1) 検証方法

検証単位は、二次細分区域に含まれるモデル格子 で構成される領域である5。検証範囲は、全国の二次細 分区域で構成される領域である。新MSMの 33 時間予 報(03,09,15,21UTC)における 3 時間積算降水量を、 1kmレーダー・アメダス解析雨量(R/A)と比較する。降 水量は、二次細分区域内の最大値を用いる。ただし、 後述される(4)のRSMとの比較の際には、前3時間降水 量の二次細分区域内の平均値を用いる。また、検証期 間は、暖候期のみとする。検証スコアにはエクイタブル スレットスコア(ETS)とバイアススコア(BS)を用いる。各 二次細分区域の観測数(R/Aが閾値を超えた個数)は 面積により異なり、スレットスコアは観測数に強く依存し てしまうため、観測数を考慮したETSを用いた。ここで、 観測数率(OBS)=R/Aが閾値を超えた個数/全統計 数、予報数率(FCST)=予報が閾値を超えた個数/全 統計数、を定義する。ただし、全統計数は、巻末付録A の分割表における、「FO+FX +XO+XX」を表す。

(2) 最大降水量による検証結果

地域的な予報精度を知るために、各二次細分区域で 計算した結果を予報中枢区ごと及び全国でまとめるとと もに、各二次細分区域の検証スコアを地図上に表示す る。強雨を見るために閾値は 30mm とした。なお、検証 期間が 20 日間と短いため、ここで示す地域特性はこの 期間に出現した降水についての当たり外れに強く影響 され、他の月や季節で傾向が変わる可能性が高いので

⁵ モデル格子が二次細分区域の境界をまたぐ場合は、その 格子の中で面積の広い二次細分区域に含める。

注意が必要である。

まず、各予報中枢区及び全国の閾値 30mm の ETS、 OBS、BS を図 4.2.10 に示す。この図から次の特徴が 見られる。

- 北海道・東北は、OBS が少なく、ETS や BS も0に 近い。
- ② 沖縄は他地域に比べて突出して BS が高い。
- ③ 北陸・東海から西では、OBSは同程度であるが、東 海で他地域に比べて ETS が高い。

これらの特徴のうち、①についてはほとんど降水をカウ ントしていないことから、②と③について詳しく見るため



に、中部地方以西と南西諸島についての各二次細分 区域のスコアマップを図 4.2.11 に示す。

まず②について、特に沖縄本島や奄美地方において OBS がほとんど0に近いものの FCST は比較的大きい ために、BS が非常に大きくなっている。本検証期間に おいては、南西諸島に2 つの台風が接近しており、台 風中心から南東に離れた島々で実況にない過剰な降 水が予報されることが多かったためとみられる。

次に③について、本検証期間は「平成 18 年 7 月豪 雨」の期間の一部が含まれており、OBS は豪雨のあっ た中部地方や九州地方で大きくなっている。一方



FCST をみると、中部地方は比較的大きく、九州地方で は西岸は大きいものの東岸は小さい。この影響で、九州 地方の ETS は中部地方よりも小さくなっているとみられ る。本検証期間においては、中部地方では梅雨前線上 の比較的広範囲における降水がみられ、このような降水 については精度よく予報できたといえる。一方、九州地 方ではスケールの小さい線状の降水が多かった。九州 にかかる線状の降水については、対流パラメタリゼーションの影響で地形に沿った降水を予想してしまうという 傾向があり(第 4.4.1 項)、その影響がスコアに現れたと みられる。

スコアマップに表れる特徴を意識して降水予報を見る ことで、モデルの得手不得手を把握しやすいのではな いかと思われる。

(3) 検証格子の大きさによる影響

ここでは、検証を行うときの検証単位の面積の大きさに よる影響を調べる。図 4.2.12 に 5km×5km、20km× 20km、40km×40km の検証格子と二次細分区域を 検証単位としてそれぞれ検証し、閾値ごとに全国分まと めた ETS と BS を示す。

BS(最大值) ETS(最大值) 1.2 0.4 ----格子5km ·----格子5km 1.0 ───格子20km - 格子20km 0.3 - 格子40km -<u>-</u>-格子40km 0.8 二次細分 二次細分 0.2 0.6 0.4 0.1 0.2 0.0 0.0 01235 15 20 25 30 10 15 20 25 30 10 0123 5 閾値(mm/3hour) 閾値(mm/3hour) BS(平均值) ETS(平均值) 1.2 0.4 -----格子5km 1.0 → 格子20km 0.3 -<u>--</u>-格子40km 0.8 二次細分 0.2 0.6 ---格子5km 04 ───格子20km 0.1 ----格子40km 0.2 二次細分 0.0 0.0 0123 5 10 20 25 30 15 10 15 20 25 30 01235 閾値(mm/3hour) 閾値(mm/3hour)

検証領域内最大降水量の場合

- ETS は全閾値において検証単位面積が広いほど 大きい。
- ・ BSも検証単位面積が広いほど良い。
- 二次細分区域は 33km×33km 検証格子に相当 するが、ETS はそれよりも広い 40km×40km 検証 格子と同程度であり、BS は、5km×5km 検証格子 と同程度と、低い値である。

検証領域内平均降水量の場合

- ETS は閾値が 15mm 以下では、検証単位面積が 広いほど ETS が大きい。
- BSは、閾値が低い場合は検証単位面積によらず1
 に近い。閾値が高い場合は、検証単位面積が広い ほど、予報頻度が小さい。
- ・ 二次細分区域については、ETS は 40km×40km 検証格子よりも良い。BS は閾値 20mm 以上で、通 常の検証格子と比べて、閾値が大きくなるほど予報 頻度が減少している。

以上のように、検証格子単位での検証結果は、ETS が、 面積が広くなるほど大きくなる等、その面積に応じた変 化傾向を示した。しかし、全国平均で33km×33km格 子の面積に相当する二次細分区域で検証したスコアは、 20km×20km格子と40km×40km格子の中間程度



の値にはならなかった。これは、二次細分区域の面積 が細分によって異なっており、大小様々な面積の検証 単位で求めたスコアを全国分まとめているためと推測さ れる。全体的には、二次細分区域の ETS は 20km× 20km 検証格子よりも大きいことから、BSの減少は適中 よりも空振りの減少のためと考えられ、検証単位として二 次細分区域を取ることは、位置ずれ等を考慮した妥当 なものといえる。

(4) RSM との比較

まず、検証単位が 20km×20km 検証格子と二次細 分区域の場合で、新 MSM と RSM における検証スコア にどのような差が表れるかについて述べる。次に、二次 細分区域を検証単位とした場合における、新 MSM と RSM の地域特性の違いについて述べる。

新 MSM は 03,15UTC 初期値の FT=03~33、RSM は 00,12UTC 初期値の FT=06~36 について検証を行った。ただし、ここでは二次細分区域内の平均降水量を 用いている。なお、新 MSM と RSM はモデル格子の大きさが異なるため、二次細分区域に含まれるモデル格子で構成される検証領域が異なる。そこで検証領域内 のモデル予報値の平均を取る場合は、各モデル格子における二次細分区域に含まれる 1kmR/A の格子数に応じて重みをつけている。

(3)では、検証単位面積の大きさ等の違いで、二次細分区域での ETS が、20km×20km 検証格子よりも大 きくなることについて述べた。この影響が、新 MSM と RSM のスコアの差にどの程度表れているのかを見る。 図 4.2.13 に、二次細分区域での検証結果を全国分まと めた閾値ごとのスコア(細分スコア)と、図 4.2.6 で描画し た 20km×20km 検証格子での検証スコア(格子スコ ア)を示す。

スレットスコアについて、新 MSM は細分スコアが格子 スコアより大きい一方、RSM は閾値 1~5mm では細分 スコアが大きいものの閾値 10mm 以上では細分スコア が格子スコアと同等か小さい。また、バイアススコアにつ いて、閾値 20mm 以下の新 MSM は細分スコアが格子 スコアと同程度である一方、RSM はほぼ全閾値で細分 スコアが格子スコアより負バイアスである。したがって、 高解像度モデルの新 MSM は、検証単位を二次細分 区域にすることで、低解像度モデルの RSM よりも、位 置ずれによるダブルペナルティの影響が軽減されてい るといえる。

最後に、閾値 10mm における新 MSM と RSM の予 報地域特性の違いについて述べる。新 MSM と RSM の二次細分区域の検証スコアの分布を図 4.2.14 に示 す。全般に、ETS の分布は新 MSM の ETS が RSM よ りも全体的に大きくなっているような傾向である。ただし、 一部に両モデルでの地形性降水の予報特性の違いが 表れている。矢印で示した部分は、飛騨山脈、赤石山 脈を含む標高の高い領域だが、RSM の ETS よりも新 MSMの ETS が高い。観測数率に対して予報数率を見 ると、RSM はこの地域で降水をあまり予想していないが、 新 MSM は予想している。新 MSM と RSM では予報の 特性に加えて地形、モデルの水平解像度の違いがあり、 このような差が表れたと考えられる。また、今回示した山 脈を含む二次細分区域はその形状が細長い。したがっ て 20km×20km 検証格子の中には二次細分区をまた ぐものもあるとみられ、検証格子よりも二次細分区域で 検証するほうが、地形性降水を考慮できると考えられ る。

(5) まとめ

20km×20km検証格子よりも平均的に面積の広い二 次細分区域で検証を行うことで、高解像度モデルに見 られる位置ずれの影響がある程度緩和された。注警報 等の防災情報の発表単位である二次細分区ごとの統 計スコアの分布から、注目している二次細分区域の予















図 4.2.14 新 MSM と RSM の閾値 10mm における二 次細分区域内平均降水量での検証結果。上段: ETS×100、中段:FCST×1000、下段 OBS× 1000。左:新 MSM、右:RSM。新 MSM と RSM の 予報対象時刻をそろえているため、両モデルの OBS は同じである。

報精度を知ることができ、これは防災情報に密接に結 びついた検証といえる。ただし、前述のように検証期間 が短いため、スコアの分布は実際に観測した降水の分 布に依存してしまうところがある。データが蓄積され次第、 今回表示しなかった地域や他の季節も含めて改めて検 証する予定である。また、各二次細分区域のスコアは、 特に閾値を大きくとると観測数が少なくなるため、標本 変動が大きくなる、またはスコアが小さくなることが多い。 スコアマップを見る際には、観測数に注意するとともに、 周囲と比較して極端なスコアでないか確認しながら、統 計的な有意性に留意して利用してほしい。

4.2.6 降水の空間分布を考慮した降水予報検証

(1)検証格子内の最大降水量を用いる検証方法に 見られる問題点

分割表を用いた降水量の検証を行うとき、予報と観測 の格子に存在する水平分解能や座標系の違いなどを そろえるため、適当な広さの検証格子を設定して検証し ている。たとえば、観測値として用いられるレーダー・ア メダス解析雨量(R/A)はモデルの水平分解能よりも細か いため、適当な広さの検証格子を設定し観測とモデル で格子をそろえて、同じ検証格子における降水量に変 換する。

モデルは、R/Aを真値として検証格子内のモデルの 降水量やR/Aについてそれぞれ平均を求めて検証格 子の降水量として用いる方法(格子平均)により検証を 行っている。

一方、MSMは防災情報の発表支援を目的として運用されているため、利用者の立場からは強い雨の予報値の表現特性についても関心が持たれる。そのため瀬川(2005)では、検証格子内のモデルの降水量やR/Aの最大値を検証格子の降水量として用いた検証(格子最大)を行った。そのなかで、水平解像度が5kmのMSM(5km-MSM)と水平解像度が10km-MSMよりも大幅に改善されること述べた。しかしながら、格子最大による検証手法は検証格子内で最大値となったモデルの降水量やR/Aが検証格子の降水量に置き換わっているだけなので、検証格子の範囲内に限定してモデルとR/Aのピーク値の表現があっているかどうかは評価できたが、降水の広がりまでは評価できなかった。

(2) 格子降水面積スコアの導入

メソスケールモデルによる降水量予報を検証するに は、予報値の精度に加えて降水域の広がりや降水系の 位置を考慮した検証手法が求められており、さまざまな 評価がなされてきた。たとえば、石田・成田(2003)では、 位置ずれを許容するスレットスコアなどが用いられ、高 解像度モデルの評価に広がりまで評価することの重要 性を示唆している。

そこで、この項では高解像度モデルと低解像度モデ ルを比較する際に、モデルやR/Aの格子が表現する降 水量を、できる限り量的にも空間的にも検証する方法を 導入する。具体的には、やや広めの検証格子を設定し、 モデルとR/Aについて閾値を超えた格子の割合(降水 面積率)を計算し、(検証格子内で表現された)降水の 空間分布を考慮した検証手法により評価する。

(a) 定義

各検証格子の降水面積率を予報(*RPf*)、観測 (*RPo*)について次のように定義する。

(4.2.1)

(4.2.2)

そして、検証対象領域の検証格子数をNとするとき、 格子降水面積スコア(以下"PAS": Precipitation Area Score)を次式で定義する。

$$PAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (RPf_i - RPo_i)^2$$
(4.2.3)

ここで、i は検証格子の識別子を示す。ただし、本稿で は各検証格子においてRPf = RPo = 0の時は検証対 象から外す6。そのため、予報及び観測で閾値を超えた 格子が1つもなかった検証格子の数だけNは小さくな る。

(b) スコアの特徴

定義からわかるPASの特徴を以下にまとめる。

①0~1の値をとる。0に近いほど精度が良い予報となり、 0で完全予報となる。

②検証格子内のずれは許容する。つまり、ある閾値での降水面積率が観測と予報で一致する(RPf = RPo)ならば、検証格子内の予報と観測の降水を表現する格子の位置がずれていても0(完全予報)と評価される。
③検証格子において、閾値を超えた予報や観測の格子数を数えるため、格子平均で見られる平滑化の影響は除かれ、検証格子内の予報や観測が示す格子の降

⁶ PAS では4 分割表は用いないが、スレットスコアの考え方を 参考にした。閾値を大きく設定した場合には、「予報で降水な し、観測で降水なし(4 分割表では XX)」となる検証格子が増 え、(*RPfi – RPoi*)²=0となる検証格子が増える。検証対象領 域内の検証格子の数だけ積算すると PAS は小さくなり、閾値 が大きいほど予報精度がよいことになってしまう。このような傾 向を防ぐために、XX の影響を排除して降水予報の精度を評 価することにした。



図 4.2.15 計算例のための検証格子内の降水分布図。図中の緑色の格子は、降水量が閾値を超えたモデルまたは観測の 格子である。(ア)は水平分解能 1km の観測格子(1km-R/A を設定)で、図中の破線は 5km 格子の区切り線を示す。(イ) は水平分解能 5km のモデル格子(MSM を想定)、(ウ)は 10km のモデル格子である。検証格子の大きさは 20km とする。

水量を活かすことができる。つまり、MSMやRSM、R/A のように分解能が異なる予報値と観測値であっても、検 証格子の降水面積率という分解能依存の小さい基準を 用いることにより、降水の空間分布を考慮した予報特性 の把握ができるようになる。

(c) 計算例

ここでは、図4.2.15に示すような降水分布を用いて PASの簡単な計算例を考える。検証格子の大きさを 20kmに設定し、観測値に1km-R/A(検証格子内に20 ×20格子)とした(ア)、予報値に水平分解能をMSMと 同じ5km(同4×4格子)とした(イ)、水平分解能を 10km(同2×2格子)とした(ウ)を設定する。図中の緑 色の格子は、予報または観測において閾値を越える降 水があった格子であり、その格子数は(ア)が255、(イ) が9、(ウ)が2である。簡単にするために、検証対象領域 は20km検証格子1つとする((4.2.3)式において検証対 象領域の検証格子数(N)は1となる)。

図中の(イ)と(ア)について、(4.2.1)式と(4.2.2)式、および(4.2.3)式を用いて、

- RPf = 9/16 = 0.5625
- RPo = 255/400 = 0.6375

 $PAS = (9/16 - 255/400)^2 = 0.005625$

また、(イ)よりも分解能の粗い(ウ)について、

RPf = 2/4 = 0.5

PAS=(2/4・255/400)²=0.018906 となる。(イ)において、検証格子面積の半分よりも1格子 分だけ多く降水が表現された分、降水予報は(ウ)よりも (イ)のほうがスコアはよく、高解像度モデルの特性を評 価できている。

(3) 検証対象期間とデータについて

第4.2.3項で述べた検証期間において、新MSM(初 期時刻は03,09,15,21UTC)とRSM(同00,12UTC)に ついてPASを計算した。新MSMとRSMには初期時刻 や予報回数に違いがあるが、ここでは各初期値の予報 結果を予報時間ごとに平均した結果について述べる。 また、できるだけ事例数を多くとるために、暖候期と寒候期をあわせて計算した。検証格子の大きさは、RSMと比較するために40kmとし7、予報値として3時間積算降水量、観測値として第4.2.3項で述べたように暖候期は1km-R/A、寒候期は2.5km-R/Aを用いた。検証対象とした領域は日本の陸地と沿岸40kmまでである。

(4) 計算結果と考察

図4.2.16に閾値1,10,30mmのPASを計算した結果 を示す。閾値1,10mmについて、どの予報時間におい ても新MSMのPASはRSMよりも小さく、予報がよいこと を示している。

閾値1mmのPASについて、新MSM、RSMともに予 報時間後半になるにつれスコアが悪化している。これは、 予報時間後半ほど予報とR/Aの降水面積率の差が大き くなっていることを意味する。降水のあった全格子につ いて、閾値1mmの予報とR/Aの降水面積を調べたとこ ろ、新MSMもRSMも予報がR/Aを上回る予報過剰であ ったが、特にRSMの降水面積は2倍以上であり、予報 後半ほど過剰になっていることがわかった(図略)。この ため、PASが予報時間とともに劣化するのは、予報の降 水分布が観測の分布と検証格子の大きさ以上にずれて きてしまうための空振り(見逃しも含む)によることの他に、 RSMは特に予報過剰による影響があると考えられる。

閾値10mmのPASについても、閾値1mmと同様の傾向が見られた。図4.2.17に閾値10mmについてモデルとR/Aの降水面積を予報時間ごとに示す。新MSMの降水面積はR/Aとほぼ同じである。一方、RSMは予報時間前半に予報過少で予報時間後半にR/Aと同程度にまで回復する。スコアを見てみると、新MSMのスコアは緩やかに劣化していくが、RSMは予報初期において新MSMと同程度であったがすぐに悪化してくる。RSMは

⁷ MSM の降水予報検証では 20km 検証格子がよく用いられ るが、20km 検証格子を用いた場合 RSM の *RPf*は0か1し かとらないため、RSM の PAS は新 MSM に対して不利となる からである。

FT=12付近で一度PASが悪化し、再び改善した後 FT=18 以降再び悪化してくる。これはRSMの予報の 降水面積が増加してくるのと一致しており、RSMではモ デルで作り出す降水分布が必ずしも観測と一致してい ないことを意味している(図4.2.17)。新MSMは予報回 数が多い分有利であるとはいえ、安定した予報をしてい る。

ところで、図4.2.18に新MSMとRSMについて、 40km検証格子の格子平均を用いて計算したスレットス コアとバイアススコアを示す。弱い雨の閾値に注目する ため、表示する閾値を1~15mmに限定して示す。スレ ットスコアから、閾値1mmではRSMが新MSMよりも優



図4.2.16 予報時間ごとのPAS。閾値は赤が1mm、緑 が10mm、青が30mmを示す。実線は新MSM(図中 ではMSM)、破線はRSM、横軸は予報時間を示す。 検証期間は、暖候期、寒候期を合わせて計算してい る。検証格子の大きさは40kmとした。



図4.2.17 閾値10mmの予報時間ごとの降水面積。赤 は新MSM(図中ではMSM)、青はRSM、太線がモ デルの降水面積(FRR)、細線がR/Aの降水面積 (R/A)を示す。横軸は予報時間、縦軸はモデルや R/Aの降水面積[km²]を示す。検証格子の大きさは 40kmとした。値は暖候期と寒候期をあわせた3時間 毎の平均値である。降水面積は[1格子あたりの面積] ×[閾値を超えた格子数]で計算した。初期時刻の違 いと予報回数の違いがあるため、新MSM(03,09,15, 21UTC)とRSM(00,12UTC)それぞれに対応する R/Aの降水面積を表示した。

れているが、閾値10mmでは逆に新MSMがRSMを凌 駕していることがわかる。バイアススコアからRSMは閾 値1mmでは予報過剰であることが分かる。一般に、バ イアススコアが過剰になるとスレットスコアが大きくなると いう傾向があるため、このことはスレットスコアやバイアス スコアを用いた検証手法では空振りに対する評価があ まいということを示している。本来は、降水検証ではその 広がりまで含めた評価をすることが大切であり、この観 点からはPASで示されるように閾値1mmのような弱い雨 についても、新MSMがRSMよりも優れている。閾値 10mmではバイアススコアが両モデルでほぼ同じであり、 スレットスコアでも新MSMはRSMよりも優位であること からPASの結果と大まかには一致する。

閾値30mmのPASについて、新MSMはおおむね RSMよりも良い成績を示す。閾値30mmに対する予報 時間ごとの降水面積を調べたところ(図略)、新MSMは 予報初期ではメソ解析におけるR/Aの同化が効いてい るため予報とR/Aの降水面積がほぼ同じであるが、予報 時間後半では予報の降水面積が時間経過とともに緩や かに小さくなる。一方、RSMはR/Aを同化しても強雨の 改善は明瞭でなく、またFT=09以降では予報の降水面 積が急激に減少する。このため、RSMのPASはFT=09 以降に新MSMよりも悪化している。新MSMは閾値



図4.2.18 閾値別のスレットスコア(上)とバイアススコア (下)。実線は新MSM(MSM-NEW)、破線はRSM、横 軸は閾値[mm/3hour]を示す。検証格子の大きさは 40kmとし、検証格子内の平均降水量で検証している。 検証期間は、暖候期、寒候期を合わせて計算している。 ただし、図4.2.6のようにモデル間で予報対象時刻に合 わせるような考慮はしていない。

30mm程度の降水を持続することが可能であるが、 RSMではそれが困難であることを示している。

(5) まとめと今後の課題

降水の空間分布を考慮したスコア(PAS)を用いて、新 MSMの降水予報についてRSMと比較しながら評価し た。その結果、閾値1,10mmについて、新MSMのPAS はRSMよりも良く、予報時間後半においてもスコアの劣 化は小さかった。閾値30mmについては、新MSMの PASはおおむねRSMよりも良い成績であり、新MSMは RSMよりも予報時間後半において強い雨を維持してい ることがわかった。また図4.2.16に示すように、PASは閾 値を大きくした場合にスコア全体が小さくなってしまう傾 向があることがわかった。PASは、スレットスコアと異なり スコアが小さくなることは良い予報を意味するため、閾 値が大きいほど予報がよいことを示してしまう。しかし、こ のことは強い雨ほど予報成績が良いことを意味するもの ではなく、弱い雨と比べて強い雨では降水面積そのも のが小さくなるのでその誤差も小さくなってしまうことに 起因している。そのため、PASを用いるときにはモデル とR/Aが表現する降水面積の変化も含めた考察をする 必要がある。たとえば同じモデルにおいて閾値1mmと 閾値30mmのPASの傾向を比較するなど、異なる閾値 についてPASを比べるときには扱いに注意が必要であ る。

また、今回は閾値30mmまでの結果しか示さなかっ たが、これは閾値30mm以上の場合では降水面積その ものが非常に狭く、すべて見逃した方が数格子だけ予 報するよりもPASの精度が良くなってしまう結果が得ら れることがわかったからである。よって、豪雨の降水予報 精度の評価にPASを利用することについては、更なる 検討が必要である。

なお、(4.2.3)式についてNに関する制限を除いて、 降水面積率をその検証格子の降水確率とみた場合に は、PASはブライアスコアと同じものになる。たとえば、 将来の導入が検討されている低解像度化したメソアン サンブル予報の評価の際に、確率予報と決定論的予報 の比較にPASを用いることも考えられる。また、検証格 子に第4.2.5項で用いられた二次細分区域を用いた場 合、降水量の最大値だけでなく二次細分区域内での広 がりを考慮した評価ができるものと考えられる。

4.2.7 地上気象要素の検証

ここでは新MSMの地上付近の予報特性をみるために、 地上気象要素(風速、気温、露点温度)について検証し た結果を述べる。

(1) 検証方法

検証対象とする観測点は、観測点を囲むモデル格子

の海陸設定が4格子点とも陸地となっているアメダス観 測点とした⁸。観測点に対する予報値の内挿方法や風 速と気温の補正方法は、瀬川(2005)と同じ方法を用い た。

検証スコアは、平均誤差(ME)と平方根平均二乗誤 差(RMSE)を用いた。ただし降水予報の検証と違い、地 上気象要素は予報誤差の日変化が大きいため、検証ス コアを予報対象時刻ごとに示した。

まず、第4.1節で述べられている新MSMの改良され た特性について把握するために、新MSMと現MSMに ついて1日8回、FT=15までの予報値を用いて両方を比 較しながら述べる。次に、新MSMについて33時間予報 を行ったときの予報特性を見るために、03,09,15,21 UTCを初期時刻とするFT=33までの予報値を用いた 検証結果について、RSMとの特性の違いにも触れなが ら述べる(RSMの初期時刻は00,12UTC)。

(2) 新MSMと現MSMとの比較

暖候期、寒候期それぞれのFT=15までの各地上気象 要素の検証結果について、予報対象時刻ごとに示した ものを図4.2.19、図4.2.20に示す。どちらの図でも全般 的に目立つのが、新MSMについてMEの日変化が小 さくなっていること、およびMEにバイアスの拡大が見ら れた場合でもRMSEはほとんどの場合で縮小している か同等であることである。MEの日変化が小さくなってい ることは、検証対象の気象要素そのものの日変化が大 きくなって、実況の変化にモデルの予報値がよく追随し ていることを示している。また、バイアスが拡大しても RMSEが縮小していることは、ランダム誤差が縮小して いることを示している(巻末付録A参照)。以下では、新 MSMと現MSMとの比較をしながら特性を述べる。

(a) 暖候期

図4.2.19に見られる特徴について、まずMEから述べ る。風速について、現MSMで見られた実況よりも日中 に弱く夜間に強く風を予報する傾向は、新MSMでも同 様に見られた。しかしながら、新MSMの方が夜間を中 心に若干バイアスを軽減している。新MSMの気温は、 現MSMで見られた夜間に1℃以上あった高温バイアス が小さくなり、1日を通して0.5~1℃の高温バイアスをも つ傾向になった。新MSMの露点温度は、現MSMに見 られた夜間の0.5℃程度の正バイアスを改善している。

次にRMSEについて述べる。新MSMの風速は1日を 通して改善が見られた。新MSMの気温は、日中におい て現MSMと同等の精度であったが、夜間は改善してい た。新MSMの露点温度は、現MSMと比べて日中僅か に改悪していたが、夜間は現MSMと同等の予報精度 であった。

⁸ 露点温度はSYNOPを報じる観測点を用いた。



図4.2.19 暖候期における新MSMと現MSMの地上気象要素のME(左)およびRMSE(右)。上段は風速、中段は気温、下 段は露点温度を示す。実線は新MSM、破線は現MSMを示す。FT=15までの検証結果を用いて予報対象時刻毎に示す。 横軸は予報対象時刻[UTC]である。

(b) 寒候期

図4.2.20に見られる特性について、まずMEから述べ る。風速は、現MSMで日中に強く予報していた傾向が、 新MSMではさらに風速を強く予報する傾向となった。 夜間の新MSMの風速は、現MSMと同じように0.5m/s 程度風を強く予報する傾向が見られた。新MSMの気 温について、現MSMと比べても1日を通して高温バイ アスが拡大し、夜間においては1℃以上の高温バイアス となっていた。露点温度は、現MSMでは日中に1.5℃ の正バイアスを持っていたが、新MSMは実況に近い表 現となっていた。

次にRMSEについて述べる。新MSMの露点温度は、 日中に改善し夜間は現MSMと同等の予報精度であっ た。また、新MSMの風速と気温については、現MSMと 同等の予報精度であった。

(c) 比較のまとめ

新MSMの地上気象要素に見られた予報特性の改善から、第4.1節で述べた改良Mellor-Yamadaレベル3ス キームの導入や、放射過程において利用する雲量の診 断方法の変更が反映されていることがわかった。また、 現MSMの各初期時刻に見られたMEやRMSEの不連 続が、新MSMでは解消されている。これは、新MSMで 用いるメン解析について、静力学MSMによる6時間予報 のうち、後半3時間を非静力学MSMによって実行した状 態を初期値として用いたことが反映されている(第4.1 節)。

暖候期の日中や寒候期において、新MSMは現 MSMと比べて気温の正バイアスが拡大する傾向がみら れたが、RMSEから気温は同等の精度であった。これら より、暖候期の日中や寒候期において新MSMの気温



図4.2.20 寒候期における新MSMと現MSMの地上気象要素のME(左)およびRMSE(右)。上段は風速、中段は気温、下 段は露点温度を示す。実線は新MSM、破線は現MSMを示す。FT=15までの検証結果を用いて予報対象時刻毎に示す。 横軸は予報対象時刻[UTC]である。

は、現MSMの気温よりも各予報に含まれるランダム誤 差が小さくなったことがわかる(巻末付録A参照)。

(3) 新MSMとRSMとの比較

(a) 暖候期

図4.2.21に暖候期のFT=33までの地上気象要素(風速、気温)の検証結果について、予報対象時刻ごとに示す。まず、新MSMについて(2)(a)で述べた傾向と比較しながら述べる。新MSMのMEについて、風速、気温、露点温度は(2)(a)で述べた傾向と大きな変化は見られなかった。すなわち、新MSMの風速は日中やや弱く予報し夜間では強く予報される傾向があり、気温は1日を通して0.5℃程度の高温バイアスをもっていた。露点温度も、日中に僅かな負バイアスが見られた(図略)。

次に、RSMと比較しながら述べる。RSMの風速には

夜間において0.5m/s以上強く予報する傾向があるが、 新MSMの風速は夜間の正バイアスが小さく、RSMより も実況に近い予報となっていた。気温についても、 RSMは特に夜間においておよそ3℃の高温バイアスを 持っていたが、それを新MSMは1℃以下に改善してい た。新MSMのRMSEについても、風速、気温、露点温 度はRSMに比べて小さく、精度の良い予報であること がわかった。

(b) 寒候期

図4.2.22に寒候期のFT=33までの地上気象要素 (風速、気温)の検証結果について、予報対象時刻ごと に示す。まず、新MSMについて(2)(b)で述べた傾向と 比較しながら述べる。新MSMのMEについて、風速、 気温、露点温度は(2)(b)で述べた傾向と大きな変化は 見られなかった。すなわち、1日を通して新MSMの風速



図4.2.21 暖候期における新MSMとRSMの地上気象要素のME(左)とRMSE(右)。上段は風速、下段は気温を示す。実線 は新MSM、破線はRSMを示す。FT=33までの検証結果を用いて予報対象時刻毎に示している。横軸は予報対象時刻 [UTC]である。初期時刻は、新MSMが03,09,15,21UTC、RSMが00,12UTCである。



図4.2.22 寒候期における新MSMとRSMの地上気象要素のME(左)とRMSE(右)。上段は風速、下段は気温を示す。実線 は新MSM、破線はRSMを示す。FT=33までの検証結果を用いて予報対象時刻毎に示している。横軸は予報対象時刻 [UTC]である。初期時刻は、新MSMが03,09,15,21UTC、RSMが00,12UTCである。

は強く予報する傾向があり、気温は1~2℃の高温バイ アスを持つ傾向があった。露点温度は、日中に0.5℃程 度の正バイアスを持つ傾向があった(図略)。

次に、RSMと比較しながら述べる。RSMの風速には 夜間において1m/s程度強く予報する傾向があるが、新 MSMの風速はRSMと比べると夜間の正バイアスは小 さかった。気温についても、RSMは夜間において3℃程 度の高温バイアスを持っていたが、新MSMは1℃程度 に改善していた。新MSMのRMSEについても、風速、 気温、露点温度はRSMに比べて小さく、精度の良い予 報であることがわかった。

(4) 地上気象要素検証のまとめ

新MSMの地上の風速、気温、露点温度の予報特性 を見るために、現MSMおよびRSMの検証結果と比較 を行った。現MSMに比べると、新MSMでは夜間にお いて地上気象要素は予報精度が改善していた。一方、 1日を通して新MSMの気温は暖候期で0.5℃、寒候期 で1~2℃の高温バイアスが見られるが、現MSMと比べ て地上気温の予報そのものは日変化がより表現されや すくなった。また、新MSMの気温は現MSMに比べて 予報のランダム誤差が小さくなっていることもわかった。 このようにランダム誤差が小さくなっていることから、新 MSMを用いることで、ガイダンスのような統計的手法を 用いたプロダクトの精度向上が期待される。FT=33まで の予報についても、新MSMの風速や気温、露点温度 のMEとRMSEは、FT=15と比べてその傾向に大きな 変化がなく、予報時間後半において目立った予報の劣 化がないことがわかった。新MSMの地上気象要素の予 報は、RSMよりも予報精度が良いことがわかった。

4.2.8 高層気象要素の検証

ここでは、新MSMの大気の鉛直方向の予報特性をみるために、高層気象要素(高度、気温、相対湿度、風速)について検証した結果を述べる。

(1) 検証方法

気象庁の高層気象観測点におけるラジオゾンデ観測 データのうち、指定気圧面の観測値を検証に用いる。た だし、以下に述べる理由から検証を行わなかった層が ある。第4.2.3項で述べた検証期間のうち、寒候期にお ける新MSMの気温と相対湿度のサンプル数を図 4.2.23に示す。1000hPaの気温のサンプル数は、他の 層に比べて8割程度となっていた⁹。よって、1000hPaに





ついて検証に利用できる観測数が少ないため、どの気 象要素についても1000hPaを除いた検証を行った。ま た、相対湿度のサンプル数についても500hPaより上層 では下層の7割以下となっていたため¹⁰、寒候期の相対 湿度について500hPaより上層について検証対象から 除外する。なお、図は省略するが暖候期においても、 1000hPaの気温は他の層の8割程度のサンプル数であ り、相対湿度は300hPaより上層でサンプル数が中・下 層の各層の2割程度であったため、各気象要素は 1000hPaを除いて検証することとし、相対湿度について は300hPaより上層を検証対象から除外する。

まず、新MSMで新たに加えられた改良の効果を確認するために、新MSMと現MSMの検証結果を比較しながら述べる。両モデルともに09,21UTCを初期時刻とするFT=15の検証結果に限定して述べる。

次に、新MSMのFT=33における特性をみるために、 FT=15との違いやRSMの検証結果にも触れながら述 べる。ただし、新MSMとRSMでは予報回数や初期時 刻に違いがあるため、両モデルを用いて予報時間をそ ろえた議論ができない。そのため、検証対象となる観測 値の観測時刻をそろえた議論を行う。つまり、初期値に ついて新MSMは03,15UTC、RSMは00,12UTCを初 期時刻とするものを用いるため、新MSMはFT=33、 RSMはFT=36の検証結果について比較することにし た。

検証に用いるスコアは、平均誤差(ME)と平方根平均 二乗誤差(RMSE)である。第4.2.3項で述べた検証期 間について、暖候期と寒候期を分けて検証する。

(2) 新MSMと現MSMの比較

(a) 暖候期

暖候期における各高層気象要素の検証結果のうち、 FT=15のMEとRMSEについて図4.2.24に示す。まず

⁹ 国際気象通報式では、指定気圧面のジオポテンシャル高度 が通報する観測所の高さよりも低い場合は、その面の気温、 湿度、風の資料を報じないため(わが国では観測値からの補 外も行わない。なお、国外には補外を行ったデータを通報し ている観測点もある。)

¹⁰ 気象庁が行う高層気象観測では、気温が-40℃以下を報じた特異点高度よりも上層は湿度を報じないため。

MEについて述べる。高度は現MSMでは下層で負バイ アス、上・中層で正バイアスが見られたが、新MSMでは 下層から400hPaまではどの層でも数mの負バイアスを 持つようになり、その大きさも現MSMから拡大されてい た。新MSMの気温は、現MSMの中・下層で見られた 0.5℃程度の正バイアスを小さくしたが、上層では正バイ アスを拡大した。中層については放射計算で用いる雲 を変えたので、その効果が中層の気温に反映されたた めと考えられ、下層については改良Mellor-Yamadaレ ベル3スキームの導入による境界層の表現の改善が反 映されていると考えられる(第4.1節)。相対湿度、風速 のMEは、新MSMと現MSMでほぼ同等であった。

新MSMの高度と気温、風速のRMSEは、現MSMに 比べて中・下層で小さくなり改善されていた。新MSMの 相対湿度のRMSEは、現MSMとほぼ同等であった。

(b)寒候期

寒候期における各高層気象要素の鉛直分布のうち、 FT=15のMEとRMSEについて図4.2.25に示す。まず MEについて述べる。新MSMの高度は、傾向が現 MSMとほぼ同じであるが上層の負バイアスを数m程度 拡大している。新MSMの気温も現MSMと同じ傾向で あり、中・下層はほぼバイアスが0℃であるが、400hPa で・0.5℃のバイアスを持つ。相対湿度について、新 MSMは現MSMと同じように水蒸気量を700hPaにお いて、やや過剰に予報する傾向がある。風速について、 現MSMでは下層において約1m/sの正バイアスを持っ ていたが、新MSMは上層ほど風速を弱く予報する傾向 になった。

新MSMの中・下層の高度と気温、風速のRMSEで は、現MSMよりもRMSEが小さくなっていたことから、 改良Mellor-Yamadaレベル3スキームの導入による境 界層表現の改善が反映されている。新MSMの相対湿 度のRMSEについても、僅かな改善がみられた。

(3) 新MSMとRSMとの比較

(a) 暖候期

暖候期のFT=33における、新MSMとRSMの各高層 気象要素のME、RMSEを図4.2.26に示す。まず新 MSMについて、図4.2.24に示したFT=15における特 性と比較する(図4.2.24と図4.2.26に示す実線同士を 比べる)。新MSMの高度はFT=15とほぼ同じ傾向を持 っているが、中・下層の負バイアスがやや拡大している。 気温は、上層の正バイアスがFT=15と比べて僅かに拡 大している。風速は、FT=15と比べて上層で負バイアス が僅かに拡大している。

次に、新MSMとRSMを比べた結果について述べる。 高度は、500hPaではRSMのほうが0mに近いが、それ 以外の高度では新MSMのほうがRSMよりもバイアスを 小さくしていた。気温についても、RSMの500hPaでは 1℃程度の高温バイアスがあったが、新MSMでは高温 バイアスをほとんど0℃にしていた。風速については、上 層で新MSMのほうがやや負バイアスが大きい。RMSE については、どの気象要素も新MSMのほうがRSMより も小さい。特に、気温のRMSEでは上・中層において、 新MSMはRSMよりも精度が良い。

(b)寒候期

寒候期のFT=33における、新MSMとRSMの各高層 気象要素のME、RMSEを図4.2.27に示す。まず新 MSMについて、図4.2.25で示したFT=15における特 性と比較する(図4.2.25と図4.2.27に示す実線同士を 比べる)。新MSMの高度は、FT=15と比べて傾向は同 じだがバイアスがさらに拡大する。気温は、400hPaに おいてFT=15よりも負バイアスが拡大し、850hPaでは 低温バイアスに変わっている。風速は上層で負バイアス を拡大する。相対湿度は、FT=15では700hPaの正バ イアスが目立っていたが小さくなりほとんど0%となって いる。

次に、新MSMとRSMを比べた結果について述べる。 新MSMの高度は上・中層ではバイアスの傾向がRSM とほぼ同じだが、下層ほどRSMより正バイアスが大きく なっている。気温についても、上層の低温バイアスは新 MSMとRSMでほぼ同じであるが、下層では新MSMの ほうがやや低温バイアスをもっている。相対湿度は、 RSMでは700hPaにおいて5%以上の正バイアスがあっ たが、新MSMでは0%に近づいている。風速は全層に わたって新MSMのほうがRSMよりもやや弱く予報する 傾向がある。RMSEは、どの気象要素も新MSMのほう がRSMよりも小さい。

(4) 高層気象要素の検証のまとめ

新MSMの高層気象要素について、ラジオゾンデ観測 データを用いて検証した。暖候期のFT=15においては、 新MSMと現MSMを比べると、気温は中・下層で正バイ アスが小さくなり実況に近い傾向となった。一方、高度 については負バイアスを持つ傾向が見られた。寒候期 のFT=15では、現MSMと同様に700hPaにおいて相 対湿度が正バイアスを持つ傾向がみられた。暖候期に おけるFT=33のバイアスは、どの気象要素もFT=15と ほぼ同じ傾向であった。寒候期におけるFT=33につい て、気温の下層でFT=15と比べてバイアスを拡大する 傾向が見られる一方、相対湿度の700hPaに見られた 正バイアスは、FT=33では小さくなっていた。新MSMと RSMを比べた結果、暖候期では特に中層の気温の表 現が改善していた。また、新MSMのRMSEはRSMと比 べて同等以上の精度となっていた。

新MSMと現MSMの比較からは、気温や風速の RMSEが下層で小さくなっていることから、改良 Mellor-Yamadaレベル3スキームによる境界層表現の 改善が目立っていた。また、暖候期の気温は中層においても精度の改善が見られ、放射計算で用いる雲を変 えた効果が反映されていた。

4.2.9 統計検証のまとめ

(1) 2001年3月に運用を開始した現業MSMの降水予報検証から、現業MSMの降水予報はさまざまな変更によって着実に予報頻度が観測頻度に近づき、予報精度が向上していることが確認された。

(2) 新MSMの予報特性について、現MSMやRSMと 比較を行いながら検証した。降水予報について、新 MSMと現MSMを比較した結果、暖候期では新MSM が現MSMに対して予報精度が向上し、寒候期では予 報頻度は全閾値で改善し、閾値10mm未満の降水はス レットスコアも向上した。新MSMとRSMを比較した結果、 暖候期では新MSMは予報頻度と予報精度ともに大幅 に改善し、寒候期では新MSMは閾値の低い降水につ いては改善した。

(3) 二次細分区域を用いた検証では、二次細分区域 ごとの検証スコアの分布図から、降水の地域特性をより 防災情報に即した形で把握することができた。また、降 水予報の位置ずれによる影響もある程度吸収できること がわかった。

(4) 格子降水面積スコア(PAS)を用いた検証では、モ デル格子の表現する降水量が閾値1,10mmの降水に 対して、新MSMはRSMよりも位置的・量的に表現が良 いことがわかった。また、RSMの弱い雨に見られるよう な予報頻度過剰まで考慮した評価ができることがわかっ た。

(5) 地上気象要素検証では、新MSMが現MSMに対してRMSEを改善していることを確認し、地上気温などの各地上気象要素そのものの日変化が、より表現されやすくなったことがわかった。

(6) 高層気象要素の検証では、新MSMで改良された 物理過程が反映され、暖候期において新MSMの中・ 下層の気温が改善されており、暖候期・寒候期ともに下 層において各気象要素のRMSEの改善が見られた。

以上のことから、新MSMの全体的な性能は現MSM よりも向上しており、1日4回の運用が計画されている新 MSMの33時間予報についても、RSMより精度のよい 予報ができることがわかった。

参考文献

- 石田純一,成田正巳,2003: 検証. 数值予報課報告· 別冊第49号,気象庁予報部,93-106.
- 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.
- 田中小緒里,2004:統計的検証.平成16年度数値予報研修テキスト,気象庁予報部,11-20.



図4.2.24 暖候期における新MSMと現MSMについての高層気象要素のME(左)とRMSE(右)の鉛直分布。FT=15に限定 して示す。実線は新MSM(MSM-NEW)、破線は現MSM(MSM-RTN)を示す。上段から順に高度、気温、相対湿度、風速 を示す。



図4.2.25 寒候期における新MSMと現MSMについての高層気象要素のME(左)とRMSE(右)の鉛直分布。FT=15に限定 して示す。実線は新MSM(MSM-NEW)、破線は現MSM(MSM-RTN)を示す。上段から順に高度、気温、相対湿度、風速 を示す。



図4.2.26 暖候期における新MSMとRSMについての高層気象要素のME(左)とRMSE(右)の鉛直分布。FT=33に限定して 示す。実線は新MSM(MSM-NEW)、破線はRSMを示す。上段から順に高度、気温、相対湿度、風速を示す。



図4.2.27 寒候期における新MSMとRSMについての高層気象要素のME(左)とRMSE(右)の鉛直分布。FT=33に限定して 示す。実線は新MSM(MSM-NEW)、破線はRSMを示す。上段から順に高度、気温、相対湿度、風速を示す。

4.3 物理過程の改良とその効果1

新 MSM では、放射、乱流、雲物理などの物理 過程でいくつかの改良をおこなっている(第 4.1 節)。この節ではその中から雲氷落下スキーム、放 射過程における雲量について取り上げ、事例を中 心にその効果を紹介する。

4.3.1 雲氷落下スキーム導入の効果

非静力学MSMでは雲物理過程を通じて、大気 中の水蒸気、雲水、雲氷、雨、雪、霰の混合比を 予報している。このうち、雨、雪、霰については 落下を考慮しているが雲水と雲氷は落下速度を持 たないものとして扱われていた。しかし、図 4.3.1 中段に示す予想衛星画像²の例のように予報時間 が進むにつれて輝度の高い白い領域が広がってお り(同図上段の実況ではこのような傾向は見られ ない)、これは雲氷の落下を考慮していないことに よる上層での雲氷の過剰な蓄積が原因であること がわかった。新MSMでは、放射過程における雲 量・雲水量・雲氷量を部分凝結スキームによって 算出するが、このような上層での雲氷の蓄積は部 分凝結スキームで過大な雲を評価することにつな がり、予報に悪影響を与える可能性がある。

この問題を解消するため、新 MSM では雲氷の 落下を考慮するようにした。図 4.3.1 の下段は雲 氷の落下を考慮したものであり、中段の画像に見 られた予報時間が進むにつれて画像が白くなる傾 向がなくなり改善しているのがわかる。



図 4.3.1 2004 年 7 月 12 日 03UTC 初期値の(左から) FT=0, 15, 33 における実況と予想衛星画像(赤外)。 (上)実況、(中)雲氷の落下を考慮しない場合、(下)雲氷の落下を考慮した場合。FT は予報時間を示す。

1 原 旅人

² 非静力学MSMで予報した雲物理量を用いて放射伝達 計算を行い、衛星画像の波長で見たときにどのように 見えるかを示したもの。

4.3.2 放射過程における雲量の表現の違いとその 効果

放射過程における雲は、短波の吸収・散乱・反 射、長波の吸収・射出を通じて大気の加熱・冷却 に寄与しているとともに、地表面の熱収支にも大 きく関係している。たとえば、雲が多ければ短波 の吸収・散乱・反射により地表面への短波の到達 量が減少して地上気温は上昇しにくくなり、夜間 は地表面への長波の到達量が増加して地上気温は 下降しにくくなる。

第4.1.1 項で述べたように、新 MSM では放射 過程で用いる雲量の求め方を相対湿度による診断 から部分凝結スキームによる算出に変更する。こ の変更によって雲の分布や雲量が大きく変わり、 その結果、大気の加熱・冷却、地表面への短波お よび長波の到達量の特性も大きく変わる。その効 果は第4.2節の高層や地上の気温の統計検証にも 示されているが、ここではこれらの特性の違いを 事例を通じて紹介する。



図 4.3.2 2005 年 7 月 7 日 09UTC 初期値の FT=18(8 日 12JST)における中層雲量。 (左)現 MSM、(右)新 MSM。



図 4.3.3 2005 年 7 月 7 日 09UTC初期値のFT=18 (8 日 12JST) における地表面への短波放射入射量(W/m²)。 (左) 現 MSM、(右) 新 MSM。



図 4.3.4 2005 年 7 月 7 日 09UTC 初期値の熊谷における地上気温のモデル予報値(実線)、観測値(破線)の 時系列。横軸は予報対象時刻(JST)、縦軸は気温(℃)。(左)現 MSM、(右)新 MSM。







図 4.3.6 現 MSM(破線)と新 MSM(実線)の長波放射入射量の観測(館野)との比較。 横軸は予報対象時刻(JST)、縦軸の単位はW/m²。(左) ME、(右) RMSE。

図 4.3.2 は 2005 年 7 月 7 日 09UTC初期値の FT=18 (8 日 12JST) における現MSMと新MSM の放射計算に用いた中層雲量を示したものである。 現MSMは雲量 1 の濃密な雲を広い範囲に表現し ており、雲量が 0 の部分はほとんどない。それに 対して、新MSMは雲が全体的に少なくなり、雲 量 0 の晴天域の領域も広く、雲の有無について現 MSMよりコントラストがついている。図 4.3.3 は 同じ予報時刻の地表面への短波放射入射量を示し たものであるが、雲が少なくなったことに対応し て、現MSMより新MSMの方が短波放射入射量が 大きい領域が広がっている。例えば、図 4.3.3 で 関東付近を見てみると、現MSMでは青い領域が 広がり、新MSMに比べて 200~300W/m²程度、 短波放射入射量が少ない。

その表現の違いを地上気温の時系列によって見 てみる。図 4.3.4 は同じ初期値の熊谷における地 上気温のモデル予報値と観測値(アメダス)の時 系列を現 MSM、新 MSM それぞれについて示し たものである。 現 MSM では8日午前の短波放射入射量の不足 に対応して気温の上昇が十分ではないのに対し、 新 MSM では観測によく合っている。また、7日 ~8日の夜間に注目すると、気温が下降する様子 が新 MSM ではほぼ実況どおり表現されているの に対し、現 MSM では気温が十分に下がっていな い。これらは雲が過多であるために短波放射入射 量が少なくて日中に気温が上がらず、夜間は長波 放射入射量が過剰になって冷却されにくかったた めであると考えられる。

この事例でも見られるように、従来用いていた 相対湿度から診断した雲では雲量を過大に評価す る傾向が強く、それが地上気温の日変化が小さい 原因のひとつになっていた。雲量の求め方を変更 することで新 MSM では地上気温の日変化が大き くなって実況に近くなることは、第4.2 節の統計 検証でも示したとおりであるが、従来に比べ雲の 表現が適切になったことを端的に見るため、地表 面における短波放射量についてモデルと観測の比 較を行った。

図 4.3.5 は観測(全国 65 官署の全天日射量の観 測)に対するモデルの短波放射入射量(前1時間 平均)の平均誤差(ME)、平方根平均二乗誤差 (RMSE)を予報対象時刻(JST)ごとに示したもの である(統計期間は 2005/12/24~2006/1/12. 2006/7/1~2006/7/20 の暖候期、寒候期それぞれ 20日間)。この図からわかるように現MSMでは観 測に対して大きな負バイアスがあるが、新MSM ではこのバイアスを大きく縮小しており、RMSE でもその改善がわかる。長波についても観測を行 っている館野のデータと比較してみると(図 4.3.6)、現MSMで生じていた正バイアスが負バイ アスになる特性の変化はあるものの、そのバイア スの大きさ(絶対値)は新MSMの方が小さくな っており、RMSEも縮小している。このように観 測と比較した地表面への短波放射入射量・長波放 射入射量の精度は新MSMで改善しており、これ は雲の表現がより適切になったことを示している といえる³。

一方、雲の有無にコントラストがつきやすくなった結果として、モデルが雲の分布の予報を大きくはずすと、従来以上に地上気温の予報に大きく影響する。地上気温を利用する際には、地上面 GPV に配信されている雲量の分布もあわせて検討することが重要である。

³長波については晴天放射過程の改良による改善の効果 もある。

4.4.1 メソ数値予報モデルの湿潤過程

メソ数値予報モデル(MSM)の湿潤過程は、格子ス ケールの予報変数によって雲と降水を陽に表現する 雲物理過程と、格子スケールより小さな積雲対流を モデル化して格子スケールの予報変数への影響を評 価する対流パラメタリゼーションから構成される。

雲物理過程では雲の発生や雨、雪、あられの生成、 相変化などを扱うことによって、現象を詳細に表現 できる。このため、降水のタイミングや位置、強度 の予想に有利である。雲物理過程の利点を十分に発 揮するためには、モデルの水平格子間隔を個々の雲 組織が解像できる 1~2 km 以下に設定しなければ ならず、現在の MSM の水平格子間隔(5 km)では分 解能が十分でない。このため、MSM の湿潤過程に 雲物理過程だけを用いた場合は、対流が発生して熱 や水蒸気が鉛直輸送されることによる成層状態の安 定化の効率が低く、少数の格子において小さなスケ ールの非現実的な対流が発生することがある。格子

スケールの対流は、過度な凝結によ って少数の格子に降水を過剰に集中 させ、予測精度を低下させる原因と なる。

対流パラメタリゼーションを用い れば、格子スケールで飽和していな くても雲や降水が生成される。この ため、格子スケールの不自然な対流 が発生する前に、パラメタライズし た対流によって不安定な成層状態を 高い効率で解消することができる。 局地的に発生する不自然な上昇流の 発生を抑え、降水の過剰な集中を抑 制して予測精度を向上させるため、 MSM では雲物理過程とメソモデル 向けに開発された対流パラメタリゼ ーションである Kain-Fritsch (KF) スキームを併用している。

ここではメソ数値予報の予報時間 の延長と合わせて予定しているモデ ルの変更(第4.1節)によって、特 に降水の予測に大きな影響がある事 例を紹介する。

4.4.2 メソ数値予報モデルによる降 水予測の問題点

現在の MSM は、次のような実況 との対応が悪い不自然な降水を予測

- (1) 地形や海陸の地表面粗度の差への過度な応答に よる降水
- (2) 少数の格子への対流の集中による過剰な降水

図 4.4.1 に(1)の例を挙げる。現在の MSM による 降水予測を示す(b)では、風上側の九州と四国の南西 部における海上から陸上への境界付近において、レ ーダー・アメダス解析雨量(a)には見られない地形に 沿った降水が分布し、風下側では実況に見られる降 水が計算されていない。この事例について、対流パ ラメタリゼーションを併用せず、雲物理過程だけで 降水を計算すると、(c)のように地形に沿った降水の 分布が解消され、実況に近い線状の組織が明瞭とな る。この結果から、(1)の過度な応答は対流パラメタ リゼーションに起因することがわかる。対流パラメ タリゼーションとして KF スキームと同じ条件に基 づいて対流の発生の有無を判定する Grell スキーム を併用した場合にも(d)のように(1)の傾向が現れる ことから、過度な応答を抑制するためには対流が発 生する条件の改良が必要であると考えられる。



図 4.4.1 2006 年 6 月 26 日 18 UTC から 21 UTC までの 3 時間降水量 [mm/3h]。(a) レーダー・アメダス解析雨量、(b) 現在の KF スキーム (ル ーチンの MSM) による予想降水量、(c) 雲物理過程だけを用いた場合 の予想降水量、(d) Grell スキームによる予想降水量。モデルの降水量は、 初期時刻 2006 年 6 月 26 日 06 UTC からの 15 時間予想。

することがある。

¹ 成田 正巳



図 4.4.2 2005 年 7 月 8 日 09 UTC から 12 UTC までの 3 時間降水量 [mm/3h]。(a) レーダー・ アメダス解析雨量、(b) 現在の MSM による予 想降水量、(c) 修正した KF スキームを組み込 んだ MSM による予想降水量。モデルの降水量 は、初期時刻 2005 年 7 月 7 日 03 UTC からの 33 時間予想。

なお、図 4.4.1(c)に示した雲物理過程だけを用い て計算した降水は、実況(a)と比べて分布が狭い。ま た、大分県から高知県にかけて見られる 100 mm/3h を超える降水の集中は、実況(a)と比べて過剰である。 この傾向は、第 4.4.1 項で述べたように、水平格子 間隔 5 km の MSM で対流パラメタリゼーションを 併用しないで降水を計算した場合に頻出する問題で ある。

一般に(2)は、総観スケールでは弱い沈降場にある が下層が湿っていて成層状態が不安定な格子や、格 子スケールで強い対流が起こっている格子で発現す ることが多い。図 4.4.2 に(2)の例を挙げる。現在の KF スキームを組み込んだ MSM による降水量(b)と、 対応する時刻におけるレーダー・アメダス解析雨量 (a)を示す。実況(a)では東京都、神奈川県、山梨県の 境界に8 mm/3h の降水があり、神奈川県と静岡県 の境界には5 mm/3h 以下の弱い降水がある。これ に対して、現在の KF スキームを組み込んだ MSM の予測(b)では、東京都と山梨県の境界に107 mm/3h の強い降水を予測し、さらに神奈川県から静岡県に かけての沿岸部に20 mm/3h を超える降水を予測し ており、いずれも実況(a)と比べて過剰である。

現在の MSM に組み込まれた KF スキームでは、 持ち上げ凝結高度(LCL)まで断熱的に上昇させた 気層の仮温度に摂動を加えた値が格子スケールにお ける周囲の大気の仮温度より高ければ、その気層は 浮力を持つとして格子スケール以下の対流を発生さ せる。摂動の大きさは、LCL における格子スケール の上昇流の大きさに基づいて決定している。この方 法では、下層が湿っているため LCL が低く、さら に格子スケールの強い上昇流が LCL より上層で発 生する場合に摂動が小さくなり、パラメタライズし た対流が発生する条件を満たさなくなることがある。 このため、不安定な成層状態を対流パラメタリゼー ションによって効率的に解消することができず、少 数の格子に降水が集中する。

このような問題の解決を狙って、KF スキームで 対流の発生を判定するトリガー関数に、従来の格子 スケールの上昇流に基づく摂動に加えて相対湿度に 依存する摂動を与えるスキームを実装した。

4.4.3 対流パラメタリゼーションの修正の効果

図 4.4.2(c)に、トリガー関数を修正した KF スキ ームを組み込んだ MSM による降水予測を示す。実 況(a)及び現在の KF スキームを組み込んだ MSM に よる予測(b)と比べると、(c)では位置にずれがあるも のの降水量の極値が 19 mm/3h に減少し、量的には 実況に近い降水を計算するようになった。

次に、KF スキームの修正によってパラメタライズした格子スケール以下の対流雲の表現がどのよう

に変わるかを調べるため、図 4.4.3 に雲頂高度と雲 底高度の分布を示す。対流スキームによる雲が存在 しない領域では、雲底高度と雲頂高度がともにゼロ になっている。雲底高度の分布を比べると、トリガ ー関数を修正した KF スキーム(c)ではパラメタライ ズした対流が発生する条件が緩くなったため、現在 の KF スキーム(a)よりも雲が存在する面積が広く、 様々な高度から対流が発生して不安定な成層状態を 効率的に解消していることがわかる。一方、雲頂高 度の分布によると、現在の KF スキーム(b)ではパラ メタライズした対流雲が 8,000 m 付近の高度まで達 しているのに対して、修正した KF スキーム(d)では 雲頂が 6,000 m 付近までしか達していない。これは、



修正した KF スキームでは成層状態がより効率的に

安定化されたため、パラメタライズした対流によっ

て解消しようとする不安定エネルギーが小さくなり、

したがって対流雲が活発に下層の熱や水蒸気を上層

に与える影響を調べるため、図 4.4.4 に 2005 年 7

月6日00 UTC から8日21 UTC までの24回の予

測について、現在のKFスキームを組み込んだMSM

とトリガー関数を修正した KF スキームを組み込ん

だ MSM による気温の鉛直プロファイルのゾンデ観

測に対する平均誤差を示す。修正した KF スキーム

では 925 hPa の気温が観測より 0.5℃近く高く、現

トリガー関数の修正が気温の鉛直プロファイル

に輸送する必要が無くなったためである。

図 4.4.3 2005 年 7 月 8 日 12 UTC の雲底高度 [m] と雲頂高度 [m] の分布。(a) 現在の KF スキームによる雲 底高度、(b) 現在の KF スキームによる雲頂高度、(c) 修正した KF スキームによる雲底高度、(d) 修正した KF スキームによる雲頂高度。初期時刻 2005 年 7 月 7 日 03 UTC からの 33 時間予想。



図 4.4.4 気温の鉛直プロファイルの平均誤差
 [℃]。現在の KF スキームによる気温(破線: CNTL)、修正した KF スキームによる気温(実線: TEST)のゾンデ観測との比較。モデルの気温は2005年7月6日00 UTCから8日21 UTCまでの24回の予測。

在の KF スキームの 0.3℃弱と比べて大きな正バイ アスが見られる。逆に、700 hPa より上層では修正 した KF スキームによる気温は負バイアスが大きい ことがわかる。以上の結果は、修正した KF スキー ムでは過度な凝結を抑制したことにより潜熱の解放 による格子スケールの加熱が小さくなったことと、 パラメタライズした対流雲の雲頂が低くなって補償 下降流による格子スケールの昇温が顕著になる高度 が低くなったことを反映していると考えられる。

4.4.4 今後の検討課題

対流の発生を判定するトリガー関数に加える摂 動の大きさは、物理的な考察から値を決定すること ができないパラメータに依存する。このパラメータ を大きくして摂動を大きくすると、対流パラメタリ ゼーションによって格子スケールの不自然な対流を 抑制する効果は大きくなるが、同時に下層の気温の 正バイアスが大きくなってしまう。また、地形や海 陸の地表面粗度の差に対する降水の過度な応答を抑 制するためには、上昇流に基づく摂動を小さくして、 相対湿度に依存する摂動を大きくすることが効果的 であるが、この方法では下層の気温の正バイアスを さらに大きくしてしまう。摂動の大きさを適切に設 定し、対流パラメタリゼーションの効果を最適化す るため、統計的な検証に基づくチューニングを進め ている。

降水の過剰な集中の問題を解決するためには、対 流パラメタリゼーションの改良のほかに、雲物理過 程における雨の落下の計算方法や拡散による水物質 の過剰な集中の抑制を見直すことも検討しなければ

ならない。また、気温の鉛直プロファイルは、放射 過程との組み合わせでバイアスが変わる可能性があ る。個々のスキームの改良だけでなく、様々なスキ ームを結合したときの効果を調べることにより、 MSM の予測精度の向上を目指して開発を進めなけ ればならない。

4.5 GPV利用上の注意点¹

4.5.1 配信プロダクトの仕様

2006年3月のシステム更新時にMSMは水平解像度 が10kmから5kmに、鉛直層数が40層から50層に²、 予報頻度も1日4回18時間予報から1日8回15時 間予報へと変更になった。この更新後のメソ数値予報 GPVについては、藤田(2005)に解説されている。

2007 年に予定されている更新では、防災気象情報 支援の更なる強化を目的として、03,09,15,21UTC 初 期値の予報について、予報時間を15時間から33時間 に延長する。MSM ガイダンスに関しては、新規に24時 間最大降水量ガイダンス等の作成を開始し、また長距 離飛行用飛行場予報(TAF-L)ガイダンスを RSM から MSM を利用した作成手法に変更する(第1.2.2項)。

配信されるメソ数値予報地上GPV・上層GPVデータの仕様の変更は、03,09,15,21UTC初期値の予報時間が15時間から33時間に延長されるのみである。航空用GPVには、鉛直速度と積乱雲雲頂高度が新規に追加される。変更後の仕様については、第1.2節の表1.2.1を参照頂きたい。但し、これは東日本アデスへの配信プロダクトについては2007年度末の西日本アデス更新時まで変更はない(藤田(2004)の表3.1.1³)。

4.5.2 利用上の留意点

数値予報 GPV データを利用する上での全般的な留 意点については永田・萬納寺(1994)に、メソ数値予報 については永田(1994)や藤田(2005)にもまとめられて いるので、適宜参照頂きたい。

今回の更新では予報時間が延長されるが、モデル解 像度や計算領域などに変更はないので、空間分解能や 地形の表現に起因する限界については従来の解釈と 違いはない。一方で、第4.1節に述べられているように、 MSM の物理過程等の改良に伴う予報特性への影響を きちんと把握しておくことが利用上重要となる。

モデルの改善に伴う予報特性の変化についての詳細は第4.1~4.4節を参照頂きたい。ここでは、モデルの改善が数値予報GPVに与える影響について簡単に述べる。積雪面での熱容量の扱いの改良により地上GPVの気温の下がりすぎが改善されている(第4.1.2項(3))。また、放射過程に関する改良は気温と雲の特性に影響を与える(第4.1.2項(6))。放射過程での雲量の診断方法の変更により、雲量はコントラストのより強い分布となる(第4.3.2項)。地上GPVの全雲量・上層雲量・ 中層雲量・下層雲量及び上層GPVの各層雲量として、 この新しい雲量が配信されるので注意が必要である。ま た、この変更で下向き短波放射量が大幅に改善し、地 上 GPV の気温の日変化も明瞭になり、より適切に表現 される。この変更と晴天放射過程の改善により、500hPa 以下で上層 GPV の気温の正バイアスが軽減される。第 4.1.2 項(7)に述べられている雲物理過程に新規に導入 される雲氷落下スキームは上層の雲氷の蓄積を軽減す る(第 4.3.1 項)。上層 GPV の雲水量は、予報されてい る雲水と雲氷の総和であるため、従来は予報時間が進 むにつれて上層で値が大きくなっていた傾向が大幅に 改善される。また、Kain-Fritsch スキームのトリガー関 数の改良により、従来の地上 GPV の降水量にみられた 格子スケールの対流による過剰な降水や地形や地表面 粗度に過度に応答した降水が軽減される(第 4.4 節)。

次に初期値・境界値の改善が数値予報 GPV に与え る影響について述べる。第4.1.2項(2)に詳述されている ように初期値の作成手法が変更される。これに伴い、瀬 川(2005)に報告されている地上気象要素(風速・気温・ 露点温度)の予報初期の異常なバイアスがなくなる。地 上GPVの風速、気温、相対湿度の予報初期のバイアス も改善される。境界値については、これまでは 03,15 UTC 初期値で更新され、初期値が進む毎に境界値の 精度は悪化していた。このことによる MSM の降水予報 精度の悪化についても検証されている(第4.2.4項)。境 界値が RSM から GSM へと変更され、更新頻度が1日 2 回から4 回となることが計画されているため、初期値に よる降水予報精度の違いは小さくなるだろう。これは、地 上 GPV の降水量の精度に反映される。

以上のことは、MSMをもとに作成している航空用の 国内悪天GPVや毎時大気解析4のプロダクトにも当ては まるので、注意が必要である。但し、国内悪天GPVの雲 水量は、上層GPVと異なり雲氷は含まれていないので、 従来と大きく異なることはない。

参考文献

- 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.
- 永田雅, 1994: メソスケール現象と数値予報. 平成6年 度数値予報研修テキスト数値予報課報告・別冊第 41号 合併号, 気象庁予報部, 112-145.
- 永田雅,萬納寺信崇,1994:利用上の留意点.平成6 年度数値予報研修テキスト数値予報課報告・別冊 第41号 合併号,気象庁予報部,97-111.
- 藤田司,2004: メソ数値予報と応用プロダクト. 平成16 年度数値予報研修テキスト数値予報課報告・別冊 第41号 合併号,気象庁予報部,112-145.
- 藤田司,2005: メソ数値予報. 平成17年度数値予報研 修テキスト,気象庁予報部,66-67.

¹本田 有機

² 鉛直解像度は、40層(層の厚さ40~1180m)から50層(層の厚さ40~904m)に変更されている。

^{3 2006} 年 3 月より予報時間は 15 時間に変更されている。

⁴ 毎時大気解析の第一推定値にはMSMの予報値が用いられている。