

平成 19 年度数値予報 研修テキスト

「新しい数値予報モデルの特性」

(数値予報課)

平成 19 年 11 月

November 2007

気 象 庁 予 報 部

はじめに¹

平成 18 年 3 月 1 日に運用を開始した数値解析予報システムにおける数値予報の改善予定のうち、今年度は次の主要な 4 項目を実施する計画である。

- ① メソ数値予報モデル（MSM）の予報時間の延長（1 日 8 回のうち 4 回を 15 時間から 33 時間へ）
- ② 全球モデル（GSM）の高解像度化（水平解像度を 60km から 20km へ、鉛直の層の数を 40 から 60 へ）
- ③ 週間アンサンブル予報モデルの高解像度化（水平解像度を 120km から 60km へ、鉛直の層の数を 40 から 60 へ）と初期摂動作成法の変更
- ④ 台風アンサンブル予報の運用開始（メンバ数 11 のアンサンブル予報を新たに）

これらはいずれも防災気象情報の基盤を構成する重要な資料の改良に関わるものであることから、数値予報課では重点的に開発を進めてきた。その結果、5 月 16 日に、まず、モデルの改良と合わせて MSM の予報時間の延長を実現した。これによって、防災気象要素の時系列予測資料と航空用予測資料を時間的に一貫したモデルで作成できるようになり、精度の向上とあいまって、より使いやすく信頼性の高い製品を提供している。次に、5 月 30 日には、1 日 4 回、5.5 日先までの台風アンサンブル予測の試験運用を開始した。平成 20 年の早い時期に本運用を開始し、事例を蓄積して性能を評価し、平成 21 年度に予定されている台風 5 日予報の発表開始に備える。そして、11 月 21 日には、全球モデル（GSM）を高解像度化するとともに、領域モデル（RSM）と台風モデル（TYM）を廃止し、これまで RSM と TYM が果たしてきた役割を全球モデルに統合することにより、モデルの構成を整理する。これによって、一般予報用の予測資料を時間的に一貫したモデルで作成できるようになるほか、台風の数に関わりなく全ての台風について 1 日 4 回、数値予測資料が提供できるようになる。また、モデルの数が減ることで技術開発と維持管理のエネルギーを少数のモデルに集中して効率を高められるメリットもある。さらに、同時に実施する週間アンサンブル予報モデルの改良によって、週間予報用予測資料の改善を図る。

以上のモデル等の変更の内容についてはすでに昨年度の数値予報研修テキストで解説されているので、必要に応じて参照願いたい。今年度の数値予報研修テキストでは、系統的な検証結果に基づいて、新しい全球モデルとメソモデルの予測精度と特性を詳しく解説している。また、これらのモデルの予測値を用いたガイダンス等応用製品の予測精度と特性についても詳しく解説した。本テキストによって、プロダクトについての理解が深まり、状況に応じてその有効性と限界を踏まえた活用が図られ、適時適切な防災気象情報等の作成に役立つことを願っている。

¹ 永田 雅

新しい数値予報モデルの特性

目 次

はじめに

第 1 章 高解像度全球モデル

1.1	変更の概要	1
1.2	全般検証	5
1.3	台風	11
1.4	地上気温の検証	15
1.5	降水	21
1.6	雲・放射	24
1.7	留意すべき予報特性	27

第 2 章 メソ数値予報モデル

2.1	モデルの変更点の概要	29
2.2	2007年5月に更新されたモデルの統計検証	32
2.3	高解像度全球モデルを側面境界とする メソ数値予報モデルの統計検証	38
2.4	高解像度全球モデルを側面境界とする メソ数値予報モデルの降水予報の例	46

第 3 章 アプリケーション

3.1	ガイダンス類の概説	48
3.2	降水確率、平均降水量、最大降水量ガイダンス	50
3.3	気温ガイダンス	60
3.4	風ガイダンス	67
3.5	天気ガイダンス	73
3.6	その他の天気予報、防災気象情報支援ガイダンス	76
3.7	航空悪天GPV	82
3.8	航空気象予報ガイダンス	87
3.9	お天気マップ	94

第 4 章 トピックス

4.1	毎時大気解析の高度化	98
4.2	ドップラーレーダーデータの利用	102
4.3	衛星データ同化の最近の開発	104
4.4	最近の全球モデルの成績	107

付録 A	統計的検証で利用される代表的な指標	110
------	-------------------------	-----

第1章 高解像度全球モデル

1.1 変更の概要¹

全球モデル(GSM)は、2007年11月に、従来のTL319L40の解像度から領域モデル(RSM)の解像度と同程度のTL959L60へ高解像度化され、RSMと台風モデル(TYM)に取って代わる(表1.1.1)。第1章では、新しく運用が始まるGSM(以下、20kmGSMと呼ぶ)の予報特性について解説を行う。なお、ここで紹介する予報特性は、2004年8月及び9月(夏季)と、2005年12月及び2006年1月(冬季)を対象に実施された性能評価試験に基づいている。

1.1.1 20kmGSM導入のねらい

2007年11月に行われる数値予報モデル構成の変更では、20kmGSMの導入により、RSMとTYMが廃止される。これにより、RSMとTYMにあった側面境界条件の技術的な難しさや、利用上の特別な留意の必要(GSMとの予報特性や解像度の違いから生じる不自然な表現など)から解放されるようになる。特に、側面境界付近から移動してくる動きの速い台風や、複数の台風が相互作用する場合など、RSMやTYMでは予報精度に影響する場合があったが、全球モデルでは側面境界に関わるこれらの問題は生じない。また単一モデル(20kmGSM)の使用により、短期から週間予報まで、均

質な予報特性をもつ数値予報プロダクトを利用することができるようになる。第1.2節以降に示すように、20kmGSMはRSMと比較して多くの点で優れた予報性能を示しており、短期予報における総合的な予報精度の向上が見込まれる。さらに、モデル開発の観点からは、ひとつのモデルの開発・改良を行えばよくなるため、開発資源の効率的・集中的な活用が可能となる。このような予報モデルの集約・統合は、2006年3月に行われた数値解析予報システム(NAPS)の大幅な能力の増強によって可能となっている。

しかしながら、RSMとTYMの廃止により、これまで3つのモデルを比較することで得られていた、台風の進路予報の確からしさに関する情報は失われることになる。このため、台風予報に新たにアンサンブルの手法を導入し、進路予報の確率的な扱いや複数シナリオの検討が可能となるようにした(山口 2006)。また、現状では20kmGSMの台風進路予報の精度が従来のGSM(以下、60kmGSMと呼ぶ)に比べるとやや劣っているため、60kmGSMも当面の間、台風発生時には並行して運用し、台風の進路予報を支援することになっている。従来TYMで行ってきた強度の予報の支援に関しては、20kmGSMにより行う。

表1.1.1 RSMとGSMのモデル解像度・下部境界条件

	領域モデル(RSM)	旧全球モデル(60kmGSM)	新全球モデル(20kmGSM)
水平解像度	約20km	約60km (0.5625度)	約20km (0.1875度)
鉛直解像度*	40層 最上層は10hPa 最下層は997.5hPa	40層 最上層は0.4hPa 最下層は995.0hPa	60層 最上層は0.1hPa 最下層は998.5hPa
エンベロープ山	あり	なし	なし
土壌温度	予報する(最下層を除く) 初期値は前回予報値 (下2層を除く)	予報する 初期値は前回予報値	予報する 初期値は前回予報値
土壌水分	予報しない (気候値を適用)	予報する 初期値は気候値	予報する 初期値は気候値
積雪被覆	予報しない 初期値は全球積雪深解析 (日本域はアメダス値も使用)	雪水当量を予報する 初期値は全球積雪深解析	雪水当量を予報する 初期値は全球積雪深解析 (日本域はアメダス値も使用)
海面温度	0.25度格子海面温度解析 (予報期間中変化しない)	1.0度格子海面温度解析 (予報期間中の季節変動有り)	0.25度格子海面温度解析 (予報期間中の季節変動有り)
海水分布	解析値 (予報期間中変化しない)	気候値 (予報期間中の季節変動有り)	解析値 (予報期間中の季節変動有り)

*鉛直解像度の欄の「最下層」は、地表気圧が1000hPaのときの最下層気圧(フルレベル気圧)をあらわしている。

¹ 北川 裕人

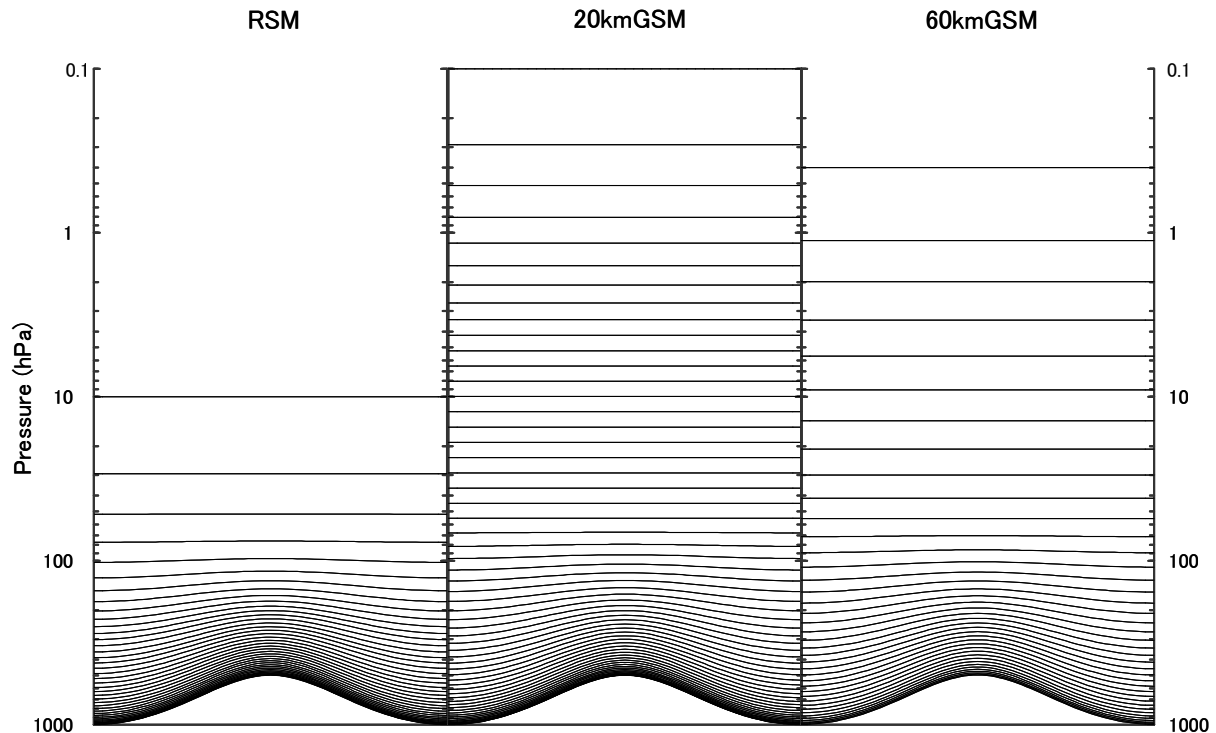


図 1.1.1 RSM と 20kmGSM、60kmGSM の鉛直層の配置。各鉛直層のフルレベル気圧(層の代表気圧、層のおよそ中心に相当する)の位置を水平の線で示してある。縦軸は気圧(hPa)。

1.1.2 20kmGSMの概要

20kmGSMについては、平成18年度数値予報研修テキストに詳しく紹介している(北川 2006、など)。データ同化システムと予報モデルの概要、検証結果や予報特性についてはそちらも参照していただきたい。ただし、2007年11月に現業化する20kmGSMでは、4次元変分法の計算時間を確保するために、サイクル解析におけるデータ打ち切り時刻を20分前倒しすることにした。また、台風の進路予報精度の向上を目的に、台風ボーガスの改良を行っている(第1.3節)。昨年度の数値予報研修テキストで紹介したものから異なっているのは、この2つである。

以下では、モデルの解像度と下部境界条件について、補足して解説する。

1.1.3 モデルの解像度

表1.1.1にRSMと新旧のGSMについて、モデル解像度と下部境界条件を比較してまとめた。まず、RSMと同等以上の機能を20kmGSMに持たせるために、20kmGSMの水平・鉛直解像度はRSMと同程度のものになっている。すなわち、水平の解像度はおよそ20kmであり、鉛直層の数や配置は対流圏ではRSMとほぼ同じである(図1.1.1)。成層圏では20kmGSMの

鉛直解像度がRSMや60kmGSMよりも高くなっている。モデルで表現される地形や海陸分布についても、20kmGSMはRSMとほぼ同様の表現となるように設定されている(北川 2006)。ただし、RSMで採用されていたエンベロープ山(萬納寺 1994)は、20kmGSMには導入していない。このため、20kmGSMの地形標高はRSMよりも山岳域を中心に、日本域で低くなる傾向がある。エンベロープ山は、本来、低い水平解像度のモデルにおける地形による効果を人為的に大きくするものであるが、効果の大きさやその得失などは完全に明確になっているわけではない。図1.1.2は、20kmGSMにおいて地形をエンベロープ山にした場合の、降水予報に与えるインパクトである。降水量の絶対値からすると、エンベロープ山の効果はそれほど大きくないと言えるかもしれない。また、モデルでは地形性の降水が観測に比べて風上側に寄って表現される傾向が見られるが、エンベロープ山を使うと降水域はさらに風上側(海上)へシフトして予報されている。地形性降水が風上側に寄りすぎて表現される傾向は、RSMにも同様に現れており、いくつかの事例について20kmGSMを用いて調査した結果では、エンベロープ山を採用したことによるこのようなデメリットも確認されている。

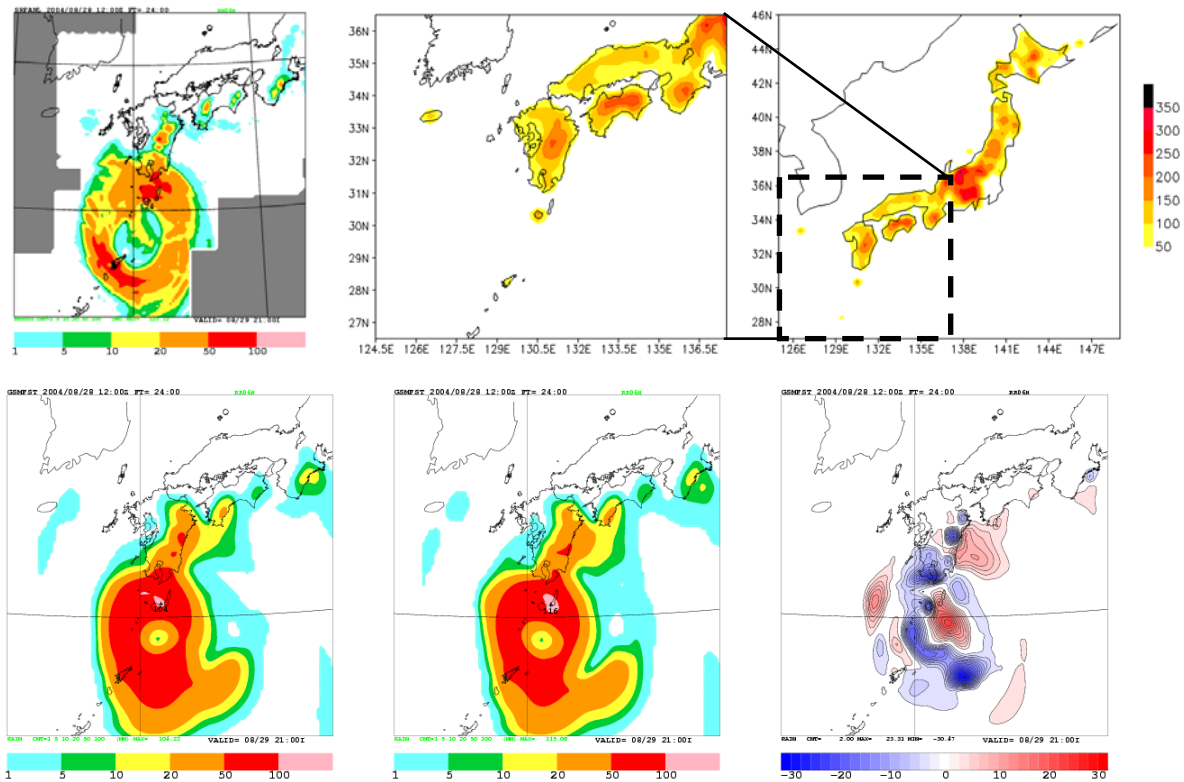


図1.1.2 降水予報におけるエンベロップ山の効果(20kmGSMによる表現)。上段は(左)解析雨量(mm)、(右・中)エンベロップによる標高かさ上げの大きさ(m)と西日本・南西諸島付近を拡大したもの。下段は(左)エンベロップ無しの場合の降水量、(中)エンベロップ有りの場合の降水量、(右)有りから無しを引いた差。2004年8月28日12UTC初期値の24時間予報(2004年台風第16号の事例)による前6時間降水量(mm)。ただし、予報モデル(20kmGSM)はどちらもDCAPE積雲対流トリガーを改良(第1.5節)したモデルを使用している。

1.1.4 下部境界条件

次に20kmGSMの下部境界(地表面)の扱いについて、簡単に解説する。モデルの下部境界条件については、平成18年度数値予報研修テキストにも記述がある(北川 2006)ので、あわせて参照して欲しい。

GSMは、陸域では土壌の水分量や積雪・融雪を計算しており、予報期間を通してこれらの量が一定であるRSMとは異なる。つまり、降水により地面や植生が湿ったり、逆に蒸発によって乾燥したり、また、降雪や融雪により積雪被覆の状況が変化したりする効果を、GSMでは適切に考慮することができる(第1.4節)。

海域については、20kmGSMに用いられる海面温度(SST)解析値が、60kmGSMで使用していた数値予報課作成SST解析値(NPDSST、1.0度格子)から、RSMやTYMなどで利用される、海洋気象情報室作成の高解像度SST解析値(MGDSST、0.25度格子、栗原ほか 2006)へ変更される。このSST解析値の変更により、台風の中心示度がやや浅く表現されるようになることが確認されている(図1.1.3)。ただし、台風強度の予報に関しては予報モデルの物理過程の取り扱いなどともあ

わせて考える必要があり、SSTの違いだけで議論することはできない。SST解析値変更の影響は、日本域における基本的な予報特性(海面更正気圧、高度場など)や、地上の気温・風、降水の成績に関しては、モデル間(20kmGSMとRSM)の違いに比べると総じて小さかった(RSMやTYMにおけるSST変更のインパクトは北川 2005を参照)。

1.1.5 まとめ

20kmGSMは、これまで改良や調整を行ってきた結果、RSMやTYMの機能・役割を担えることが確認されたため、2007年11月にRSMとTYMを廃止して現業化されることになった。次節以降に示すように、20kmGSMは多くの点でRSMよりも優れた予報性能を示しており、20kmGSMの導入により天気予報業務の改善が期待できる。また、20kmGSMの優れた予報精度は、側面境界を通じてメソ数値予報モデル(MSM)の予報精度の向上にも寄与するであろう(第2章)。一方、20kmGSMは台風の進路や強度の予報について、さらなる精度の向上が要請されており、また、降水の予報に

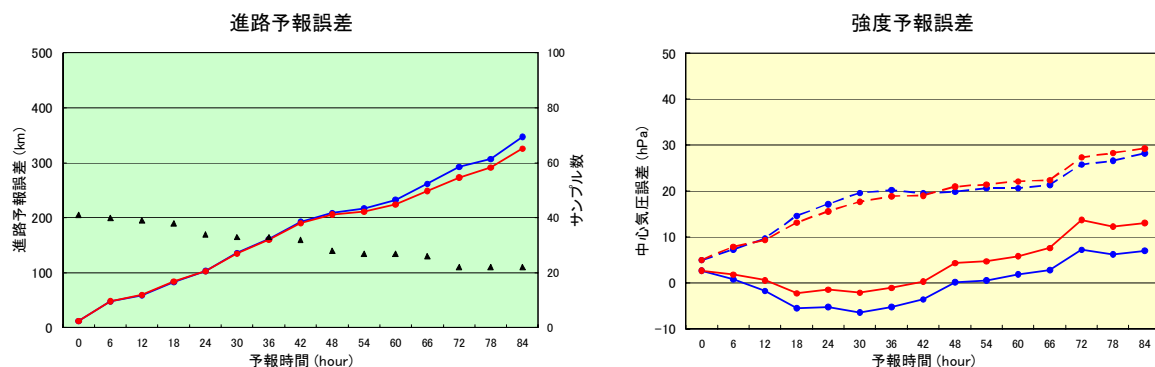


図1.1.3 SST解析値の変更による台風予報への影響(2004年台風第11号～第18号の平均)。(左)進路予報(km)と(右)中心気圧(hPa)の平均誤差(実線)、平方根平均二乗誤差(破線)。青線が数値予報課作成のSST解析値(NPDSST)、赤線が海洋気象情報室作成の高解像度SST解析値(MGD SST)を使用した場合の予報。ただし、初期値はどちらもNPDSSTを用いたデータ同化サイクルで作成されており、また20kmGSMは開発途中のものが使用されている。

ついても、強い降水の表現が十分でない等、改善の余地がある(第1.5節)。このため、今後も引き続き物理過程を中心にモデルの改良を行い、予報精度の一層の向上に努める必要がある。20kmGSMの利用に当たっての一般的な留意事項については第1.7節にまとめているので、参考にしていただきたい。

参考文献

- 北川裕人, 2005: 全球・領域・台風モデル. 平成17年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 38-43.
- 北川裕人, 2006: モデルの概要. 平成18年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 7-10.
- 栗原幸雄, 桜井敏之, 倉賀野連, 2006: 衛星マイクロ波放射計、衛星赤外放射計及び現場観測データを用いた全球日別海面水温解析. 測候時報, 73, 特別号, S1-S18.
- 萬納寺信崇, 1994: 数値予報モデル. 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, 気象庁予報部, 52-89.
- 山口宗彦, 2006: 台風アンサンブル予報. 平成18年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 49-54.

1.2 全般検証¹

1.2.1 はじめに

2007年11月より本運用を開始した高解像度全球モデル（以下、20kmGSM）は、これまで領域モデル（以下、RSM）が担ってきた日本付近の予報の役割と、旧全球モデル（以下、60kmGSM）によって行われてきた全球予報の役割を併せ持つものである。そこで本節では、20kmGSMの日本付近での予報精度を見るために、日本付近の領域において対初期値検証を実施してRSMや60kmGSMと比較した結果と、対ゾンデ検証及び対アメダス降水検証を実施してRSMと比較した結果を報告する。また、20kmGSMの全球予報としての予報精度を見るために、特に北半球領域における対初期値検証の結果を60kmGSMと比較して報告する。

検証の対象とする期間は、2004年夏期（2004年8月1日～9月30日、以下「夏実験」）及び2005～2006年冬期（2005年12月1日～2006年1月31日、以下「冬実験」）である。比較対象となるRSM及び60kmGSMは、2006年9月時点のルーチン仕様のモデルを用いて各検証期間に遡って再実行したものを使用している。これは、実験対象期間以降の同化・予報手法等の改善を各モデルに等しく反映させることにより、純粋にモデル間の差異を調べるためである。

1.2.2 日本付近の予報の対初期値検証(図1.2.2)

日本付近における20kmGSMの予報精度をRSM及び60kmGSMと比較するため、代表的な予報要素である海面気圧、500hPa高度、850hPa気温及び500hPa気温のFT=72（72時間予報。以下同様）まで12時間毎の予報値を、それぞれのモデルの初期値

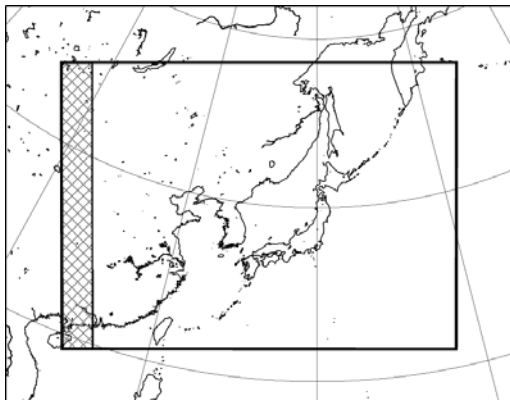


図 1.2.1 対初期値検証を行った領域(黒太線内)。上記の地図全体が RSM の計算領域、そのすぐ内側の太線の四角が検証の計算領域。ただし網掛け部分は海面気圧および 850hPa 気温の検証の対象外とする。

を真値として検証した。ただしRSMの予報対象期間はFT=48までである。これまで短期予報では、FT=48までは主にRSM、それ以降FT=72までは主に60kmGSMが用いられてきており、2007年11月にこれらが20kmGSMに置き換わった。このため本項の検証結果は短期予報の精度と密接に関連する。ここでは初期時刻12UTCの予報についての検証結果を記述する。

日本付近の予報の検証対象とした領域を図1.2.1に示す。図1.2.1の地図全体はRSMの計算対象領域そのものであり、ここから境界付近を除いた黒太線内の領域（海面気圧と850hPa気温については標高の高い西側の網掛け部分も除く）が検証対象領域である。各モデルの初期値および予報値をこの検証対象領域の内部の80km間隔の検証格子に内挿した後、各検証スコアを計算した。

図1.2.2に実験期間（夏実験／冬実験）、モデル、予報時間別の各予報要素の平均誤差(ME)及び平方根平均二乗誤差(RMSE)を示す。両実験期間とも、いずれの予報要素についても20kmGSMのRMSEはRSMよりも大幅に小さい。またMEについても、冬実験の500hPa高度及び500hPa気温において20kmGSMのMEの絶対値がRSMより大きいFTがあるものの、ほとんどの予報要素及びFTで20kmGSMのMEの絶対値がRSMより小さくなっている。また、巻末付録に示すように、RMSEは予報のバイアスに起因するMEとランダムな誤差に相当する σ_e に分離されるが、いずれの予報要素についても20kmGSMのランダム誤差 σ_e はRSMよりも大幅に小さい（図略）。以上のような傾向は00UTCを初期値とする予報の比較においても同様であった（図略）。これらのスコアからは、20kmGSMはRSMよりも予報精度が大きく向上しているといえる。

60kmGSMとの比較では、夏実験・冬実験の500hPa気温及び冬実験の500hPa高度の20kmGSMのMEの絶対値が60kmGSMよりも大きく、またRMSEについても冬実験の500hPa気温のRMSEが60kmGSMよりも大きくなっているが、その他の予報要素及び実験期間については、20kmGSMのRMSEは60kmGSMよりも小さいかほぼ同じである。こうした傾向は00UTCを初期値とする予報の比較においても同様であった（図略）。これらのスコアからは、日本付近の領域において20kmGSMは60kmGSMと比較して概ね精度が向上しているといえる。

1.2.3 全球予報の対初期値検証(図1.2.3)

全球予報における20kmGSMの予報精度を60kmGSMと比較するため、北半球領域（北緯20度

¹ 大河原 斉揚

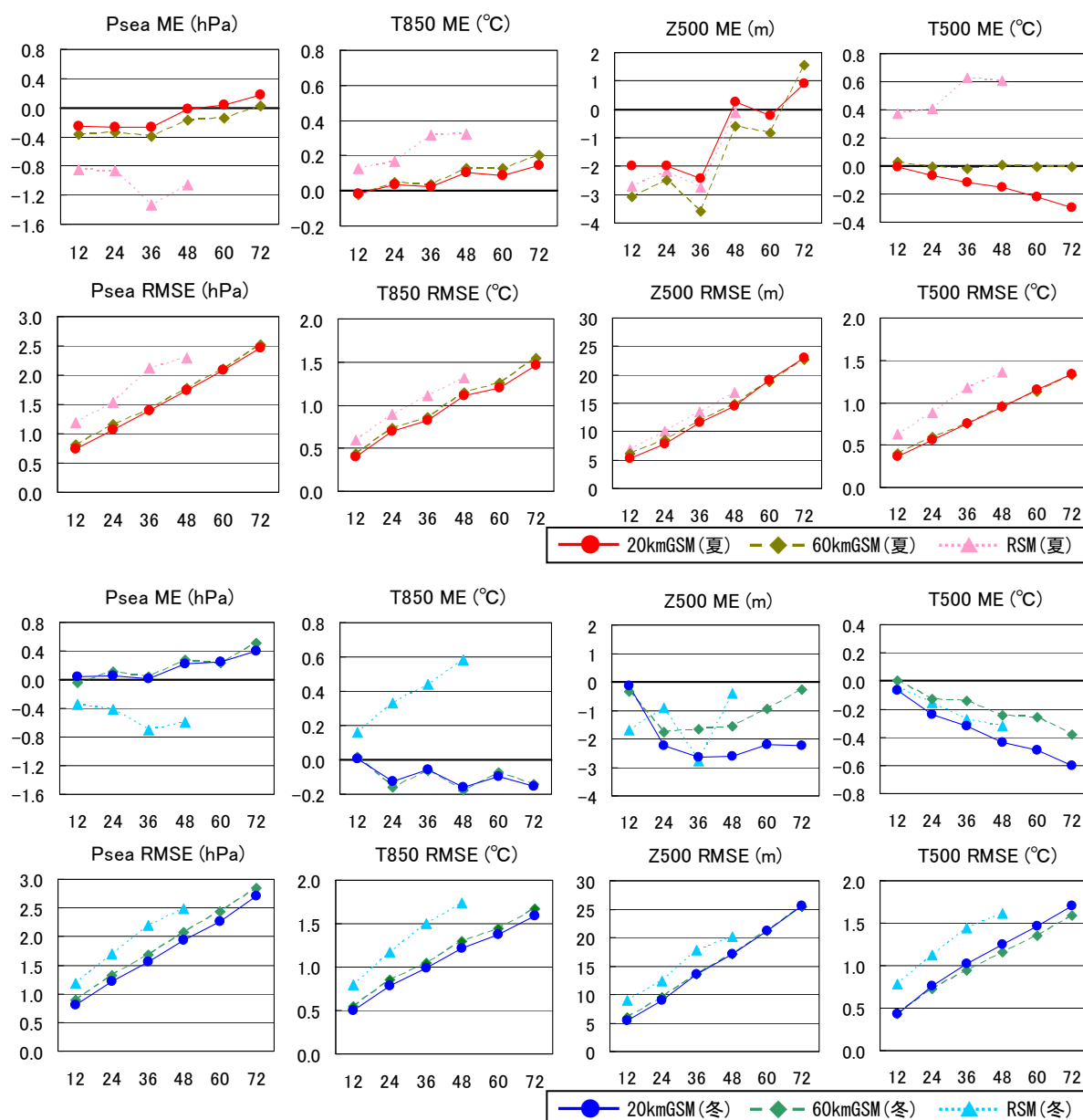


図 1.2.2 日本付近の領域 (図 1.2.1 参照) における 20kmGSM、60kmGSM 及び RSM の対初期値の各スコアの比較。最上段は夏実験の平均誤差(ME)、2 段目は夏実験の平方根平均二乗誤差(RMSE)。3 段目、4 段目はそれぞれ冬実験の ME 及び RMSE。左から順に海面気圧(hPa)、850hPa 気温(°C)、500hPa 高度(m)、500hPa 気温(°C)。グラフの横軸は予報時間 FT (単位: 時間)。●及び実線が 20kmGSM、◆及び破線が 60kmGSM、▲及び点線が RSM。予報の初期時刻は 12UTC。

以北) における海面気圧、500hPa 高度、500hPa 気温の FT=72 まで 12 時間毎の予報値を、それぞれのモデルの初期値を真値として検証した。ここでは両モデルの初期値及び予報値を 2.5 度四方の緯度経度格子における値に内挿し、緯度による各格子の面積の違いを考慮した重みを付けて各検証スコアを計算している。予報の初期時刻は 12UTC である。

図 1.2.3 に実験期間 (夏実験/冬実験)、モデル、予報時間別の各予報要素の ME 及び RMSE を示す。RMSE については、いずれの予報要素においても 20kmGSM の方が 60kmGSM よりも値が小さいかほ

ぼ同等である。ME については、20kmGSM の海面気圧の ME の絶対値が 60kmGSM よりも小さい一方で、500hPa 気温の ME の絶対値は 60kmGSM よりも大きい。ただし、いずれの実験期間、予報要素においても、RMSE に対する ME の寄与は 20kmGSM、60kmGSM とともに小さく、ランダム誤差 σ_e の値は RMSE の値とほぼ等しくなる (図略)。以上のような傾向は 00UTC 初期値の予報についても同様であった (図略)。これらのスコアからは、20kmGSM は 60kmGSM よりも概ね精度が向上しているといえる。

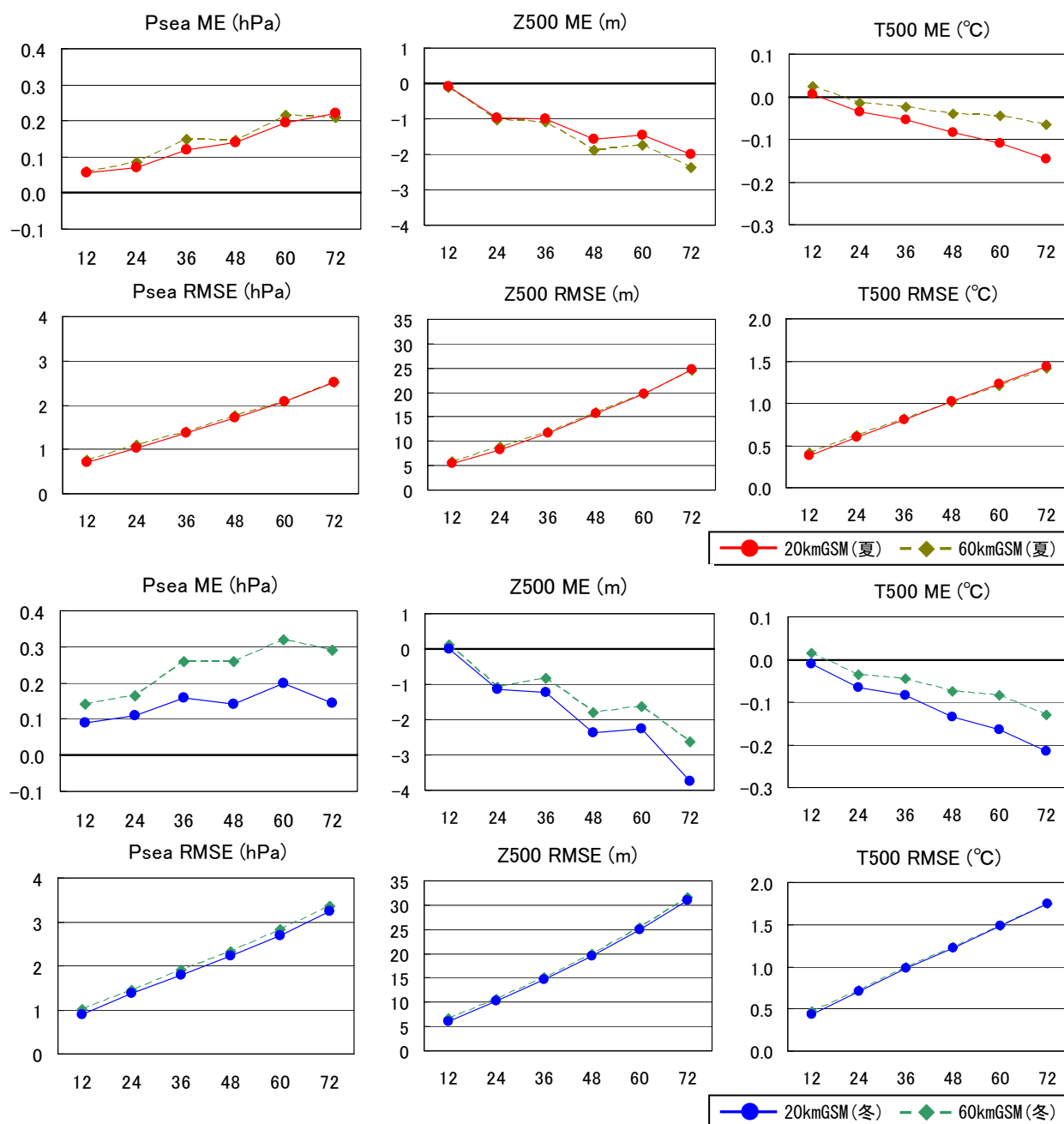


図 1.2.3 北半球領域（北緯 20 度以北）における 20kmGSM と 60kmGSM の対初期値の各スコアの比較。最上段は夏実験の平均誤差(ME)、2 段目は夏実験の平方根平均二乗誤差(RMSE)。3 段目、4 段目はそれぞれ冬実験の ME 及び RMSE。左から順に海面気圧(hPa)、500hPa 高度(m)、500hPa 気温(°C)。グラフの横軸は予報時間 FT (単位：時間)。●及び実線が 20kmGSM、◆及び破線が 60kmGSM。予報の初期時刻は 12UTC。

1.2.4 対ゾンデ検証

日本付近における 20kmGSM の大気鉛直プロファイルの予報精度を調べるため、各気圧面における気温、相対湿度、風速の予報値を日本国内のゾンデ観測点（20地点）における値に内挿し、ゾンデによる観測値を真値として検証して、検証結果を RSM と比較する。夏実験・冬実験のそれぞれについて、12UTC を初期値とする FT=48 の予報を検証対象とした。

各要素の予報の ME、RMSE を図 1.2.4 に示し、その検証結果を以下の (a)～(c) にまとめる。なお、(a)～(c) に記述した特性は FT=24 の予報においても同様であった（図略）。

(a) 気温(図 1.2.4 左列)

20kmGSM の RMSE は夏実験・冬実験とも RSM より小さくなっており、20kmGSM は RSM より精度よく気温の鉛直プロファイルを予報している。

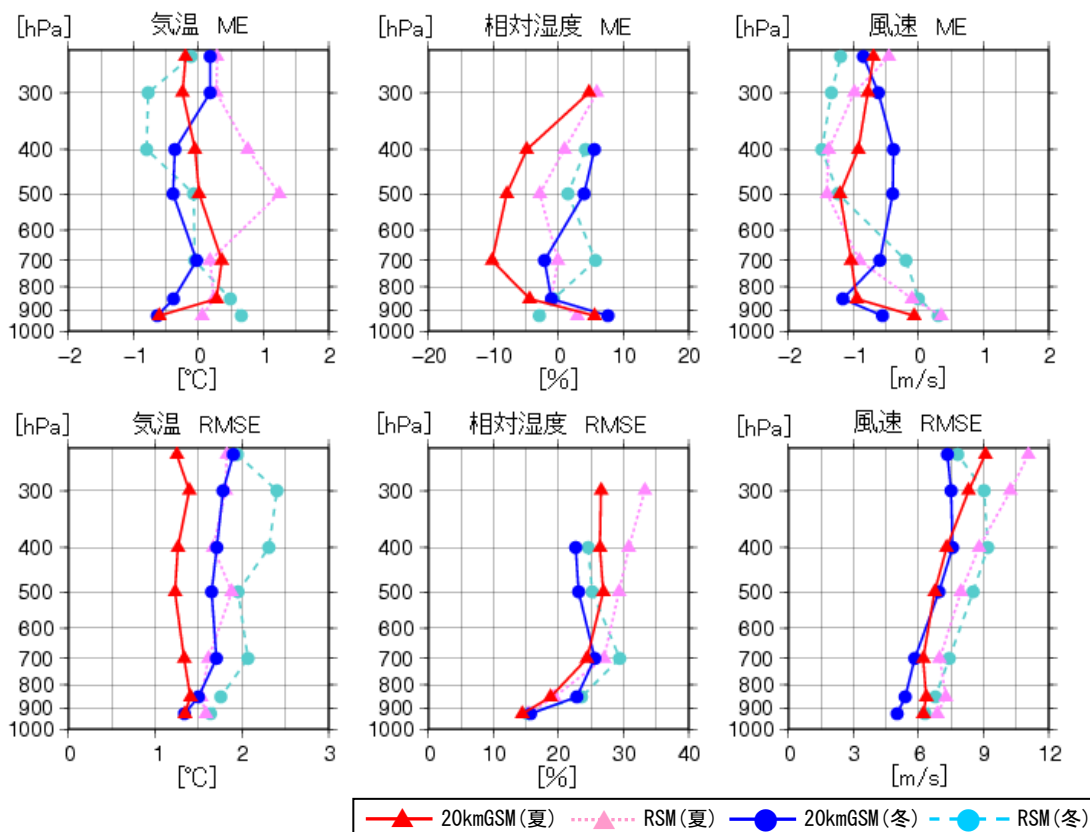


図 1.2.4 20kmGSM 及び RSM の FT=48 の予報値を指定気圧面毎にゾンデの観測値と比較検証した結果。日本国内のゾンデ (20 地点) を比較対象としている。左から気温(°C)、相対湿度(%)、風速(m/s)の鉛直分布のグラフ。上段は ME、下段は RMSE。実線は 20kmGSM、破線及び点線は RSM。▲は夏実験、●は冬実験。縦軸は気圧(hPa)。予報の初期時刻は 12UTC。夏実験の 250hPa、冬実験の 300hPa 及び 250hPa の相対湿度は、ゾンデ観測のサンプル数が少ないためスコアを記載していない。

20kmGSMのMEは、夏実験の500hPa面より上層でRSMと比較して改善傾向が見られる一方、925hPa面では観測値よりも低い気温を予報する傾向がみられる。

(b) 相対湿度(図1.2.4中列)

20kmGSMのRMSEは夏実験、冬実験ともRSMよりおおむね小さくなっている。ただしMEのグラフを見ると、20kmGSMの夏実験では850hPa～400hPa面における乾燥傾向が顕著である。一方で925hPa面では夏実験、冬実験とも20kmGSMに湿度を高く予報する傾向が見られる。これは、(a)に示したように20kmGSMが925hPa面で気温を低く予報する傾向があるほか、同じく20kmGSMが925hPa面で水蒸気量を多く予報する傾向があること(図略)にも起因していると考えられる。

(c) 風速(図1.2.4右列)

風に関しては、風向を考慮せず風速のみについて検証を実施した。20kmGSMは夏実験、冬実験とも

RSMと比較してRMSEが小さくなっている²。一方MEは、500hPa～300hPa面にかけて20kmGSMのMEの絶対値がRSMよりも小さくなっているものの、20kmGSMのMEは全層にわたって負の値となっており、実況と比較して全般的に風速を弱めに予想する傾向がある。

1.2.5 対アメダス降水検証

日本付近における20kmGSMの地上降水の予報精度を調べるため、アメダス観測を真値として検証し、RSMと比較した結果を記す。ここでは、日本域80km間隔の検証格子に含まれるアメダス降水量観測値ならびにモデルの予報値それぞれを格子内平均し比較している(詳細は平井・坂下(2004)を参照のこと)。

本項では、弱い降水からやや強い降水までの検証結果を示す。強い降水は発現回数が少ないため、検証結果を統計的に判断することは難しい。なお、強い降水の事例検証については中川(2006)及び第1.5

²風速のMEは、水平風速の絶対値についてゾンデ観測と比較して算出した。また風速のRMSEは、風速の水平成分U,VそれぞれのRMSEの二乗和の平方根とした;

$$RMSE = \{[RMSE(U)]^2 + [RMSE(V)]^2\}^{1/2}$$

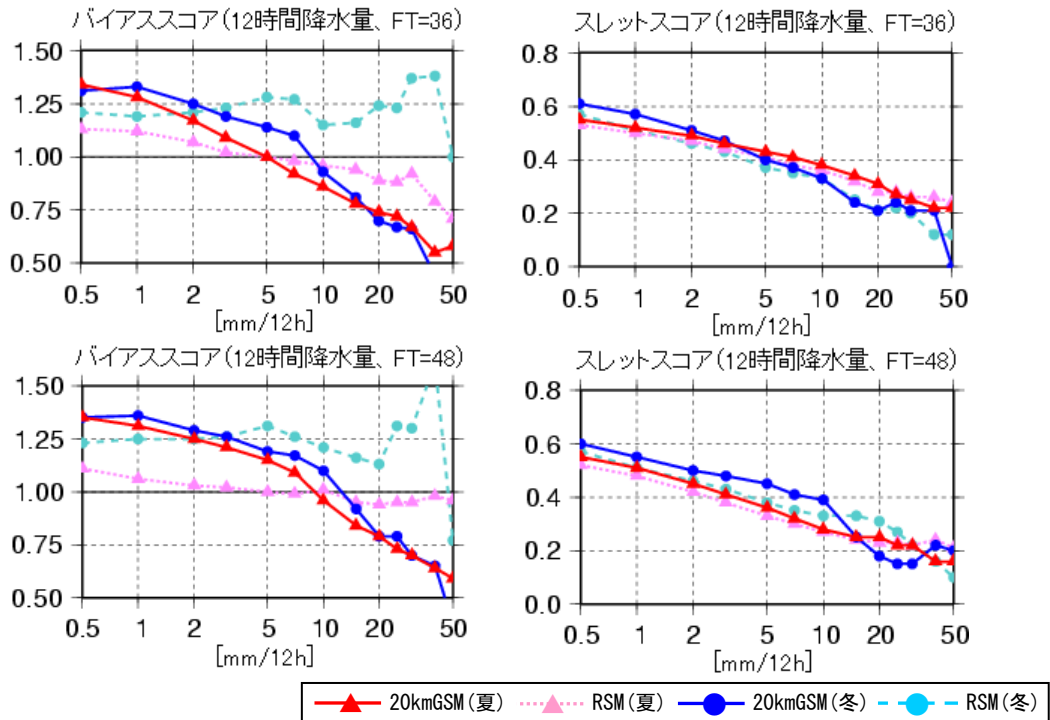


図 1.2.5 20kmGSM 及び RSM の FT=36 及び FT=48 の前 12 時間降水量予報をアメダス観測と比較したスコア。横軸は 12 時間降水量の閾値(mm/12h)、縦軸はバイアススコア (左) 及びスレットスコア (右)。実線は 20kmGSM、破線及び点線は RSM で、▲は夏実験、●は冬実験。予報の初期時刻は 12UTC。

節を参照して頂きたい。

(a) 閾値別の降水予報特性(図1.2.5)

図1.2.5は、20kmGSM及びRSMのFT=36,48の前12時間降水量予報について、バイアススコア及びスレットスコアを閾値別に示したものである³。予報の初期時刻は12UTCであり、FT=36,FT=48のグラフはそれぞれ、主に夜間及び昼間の降水量の予報特性を表す。

バイアススコアに注目すると、FT=36,FT=48の両方のグラフにおいて、弱い降水では夏実験、冬実験とも20kmGSMの値が1を上回っており、実況よりも降水を予報する頻度が多いことを示している。一方、およそ10mm/12h以上の降水については1を下回っており、20kmGSMの降水予報の頻度は実況よりも少ない。およそ10mm/12h以上の降水の予報頻度の低さはRSMと比較しても顕著である。

20kmGSMとRSMでの降水のこのような予報傾向の違いは、両モデルの採用している物理過程が異なることが主な理由である。両モデルの降水の取り

扱いの違いについては中川(2006)を参照して頂きたい。

スレットスコアに注目すると、弱い降水では夏実験・冬実験とも20kmGSMの値がRSMと比較して若干大きくなっており、閾値以上の降水の有無を予報する精度がRSMよりも高い。ただし夏実験のFT=12の前12時間予報では、弱い降水に対して20kmGSMのスレットスコアがRSMを下回った(図略)。やや強い降水については、冬実験のFT=48における15~30mm/12hの降水について20kmGSMのスレットスコアがRSMより小さく、その他の場合においては同等かやや改善している。

(b) 予報時間毎の降水予報特性(図1.2.6)

図1.2.6は20kmGSM及びRSMの前3時間降水量予報を、閾値1mm/3hの場合と、10mm/3h(夏実験)及び5mm/3h(冬実験)の場合についてFT毎にアメダス観測と比較したスコアである。20kmGSMは閾値1mm/3hのバイアススコアが各FTとも1より大きく、弱い降水について予報頻度が実際の観測よりも多いことを表している。一方、閾値が大きくなるほどバイアススコアが小さくなる傾向があり(図略)、夏実験の閾値10mm/3hでは全てのFTにおいて、また冬実験の閾値5mm/3hにおいてもほぼ全てのFTで、バイアススコアが1より小さい。

閾値1mm/3hのスレットスコアは、夏実験の予報

³冬実験期間(2ヶ月間)は、やや強い程度の降水についてもサンプル数が限られており(20mm/12h閾値で延べ約200格子)、特に20mm/12h程度以上の閾値においては、数回の天気現象に関連するサンプルが全体の大多数を占めている状況である。より確度の高い統計検証のためには、より多くの事例を蓄積する必要がある。

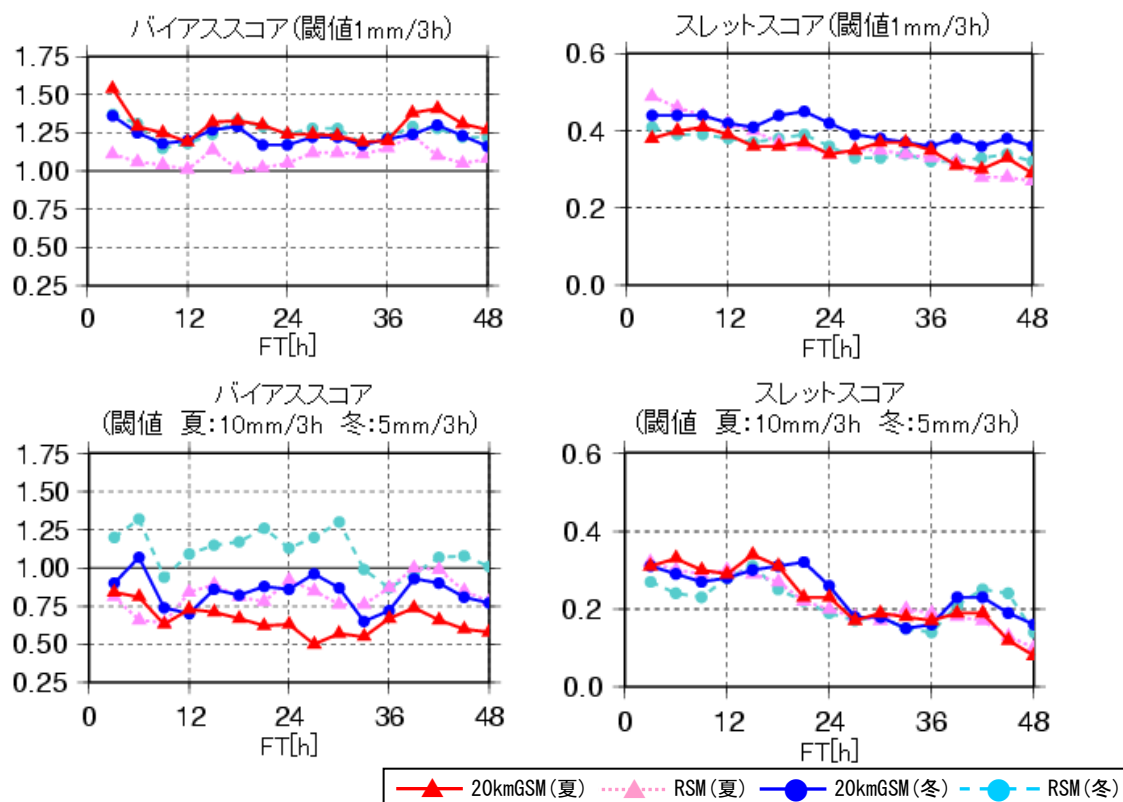


図 1.2.6 20kmGSM 及び RSM の前 3 時間降水量予報をアメダス観測と比較したスコア。横軸は予報時間 FT(単位: 時間)、縦軸はバイアススコア (左) 及びスレットスコア (右)。上段は閾値 1mm/3h、下段は同 10mm/3h (夏実験) 及び 5mm/3h (冬実験) の場合についてのスコアを表す。実線は 20kmGSM、点線及び破線は RSM で、▲は夏実験、●は冬実験。予報の初期時刻は 12UTC。

初期($FT \leq 15$)で 20kmGSM の値が RSM を下回っているものの、それ以外は RSM を上回るかほぼ同程度である。夏実験の予報初期でのスコアが RSM を下回っていることについては、RSM で実施している解析雨量の同化を 20kmGSM では実施していないことも原因の一つであると推測される。一方、閾値 10mm/3h (夏実験) 及び 5mm/3h (冬実験) のやや強い降水では、冬実験の $FT=45$ を除いて 20kmGSM のスレットスコアが RSM を上回っているかほぼ同程度である。

1.2.6 まとめ

20kmGSM の夏実験と冬実験について、日本付近領域を対象とする対初期値検証を行い、結果を RSM 及び 60kmGSM と比較した。また、北半球領域を対象とする対初期値検証を行い、60kmGSM と比較した。さらに、日本域における対ゾンデ検証、対アメダス降水検証を行い、結果を RSM と比較した。その結果、20kmGSM は RSM や 60kmGSM よりも総合的に見て精度が向上しているといえる。

特に日本付近の予報における 20kmGSM の課題として、以下のことが挙げられる。

- ・下層(925hPa)の気温を実況よりも低く予報する

傾向がある。

- ・下層(925hPa)の相対湿度を実況よりも高く予報する一方、特に夏期において 850hPa~400hPa 面の相対湿度を実況よりも低く予報する傾向がある。
- ・下層から上層まで風速を実況よりも弱めに予報する傾向がある。
- ・弱い降水の予報頻度が実況や RSM よりも多く、降水が強くなるほど予報頻度が顕著に少くなる。
- ・夏期において、予報初期の弱い降水の予報の精度が RSM よりも悪い。

こうした課題については、物理過程やデータ同化プロセスの改良などを通して、改善に向けて取り組んでいく。現状においては 20kmGSM にこのような予報特性があることを踏まえ、第 1.7 章で述べる利用上の注意点も参考にしながら活用して頂きたい。

参考文献

- 平井雅之, 坂下卓也, 2004: 日本域の降水量予測の国際比較. 数値予報課報告・別冊第 50 号, 気象庁予報部, 34-38.
- 中川雅之, 2006: 降水事例検証. 平成 18 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 36-39.

1.3 台風¹

1.3.1 はじめに

気象庁が台風予報のための3次元領域モデル（台風専用領域モデル）の現業運用を開始したのは1982年²である（上野 2000）。台風の構造をできる限り忠実に表現し、より良い数値予報を行うためには、モデルの解像度をどの程度確保するかが重要な課題の一つである。台風専用領域モデルの運用は、限られた計算機環境の下、必要な解像度を確保するための工夫として行われてきた側面が大きい。最新の台風専用領域モデルである台風モデル(TYM)の水平解像度は、2001年3月のシステム更新時には24kmとなり（萬納寺 2000）、進路予報のみならず強度予報にも利用可能な唯一の数値予報モデルとしてこれまで運用されてきた。

しかしながら、同時に複数個存在し、なおかつ長時間、長距離を移動しうる台風という擾乱に対し、あえて計算領域を限るモデルを適用することには様々な原理的困難が付きまとう。台風専用領域モデルを運用する際の高コスト要因と制約は数多くあり、例えば、これまでTYMは同時に3個以上の擾乱を対象とすることはできなかった。

これに対し、計算機能力の向上の恩恵を受けて現業化がついに可能となった高解像度全球モデル(20kmGSM)は、TYMを上回る解像度を持ちながらも、計算領域、側面境界の制約を一切受けることのないモデルであり、台風の強度予報と進路予報ともに利用可能な現業数値予報モデルとして画期的なものといえる。この20kmGSMの運用開始をもってTYMの運用は終了することとなり、25年余り続いた気象庁における台風専用領域モデルの現業運用の歴史に幕が下ろされることとなる。

ここでは、台風予報に大きく関わる20kmGSMと従来のGSM(60kmGSM)との相違点である、台風ボーガスの変更についてまず紹介する。次に、20kmGSMの性能評価試験（以後、20kmGSM評価試験）の結果を、TYM、60kmGSMなどと比較しながら紹介しつつ、20kmGSMの台風予報の特性について述べる。台風予報の評価に関わる20kmGSM評価試験の対象期間は2004年8,9月（夏季）で、初期時刻は00,12UTCであり、対象台風はT0411³からT0421までである。検証はすべて気象庁の事後解析

データ（ベストトラック）に対して行った。

1.3.2 台風ボーガスの変更

20kmGSMにおける台風ボーガスの、60kmGSMからの変更点は以下のとおりである。

(1) 擬似観測型ボーガスのサイクル解析での利用

西嶋・室井(2006)で紹介されたように、60kmGSMの速報解析ですでに利用されている擬似観測型のボーガスを、これまで埋め込み型のボーガスを利用してきたサイクル解析においても採用する。このことで、速報解析、サイクル解析ともにボーガスの手法が統一されるため、今後開発対象を擬似観測型の一種類に絞ることが可能となる。また、観測要素毎に配置を独立に設定できるなど、埋め込み型ではできない多様な設定が可能となることも、利点の一つとして挙げられる。

(2) 熱帯低気圧時のボーガス半径の変更

GSMでは、ほとんどの場合(1.3.1)式で示される R_b を半径とする円内にボーガスを適用している（大野木 1997）。ここではこれをボーガス半径と呼ぶことにする。

$$R_b = R_{15} \sqrt{1 + \frac{2V_{15}}{fR_{15}}} \quad (1.3.1)$$

R_{15} は台風の強風半径、 V_{15} は強風半径における風速(15m/s)、 f は台風中心位置におけるコリオリパラメータ⁴である。熱帯低気圧(TD)の段階では、強風半径といった風の水平分布の解析情報が与えられないため、(1.3.1)式の考え方が適用できない。このため、TDに対してはボーガス半径の最小値として設定されている値⁵が固定的に使われていた（大野木 1997）。しかしながら、風が弱くても、必ずしも擾乱のスケールが小さいとは限らない。

また、TDの段階での中心位置の解析誤差は大きく、第一推定値⁶における中心位置の誤差も大きいので、両者の距離は台風の場合に比べて大きくなることが多い。このため、TDの段階において、第一推定値の擾乱をボーガスによって適切に修正できない事例がみられた。そこで、TDの段階でのボーガス半径（以後、TDボーガス半径）に変更を加えることとした。

¹ 美濃 寛士

² これ以前には、バランス・パロトロピックモデル（二次元モデル）が台風予報に利用されていた。

³ ここでは、アジア地上天気図等で用いられる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。平成16年（2004年）台風第11号は、T0411となる。

⁴ 赤道で f は0となってしまうため、赤道のごく近くでは、0での除算と、ボーガス半径が過大になることを防ぐための処理が(1.3.1)式に対して付加される。

⁵ 当時最小値は300kmとされていたが、その後360kmへ変更されている。

⁶ GSMの解析予報サイクルにおける第一推定値は、6時間前を初期時刻とする6時間予報値である。

方法としては、(1.3.2)式に示すように、TDボーガス半径(RTD_b)がTDの中心気圧(P_c)と中心位置の緯度(Lat_c)を変数とする一次式で表せると仮定し、各係数(a, b, c)は、ベストトラックから台風発生時刻のデータのみを抽出して、(1.3.1)式で求まるボーガス半径を目的変数、中心気圧と中心位置の緯度を説明変数とする回帰分析により求めた。

$$RTD_b = aP_c + bLat_c + c \quad (1.3.2)$$

つまり、台風発生時刻の台風について求めた係数を、便宜的にTDに流用する形となる。求められた係数によれば、中心が赤道に近いほど、また、中心気圧が深いほど大きなボーガス半径となる。台風発生時刻の中心気圧と強風半径にはある程度相関があることから、(1.3.2)式を用いることにより、強風半径の解析がないTDであっても、(1.3.1)式と同様の傾向でボーガス半径に変化を持たせることが可能となっている。最終的なTDボーガス半径は、(1.3.2)式の RTD_b に対し、第一推定値における中心位置と実況の中心位置が離れている場合であっても的確に修正することを目的として一律に250kmを加算し、さらに従来と同様の上限、下限を適用して決定される。

図1.3.1は、T0413の進路予報誤差について、TDボーガス半径変更後の20kmGSMと、TDボーガス半径変更前の旧バージョンの20kmGSM（以後、旧バージョン20kmGSM）、及び、60kmGSMとで比較したものである。T0413は、従来のTDボーガス半径による処理では適切に第一推定値の修正がなされず、その後の解析予報サイクルに悪影響が残る典型的な事例であった。新たに導入したTDボーガス半径は、この台風の進路予報改善に大きな役割を果たしていることがわかる。

1.3.3 台風強度予報

20kmGSM台風予報の特性のうち、TYMに代わり利用されることとなる強度（中心気圧）予報についてまず述べる。図1.3.2は、20kmGSM、60kmGSM、TYMの台風強度予報の平均誤差(ME)及び平方根平均二乗誤差(RMSE)を示したものである。水平解像度の向上により、強度予報では60kmGSMのMEとRMSEを大幅に改善している。しかし、TYMと比較すると、予報中盤まではほぼ同等だが、予報後半はTYMに劣っている。このことについて、さらに細かく見ていくことにする。20kmGSMでは予報後半に正のMEが拡大する。これには、台風の発生前後を初期値とする場合に、その後の発達程度が実況に比べて不足する傾向がみられることが大きく影響している（図略）。そこで、20kmGSMの予報結果を補正する試みとして、気圧変化の気候値を利用した

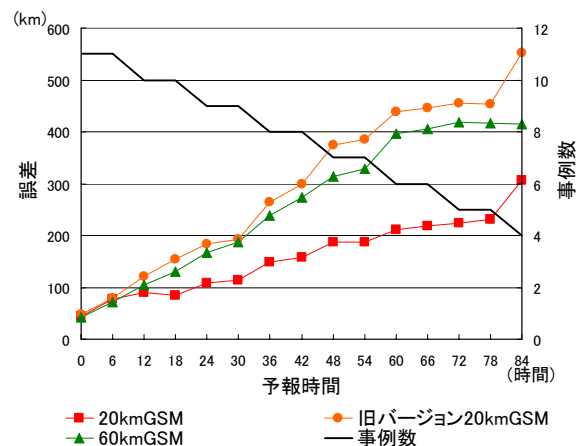


図1.3.1 20kmGSM評価試験におけるT0413の進路予報検証結果。左縦軸は平均進路予報誤差(km)、横軸は予報時間（時間）を表す。20kmGSMは赤色四角（TDボーガス半径変更あり）、旧バージョン20kmGSM（TDボーガス半径変更なし）は橙色丸印、60kmGSMは緑色三角で示している。事例数は黒線で示し、値は右縦軸に対応する。

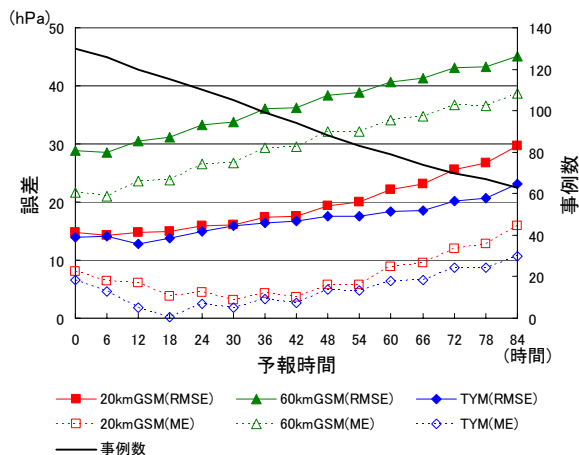


図1.3.2 20kmGSM評価試験における強度予報の検証結果。左縦軸は中心気圧の誤差(hPa)、横軸は予報時間（時間）を表す。実線と塗りつぶされた印はRMSE、破線と白抜き印はMEを示す。20kmGSMは赤色四角、60kmGSMは緑色三角、TYMは青色ひし形で示している。事例数は黒の実線で示し、値は右縦軸に対応する。

表1.3.1 発生初期の台風の気圧変化気候値。1977年から2007年のT0702までの台風で、北緯20度以南のTSについて、それぞれの経過時間毎に気圧変化の平均値をとったもの。上陸や温帯低気圧化の有無は考慮していない。発表予報で利用される数値予報の予報時間に合わせ、経過時間は18,30,54,78時間としている。

経過時間 (時間)	18	30	54	78
気圧変化 気候値 (hPa)	-4.16	-7.92	-16.29	-21.96
事例数	3306	3155	2798	2421

場合に、この誤差をどの程度改善できるかについて調べた。なお、台風の発表予報の各予報時間のうち、数値予報資料が必要とされるものは12,24,48,72の各予報時間である。利用可能な最新の数値予報資料は、発表時刻から6時間さかのぼった時刻を初期値とするものであるため、それぞれ、18,30,54,78時間予報の資料が利用されることになる。ここでは、これらの予報時間に絞って評価を行った。表1.3.1は1977年から2007年のT0702までのベストトラックから、北緯20度以南の台風で、中心付近の最大風速が48kt未満のもの(TS: Tropical Storm)を抽出し、経過時間毎の気圧変化を平均したもの(気圧変化気候値)を示している。この統計をとる際、上陸及び温帯低気圧化の有無は考慮していない。

図1.3.3は、20kmGSMの台風発生前後を初期値とする事例の発達が弱い傾向を補うために、北緯20度以南のTSとTDに対して、20kmGSMの発達の程度が表1.3.1の気圧変化気候値に及ばないものについては、表1.3.1の値を代わりに利用するという補正を施した予報と、20kmGSM(補正なし)及びTYMの強度予報とを比較した検証結果である。なお、数値予報の予測対象となったTDとは、まもなくTSになると予想されたものであるという点を考慮して対象に含めた。この補正手法を用いることにより、20kmGSMのMEとRMSEを改善し、ほぼTYMと同等の精度を実現することができている。本来は予報モデルの改善により解決してゆくべき問題であるが、現時点では20kmGSMの予報特性を理解し、少なくともここで示したような気候値を用いた補正を加味することで、3個以上の台風に対しても、これまでのTYM利用時とほぼ同等の強度予報提供が可能と考えられる。

1.3.4 台風進路予報

20kmGSM評価試験における台風進路予報の検証結果を図1.3.4に示す。20kmGSMの進路予報精度がTYMを上回っているという点は酒井(2006)と変わらないこともあり、ここではTYMについては示していない。第1.3.2項で述べたように、TDボーガス半径に改良を加えたことにより、旧バージョン20kmGSMより改善はしたものの、依然として20kmGSMの進路予報精度は60kmGSMに及ばないという結果となった。このことを踏まえて、当面20kmGSMの台風進路予報精度の改善が確認されるまでの間、台風進路予報のためにのみ60kmGSMの運用が継続されることとなった。

進路予報改善に向けた取り組みの過程で、20kmGSMの解析予報サイクルで作成された解析値を初期値として用いて60kmGSMを実行する実験が行われ、20kmGSMよりも良い結果が出るのではな

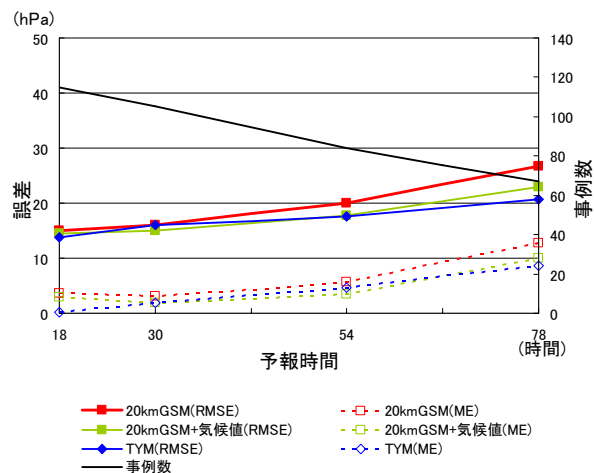


図1.3.3 20kmGSM強度予報に気候値予測を加味したものの検証結果。左縦軸は中心気圧の誤差(hPa)、横軸は予報時間(時間)を表す。太い実線と色塗りされた印はRMSE、破線と白抜き印はMEを示す。20kmGSMに気候値予測を加味したものは黄緑四角、20kmGSMは赤色四角、TYMは青色ひし形で示している。事例数は黒線で示し、値は右縦軸に対応する。

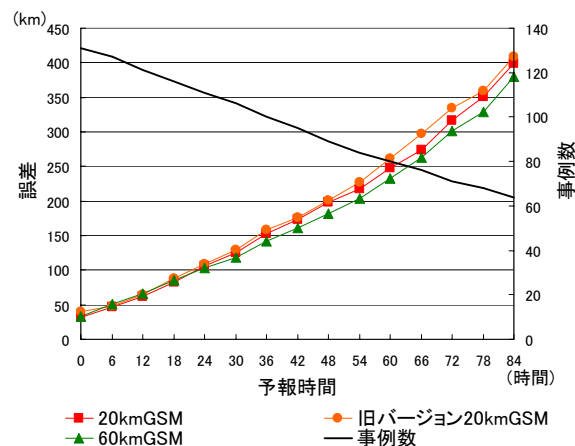


図1.3.4 20kmGSM評価試験の台風進路予報検証結果。左縦軸は平均進路予報誤差(km)、横軸は予報時間(時間)を表す。20kmGSMは赤色四角(TDボーガス半径変更あり)、旧バージョン20kmGSM(TDボーガス半径変更なし)は橙色丸印、60kmGSMは緑色三角で示している。事例数は黒線で示し、値は右縦軸に対応する。

いかと期待された。しかし、結果はかえって精度が悪化した(検証結果の図は省略)。図1.3.5に示したT0419の事例は、この問題を端的に示したもので、同一の60kmGSMモデルによる予報であっても、異なる解析予報サイクルで作られた解析値を初期値に用いているために、予報の傾向が大きく異なっていることがわかる。このことは、予報モデル本体も含めた解析予報サイクル全般について、20kmGSMの問題点を調査すべきであることを示唆している。第

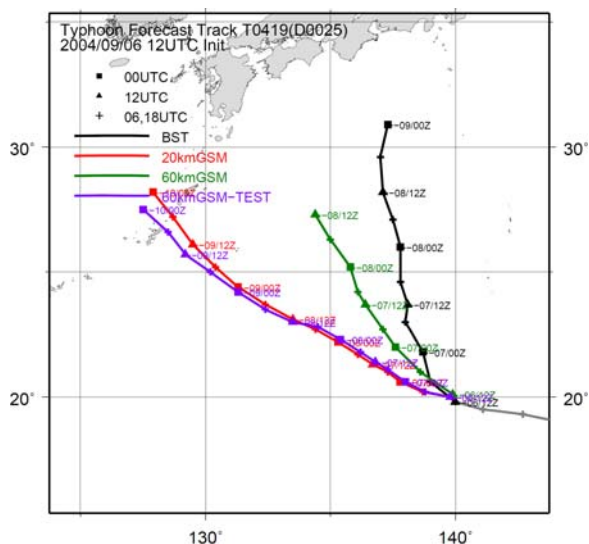


図1.3.5 台風進路予報改善に向けた調査事例。2004年9月6日12UTC初期値のT0419の進路予報結果。20kmGSMの解析予報サイクルで作成された解析値を初期値として用いた60kmGSMの予報結果を紫で示した。赤は20kmGSM評価試験、緑は60kmGSM、黒はベストトラックである。84時間予報とそれに対応する期間の実況を示している。但し、84時間予報の最後まで経路が表示されていないものは、擾乱が弱まったためにプログラムによる自動追跡が不可能となったことを意味している。進路予報位置のうち00UTCは四角、12UTCは三角、06及び18UTCは+印でプロットしている。

1.5節にあるように、予報モデルでは降水過程を中心に改良が進められている部分もあるが、残念ながら台風進路予報改善に結びつく結果は今のところ得られていない。ここでは、解析システムに対する調査の一端として、図1.3.5の事例における台風ボーガスの影響を調べる実験を行ったので、その結果を紹介する。図1.3.6は、20kmGSM評価試験と同様の条件で、9月4日00UTC (T0419に対する最初のボーガス投入時) のサイクル解析から6日12UTCの速報解析までの間、解析システムにおける台風ボーガスの観測誤差の設定値 (新堀 2005) のみを1.75倍にして解析予報サイクルを実施し、その結果得られた6日12UTC初期値による予報実験の結果を示したものである。1事例のみであるので、この観測誤差の設定値の妥当性を判断することはできないが、この実験結果は、少なくとも台風ボーガスが20kmGSMの台風進路予報に大きな影響を及ぼしうることを具体的に示したものだといえる。台風予報の改善に向けては、台風ボーガスの改良点を見出していく取り組みを、今後も継続すべきと考えられる。

1.3.5 まとめ

計算領域及び側面境界の制限を受けることのない20kmGSMによって、台風の現業数値予報には新た

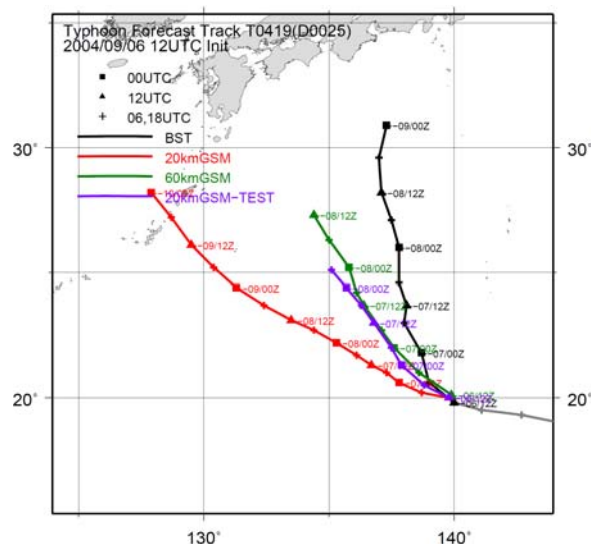


図1.3.6 台風進路予報改善に向けた調査事例。図1.3.5と同様。但し、20kmGSM評価試験と同様の条件で、2004年9月4日00UTCのサイクル解析から6日12UTCの速報解析までの間、解析システムにおける台風ボーガスの観測誤差の設定値のみを1.75倍に変更した実験結果を紫で示している。

な局面が切り開かれることとなった。台風強度予報については、台風の個数に制限を受けない支援が可能となる。但し、現段階では20kmGSMの特性を考慮した補正が必要であろう。台風進路予報については、台風ボーガスの改良が一定の成果を示したものの、依然として課題が残っており、暫定的に60kmGSMが継続運用される。20kmGSMの台風予報改善のためには、解析予報サイクル全般に調査の目を向ける必要がある。台風ボーガスは、台風予報に与える影響の大きさからみても、重点的に調査されるべきものの一つであると考えられる。

参考文献

- 上野充, 2000: 数値モデルによる台風予報. 台風—解析と予報—, 気象研究ノート, **197**, 131-286.
- 大野木和敏, 1997: 台風ボーガス. 数値予報課報告・別冊第43号, 気象庁予報部, 52-61.
- 酒井亮太, 2006: 台風予報の検証. 平成18年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 20-22.
- 新堀敏基, 2005: 全球4次元変分法の台風ボーガス. 数値予報課報告・別冊第51号, 気象庁予報部, 106-110.
- 西嶋信, 室井ちあし, 2006: データ同化システムの概要. 平成18年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 11-13.
- 萬納寺信崇, 2000: 領域モデル (RSM, MSM, TYM). 平成12年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 23-27.

1.4 地上気温の検証¹

1.4.1 はじめに

ここでは、日本域における高解像度全球モデル(20kmGSM)の地上気温の予報特性を領域モデル(RSM)と比較して示す。はじめに両モデルの地上気温の予報値の統計的検証結果を示し、次に個別の予報事例をいくつか示して、両モデルの地上気温の予報特性について考察する。

1.4.2 モデルの地上気温予報値

モデルでは、地上気温をモデル面の大気最下層気温と地表面(または海面)温度からの内挿で求めているため、地上気温は常に両者の間の値になる。陸上では、地表面温度の変化に関わる熱収支を、陸面過程で評価している。地表面温度の日較差は大気に比べはるかに大きく、地上気温の予報には陸面過程の影響が大きいと言える。ただし、地表面熱収支では陸面に入射する放射強度の影響が非常に大きいので、陸面に入射する放射強度が適切に予報できることも地上気温の予報には重要である。

RSMと20kmGSMの陸面過程の中で、地上気温予報に関わるプロセスの違いについて、表1.4.1にまとめる。20kmGSMの陸面過程には、SiB(生物圏モデル)という植生の存在を考慮したモデルを用いている。積雪についても両モデルで異なり、20kmGSMは積雪水当量を予報変数にしているが、RSMでは積雪の有無のみの情報を用いて予報時間中変わらない。一方、RSMにおいては土壌温度で多層の土壌層間の熱伝導を明示的に扱ったり、地上気温の診断で安定度を考慮したりして

おり、この点は20kmGSMより精緻に扱われている。このように20kmGSMとRSMでは陸面過程が大きく異なるため、両モデルで地上気温の予報特性が異なることに留意する必要がある。

1.4.3 地上気温予報の統計的検証

夏(2004年8～9月)、冬(2005年12月～2006年1月)を対象にして、20kmGSMとRSMのサイクル実験を行った。毎00,12UTC初期値の予報時間0～48時間(FT=0～48)の地上気温予報を、アメダスの全観測点のデータを用いて検証した。ただし、RSMに関しては、当時の数値予報ルーチンの予報値ではなく、60kmGSMを最新の設定で再実行して得られた境界条件を用いて予報した結果を用いた。そうしないと、最近開発された同化・予報手法が反映されず、RSMが不利に扱われてしまうためである。

各観測点における予報値は、観測点を囲む4格子のモデル出力データからの線形内挿で求めた。モデル出力データの水平座標系は、RSMではモデル格子系と同一であるが、20kmGSMではモデル格子系と異なる等緯度経度座標系である。そのため、観測点における予報値を内挿により求めるときに、20kmGSMの方がRSMより海格子の影響を受けやすくなる。この点で、海岸に近い観測点については20kmGSMに不利な検証法であるが、配信予定のGSMデータは等緯度経度座標系に変換されたものであるため、こちらのデータを検証に用いる。実際に20kmGSMの予報値がどれだけ海の格子の影響を受けるかを調べるため、両モデルで各観測点を囲む4つの格子のうち海の格子²の数の分布を図1.4.1に示す。観測点の予報値に対する海格子の影

表 1.4.1 RSM と 20kmGSM の地上気温に関わる陸面過程の違い。

	RSM	20kmGSM
陸面の状態	・裸地、土壌で構成。 (植生の存在を陽に扱わない。ただし、蒸発量の見積りに短波入射量を依存させることで、蒸散の効果を簡易的に表現。)	・生物圏モデル(SiB) 植生、裸地・下草、土壌で構成。
積雪の取り扱い	・積雪層を明示的に取り扱わず、積雪の有無のみを考慮。 ・積雪の有無は、予報時間中変わらない。	・積雪層を裸地・下草上の氷として考慮。 ・降雪、融雪により積雪水当量(積雪を融解したときに得られる水量)が予報時間中に変化する。
土壌の鉛直層数	4	・土壌温度考慮時は2(地表面+土壌底面温度)。
土壌の熱伝導の評価	・熱伝導方程式 (土壌層の熱容量と熱伝導率を定義。ただし、積雪時の土壌の熱伝導率は、土壌の値よりも大きな氷の値を適用。)	・強制復元法 (地表面と土壌底面間の熱交換は、地表面と土壌底面の温度差に比例。)
地上気温の診断	・大気最下層気温と地表面温度から安定度を考慮しながら診断。	・大気最下層気温と地表面温度から中立成層(温位の鉛直分布が対数則に従う)を仮定して診断。

¹ 平井 雅之

² ここで20kmGSMの海格子とは、観測点への内挿に利用する等緯度経度座標系の各格子が、元のモデル座標系中の海格子の影響を50%以上受けている場合を指すことにする。

響は、内海の多い西日本を中心に、20kmGSMの方がRSMより大きくなる。

気温の予報値、観測値は、いずれも0.65℃/100mの割合で海拔0mにおける値に換算してから検証を行った。なお、8月と9月では明け方の冷え込み具合に大きな差があることから独立に扱い、「2004年8月」「2004年9月」「2005年12月～2006年1月」の3期間に分けて集計した。ここでは、簡単のため、2004年8月を「夏」、2004年9月を「秋」、2005年12月～2006年1月を「冬」と表現する。

表1.4.2に3期間における20kmGSMとRSMの気温予報の検証スコア(平方根平均二乗誤差(RMSE)、平均誤差(ME)、誤差の標準偏差(σ_e))を示す。20kmGSMの気温予報のRMSEは、いずれの期間ともRSMより2～3割も小さく、20kmGSMはRSMに比べて気温予報を大幅に改善していることが分かる。巻末付録に示すように、RMSEはバイアスに起因するMEとランダムな予報誤差に起因する σ_e の二つの成分に分解できる。20kmGSMのMEは3期間ともRSMより0に近い。また、 σ_e も20kmGSMの方がRSMより3期間とも小さい。特にMEの顕著な改善は、RMSEの減少に大きく寄与している。

モデルの地上気温の予報誤差特性は、予報時間の経過とともに誤差が大きくなる影響よりも、日変化特性の再現性が圧倒的に卓越する³。そこで、予報対象時刻ごとにRMSEとMEを集計した結果を図1.4.2に示す。RMSEは、20kmGSMの方がRSMよりも3期間とも全予報時間を通じて小さく、特に夜間の改善が顕著である。RSMはいずれの期間にも夜間に大きな高温バイアスがあり、予報精度を悪化させる大きな要因になっている。この高温バイアスは、夏より秋、秋より冬に顕著である。20kmGSMでも冬の夜間の高温バイアスの傾向が見られるが、その程度はRSMより小さい。また、最高気温が出現しやすい06UTC前後の20kmGSMのMEに着目すると、最高気温が現れる前の00,03UTCに極小となり、その後09,12UTCにかけて増加している。これは、20kmGSMで地上気温の日変化の位相が遅いという問題(例えばYang et al.(2007))を反映していると考えられる。

日最低気温の観測されやすい18UTCの時間帯について、夏と冬の観測点別の気温のMEを図1.4.3に示す。RSMではいずれの季節でも全国的に気温を高く予報する傾向が見られる。特に冬の北海道内陸と本州太平洋側では+5℃以上の地点がある。20kmGSMはRSM

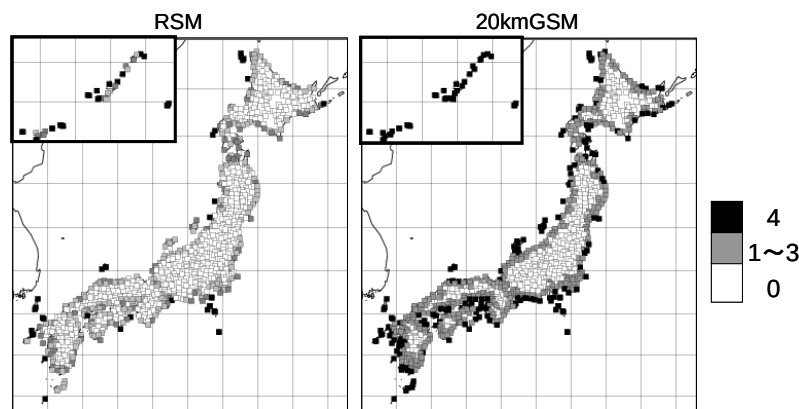


図1.4.1 モデルの予報値を各観測点へ内挿する際に用いる4格子のうち、海格子の数。左がRSM、右が20kmGSM。

に比べて高温に予想する傾向は小さいものの、積雪域である北海道で4℃以上、本州日本海側で+1～2℃気温を高く予報する傾向がある。また九州沿岸でも+2～4℃高く予報する傾向が見られる。

RSMで季節を問わず夜間に高温バイアスが表れる要因は、第1.6節に示すように、雲量が過大で放射冷却が過小なためと考えられる。特に積雪域で晴天率の比較的高い北海道内陸では、冬に高温バイアスが特に明瞭化したと考えられる。一方、20kmGSMに見られる本州日本海側と北海道の高温バイアスの原因の一つは、陸面過程における雪の簡素な取り扱いにあると思われる⁴。その中で、特に北海道内陸で高温バイアスが顕著であることについて原因は特定できていないが、強安定時に地面付近に冷気が十分滞留せず、大気下層と過大に熱交換されてしまうことが考えられる。なお、冬の九州沿岸で高温に予報される傾向があるのは、予報値の内挿時に海格子を使用している影響を受けていると考えられる。実際には海の熱容量が陸に比べてはるかに大きいので、海上では気温の日較差が陸上より著しく小さく、夜間は気温がほとんど下がらない⁵。それに加え、九州近海では海面温度が20℃以上と高く、陸上との温度差は他の地域に比べ大きいので、高温傾向がより明瞭に表れたと思われる。

1.4.4 地上気温予報の事例検証

20kmGSMとRSMの気温予報の事例について示す。ここでは、地上気温の予報特性のみに着目するため、両モデルで総観場の予想に大差のなかった次の4つの

⁴ 積雪層を明示的に取り扱わず裸地・下草上の氷と見なすと、地表面熱容量や雪中の熱伝導が過大評価され、明け方の高温バイアスの要因になると考えられる。詳細は Hirai et al.(2007)を参照のこと。

⁵ 20kmGSMにおける海面温度は短波入射量と風速により若干変化するが、日較差は1℃にも満たない。RSMでは、海面温度の時間変化は全くない。

³ 例えば、平井・坂下(2006)の図2.3.14を参照。

表1.4.2 RSMと20kmGSMによる全地点、全予報時間の気温予報の検証スコア(単位は℃)。

	夏実験				冬実験	
	2004 年 8 月		2004 年 9 月		2005 年 12 月～2006 年 1 月	
	RSM	20kmGSM	RSM	20kmGSM	RSM	20kmGSM
RMSE	2.53	1.92	2.68	1.92	3.55	2.87
ME	1.18	0.12	1.58	0.38	2.40	1.39
σ_e	2.24	1.91	2.17	1.88	2.62	2.51

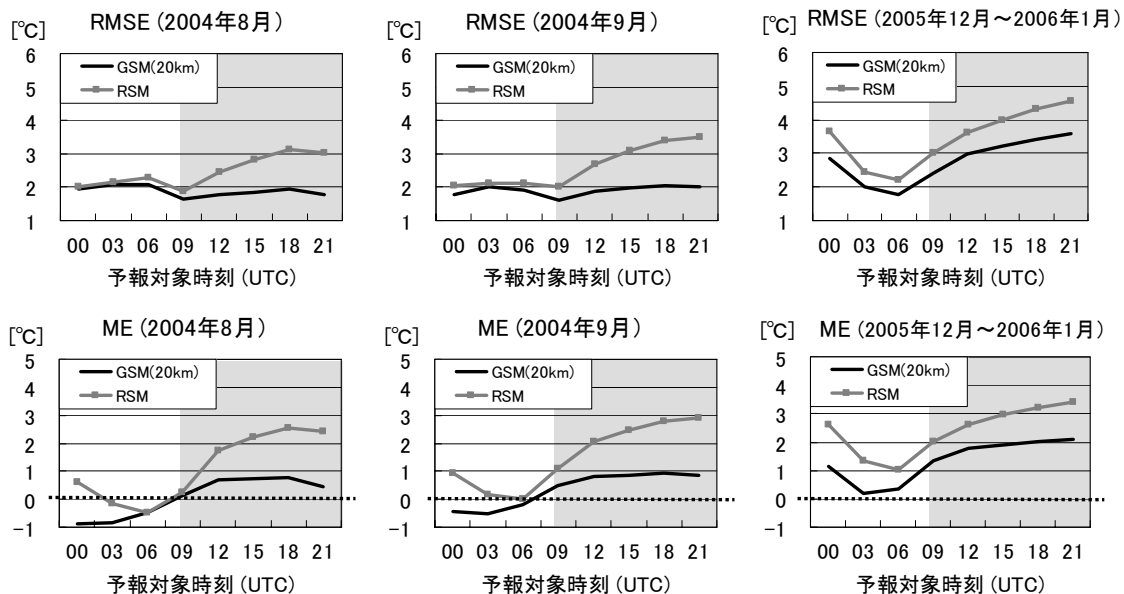


図1.4.2 RSM(灰)と20kmGSM(黒)の気温予報の予報対象時刻別の平方根平均二乗誤差(RMSE)(上段)と平均誤差(ME)(下段)。期間は左から2004年8月、2004年9月、2005年12月～2006年1月。陰影は予報対象時刻が夜間(09～21UTC)であることを示す。

事例を取り上げる。

- ・夏季晴天時の昼・夜の気温
…(2004年8月12日06,18UTC)
- ・秋の晴天時の夜間放射冷却による低温
…(2004年9月15日18UTC)
- ・強い冬型の気圧配置時の低温
…(2006年1月5日18UTC)
- ・関東地方降雪時の気温
…(2006年1月21日06UTC)

(1) 夏季晴天時の昼・夜の気温

図1.4.4に2004年8月11日12UTC初期値の12日06,18UTCの気温の予報値、観測値と12日12UTCの地上天気図を示す。九州から東北南部にかけては太平洋高気圧に覆われて晴れた。06UTCには、東北南部より南で概ね30℃以上、特に関東以西の内陸では33℃以上の高温を観測した。20kmGSM・RSMとも30℃以上の領域はほぼ同じで、20kmGSMは夏季晴天時の日中の高温の予報についてRSMとほぼ同程度の精度であると言える。

なお、この日の夜も、関東から西では引き続き太平洋高気圧に覆われて概ね晴れた。18UTCの気温は両モデルとも実況より高いものの、20kmGSMの方がRSMより適切に予報している。また、東北以北は太平洋高気圧の北側の冷涼な空気に覆われ、18UTCの気温は概ね21℃以下に下がった。20kmGSMはRSMより気温を3℃近く低く予報し、観測値に近づいて改善していることが分かる。

(2) 秋の晴天時の夜間放射冷却による低温

図1.4.5に2004年9月14日12UTC初期値の15日18UTCの気温の予報値、観測値と15日12UTCの地上天気図を示す。日本付近は移動性高気圧に覆われたため概ね晴れとなり、東日本以北では放射冷却によって明け方の気温が下がった。東日本以北の18UTCの気温は、20kmGSMの方がRSMより3～6℃低い。実況と比べると、まだ十分ではないが、20kmGSMはRSMより夜間の放射冷却が卓越する時の低温を適切に予報している。

(3) 強い冬型の気圧配置時の低温

図1.4.6に2006年1月4日12UTC初期値の5日18UTCの気温の予報値、観測値と5日12UTCの地上天気図を示す。千島の東に発達した低気圧、モンゴルに高気圧があり、冬型の気圧配置になった。図は省略するが、5日に上層トラフが北日本を通過し北海道付近の500hPa面には-42℃前後の寒気が流入した。関東以西では上層寒気は強くないものの、九州以北で850hPa面の気温が-6℃以下となるような強い下層寒気に覆われた。そのため、5日18UTCの地上気温は全国的に低く、九州以北の多くの地点で氷点下になった。特に、晴れて風の弱かった中部から東北の内陸と北海道では、厳しい冷え込みになった。東北以南では、20kmGSMの方がRSMより気温を3℃前後低く予報している。観測値が中部地方の内陸と東北の広範囲で-3℃以下、西日本内陸の多くの地点で0℃以下になっていることを考慮すると、20kmGSMの方がRSMより適切に予報している。一方、北海道では、20kmGSMの方がRSMより-6℃以下の領域を広く予報し実況に近いものの、-12℃以下になるような極端な低温は両モデルとも予報できていない。積雪域の放射冷却時の強い冷え込みは、20kmGSMでもRSMと同様に予想が難しいことが分かる。

(4) 関東地方降雪時の気温

図1.4.7に2006年1月20,21日12UTC初期値の翌日06UTCの気温と翌日00UTCの地上天気図を示す。関東南部では、本州南岸の低気圧と下層寒気の影響で、20日夜遅くから21日にかけて雨または雪が降り出し、21日には一部を除いて大雪となった。22日には関東南部の天気は回復したが、積雪状態が続き、日中の昇温は鈍かった。20kmGSMの21日06UTCの気温は、関東南部で周辺の地方より低い0～3℃と予報している一方、RSMでは北陸や東南北部と同程度の3～6℃となっており、20kmGSMの方が適切に予報している(図1.4.7上段)。これは両モデルにおける積雪の取り扱いが違う影響が大きいと考えられる。関東南部は両モデルとも20日12UTCの予報初期に無積雪格子になっていた。その場合、RSMでは予報時間中、無積雪として計算が行われてしまうのに対し、20kmGSMは降雪による積雪域の形成を考慮できる。図は省略するが、20kmGSMによる東京近傍格子の予報では、21日明け方から積雪域として計算が行われ、日中になっても地表面温度の低い状態を維持することができ、低温を予報することができた。一方、RSMは予報時間中無積雪格子として取り扱われた上、夜間に気温がほとんど下がらない影響が大きく、21日は終日実況より高く予報していた。

21日12UTC初期値による22日06UTCの気温は、RSMでも20kmGSMと同様に関東南部の低温を予報

できた(図1.4.7下段)。これは、予報初期の21日12UTCに関東南部が積雪状態にあることが分かっていたため、RSMでも積雪状態を前提に予報を行うことができたためである。

20kmGSMは積雪水当量を予報変数として扱っているため、計算時間中に積雪が形成・消散する効果をRSMより適切に地上気温に反映できる。ただし、20kmGSMでも積雪の形成・消散の予報を誤った場合、地上気温も誤って見積もられることには留意する必要がある。

1.4.5 まとめ

20kmGSMの気温の予報は、夏・冬とも全予報時間を通じてRSMの予報より改善していることが分かった。特に、RSMは夜間に気温を実況より高く予報する傾向が顕著であるが、20kmGSMはその傾向を大幅に改善している。個別の予報事例を見ると、20kmGSMは夏季日中の高温や夜間の気温低下をRSMより適切に再現できることが確認できた。また、秋の放射冷却による低温の予報も、20kmGSMの方が適切に予報できた。冬季の低温に関しても、20kmGSMはRSMより適切に予報できていた。また、20kmGSMで積雪水当量を予報変数として扱う優位性について確認できた。しかし、冬季夜間の放射冷却による極度の冷え込みは、RSMと同様に20kmGSMでも十分には表現できない。

謝辞

アメダスの気温観測値の分布の作図には、東京管区気象台が開発したアプリケーション「かさねーる3D」を利用しました。

参考文献

- 平井雅之, 坂下卓也, 2006: 地上気温・風速の検証。平成18年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 23-27.
- Hirai, M., T. Sakashita, H. Kitagawa, T. Tsuyuki, M. Hosaka and M. O'hizumi, 2007: Development and validation of a new land surface model for JMA's operational global model using the CEOP observation dataset. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85A**, 1-24.
- Yang, K., M. Rasmy, S. Rauniyar, T. Koike, K. Taniguchi, K. Tamagawa, P. Koudelova, M. Kitsuregawa, T. Nemoto, M. Yasukawa, E. Ikoma, M. G. Bosilovich and S. Williams, 2007: Initial CEOP-based review of the prediction skill of operational general circulation models and land surface models. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85A**, 99-116.

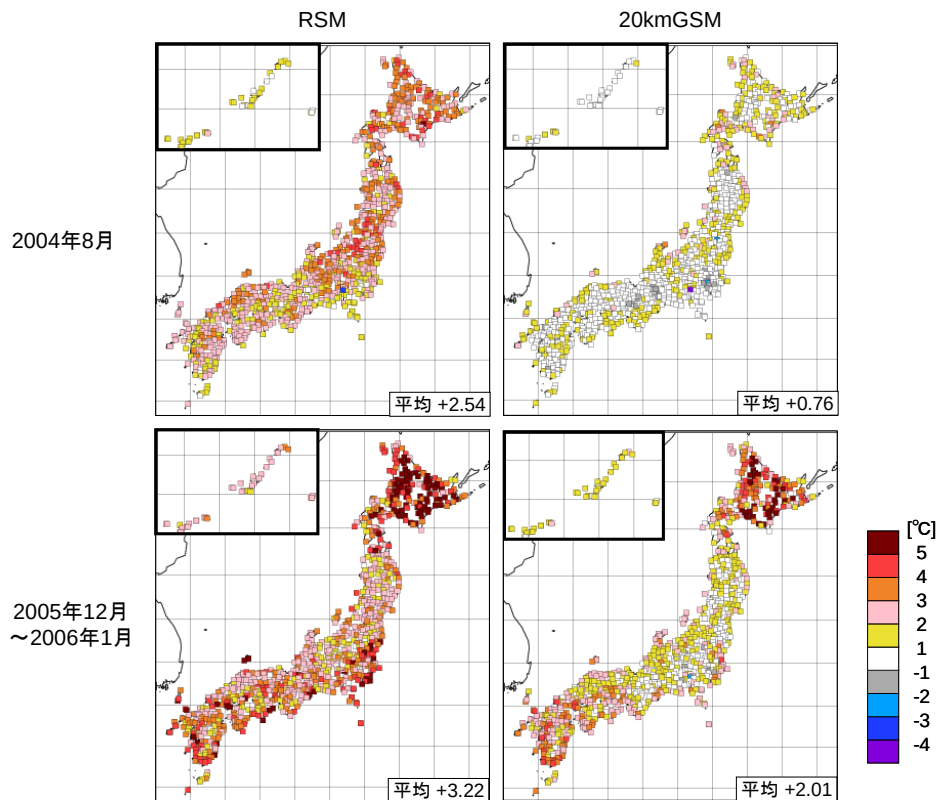


図1.4.3 2004年8月(上段)と2005年12月～2006年1月(下段)における18UTCを予報対象にした観測点別の地上気温の平均誤差。左がRSM、右が20kmGSMのスコア。

2004年8月12日06UTC (初期時刻11日12UTC)

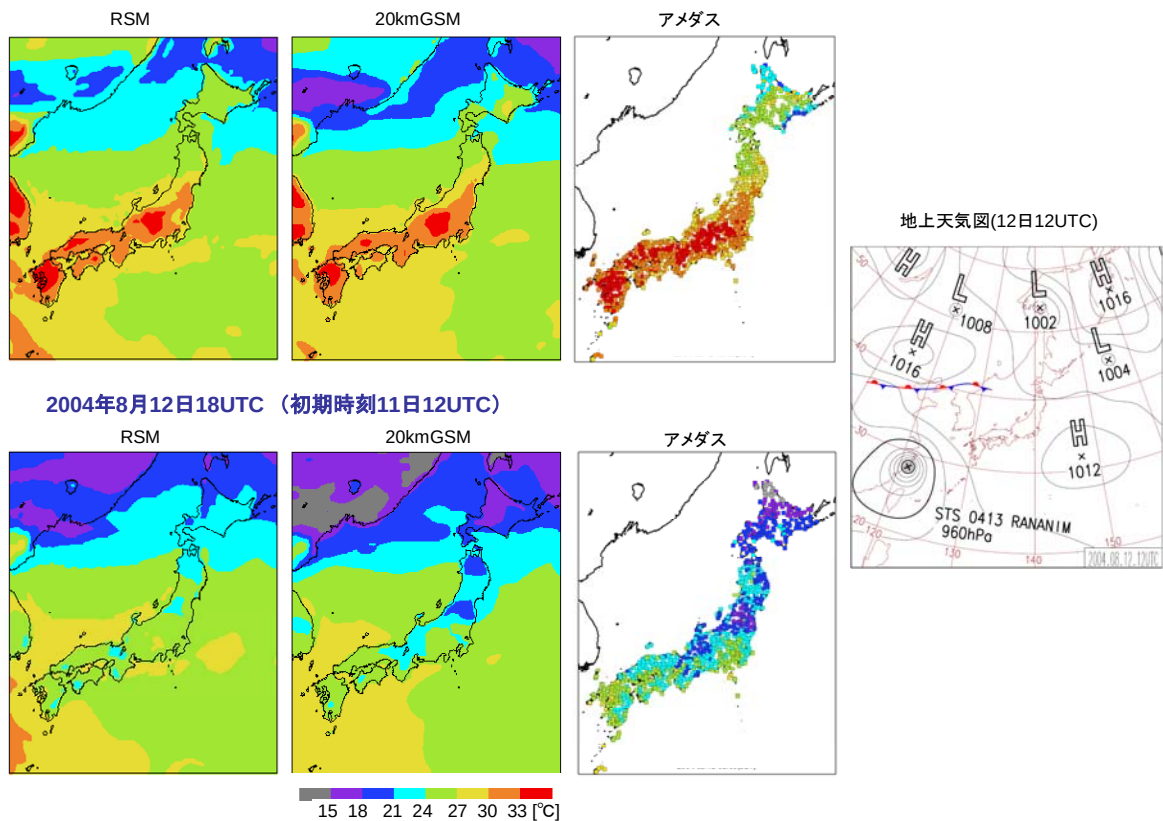


図1.4.4 2004年8月11日06UTC(上段)と18UTC(下段)のRSMと20kmGSMの気温(左から1,2列目)、アメダスによる気温観測値(同3列目)と12日12UTCにおける地上天気図(同4列目)。モデルの初期時刻は12日12UTC。気温は、 $0.65^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ の割合で、海拔0mにおける値に換算。

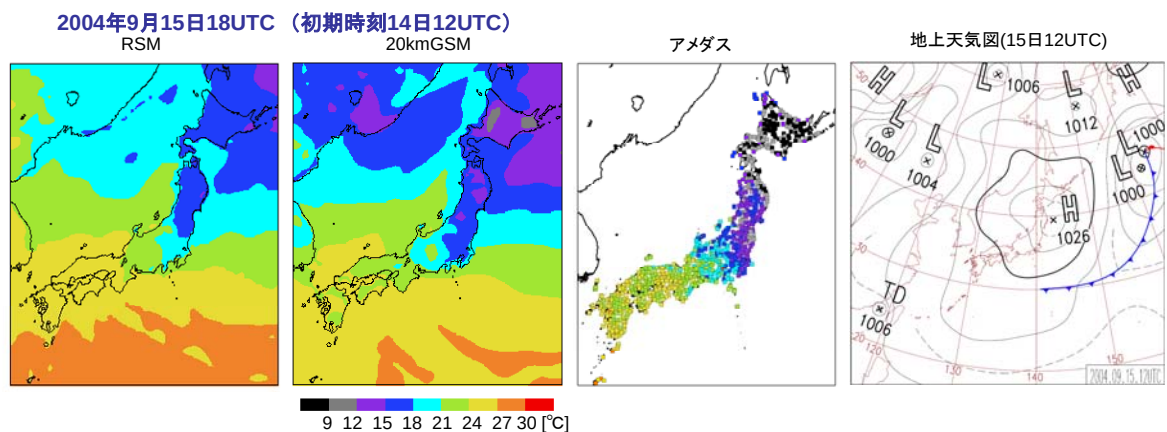


図1.4.5 図1.4.4に同じ。ただし、2004年9月14日12UTC初期値の15日18UTCの気温と15日12UTCの地上天気図を示す。

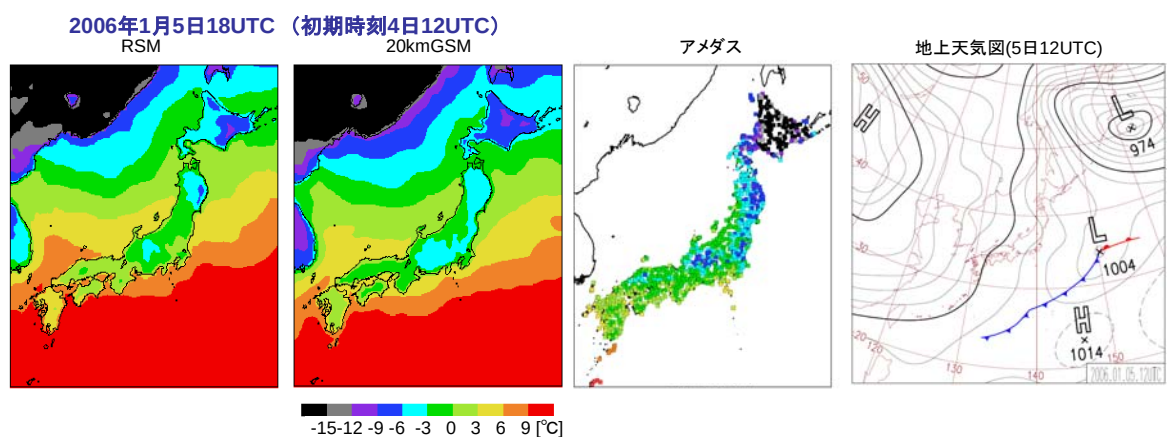


図1.4.6 図1.4.4に同じ。ただし、2006年1月4日12UTC初期値の5日18UTCの気温と5日12UTCの地上天気図を示す。

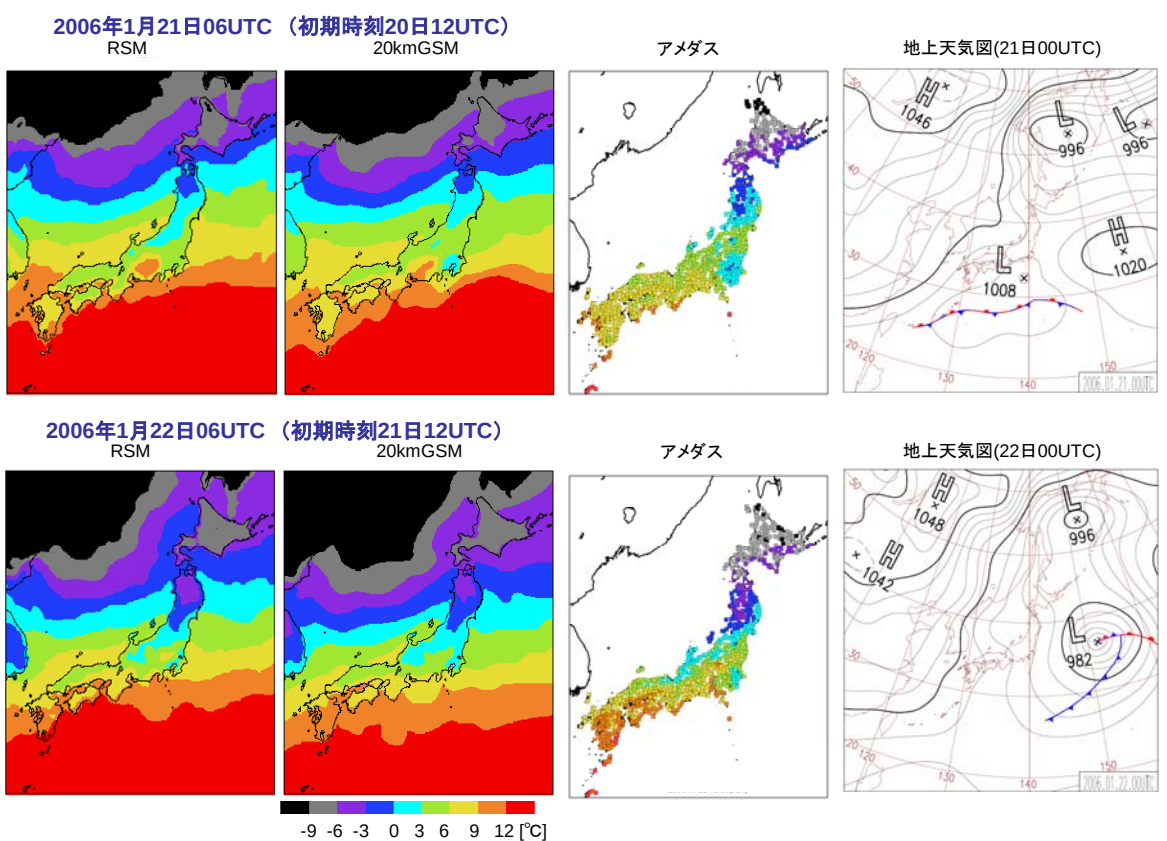


図1.4.7 図1.4.4に同じ。ただし、2006年1月20日12UTC(上)と21日12UTC(下)初期値の翌日06UTCの気温と翌日00UTCの地上天気図を示す。

1.5 降水¹

1.5.1 はじめに

新たに導入される高解像度(TL959L60)全球モデル(以下20kmGSMと呼ぶ)は、平成18年度数値予報研修テキストに記述されたものとほぼ同じである(第1.1節参照)。従って、事例に基づく20kmGSMの降水予想特性及び領域モデル(RSM)との比較についても、中川(2006)と同様となる。本稿では、降水予想精度の向上を目指す開発を中心に解説する。

GSMには、弱い降水を予想する範囲が広すぎるという問題がある(坂下 2006)。主な原因は、GSMで使用している荒川・シュート積雲対流スキーム(以下A-Sと呼ぶ)において、積雲活動の強さが大気の安定度に関連する量である雲仕事関数によって制御されており、大気が不安定になるとただちに降水を作りやすいことである。その対策として20kmGSMには、Xie and Zhang(2000)に基づき、CAPE(対流有効位置エネルギー；大気の安定度を示す指標の一つ)の力学過程による時間変化傾向(以下DCAPE)を、対流の発生を判定するトリガー関数としてA-Sに組み込んでいる(Nakagawa 2005)。これにより、弱い降水を予想する頻度が過剰であるバイアスが、従来のGSMと比べて改善された。

一方、強い降水については、20kmGSMは降水量を少なめに予想する傾向がある(坂下 2006；中川 2006)。今回、DCAPEの計算手法を改良することで、主に地形性の降水について、より強い降水を表現できるようになることがわかった。本節では、まず改良の内容を簡単に解説する。その後、これに伴う降水の予想の変化について、事例を用いて説明する。なおこの改良は、調整とサイクル実験を行って降水以外の予想精度も評価した上で、現業化を目指す計画である。

1.5.2 DCAPE計算手法の改良

GSMにおいて、DCAPEはXie and Zhang(2000)に基づき以下のように定義されている。

$$DCAPE = [CAPE(T^*, q^*) - CAPE(T, q)] / \Delta t \quad (1.5.1)$$

$$CAPE = \int_{Z_{LFC}}^{Z_{TOP}} g \frac{T_v^u - \bar{T}_v}{\bar{T}_v} dz \quad (1.5.2)$$

ただし T は気温、 q は比湿、 Δt はモデルの時間ステップ、 g は重力加速度、 T_v は仮温度($=T(1+0.608q)$)である。また T^* 、 q^* はそれぞれ T 、 q に Δt の間の格子スケールの移流による変化を加えたもので、モデルの力学部分のみを計算した後の T 、 q に相当する。上付きの u は

積雲の中の値、 $\bar{}$ は格子平均場の値であることを表す。 Z_{TOP} 、 Z_{LFC} はそれぞれ浮力がなくなる高度、自由対流高度である。DCAPEが正であるということは、力学過程によりCAPEが増加していることを意味し、大気下層で移流による加熱・加湿が起きているような状況に対応する。GSMでは、モデルの水平解像度に依存する閾値(0または負の値をとり、20kmGSMでは $-1/300$ [J/kg/秒])を設定し、DCAPEがそれより小さい場合にはA-Sの積雲対流が発生しないようにしている²。

今、力学過程による気温の変化率は、熱力学の第一法則より以下のように書ける。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\mathbf{v} \cdot \nabla T - \frac{\partial p}{\partial t} \frac{\partial T}{\partial p} + \frac{R_d T_v \omega}{c_p p} \quad (1.5.3)$$

ただし $\mathbf{v}$ は水平風ベクトル、 ∇ は水平微分、 ω は鉛直流、 p は気圧、 R_d は乾燥空気の気体定数、 c_p は定圧比熱である。(1.5.3)式の右辺で、第1項は水平移流、第2項は鉛直流、第3項は断熱圧縮・膨張による気温の変化を表している。

現在20kmGSMに導入されているDCAPEの計算手法では、(1.5.3)式の右辺第3項の計算において、地表面気圧の変化に関係する項の取り扱いが十分でない。その結果、例えば下層の風が山を登るように吹く場合では、下層の気温の変化が相対的に低く見積もられ、DCAPEの値が厳密に計算した場合よりも小さくなっている。これは、地形による上昇流域で必要以上に積雲対流を抑止してしまう場合があることを意味する。また逆に地形による下降流域では、抑止すべき積雲対流が発生させてしまうことがある。

図1.5.1は現在の手法と、より厳密に計算するように改良された手法で求めたDCAPEを比較した例である。2004年8月28日12UTCを初期時刻とする30時間予報(以下FT=30と書く)のDCAPEを示す。陰影はDCAPEが閾値より小さいため積雲対流が抑止されて

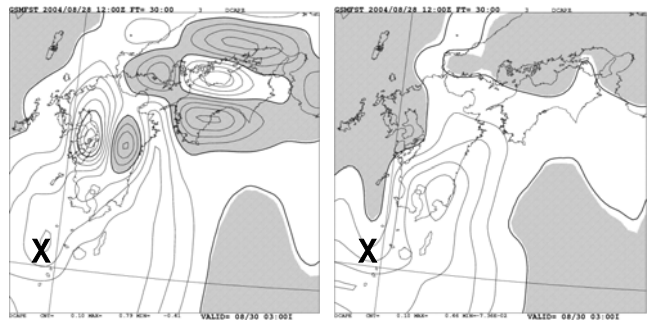


図 1.5.1 2004 年 8 月 28 日 12UTC 初期時刻の FT=30 における DCAPE。左：現在の手法、右：改良された手法。等値線間隔は 0.1 [J/kg/秒]で、太線が 0[J/kg/秒]、陰影は DCAPE が閾値($-1/300$ [J/kg/秒])より小さいため積雲対流が抑止されている領域、X はこのときの台風第 16 号の中心位置を表す。

¹ 中川 雅之

² ただし雲頂がモデル第 18 層(約 670hPa)以下の、浅い積雲には適用しない。

いる領域を表す。このとき屋久島の西(図中のX)に台風第16号があり、九州南部から東北部まで太平洋側を中心に広範囲で雨が降っていた。2つの手法によるDCAPEを比較すると、現在の手法では九州と四国の太平洋側の広い範囲でDCAPEが大きな負の値となっており、A-Sの積雲対流が抑止されている。現実にはこれらの領域は地形性の降水が起きやすい状況であり、積雲が発生しないのは適当でない³。一方、改良された手法では、九州から四国の太平洋側でDCAPEが正になっている。またこれに対応する領域では、A-Sの積雲対流による降水が予想されていた。2つの図でDCAPEの差が大きいのは、山地の風上側と風下側、台風周辺であり、いずれも風が地表面気圧の等値線に交差して吹いている領域に対応する。

このように、DCAPEの計算において地表面気圧の変化に関係する項の取り扱いを厳密にすることで、積雲対流の発生を判定するトリガーとして、より適当な値を得ることができた。次項以下では、この改良が降水の予想に与える影響を、事例によって検証する。

1.5.3 2004年8月30日の台風第16号に伴う強雨の例

降水予想の事例として、まず平成16年(2004年)台風第16号に伴う強雨の予想について解説する。この台風は8月30日01UTCに鹿児島県に上陸し、九州を縦断した後、山口県に再上陸した。この影響で8月27～31日にかけて西日本の太平洋側を中心に大雨となった。図1.5.2に2004年8月28日12UTCを初期時刻とする、現在の手法による20kmGSM(以下単に20kmGSM)、20kmGSMのDCAPEの計算手法を改良した版(以下改良DCAPEと呼ぶ)とRSMのFT=36の前6時間降水量、対応する時刻の解析雨量と台風第16号の中心位置を示す。このとき台風の中心は鹿児島市の西の海上で31.5°N、130.2°Eにあり北北東に時速15kmで進んでおり、各モデルによる台風中心位置の予報は、解析よりもやや北寄りであったものの概ね適中

していた。なお本事例は前項で示したものと同一初期時刻で、図1.5.1の時刻に続く6時間の降水を示している。また中川(2006)で紹介した事例とも同一である。

九州から南の海上にかけて観測された強い降水域は、どのモデルでもある程度再現できている。ただし20kmGSMでは、九州南東部や四国などで地形性降水の表現が改良DCAPE、RSMや解析雨量と比べて弱い。これに対して改良DCAPEでは、九州南東部での100mm/6時間を超える強雨や四国の降水の予想がより解析雨量に近くなっている。ただし九州の南の海上ではやや強雨を予想する範囲が広すぎ、対馬海峡から九州の西では降水の予想が少ない。また比較的弱い降水については、20kmGSMよりも緩和されているものの、予想する面積が広すぎる傾向が見られる。両モデルによる降水の予想を比較すると、改良DCAPEの方が九州や四国の山地の風上側で多く予想しており、DCAPEの差とよく対応している⁴。

RSMの予想を見ると、20kmGSMや解析雨量よりも地形の効果を強く表現している。九州東部の降水のピークが海岸寄りに予想され、高知県西部では降水を強く予想しすぎている一方で、九州山地の西側や四国山地の北側では降水が弱すぎる。また、壱岐から天草諸島にかけては過剰な降水を予想している。以上よりこの事例では、降水分布の予想において、改良DCAPEは20kmGSM及びRSMと同程度以上の性能であったといえよう。

予想された降水量のピークを見ると、20kmGSMで95mm/6時間であったのに対し、改良DCAPEで155mm/6時間、RSMでは173mm/6時間となっていた。解析雨量の160mm/6時間と比較すると、20kmGSMの予想は少なかったのに対し、改良DCAPEではより強い降水を予想でき、最大降水量についてもRSMとほぼ同等の性能があったといえる。改良DCAPEが降水のピークを予想した地点は宮崎県北部で、図1.5.1でDCAPEの差が大きい領域に含まれている。従って

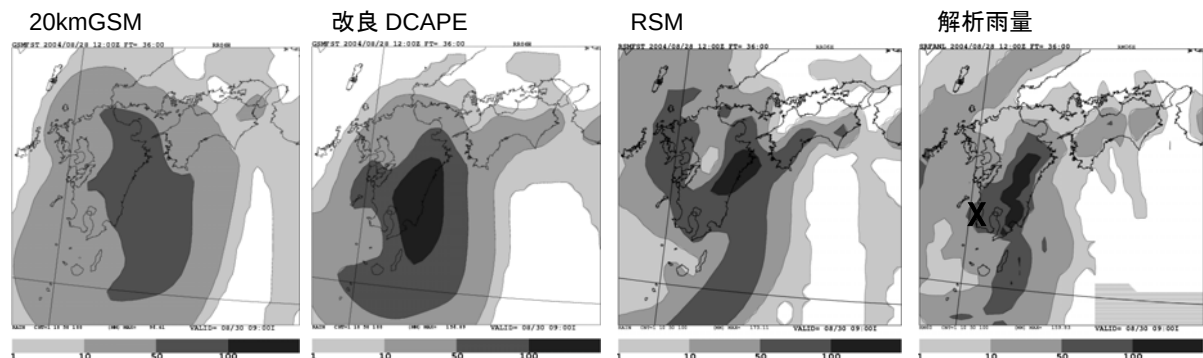


図 1.5.2 2004 年 8 月 28 日 12UTC を初期時刻とする FT=36 における前 6 時間降水量(左から 20kmGSM、改良 DCAPE、RSM)と、対応する時刻の解析雨量。右図で右下の横線は解析値がない領域、X は 8 月 30 日 00UTC における台風第 16 号の中心位置を表す。

³ ただし A-S の積雲対流と現実の積雲が、必ずしも一対一に対応するわけではない点には注意が必要である。

⁴ 図 1.5.1 に示した DCAPE は瞬間値である一方、図 1.5.2 の降水量は 6 時間積算値であるため、対応は完全でない。

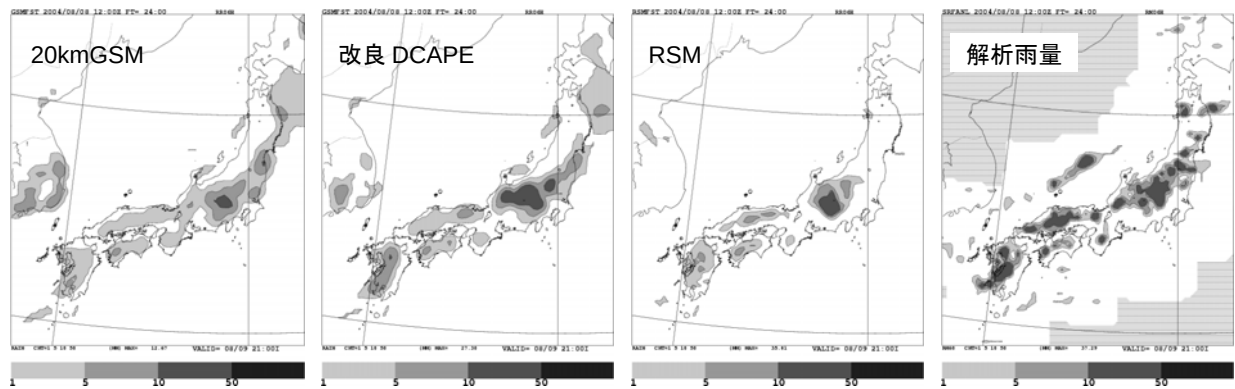


図 1.5.3 2004 年 8 月 8 日 12UTC を初期時刻とする FT=24 における前 6 時間降水量(左から 20kmGSM、改良 DCAPE、RSM)と、対応する時刻の解析雨量。右図で横線は解析値がない領域を表す。

20kmGSMでは積雲対流が過剰に抑止されていたのが、DCAPE計算手法の改良により降水を適切に予想できるようになったものであると考えられる。

1.5.4 2004年8月9日の雷雨の例

次に、2004年8月9日に観測された不安定性降水の予想について解説する。この日は本州付近は高気圧に覆われ、最高気温が広い範囲で30度を上回った。午後は大気の状態が不安定になり、猛烈な雨が観測されたところもあった。図 1.5.3 に 2004 年 8 月 8 日 12UTC を初期時刻とする 20kmGSM と改良 DCAPE、RSM の FT=24 の前 6 時間降水量と、対応する時刻の解析雨量を示す。

20kmGSM を解析雨量と比べると、分布は対応しているものの、降水を予想する面積が広すぎ、強度も弱い。これに対して改良 DCAPE の予想は、分布・量ともに改善している。このときの DCAPE を見ると、西日本の太平洋側を中心に改良 DCAPE の方が負の領域が広く(図略)、A-S の積雲対流が抑止されており、これが両モデル間の降水予想の差に現れていると考えられる。

一方 RSM は、降水を予想する範囲が解析雨量より狭く、特に東北地方でほとんど予想していない。これは RSM の、A-S があまり働かず、大規模凝結による降水は格子スケールで過飽和にならない限り作らないという特性によるものと考えられる(細見 2002; 中川 2006)。RSM で予想できなかった不安定性降水が 20kmGSM では予想でき、さらに改良 DCAPE では降水量についても改善したといえる。

1.5.5 まとめ

20kmGSM において DCAPE の計算手法を改良することで、主に風が地表面気圧の等値線に交差して吹いているような状況で、より厳密な DCAPE を求めることができた。新しい手法を組み込んだ 20kmGSM で実験を行ったところ、台風に伴う強雨の事例では、山地の風上側で予想降水量が増加して解析雨量に近くなった。この結果、RSM と比べて降水分布で同程度以上、最

大降水量でもほぼ同等の予想となった。また夏季の不安定性降水については、現在の手法による 20kmGSM と比較して、弱い降水を予想する面積が広すぎる傾向が緩和されるとともに、強い降水をより実況に近く予想できるようになった。RSM が表現しない不安定性降水を予想できる点は、現在の 20kmGSM と改良 DCAPE で共通している。

事例は挙げなかったが、冬型の気圧配置の時の降水について見ると、20kmGSM と改良 DCAPE の予想はほぼ同じであった。理由は、雲水スキームによる降水が卓越し、A-S による降水がほとんど予想されていなかったことである。なお、RSM の予想も概ね同様であった(冬型の気圧配置時の降水特性については、中川(2006)参照)。

改良 DCAPE には、降水の予想は改善されるものの、台風進路予報の誤差が大きくなるなどの問題点も見られる。今後これらの点に注意して調整と実験・検証を行い、現業化を目指す計画である。

参考文献

- 坂下卓也, 2006: 統計検証. 平成 18 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 14-19.
- 中川雅之, 2006: 降水事例検証. 平成 18 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 36-39.
- 細見卓也, 2002: メソスケール低気圧の過発達の改善に向けて. 平成 14 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 8-12.
- Nakagawa, M., 2005: Precipitation forecasts by a high resolution global model at JMA. *BMRC research report No.111*, 127-130.
- Xie, S. C. and M. H. Zhang, 2000: Impact of the convective triggering function on single-column model simulations. *J. Geophys. Res.*, **105**, 14983-14996.

1.6 雲・放射¹

予報モデルにおける雲の表現の差異は、晴れ・曇りといった天気表現の違いだけでなく、放射を通じた地上気温や風の差、降水の有無や強弱分布の違いとなって予報結果に影響する。小森・北川(2006)によると、RSMの雲量は過多であり、一方、高解像度全球モデル(20kmGSM)で表現される雲量分布はそれよりも妥当である。本節では、雲や放射の観点から、20kmGSMの精度を日本付近においてRSMと比較して評価する。

1.6.1 雲量と放射フラックスの比較

まずRSMと20kmGSMの雲量予想の違いを統計的に見る。2004年8月を検証対象期間として、表1.6.1に示した国内22地点に最も近いモデル格子における全雲量の予報頻度を比較した。予報値には、モデルのスピンアップの影響を避けるため²、予報初期のデータを使用せず、予報時間FT=25~48の1時間毎のデータを使用した。図1.6.1に雲量(0~1)の頻度分布を示す。RSMは雲量1と予報する頻度が全体の80%近くにも及ぶ。一方、20kmGSMでは様々な

表 1.6.1 比較に使用した期間と地点

対象期間	2004 年 8 月
使用予報値	各 12UTC 初期値の予報の FT=25 から FT=48 まで 1 時間毎のデータを使用
対象地点	稚内、札幌、秋田、仙台、館野、宇都宮、前橋、東京、八丈島、父島、銚子、名古屋、大阪、広島、高知、福岡、鹿児島、名瀬、那覇、南大東島、石垣島、南鳥島

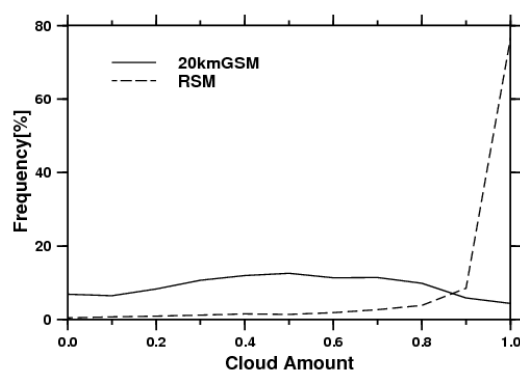


図 1.6.1 2004 年 8 月を対象とした RSM (破線) と 20kmGSM (実線) の雲量予報頻度。

¹ 村井 臣哉、小森 拓也、小野田 浩克

² 予報開始直後は、対流の立ち上がりや雲の生成が平衡状態に達しておらず、安定した予報ができていないことがある。

雲量がほぼ均等に予報されており、RSMとは大きく異なる。

これらの雲量を地上観測と比較するには注意が必要である。地上観測の雲量は、観測点から見た全天に占める雲量であり、モデル格子に占める雲量とは本質的に異なるからである。そこで、ここでは雲量ではなく、地上に到達する放射フラックスの予報値を観測値と比較する。地球大気上端に到達した短波放射(太陽放射)は、大気分子や水蒸気、雲によって吸収・散乱される。雲水を多量に含む雲が多く存在するほど、放射は大気中を透過しづらくなり(岩崎・北川 1996)、地上に到達する短波放射量は減少する。長波放射の場合は、大気中での透過・吸収に加え、水蒸気や雲などからの射出により、地上に到達する長波放射量が決定される。したがって地上に到達する放射フラックスは、雲量や雲の厚さの違いによって大きく変化する。

全雲量の比較と同様にして、2004年8月を対象に、22地点の放射フラックスを観測値と比較した³。図1.6.2は、22地点を平均した地上に入射する短波放射フラックスの平均誤差(ME)と平方根平均二乗誤差(RMSE)の日変化である。RSMでは、昼前後の時間帯に 250W/m^2 以上も短波放射フラックスが過少となっている。これに対して20kmGSMでは、RSMと

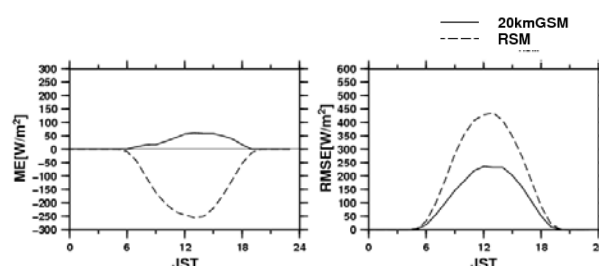


図 1.6.2 RSM と 20kmGSM の地上に入射する短波放射フラックスの平均誤差(ME) (左) と平方根平均二乗誤差(RMSE) (右)。横軸は日本時間。2004 年 8 月における 22 地点の平均値で、破線が RSM、実線が 20kmGSM。

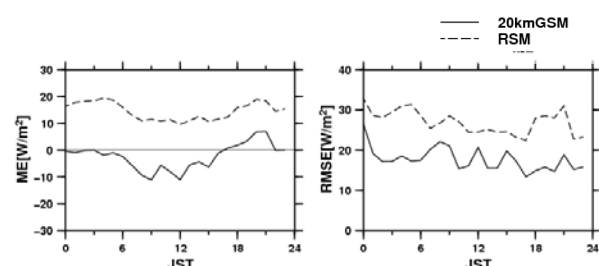


図 1.6.3 RSM と 20kmGSM の地上に入射する長波放射フラックスの平均誤差(ME) (左) と平方根平均二乗誤差(RMSE) (右)。横軸は日本時間。2004 年 8 月における館野での平均値で、破線が RSM、実線が 20kmGSM。

³ MSM に対して原(2006)が同様の検証を行っている。

は逆に観測より過多であるが、その大きさは 50W/m^2 程度と小さい。また 20kmGSM の RMSE は RSM の半分程度であり、誤差が小さく精度が良い。

RSM の 250W/m^2 もの短波放射フラックスのバイアスは、RSM と 20kmGSM で用いられている放射スキームの精度の違いだけでは説明しづらい。図 1.6.1 で示したように、RSM ではモデル格子が雲で覆われて、全雲量が 1 となる格子が広範囲に分布することが多い。この雲量過多が、短波放射フラックスの過少の主な原因であると考えられる。

図 1.6.3 は、館野における地上に到達する長波放射フラックスの ME と RMSE である。RSM が予報する長波放射フラックスは $10\sim 20\text{W/m}^2$ の正バイアスとなっている。図 1.6.1 で示した雲量予報頻度は予報対象時刻にほとんど依存していないため（図略）、RSM では 1 日を通して現実よりも多くの雲が予報されており、その雲層からより多くの長波放射が射出されていることが示唆される。 20kmGSM では ME は 0 に近く、RMSE は RSM よりも小さく、精度が良いことがわかる⁴。

1.6.2 地上気温予報との関係

地上での放射フラックスの予報精度は、地表面過程等の計算を通じて、大気的气象場の予報に間接的に反映される。詳細な地上気温検証は第 1.4 節に述べたが、ここでは放射フラックスとの関係から地上気温を考える。

図 1.6.4 に、2004 年 8 月における、22 地点平均の地上気温の日変化を示す。観測値、予報値ともに気温は $0.65^\circ\text{C}/100\text{m}$ の割合で海拔 0m における値に換算している。RSM は夜間に気温が下がらず、気温の日較差が小さい。一方、 20kmGSM の夜間の気温は観測とよく一致している。しかし日中は RSM と同様に観測ほど気温が上がらない。

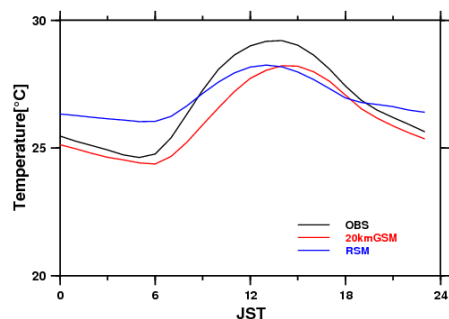


図 1.6.4 観測とモデル予報による気温の日変化。2004 年 8 月における 22 地点の平均値で、横軸は日本時間。黒線が観測値、青線が RSM、赤線が 20kmGSM 。

⁴ なお GSM の精度には、最近の長波放射スキームの改良（簗ほか 2005）の効果も含まれている。

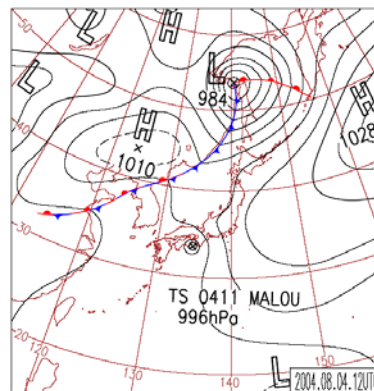


図 1.6.5 2004 年 8 月 4 日 12UTC の地上天気図。

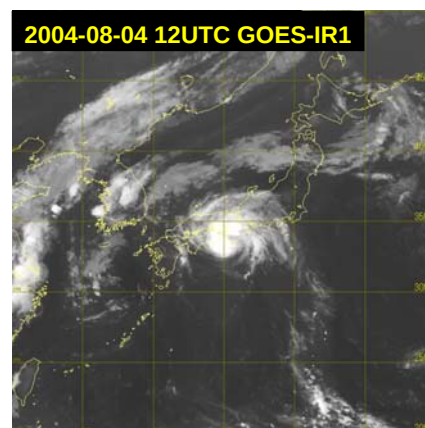


図 1.6.6 2004 年 8 月 4 日 12UTC の GOES-9 赤外画像。

これまでの議論から、RSM では過剰な雲からの長波放射の射出により、地上の放射冷却効果が小さくなることから、夜間の気温が低下しない原因の一つである可能性があると考えられる。 20kmGSM ではフラックスの誤差も小さく、気温予報精度が良くなっている。一方、日中の気温は、精度の良い放射フラックスを予報する 20kmGSM が、必ずしも RSM よりも気温予報の精度が良いという結果にはなっておらず、また、最高気温が現れる時刻が遅い傾向にある。

地上気温の予報には、大気と地表面との間の放射フラックスの違いだけでなく、モデル内の地表面状態（植生の違いや積雪状態など）や地表面過程、大気境界層過程の計算など、複数の過程が相互に関連している。特に第 1.4 節で述べたように、陸面過程の違いによる地上気温予報への影響が大きいと考えられる。ここでは夜間の地上気温予報の改善に、放射フラックスの精度が寄与している可能性を指摘するにとどめる。

1.6.3 衛星観測との比較

ここで、少し異なった観点からの雲量評価を試みる。衛星観測画像と 20kmGSM の予想衛星画像とを比較する。予想衛星画像とは、モデルで予想される

雲量や雲水量を用いて、数値モデルの放射伝達計算方法等により、衛星で観測される輝度温度の予想値を算出したものである（大和田 2006）。大和田（2006）が述べているように、予想衛星画像には放射計算の簡略化や数値予報モデルの特性が反映されていることから、注意して利用する必要がある。例えば予想赤外画像では、雲分布パターンは衛星観測に合っているものの、発達した積乱雲をうまく表現できないことが多い。

2004年8月4日12UTCからの24時間⁵を事例に選び、GOES-9衛星観測と予想衛星画像の1時間毎の輝度温度の統計をとり、特徴を調べた。この期間には、台風第11号が示度を浅めながら四国付近から日本海中部へと北上する一方、北海道北部を寒冷前線が通過した。図1.6.5に8月4日12UTCの地上天気図を、図1.6.6にGOES-9の赤外衛星画像を示す。

図1.6.7は、北緯20～50度、東経120～150度の範囲（図1.6.6と同じ領域）を、南北に5度ずつ区切った帯状の各領域における、GOES-9と20kmGSMの赤外輝度温度の5℃毎の頻度分布である。縦軸に輝度温度、横軸にその頻度を示している。この図で特徴的なのは、観測では輝度温度が0度より低い雲が比較的多く存在しているにも関わらず、モデル予想ではその頻度が低い点である。これは必ずしも、これらの輝度温度を雲頂温度とする雲がモデルで予報されていないということではない。それらの高度に雲を予報していたとしても、その雲の光学的な厚さが薄い（放射が散乱や吸収などによって妨げられる程度が弱い）ために、より低い高度の暖かい温度を反映した輝度温度になっている場合もある。定量的な評価は難しいが、輝度温度の頻度分布に差があることから、20kmGSMの予報は、上中層雲の雲量が少ないか、光学的に薄い可能性があるといえる。

北緯40度以北では、観測とモデルの差はあまり顕著ではない。これは、緯度によってモデルの雲の生成過程が異なる（例えば低緯度域ほど対流性雲が生成されやすく、高緯度域では層状性の雲が主となる）ことが関係しているかもしれない。今後、より多くの事例で確認する必要がある。

1.6.4 雲量予報の使用にあたって

20kmGSMは、RSMと比較して精度の良い放射フラックスを予報することができる。放射フラックスは地表面過程の計算に用いられ、結果的に地上気温予報の改善にもつながるものである。

雲の予報については、RSMで見られた雲量の極度の過多が改善されるが、逆にやや雲が少ないか、光学的に薄い可能性がある。このため雲量予報値を直

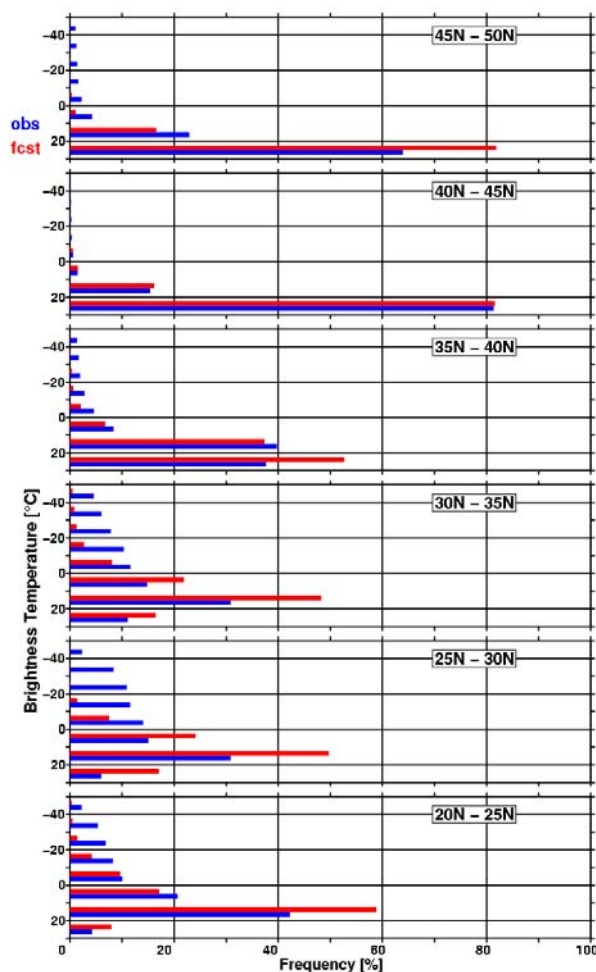


図 1.6.7 GOES-9 の観測（青）と 20kmGSM 予報値（赤）における赤外輝度温度の頻度分布。北緯 20～50 度、東経 120～150 度の範囲を南北に 5 度ずつ区切った帯状の領域での、2004 年 8 月 4 日 12UTC から 5 日 12UTC までの 1 時間毎の出力による統計。

接使用する場合には注意が必要である。お天気マップ（第3.9節）と併用して利用することも必要だろう。

参考文献

- 岩崎俊樹，北川裕人，1996：放射過程．数値予報課報告・別冊第42号，気象庁予報部，1-29.
- 大和田浩美，2006：予想衛星画像．衛星からわかる気象—マルチチャンネルデータの利用—，気象研究ノート，**212**，105-120.
- 小森拓也，北川裕人，2006：20kmGSMとRSMの雲の特徴．平成18年度数値予報研修テキスト，気象庁予報部，30-31.
- 原旅人，2006：物理過程の改良とその効果，平成18年度数値予報研修テキスト，気象庁予報部，84-87.
- 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.

⁵ 予報値は2004年8月3日12UTC初期値のFT=25～48を使用した。

1.7 留意すべき予報特性¹

1.7.1 はじめに

20kmGSMとRSMの予報特性を比較するため、昨年度の研修テキストに続いて、統計検証、事例解析が行われた。20kmGSMはRSMと同等以上の解像度を持つ全球モデルであり、60kmGSMの高解像度化とそれに見合った物理過程の導入によって、その予報精度がRSMを上回ることが確認された。

しかしその格子間隔が同じ20kmであるので、予報の対象とする現象のスケール等は、RSMと同程度であることに留意してほしい。例えば表現可能なスケールは格子間隔の5ないし8倍以上とされるので、20kmGSMにおいても100kmから160km程度以上である。一般的には、モデルで表現可能なスケールの現象でも、空間的・時間的スケールに応じた予報誤差を考慮する必要がある。短期予報についての北川(2005)の解説を参照していただきたい。

20kmGSMでは、RSMと異なった、あるいはより精緻な物理過程を採用していることから、その予報特性にいくつか注意すべき差異がある。また、物理過程の再検討によって改良が期待されることはすでに述べられている。ここでは、第1章の各節で詳述されたモデルの特性と議論のうち、顕著な特性について述べる。

1.7.2 雷雨の予報と降水過程

RSMと20kmGSMでは夏季の陸上における雷雨の予報特性の違いが大きい。RSMは予想する面積が実況より狭いことが多いので、大気の安定度を考慮しガイダンス等から雷雨の可能性を判断する必要があった。一方GSMは弱いながら降水を予報する。しかし不安定域が広い場合は予報する降水域も広くなり、統計検証では弱い降水頻度が過剰であるバイアスになって現れている(図1.2.5)。この特性は20kmGSMにおける積雲対流のパラメータ化によるものである(中川 2006)。

20kmGSMが弱い降水を広範囲に予報している場合、これがモデルでの積雲対流を意味するならば、この予報は降水量は過小、領域は広すぎると判断するのが一般的に妥当である。そのためには予報された降水が積雲対流によるものか否かを知ることが必要で、それには安定度などが指標になる。その上で、降水についてガイダンスの値を参照して検討していただきたい(第3.2節、予報事例参照)。

広すぎる降水域の改善に対しては今後の検討課題であるが、降水の同化のみならず降水過程の改善にも取り組む必要がある。RSMの場合、予報初期の降水のスレットスコアがよいのが特徴的で、領域解析が解析雨量を同化している効果と考えられている。20kmGSMに対しても同様に解析雨量を同化することが想定されるの

だが、雷雨の予想が弱かったRSMと事情が異なり、不安定降水に対する同化の有効性に、より慎重な検討が必要であると考えられる。その理由は、力学過程等とは異なり、降水過程の場合は近似的なパラメータ化であり、先の雷雨の予報事例等からわかるとおり、降水強度や領域の予報はまだ十分とはいえない。その不十分なモデルに基づいてデータを同化すると、モデルの誤差が気温や水蒸気の解析値を歪めるおそれが生じるからである。基本的には予報モデルの降水過程の改良が必要であり、開発を進めている。第1.5節はひとつのその成果についての解説である。

不安定降水域が広すぎる場合、そのことで気温の予報を誤らせることも考えられる。つまり降水を誤って予報して不安定を解消し、その結果日中の昇温が不十分であるなどである。20kmGSMの特性がRSMの特性と粗く言えば逆転しているわけだが、これまでと同様、降水と気温などが互いに矛盾しないように注意が必要である。

一般に系のスケールがモデルが表現できるスケールの下限に近い場合、予測は困難な場合が多く、初期場にその現象が解析されないとさらに難しい。メソスケールの降水の予報はデータ同化によってその系を捉える必要があるが、データ同化が予報モデルの物理過程のパラメータ化そのものと密接に絡んでおり、予報、同化、観測のシステムとしての性能向上が必要な分野である。

1.7.3 メソスケールの低気圧の予報

降水過程の違いによって予報特性が改善された事例として、RSMで200kmから300km程度のメソ低気圧の発達しすぎが見られる場合でも、20kmGSMではそれが見られないことが述べられている(山田 2006a)。

これまでRSMの予想する低気圧の中心示度が深すぎる例のあることは、60kmGSMの予報する低気圧との比較からもわかることが多かった。初期値が新しくなるほど、同じ予報時刻の示度の予想が浅くなり、周辺の降水量も少なくなることで、60kmGSMの予想に近づく傾向があった。このRSMの予想する低気圧の過発達は、モデルの降水過程のうち大規模凝結が主に働くというRSMの特性が主因と考えられており(山田 2006a)、60km、20km両GSMには積雲対流パラメタリゼーションの降水過程が主に働くため、同様な機構による過発達の可能性は低い。

初期時刻によって予報が変わる事例は経験上60kmGSMのほうがRSMより少なく安定している²。統計検証結果が改善していることから、20kmGSMも同程度に安定していると考えられる。しかし、初期値変わりに対する基本的な考え方は、初期時刻の新しい予報のほ

² RSMのような低気圧の過発達があると、解析のたびに第一推定値が大きく変化を受けて、初期値変わりという状態になりがちであることがひとつの理由と推定される。

¹ 田宮 久一郎

うがより信頼性のあること、それでも予報には現象のスケールに応じた空間的・時間的ばらつきがあること、などを念頭におくことであるが、毎日出力されるプロダクトを通して20kmGSMの特性について経験を重ねて行く必要があると考えている。

1.7.4 夏季700hPa相対湿度の乾燥バイアス

相対湿度の予報特性には、注意すべき点がある。RSMとは異なり、夏季700hPaを中心に10%程度の乾燥バイアスがあり(図1.2.4)、検証期間中の毎日の予報事例にも湿潤域が狭いことはRSMとの比較からも明らかに見て取れる(坂下 2006)。RSMでは相対湿度のバイアスがほぼゼロであったことから、湿潤域の広さに関してほぼ妥当であるといえる(坂下 2006)。しかし20kmGSMは、バイアスはRSMより大きいものの、RMSEが小さいことから、誤差の標準偏差については、RMSEの改善以上に大きく減少していることがわかる。

その点を踏まえると、相対湿度のバイアス補正を行って、湿潤域の広さを広めに捕らえることが必要かつ有効になる。700hPaで相対湿度10%の負バイアスを基準にして、RSMにおける気温露点差3℃以下(相対湿度80%以上)の湿潤域は20kmGSMでは4.5℃程度以下(70%以上)の領域に対応するというのが平均的な目安となる。

湿潤域の過小表現に対して、乾燥域は過大の傾向であるが、700hPaを中心とした乾燥バイアスが、20kmGSMの予報の何かの誤差特性の結果であるのか、あるいは原因となっていないか(対流不安定が強調されすぎることはないか)などについてまだ明らかになっていないので、今のところ湿潤域の予報に注意が必要といえる段階にしかない。

900hPaを境に下の高度で湿潤バイアス、上で乾燥バイアスがあることは、湿った境界層の高度が低いことを意味する(中川 2006)。日本域のゾンデ観測との比較から、風速の平均誤差にも、900hPaを境にしたバイアスの急変が見える(図1.2.4)。この原因として、RSMに比べ境界層が発達していないため、上層の強風層の運動量が十分下層に運ばれていない可能性がある。これが日本付近に限ったことでないことは、海上風にも(夏季にはRSMよりも大きな)弱風バイアスがあることを示したQuikSCAT海上風データとの比較検証(山田 2006b)からも示唆される。さらに気温の平均誤差についても(図1.2.4)、鉛直構造を見てみると同様なことが見えて、GSMに特徴的な925hPaでの低温バイアスとそれによってその上層の安定度が大きくなっている誤差は、鉛直混合の不足という見方と矛盾しない。

このような個々の要素の誤差特性が、例えば中川(2006)の指摘するように湿った境界層の高さが不足しているという観点から統合的に説明ができる、などがわかれば開発にとっても有益である。利用者に対しても、

より統合的でわかりやすい形で特性を提示することが望ましいであろう。その意味で予報特性を明らかにするために、さらなる調査、事例解析を継続し、モデルの理解を深める必要がある。

参考文献

- 北川裕人, 2005: プロダクトとその利用の仕方. 平成17年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 68–69.
- 坂下卓也, 2006: 統計検証. 平成18年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 14–19.
- 中川雅之, 2006: 降水事例検証. 平成18年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 36–39.
- 山田和孝, 2006a: 20kmGSMの総観場の予報特性について, 平成18年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 32–35.
- 山田和孝, 2006b: 20kmGSMの海上風の検証. 平成18年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 28–29.

第2章 メソ数値予報モデル

2.1 モデルの変更点の概要¹

2.1.1 はじめに

メソ数値予報モデル(MSM)は、2007年5月16日に1日8回のうち4回の予報時間を15時から33時間に延長するとともに、物理過程を中心に多くの改良がなされたモデルに置き換えられた。この33時間への予報時間延長にあわせた改良については、荒波・原(2006)で述べられているが、その後、いくつかのさらなる改良が行われた上で現業化されている。

一方、第1章で述べられているように、2007年11月に領域モデル(RSM)が廃止され、その役割を高解像度全球モデル(20kmGSM)が担うこととなる。現在のMSMは解析・予報ともに側面境界値としてRSMの予報値を利用しているが、RSMの廃止およびGSMの高解像度化にあわせ、MSMの側面境界値を20kmGSMの予報値に変更する。これによって、RSMと20kmGSMの間の特性の違いが、側面境界値を通じてMSMにも影響を及ぼし、MSMの特性が変わる。

本章では、荒波・原(2006)以降に行われたモデルの改良、2007年5月に現業化されたモデルの約1年間にわたる検証結果、および側面境界値がRSMから20kmGSMに変更となるMSMの仕様、検証結果、特性を紹介する。

なお、本章で示す20kmGSMの側面境界値を用いたMSMでは、GSMにおけるDCAPEの修正(第1.5節)が行われる以前のGSMの予報値を側面境界値として用いており、今後のGSMの特性の変化によってMSMも特性が変化する可能性がある。また、計算機資源の都合上、検証の対象にしたのは予報時間が33時間である03, 09, 15, 21UTCのみである。また、実験システムの都合上、09, 21UTC初期値で側面境界値とするそれぞれ06, 18UTC初期値の20kmGSMは、本運用で利用する速報解析ではなく、サイクル解析²の結果を初期値にした予報値を用いている。そのため、本運用においては本稿で示すものと特性が変わる可能性があることに注意を要する。

以下では2007年5月までMSMで使っていたモデルをMSM0603、荒波・原(2006)執筆時点における改良モデルをMSM0612³、さらに改良が加えられて2007年5月16日より現業化したモデルをMSM0705と表記することにする。

2.1.2 MSM0612 から MSM0705 への変更点

MSM0612 から MSM0705 への変更点を簡単に述べる。

(1) 雲氷の落下速度の調整

瀬川・三浦(2006)で指摘されているように、MSM0612ではMSM0603に比べて、暖候期の400hPaより下層の高度場でほぼ一定の負バイアスが見られ、上層では気温の正バイアスが拡大していた。

MSM0612においては、放射過程で用いる雲量や雲水・雲氷量を部分凝結スキームから計算しており、従来の相対湿度や可降水量による診断に比べて、MSMの大きな特徴である雲微物理過程で予報される雲水や雲氷量の情報を大きく反映するようになった(Hara 2007)。一方、MSM0603では雲氷の落下を考慮していなかったために、予報が進むにつれて上空に雲氷が蓄積されていたが、MSM0612では雲氷の落下を考慮し、上層での雲氷の蓄積を抑制するようにした(原 2006)。

しかし、MSM0612ではこの雲氷の落下が不十分であるために、部分凝結スキームによって上層雲(雲量・雲氷量)が過大に評価されている傾向が見られた。そのため、上空で太陽からの短波放射を過度に吸収することによって上層の気温の正バイアスが生じており、その結果、上空の大気が軽くなることで中層から下層にかけて高度場に負バイアスが生じていると考えられた。実際に、雲氷の落下速度をモニターしてみたところ、一般にいわれている雲氷の落下速度(最大 30cm/s)より小さいことが判明し、MSM0705では雲氷の落下速度を調整してより多くの雲氷を落下させるようにした。その結果、上空の気温の正バイアス、中層から下層の高度場の負バイアスが縮小し、精度向上を図ることができた(図 2.1.1)。

(2) 積雪時の地面熱容量の調整

MSM0603では冬の雪上で地上気温が下がりすぎることがしばしばあった。これは積雪域であっても森林や人工構造物など雪で覆われていない部分があるにもかかわらず、地表面種別が雪とされた格子全体が積雪に覆われていると仮定していることを原因と考えた。そこで、MSM0612では、森林や人工構造物など雪で覆われていない部分の効果を加味するために、熱容量などの地表面パラメータを積雪のある場合とない場合の重み付き平均で設定するようにした。これによって、MSM0603と比較して、正バイアスは拡大しているものの、平方根平均二乗誤差(RMSE)は同等でランダム誤差が縮小した(瀬川・三浦 2006)。

しかし、MSM0612では地域によっては地上気温が下がるべきところで下がりにくくなるなどの弊害が見られた。そこで、MSM0705ではMSM0612において一律

¹ 原 旅人

² サイクル解析では速報解析より観測データの入電締切時間が遅く、より多くの観測データを同化に利用できる。

³ 「MSM0612」という呼称は本稿だけのものであり、現業化されたものではない。

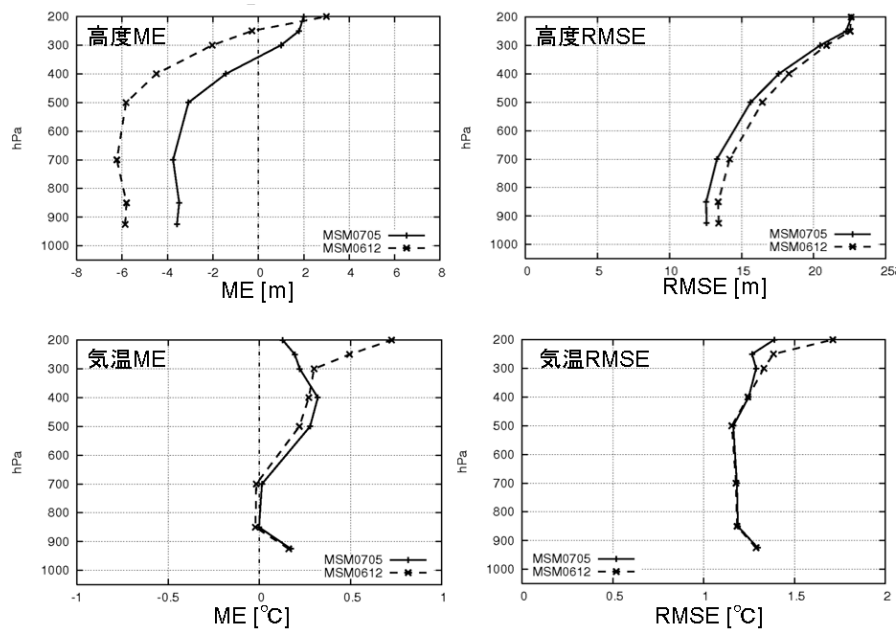


図 2.1.1 2006 年 7 月 1 日～7 月 31 日における MSM0612 と MSM0705 の高度(上段)および気温(下段)の ME(左)と RMSE(右)の鉛直分布。検証対象は日本のゾンデ観測で予報時間 33 時間の結果を示す。実線は MSM0705、破線は MSM0612。

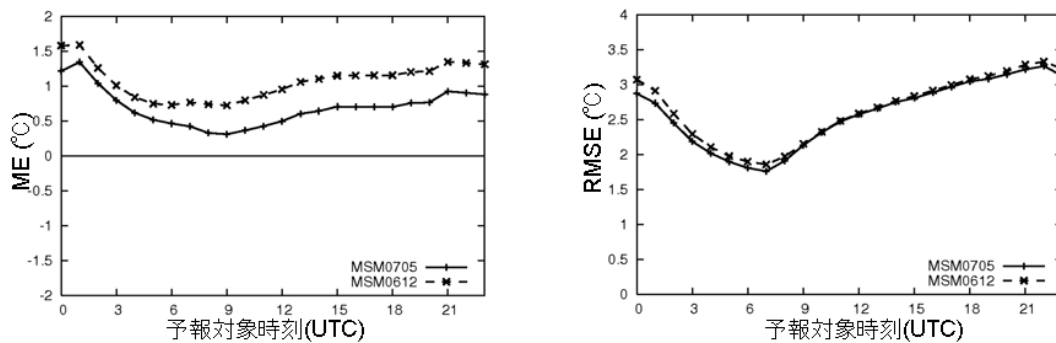


図 2.1.2 2005 年 12 月 24 日～2006 年 1 月 23 日の MSM0612 と MSM0705 の地上気温の ME(左)と RMSE(右)。検証方法は瀬川・三浦(2006)と同じ。予報時間 33 時間までの予報結果を用いて予報対象時刻ごとに示している。実線は MSM0705、破線は MSM0612。

に設定していた重み付き平均の重みを土地利用状況に応じて設定するように変更した。その結果、地上気温の正バイアスの拡大を抑制するとともに RMSE を縮小して精度が向上した(図 2.1.2)。

2.1.3 20kmGSM 予報値への側面境界値の変更に伴うモデルの変更点

20kmGSM の運用開始と同時に、側面境界値が RSM 予報値から 20kmGSM 予報値に変更になることにあわせて、以下の変更を行う。

(1) 側面境界値の更新頻度

RSM は 1 日 2 回(00,12UTC)の実行であったが、20kmGSM は 1 日 4 回(00,06,12,18UTC)の実行となる。これにあわせて、MSM で利用する側面境界値を表 2.1.1 のように変更し、従来、1 日 2 回だった側面境界値

の更新が 1 日 4 回になる。これによって、最新の観測値を反映させた初期値から予報した、予報時間が短く精度の高い予報値を側面境界値として使うことができるようになる⁴。

表 2.1.1 MSM の初期時刻と側面境界値に用いる予報値の初期時刻の対応

初期時刻 (UTC)	側面境界となる予報値の初期時刻(UTC)	
	RSM	20kmGSM
03, 06	00	00
09, 12		06
15, 18	12	12
21, 00		18

⁴ MSM で 33 時間予報を行う 03, 09, 15, 21UTC 初期値は、側面境界値の更新直後に対応している。

(2) 側面境界付近のモデル地形や海陸分布

境界条件の情報を反映させるモデルの計算領域の境界付近の格子における地形(標高)や海陸分布は、側面境界値を提供するモデルのそれらを考慮して決定されているため、側面境界値の変更により地形や海陸分布が変更になる。ただ、この変更は側面境界付近に限られるため、これによる予報特性への影響はない。

(3) 力学過程-移流のスプリット

荒波・原(2006)で述べられているように、MSM0612およびMSM0705においては、計算安定性のために移流のスプリットにおいてリープフロッグの前半でも重力波をスプリットするように変更した。しかし、これは低解像度では効果があるものの、5kmのような高解像度では逆に安定性を損ねる場合があることが判明した。そのため、MSM0603と同様にリープフロッグの後半だけで重力波をスプリットするように変更する。

2.1.4 側面境界値の変更に伴うモデルの特性の変化

第2.3節で示すように、RSMに比べて20kmGSMでは高度場、気温場の予報精度が大きく改善されることに対応して、MSMでも側面境界値のRSMから20kmGSMへの変更によって高度場、気温場に大きな改善が見られる。一方、20kmGSMで顕著に表れる下層の湿潤バイアスと中層以上の乾燥バイアス、寒候期の上空300hPa付近における高度場の負バイアス、気温場の正バイアスが、側面境界値の変更によって子モデルであるMSMにも現れてくる。特に湿りの表現の違いによって、第2.4節で示すように、対流パラメタリゼーションの働き方が変わり、降水予報の表現が大きく変わる場合がある。

また、側面境界値の更新頻度が多くなることで、最新の観測値を反映した新しい予報を側面境界値として利用できるようになり、MSMの精度の予報時間による劣化を抑制できると期待されたが、今回の実験結果では06, 18UTC初期値の20kmGSMを側面境界値に用いた09, 21UTC初期値のMSMの降水スコアの劣化は00, 12UTC初期値の20kmGSMを側面境界値に用いた03, 15UTC初期値のそれより速い傾向が見られる。これについては、側面境界値である20kmGSMの初期値による精度の違いなども含めて、今後、調査を進める必要がある。

2.1.5 今後のメソ数値予報モデル

非静力学モデルへの変更、高解像度化、予報時間延長と続いたMSMの大きな改良は2007年5月のMSM0705の現業化、そして2007年11月の20kmGSMへの側面境界値の変更で一段落した。

モデル本体については、今後、予報結果の検証を通

じて問題点を抽出しながらモデルの改良のために開発を行い、成果が出た段階で順次、ルーチンに取り入れていく。現在進められている開発としては、植物圏モデル(SiB)の導入、積雲対流パラメタリゼーションの特性調査とさらなる改良(成田 2007)などがある。

一方、初期値の作成手法については、現在の静力学モデルを基にした4次元変分法から非静力学モデルを基にした4次元変分法(JNoVA)への変更(Honda et al. 2005)が2007年度中に予定されており、現在、開発の最終段階を迎えている。

また、水平解像度2kmの高分解能局地モデル(LFM)の開発では、関東域を予報領域とした1日8回の実験運用を2007年6月より行っている(竹之内ほか2007)。

モデル本体の開発だけでなく、メソモデルによる確率予報や複数シナリオの提供を目指して、メソアンサンブルの開発も始まっており、現在はLAF法によるアンサンブル予報の精度検証や検証手法の開発、SV法による初期値摂動を用いたアンサンブル予報の基礎的な実験が行われている。

参考文献

- 荒波恒平, 原旅人, 2006: メソ数値予報モデルの改良と予報時間延長. 平成18年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 55-58.
- 瀬川知則, 三浦大輔, 2006: 統計検証. 平成18年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 59-79.
- 竹之内健介, 荒波恒平, 中山寛, 藤田匡, 倉橋永, 石川宜広, 2007: 高分解能局地モデルの開発. 第9回非静力学モデルに関するワークショップ予稿集.
- 成田正巳, 2007: 気象庁メソ数値予報モデルにおけるKain-Fritsch対流パラメタリゼーションの特性. 第9回非静力学モデルに関するワークショップ予稿集.
- 原旅人, 2006: 物理過程の改良とその効果. 平成18年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 84-87.
- Hara, T., 2007: Implementation of improved Mellor-Yamada Level 3 scheme and partial condensation scheme to JMANHM and their performance. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, **37**, 4-07.
- 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 nonhydrostatic model at Japan Meteorological Agency: Formulation and preliminary results. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **131**, 3465-3475.

2.2 2007年5月に更新されたモデルの統計検証¹

2.2.1 はじめに

本節では、2007年5月に更新された、側面境界値に領域モデル(RSM)を用いたメソ数値予報モデル（以下MSM 0705と記述する）の降水量、地上気象要素、高層気象要素について検証した結果を述べる。MSM0705の予報の特徴を調べるために、2007年5月に更新される以前のMSM（以下MSM0603と記述する）とRSMを比較の対象とした。またMSM0705とMSM0603は03,09,15,21UTC初期値、RSMは00,12UTC初期値の予報を用いた。検証期間は、瀬川・三浦(2006)では、暖候期・寒候期それぞれ20日間程度だったが、本検証では2006年7月～2007年4月の10か月間とし、これを、夏季（2006年7月～9月）、秋季（2006年10月～11月）、冬季（2006年12月～2007年2月）、春季（2007年3月～4月）に分けて検証した。検証期間は2007年5月以前であるが、MSM0705については、2007年5月に現業化されたモデルと同じ仕様で計算した結果を用いている。なお、以下では予報時間をFTと記述する。

2.2.2 降水検証

ここでは、モデルの降水予報を、対解析雨量で検証した結果を示す。瀬川・三浦(2006)と同様に、陸域と海岸から40km以内の海域において、前3時間降水量について、20km間隔の検証格子内の観測値および予報値それぞれの平均値を比較した。

(1) 降水強度別の降水予報特性

図2.2.1に、3時間ごとの各FTについて作成した四分割表（付録参照）をFT=03-15（予報前半）とFT=18-33（予報後半）でそれぞれまとめて計算した、降水強度別のスレツスコアとバイアススコアを示

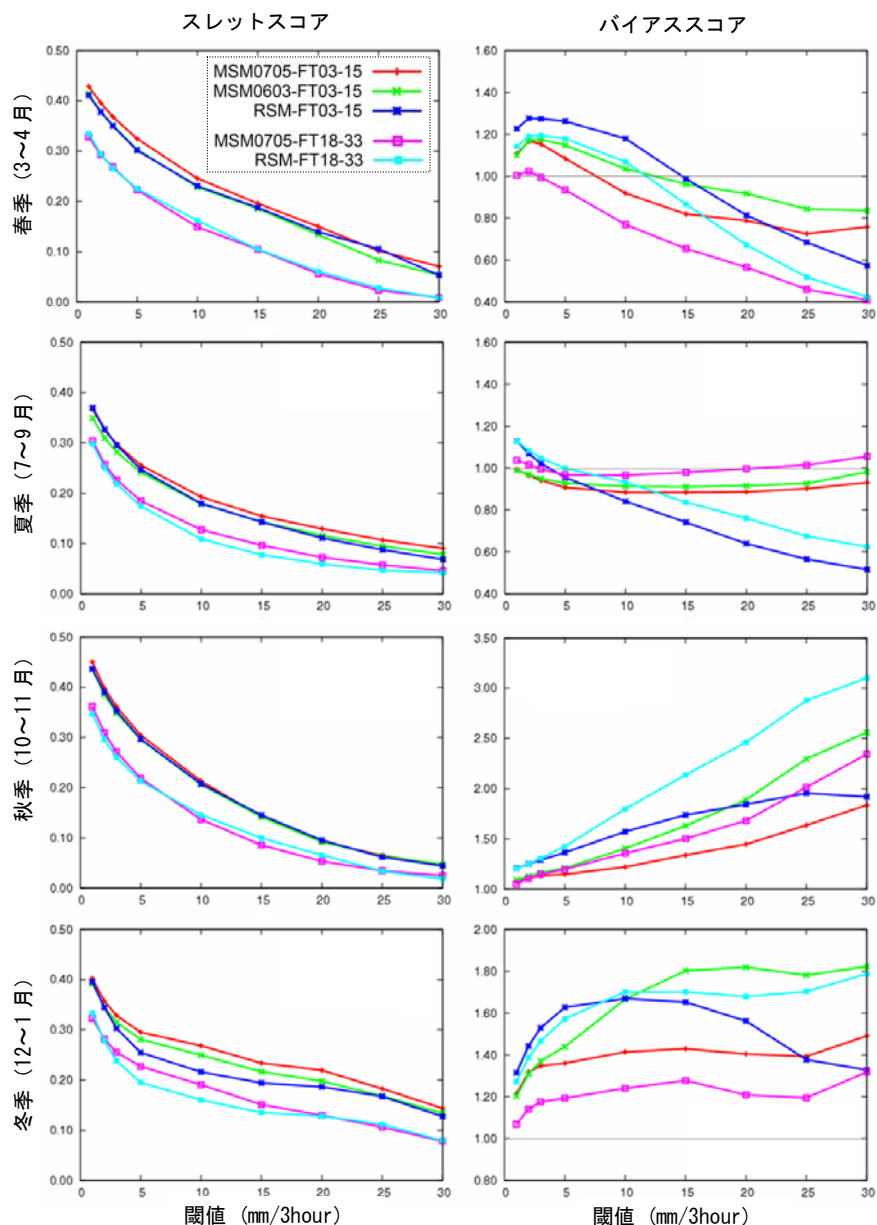


図2.2.1 解析雨量に対する各モデルの降水強度別スレツスコア（左）とバイアススコア（右）。20km検証格子内平均降水量を使用。凡例はモデルの名称と予報の前半(FT=03-15)か後半(FT=18-33)かを表す。例えばMSM0705-FT03-15は、MSM 0705におけるFT=03-15の各FTのスコアを閾値ごとにまとめたスコアである。

す。なお、MSM0603は15時間予報のため、FT=03-15（予報前半）のみ表示している。

夏季と冬季におけるMSM0705のスレツスコアはMSM0603から改善し、予報前半・後半ともにRSMをほぼ上回る。一方、春季のMSM0705は、予報前半はMSM0603やRSMを上回るものの、予報後半はRSMと同等である。秋季のMSM0705は、予報前半・後半ともに、MSM0603やRSMと同等である。バイアススコアは季節により以下の傾向がみられる。

- ・春季：右下がり、特に後半強雨の予報頻度過少
- ・夏季：閾値、前半・後半によらずほぼ1

¹ 三浦 大輔

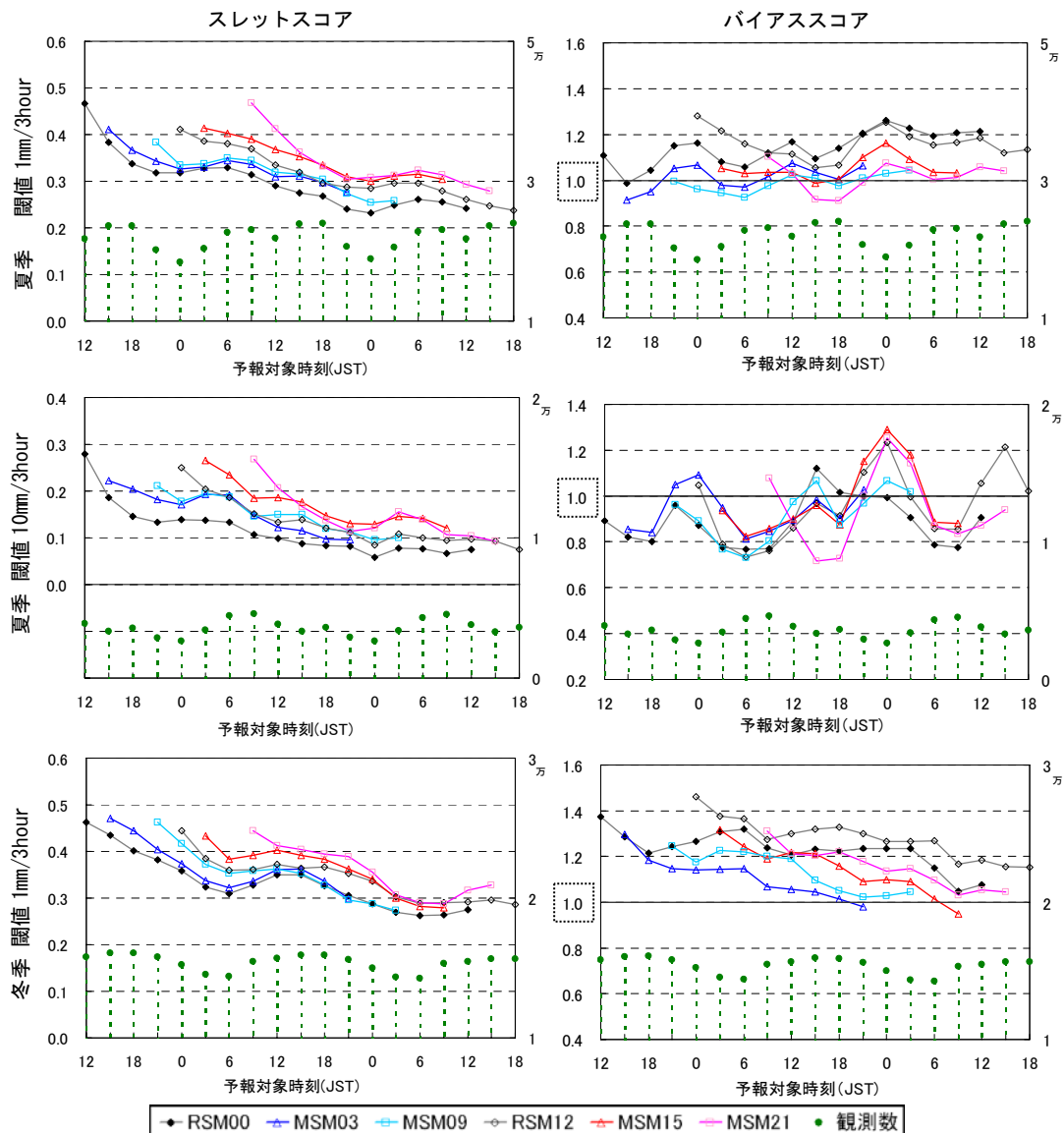


図 2.2.2 MSM0705 と RSM の初期時刻別の予報対象時刻ごとのスレットスコア (左) とバイアススコア (右)。20km 検証格子内平均降水量を使用。上から、夏季閾値 1mm/3hour, 10mm/3hour、冬季閾値 1mm/3hour。03UTC 初期値の MSM を MSM03 と表示。各グラフの右縦軸は、解析雨量が閾値を超えた数 (観測数) を表す。

- ・ 秋季：右上がり、強雨の予報頻度が非常に大きい
- ・ 冬季：全閾値で、予報頻度過剰

(2) 予報対象時刻別の降水予報特性

図 2.2.2 は、夏季と冬季における MSM0705, RSM の各初期時刻別の予報対象時刻ごとのスコアである。両季節、各閾値について、03, 15UTC 初期値のスレットスコアは、それぞれその前の予報である 21, 09UTC 初期値のスコアよりも同じ予報対象時刻において大きい。一方、09, 21UTC 初期値のスレットスコアは、その前の予報である 03, 15UTC 初期値に対して、予報前半は上回るものの、後半は同程度になる。特に、夏季では FT=06-09 以降同程度になっている。側面境界値として使われている RSM の予報経過時間 (新鮮度) 等が予報に影響しているとみら

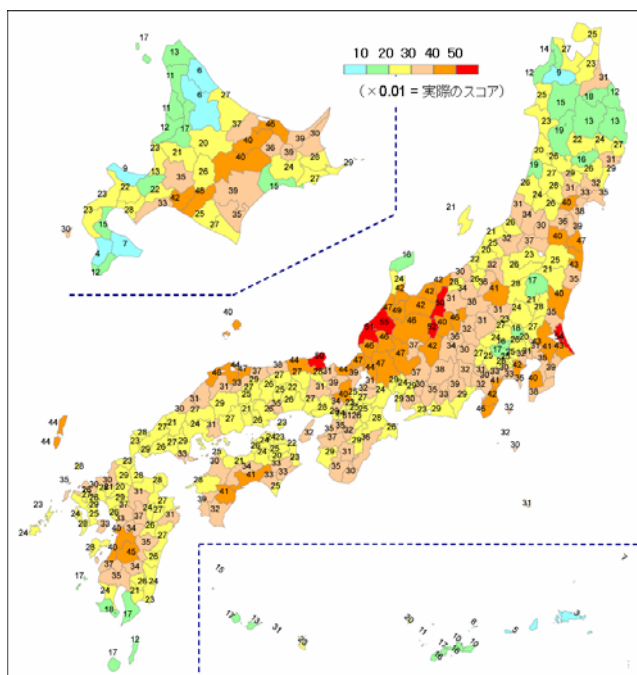
れる (第 2.3 節に GSM を側面境界として用いた場合について示している)。

また各スコアと観測数 (閾値を超えた観測の数) に日変化がみられる。夏季を中心にバイアススコアと観測数は負相関であり、観測数の少ない時間帯はバイアススコアが 1 より大きく空振りが多い。このことは、スレットスコアが小さいことにつながっている。

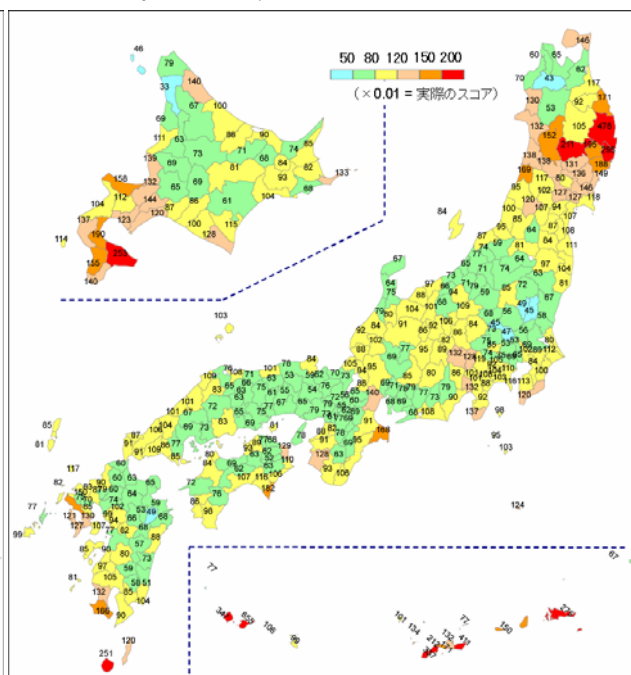
(3) 降水予報の地域特性

図 2.2.3 は、MSM0705 の FT=03-15 について、二次細分区域内で平均したモデルと観測の各 3 時間降水量を元に計算したスレットスコアとバイアススコアのスコアマップ (瀬川・三浦 2006 参照) である。以下に、夏季の閾値 5mm、冬季の閾値 1mm における

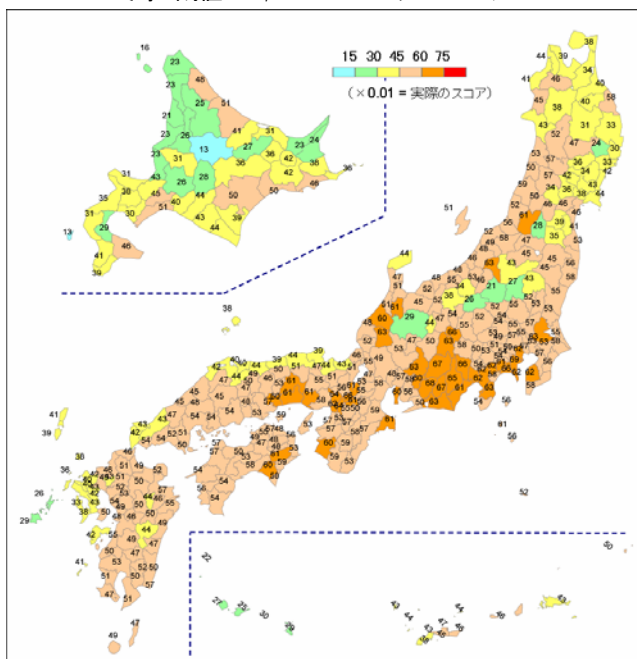
夏季 閾値 5mm/3hour スレットスコア



夏季 閾値 5mm/3hour バイアススコア



冬季 閾値 1mm/3hour スレットスコア



冬季 閾値 1mm/3hour バイアススコア

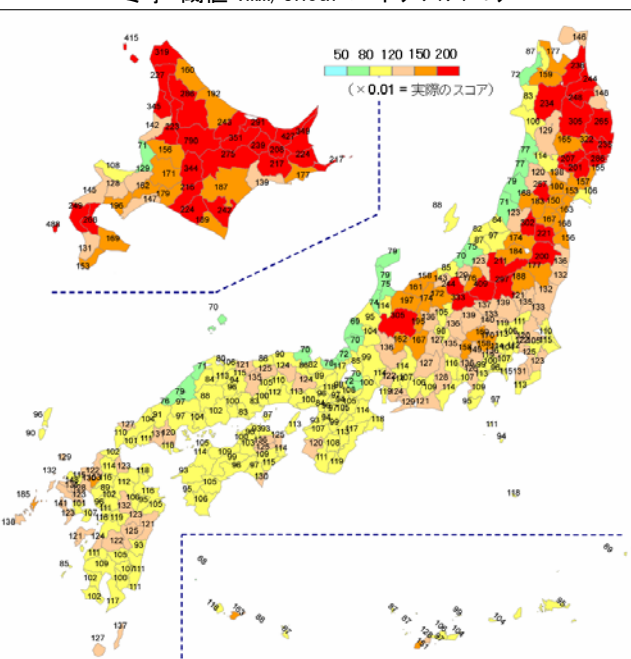


図 2.2.3 MSM0705 の FT=15 までの全予報期間を対象に、二次細分区域内平均降水量で夏季閾値 5mm/hour(上段)、冬季閾値 1mm/3hour(下段)について計算した、スレットスコア×100(左)、バイアススコア×100(右)。

スコアマップから読みとれる降水の地域的な特性について述べる。夏季は、(1)の全国のスコアではバイアススコアがほぼ1であったが、全国一様に1ではなく、北日本の一部や南西諸島で予報頻度過剰となっている他は、予報頻度がやや過少な地域が多い。スレットスコアは、梅雨前線や秋雨前線による降水の多かった北陸～中国地方の日本海側などで大きくなっている。冬季は、(1)の全国のスコアでは約1.2で予報頻度過大であると述べたが、過大なのは北海

道と東北の太平洋側、中部の山岳地帯である²。一方、積雪の多い本州日本海側の平野部は予報頻度過少となっている³。関東から西の太平洋側のバイアススコアは1に近い。スレットスコアは、バイアススコアの大きい地域でやや小さい傾向がみられる。

² 解析雨量が実際の降水よりも過少であるため、それに対するバイアススコアが大きくなっているとみられる。

³ 水平解像度を 1 km 程度まで高解像度化すると、日本海側平野部の予報過少は解消されると言われている。

2.2.3 地上気象要素の検証

MSM0705の地上付近の予報特性をみるために、地上気象要素（気温・風速）について検証した結果を図2.2.4に示す。瀬川・三浦(2006)と同様に、観測点を囲むモデル格子の海陸設定が4格子とも陸地となっているアメダス観測点の値とモデルの値を比較した。検証スコアは、平均誤差(ME)と平方根平均二乗誤差(RMSE)である。FT=00-15の予報値を用いて、予報対象時刻ごとにスコアを示した。

まず、全季節、両要素におけるMSM0705のMEとRMSEについて、ほぼ全予報対象時刻においてMSM0603、RSMよりも精度が良い。

気温のMEについては、全体的に正バイアスで、冬季以外は日中よりも夜間の正バイアスが大きいの。なお、冬季のMSM0705の正バイアスは、瀬川・三浦(2006)ではMSM0603よりも顕著であるが、本検証では夜間を中心にMSM0603よりも小さい。第2.1.2項(2)の土地利用に応じた積雪域の地面熱容量の調整の効果とみられる。

風速のMEについては、各季節似通った傾向となっており、夜間に正バイアス、日中に春と夏を中心に負バイアスとなっている。

2.2.4 高層気象要素の検証

MSM0705の大気鉛直構造の予報特性をみるために、高層気象要素について検証した結果を述べる。瀬川・三浦(2006)と同様に、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用いて検証を行った。検証に用いるスコアはMEとRMSEである。FT=15におけるMSM0705とMSM0603を比較し、モデル変更の効果を見る。また、期間後半の影響をみるために、MSM0705のFT=33とRSMのFT=36を比較する。

図2.2.5に夏季、図2.2.6に冬季の検証結果を示す。両季節、全要素について、MSM0705のFT=15におけるRMSEは中層から下層を中心にMSM0603よりも小さい。FT=33になると、MSM0705のRMSEはFT=15の値から拡大するが、RSMよりは概ね小さい。

MEは、夏季と冬季について以下の特徴がある。夏季のFT=15におけるMSM0705は、500hPaより下層で高度の負バイアス、上層での気温の正バイアスがみられる。この傾向が、瀬川・三浦(2006)ではMSM0603よりも顕著であるが、本検証ではMSM0603と同程度になっている。第2.1.1項(1)の雲氷の落下速度の調整による結果とみられる。

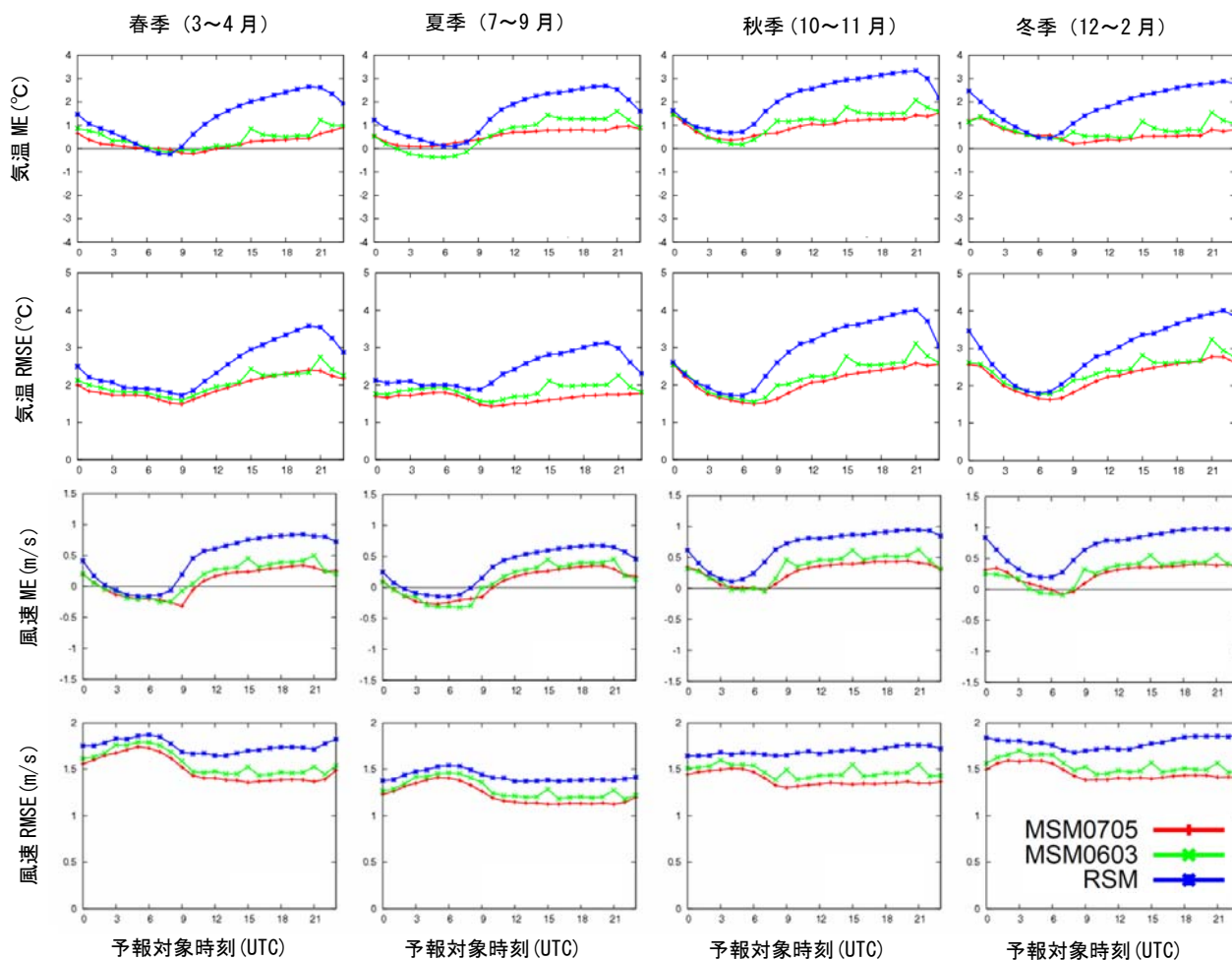


図 2.2.4 FT=00-15 を対象とした予報対象時刻ごとの地上気温と地上風速の ME と RMSE。

MSM0705の風速については高度とともに負バイアスが拡大しており、MSM0603とは同程度である。高度が高いほど風速が大きいいため、誤差も大きいと思われる。相対湿度のバイアスはほぼ0である。FT=33におけるMSM 0705のMEは、FT=15の値と比べて、風速の負バイアスが拡大している他は同程度である。また全体的にRSMよりバイアスが抑えられている。

冬季のFT=15におけるMSM0705は、500hPaより下層では0に近いが、上層で負バイアスが大きい傾向がある。高度についてはMSM0603よりもバイアスがやや拡大している。FT=33になるとMSM0705のバイアスはFT=15よりも拡大し、高度について上層負バイアス・下層正バイアス、気温および風速について全層負バイアスの傾向がみられる。また、FT=33におけるこれらのバイアスの傾向はRSMよりもやや強い。

なお、春季と秋季については、各要素、ME・RMSEについて、冬季と似た傾向がみられた（図略）。

2.2.5 まとめ

2007年5月に現業化されたMSMについて、10か月分の統計的検証を行ったところ、全体的には

MSM0705の予報精度はMSM0603 やRSMよりも良く、各要素については以下の特徴がみられた。

降水については、夏季と冬季でMSM0603を全降水強度で改善し、弱い雨でもRSMよりも精度が良くなった。春季と秋季は同等であった。夏季と冬季について初期値ごとにみると、09,21UTC初期値の予報後半のスレットスコアが、それぞれの前の予報である03,15UTC初期値のスコアと同程度になるといった傾向がみられた。

地上気象要素については、ME, RMSEともにMSM0603を改善しており、RSMよりも概ね良いものの夜間を中心に気温と風速に正バイアス、春季・夏季の日中の風速に負バイアスがみられた。

高層気象要素については、各季節、各要素でそれぞれバイアスがみられ、MSM0603やRSMよりも概ね良いが、一部拡大している部分もみられた。RMSEはMSM0603やRSMと同等か改善していた。

参考文献

瀬川知則，三浦大輔，2006：統計検証．平成18年度数値予報研修テキスト，気象庁予報部，59-83。

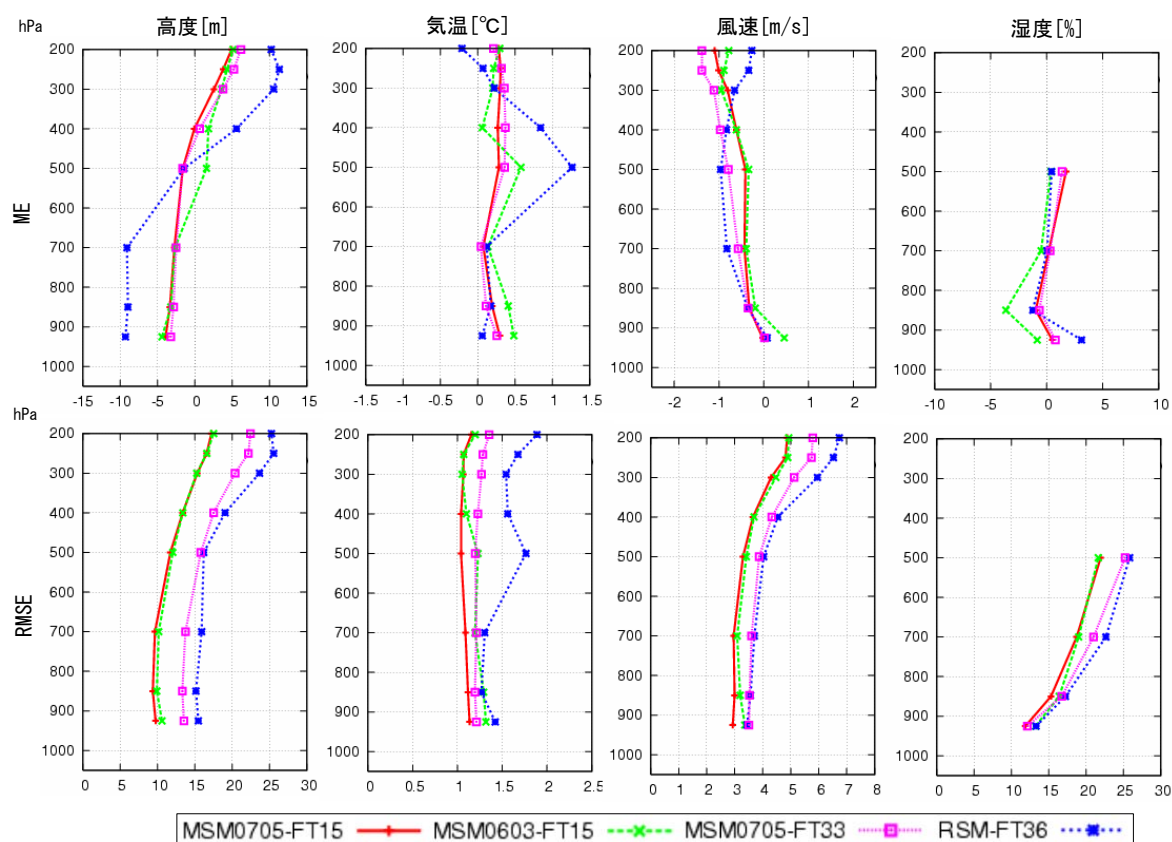


図 2.2.5 夏季における MSM0705(FT=15,33), MSM0603(FT=15), RSM (FT=36)の対ゾンデ検証。上段が ME、下段が RMSE。左から高度、気温、風速、相対湿度。上層の相対湿度は信頼できる観測が少ないため 500hPa より下層のみ表示している。

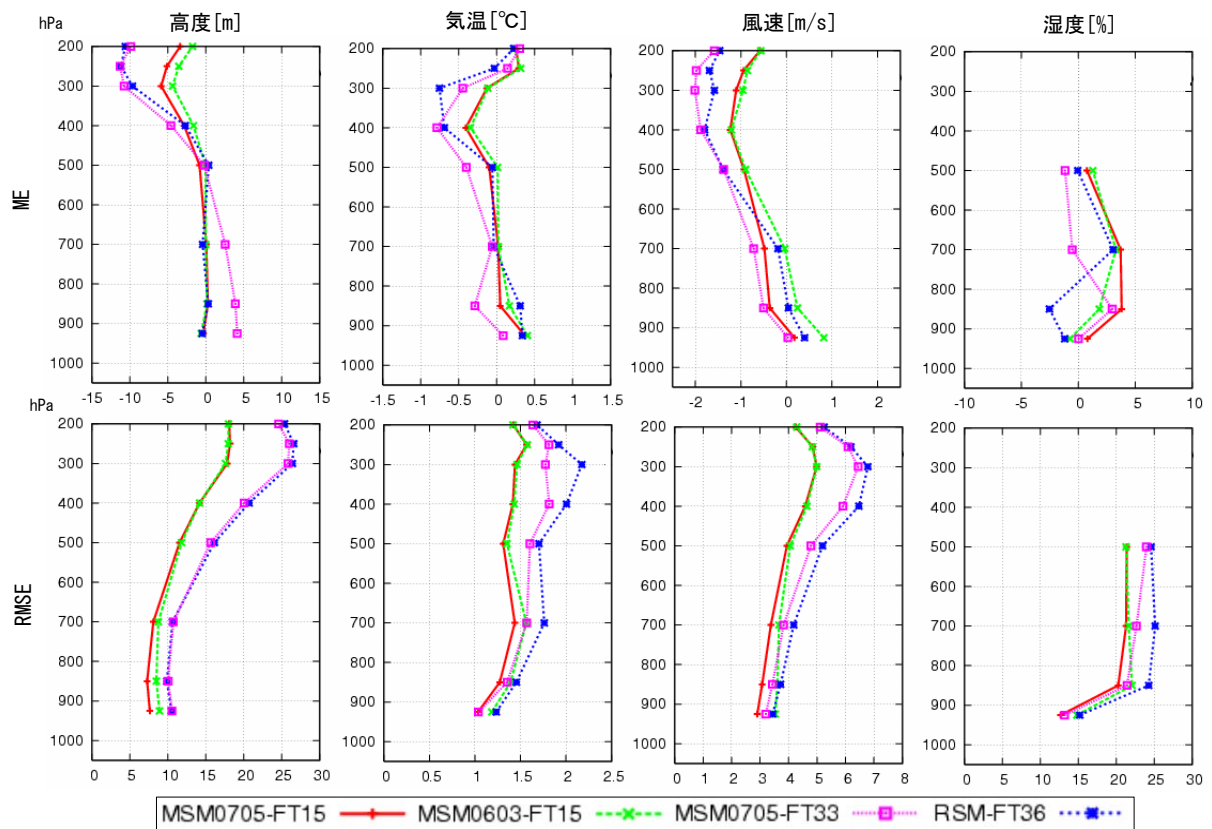


図 2.2.6 冬季における MSM0705(FT=15,33), MSM0603(FT=15), RSM (FT=36)の対ゾンデ検証。上段が ME、下段が RMSE。左から高度、気温、風速、相対湿度。上層の相対湿度は信頼できる観測が少ないため 500hPa より下層のみ表示している。

2.3 高解像度全球モデルを側面境界とするメソ数値予報モデルの統計検証¹

2.3.1 はじめに

高解像度全球モデル(20kmGSM)が2007年11月から運用されるため、メソ数値予報モデル(MSM)に用いている側面境界値を領域モデル(RSM)から20kmGSMに変更する。また、側面境界値はこれまで1日2回の更新を行っていたが、1日4回の頻度で更新するように変更した(第2.1.3項)。本節では、MSMの側面境界値としてRSMを用いた場合(以下、RSM境界MSM)と20kmGSMを用いた場合(以下、GSM境界MSM)について、降水、地上気象要素、高層気象要素について統計的検証を行ったので報告する。検証には、03,09,15,21UTCを初期値とする33時間予報を使用した。検証期間は、夏実験(2004年8月6日～2004年9月5日)、冬実験(2005年12月24日～2006年1月23日)とした。検証方法は、降水、地上気象要素、高層気象要素ともに第2.2節と同様である。なお、本節で使用している統計スコアの説明は、巻末の付録を参照していただきたい。予報時間はFTと表記した(例えば、予報時間3時間目はFT=03)。検証結果について注意する点については第2.1.1項を参照していただきたい。

2.3.2 降水の統計的検証

検証では、閾値に前3時間降水量を使用した(例えば、閾値1mmとは1mm/3hのことである)。

(1) 降水量の閾値ごとの検証

夏実験の降水量の閾値ごとのスコアを図2.3.1上段に示す。スレットスコアは15mm以下の閾値に対しては、GSM境界MSMがRSM境界MSMより高い。それ以上の閾値では両者は同程度になっている。これはGSM境界MSMでは全閾値でやや見逃しが減っている一方で、20mm以上の閾値ではやや空振りが多くなっているためである(図略)。また、MSMは強い降水ほど予報頻度が過剰になっており、GSM境界MSMではその傾向が顕著になっている。2006年7月を検証期間にした瀬川・三浦(2006)では、RSM境界MSMにこのようなバイアスはみられなかったため、検証期間に大きく依存していると思われる。

次に、冬実験の降水量の閾値ごとのスコアを図2.3.1下段に示す。スレットスコアは10mm以上の閾値に対して、GSM境界MSMがRSM境界MSMより高い。これはGSM境界MSMではやや見逃しが減っているためである(図略)。MSMは全閾値を通して予報頻度が観測頻度よりも大きい。また夏実験と同様に、強い降水に関してはGSM境界MSMの方が、この傾向が顕著になっている。

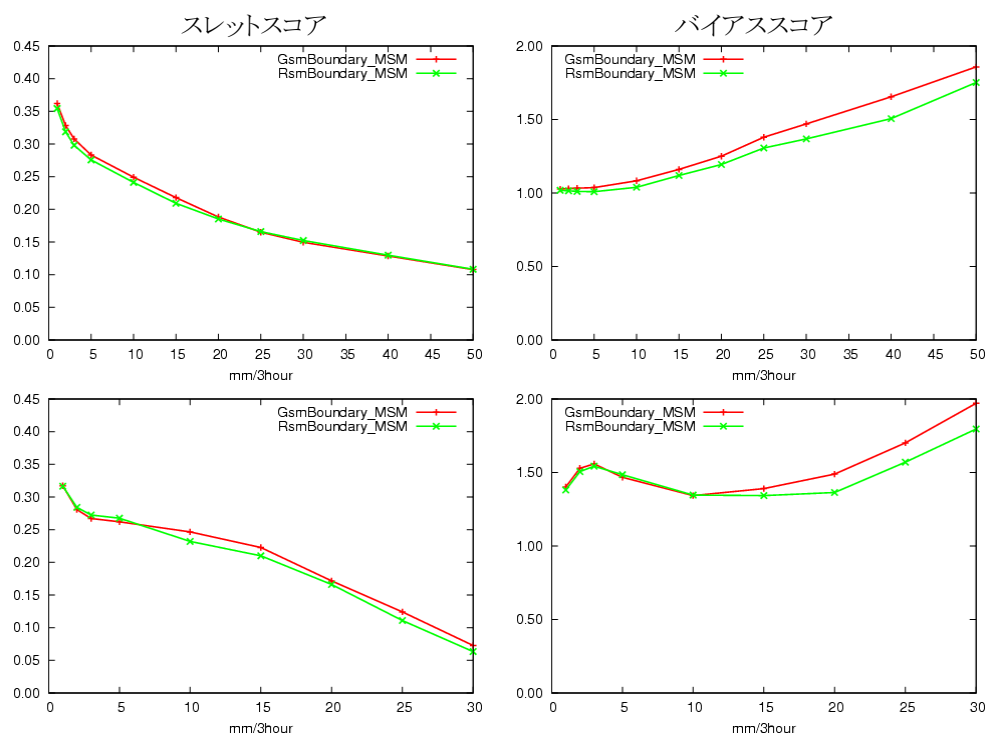


図 2.3.1 夏実験と冬実験における GSM 境界 MSM と RSM 境界 MSM の閾値ごとのスコア。20km 検証格子内平均降水量を使用。左:スレットスコア、右:バイアススコア。上段:夏実験(2004 年 8 月 6 日～2004 年 9 月 5 日)、下段:冬実験(2005 年 12 月 24 日～2006 年 1 月 23 日)。GsmBoundary_MSM(赤実線):GSM 境界 MSM。RsmBoundary_MSM(緑実線):RSM 境界 MSM。横軸:閾値(mm/3h)。

¹ 古市 豊

(2) 予報時間ごとの検証

夏実験の予報時間ごとのスコア(閾値 1mm)を図 2.3.2 上段に示す。スレットスコアは FT=18 以降で、GSM 境界 MSM は RSM 境界 MSM より高くなっている。バイアススコアは両者ともに 1 に近いいため、このスレットスコアの向上は、空振りと見逃しの両方が減ったためである。閾値 20mm のスコアを図 2.3.2 下段に示す。スレットスコアは FT=09 にかけて、見逃しが少ないため GSM 境界 MSM の方がやや高くなっている。またバイアススコアは GSM 境界 MSM の方が全予報時間を通して概ね高くなっている。これは GSM 境界 MSM では

RSM 境界 MSM に比べて空振りが多くなっているからである(図略)。

次に冬実験の予報時間ごとのスコア(閾値 1mm)を図 2.3.3 上段に示す。スレットスコア、バイアススコアともに GSM 境界 MSM、RSM 境界 MSM は同程度である。閾値 10mm のスコアを図 2.3.3 下段に示す。RSM 境界 MSM には、予報期間中頃(FT=12~FT=21)にスレットスコアの一時的な低下がみられるが GSM 境界 MSM にはそのような傾向はみられない。またどちらも予報時間前半は予報頻度過剰であるが、予報時間が進むにつれて観測頻度に近づく傾向がある。

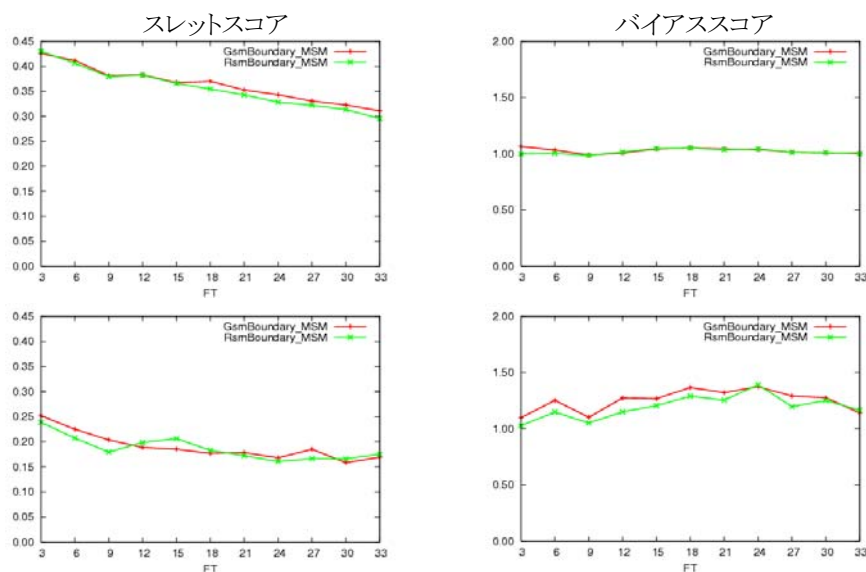


図 2.3.2 夏実験(2004 年 8 月 6 日~2004 年 9 月 5 日)における GSM 境界 MSM と RSM 境界 MSM の予報時間ごとのスコア。20km 検証格子内平均降水量を使用。左:スレットスコア、右:バイアススコア。上段:閾値 1mm/3h。下段:閾値 20mm/3h。GsmBoundary_MSM(赤実線):GSM 境界 MSM。RsmBoundary_MSM(緑実線):RSM 境界 MSM。横軸:FT(h)。

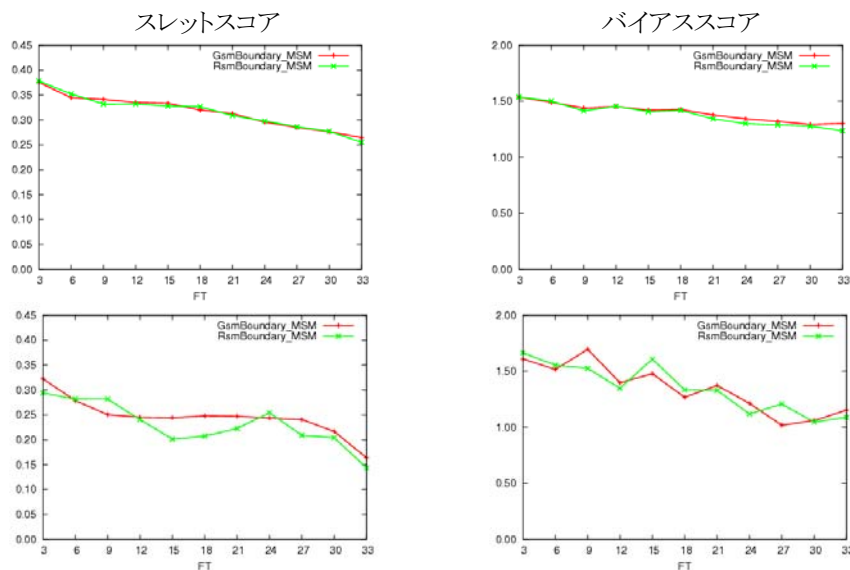


図 2.3.3 冬実験(2005 年 12 月 24 日~2006 年 1 月 23 日)における GSM 境界 MSM と RSM 境界 MSM の予報時間ごとのスコア。20km 検証格子内平均降水量を使用。左:スレットスコア、右:バイアススコア。上段:閾値 1mm/3h。下段:閾値 10mm/3h。GsmBoundary_MSM(赤実線):GSM 境界 MSM。RsmBoundary_MSM(緑実線):RSM 境界 MSM。横軸:FT(h)。

(3) 初期時刻別の検証

GSM 境界 MSM の夏実験における初期時刻別のスコア(閾値 1mm)を図 2.3.4 上段に示す。スレツスコアは同じ予報対象時刻で比較すると、概ね最新の初期値を使用したものが高い、もしくは同程度になっている。特に、FT=09 までは見逃しが少なく、その傾向が大きくなっている(図略)。バイアススコアは日中にやや高くなっており、予報頻度がやや過剰になっている。

次に、冬実験の初期時刻別のスコア(閾値 1mm)を図 2.3.4 下段に示す。スレツスコアは同じ予報対象時刻で比較すると、日中は一定のスコアを維持しているが、

夜間から明け方にかけて低下している。一方でバイアススコアの変化が小さいことから、見逃し、空振りともに多くなっている(図略)。バイアススコアは、21UTC 初期値のものが他の初期値のものに比べて高い。

夏実験における MSM21 のスレツスコアの劣化は MSM15 に比べて速く、18 時以降はスコアが同程度になっている。また、冬実験においてもスコアの劣化が速い。側面境界の更新頻度が高くなったにも関わらず、スコアの劣化が速いことについては今後調査が必要である。

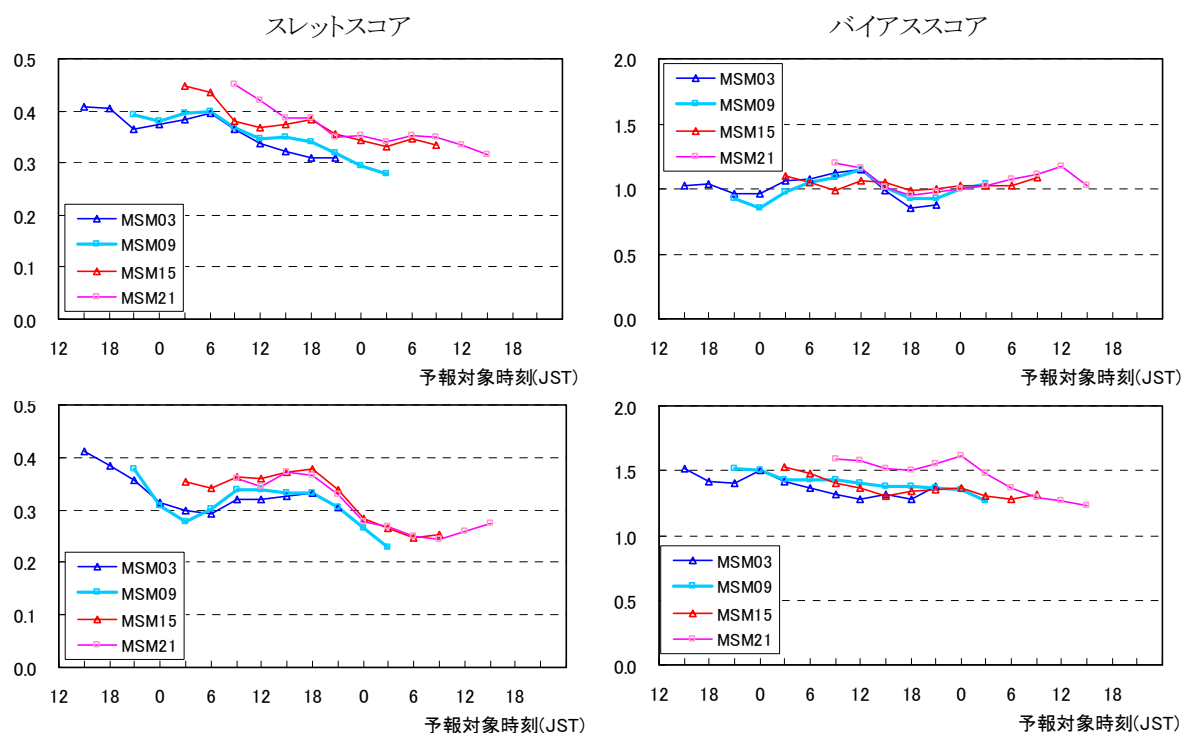


図 2.3.4 夏実験と冬実験における GSM 境界 MSM の初期時刻別のスコア。上段: 夏実験 (2004 年 8 月 6 日～2004 年 9 月 5 日)。下段: 冬実験 (2005 年 12 月 24 日～2006 年 1 月 23 日)。左: スレツスコア。右: バイアススコア。閾値は 1mm/3h。MSM03: 初期時刻 03UTC、境界値 20kmGSM(初期時刻 00UTC)。MSM09: 初期時刻 09UTC、境界値 20kmGSM(初期時刻 06UTC)。MSM15: 初期時刻 15UTC、境界値 20kmGSM(初期時刻 12UTC)。MSM21: 初期時刻 21UTC、境界値 20kmGSM(初期時刻 18UTC)。横軸: 予報対象時刻(JST)。

2.3.3 地上気象要素の統計的検証

(1) 夏実験の検証

夏実験の地上気象要素のスコアを図 2.3.5 に示す。風速、露点温度には GSM 境界 MSM と RSM 境界 MSM の違いはみられない。MSM の予報特性としては、夜間に風を実況よりもやや強めに予報するバイアスがある。気温については、GSM 境界 MSM と RSM 境界 MSM は同程度であり、夜間に実況よりもやや高く予報するバイアスがある。

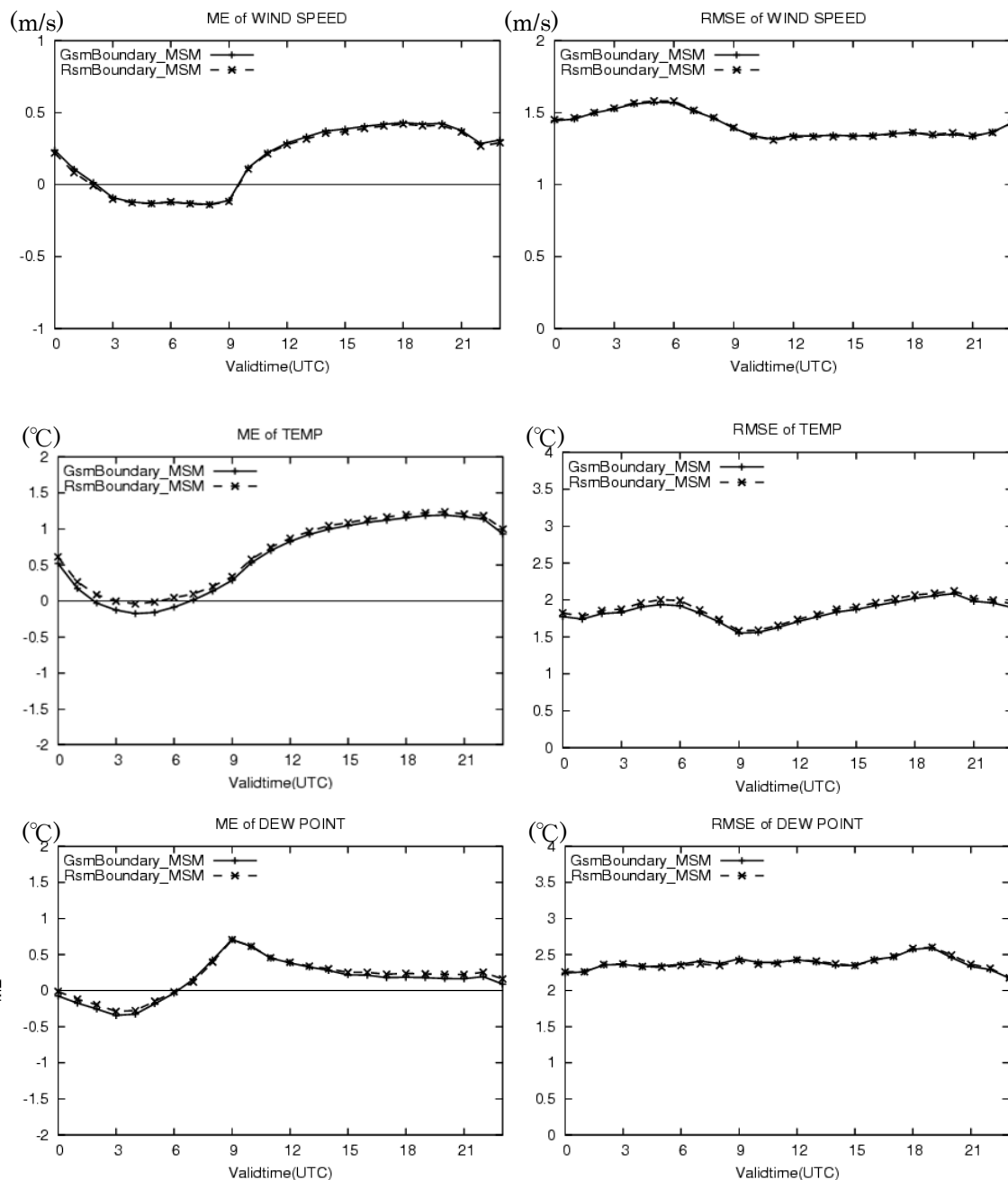


図 2.3.5 夏実験(2004 年 8 月 6 日～2004 年 9 月 5 日)における地上気象要素の予報対象時刻ごとのスコア。
上段:風速(m/s)、中段:気温(°C)、下段:露点温度(°C)の順に示している。左:ME(平均誤差)、右:RMSE
(平方根平均二乗誤差)。GsmBoundary_MSM:GSM 境界 MSM。RsmBoundary_MSM:RSM 境界
MSM。横軸:予報対象時刻(UTC)。

(2) 冬実験の検証

冬実験の地上気象要素のスコアを図 2.3.6 に示す。風速には夏実験同様に、GSM 境界 MSM と RSM 境界 MSM に違いはみられない。MSM の予報特性は夏実験とやや異なり、夜間に限らず風を実況よりもやや強めに予報する傾向がある。気温は RSM 境界 MSM にみられる高温バイアスをやや改善している。露点温度は夜間に負バイアスをやや高くしているが、日中は正バイアスを改善している。

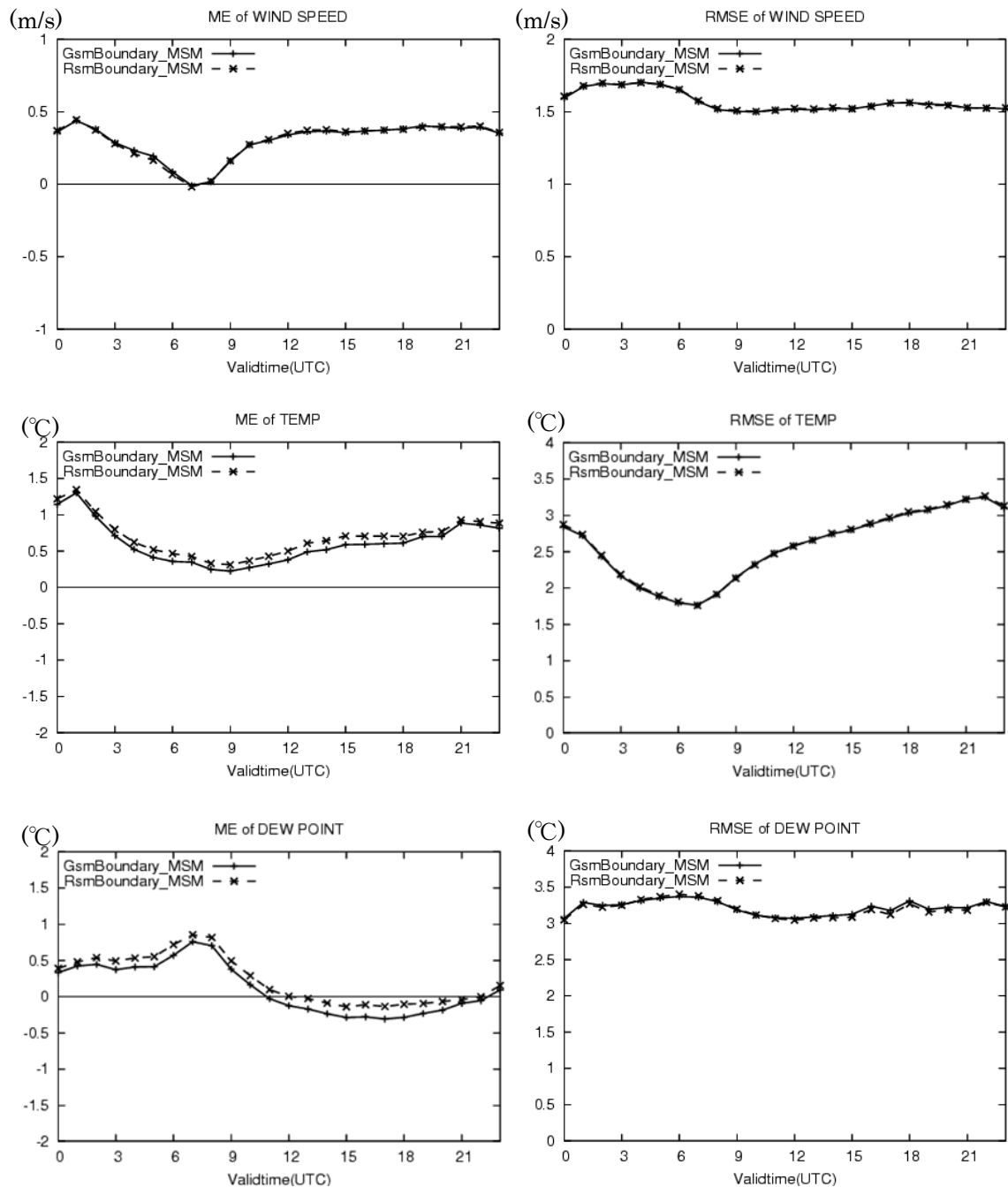


図 2.3.6 冬実験(2005 年 12 月 24 日～2006 年 1 月 23 日)における地上気象要素の予報対象時刻ごとのスコア。上段:風速(m/s)、中段:気温(°C)、下段:露点温度(°C)の順に示している。左:ME(平均誤差)、右:RMSE(平方根平均二乗誤差)。GsmBoundary_MSM:GSM 境界 MSM。RsmBoundary_MSM:RSM 境界 MSM。横軸:予報対象時刻(UTC)。

2.3.4 高層気象要素の統計的検証

(1) 夏実験の検証

夏実験の高層気象要素のスコアを図 2.3.7 に示す。GSM 境界 MSM は中層から上層にかけて顕著な乾燥バイアスがみられる。この中層から上層にかけての乾燥バイアスは 20kmGSM にもみられる傾向(第 1.2.4 項)であるため、その影響を強く受けたと思われる。気温は中層から上層にかけてやや低温バイアスになり、高度

は全層で正バイアスに変化した。風速のバイアスはほぼ同程度である。RMSE はすべての要素で小さくなっており、予報精度は改善していると言える。

(2) 冬実験の検証

冬実験の高層気象要素のスコアを図 2.3.8 に示す。相対湿度には夏実験同様に、中層から上層にかけて乾燥バイアスがある。特にその傾向は 700hPa 付近に顕

著にみられる。このバイアスも 20kmGSM とよく似ているため、その影響を受けた可能性がある(第 1.2.4 項)。気温は下層から中層にかけて低温バイアスがあり、上層では高温バイアスとなっている。また、風速は RSM 境界 MSM にみられる、中、上層の負バイアスをやや改善している。RMSE は、上層の気温、高度、中層の相対湿度を除いて概ね改善している。

2.3.5 検証のまとめ

降水、地上気象要素、高層気象要素ともに側面境界値を RSM から 20kmGSM に変更することによって、予報精度は同程度かやや改善した。バイアスは RSM と 20kmGSM の予報特性が異なるため、その影響が MSM にも現れる結果となった。以下に、要素ごとの特徴をまとめた。

(1) 降水

20kmGSM を側面境界に用いることによって、夏実験、冬実験とも、スレットスコアがやや向上した。夏実験の閾値 1mm の降水では、予報時間後半にその傾向が顕著になっている。また冬実験では閾値 10mm 以上の降水でスレットスコアが向上した。一方、夏実験、冬実験ともに RSM 境界 MSM に比べて、強い降水ほど予報の頻度が過剰になっている。

(2) 地上気象要素

夏実験の地上気温、風速は、側面境界の違いによる大きな変化はみられない。冬実験の地上気温は、RSM 境界 MSM にみられる高温バイアスをやや改善した。冬実験の露点温度は RMSE に大きな変化はない。しかし、バイアスは日中の正バイアスを改善したが、夜間から明け方に負バイアスを高くしている。

(3) 高層気象要素

RMSE は全要素ともに概ね改善した。特徴的なことは夏実験、冬実験ともに中層から上層にかけては乾燥バイアスに変化したことである。特に、中層付近が顕著な乾燥バイアスになっている。これは側面境界に用いている 20kmGSM にもみられるため、メソ解析や境界を通してその影響を受けたからだと思われる。

参考文献

瀬川知則，三浦大輔，2006：統計検証．平成 18 年度数値予報研修テキスト，気象庁予報部，59-83.

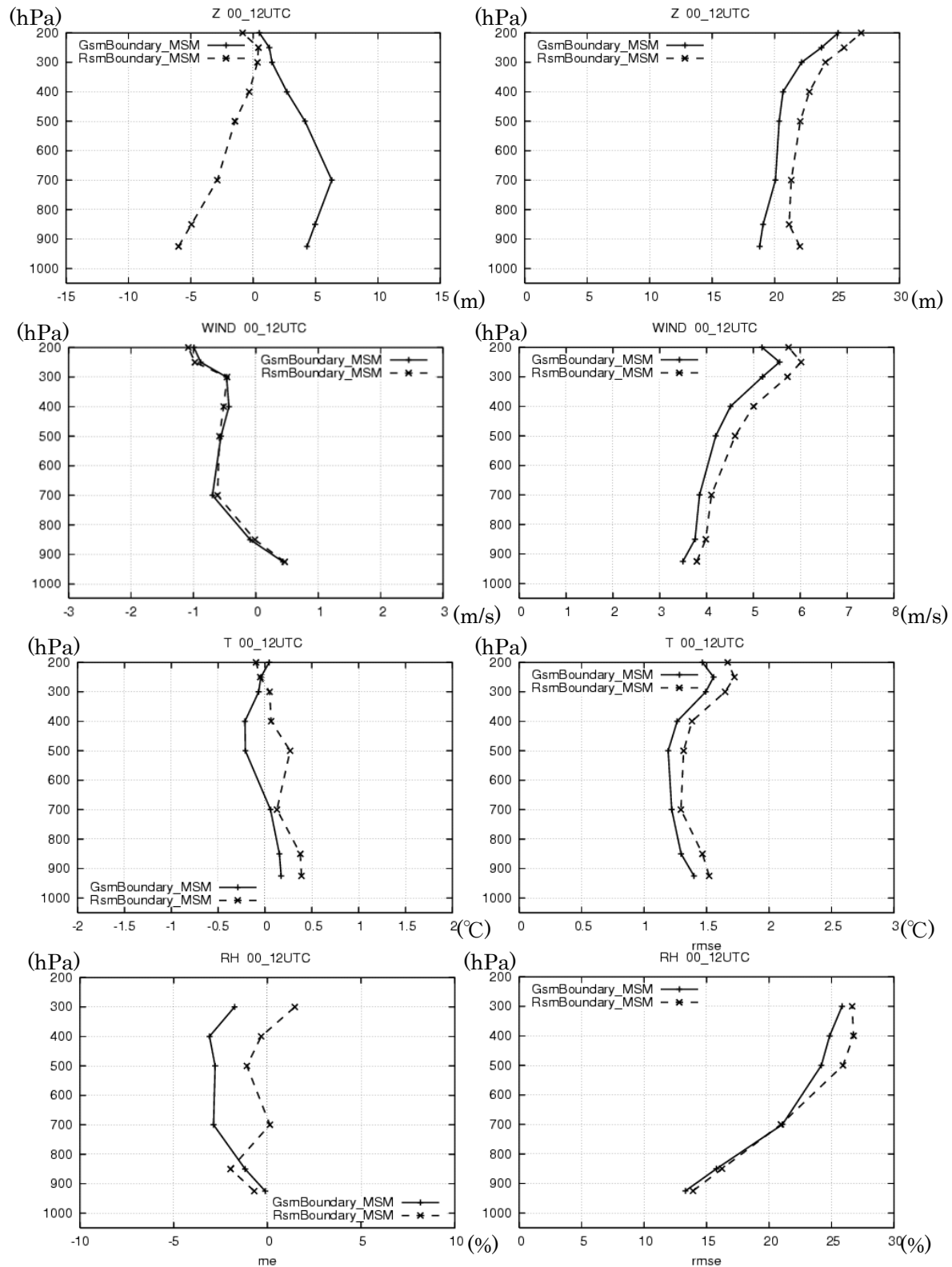


図 2.3.7 夏実験(2004 年 8 月 6 日～2004 年 9 月 5 日)における高層気象要素の FT=33 のスコア。上から高度(m)、風速(m/s)、気温(°C)、相対湿度(%)の順に示している。左:ME(平均誤差)、右:RMSE(平方根平均二乗誤差)。GsmBoundary_MSM:GSM 境界 MSM。RsmBoundary_MSM:RSM 境界 MSM。

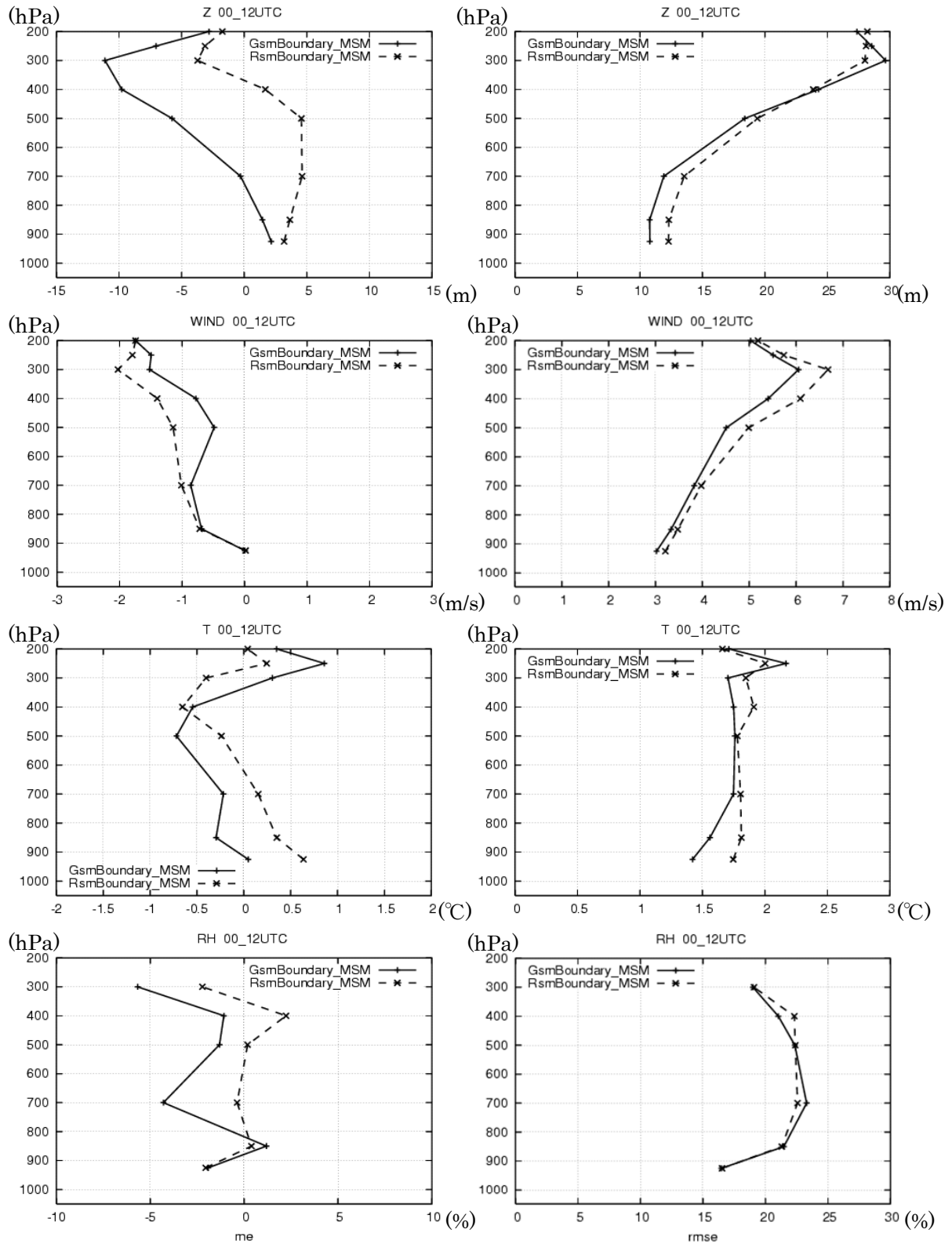


図 2.3.8 冬実験(2005 年 12 月 24 日～2006 年 1 月 23 日)における高層気象要素の FT=33 のスコア。上から高度(m)、風速(m/s)、気温(°C)、相対湿度(%)の順に示している。左:ME(平均誤差)、右:RMSE(平方根平均二乗誤差)。GsmBoundary_MSM:GSM 境界 MSM。RsmBoundary_MSM:RSM 境界 MSM。

2.4 高解像度全球モデルを側面境界とするメソ数値予報モデルの降水予報の例¹

2.4.1 はじめに

現在のメソ数値予報モデル (MSM) には、特に梅雨期の九州や四国において、地形や海陸の地表面粗度の差への過度な応答によって実況との対応が悪い不自然な降水を予報する欠点がある (成田 2006)。このような降水が予報されるときには、海岸線の風下となる陸地や山岳の風上側に大きな上昇流と高い相対湿度の領域が鉛直に分布することが多い。MSM で採用している Kain-Fritsch 対流パラメタリゼーションの発動の有無は下層の上昇流と相対湿度に敏感であり、相対湿度の鉛直分布の違いは降水量の予報に大きな影響を与える。一方、第 1.2 節によると、高解像度全球モデル (20kmGSM) には季節によらず 925 hPa 面に湿潤バイアスがあり、夏季の 850 hPa 面より上層に乾燥バイアスがある。

これらのバイアスは、側面境界値としてメソ解析とメソ予報の両方に影響を与える。特に、下層の湿潤バイアスによって対流パラメタリゼーションの効果が大きくなり、降水を過剰に計算する可能性がある。統計的な検証によると、MSM の側面境界値を領域モデル (RSM) の予報値から 20kmGSM の予報値に変更することによって強い降水を予報する頻度が観測よりも過剰になることがわかっている (第 2.3 節)。

本節では、2004 年 8 月を対象とする MSM の予報の結果から、側面境界値の変更によって降水の分布に大きな違いが見られた事例を選んで紹介する。以下では RSM を側面境界とする MSM を「RSM 境界 MSM」、20kmGSM を側面境界とする MSM を「GSM 境界 MSM」と表記する。

2.4.2 海岸線や地形に沿った過剰な降水の予報

図 2.4.1 と図 2.4.2 に、海から陸に、または低地

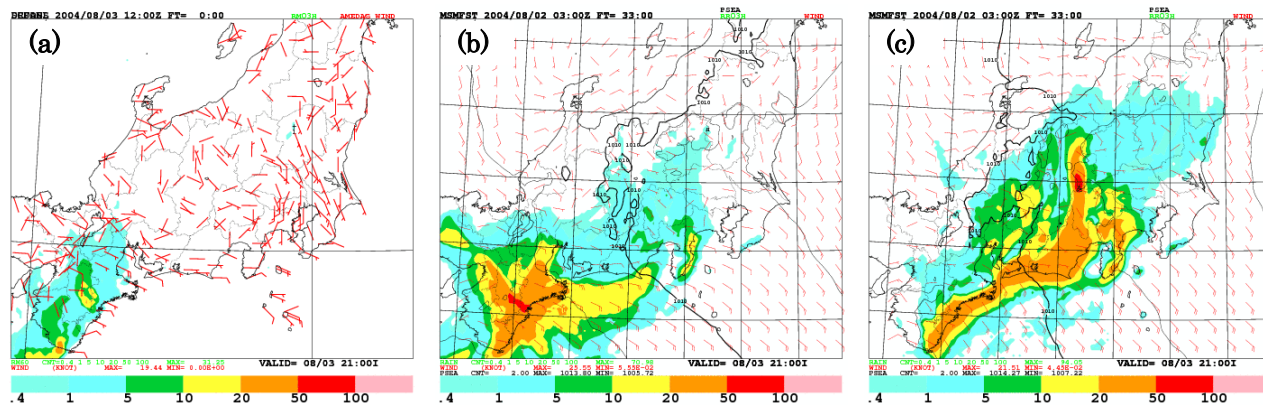


図 2.4.1 2004 年 8 月 3 日 09 UTC から 12 UTC までの 3 時間降水量 [mm/3h]。(a)解析雨量、(b) RSM 境界 MSM による予想降水量、(c) GSM 境界 MSM による予想降水量。モデルは、初期時刻 2004 年 8 月 2 日 03 UTC からの 33 時間予想。

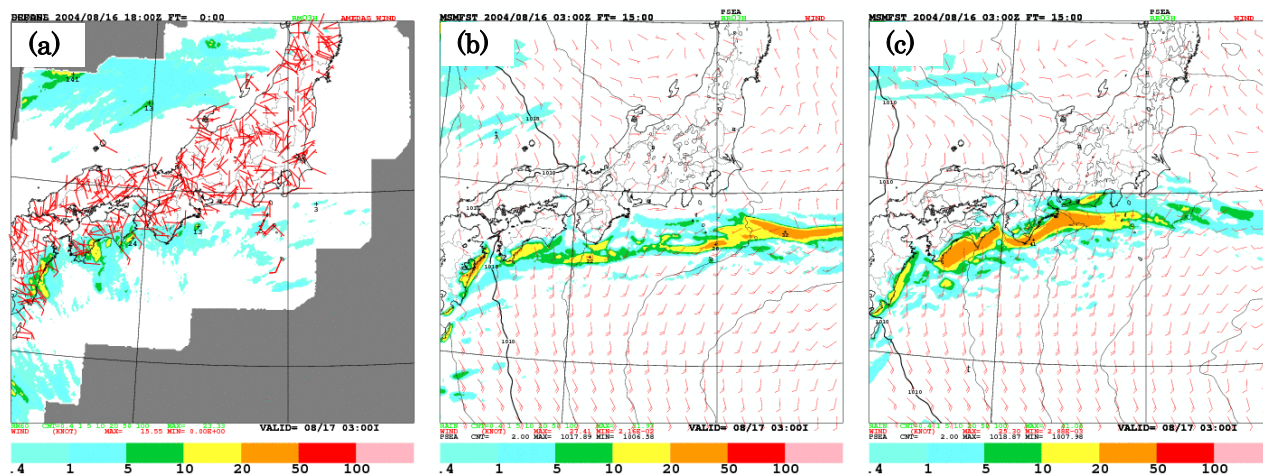


図 2.4.2 2004 年 8 月 16 日 15 UTC から 18 UTC までの 3 時間降水量 [mm/3h]。(a)解析雨量、(b) RSM 境界 MSM による予想降水量、(c) GSM 境界 MSM による予想降水量。モデルは、初期時刻 2004 年 8 月 16 日 03 UTC からの 15 時間予想。

¹ 成田 正巳

から高地に向かって風が吹くときに、MSM が過剰な降水を予報した例を示す。実況 (a) と比べて、RSM 境界 MSM (b) の降水は特に海岸線付近で過剰になっており、GSM 境界 MSM (c) ではこの傾向がより顕著である。また、いずれの例でも 5~50 mm/3h の降水のほとんどは対流パラメタリゼーションによって計算されている (図略)。特に図 2.4.1 (c) では、中部山岳の風上側で実況には見られない降水が対流パラメタリゼーションによって過剰に計算されている。このように、雲物理過程による降水が少なく、対流パラメタリゼーションによる降水が支配的な場合は、実況に比べて MSM が予報した降水は過剰である事例が多い。

いくつかの事例で RSM 境界 MSM よりも GSM 境界 MSM のほうが海岸線付近の降水が過剰に計算されており、逆の事例は少数である。このような過剰な降水によってバイアスコアが大きくなったと考えられる (第 2.3 節)。ただし、図 2.4.2 のように過剰な降水が海上に分布する場合は、陸地及び海岸から 40 km 以内の格子を対象とする統計検証のスコアには大きな悪化として表れないことに注意が必要である。

2.4.3 海岸線や地形に沿った適切な降水の予報

図 2.4.3 に RSM 境界 MSM と比べて GSM 境界 MSM の降水予報が改善された例を示す。実況 (a) では四国南部の海岸線から紀伊半島にかけてと山陰地方、山陰沖の日本海に西南西から東北東にのびる降水域が見られる。一方、RSM 境界 MSM (b) では紀伊半島南東部の海岸線付近などに降水のまとまりが見られ、降水が分布する方向は実況と対応している。GSM 境界 MSM (c) では降水の極大の位置にずれが見られるものの、降水が分布する方向や降水量は実況に近く、RSM 境界 MSM より改善できている。この例では、四国付近の 5~50 mm/3h の降水のほとんどは対流パラメタリゼーション、50 mm/3h 以上の降水と中国地方の降水は主

に雲物理過程によって計算されている (図略)。第 2.4.2 項で述べた対流パラメタリゼーションによる過剰な降水の事例とは異なり、雲物理過程による降水が計算されている場合には対流パラメタリゼーションによる降水と合わせて実況との対応が良い事例が多い。同様の例は予報期間の前半に見られることもあり (図略)、スレットスコアの改善に結びついていると考えられる。

2.4.4 おわりに

本節では、2004 年 8 月を対象に 20kmGSM を側面境界とする MSM の降水予報の事例を紹介した。雲物理過程による降水がほとんど計算されておらず、対流パラメタリゼーションによる降水が支配的な場合には予報の信頼度が低く、雲物理過程による降水が計算されている場合には対流パラメタリゼーションによる降水と合わせて予報の信頼度が高い傾向が見られた。

第 2.4.1 項で述べたように、MSM の欠点である地形や海陸の地表面粗度の差への過度な応答による不自然な降水は主に梅雨期に見られるが、本稿の執筆時点では梅雨期を対象とする GSM 境界 MSM においてこのような降水の分布がどのように計算されるか、確認することはできない。また、DCAPE の計算方法を改良した 20km GSM (第 1.5 節) を側面境界としたときに GSM 境界 MSM の特性がどのように変化するかも、確認できない。いずれも 20kmGSM を側面境界とする MSM を現業運用しながら確認を続ける必要がある。特に側面境界の変更によって湿りの鉛直分布のバイアスが変わると対流パラメタリゼーションの効果に大きな影響を及ぼすと考えられるので、引き続き予報精度の改善を目指して開発を進める必要がある。

参考文献

成田正巳, 2006: 降水予測の改良. 平成 18 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 88-91.

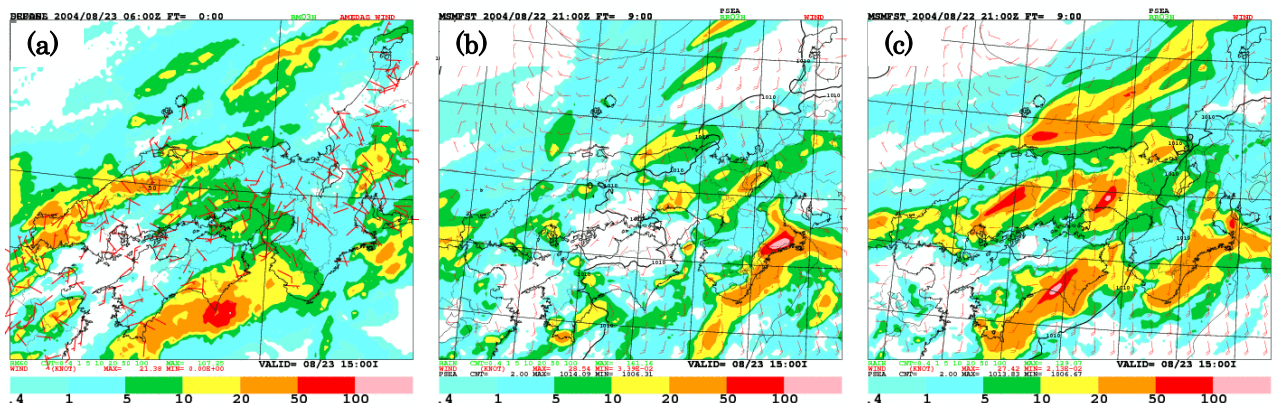


図 2.4.3 2004 年 8 月 23 日 03 UTC から 06 UTC までの 3 時間降水量 [mm/3h]。(a) 解析雨量、(b) RSM 境界 MSM による予想降水量、(c) GSM 境界 MSM による予想降水量。モデルは、初期時刻 2004 年 8 月 22 日 21 UTC からの 9 時間予想。

第3章 アプリケーション

3.1 ガイダンス類の概説¹

3.1.1 はじめに

本節では、高解像度全球モデル(以下、20kmGSMという)と、メソ数値予報モデル(以下、MSMという)33時間予報の運用開始以降に出力されているガイダンス等について、その仕様と精度の概要を述べる。

MSMの予報結果を用いた降水系ガイダンスと気温ガイダンス、及び航空気象予報ガイダンスに変更や要素追加があった。その他のMSMや20kmGSMの予報結果を用いたガイダンスは、従前の領域モデル(以下、RSMという)やGSM(60km解像度)を用いたガイダンスから、作成手法や要素追加などの大きな変更はない。

3.1.2 GSMガイダンス(天気予報用、明後日予報用)

2007年11月21日に、20kmGSMの運用が開始され、同時にRSMと台風モデルが廃止される。20kmGSM変更点の概要は、第1.1節を参照されたい。

表3.1.1に、20kmGSMの予報結果を用いて作成されるガイダンスの一覧を示す。

RSMの廃止に伴い、それまでRSMを用いていた各ガイダンス(天気予報ガイダンス、一部の防災ガイダンス)は、20kmGSMの予報結果を用いて作成される。また、地方予報中枢官署における明後日予報を支援するため従前のGSM(60km解像度)を用いていたガイダンス(GSM明後日ガイダンス、予報対象51～75時間)も、同様の手法により20kmGSMの予報結果を用いる。

20kmGSMの予報結果を用いた各ガイダンスについて、2004年8月と9月(夏実験)、及び2005年12月と2006年1月(冬実験)を対象に実施された20kmGSM

の予報結果を用いて、精度や特性の検証を行った。その結果、RSMを用いたガイダンスと比較して、精度は概ね同等かやや良いことを確認した。現在のガイダンスは、ほとんどがカルマンフィルターやニューラルネットワークの手法を用いた学習型となっているため、20kmGSMの本運用時には慣熟運用期間中の学習によって、実験での結果以上の精度が得られていると期待される。

短期予報作業においては、これまで主にRSMを用いて予報期間中のシナリオを組み立てていたが、今後は20kmGSMを用いることになる。このため、20kmGSMの予報結果を用いたガイダンスは、第1.2節から第1.7節に示された当モデルの検証結果や予報特性にも留意して利用願いたい。

なお、20kmGSMの予報結果を用いたガイダンスは、1日4回、6時間毎に作成・配信される。予報作業支援システム(中村・神田 2003)に取り込まれるのは従前同様に00UTC・12UTC初期値によるガイダンスであり、06UTC・18UTC初期値によるものは統合ビューワ(前多 2005)で参照することになる。

3.1.3 MSMガイダンス(防災用、航空気象予報用)

2007年5月16日に、MSMの予報時間が03,09,15,21UTC初期値について15時間から33時間に延長された(00,06,12,18UTC初期値は15時間のまま)。併せて、力学・物理過程の改良が図られた。MSM変更点の概要は、荒波・原(2006)と第2.1節を参照されたい。

表3.1.2に、MSMの予報結果を用いて作成されるガイダンスの一覧を示す。

予報時間の延長によって、常時24時間先までの防災時系列の作成・最適化作業を支援することが可能にな

表 3.1.1 20kmGSM の予報結果を用いて作成されるガイダンスの一覧

(アデスに配信していない中間製品を含む。KLM:カルマンフィルター、NRN:ニューラルネットワーク、FBC:頻度バイアス補正)

ガイダンス名	予報要素(hは「時間」を表す)	対象領域	算出手法	詳述節
GSM 降水確率	前 3h、前 6h 降水確率	20km 格子	KLM	第 3.2 節
GSM 降水量	前 3h、前 6h、前 24h 平均降水量		KLM、FBC	
GSM 最大降水量	前 3h 内の 1h 最大降水量、 前 3h 平均・最大降水量、 前 24h 平均・最大降水量	二次細分区域 (373 区域)	NRN	
GSM 気温	1h 時系列気温、最高・最低気温	アメダス地点	KLM	第 3.3 節
GSM 風	3h 時系列風		KLM、FBC	第 3.4 節
GSM 最大風速	前 3h 最大風		KLM、FBC	
GSM 天気	前 3h 天気カテゴリ	20km 格子	NRN	第 3.5 節
GSM 日照率	前 3h 日照率		NRN	
GSM 雪水比	前 3h 雪水比		NRN (学習なし)	第 3.6 節
GSM 最小湿度	日最小湿度	地上気象官署 (153 地点)	NRN	
GSM 大雨確率	前 3h に基準以上の雨が降る確率	二次細分区域 (373 区域)	NRN	
GSM 発雷確率	前 3h 発雷確率		NRN (学習なし)	
GSM 降雪量 (試験運用)	前 12h 降雪量	積雪深計設置地点	NRN	(なし)

¹ 阿部 世史之

表 3.1.2 MSMの予報結果を用いて作成されるガイダンスの一覧(**太文字**は新しく追加した要素)
(アデスに配信していない中間製品を含む。KLM:カルマンフィルター、NRN:ニューラルネットワーク、FBC:頻度バイアス補正)

ガイダンス名	予報要素(hは「時間」を表す)	対象領域	算出手法	詳述節
MSM降水確率	前 3h、前 6h 降水確率	20km 格子	KLM	第 3.2 節
MSM 降水量	前 3h、前 24h 平均降水量		KLM、FBC	
MSM 最大降水量	前 3h 内の 1h 最大降水量、 前 3h 平均・最大降水量、 前 24h平均・最大降水量		二次細分区域 (373 区域)	
MSM／降水短時間予報	前 3h 平均降水量	20km 格子	MSM ガイダンス、 解析雨量、降水 短時間予報	
	前 3h 内の 1h、前 3h、前 24h 最大降水量	三次細分区域 ^{*1} (483 区域)		
MSM気温	1h 時系列気温、最高・最低気温	アメダス地点	KLM	第 3.3 節
MSM 最大風速	前 3h 最大風		KLM、FBC	第 3.4 節
MSM 航空気象予報 (2007 年 5 月 16 日から、長 距離飛行用飛行場予報 (TAF・L)と短距離飛行用飛行 場予報(TAF・S)を支援する ガイダンスを統合)	風(1h時系列 、前 1h最大)、 視程(前 1h最小・ 平均 、前 3hに 5000m 未満及び 1600m 未満となる確率)、 雲(前 1h 最低シーリング時の雲量と雲底 高度)、 天気(前 1h 卓越、降水強度)、 気温(1h時系列 、最高・最低)	国内空港 (76 地点)	風:KLM、FBC 視程:KLM、FBC 雲:NRN、FBC 天気:お天気マップ 方式 気温:KLM	第 3.8 節
MSM(航空向け)発雷確率	前 3h 発雷確率	20km格子 ^{*2}	ロジスティック回帰	

※1:注意報・警報の発表単位となる二次細分区域(2007 年 3 月現在で全国を 373 に細分)を、さらに「山沿い」、「平地」などに細分した区域をいい、2007 年 3 月現在で 483 区域となっている。 ※2:空港を含む格子の値を配信する。

った。さらに、航空気象予報ガイダンスでは、それまで予測要素や使用モデル、予測特性に違いがあった短距離飛行用飛行場予報(TAF-S)と長距離飛行用飛行場予報(TAF-L)を支援するガイダンスを統合し、MSMの予報結果を用いて同じ手法で作成することにしたため、一貫性のあるガイダンスを提供できるようになった。

MSMの予報結果を用いた各ガイダンスについて、2006年夏から2007年春までの試験運用による予報結果を対象に、精度や特性の検証を行った。その結果、RSMを用いたガイダンスと比較して、すべてのガイダンスで精度が向上することを確認した。また、MSMの境界値がRSMから20kmGSMに変わった場合の精度の違いについて検証したところ、ほぼ同じ程度であった。

MSMの予報特性を検証した結果が、瀬川・三浦(2006)と第2.2節に示されている。MSMの予報結果を用いた各ガイダンスは、RSMや従前のMSMからの予報特性の変化にも留意して利用願いたい。

なお、MSMの予報結果を用いた各ガイダンスは、1日8回、3時間毎に作成され、予報作業支援システム向けに配信される(MSM/降水短時間予報ガイダンスは1日48回、30分毎)。MSM最大降水量ガイダンスとMSM最大風速ガイダンスは、今後統合ビューワでも閲覧できるようになる予定である(航空気象予報用ガイダンスは、現在でも統合ビューワで閲覧可能)。

3.1.4 航空悪天GPV(第3.7節で詳述)

MSMの予報時間延長に合わせて、国内航空悪天GPVに積乱雲頂高度等の要素を追加するとともに、積乱雲量の予測手法を改良し、乱気流指数として出力し

ている鉛直ウィンドシアの算出方法を変更した。

また、20kmGSMの運用開始に合わせて、全球航空悪天GPVに加え、福岡FIR(Flight Information Region)を中心とした空域悪天情報の作成支援等を主な目的として、北太平洋航空悪天GPVを新たに作成するとともに、積乱雲頂高度の診断方法を改良した。

3.1.5 お天気マップ(第3.9節で詳述)

お天気マップは、モデルの予報結果を用いて、快晴、晴れ、薄曇り、曇り、雨、みぞれ、雪を判別する。

モデル更新により降水特性と雲量算出法が変わったため、従前の判別閾値をそのまま使用すると、お天気マップの表現も大きく変わる。そのため、20kmGSMとMSMの予報結果を用いるお天気マップで、天気判別アルゴリズムの閾値を見直した。新閾値によるお天気マップは、統合ビューワの改修後に利用可能となる。

参考文献

- 荒波恒平，原旅人，2006：モデルの変更点．平成18年度数値予報研修テキスト，気象庁予報部，55-58。
 瀬川知則，三浦大輔，2006：統計検証．平成18年度数値予報研修テキスト，気象庁予報部，59-79。
 中村誠臣，神田豊，2003：予報作業支援システム．平成14年度量的予報研修テキスト，気象庁予報部，1-8。
 前多良一，2005：統合ビューワによる実況監視・予測作業．平成17年度量的予報研修テキスト，気象庁予報部，34-46。

3.2 降水確率、平均降水量、最大降水量ガイダンス¹

3.2.1 はじめに

本節では、2007年11月に行われたモデル更新後の降水確率(PoP)、平均降水量(MRR)、最大降水量(MAXP)ガイダンスの仕様、作成方法の概略、各ガイダンスの検証結果を示す。モデル更新後に作成するガイダンスの仕様は、表3.2.1に示す通りである。

なお、本文中では、高解像度全球モデルを20kmGSM、旧全球モデルを旧GSM、領域モデルをRSM、メソ数値予報モデルをMSMと記述する。各モデルを利用したガイダンスは、モデル名と要素名を組み合わせ、「20kmGSM降水確率ガイダンス」又は、要素名を略した形式で「20kmGSM-PoP6」のように記述する。また、初期時刻から起算した予報時間をFT（単位は時間）と表記する。

3.2.2 新ガイダンス作成手法と予測要素

PoP、MRR、MAXPの各ガイダンスの基本的な作成手法は変更しない。詳細な作成手法は、瀬上ほか(1995)や海老原(2002)等、過去の研修テキストにまとめられているので、それらを適宜参照して欲しい。以下では、ガイダンスの計算手法の概略を説明する。

(1) MSM、20kmGSM降水確率ガイダンス

20km格子（南北12分×東西15分の格子）毎、6時間毎に前6時間で1mm以上の降水のある確率(PoP6)を予報する。作成手法は、カルマンフィルタ(KLM)方式であり、表3.2.2のPoP3,6列に示す説明変数（各モデル共通）を利用する。また、3時間毎に前3時間で1mm以上の降水のある確率(PoP3)も、PoP6と同様の手法で計算を行い、後述のように降水量ガイダンスの改善に利用している。なお、日本の陸上を中心とした約1400格子について係数を作成し、海上はこれらの係数を外挿して利用している。

(2) MSM、20kmGSM平均降水量ガイダンス

20km格子毎に3時間毎の前3,6,24時間の平均降水量(MRR3、MRR6、MRR24)を予報する。手法は以下の通りである。

- ①KLM方式でMRR3(A)を作成
- ②頻度バイアス補正でMRR3(B)を作成
- ③MRR3(B)をPoP3で補正し、MRR3を作成
- ④MRR3を積算しMRR24(A)を作成
- ⑤頻度バイアス補正でMRR24を作成
- ⑥MRR3を2時刻分積算してMRR6を作成

①表 3.2.2 の MRR3 列に示す説明変数（各モデル

共通）を利用して KLM 方式で 3 時間平均降水量(MRR3(A))の予報を行う。この MRR3(A)には、弱雨の頻度が多く、強雨の頻度が少ない特性がある。

②MRR3(A)に頻度バイアス補正（藤田 1996）を行い MRR3(B)を作成する。③1mm/3h 程度の降水の予報精度を改善するために、MRR3(B)を PoP3 で補正し、最終的な MRR3 を作成する。④MRR3 を 24 時間分積算した MRR24(A)を作成する。⑤RSM ガイダンスによる MRR24(A)には大雨を予測する頻度が多すぎるバイアス特性があった（海老原 1999）ため、頻度バイアス補正を行っていた。新ガイダンスでも MRR3 を 24 時間分積算した MRR24(A)に対して頻度バイアス補正を行い、MRR24 を作成する。⑥20kmGSM 降水量ガイダンスでは FT=57 から FT=75 の期間について、明後日予報用として、MRR3 を 2 時刻分積算して MRR6 を作成する。MRR も PoP と同様に日本の陸上を中心とした約 1400 格子で係数を作成し、海上はこれらの係数を外挿して利用している。

MRR24 は、最大降水量ガイダンスの入力値となる中間製品であり、配信は行わない。

(3) MSM、20kmGSM最大降水量ガイダンス

二次細分区域²内の「前3時間の1時間最大降水量(MAXP1)」、「3時間最大降水量(MAXP3)」、「24時間最大降水量(MAXP24)」「3時間平均降水量(MEAN3)」「24時間平均降水量(MEAN24)」を予報する。対象領域がMRR3、MRR24は20km格子であるのに対して、MEAN3、MEAN24は二次細分区域であり、MAXPの予測要素として扱っている。

作成手法は、二次細分区域毎に①MRRによる20km格子の平均降水量予報値を二次細分区域に割り振り、②ニューラルネット(NRN)方式で比率(=最大降水量/平均降水量)を求め、③①の平均降水量と②の比率を乗ずることによって最大降水量を求める。表3.2.2のMAXP列に②のNRN方式による比率予報に利用する説明変数(各モデル共通)を示す。比率予報に利用する係数は、年1回の二次細分区域の変更に際して作成する。

なお、RSM-MAXP24は、FT=27から51まで6時間毎に作成し、FT=30,36,42,48は前後の時間帯から内挿していた。新ガイダンスでは、MAXP24を3時間毎に作成し、時間内挿は廃止する。また、FT=3から24では、初期時刻より前の時刻の解析雨量による実況値を利用して作成する。

(4) MSM/降水短時間予報最大降水量ガイダンス

MSM/降水短時間予報最大降水量ガイダンスは、

¹ 安藤 昭芳

² 注意報、警報発表の単位となる区域で、2007年3月現在で全国を373の区域に分けている。

表 3.2.1 降水量、降水確率、最大降水量ガイダンスの予報要素、領域、及び運用回数

ガイダンス名		要素	対象領域	予報時間	予報間隔	運用回数	入力値となる利用モデル等	
MSM	降水確率	3 時間降水確率 (PoP3)	20km 格子	FT=3～33	3 時間	8 回 ／日	MSM 海面水温解析	
		6 時間降水確率 (PoP6)		FT=6～30	6 時間			
	平均降水量	3 時間平均降水量 (MRR3)		FT=3～33	3 時間			
		24 時間平均降水量 (MRR24)		FT=24～33	3 時間			
	最大降水量	3 時間平均降水量 (MEAN3)	二次 細分 区域	FT=3～33	3 時間			
		1 時間最大降水量 (MAXP1)						
		3 時間最大降水量 (MAXP3)		FT=24～33				
		24 時間平均降水量 (MEAN24)				FT=3～33		
		24 時間最大降水量 (MAXP24)						
MSM/ 降水短 時間予 報	平均降水量	3 時間平均降水量 (MRR3)	20km 格子	FT=3～ (最大)33	3 時間	48 回 ／日	MSM ガイ ダンス 解析雨量 降水短時間予 報	
	最大降水量	1 時間最大降水量 (MAXP1)						三次 細分 区域
		3 時間最大降水量 (MAXP3)						
		24 時間最大降水量 (MAXP24)						
GSM	降水確率	3 時間降水確率 (PoP3)	20km 格子	FT=6～84	3 時間	4 回 ／日	GSM 海面水温解析	
		6 時間降水確率 (PoP6)		FT=9～81	6 時間			
	平均降水量	3 時間平均降水量 (MRR3)		FT=6～84	3 時間			
		6 時間平均降水量 (MRR6)		FT=57～75				
		24 時間平均降水量 (MRR24)		FT=27～84				
	最大降水量	3 時間平均降水量 (MEAN3)	二次 細分 区域	FT=6～84				
		1 時間最大降水量 (MAXP1)						
		3 時間最大降水量 (MAXP3)		FT=27～84				
		24 時間平均降水量 (MEAN24)				FT=6～84		
24 時間最大降水量 (MAXP24)								

表のMSMガイダンスの予報時間は、03,09,15,21UTC初期値による予報時間。00,06,12,18UTC初期値の予報時間は、FT=15までとなり、MRR24などは作成しない。

YSS (予報作業支援システム) 向けに防災時系列置換用として三次細分区域³、3時間のコマ⁴毎に1,3,24時間最大降水量⁵を予報する。2005年3月以前は、降短最大降水量ガイダンス (山田 2004) を利用していたが、現在は次の手順で解析雨量、降水短時間予報、MSM最大降水量ガイダンスを組み合わせて作成している。初期時刻が含まれる1コマ目では、「解析雨量、降水短時間予報による三次細分区域内の予報最大値」を採用する。次の2、3コマ目では、「解析雨量、降水短時間予報による三次細分区域内の予報最大値」と「MSM最大降水量ガイダンスの予報値」を比較して、大きな方を採用する。4コマ目以降は「MSM最大降水量ガイダンスの予報値」が採用される。

³ 「山沿い」「平地」など二次細分を更に細分した区域。

⁴ 注意報、警報発表時に利用する3時間毎の時間区切りを「コマ」と呼ぶ。

⁵ 厳密には、降水短時間予報が得られる FT=6 までの時間帯は、積算期間の終端時刻が対象とするコマに含まれる任意の n 時間 (n=1,3,24: 現在時刻より前の時間帯については解析雨量を用いて積算する) 中の最大値を用いる。

(5) MSM/降水短時間予報平均降水量ガイダンス

MSM/降水短時間予報平均降水量ガイダンスは、防災時系列をMSM/降水短時間予報最大降水量ガイダンスで置き換えた場合に、天気予報、分布予報用の20km格子の平均降水量予報値を置き換えるのに利用される。作成手順は以下の通りである。1コマ目、2コマ目を対象に解析雨量及び降水短時間予報を利用し、20km格子の3時間平均降水量(MRR3S)を作成する。作成したMRR3SでMSM-MRR3を置き換える。3コマ目以降は、MSM-MRR3がそのまま採用される。なお、MRR3Sは毎時00分の解析雨量及び降水短時間予報のみを利用して作成しており、毎時30分の初期時刻に作成される予報値は、直前の00分の初期時刻に作成される予報値と同じである。一方、3コマ目以降は、30分の時点での3時間毎に更新される最新のMSM-MRR3であるので、00分に利用された予報値とは一致しない場合もある。

3.2.3 ガイダンスの改善項目

(1) 降水の有無の精度向上

従来のMRR3は、弱い雨から強い雨まで層別化せず全て1組の係数を利用して作成しており、降水

表 3.2.2 降水確率、平均降水量、最大降水量ガイダンスの説明変数

	説明変数の内容	POP3,6	MRR3	MAXP
NW85	850hPa 風 北西-南東成分	○	○	
NE85	850hPa 風 北東-南西成分	○	○	
NW50	500hPa 風 北西-南東成分	○		
NE50	500hPa 風 北東-南西成分	○		
SSI	ショワルターの安定指数		○	○
PCWV	可降水量×850hPa 風速×850hPa 上昇流		○	
QWX	Σ (上昇流×比湿×湿度×層厚)		○	
EHQ	Σ (基準湿度からの超過分×比湿×湿潤層の厚さ)		○	
ESHS	Σ (比湿×湿潤層の厚さ) / Σ 飽和比湿	○		
OGES	地形性上昇流×比湿×湿潤層の厚さ		○	
OGR	地形性上昇流×比湿			○
HOGP	地形性上昇流×相対湿度	○		
RH85	850hPa 相対湿度	○		
DXQV	冬型降水の指数	○	○	
FRR	モデル降水量予報値		○	
CFRR	モデル降水量予報値の変換値	○		
D850	850hPa 風向			○
W850	850hPa 風速			○
10Q4	1000hPa の比湿と 400hPa の飽和比湿の差			○
DWL	湿潤層の厚さ			○
MRR	平均降水量			○

MAXP では、比率＝最大降水量／平均降水量を求めるために利用する説明変数である。

の有無の閾値となる1mm/3hの精度が良くなるような操作は行われていなかった。新ガイダンスでは、1mm/3h程度の弱い雨の精度向上を図るために、PoP3を利用した補正を行う。図3.2.1で示す通り、MRR3の補正を行うことで、1mm/3h前後の精度が向上している。5～20mm/3hでは、補正前後のスレトスコアには大きな差が無い。

(2) 30mm/3h以上の強雨の予報頻度の改善

旧ガイダンスのMRR3は、頻度バイアス補正の閾値が0.5,1,3,5,10,20,30mm/3h と最大30mm/3hであった。そのため30mm/3hを超える強雨の予報頻度が正しくない可能性があった。実際に旧ガイダンスでは50mm/3h以上といった極端な強雨を予報する頻度が多く、また、その精度は良くなかった。新ガイダンスでは50mm/3h以上といった極端な強雨の予報頻度を低くするために、従来に閾値に加えて、50,80mm/3hを追加した。

(3) 100mm/24h以上の大雨の予報頻度の改善

旧ガイダンスのMRR24は、頻度バイアス補正の最大閾値が100mm/24hであり、(2)と同様の問題があった。特に150mm/24hを超える大雨の予報頻度が過多であった。この欠点を軽減するために新ガイダンスでは、従来の閾値(3,10,30,50,70,100mm/24h)に、150,200mm/24hを追加した。

なお、MRR24による大雨の予報頻度は過多であったが、後述する(4)の問題点により、「比率」予報が

過少であったために、MAXP24の予報頻度は実況とほぼ同程度になっていた。

(4) 最大降水量ガイダンスの比率学習期間の延長

MAXPの比率を予報するのに利用する係数は、年1回の細分区域の変更に際して作成する。作成に利用する期間を延長することで「比率」の予報精度は向上する。また、解析雨量格子の大きさ(2001年2月以前は5km格子、2001年3月から2006年2月までは2.5km格子)の違いから、学習期間が短い(解析雨量5km格子の期間が相対的に多い)場合には、予報する「比率」が実況に比べて過少になることが判明している。そこで、2006年3月にMAXP1、MAXP3の学習期間を延長した。学習期間の延長により精度向上が得られている。

3.2.4 20kmGSMガイダンスの予測特性と精度

20kmGSMの予報値を利用し、第3.2.2項の手法で2004年8月から9月までガイダンスの計算を行った。なお、最大降水量ガイダンスでは、学習期間延長前の係数を利用している。係数の最適化の期間を考慮し、2004年9月を検証し、RSM、旧GSMガイダンスと比較した。(1)から(7)の検証結果は、全て2004年9月の1か月間の00,12UTC初期値の結果である。また、比較に利用したRSM、旧GSMガイダンスは2004年に現業利用していたガイダンス、実況値は解析雨量である。ガイダンスとの比較に利用したモデルの降水量予報はFRRと略し、前3時間降水量予報は

FRR3と記述している。

(1) PoP6、PoP3の精度

・信頼度

図3.2.2は降水確率予報の信頼度曲線である。FT=9から51では、どの降水確率予報も傾き45度の直線に近く、確率予報として高い信頼性を持つことが分かる。一方、FT=57から75では、旧GSM-PoP6、20kmGSM-PoP6のいずれも70%以上の予報値では、実況値が小さく、傾き45度の直線から大きくはずれ、信頼度が低くなっている。FT=57以降では、70%以上の予報値の頻度は極めて少なく、少数の予報値のはずれの影響を大きく受けている。ただし、新旧のガイダンスの差は小さく、信頼度は同程度である。

・ブライアスコア

図3.2.3左はFT別のブライアスコアである。新旧のPoP6のいずれも予報時間が先になるに従ってスコアが大きくなり、精度が悪くなっていく。FT=9は、新旧PoP6が同程度であり、他の時間と比べて20kmGSM-PoP6の改善率が低い。RSMは領域解析で解析雨量を同化し、予報初期の降水予報の精度を向上させているが、20kmGSMでは解析雨量の同化が行われていない。予報初期におけるスコアの差はモデルの降水量予報の精度差が原因であろう。FT=15から51は、20kmGSM-PoP6のRSM-PoP6からの改善が大きい。また、旧GSMとの比較であるFT=57以降も精度が向上している。

図3.2.3右は地域別のブライアスコアである。沖縄・九州南部を除く各地域では、新PoP6の精度が良くなっている。検証期間には台風が沖縄から九州南部に接近しており、RSMに比べて20kmGSMの台風の進路予報の精度が悪かった影響と思われる。

(2) MRR3の精度

図3.2.4は閾値別の検証結果である。PoP3を利用して1mm/3h前後の予報精度を改善した効果もあり、5mm/3h以下の20kmGSM-MRR3のスレットスコアはRSM-MRR3より良くなっている。5mm/3h以上はスレットスコアに大きな差は無い。

図3.2.5は、FT別の検証結果である。閾値1mm/3hの予報初期はRSM-MRR3より20kmGSM-MRR3は精度が劣るが、FT=15以降は精度が良い。予報初期の精度が良くないことは、PoP6と同じであり、モデル降水量の予報精度の差が原因であろう。閾値5mm/3hでは、FT=12,24,36,48の精度が悪く、他の時間帯はRSM-MRR3と同程度である。00UTC初期値のFT=12,36、12UTC初期値のFT=24,48に対応する12UTCの予報精度が悪い。これは20kmGSM-FRR3でも同じ傾向であり、20kmGSMの特性と考えられる。

(3) MRR6の精度

FT=57から75までの新旧MRR6の検証結果を図3.2.6に示す。新旧のスコア差は小さいが、閾値が大きくなると新MRR6のスコアが悪くなる。旧MRR6では、6時間降水量を直接求めていた。新MRR6はFT=51までと同じ手法でMRR3をFT=54から75まで作成し、作成したMRR3を2時刻分積算している。また、旧MRR6は、モデル予報の時間ずれ、空間ずれを考慮してメリハリのある予報をしない仕様としていたが、新ガイダンスではFT=51までと同じ手法で作成し、FT=57以降であってもメリハリのある予報をする。これらのことが精度悪化の原因である可能性がある。弱い降水の予報精度は同程度かやや改善していることから、明後日予報に利用する上で大きな問題にはならないであろう。なお、旧GSM-FRR6のスレットスコアが最も良い。検証期間を長くすると旧GSM-MRR6は旧GSM-FRR6よりもスレットスコアが良くなることから、検証期間が1か月と短い影響と考えられる。

(4) MRR24の精度

図3.2.7にMRR24とFRR24の検証結果を示す。RSM-MRR24は、第3.2.3項(3)のようにガイダンスの頻度バイアス補正に問題があったこと、RSMの特徴として大雨の予報頻度が過多であったことから、バイアススコアが1以上となっていた。20kmGSM-MRR24のバイアススコアは、閾値100mm/24h以上でやや1を上回るが、RSM-MRR24に比べて大きく改善している。スレットスコアは、RSM-MRR24とほぼ同等か140mm/24h以上では改善している。

MRR24は、MAXP24の入力値として利用されており、MRR24の精度向上によりMAXP24の精度向上が期待される。

(5) MAXP1、MAXP3、MAXP24の精度

実況値として解析雨量を利用した検証結果を図3.2.8に示す。MAXP1、MAXP3では、20kmGSMガイダンスのバイアススコアが小さくなっている。これはMRR3の段階で既に現れており、20kmGSMガイダンスでは、特に強い雨の予報頻度が少なく、二次細分区域の3時間平均降水量であるMEAN3でも40mm/3h以上のバイアススコアがRSMガイダンスより小さくなっている（図は省略）。この影響で最大降水量ガイダンスも短時間強雨の予報頻度が少なくなっている。一方、スレットスコアはRSMガイダンスと同程度かやや下回る程度である。RSM最大降水量ガイダンスでは、短時間強雨の予報頻度が少なく、捕捉率が低かったが、20kmGSMガイダンスでも同じ傾向がある。一方、MAXP24は100mm/24h以上の大雨の予報頻度が増え、スレットスコアが向上し

ている。20kmGSM-MAXP24は、第3.2.3項(3)の改善により、大雨の予報頻度が少なくなると考えられるのだが、逆に増えている。これは検証期間が短く、検証対象期間である2004年9月の特徴が現れている可能性がある。

(6) FT=51以降のMAXPの精度

20kmGSMガイダンスは、FT=51以降も二次細分区域毎、3時間毎に最大降水量を予報する。図3.2.9にMAXP24の閾値100mm/24hのFT別検証結果を示す。二次細分区域毎の予報では、FTが進むとスレトスコアは次第に小さくなる。空間的な予報のずれを許容するために、府県予報区に含まれる二次細分区域の最大値を用いて、検証した結果も示している。府県予報区内の最大値を用いて検証した場合は、二次細分区域の検証結果に比べて、予報後半のスレトスコアが向上している。FT=51以降の降水量予報は、低気圧の位置や移動速度などの予報誤差に大きく影響を受ける。そのため、府県予報区程度の大きさで空間的な幅を持たせたとしても、予報後半の予報精度はかなり低いことが分かる。

(7) 初期値別の20kmGSM-MRR3の検証結果

RSMガイダンスは1日2回の作成だが、20kmGSMガイダンスは1日4回作成する。追加された06,18UTC初期値の効果を見るために、初期値別に

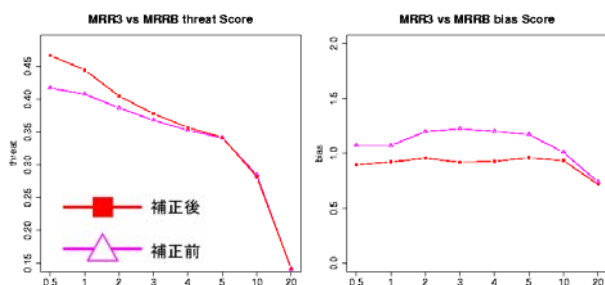


図3.2.1 MSM-MRR3のPoP3による補正前後の精度比較。2006年8月から2007年3月までの8か月間、RSMを境界値とするMSMを利用したガイダンスの検証。左はスレトスコア、右はバイアススコア。横軸は閾値、単位はmm/3h。

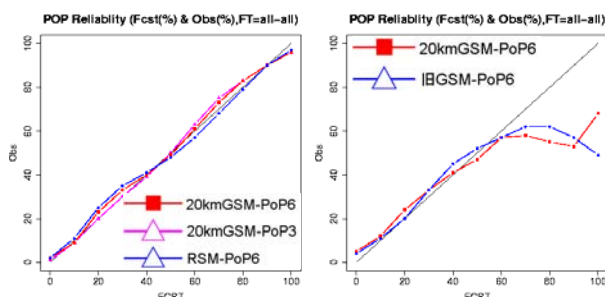


図3.2.2 PoPの信頼度曲線。横軸は観測値、縦軸は予報値とともに単位は%。左はFT=9から51まで、右はFT=57から75まで。

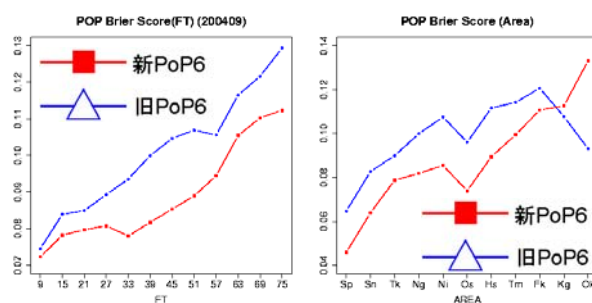


図3.2.3 PoPのブライアスコア。左はFT別のスコア。右はFT=9から51までの地方別のスコア。(左から北海道、東北、関東甲信、東海、北陸、近畿、中国、四国、九州北部、九州南部、沖縄の各地方)。

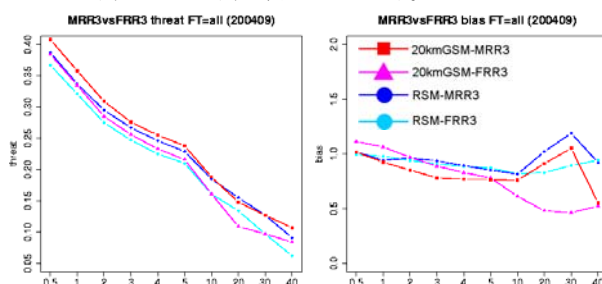


図3.2.4 20kmGSM,RSMによるMRR3とFRR3の閾値別検証結果。FT=6から51。左がスレトスコア、右がバイアススコア。横軸は閾値、単位はmm/3h。

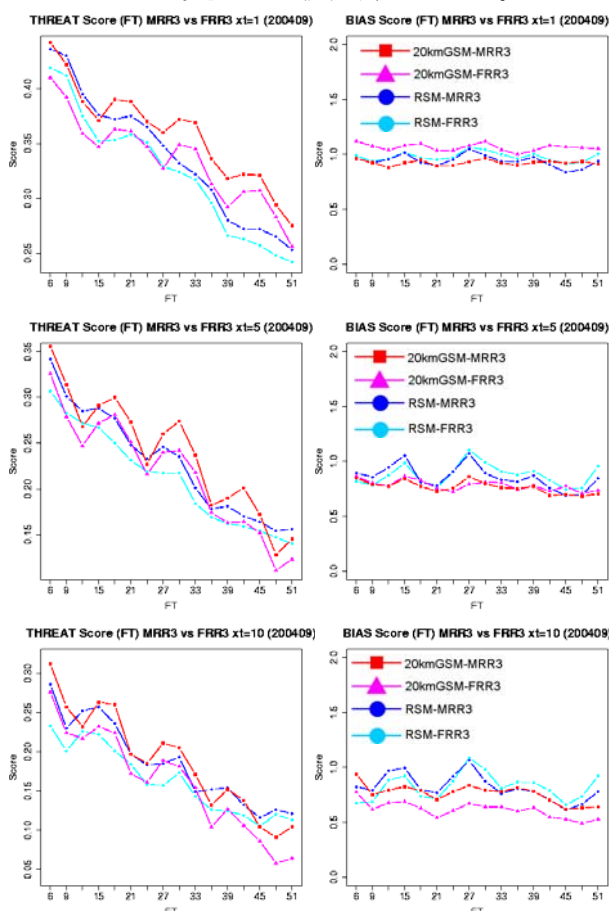


図3.2.5 20kmGSM,RSMによるMRR3とFRR3のFT別の検証結果。上段から閾値1,5,10mm/3h。左がスレトスコア、右がバイアススコア。横軸はFT。

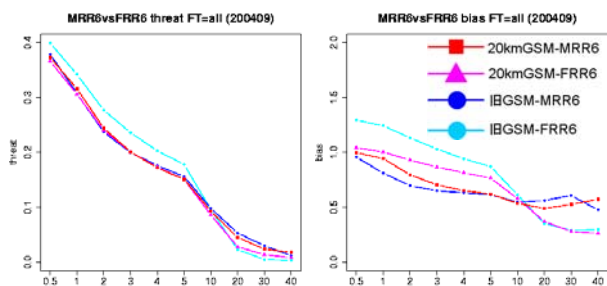


図3.2.6 20kmGSM,旧GSMによるMRR6とFRR6の閾値別の検証結果。FT=57から75まで。左がスレツスコア、右がバイアスコア。横軸は閾値、単位はmm/6h。

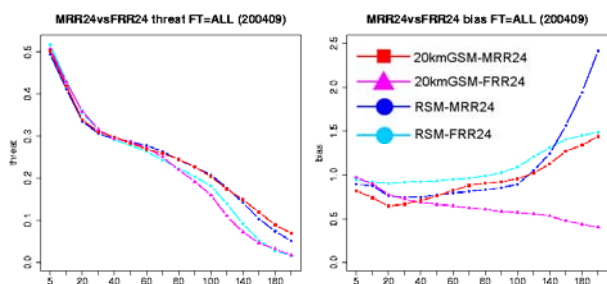


図3.2.7 20kmGSM,RSMによるMRR24とFRR24の閾値別の検証結果。FT=27から51まで。左がスレツスコア、右がバイアスコア。横軸は閾値、単位はmm/24h。

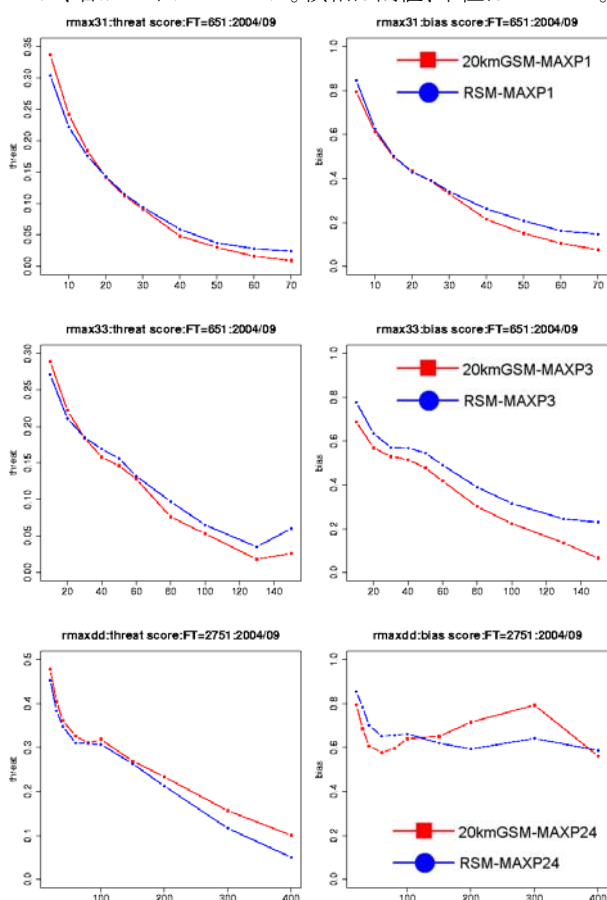


図3.2.8 上からMAXP1(FT=6から51)、MAXP3(FT=6から51)、MAXP24(FT=27,33,39,45,51)の閾値別の検証結果。左がスレツスコア、右がバイアスコア。横軸は閾値、単位はmm/h、mm/3h、mm/24h。

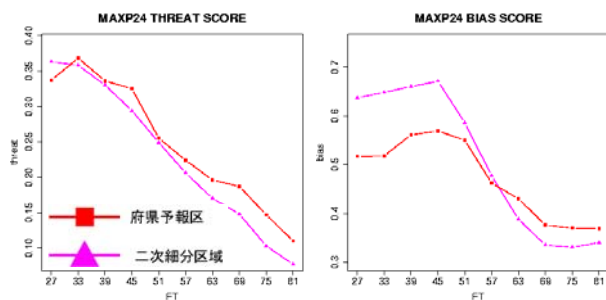


図3.2.9 MAXP24の予報時刻(FT)別の検証結果。閾値は100mm/24h。左はスレツスコア、右はバイアスコア。府県予報区は、府県予報区内に含まれる二次細分区域の最大値で検証した結果。横軸はFT。

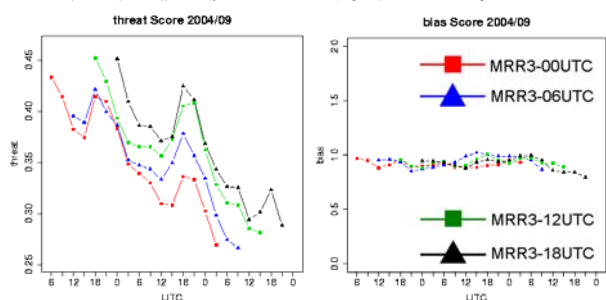


図3.2.10 20kmGSM-MRR3の閾値1mm/3hの初期時刻別の検証結果。左はスレツスコア。右はバイアスコア。横軸は予報対象時刻(UTC)。

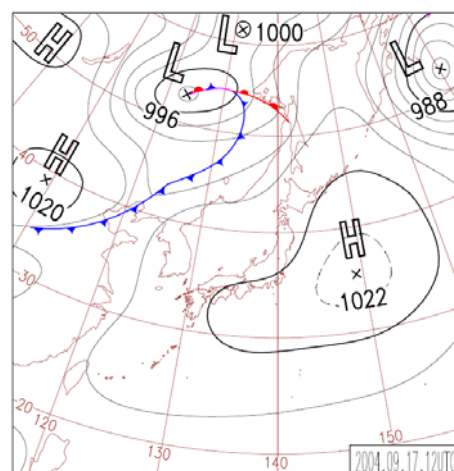


図3.2.11 2004年9月17日21時(JST)の地上天気図。

検証する。図 3.2.10 は、閾値 1mm/3h とした 20kmGSM-MRR3 の初期時刻別の検証結果である。横軸が UTC での時刻となり、新しい初期時刻の精度が高い。運用回数が 1 日 4 回になることで、精度の高い予報を利用できるようになる。

(8) 予報事例

2004 年 9 月 17 日に西日本で発生した不安定降水を事例として、RSM と 20kmGSM による予報を検証する。図 3.2.11 及び 12 に同日 21 時 (日本時間) の地上天気図と両モデルによる FRR3、MRR3、

MAXP3の予報例を示す。

初めに降水の有無に着目する。RSMでは、FRR3・MRR3の両者ともに実況の降水域との対応は悪い。一方、20kmGSMでは、九州・山陰・瀬戸内など実況で降水のあった地域に、FRR3・MRR3は降水を予報しており、不安定性降水の有無の予報が良くなっている。

次に20kmGSMによるFRR3とMRR3を比較す

る。FRR3に比べてMRR3は、山陰や瀬戸内などで降水域が狭く、降水量が少ない。20kmGSM-FRR3は、統計的には弱い降水の予報頻度が実況よりも過多である傾向がある。予報頻度が過多である点を補正するには、弱い降水域を狭く、降水量を少なく修正すれば良い。実際にMRR3は、FRR3に比べて降水域を狭く、降水量を少なく修正している。この修正は、統計的に間違いではないが、本事例の山陰や

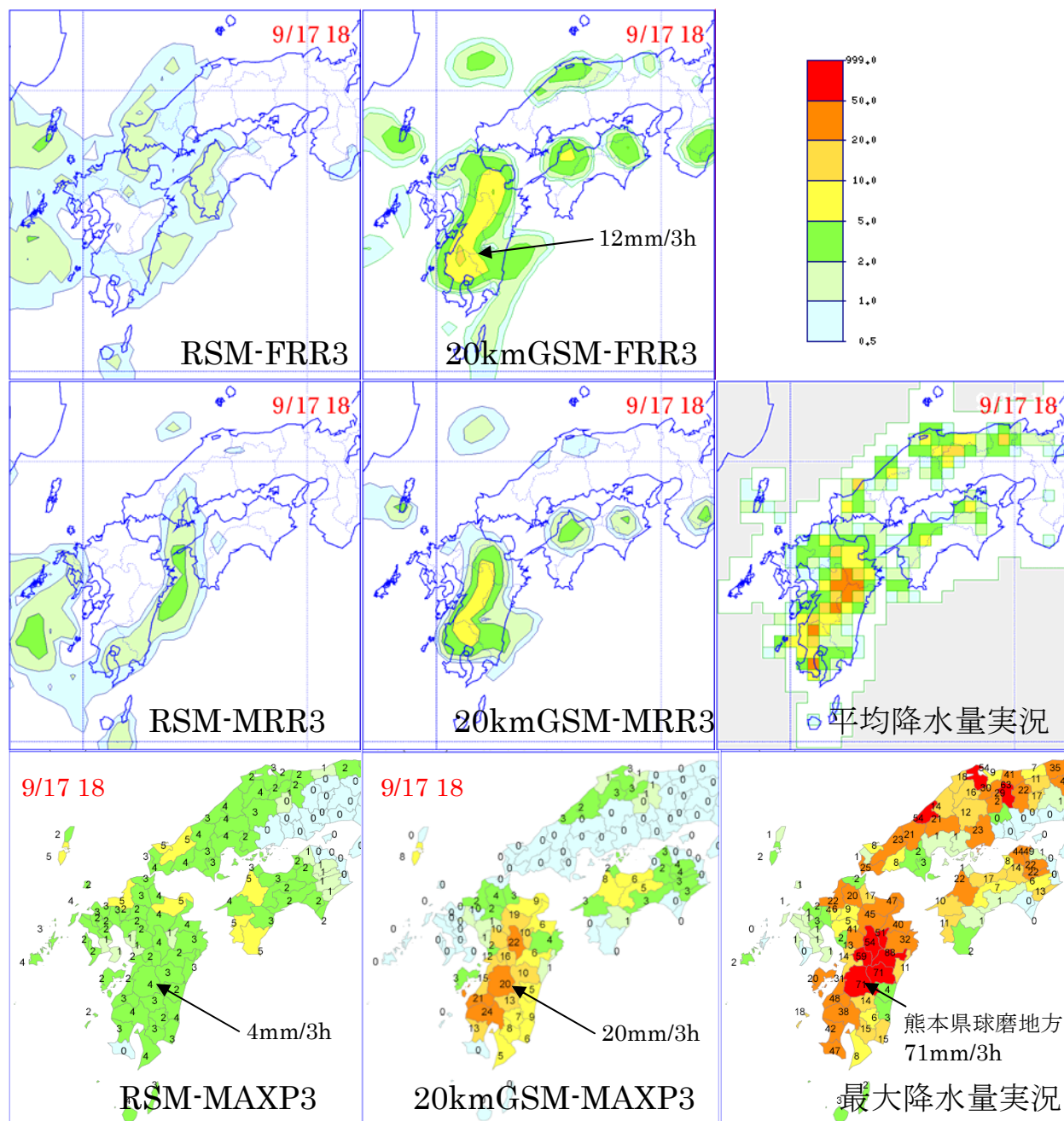


図3.2.12 2004年9月16日12UTC初期値によるFT=21の予報。上段はモデル降水量(FRR3)、中段は降水量ガイダンス(MRR3)、下段は最大降水量ガイダンスによる3時間最大降水量(MAXP3)。左列はRSM、中列は20kmGSMによるモデル降水量及びガイダンス、左列は解析雨量による実況値。降水量ガイダンスの実況値は、3時間積算解析雨量の20km格子格子平均値、最大降水量ガイダンスの実況値は、3時間積算解析雨量の二次細分区域内最大値。

瀬戸内などでは、改悪となっている。FRR3 で広い範囲に予報した不安定降水をガイダンスは弱める傾向があり、多くの場合は改善されるが、時には改悪となることもある。

最後に MAXP3 の予報値に着目する。RSM ガイダンスでは、熊本県などの強雨が予報できず、最大降水量予報の地域差は小さくメリハリが無い。一方、20kmGSM ガイダンスでは、実況で強い降水のあった熊本県付近で、他の地域よりもやや大きな最大降水量を予報しており、地域差を表現している。ただし、最大降水量の予報値は、最も多かった細分区域でも 24mm/3h と実況に比べて大幅に少なく、量的な予報精度は良くない。

不安定降水について 20kmGSM は RSM に比べて降水の有無の予報精度が向上している。しかし、量的には RSM 同様に十分な精度を持っていないことが分かる。

3.2.5 MSMガイダンスの予測特性と精度

各種改良が行われたMSM は、RSMを側面境界値として2007年5月に運用が開始された（第2.1節）。同年11月には20kmGSM の運用開始とRSMの廃止に伴って、MSMの側面境界値が20kmGSMに変更される。本項は20kmGSMを側面境界値とするMSMを利用したガイダンスの検証結果を示す。検証対象は2004年8月6日から9月5日までの1か月間である。検証には03,15UTC初期値の予報値、比較対象のRSMガイダンスは00,12UTC初期値を利用して、対象時刻を合わせて検証した。RSMガイダンスは、2004年に現業運用を行っていたガイダンスである。第3.2.4項で述べた20kmGSMガイダンスと検証期間が異なることに注意して欲しい。なお、FRRはMSMの降水量予報をガイダンスと同じ格子系に座標変換したものである。

(1) PoP6、PoP3の精度

図3.2.13はPoPの信頼度曲線とブライアスコアである。信頼度を見ると、RSM-PoP6と同様に傾き45度の線に近く信頼度が高い。全国平均のブライアスコアは、RSM-PoP6よりも精度が高くなっている。検証している期間が異なるが、地域別では、20kmGSMガイダンスがRSMガイダンスより精度の悪かった九州南部や沖縄は、MSMガイダンスも精度が悪い。

(2) MRR3の精度

図3.2.14はMRR3の検証結果である。どの閾値でもMSM-MRR3は、RSM-MRR3をおおむね改善しているが、閾値1mm/3hのFT=9,12では、RSMよりもMSMの精度が悪い。FRR3の比較でもMSMの精度が悪くなっている。この時間帯は、20kmGSMガイ

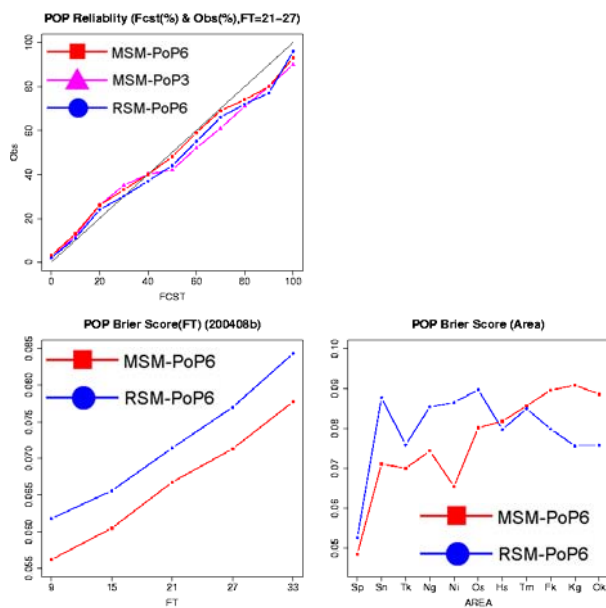


図3.2.13 左上はMSM-PoP(FT=24)の信頼度曲線。横軸は予報値、縦軸は観測値とともに単位は%。比較相手のRSM-PoP6はFT=27。左下はFT別のブライアスコア、横軸はFT (RSM-PoP6のFT)。右下は地域別のブライアスコア（左から北海道、東北、関東甲信、東海、北陸、近畿、中国、四国、九州北部、九州南部、沖縄の各領域）。MSM-PoP6はFT=24、RSM-PoP6はFT=27。

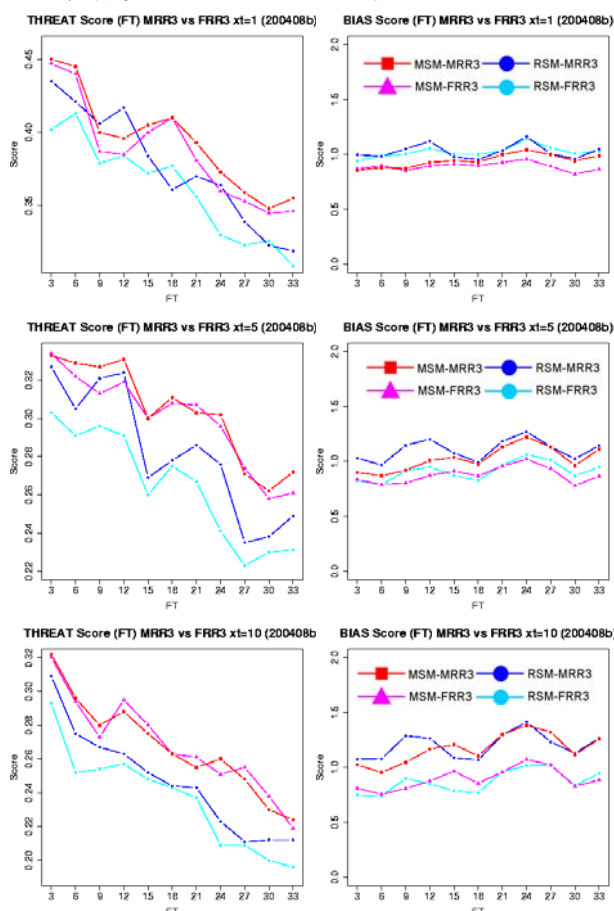


図3.2.14 RSM,MSMによるFRR3とMRR3のFT別の検証結果。上段から閾値1,5,10mm/3h。左がスレットスコア、右がバイアスコア。横軸はFT。

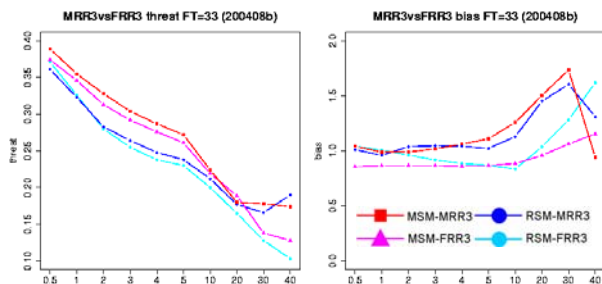


図3.2.15 RSM,MSMによるMRR3とFRR3の閾値別検証結果。MSMはFT=30、RSMはFT=33。左がスレツスコア、右がバイアススコア。横軸は閾値、単位はmm/3h。

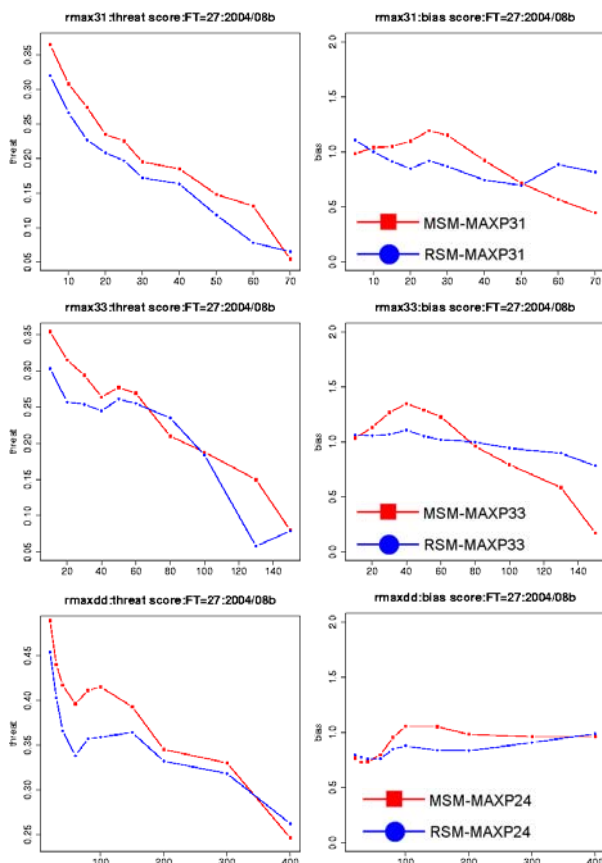


図3.2.16 RSM,MSMによる最大降水量ガイダンスの検証結果。上からMAXP1,MAXP3,MAXP24。MSMガイダンスはFT=24、RSMガイダンスはFT=27。左がスレツスコア、右がバイアススコア。横軸は閾値、単位はmm/h,mm/3h,mm/24h。

ダンスでも精度が悪くなっている。20kmGSMを側面境界値として利用していることで、MSMも20kmGSMに似た予報傾向を持っていると思われる。

図3.2.15の閾値別の検証結果では、MSM-MRR3は弱い降水でRSM-MRR3からの改善が大きい。強い降水は、バイアススコアがやや大きくなっている。MSMの降水検証でも20kmGSMを側面境界値に利用した場合に、予報頻度が高くなるとの結果が出ている。統計的に強い降水の予報頻度が増えているのであれば、学習を重ねることで、バイアススコアは

1前後になると期待されるので、運用開始まで十分なデータを利用して係数の適応を進める必要がある。

(3) MAXPの精度

図3.2.16はMSM-MAXPの検証結果である。MAXP1、MAXP3、MAXP24のいずれもRSMガイダンスに比べてやや強い降水のバイアススコアが大きくなった。また、スレツスコアでは、RSMガイダンスよりも精度が高くなっている。バイアススコアが大きくなったのは、MRR3の強い降水の頻度が多くなっていることの影響である。20kmGSMガイダンスでは、強い降水の予報精度がRSMガイダンスと同程度か悪かったが、MSMガイダンスでは概ね改善されている。

3.2.6 まとめと利用上の留意点

20kmGSM、MSM (20kmGSMを側面境界値とする) を利用したガイダンスを作成し、精度の検証を行った。どちらのガイダンスもRSMガイダンスとほぼ同等か上回る精度を持つことが確認できた。

また、新しいガイダンスの精度と特徴から、次の点に留意して利用して欲しい。

- ・ 予報初期 (FT=15 程度まで) の 1mm/3h の降水に対して、20kmGSM ガイダンスの精度は RSM ガイダンスよりも悪い。MSM ガイダンスは RSM ガイダンスと同程度か上回る精度を持っているので、予報初期は MSM ガイダンスを利用した方が良い。
- ・ FT=24 以降の 1mm/3h の降水に対して、20kmGSM ガイダンスの精度は RSM ガイダンスよりも良い。気圧配置などの総観場の予報精度が向上している結果だと思われる。
- ・ 短時間強雨に対して、20kmGSM ガイダンスの精度が RSM ガイダンスよりもやや悪い。MSM ガイダンスは RSM ガイダンスを上回るなので、短時間強雨の予報は MSM ガイダンスを利用した方が良い。
- ・ 不安定降水に対して、RSM と 20kmGSM のモデル比較では、RSM で多くを見逃していたのに対して、20kmGSM は観測より広い範囲に予報する傾向がある。ガイダンスの比較では、RSM ガイダンスは不安定降水を予報できない事例が多かった。20kmGSM ガイダンスは降水を予報できる事例が増えるが、正確な量的予報ができない事例が多い点は RSM ガイダンスと変わらない。予報作業では引き続き実況監視が重要である。
- ・ 100mm/24h 以上の降水に対しては、RSM と 20kmGSM のモデル比較では RSM で予報頻度が過多であったが、20kmGSM では反対に過少になった。最大降水量ガイダンス同士の比較で

は、ほぼ同程度の予報頻度である。

- ・ 新しい初期時刻の精度が高く、高頻度に更新される最新の予報結果を利用することが統計的には最も精度が高い。
- ・ モデルの更新により、多くの点でガイダンスの特性も変わる。ガイダンスの利用では、モデルや実況との比較を行って、ガイダンスの妥当性を確認しながら利用することが重要である。

参考文献

- 海老原智, 1999: 降水ガイダンスの改良と検証. 平成11年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 23-33.
- 海老原智, 2002: 最大降水量ガイダンス. 平成14年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 35-39.
- 瀬上哲秀, 大林正典, 国次雅司, 藤田司, 1995: カルマンフィルタ. 平成7年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 25-32.
- 藤田司, 1996: 降水ガイダンスの統計的検証. 平成8年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 34-43.
- 山田眞吾, 2004: 降水短時間予報. 平成16年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 44-47.

3.3 気温ガイダンス¹

3.3.1 新GSM気温ガイダンス

(1) はじめに

領域モデル(RSM)と全球モデル(GSM)が高解像度全球モデル(20kmGSM)に統合されることに伴い、ガイダンスもRSMガイダンスとGSMガイダンスを統合し、20kmGSMから作成することとなる。本項では、夏(2004年8～9月)・冬(2005年12月～2006年1月)を対象としたサイクル実験の予報値を用いて作成した気温ガイダンス(新GSMガイダンス)の精度検証結果を解説する。

(2) 仕様と作成手法

表3.3.1に新GSMガイダンスの仕様を示す。作成手法はRSMガイダンスと同じ手法を用いる。新GSMガイダンスは、20kmGSM地上気温予報値と観測値との偏差を目的変数として予測式を作成し、予測式の係数はカルマンフィルター方式によって逐次更新される。最高・最低気温の観測値はアメダス10分値から算出された値を使用している。予報回数は1日2回(00,12UTC)から4回(00,06,12,18UTC)となる。これまでは、11JST発表の予報作成時に新しいガイダンスは提供されていなかったが、今後は18UTC初期値のガイダンスを利用できるようになる。

表3.3.2に初期時刻と予測要素(最高・最低気温)を示す。06UTCと12UTC、18UTCと00UTC初期値のガイダンスがそれぞれ同じ要素を予測する。時系列気温の予測時間間隔はRSMガイダンスが3時間間隔、GSMガイダンスが6時間間隔であったが、1時間間隔に変更となっている。

(3) 予測精度

夏を対象としたサイクル実験(夏実験)では、2004年8月のアメダス観測値及び20kmGSMによる予報値を用いて予測式の係数を最適化し、2004年9月について予測精度を検証した。RSMガイダンス(最高・最低気温:MAX1、MAX2、MIN1、MIN2、時系列気温:予報時間06～51)とGSMガイダンス(最高・最低気温:MAX3、MIN3、時系列気温:予報時間54～72)を旧ガイダンスとして、新GSMガイダンスと比較した。比較する初期値は、予想要素が同じ初期値同士としている。最高・最低気温ガイダンスの平方根平均二乗誤差(RMSE)を図3.3.1に示す。新GSMガイダンスは、旧ガイダンスと比べて00UTC初期値では明々後日の最低気温(MIN3)を除く全て、

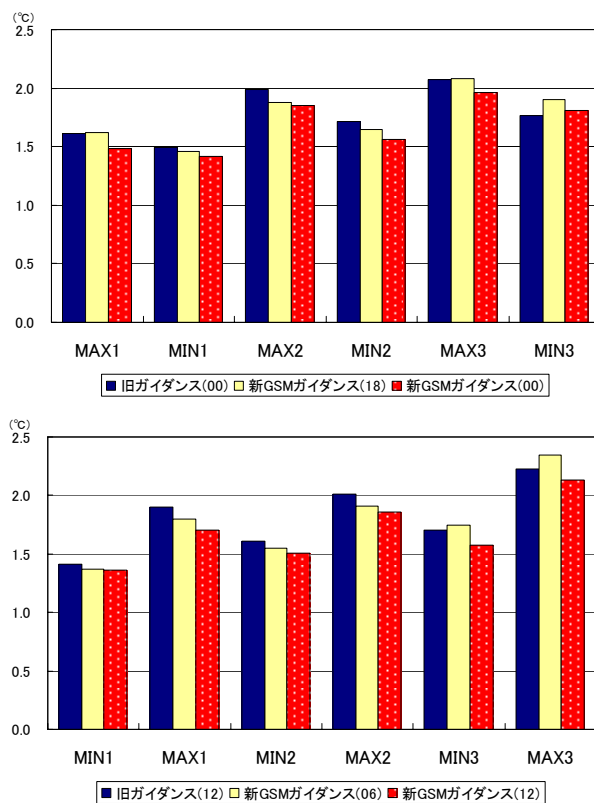


図3.3.1 2004年9月の最高・最低気温ガイダンスのRMSE。凡例の括弧の数字はガイダンスの初期時刻(UTC)を表す。

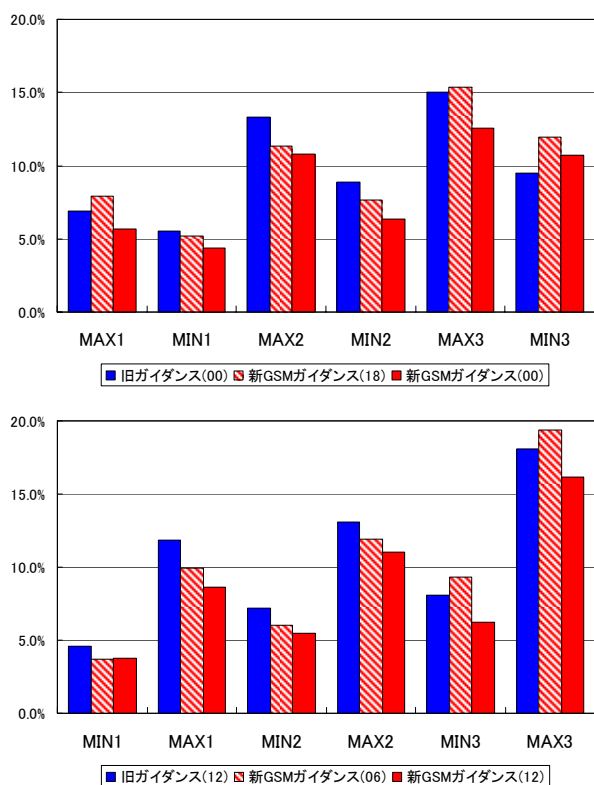


図3.3.2 2004年9月の最高・最低気温ガイダンスの3°Cはずし率。凡例の括弧の数字はガイダンスの初期時刻(UTC)を表す。

¹ 小泉 友延

表3.3.1 気温ガイダンスの仕様

	新GSMガイダンス	新航空ガイダンス		MSMガイダンス	
初期時刻(UTC)	00,06,12,18	00,06,12,18	03,09,15,21	00,06,12,18	03,09,15,21
利用モデル	20kmGSM	MSM		MSM	
統計手法	カルマンフィルター	カルマンフィルター		カルマンフィルター	
予測要素	最高・最低・時系列	時系列	最高・最低・時系列	時系列	最高・最低・時系列
最高・最低	今日・明日・明後日	なし	今日・明日	なし	今日・明日
毎時時系列	FT=03~75	FT=01~15	FT=01~33	FT=01~15	FT=01~33
予測地点	アメダス地点	国内空港		アメダス地点	
説明変数	バイアス項	バイアス項		バイアス項	
	20kmGSM地上気温	MSM地上気温		MSM地上気温	
	20kmGSM地上西風成分	MSM地上西風成分		MSM地上西風成分	
	20kmGSM地上東風成分	MSM地上東風成分		MSM地上東風成分	
	20kmGSM地上南風成分	MSM地上南風成分		MSM地上南風成分	
	20kmGSM地上北風成分	MSM地上北風成分		MSM地上北風成分	
	20kmGSM地上風速	MSM地上風速		MSM地上風速	
	20kmGSM中下層雲量	MSM中下層雲量		MSM中下層雲量	

表3.3.2 新GSMガイダンスの初期時刻と予測要素

初期時刻	今日		明日		明後日		明々後日
	最低	最高	最低	最高	最低	最高	最低
06 UTC (前日15JST)	MIN1	MAX1	MIN2	MAX2	MIN3	MAX3	
12 UTC (前日21JST)	MIN1	MAX1	MIN2	MAX2	MIN3	MAX3	
18 UTC (当日03JST)		MAX1	MIN1	MAX2	MIN2	MAX3	MIN3
00 UTC (当日09JST)		MAX1	MIN1	MAX2	MIN2	MAX3	MIN3

06UTC初期値では明後日の最高・最低気温(MAX3、MIN3)を除く全て、12UTC初期値では全て、18UTC初期値では明日の最高・最低気温(MAX2、MIN1)と明後日の最低気温(MIN2)の精度がよい。平均誤差は新・旧ガイダンスともにほぼ0となっている(図略)。図3.3.2には全予測の中で誤差が3℃以上であった予測回数の割合(3℃はずし率)を示した。3℃はずし率について新GSMガイダンスと旧ガイダンスとを比較すると、RMSEと同様の傾向が見られた。

冬を対象としたサイクル実験(冬実験)では、2005年12月のアメダス観測値及び20kmGSMによる予報値を用いてガイダンスの係数を最適化し、2006年1月について予測精度を検証した。新GSMガイダンスは旧ガイダンスと比べて、RMSEは00UTC初期値では明日の最低気温(MIN1)を除く全て、06,12UTC初期値では今日・明日の最低気温(MIN1、MIN2)を除く全て、18UTC初期値では明日・明後日の最高気温(MAX2、MAX3)の精度がよい(図略)。平均誤差は新・旧ガイダンスともにほぼ0となった(図略)。3℃はずし率は、RMSEと同様の傾向が見られた(図略)。

図3.3.3に2004年9月の時系列気温のRMSEを示す。新GSMガイダンスは旧ガイダンスとほぼ同等の精度となっているが、00UTC初期値同士での比較では予報時間18~21,42~45,12UTC初期値同士での

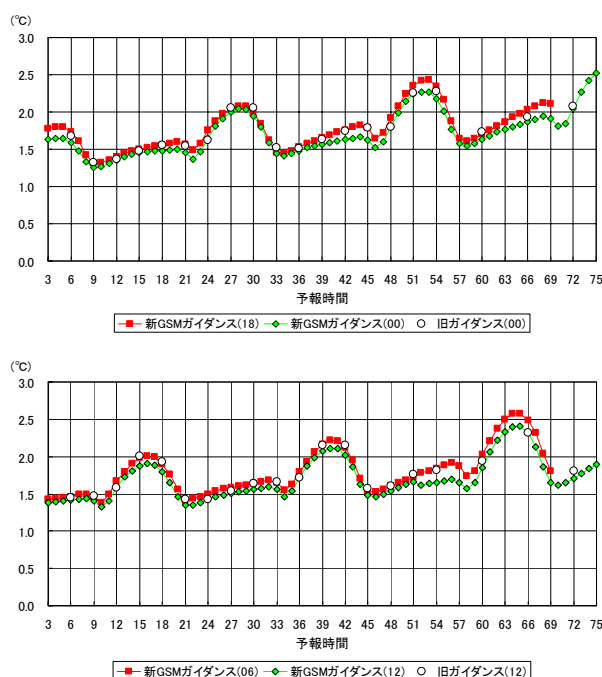


図3.3.3 2004年9月の時系列気温のRMSE。凡例の括弧の数字はガイダンスの初期時刻を表す。上段は00UTC、下段は12UTCを基準とした予報時間を横軸としている。

比較では予報時間30~33,54で精度がよい。この時間はいずれも明け方03~06JSTにあたり、明け方の時間帯で精度がよくなっていることがわかる。平均

誤差は、新・旧ガイダンスともにすべての予報時間でほぼ0となっている（図略）。2006年1月の時系列気温のRMSEは、日中の12～18JSTにおいて新GSMガイダンスの精度がよい（図略）。平均誤差は、新・旧ガイダンスともにすべての予報時間でほぼ0となっている（図略）。

(4) まとめと考察

新GSMガイダンスと旧ガイダンスとの精度検証結果の比較は、以下ようになった。

- ・ 最高気温は夏実験、冬実験ともに新GSMガイダンスの方が精度がよい。
- ・ 最低気温は夏実験では新GSMガイダンスの方が精度がよく、冬実験ではほぼ同等である。
- ・ 時系列気温は夏実験では明け方の気温の精度は新GSMガイダンスの方がよく、その他はほぼ同等である。冬実験では日中の気温の精度は新GSMガイダンスの方がよく、その他はほぼ同等である。

これらの結果は、20kmGSMの地上気温の予報特性によく対応している（第1.4節参照）。このことから、新GSMガイダンスの精度の向上は20kmGSMの予報特性を反映したものと思われる。新GSMガイダンスの初期値別の精度は、00UTC、12UTCのガイダンスが18UTC、06UTCのガイダンスをそれぞれ上回っている。これは、18UTC、06UTCのガイダンスが00UTC、12UTCのガイダンスより6時間古いためである。利用する際は初期値別の精度の違いに留意願いたい。

3.3.2 航空気温ガイダンス

(1) はじめに

航空気温ガイダンスはRSMを元にしたTAF-Lガイダンス（旧航空ガイダンス）として提供してきたが、2007年5月にMSMの予報時間が33時間に延長されたことに伴い、MSMを元に作成されるTAFガイダンス（新航空ガイダンス）に切り替わっている。本項では新航空ガイダンスの気温の精度検証結果を解説する。

表3.3.3 新航空ガイダンスとMSMガイダンスの初期時刻と予測要素

初期時刻	今日	明日	
	最高	最低	最高
15 UTC（当日00JST）	MAX1	MIN2	
21 UTC（当日06JST）	MAX1	MIN2	
03 UTC（当日12JST）		MIN1	MAX2
09 UTC（当日18JST）		MIN1	MAX2

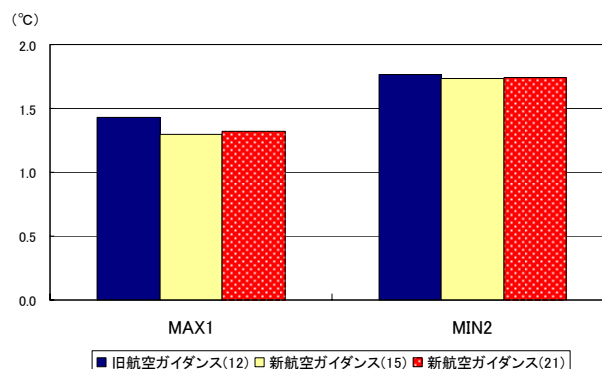
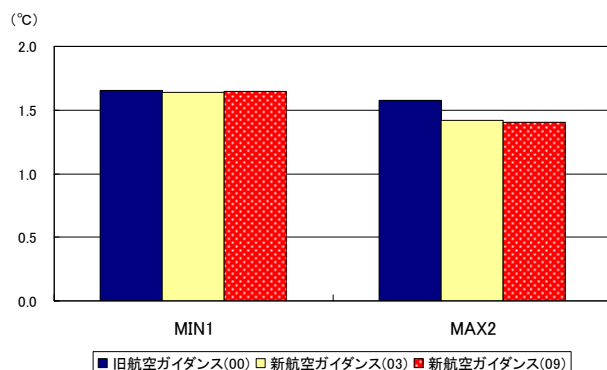


図3.3.4 最高・最低気温ガイダンスのRMSE。凡例の括弧の数字はガイダンスの初期時刻(UTC)を表す。

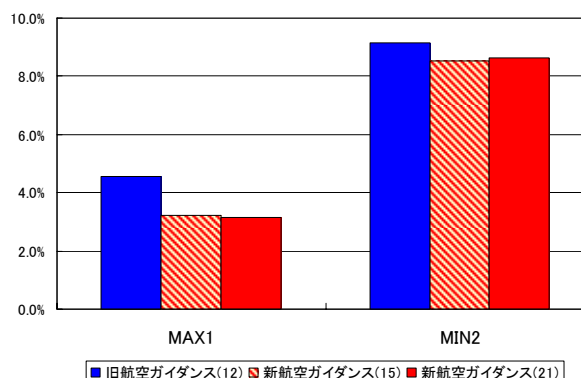
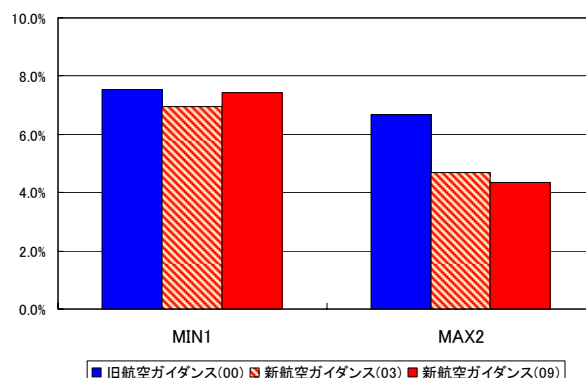


図3.3.5 最高・最低気温ガイダンスの3℃はずれ率。凡例の括弧の数字はガイダンスの初期時刻(UTC)を表す。

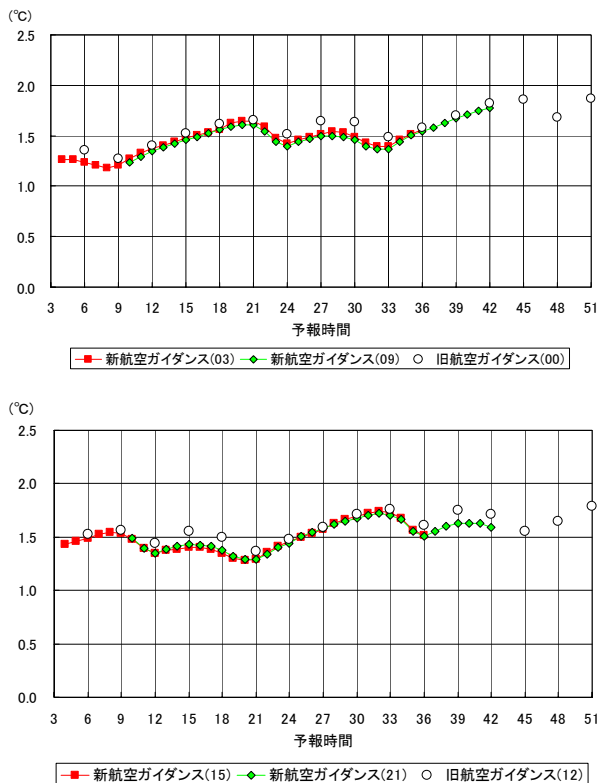


図3.3.6 時系列気温のRMSE。凡例の括弧はガイダ
ンスの初期時刻を表す。上図は00UTCを基準とし
た予報時間、下図は12UTCを基準とした予報時間
を横軸としている。

(2) 仕様と作成手法

表3.3.1に新航空ガイダ
ンスの仕様を示す。作成手
法は利用モデルがRSMからMSMに変更になること
以外は旧航空ガイダ
ンス²からの変更はない。最高気
温・最低気温の観測値はMETAR,METAR AUTO,
SPECI,SCAN報から算出された値を使用している。
予報回数は、最高・最低気温は1日2回から1日4回に、
時系列気温は1日2回から1日8回にそれぞれ増加し
ている。表3.3.3に初期時刻と予測要素（最高・最低
気温）を示す。03UTCと09UTC、15UTCと21UTC
初期値のガイダ
ンスが、それぞれ同じ要素を予測す
る。時系列気温の予測時間間隔は3時間間隔から1時
時間間隔に変更となっている。1時間間隔となること
で、離陸用飛行場予報(TAKE-OFF FCST)に対応し
たガイダ
ンスとなるので活用していただきたい。

(3) 予測精度

2006年7月の空港の気温観測値及びMSMの予報
値を用いて予測式の係数を最適化し、2006年8月か
ら旧航空ガイダ
ンスの運用が終了する2007年5月ま
でについて予測精度を検証した。MSMは33時間予

報に延長されたMSMと同じ設定による予報値を使用している。新航空ガイダ
ンスと旧航空ガイダ
ンスとのRMSEの比較を図3.3.4に示す。03,09UTC初期
値の新航空ガイダ
ンスは、00UTC初期値の旧航空ガ
イダ
ンスと利用時間が重なることから、03,09UTC
初期値の新航空ガイダ
ンスと00UTC初期値の旧航空
ガイダ
ンスを比較した。同様に、15,21UTC初期
値の新航空ガイダ
ンスと12UTC初期値の旧航空ガ
イダ
ンスを比較している。最高気温はどの初期値の
ガイダ
ンスも新航空ガイダ
ンスが0.1℃以上よくな
っている。最低気温はどの初期値のガイダ
ンスもほ
ぼ旧航空ガイダ
ンスと同じ精度となっている。平均
誤差は新航空ガイダ
ンス、旧航空ガイダ
ンスともに
ほぼ0となっている（図略）。図3.3.5に最高・最低気
温の3℃はずし率の比較を示す。最高気温はどの初
期値のガイダ
ンスも新航空ガイダ
ンスが旧航空ガイ
ダ
ンスより大幅に精度がよくなっており、改善率は
30%前後となっている。最低気温は09UTC初期値で
は旧航空ガイダ
ンスとほぼ同じ精度であるが、その
他の初期値では新航空ガイダ
ンスの方が精度がよくな
っている。

図3.3.6に時系列気温のRMSEを示す。ここでは、
予報時間33時間の03,09,15,21UTC初期値のガイ
ダ
ンスのみ旧航空ガイダ
ンスと比較した。03,09UTC
初期値の新航空ガイダ
ンスは、00UTC初期値の旧航
空ガイダ
ンスと比べて予報時間06～09,24～
33,15,21UTC初期値の新航空ガイダ
ンスは、12UTC
初期値の旧航空ガイダ
ンスと比べて予報時間12～
21,36～42の精度がそれぞれよくなっている。これ
らの時間はいずれも09～18JSTにあたり、日中の精
度がよくなっていることがわかる。平均誤差は新航
空ガイダ
ンス、旧航空ガイダ
ンスともにすべての予
報時間でほぼ0となっている（図略）。

(4) まとめと考察

新航空ガイダ
ンスと旧航空ガイダ
ンスとの精度検
証結果の比較は以下になった。

- ・ 最高気温の精度は新航空ガイダ
ンスの方がよい。
- ・ 最低気温の精度はほぼ同等である。
- ・ 時系列気温の精度は、日中は新航空ガイダ
ンス
の方がよく、その他の時間はほぼ同等である。

MSMはRSMより地上気温の予報精度がよく、特
に夜間のバイアスを大きく改善している（瀬川
2006）。最高気温や日中の時系列気温の精度の向上
は、MSMの予報精度の向上の結果を反映したもの
と思われる。最低気温や夜間の時系列気温は旧航空
ガイダ
ンスとほぼ同等の精度であったが、これは
RSMのバイアスを旧航空ガイダ
ンスにおいても十
分な精度まで補正していたためと思われる。

² 旧航空ガイダ
ンスの詳細については、新美(2005)を参照
していただきたい。

以上の結果は、RSMを境界値としたMSMによる検証である。20kmGSMを境界値としたMSMによるガイダンスについては、2004年8月と2006年1月を対象に実験・検証し、RSMを境界値としたMSMによるガイダンスとほぼ同等の精度であることを確認している。

3.3.3 MSM気温ガイダンス

(1) はじめに

2007年5月にMSMの予報時間が33時間に延長されたことにより、MSMでも最高気温・最低気温のガイダンスを作成することが可能となった。気温は地形の影響を受けやすく、地形表現が精細なMSMを利用することで気温ガイダンスの精度向上が期待できる。また、予報回数は最高・最低気温が1日4回、時系列気温が1日8回あり、新GSMガイダンスと合わせるとひとつの予測要素に対して複数のガイダンスが得られるようになる。これらのガイダンスをアンサンブル的に用いて利用するなど、ガイダンスの応用範囲を広げることが可能となる。本項ではMSMを元にした最高気温・最低気温・時系列気温の各ガイダンス（MSMガイダンス）の精度検証結果を解説する。

(2) 仕様と作成手法

表3.3.1にMSMガイダンスの仕様を示す。作成手法は新GSMガイダンスと同じ手法を用いる。最高・最低気温の観測値はアメダス10分値から算出された値を使用している。表3.3.3に初期時刻と予測要素（最高・最低気温）を示す。03UTCと09UTC、15UTCと21UTC初期値のガイダンスが、それぞれ同じ要素を予測する。時系列気温は1時間毎の気温を予測する。

(3) 予測精度

2006年7月のアメダスの気温観測値及びMSMの予報値を用いて予測式の係数を最適化し、2006年8月から2007年6月までについて予測精度を検証した。MSMは2007年5月15日までは33時間予報に延長されたMSMと同じ設定による予報値、2007年5月16日以降は現業化されたMSMの予報値を使用している。MSMガイダンスとRSMガイダンスのRMSEの比較を図3.3.7に示す。03,09UTC初期値のMSMガイダンスは、00UTC初期値のRSMガイダンスと利用時間が重なることから、03,09UTC初期値のMSMガイダンスと00UTC初期値のRSMガイダンスを比較した。同様に、15,21UTC初期値のMSMガイダンスと12UTC初期値のRSMガイダンスを比較している。最高気温、最低気温ともにどの初期時刻でも、MSM

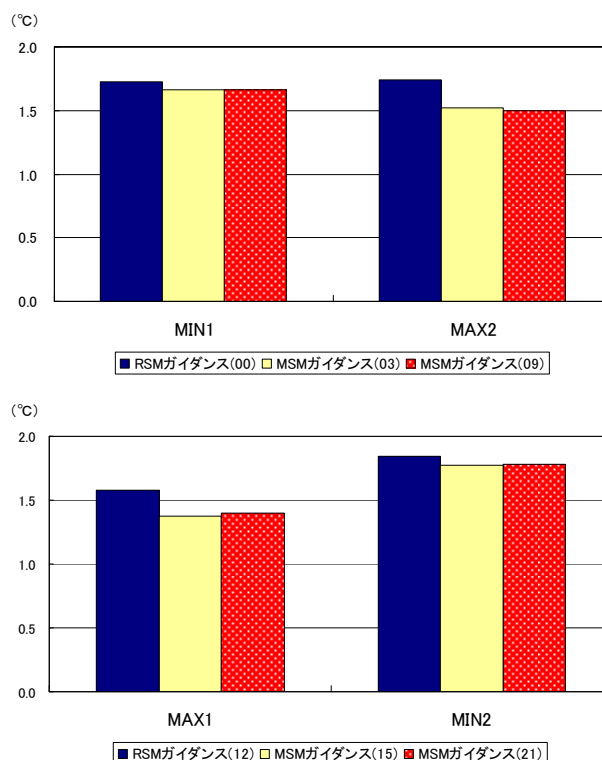


図3.3.7 最高・最低気温ガイダンスのRMSE。凡例の括弧の数字はガイダンスの初期時刻(UTC)を表す。

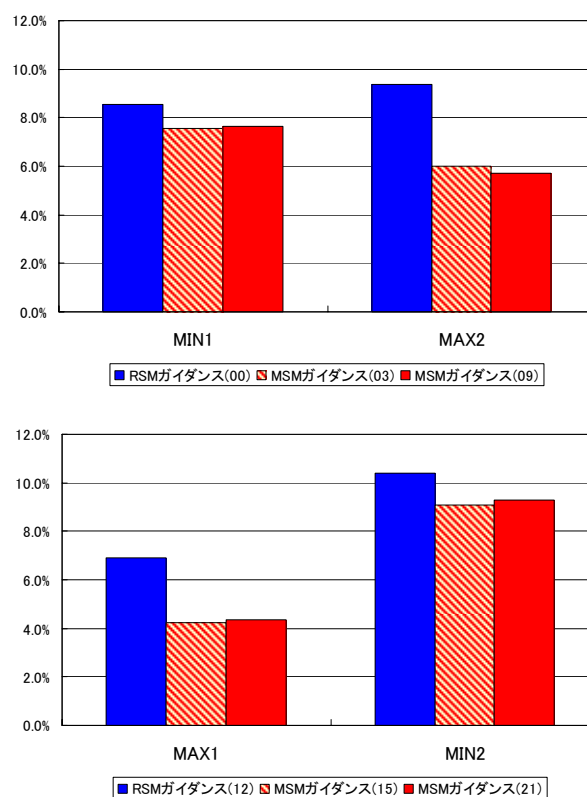


図3.3.8 最高・最低気温ガイダンスの3°Cはずれ率。凡例の括弧の数字はガイダンスの初期時刻(UTC)を表す。

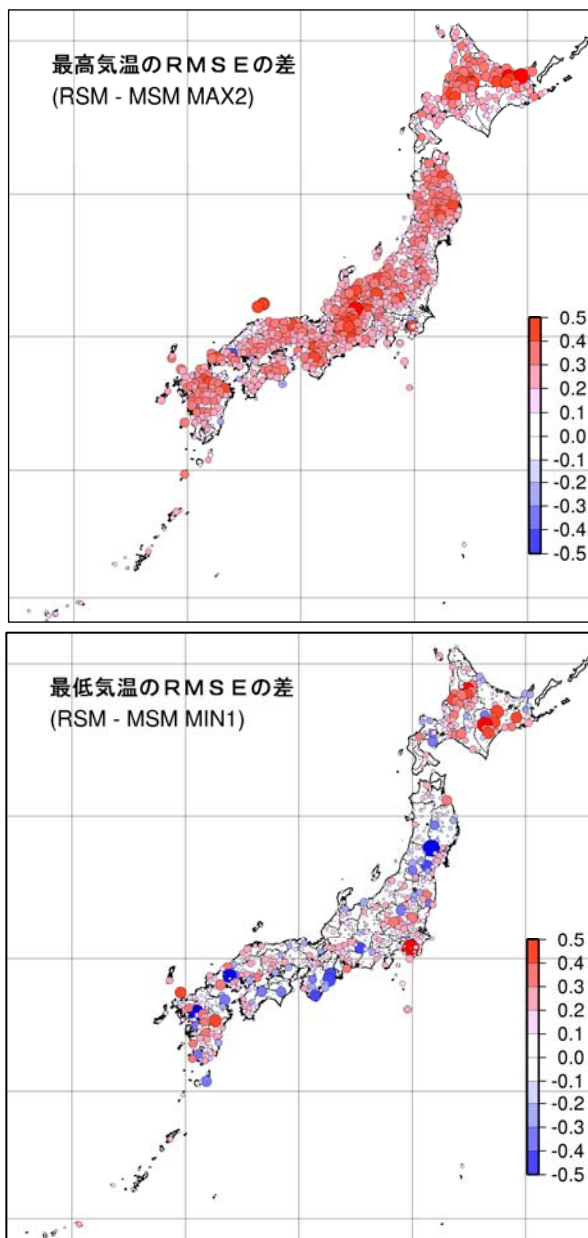


図3.3.9 最高・最低気温のRSMガイダンスとMSMガイダンスのRMSEの差の地点分布。どちらも00UTC初期値のRSMガイダンスと03UTC初期値のMSMガイダンスを比較している。赤色の地点はMSMガイダンスの方がRMSEが小さい地点。差が大きい地点ほど大きいマークでプロットしている。

ガイダンスの方が精度がよい。特に最高気温は0.15～0.2℃ほど小さくなり、大幅によくなっている。平均誤差はMSMガイダンス、RSMガイダンスともにほぼ0となっている（図略）。図3.3.8には3℃はずし率の比較を示す。最高気温はどの初期時刻でもMSMガイダンスがRSMガイダンスより大幅に精度がよくなっており、改善率は35%を超えている。最低気温も全ての初期時刻でMSMガイダンスの方が精度がよく、改善率は10%以上となっている。図3.3.9は、03UTC初期値のMSMガイダンスと00UTC

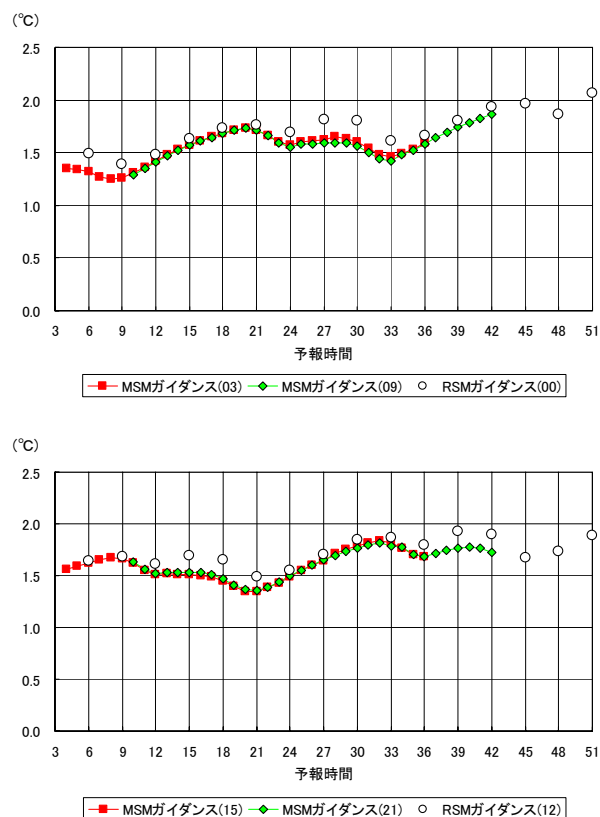


図 3.3.10 時系列気温の RMSE。凡例の括弧の数字はガイダンスの初期時刻を表す。

初期値のRSMガイダンスの各アメダス地点のRMSEの差である。最高気温はほとんどの地点でMSMガイダンスの方が精度がよくなっている。特に中部地方、東北地方、北海道地方の内陸部で大幅によくなっている。最低気温は北海道地方、関東地方、九州地方の内陸部でMSMガイダンスの方が大幅に精度がよくなった地点があるが、全国的に海岸に近い地域では精度が悪くなっている地点が多い傾向がある。

図3.3.10に時系列気温のRMSEを示す。ここでは、予報時間33時間の03,09,15,21UTC初期値のMSMガイダンスのみRSMガイダンスと比較した。03,09UTC初期値のMSMガイダンスは、00UTC初期値のRSMガイダンスと比べて予報時間06～09,24～33,15,21UTC初期値のMSMガイダンスは、12UTC初期値のRSMガイダンスと比べて予報時間12～21,36～42の精度がそれぞれよくなっている。これらの時間はいずれも09～18JSTにあたり、日中の気温予想の精度がよくなっていることがわかる。平均誤差はMSMガイダンス、RSMガイダンスともにすべての予報時間でほぼ0となっている（図略）。

(4) まとめと考察

MSMガイダンスとRSMガイダンスとの精度検証結果の比較は、以下ようになった。

- ・ 最高気温の精度はMSMガイダンスが大幅によい。
- ・ 最低気温の精度はMSMガイダンスがよい。
- ・ 時系列気温の精度は、日中はMSMガイダンスがよく、その他の時間はほぼ同等の精度である。

これらの結果は新航空ガイダンスと同様、MSMの地上気温の予報精度が改善していることによると思われる。特に最高気温の精度がよくなっていることが目立つ。地域的な特徴を見ると、図3.3.9が示すように、RSMガイダンスでは精度が悪かった内陸部の地点で大幅に精度がよくなっている。RSMでは内陸部にはモデルと観測点の標高差が大きい地点が多く、これらの地点は、モデルの地上気温予報値のランダム誤差が大きくなっていた。MSMでは物理過程の改良（荒波・原 2006）によって地上気温のランダム誤差が小さくなったが、内陸部では地形表現が精細となった効果が加わり、他の地域に比べてより大きく精度が向上している。内陸部でMSMガイダンスがRSMガイダンスより大幅に精度がよくなっているのは、このことを反映した結果と言える。海岸に近い地域では、最低気温の精度が悪くなった地点が見られた。気温ガイダンスでは、モデルの地上気温予報値はアメダス地点を囲む4つの格子点の値を線形内挿して求めている。最低気温の精度が悪くなった地点を調べてみると、20km格子のRSMでは内挿する格子点に陸地の格子点が含まれていたが、5km格子のMSMでは海上の格子点のみとなっている地点が多くあった。内挿する格子点の海陸の違いが、最低気温の精度が悪くなった原因のひとつと考えられる。今後、モデルの予報値の内挿方法の改良を検討するが、当面は新GSMガイダンスと精度の比較をして、より精度のよいガイダンスを利用していきたい。

以上の結果は、RSMを境界値としたMSMによる検証である。20kmGSMを境界値としたMSMによるガイダンスについては、2004年8月と2006年1月を対象に実験・検証し、RSMを境界値としたMSMによるガイダンスとほぼ同等の精度であることを確認している。

参考文献

- 荒波恒平，原旅人，2006：メソ数値予報モデルの改良と予報時間延長．平成18年度数値予報研修テキスト，気象庁予報部，55-58.
- 瀬川知則，2006：地上気象要素の検証．平成18年度数値予報研修テキスト，気象庁予報部，73-77.

新美和造，2005：航空気温ガイダンス．平成17年度数値予報研修テキスト，気象庁予報部，60-62.

3.4 風ガイダンス¹

3.4.1 はじめに

2007年5月16日に03,09,15,21UTC初期値のメソ数値予報モデル(MSM)の予報時間が33時間に延長され、また同年11月21日に高解像度全球モデル(以下、20kmGSM)が現業化されたことに伴い、風ガイダンスに変更を施したので、以下の通り報告する。

まず、従来の研修テキストでは、「風ガイダンス」という用語を「風に関するガイダンス全般」という広義でも、「定時の10分間平均の風向・風速を予測するガイダンス」という狭義でも用いていたが、本稿ではその曖昧さを廃するため、後者を定時風ガイダンスと呼ぶこととする。これにより、「定時から見た前N時間内の最大風速及びその風向を予測するガイダンス」を最大風速ガイダンスと呼んでいることとの整合もとれる。また、領域モデルをRSM、旧全球モデルを60kmGSMと呼ぶ。

従来の風ガイダンスには、一般予報(天気予報、防災情報)用にRSM定時風ガイダンス、RSM最大風速ガイダンス、60kmGSM定時風ガイダンス及びMSM最大風速ガイダンスの4種類、また飛行場予報用にRSM定時風ガイダンス、MSM最大風速ガイダンスの2種類の、合計6種類があった。

このうち、飛行場予報用の定時風ガイダンスで利用する数値予報モデルをRSMからMSMに変更し、予報時間(以下FT)間隔も3時間から1時間に変更した。これにより、飛行場予報用の風ガイダンスがMSMで統一され、一貫性の高い予測が出来るようになった。また、一般予報用の定時風ガイダンスは20kmGSMに一本化し(これにより風ガイダンスは1種類減って5種類となった)、RSM最大風速ガイダンスは20kmGSMで置き換えた。表3.4.1に、上記仕様変更後の風ガイダンスについて概要を示す。

表3.4.1 上記仕様変更後の風ガイダンスの概要

表中、MSMの「00UTC系」とは00,06,12,18UTC初期値を意味する。なお、表に示すFTには、作成しているがアメダスには配信していない時間も含んでいる。

対象	モデル	種類	初期値	FT
飛行場	MSM	前1時間 最大風速	1日8回 (00,03,06, 09,12,15, 18,21UTC)	01~33 ただし、 00UTC 系は 01~15
		1時間毎 定時風		
アメダス	20km GSM	前3時間 最大風速	1日4回 (00,06,12, 18UTC)	03~84
		3時間毎 定時風		
		前3時間 最大風速		

¹ 井手 和彦

3.4.2 作成手法

新しい風ガイダンスの作成手法は、RSM定時風ガイダンス(木村 1998)、RSM最大風速ガイダンス(松本 2003)、MSM最大風速ガイダンス(新美 2005a)、及びTAF-S最大風速ガイダンス(新美 2005b)と同様で、大きな変更点はない。作成手法の詳細については、木村(1998)や国次(1997)を参照していただきたい。20kmGSMでは1時間毎、MSMでは30分毎の地上予測値が得られるが、風ガイダンスではそれらのうち予報対象地点から見た最近接のGPV(格子点値)を説明変数に利用する。また、風ガイダンスのカルマンフィルター及び頻度バイアス補正の係数を更新する際に目的変数として用いる観測値は、対象時刻に通報されたアメダス10分値または飛行場実況通報である。

定時風ガイダンスと最大風速ガイダンスは各々独立に計算されるため、定時風ガイダンスの風速が、同一の数値予報モデルを用いた最大風速ガイダンスの風速を超えることがあった。これはガイダンスの定義として不自然なので、その場合には最大風速ガイダンスの値を定時風ガイダンスに揃える整合処理を追加した。これにより、最大風速ガイダンスの統計スコアが僅かながら改善することを確認している。

3.4.3 新しい風ガイダンスの予測特性と精度

(1) 20kmGSM 定時風・最大風速ガイダンス

2004年8~9月(以下、夏実験)及び2005年12月~2006年1月(以下、冬実験)について実行された20kmGSM実験の1日4回の地上予測値から、3時間毎の定時風ガイダンス、及び前3時間最大風速ガイダンスを作成し、当時のRSM定時風ガイダンス、60kmGSM定時風ガイダンス及びRSM最大風速ガイダンスと比較した。ただし、それぞれの実験期間の前半1か月は係数の最適化に用い、後半1か月だけを検証対象とした。ここで、特に断らない限り、各統計スコアは全アメダス観測点で平均し、またRSMとの比較時にはFT=06~51の期間で平均、60kmGSMとの比較時にはFT=54~72の期間で平均している。なお、時系列予報やカテゴリ予報に利用する際には、風速の平方根平均二乗誤差(RMSE)や風向の適中率の精度が重要である。一方、注意報・警報等の防災情報に利用する際には、風速のバイアスコアやスレトスコアの精度が重要である。

まず、日変化が表現できているかを確認するため、図3.4.1に、モデルGPVと定時風ガイダンスの平均風速の時刻別月平均値(2004年9月)を示す。予測値と観測値の差が平均誤差(ME)に相当する。モデルGPV同士を比較すると、RSMに比べ20kmGSMは全ての時刻でMEを約0.5m/s改善し精度が向上しているが、夜間には正バイアスがある。ガイダンスでは

RSM、60kmGSMとも夜間の正バイアスが軽減されているが、完全には除去できていない。なお定時風ガイダンスでは、冬実験においても夏実験と同様に夜間の正バイアスが見られた（図は省略）。この正バイアスを詳しく調査したところ、主に風速2m/s程度の弱風時に起きていた（弱風は、強風に比べて発生頻度がずっと高いので、弱風時の特徴は統計スコアへの寄与が大きい）。なお、後述するバイアススコアのように、統計スコアに風速の閾値を設定すれば、この影響を排除した評価が可能である。一方、同様の条件で最大風速ガイダンスの時刻別月平均値を求めて観測値と比較したところ、夏実験・冬実験ともに全時刻でバイアスは殆どなく、日変化を正確に表現していた（図は省略）。

次に、風速の時刻別のRMSEについて述べる。夏実験では、定時風・最大風速両ガイダンスとも、20kmGSMとRSMとでほぼ同等の結果であった。一方、冬実験では、全体的に僅かながら20kmGSMの両ガイダンスの方が、RSMのそれよりも成績が良かった。このうち、定時風ガイダンスの冬実験における時刻別のRMSEを図3.4.2に折れ線グラフで示す。（参考のため、MEも棒グラフで示す。）

続いて風速のバイアススコアであるが、閾値が大きくなるにつれ、20kmGSMのスコアが1より小さくなっていく。この傾向は定時風ガイダンス・最大風速ガイダンスとも同じであり、また夏実験・冬実験とも同じであった。図3.4.3に最大風速ガイダンスのバイアススコア（夏実験）を、図3.4.4に同（冬実験）を示す。ただし、バイアススコアは棒グラフ、後述するスレトスコアは折れ線グラフとした。スレトスコアについては、夏実験では定時風・最大風速の双方とも、20kmGSMはRSMと比べてモデルGPVでは優れていたが、ガイダンスではやや劣っていた。つまり、20kmGSMガイダンスの係数は十分に最適化されておらず、特に台風による強風時の誤差が大きかったと考えられる。一方冬実験では、RSMと同等かやや上回る成績が得られた。ここで図3.4.4から、冬実験の強風時には、バイアススコアではRSMが大きい、スレトスコアでは20kmGSMが大きいことが分かる。これは、冬実験においては、20kmGSMガイダンスはRSMガイダンスに比べて強風予報の空振りが少ないことを意味する。20kmGSMの係数の最適化が進めば、この特徴は維持しつつ統計スコアが向上すると期待される。

風向の適中率は、アメダス観測値に合わせ、16方位で検証した（つまり、予測値が観測値に対して±11.25度以内の場合を適中とした）。その結果、定時風・最大風速の両ガイダンスとも、夏・冬の両実験において、20kmGSMはRSMと同等の精度であった（図は省略）。

最後に、新旧のGSM定時風ガイダンスの比較結果について述べる。20kmGSMガイダンスは、風向の適中率では60kmGSMガイダンスと同等であったが、図3.4.5に示すように、風速のバイアススコアとスレトスコアで精度がやや悪かった。これは係数の最適化不足だけでなく、以下のことに起因していると思われる。図3.4.6（冬実験における、00UTC初期値の定時風速の、FTごとの月平均値）から分かるように、20kmGSMのGPV地上風速には、周期的でないFT依存成分がある。具体的には、日中の時間帯に見られる正バイアスが、予報時間が進むにつれて解消されていく。しかし一般予報用定時風ガイダンスは、日変化を念頭に1日を予報対象時刻ごとに8層に層別化しているものの、予報時間FTでは層別化していない。このため20kmGSMガイダンスでは、例えばFT=06で学習した統計的関係をFT=30やFT=54にも適用してガイダンスを計算するため、予報期間後半の風速を下げすぎている。一方60kmGSMでは、例えばFT=54で学習した統計的関係を用いてFT=54のガイダンスを計算していたので（FT=51までは別途RSMガイダンスがあった）、統計誤差は正しく除去された。言い換えると、RSM・60kmGSMではFT=51を境に係数が層別化されていたと見做せるが、20kmGSMに統一した際にその層別化が無くなり、FT=54以降の精度が低下したということである。今後、改善策を検討したい。

なお、2004年9月について旬ごとにRMSEを計算したところ、モデルGPV・ガイダンスとも、上旬と下旬では20kmGSMは60kmGSMより精度が悪く、逆に中旬では60kmGSMより精度が良かった（図は省略）。この旬ごとの違いは、上旬に台風第18号、下旬に台風第21号が日本へ接近・上陸したことと関係している。つまり第1.3.4節で示されているように、20kmGSMの台風進路予報精度が60kmGSMに及ばないことが、精度低下の一因と考えられる。

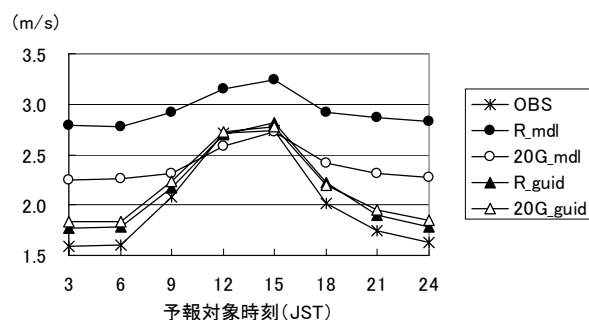


図3.4.1 3時間毎の定時風ガイダンスの、時刻別の月平均値（2004年9月）。予測値と観測値の差がMEに相当。凡例のOBSはアメダス観測値、20Gは20kmGSM、RはRSM、mdlはモデルGPV、guidはガイダンス値の意。

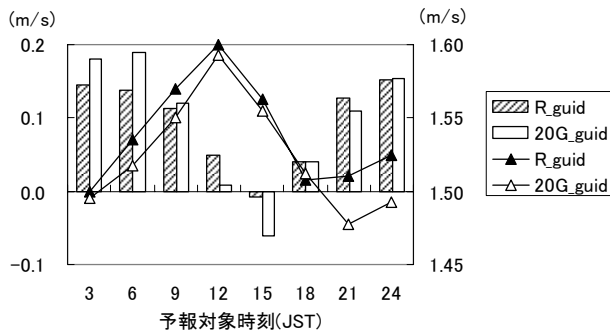


図3.4.2 3時間毎の定時風ガイダンスの、時刻別の風速のME（棒グラフ、軸は左端）とRMSE（折れ線グラフ、軸は右端）の月平均値（2006年1月）。凡例は図3.4.1と同じ。

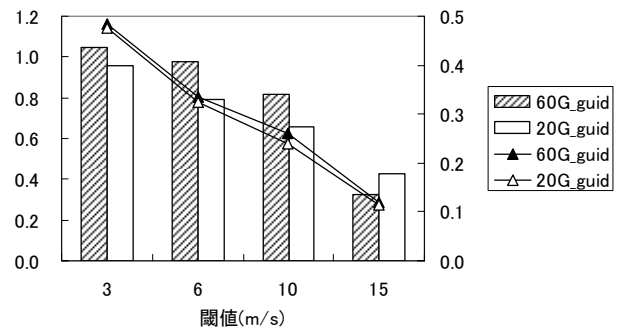


図3.4.5 3時間毎の定時風ガイダンスの、閾値別の風速のバイアススコア（棒グラフ、軸は左端）とスレットスコア（折れ線グラフ、軸は右端）の2か月平均値（2004年9月及び2006年1月）。凡例は図3.4.1と同様だが、60Gは60kmGSM。

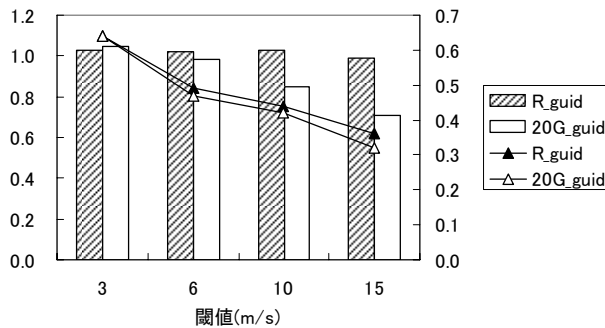


図3.4.3 前3時間最大風速ガイダンスの、閾値別の風速のバイアススコア（棒グラフ、軸は左端）とスレットスコア（折れ線グラフ、軸は右端）の月平均値（2004年9月）。凡例は図3.4.1と同じ。

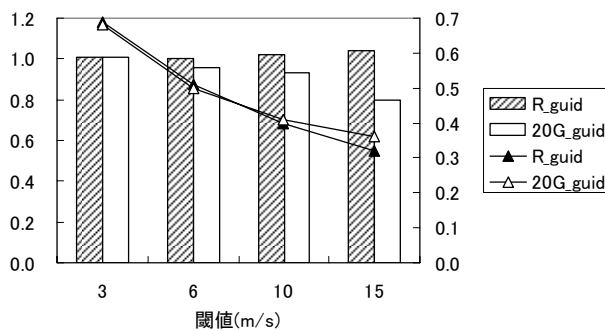


図3.4.4 前3時間最大風速ガイダンスの、閾値別の風速のバイアススコア（棒グラフ、軸は左端）とスレットスコア（折れ線グラフ、軸は右端）の月平均値（2006年1月）。凡例は図3.4.1と同じ。

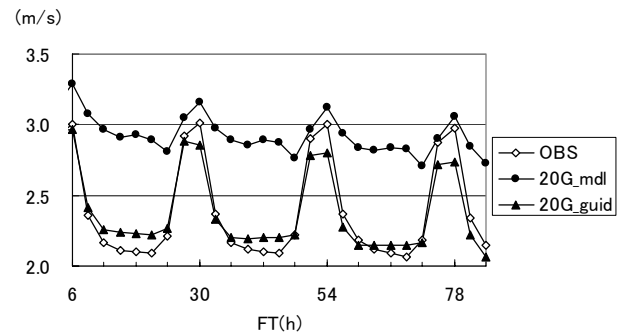


図3.4.6 20kmGSMの00UTC初期値の定時風速予報値（モデルGPV、ガイダンス）を、FT毎に観測値と比較（2006年1月で月平均）。横軸の目盛りは、ガイダンスの負バイアスが1日の中で最大となる時刻(06UTC)に対応。凡例は図3.4.1と同じ。

(2) 一般予報用MSM最大風速ガイダンス

2007年5月から8月の4か月間における、並行運用²期間及び現業の33時間MSM最大風速ガイダンス（03,09,15,21UTC初期値）を、現業のRSM最大風速ガイダンスと比較し、MSMの予報時間延長の効果を調べた。なお、モデル実験の地上予報値を用いた係数の学習期間は、2006年12月から2007年4月までである。風ガイダンスは係数の最適化に非常に時間がかかるため、このように長期の学習期間を設定した。（実際、2007年1月から継続して検証を行って見たが、当初はモデルGPVではRSMより精度が高いのにガイダンスではRSMとあまり精度が変わらず、係数の学習不足が明瞭であった。）また、特に断らない限り、各統計スコアは全アメダス観測点で平均し、また両ガイダンスの予報の初期時刻の差を考慮し、

² 並行運用とは、新しい数値予報モデル及びガイダンスを、現業化に先立ち、現業のモデルやガイダンスと並行して部内向けに運用することである。（33時間MSMについては、2007年4月16日から5月15日まで。）

MSMはFT=03~33、RSMはFT=06~36で平均する。

まず、図3.4.7に、最大風速ガイダンスのMEとRMSEの時刻別平均値を示す。ただし、MEを棒グラフ、RMSEを折れ線グラフとした。MEを見ると、MSMガイダンスは18及び21JSTを除く全時刻で、RSMガイダンスよりもバイアスが小さい。またRMSEについても、MSMガイダンスはRSMガイダンスと比べて日中の成績が良く、最大で約0.1m/sの差がある。

更に、風速のバイアスコア及びスレツスコア（図3.4.8）、風向の適中率（20kmGSMと同様に16方位で検証、図3.4.9）を見ても、MSMガイダンスは全ての閾値でRSMガイダンスと比べて同等以上の成績となっている。

なお、以上のようなガイダンスの精度向上は、モデルの精度が向上していることに起因すると思われる。図は省略するが、MSMはRSMに比べ風速の日変化がより実況に近くなっており、例えば、RSMに見られた夜間の正バイアスがMSMには殆どない。

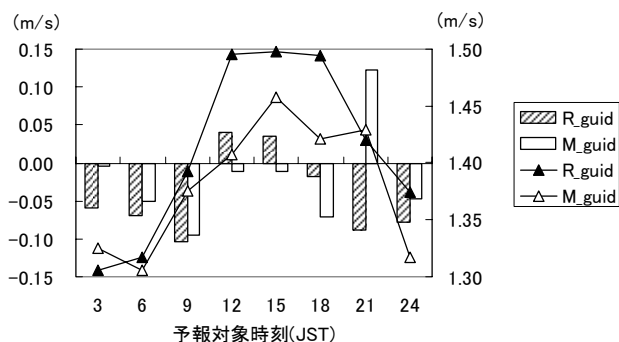


図3.4.7 前3時間内最大風速ガイダンスの、時刻別の風速のME（棒グラフ、軸は左端）とRMSE（折れ線グラフ、軸は右端）の4か月平均値（2007年5月～8月）。凡例は図3.4.1と同様で、MはMSMの意。

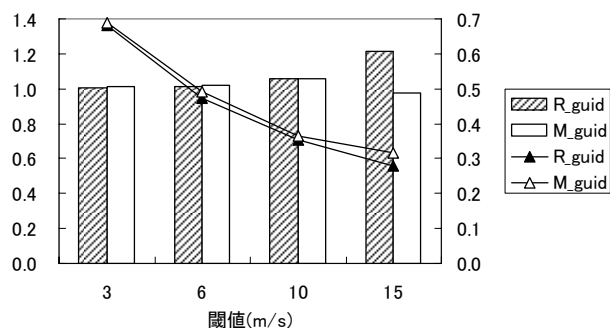


図3.4.8 前3時間内最大風速ガイダンスの、閾値別のバイアスコア（棒グラフ、軸は左端）とスレツスコア（折れ線グラフ、軸は右端）の4か月平均値（2007年5月～8月）。凡例は図3.4.7と同じ。

最後に、初期値毎の精度について述べる。33時間MSMガイダンスは1日4回、6時間毎に計算されるので、例えば03UTC初期値のFT=Nの予報値と、09UTC初期値のFT=(N-6)の予報値のように、予報対象時刻を合わせてRMSEを比較した（ $9 \leq N \leq 33$ ）。その結果、03UTC初期値と15UTC初期値では、前初期値と比較して、予報期間後半でも精度がかなり良くなっていた。一方、09UTC初期値と21UTC初期値では、前初期値と殆ど同じ精度であった。この初期値毎の違いは、側面境界値として用いているRSMに起因すると考えられる。つまり、RSMは00UTCと12UTCの1日2初期値なので、その前後でMSMの精度が変わるのである。図3.4.10に、09UTC初期値のMSM最大風速ガイダンスのFT=09~33、及び15UTC初期値のMSM最大風速ガイダンスのFT=03~27について、RMSEを示す。また、比較対象として、12UTC初期値のRSM最大風速ガイダンスのFT=06~30のRMSEも示す。

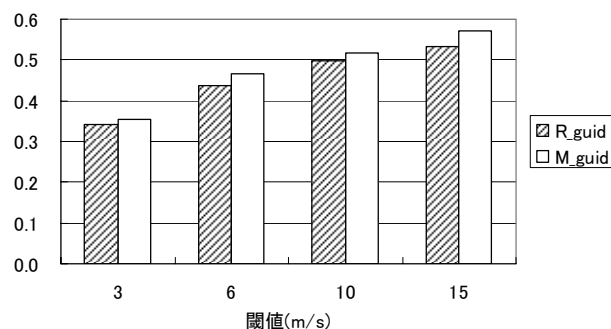


図3.4.9 前3時間内最大風速ガイダンスの、閾値別の風向適中率の4か月平均値（2007年5月～8月）。凡例は図3.4.7と同じ。

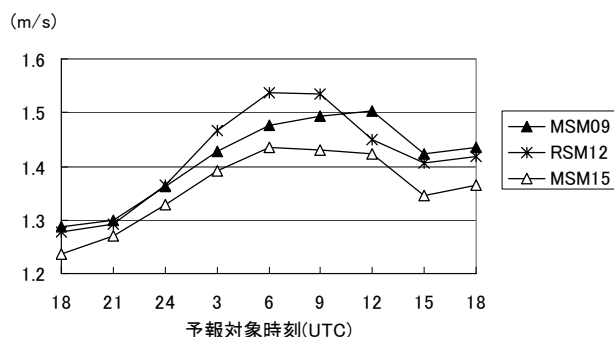


図3.4.10 前3時間内最大風速ガイダンスの、初期値別の風速のRMSEの4か月平均値。凡例はモデル名+初期値(UTC)の意。

(3) 飛行場予報用ガイダンス

第3.4.1項でも述べた通り、定時風ガイダンスに利用する数値予報モデルをRSMからMSMへ、また予報時間間隔も3時間から1時間へ、それぞれ変更した。一方最大風速ガイダンスについては、モデルの変更はないが、予報時間を33時間に延長した。以下、これらの新しいガイダンスの精度について述べる。なお、検証期間は2007年5月から8月の4か月間とし、5月15日までは並行運用期間の結果を用いた。また、新しい定時風ガイダンスとの精度比較に用いる旧TAF-Lガイダンス（飛行場予報用の3時間毎のRSM定時風ガイダンス）を、5月16日以降8月末まで現業とは別に作成した。

統計スコアについては、飛行場実況気象通報に合わせ、風速をノット(kt)単位で記述する。その平均方法については、飛行場予報用ガイダンスの対象となる全空港（76空港）で平均し、また、予報の初期時刻の差を考慮してMSMではFT=03~33、RSMではFT=06~36で平均する。風向は、飛行場実況気象通報に合わせ36方位で検証するが、適中率の計算にあたり、±10度の誤差は許容範囲とする。

まず、定時風ガイダンスのME（図3.4.11）を見ると、MSMはRSMに比べ僅かではあるが夜間の正バイアスが大きくなっている。空港は離発着の都合上平坦な地形となっており、周囲よりも粗度が小さく、風速の観測値が一般アメダス地点に比べて大きい。このため、図は省略するが、夜間のモデルGPVの風速ではRSMの方が実況に近く、MSMには負バイアスがある。その結果、MSMではガイダンスによるバイアス補正量が大きくなり、MEに影響していると考えられる。ただしRMSE（図3.4.11）では、03JSTを除く全時刻でMSMガイダンスの方がRSMガイダンスより成績が良く、ランダム誤差が減っていることが分かる。

同じく定時風ガイダンスについて、バイアスコア（図3.4.12）ではRSMとMSMはほぼ同等、スレットスコア（同）及び風向の適中率（図3.4.13）では、MSMガイダンスの成績はRSMガイダンスを全閾値で上回った。

次に最大風速ガイダンスであるが、これは従来「TAF-Sガイダンス」として15時間先まで予報していたものを、MSMの予報時間延長に合わせて1日4初期値を33時間まで延長したものであり、検証時に比較対象にできる他のガイダンスが存在しない。そこで2007年の5月から8月の4か月間について、統計スコアを定時風ガイダンスと比較した。その結果、図は省略するが、全ての統計スコアで定時風ガイダンスとほぼ同等の成績が得られた。なお、第3.4.2項で前述した整合処理はこの検証には用いていない。

また、定時風・最大風速の両ガイダンスとも、一

般予報用のMSM最大風速ガイダンスと同様に、03UTC初期値と15UTC初期値では、前初期値と比較して、予報期間後半で精度が大きく向上していた。一方、09UTC初期値と21UTC初期値では、予報期間前半で前初期値と比べ僅かに精度が向上した程度で、予報期間後半は前初期値と殆ど同じ精度であった（図は省略）。

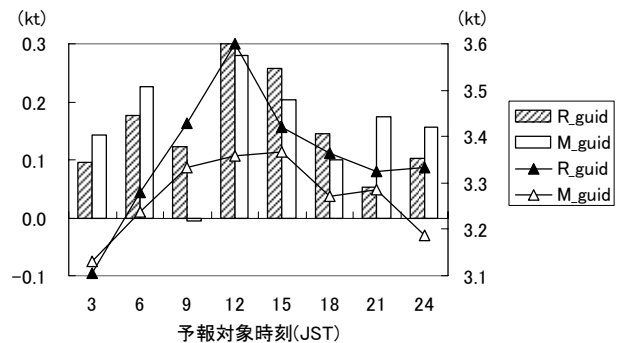


図3.4.11 TAF定時風ガイダンスの、時刻別の風速のME（棒グラフ、軸は左端）とRMSE（折れ線グラフ、軸は右端）の4か月平均値（2007年5月～8月）。凡例は図3.4.7と同じ。

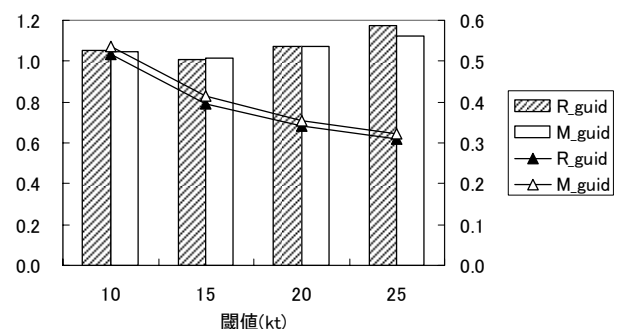


図3.4.12 TAF定時風ガイダンスの、閾値別のバイアスコア（棒グラフ、軸は左端）とスレットスコア（折れ線グラフ、軸は右端）の4か月平均値（2007年5月～8月）。凡例は図3.4.7と同じ。

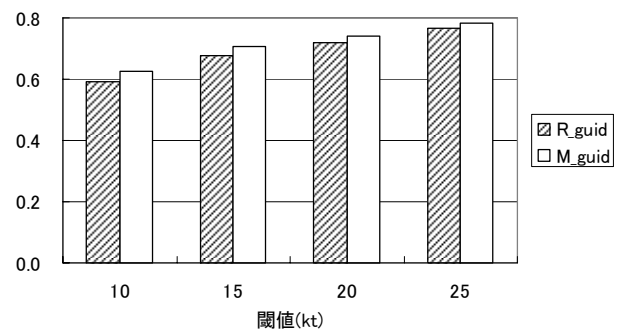


図3.4.13 TAF定時風ガイダンスの、閾値別の風向適中率の4か月平均値（2007年5月～8月）。凡例は図3.4.7と同じ。

(4) MSMの側面境界値が変わることによる影響

2007年11月にMSMの側面境界値がRSMから20kmGSMに変わることを受け、数値予報課では事前の特定期間について、20kmGSMを境界とするMSMとRSMを境界とするMSMの双方の予報実験を行い、モデルやガイダンスの成績を比較した。その結果、風ガイダンスは側面境界値の20kmGSM化により、従来と比べて同等以上の成績が確保された(図は省略)。

(5) 地点別の精度の差について

アメダス地点を対象とした、20kmGSM定時風ガイダンス、同最大風速ガイダンス、MSM最大風速ガイダンスについて、地点別にME及びRMSEを求めた。その結果、図は省略するが、全地点のMEの絶対値が1m/s以下であった。RMSEでは、岬や離島、空港などの値が大きかったが、これは風速が大きくなりやすい地形のためである。RMSEを平均風速で除した無次元量で評価(つまり規格化)すれば、地点ごとの精度の差は大きくない。

3.4.4 まとめ

(1) 20kmGSM定時風・最大風速ガイダンス

定時風・最大風速ガイダンスを20kmGSMから作成するよう変更し、モデルの実験期間で検証した。その結果、係数の最適化が不十分な状況でも、RSMを利用したガイダンスと比べて同等以上の精度を持つことが確認できた。ただしFT=54以降では、図3.4.6に示す予測特性に起因して日中の風速に負バイアスがかかることもあって、60kmGSMを利用したガイダンスに比べて現時点では精度がやや劣っている。また、モデルの台風進路予報精度が60kmGSMより劣るため、台風接近時のFT=54以降については、ガイダンスの精度がより悪くなっている。

(2) 一般予報用MSM最大風速ガイダンス

MSMの予報時間延長に伴い、MSM最大風速ガイダンスも予報時間を延長した。十分な日々実験期間・並行運用期間を経て係数が最適化された後の、2007年5月から8月で検証したところ、RSM最大風速ガイダンスと比べてかなり良い成績が得られた。これはモデルの精度の差に起因するものと考えられる(図は省略したが、モデルGPV自体の統計スコアも、MSMはRSMよりかなり良い成績であった)。

初期値別では、03UTCと15UTCを初期値とするMSM最大風速ガイダンスは、前初期値と比較して、予報期間後半での精度が高い。一方、09UTCと21UTCを初期値とするMSM最大風速ガイダンスは、前初期値からの精度向上は殆どないが、3時間後を初期値とするRSM最大風速ガイダンスとはほぼ同

等の成績が得られた。つまり、同精度のガイダンスを従来よりも早い時間に利用できることになる。

(3) 飛行場予報用ガイダンス

MSMの予報時間延長に伴い、定時風ガイダンスをMSMから作成するよう変更した。また、最大風速ガイダンスの予報時間を延長した。その結果、RSMから作成した定時風ガイダンスとの比較で、精度の改善が確認できた。前述(2)の通り、これはモデル自体の精度の向上に起因するものである。初期値別の精度についても、前述(2)とほぼ同様である。

3.4.5 利用上の留意点

他のガイダンスにも共通することだが、ガイダンスは数値予報モデルの系統的な誤差を補正するものであり、ランダムな誤差を補正することはできない。例えば、モデルの地形と実際の地形の違いによる誤差は系統誤差であり、補正可能である。一方、例えば前線の移動の予想が、実況よりも進んだり遅れたりした場合には補正できない。従って、モデルの予想と実況との間に系統的でない「ずれ」が生じている場合は、その度合いに応じて風ガイダンスの予測値の修正を検討していただきたい。また、20kmGSM定時風ガイダンスの風速については、モデルGPVの特性に起因し、予報期間後半では日中の時間帯に負バイアスがあることにも注意していただきたい。

参考文献

- 木村陽一, 1998: 風ガイダンスの統計的特徴と風速補正. 平成10年度量的予報研修テキスト, 気象庁予報部, 79-84.
- 国次雅司, 1997: 風ガイダンスの開発. 平成9年度量的予報研修テキスト, 気象庁予報部, 39-44.
- 新美和造, 2005a: MSM最大風速ガイダンス. 平成17年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 47-48.
- 新美和造, 2005b: TAF-S最大風速ガイダンス. 平成17年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 59-60.
- 松本逸平, 2003: RSM及びMSM最大風速ガイダンス. 平成15年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 43-46.

3.5 天気ガイダンス¹

3.5.1 天気ガイダンス

天気ガイダンスは、20km格子ごとに天気カテゴリ（晴れ・曇り・雨・雨または雪・雪の5カテゴリ）を予報する。各種ガイダンス及び数値予報モデルの結果を利用し、閾値判別によるフローチャート方式で作成される（図3.5.1参照）。

今回のモデル更新に伴い、利用するモデルをRSM及び60kmGSMから20kmGSMに変更するが、作成手法は変更しない。予報回数は、モデルが1日2回から4回へ変更されるのに伴い、ガイダンスも1日4回へ変更する。

予報時間（以下FTと略す）については、従来のRSMガイダンス（FT=6～51、3時間ごと）と60kmGSMガイダンス（FT=57～75、6時間ごと）を統合し、FT=6～75まで通して3時間ごとに作成する。ただし60kmGSMガイダンスとの対応をとるため、FT=57～75については6時間ごとのガイダンスも作成する。

図3.5.1に示すガイダンスのうち、降水量ガイダンスについては第3.2節で述べた。日照率ガイダンスについて本節で述べる。

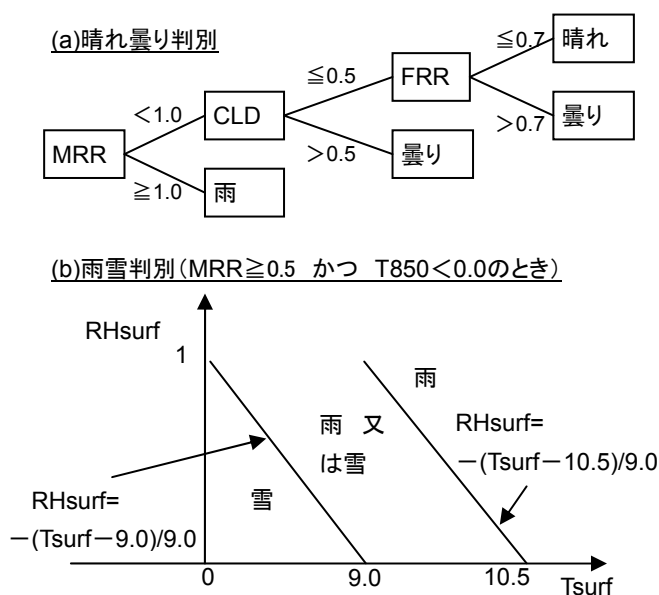


図3.5.1 天気ガイダンスの作成手法

(b)雨雪判別は「MRR≥0.5かつT850<0.0」のときに使用する。それ以外のときは(a)晴れ曇り判別を使用する。略号の意味は以下の通り。

MRR：降水量ガイダンス（mm/3h、6h天気はmm/6h）
 CLD：1－(日照率ガイダンス)（100%を1とする）
 FRR：モデル降水量（mm/3h、6h天気はmm/6h）
 T850：モデル850hPa気温（℃）
 Tsurf：気温ガイダンスで補正したモデル地上気温(℃)
 RHsurf：モデル地上相対湿度(100%を1とする)

3.5.2 日照率ガイダンス

(1) はじめに

日照率ガイダンスはニューラルネットワークを用いた逐次学習型のガイダンスであり、天気ガイダンスの入力データとして晴れ曇り判別に利用されている。現在、その値は配信されていない²。

学習はアメダス地点における日中の日照時間（09～15JST）を用いて地点ごとに行い、その係数を使用して地点ごとのガイダンスを作成する。その後、その値を内挿または外挿して20km格子のガイダンス値を作成する。

(2) 作成手法と変更点

日照率ガイダンスのニューラルネットワークは、従来、入力層（RSMガイダンスで11ユニット、60kmGSMガイダンスで10ユニット）、中間層（5ユニット）、出力層（1ユニット）の3層ネットワークを組んできた。ここで入力因子数の違いは、両ガイダンスの予報時間間隔の違いによっている（表3.5.1参照）。

FTについては天気ガイダンスと同様に、従来のRSMガイダンス（FT=6～51、3時間ごと）と60kmGSMガイダンス（FT=57～75、6時間ごと）を統合して、FT=6～75まで通して3時間ごとにガイダンスを作成する。そのため20kmGSMガイダンスの入力因子としては、RSMガイダンスと同様の入力因子を採用する。なお6時間天気ガイダンスが作成される範囲においては、6時間日照率ガイダンスが必要とされるが、これは2予報時間分の日照率ガイダンスを平均して作成する。

表3.5.1 日照率ガイダンスの入力因子

RSM ガイダンス	60kmGSM ガイダンス	20kmGSM ガイダンス
相対湿度 1000hPa 925hPa 850hPa 700hPa 500hPa 400hPa 300hPa	相対湿度 1000hPa 925hPa 850hPa 700hPa 500hPa 400hPa 300hPa	RSMガイダンス と同様の入力 因子を採用
3h降水量 －6h～－3h －3h～ 0h 0h～＋3h	6h降水量 －3h～＋3h ＋3h～＋9h	
850 hPaと 500hPaの気温差	850 hPaと 500hPaの気温差	

² 今後、統合ビューワでの利用を念頭に、アメダスへの配信について検討を行う予定である。

¹ 鎌倉 智之

係数は先に述べた通り、アメダス地点ごとに作成される。加えて季節による層別化を行っており、地点ごとに夏用の係数（4月～9月）と冬用の係数（10月～3月）を持っている。さらに旧ガイダンスにおいては、FT=51を境に別のモデルを参照することからモデルごとの係数を持っていた。これはモデルごとの予報特性に合わせるためである。20kmGSMガイダンスでは、全FTを通して同一のモデルからガイダンスが作成されることから、FTについての係数は1組とした。

(3) 検証方法

20kmGSMのサイクル実験として、2004年8月～9月を対象とした夏実験と、2005年12月～2006年1月を対象とした冬実験が行われた。ガイダンスの検証では、それぞれの前半1か月を学習期間、後半1か月を検証期間とした。

検証対象FTは予報対象時刻が09～15JSTとなるFT、検証対象初期時刻は00・12UTC初期値とし、旧ガイダンスとの比較を行った。このとき予報時間間隔については旧ガイダンスにあわせて、対RSMガイダンスでは3h×2コマ、対60kmGSMガイダンスでは6h×1コマとした。検証した予報対象時刻について、表3.5.2にまとめた。

検証では平均誤差（ME）、平方根平均二乗誤差（RMSE）、及び日照率の閾値を50%とした適中率（以下、50%適中率）を用いて統計的評価を行った。適中率において閾値を50%としたのは、日照率ガイダンスが天気ガイダンスで使われる際の、晴れ曇り判別の閾値が50%だからである。そのため日照率ガイダンスの閾値50%の適中率は、おおむね天気ガイダンスの晴れ曇りの適中率と見なすことができる。

(4) 検証結果

従来からある00・12UTC初期値について、新旧ガイダンスの結果を比較した。ME、RMSEを図3.5.2（2004年9月）、図3.5.3（2006年1月）に、50%適中率を図3.5.4（2004年9月）、図3.5.5（2006年1月）に示す。

RMSE及び50%適中率については、夏のFT=24～

表3.5.2 検証した予報対象時刻

初期時刻	今日 09～15JST	明日 09～15JST	明後日 09～15JST
00UTC (当日 09JST)		FT=24～30 3h×2コマ 対RSM	FT=48～54 6h×1コマ 対60kmGSM
12UTC (前日 21JST)	FT=12～18 3h×2コマ 対RSM	FT=36～42 3h×2コマ 対RSM	FT=60～66 6h×1コマ 対60kmGSM

30でわずかに改悪している以外は、すべて改善している。

MEについては、夏の予報後半と冬において改善しているものの、夏の予報前半が改悪となっている。これは入力因子として参照しているモデルが、特に夏期において中層の相対湿度を低く予想する傾向があることと関係があるように思われる（第1.2節参照）。1か月という学習期間では、このようなモデルバイアスを除去しきれなかった可能性がある。

(5) まとめ

20kmGSMを用いた日照率ガイダンスについて、精度検証を行った。RSM及び60kmGSMガイダンスと比較して、おおむね精度の改善が確認できたが、夏の予報前半でMEが改悪となった。これはモデルにおける中層の相対湿度の負バイアスに起因する可能性が高く、運用が開始されガイダンスの学習が進むにしたがって軽減されていくものと思われる。

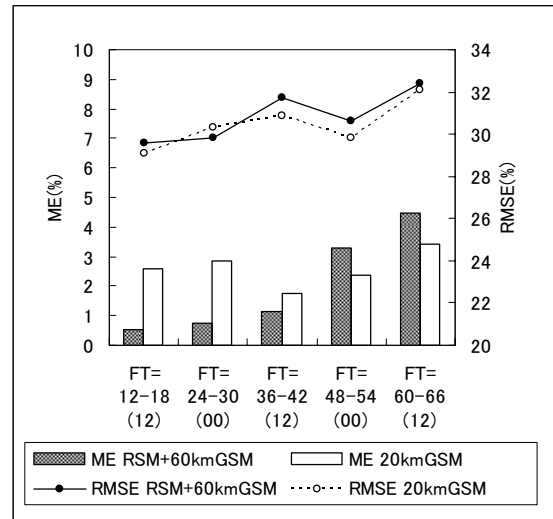


図3.5.2 日照率ガイダンス ME、RMSE（2004年9月）
カッコ内は予報初期時刻（UTC、以下の図も同様）

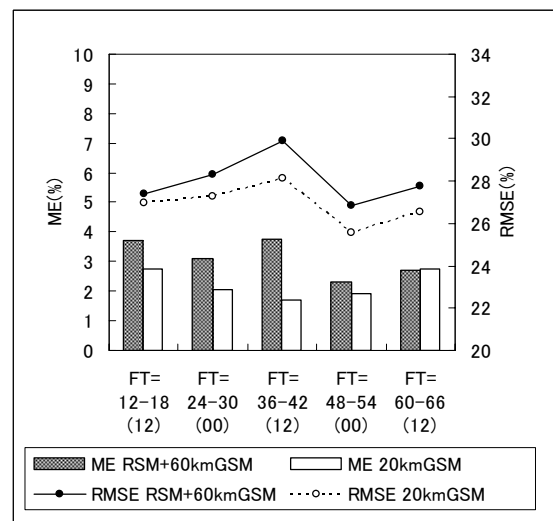


図3.5.3 日照率ガイダンス ME、RMSE（2006年1月）

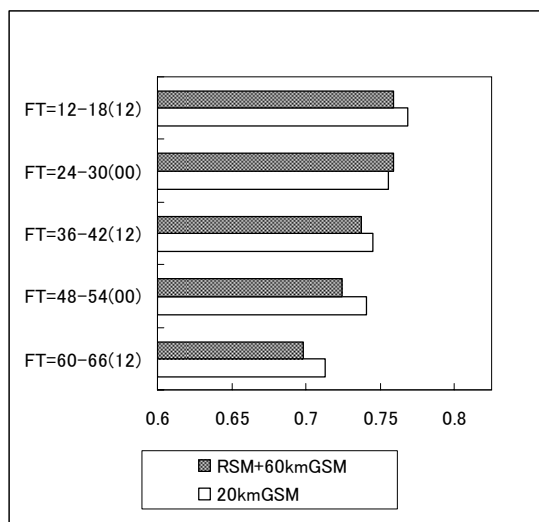


図3.5.4 日照率ガイダンス 50%適中率 (2004年9月)

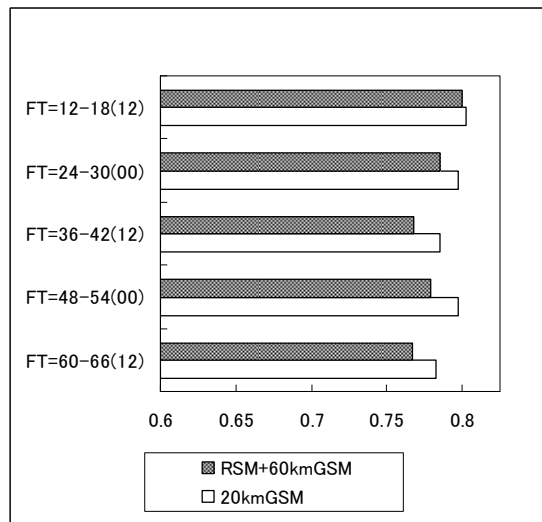


図3.5.5 日照率ガイダンス 50%適中率 (2006年1月)

3.6 その他の天気予報、防災気象情報支援ガイドス¹

3.6.1 雪水比ガイダンス

(1) はじめに

雪水比ガイダンスは、予報作業支援システム(YSS)で面的な降雪量予報を行うため、2003 年 10 月に運用を開始した。YSS では、雪水比を面的に修正した上で、降水量に雪水比を乗ずることで降雪量を予報する。直接、降雪量を予報しないのは、降水量と降雪量の不整合を回避するためである。雪水比ガイダンスの作成に利用するモデルは、領域モデル(RSM)から高解像度全球モデル(20kmGSM)に変更する。なお、以下では予報の初期時刻から起算した予報時間を FT (単位は時間) と表記する。

(2) 雪水比の定義

雪水比は、降雪量を次のように表現できるものとして定義する。

降雪量(cm)=降水量(mm)×雪水比(cm/mm)

すなわち、雪水比は降水量に対する降雪量の比であり、雪水比ガイダンスはこれを 20km 格子 (南北 12 分×東西 15 分の格子) 毎、3 時間毎に予報する。ただし、配信にあたっては、鹿児島県奄美地方及び沖縄県の格子は常に 0 としている。

(3) 雪水比ガイダンスの作成手法

RSM を利用した雪水比ガイダンスと 20kmGSM を利用した雪水比ガイダンスの作成方法は共通である。

雪水比ガイダンスは、降雪量と降水量の実況の比を教師データとして作成したニューラルネットワークを利用する。ネットワークは 3 層の階層型 (ユニット数は入力層 28、中間層 6、出力層 2) を採用している。雪水比は主に気温の影響が大きいことから、出力層を雪水比と地上気温とし、両者の予報誤差が小さくなるように学習をさせている。

表 3.6.1 に説明変数を示す。地上気温に関しては、モデルとアメダス地点の標高差の補正を行っている。教師データ (実況値) は、アメダス積雪深計の設置地点 (約 280 地点) における降雪量 (北海道は 3 時間積雪深差の増分、その他の地域は 1 時間毎の積雪深差の増分の合計)、降水量 (雨量計による)、気温である。雪水比は、3 時間降雪量と 3 時間降水量の比であり、降水量が 1mm 未満の場合は教師データから除外している。気温は、当該 3 時間に含まれる 4 つの正時気温の平均である。

学習は 2001 年冬季 (2001 年 12 月から 2002 年 3

表 3.6.1 雪水比ガイダンスの説明変数 (入力層)

	鉛直層
気温	地上,925,850,700,500hPa
相对湿度	地上,925,850,700hPa
高度	850,700,500hPa
風向	925,850,700,500hPa
風速	925,850,700,500hPa
上昇流	925,850,700hPa
SSI	地上-850hPa,925-700hPa
地形性上昇流に関する因子	
前 3 時間降水量	
地上気圧	

月) のデータを用い、この期間を繰り返し学習させ、最適係数を求めた (逐次学習)。作成した係数は 1 組で、ガイダンスの予報には全国のどの地点 (地域・格子) でも同じ係数を利用する。また、係数は固定で逐次学習は行っておらず、2003 年の RSM 雪水比ガイダンスの運用開始時から変更していない。20kmGSM 雪水比ガイダンスも同じ係数を利用する。なお、RSM 雪水比ガイダンスは FT=6 から FT=51 までを予報していたが、20kmGSM 雪水比ガイダンスは FT=84 までに延長する。

(4) 精度検証

降水量に雪水比ガイダンスを乗じて計算した降雪量を検証する。検証期間は 2006 年 1 月の 00,12UTC 初期値、検証対象はアメダス積雪深計の設置地点である。

図 3.6.1 に 12 時間降雪量の検証結果を示す。12 時間降雪量予報は、降水量に雪水比を乗じた降雪量 (3 時間降雪量) を 12 時間分積算し、20km 格子からアメダス地点に内挿した。20kmGSM-MRR は、20kmGSM から作成した雪水比ガイダンスと降水量ガイダンス、RSM-MRR は、RSM から作成した雪水比ガイダンスと降水量ガイダンスを利用した。20kmGSM-OBS 及び RSM-OBS は、降水量ガイダンスの代わりに解析雨量による 20km 格子平均降水量を利用している。降水量に実況値を利用することで雪水比の精度差を比較することになる。

降水量として実況値を利用した 20kmGSM-OBS と RSM-OBS では、RSM よりも 20kmGSM のスレトスコアが良い。また、RSM では閾値が大きくなるに従ってバイアスコアが小さくなるのに対して、20kmGSM では反対に大きくなっていく。即ち RSM ガイダンスに比べて、20kmGSM ガイダンスでは、雪水比を大きく予報する事例が増える。

降水量として降水量ガイダンスを利用した 20kmGSM-MRR と RSM-MRR でも、スレトスコアは全ての閾値で RSM よりも 20kmGSM が良い。降水量として実況値を利用した場合には、5cm/12h 以下の閾値ではスレトスコアの改善がわずかであ

¹ 3.6.1 安藤 昭芳、3.6.2 鎌倉 智之、3.6.3、3.6.4 北畠 淳

ったのに対して、降水量ガイダンスを利用した場合には大きく改善されている。これは、降水量ガイダンスの改善の効果と思われる。

図 3.6.2 に 20kmGSM 雪水比ガイダンスと降水量ガイダンスから計算した 12 時間降雪量の初期時刻別、FT 別の検証結果を示す。閾値は 20cm/12h である。スレツスコアの初期値間の差は小さい。00UTC、06UTC、12UTC、18UTC の各初期値による FT=48、42、36、30 (00UTC までの 12 時間降雪量) の予報精度は、他の時間に比べてかなり悪い。これは、降水量ガイダンスの予報精度がこの時間に悪いことに起因する。一方、バイアススコアは、18UTC 初期値を除いて FT=51 以降の 15UTC から 03UTC で大きくなる傾向があり、FT または時刻に依存するバイアスを持っていることが分かる。1 組の係数を利用し、FT や時刻で層別化を行っていないが、20kmGSM のデータ蓄積後に層別化による精度向上を図る計画である。

(5) まとめと利用上の留意点

20kmGSM 雪水比ガイダンスと RSM 雪水比ガイダンスをアメダス積雪深計で検証した結果は、以下の通りとなった。

- 降水量として実況値を利用した場合の降雪量予報の検証から、雪水比の精度は、20kmGSM ガイダンスが RSM ガイダンスを上回る。
- 降水量として降水量ガイダンスを利用した場合の降雪量予報の精度は、20kmGSM ガイダンスが RSM ガイダンスを上回る。
- 20kmGSM 雪水比ガイダンスを利用した降雪量予報では、00UTC までの 12 時間降雪量の予報精度は、他の時間に比べて悪い。

なお、雪水比ガイダンスの利用には、以下の点に留意して利用して欲しい。

- 雪水比は気温に対する依存性が高いことから、地上気温が 0 度前後では予報誤差が大きくなる。
- 雪水比、降水量、天気各ガイダンスは独立に作成されている。格子ごとには、降水量予報が 0mm であっても雪水比が 0 以上、あるいは雪水比が 0 であっても天気ガイダンスで雪と予報されることがありえる。
- 係数の作成・検証ともに、アメダス積雪深計の地点で行っている。アメダス積雪深計の設置されていない地域の予報精度は、本項で示した検証結果よりも精度は低いと考えられる。

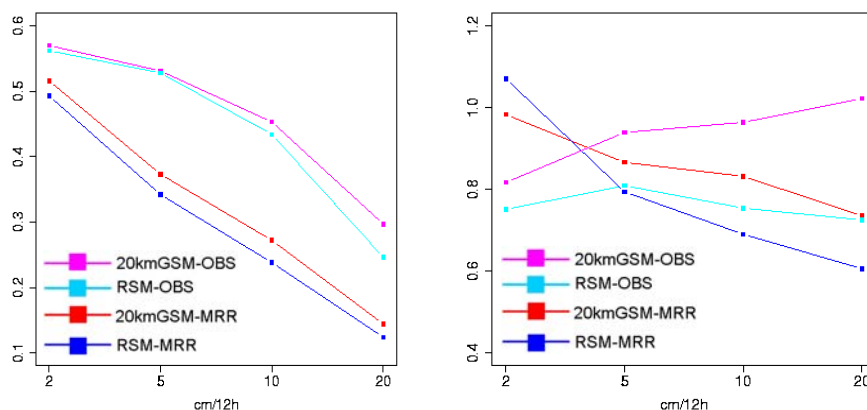


図3.6.1 雪水比ガイダンスを利用した12時間降雪量の検証結果。左はスレツスコア、右はバイアススコア。横軸は閾値 (単位cm/12h)。GSM-MRRは20kmGSM雪水比、降水量ガイダンスを利用、RSM-MRRはRSM雪水比、降水量ガイダンスを利用、GSM-OBS及びRSM-OBSは、降水量として解析雨量による実況値を利用。FT=24,36,48。

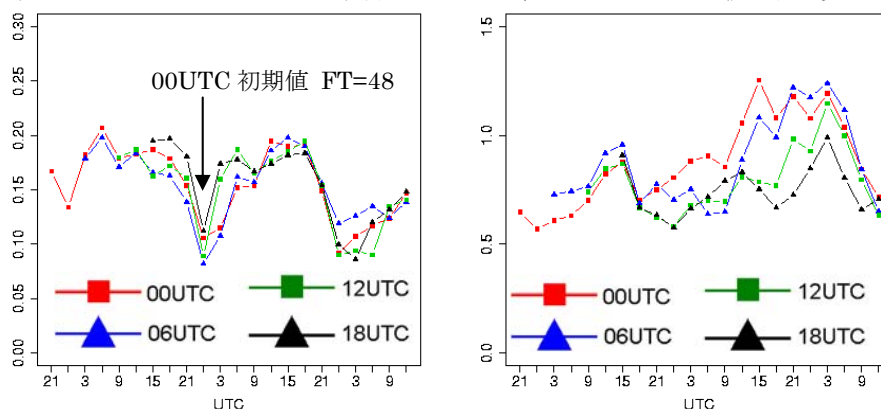


図3.6.2 20kmGSMによる雪水比、降水量ガイダンスを利用した12時間降雪量の初期値別、FT別の検証結果。左はスレツスコア、右はバイアススコア。横軸はUTC。閾値は20cm/12h。

3.6.2 最小湿度ガイダンス

(1) はじめに

最小湿度ガイダンスは、地上気象官署における日最小湿度を予報する地点形式のガイダンスである。

今回のモデル更新に伴い、利用するモデルをRSM及び60kmGSMから20kmGSMに変更する。また予報回数も1日2回から4回に変更する。

以下、最小湿度ガイダンスについて作成方法及び変更点を述べた上で検証した結果について報告する。

(2) 作成手法及びその変更点

最小湿度ガイダンスはニューラルネットワークを用いた逐次学習型のガイダンスであり、地上気象官署における日最小湿度の観測データを用いて学習を行っている。ニューラルネットワークは、入力層（23ユニット）、中間層（5ユニット）、出力層（1ユニット）の3層ネットワークを組んでおり、入力因子について新旧ガイダンスで変更はない（表3.6.2）。

FTについて表3.6.3にまとめる。従来のRSMガイダンスと60kmGSMガイダンスを統合し、全FTを通して20kmGSMを利用したガイダンスを作成する。

表3.6.2 最小湿度ガイダンスの入力因子

RSM,60kmGSM,20kmGSM共通	
地上気温(°C) 850hPa風速(m/s) 1000,925,850hPa相対湿度の平均(%) 1000-700hPa気温減率(°C/m)	03,12,21JST
地上最高気温(°C) 地上最高気温出現時の地上比湿(g/kg) 925hPa最高気温出現時の 925hPa比湿(g/kg) 地上最小比湿(g/kg) 地上最小湿度(%)	3h×8回の中の 最高・最小
日平均相対湿度(%) (3h×8回の平均)	地上,1000,925, 850,700,500hPa

表3.6.3 予報時間と従来の利用モデル

初期時刻	今日	明日	明後日	明々後日
12UTC (前日 21JST)	FT= 03~27	FT= 27~51	FT= 51~75	
	RSM	RSM	60km GSM	
18UTC (当日 03JST)		FT= 21~45 新規	FT= 45~69 新規	
00UTC (当日 09JST)		FT= 15~39	FT= 39~63	
		RSM	60km GSM	
06UTC (当日 15JST)		FT= 09~33	FT= 33~57	FT= 57~81
		新規	新規	新規

係数は地点ごとに作成される。加えて季節による層別化を行っており、地点ごとに夏用の係数（4月～9月）と冬用の係数（10月～3月）を持っている。さらに旧ガイダンスにおいては、FT=51を境に別のモデルを参照することから、モデルごとの係数を持っていた。これはモデルごとの予報特性に合わせるためである。20kmGSMガイダンスでは全FTを通して同一のモデルを用いて作成されることから、FTについての係数は1組とした。

(3) 検証方法

20kmGSMのサイクル実験として、2004年8月～9月を対象とした夏実験と、2005年12月～2006年1月を対象とした冬実験が行われた。ガイダンスの検証では、それぞれの前半1か月を学習期間、後半1か月を検証期間とした。検証対象初期時刻は00・12UTC初期値とし、平均誤差(ME)及び平方根平均二乗誤差(RMSE)について、旧ガイダンスとの比較を行った。

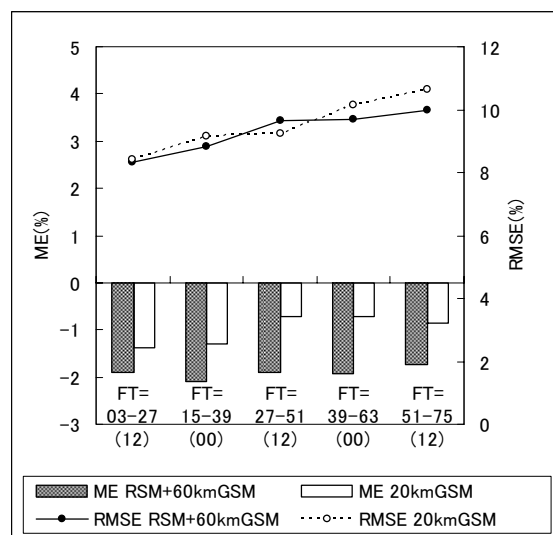


図 3.6.3 最小湿度ガイダンス ME、RMSE (2004 年 9 月)
カッコ内は予報初期時刻 (UTC、図 3.6.4 も同様)

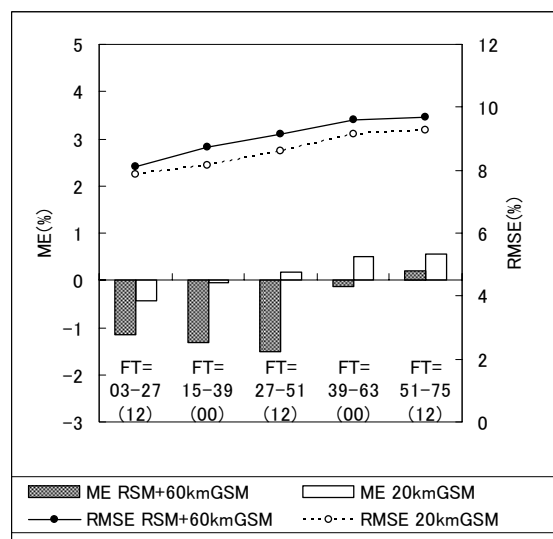


図 3.6.4 最小湿度ガイダンス ME、RMSE (2006 年 1 月)

(4) 検証結果

検証結果を図3.6.3（2004年9月）、図3.6.4（2006年1月）に示す。

夏実験について、RMSEはFT=27～51で改善しているが、それ以外でやや改悪となっている。MEについてはすべてのFTで改善している。冬実験では、RMSEがすべてのFTで改善している一方、MEは予報後半で改悪となっている。

(5) まとめ

20kmGSMを用いた最小湿度ガイダンスについて精度検証を行った。RSM及び60kmGSMガイダンスと比較して、夏のMEや冬のRMSEなど改善となったものが多かったが、一部に改悪となったものもあった。

このうち、夏のRMSEや冬のMEなど予報後半の改悪については、FTについての係数を一本化した影響が疑われる。運用開始後学習が進み、全体の精度向上の中で解消されていく可能性もあるが、特定のFTで精度が向上しない場合、FTによる層別化を検討する。

3.6.3 大雨確率ガイダンス

(1) 仕様と作成手法および変更点

大雨確率ガイダンスは、3時間最大降水量が4月から9月は30mm以上、10月から3月は20mm以上となる確率を40km格子ごとに予報し、二次細分区域の値に変換して配信するものである。ガイダンスの作成手法はニューラルネットワークである。仕様を表3.6.4に示す。ニューラルネットワークの係数は格子ごとに異なり、予報対象時刻がどちらの期間にあるかで係数を替える。年2回の係数の切り替わり時は、一連の現象でも予報確率が大きく変わる場合がある。予報対象の降水量は解析雨量を使用し、周囲に比べて突出した値を除去する品質管理を行っている。その降水量を使って学習を行い、初期値ごとに係数を更新している。

表3.6.4に示すように20kmGSMガイダンスは、RSMガイダンスで使用しているニューラルネットワークの出力関数と説明変数の一部を変更した。初めに20kmGSMの実験期間(2004年8月から9月、2005年12月から2006年1月)と重ならない2003年6月から2004年5月までの1年間のRSMデータを使用し、変更したニューラルネットワークで学習を行って係数を作成した。次に作成した係数を初期係数とし、20kmGSMの実験期間中、現業運用と同様に係数の更新を行いながら検証を行った。また、ガイダンスの仕様変更による特性変化を比較するため、変更した手法によるRSMガイダンス（以下、RSMガイダンス（新））についても20kmGSMガイダンスと同様に20kmGSMの実験期間中の検証を行った。

表 3.6.4 大雨確率ガイダンスの仕様。変更した部分に下線をつけた。

20kmGSMガイダンス	RSMガイダンス
ニューラルネットワークの構成	
入力層 <u>2</u> , 中間層 <u>6</u> , 出力層 <u>1</u>	入力層8, 中間層6, 出力層1
ニューラルネットワークの出力関数	
入力層→中間層 <u>双曲線関数¹</u> 中間層→出力層 一次関数	入力層→中間層 シグモイド関数 ² 中間層→出力層 一次関数
説明変数	
850hPa風の <u>東西成分</u> 850hPa風の <u>南北成分</u> 500hPa風の <u>東西成分</u> 500hPa風の <u>南北成分</u> <u>925・850・700hPa</u> の上昇流の最大値 1000hPaの比湿と400hPa の飽和比湿との差 湿潤層の厚さと比湿の積 地形性降水指数 ブラックボックス指数 ³	850hPa風向 850hPa風速 500hPa風向 900・850・700hPa の上昇流の最大値 1000hPaの比湿と400hPa の飽和比湿との差 湿潤層の厚さと比湿の積 地形性降水指数 ブラックボックス指数

¹ $(e^x - e^{-x}) / (e^x + e^{-x})$ と表される関数。

² $1 / (1 + e^{-x})$ と表される関数

³ 以下のような水蒸気の輸送量に関係した量。

$$\int_{p_i}^{p_h} p \sqrt{u^2 (q - q_s)^2 + v^2 (q - q_s)^2} dp$$

p: 気圧、p_i: 下層の気圧、p_h: 上層の気圧、u: 風の東西成分、v: 風の南北成分、q: 比湿、q_s: p_hにおける飽和比湿

(2) 検証結果

検証期間は2004年8月から9月（夏）、2005年12月から2006年1月（冬）である。検証対象の予報時間は、RSMガイダンスと同じFT=6からFT=51までである。初期時刻は、20kmGSMガイダンスが00,06,12,18UTC、RSMガイダンスが00,12UTCと、それぞれの全初期値を検証の対象とした。

図3.6.5に20kmGSMガイダンス、RSMガイダンス、RSMガイダンス（新）の各確率で大雨のあった割合(信頼度)を示す。夏の信頼度は、20kmGSMガイダンスとRSMガイダンス（新）ではRSMガイダンスよりも理想直線に近い。これはニューラルネットワークの出力関数をシグモイド関数から双曲線関数に変更したためである。冬の信頼度はいずれのガイダンスも確率50%前後以上で大きく変動している。これは高い確率の予測回数が少なく、少数のデータに影響されるためである。

図3.6.6に20kmGSMガイダンス、RSMガイダンス、RSMガイダンス（新）の各確率以上で大雨ありとした場合のスレツスコアを示す。説明変数の変更によって、夏、冬ともにスコアは、20kmGSMガイダンスとRSMガイダンス（新）はRSMガイダンスよりも向上している。夏の場合、20kmGSMガイダンスはRSM（新）よりもスコアが小さいが、

RSM データで最適化した係数を初期係数としているため、RSM（新）の方がより適合していると思われる。冬の場合は 20kmGSM ガイダンスの方が RSM（新）をやや上回っている。

図 3.6.7 に 20kmGSM ガイダンス、RSM ガイダンスの各確率以上での大雨の捕捉率を示す。夏、冬ともに 20kmGSM ガイダンスは RSM ガイダンスよりも捕捉率が向上したが、それでも確率 20%以上での大雨の捕捉率は 10%である。予測確率のメリハリが不十分で実況対応が必要である。

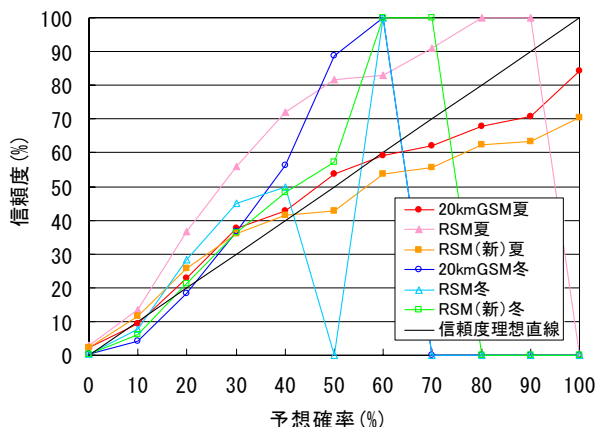


図 3.6.5 20kmGSM 大雨確率ガイダンス、RSM 大雨確率ガイダンス、変更した手法による RSM 大雨確率ガイダンスの信頼度。検証期間は夏：2004 年 8 月から 9 月、冬：2005 年 12 月から 2006 年 1 月。RSM（新）は変更した手法による RSM 大雨確率ガイダンスを表す。

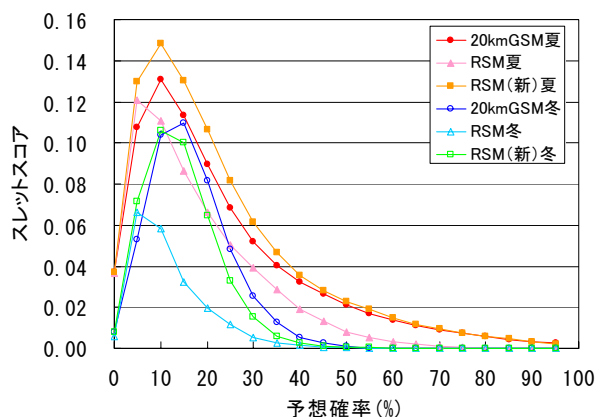


図 3.6.6 20kmGSM 大雨確率ガイダンス、RSM 大雨確率ガイダンス、変更した手法による RSM 大雨確率ガイダンスの各確率以上で大雨ありとした場合のスレツスコア。検証期間、凡例は図 3.6.5 と同じ。

3.6.4 発雷確率ガイダンス

(1) 仕様

発雷確率ガイダンスは、予報時刻の前 3 時間に発雷のある確率を 20km 格子ごとに予報し、二次細分区域の値に変換して配信するものである。ガイダンスの作成手法はニューラルネットワークであり、20kmGSM ガイダンスでも手法、係数などは RSM

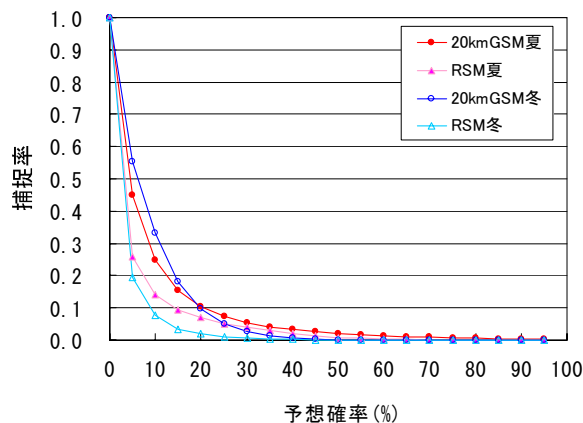


図 3.6.7 20kmGSM 大雨確率ガイダンス、RSM 大雨確率ガイダンスの各確率以上での大雨の捕捉率。検証期間は図 3.6.5 と同じ。

表 3.6.5 発雷確率ガイダンスの仕様。単位なしの数字は気圧レベルを表し、単位 hPa を省略している。SSI925-700 などの表記は、例えば SSI925-700 なら 925hPa と 700hPa で求めた SSI を示す。

ニューラルネットワークの構成	入力層12、中間層7、出力層1
説明変数	SSI925-700, SSI700-300 SSI900-300, 700の相当温位 K index, Total Totals index 持ち上げ高度925のCAPE バルクリチャードソン数 地上から900までの可降水量 950から500までの上昇流の平均値 700と500の風の鉛直シア 2kmメッシュ地形から求めた標高
ニューラルネットワークの重み係数	全格子同一、学習による更新なし、-10℃高度で層別化
-10℃高度による係数の切り替え条件	・ 4000m以上 夏期用係数 ・ 3000m以上4000m未満 夏期用係数と冬期用係数で算出した確率値の平均 ・ 1400m以上3000m未満 冬期用係数
確率を0%とする条件	・ -10℃高度が4000m以上かつ SSI900-300が10より大きい ・ -10℃高度が3000m以上かつ 持ち上げ高度925のCINが500より大きい ・ -10℃高度が1400m以上かつ SSI925-700が5より大きい ・ -10℃高度が1400m未満

ガイダンスのものを変更なしで引き継ぐ。予報時間は FT=6 から FT=51 までを FT=6 から FT=84 までに延長する。仕様を表 3.6.5 に示す。

RSM ガイダンスの作成に使用された発雷データは、東京電力から提供を受けた落雷位置標定データであり、夏期として 1998 年 7 から 8 月、冬期として 1998 年 1 から 2 月のそれぞれ 2 か月間のデータで学習を行っている。提供データの観測範囲の制約により、学習に使用した範囲は、東北南部、関東、

甲信、東海、北陸地方に限られ、この範囲で作成した一組の係数を全国に適用している。気温が -10°C となる高度で層別化を行い、夏期用、冬期用の係数を使い分けている。また、空振りを減らすため、確率を0%にする条件を加えている。

(2) 検証結果

検証に用いた発雷データは、第3.8.5項で解説されている雷監視システム(LIDEN)を元に作成されたものである。検証期間は20kmGSMの実験期間の2004年8月から9月(夏)、2005年12月から2006年1月(冬)である。検証対象の予報時間は、RSMガイダンスと同じ $\text{FT}=6$ から $\text{FT}=51$ までであり、初期値は20kmGSMガイダンスが00,06,12,18UTC、RSMガイダンスが00,12UTCと、それぞれの全初期値を検証対象とした。

図3.6.8に20kmGSMガイダンス、RSMガイダンスによる、各予想確率で発雷のあった割合(信頼度)と、各確率以上で発雷ありとした場合の空振り率、図3.6.9に各確率以上で発雷ありとした場合のスレットスコアを示す。夏の場合、20kmGSMガイダンスは、確率50%まではRSMガイダンスよりも空振り率が小さく、信頼度が向上しているが、確率50%以上では空振り率が増加し、信頼度が低下する。スレットスコアも確率50%以上で20kmGSMガイダンスはRSMガイダンスよりも悪化している。冬の場合、20kmGSMガイダンスは確率70%を超えてから空振り率が増加するが、全確率でRSMガイダンスよりも空振り率は小さく、信頼度が向上している。

(3) 今後の課題

20kmGSMガイダンスはRSMガイダンスよりも冬では精度が向上したが、夏では確率50%以上で精度が低下している。また、年を通して第3.8.5項のMSMガイダンスに比べて精度が悪い。20kmGSMの予報値の蓄積を待ってガイダンスの作成手法の変更を検討する。

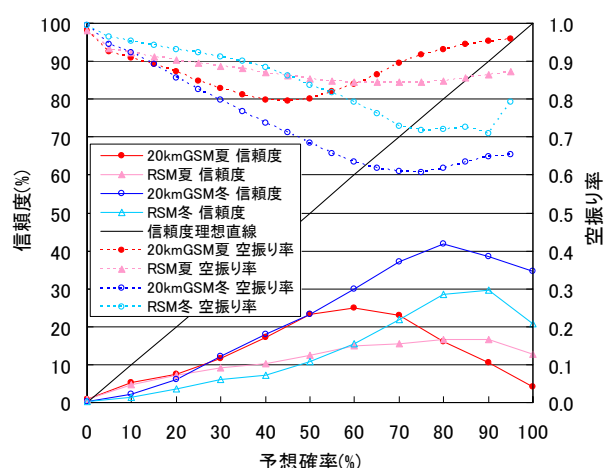


図 3.6.8 20kmGSM 発雷確率ガイダンスと RSM 発雷確率ガイダンスの信頼度と各確率以上で発雷ありとした場合の空振り率。検証期間は、夏：2004年8月から9月、冬：2005年12月から2006年1月。

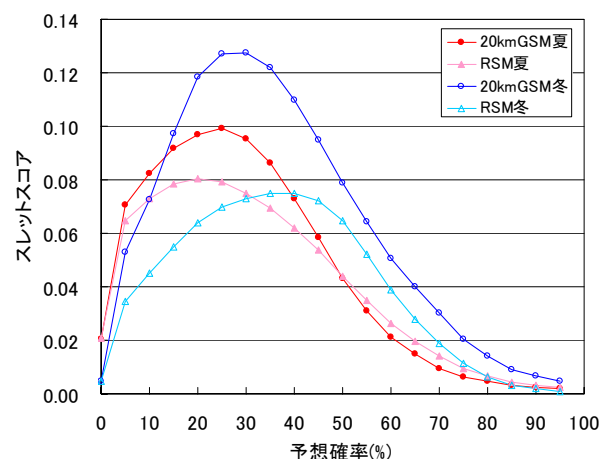


図 3.6.9 20kmGSM 発雷確率ガイダンスと RSM 発雷確率ガイダンスの各確率以上で発雷ありとした場合のスレットスコア。検証期間は図 3.6.8 と同じ。

3.7 航空悪天 GPV¹

3.7.1 国内航空悪天 GPV

2007 年 5 月に開始された MSM の予報時間延長時より、国内航空悪天 GPV に積乱雲頂高度の要素を追加するとともに、積乱雲量の予測手法を改良し、乱気流指数(TURB)として出力している鉛直ウィンドシアアの算出方法を変更した。積乱雲頂高度の追加と積乱雲量の改良については、工藤(2007)で述べたのでこれを参照されたい。本項ではまず MSM 予報時間延長以降の国内航空悪天 GPV の仕様を示し、続いて鉛直ウィンドシアアの算出方法の変更について述べる。

(1) 国内航空悪天 GPV の仕様

MSM 予報時間延長以降の国内航空悪天 GPV の仕様を表 3.7.1 に示す。格子系は、水平は格子間隔 40km のポーラステレオ座標、鉛直は 2000ft 間隔のフライトレベル (FL) 面で従来と変わらず、予報時間は MSM と同様に、03, 09, 15, 21UTC 初期値について 33 時間まで延長した。

表では今回新規に追加した層と要素に下線を付加している。W は鉛直流 (単位は m/s) であり、山岳波や航空機への着氷等の予測に有効であると考えられる。VWS は鉛直ウィンドシアアであり、現在のところ TURB と同じ値が入っているが、将来的には TURB を新たな乱気流指数として内容を変更する予定である。CBTOP の Z と P は、それぞれ積乱雲頂の高度 (単位は m) と気圧 (単位は hPa) である。レーダーエコー頂等と比較する場合には高度を用いるのが有効であるが、フライトレベル面に表示させる場合には気圧が必要なため、Z と P の両方の値を出力する。

表 3.7.1 国内航空悪天 GPV の仕様

格子系	格子間隔 40km のポーラステレオ座標	
予報時間	00, 06, 12, 18UTC 初期値は予報時間 FT=0~15, 03, 09, 15, 21UTC 初期値は予報時間 FT=0~33 まで 1 時間間隔	
層・要素	層	要素
	地上面	U, V, T, RH, PSEA, TRPP (圏界面気圧), RAIN, CSIG(中層雲量・下層雲量・積乱雲量)
	FL 面 (010 から 550 まで 20 間隔)	U, V, <u>W</u> , RH, TURB (乱気流指数), <u>VWS</u> (鉛直ウィンドシアア), CWMR (雲水量)
	<u>CBTOP</u>	<u>Z</u> , <u>P</u>

(2) 鉛直ウィンドシアアの算出方法の変更

鉛直ウィンドシアアの値は、これまでは各モデル面間で求めた鉛直ウィンドシアアを各フライトレベル面にスプライン内挿して算出していた (大林・榊原 2000, 工藤 2004) が、この算出方法には次のような問題があった。

- 各モデル面間で算出した鉛直ウィンドシアアの値をフライトレベル面での値に内挿していたため、モデル面の鉛直分解能が高い下層ほど、相対的に値が大きく、特に地表面付近での値が極端に大きくなる場合があった。
- モデルの鉛直分解能が変更されると鉛直ウィンドシアアの値も相対的に変化するため、予報作業での適切な閾値を見直す必要があった。
- 鉛直ウィンドシアアの値自体を内挿していたため、シアアの大きさが負になる等、物理的に意味のない値が計算されることがあった。
- 水平格子間隔 5km の MSM から水平格子間隔 40km の国内航空悪天 GPV での鉛直ウィンドシアアを算出する際、最近接の MSM の格子点値のみ用いていたため、代表性に欠けた値となっている場合があった。

これらの問題を解決するために、鉛直ウィンドシアアの算出方法を次のように変更した。

- ① MSM のモデル面から、水平 5km、鉛直 1000ft 間隔のフライトレベル面へ、風と高度をスプライン内挿する。
- ② 上下 1000ft の風と高度から、水平 5km、鉛直 2000ft 間隔で鉛直ウィンドシアアを算出する。
- ③ 国内航空悪天 GPV (40km) の各格子点の近傍 5×5 格子で鉛直ウィンドシアアを平均する。

これにより、特に下層での鉛直ウィンドシアアの表現が変わる。

図 3.7.1(a)-(d) に 2007 年 1 月 29 日 09UTC 初期値の 6 時間予報の、新旧手法による FL050 と FL310 での風と鉛直ウィンドシアアを示す。旧手法の下層 FL050 (図 3.7.1(a)) では、越後山脈や北朝鮮、中国河北省付近の山脈などで鉛直ウィンドシアアが大きくなっている。このように、高い山の山頂付近で鉛直ウィンドシアアが極端に大きくなることは旧手法ではしばしば見られたことであった。これに対して新手法 (図 3.7.1(b)) ではそのようなことが緩和されており、また全体的に鉛直ウィンドシアアの値が小さくなっている。これは主に、2000ft 毎の風から鉛直ウィンドシアアを算出するようにした効果である。一方上層 FL310 では、旧手法 (図 3.7.1(c)) と新手法 (図 3.7.1(d)) の鉛直ウィンドシアアの値

¹ 3.7.1 工藤 淳、 3.7.2 松下 泰広

には大きな違いは見られない。ただし、新手法では全体的にやや凹凸が減って滑らかになっている。これは 5×5 格子で平均化した効果である。

図 3.7.2 に鉛直ウィンドシアーと PIREPs (ARS, PIREP, C-PIREP の各航空機気象観測報告) の乱気流実況とを比較した統計検証の結果を示す。(a)図は FL100 以下、(b)図は FL300 以上のデータのみ使用した結果である。それぞれ鉛直ウィンドシアーの閾値別に、並以上の乱気流に対する誤検出率 (False Alarm Rate) と捕捉率 (Hit Rate) を示してある。誤検出率は小さく捕捉率は大きいほどよいので、左上にあるほど予報精度がよい。図中の凡例の括弧内には ROC 面積 (線分より下の領域の面積) を示してある。検証期間は 2006 年 6 月 1 日～2007 年 5 月 15 日である。09UTC と 21UTC 初期値の予想のみ使用し、予報時間については FT=0～15 の結果を全て足し合わせている。鉛直ウィンドシアーは晴天乱気流を予測する指標の一つであるため、検証では雲の外で遭遇したと推定される通報 (工藤 2005) のみ使用する。PIREPs のデータには QC を行い、重複した通報や、通報された 2 点間の水平距離が 240km

より離れている通報、2 点間の高度差が 6000ft よりも大きな通報を除外している。

下層での検証結果 (図 3.7.2(a)) を見ると、鉛直ウィンドシアーの値が大きい場合、新手法では旧手法よりも誤検出率が小さくなっている。これは図 3.7.1(b) で示したように、下層で大きな鉛直ウィンドシアーが表現されにくくなったためである。同じ誤検出率に対する捕捉率を比較すると、全ての閾値に

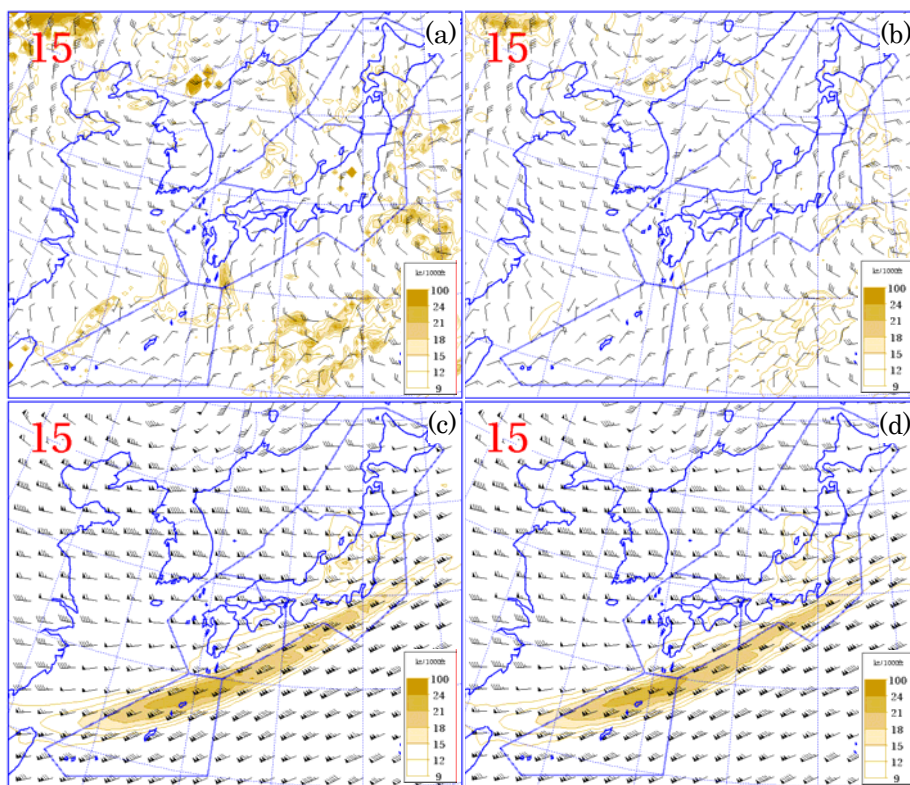


図 3.7.1 新旧手法による鉛直ウィンドシアー (TURB、単位は kt/1000ft) の表現。2007 年 1 月 29 日 09UTC 初期値の 6 時間予報。(a)旧手法 FL050、(b)新手法 FL050、(c)旧手法 FL310、(d)新手法 FL310

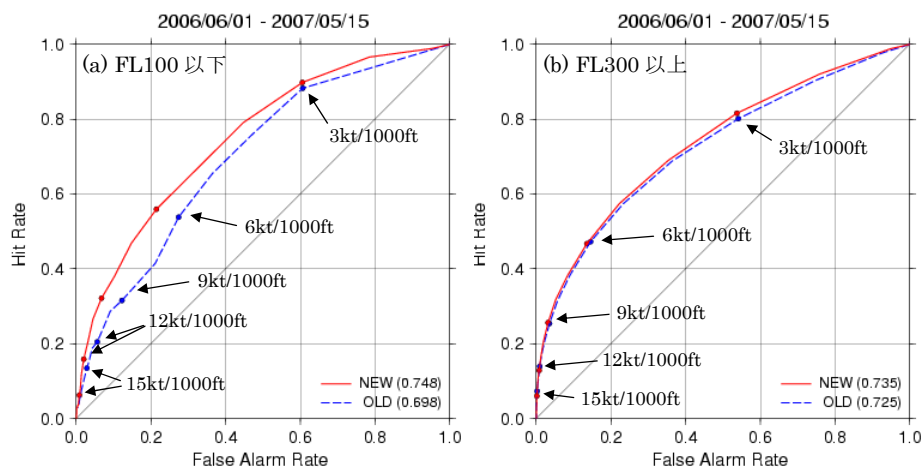


図 3.7.2 2006 年 6 月～2007 年 5 月の乱気流の予測精度。(a) FL100 以下。(b)FL300 以上。赤実線は新手法(NEW)、青破線は旧手法(OLD)での検証結果。凡例の括弧内は ROC 面積。線上の点は右上から順に、鉛直ウィンドシアーが 3, 6, 9, 12, 15kt/1000ft における結果。予報時間については FT=0～15 の結果を全て足し合わせている。

おいて新手法は旧手法を上回っており、手法の変更により予測精度が向上していることが分かる。一方上層での検証結果 (図 3.7.2(b)) ではそのような違いはなく、予報精度も同等である。

鉛直ウィンドシアーの算出方法を変更することで、主に下層で大きな値が出現しやすかった問題が解消し、乱気流との対応も改善した。

3.7.2 全球航空悪天GPVおよび北太平洋航空悪天GPV

2007年11月の高解像度全球モデル（以後20km GSMと表記する）の運用開始に合わせ、国際線の運行支援を目的に従前から作成・提供している全球航空悪天GPVに加えて、福岡FIR²の空域悪天情報作成支援および北米を中心とした北太平洋航路の運航支援を主目的に、北太平洋航空悪天GPVの作成・配信を新たに開始する。また積乱雲頂高度の診断方法を変更し、熱帯域を中心とした積乱雲の表現を改善する。本項では、作成するGPVの仕様と、積乱雲頂高度の診断方法変更について述べる。

(1) 全球航空悪天GPVおよび北太平洋航空悪天GPVの仕様

2007年11月から作成・配信を開始する、北太平洋航空悪天GPVの仕様を表3.7.2に示す。格子系は等緯度経度座標、領域は南北方向は赤道～北緯65度、東西方向は東経100度～西経110度。鉛直層はフライトレベル(FL) 010～550まで20間隔で28層である。作成時刻は1日4回00,06,12,18UTC初期値に、予報時間00～24まで3時間間隔で作成・配信する。

全球航空悪天GPVの仕様（提供要素・時間）は変更しない（表3.7.3）。

提供する各要素は、モデル格子（約20km間隔）で計算したものを、出力GPVの格子で平均して作成する。ただし積乱雲頂高度については、積乱雲ありと診断された格子についてのみ平均し、出力格子内に積乱雲ありのモデル格子が無い場合は0とする。

表3.7.2 北太平洋航空悪天GPVの仕様
(要素の略号は表3.7.4参照)

格子系	格子間隔 0.5 度の等緯度経度座標	
領域	赤道～65N,100E～110W	
予報時間	00, 06, 12, 18UTC 初期値、予報時間 0～24 まで 3 時間間隔	
層・要素	層	要素
	地上面	PSEA,U,V,T,RH,RAIN,CLA,CLL,CLM,CLH
	FL 面 (010 から 550 まで 20 間隔)	U,V,T,RH,OMG,VWS
	CBTOP	Z
	最大風速面	Z,U,V,T,P
	圏界面	Z,U,V,T

表3.7.3 全球航空悪天GPVの仕様
(要素の略号は表3.7.4参照)

格子系	格子間隔 1.25 度の等緯度経度座標	
領域	全球	
予報時間	00, 06, 12, 18UTC 初期値、予報時間 0～36 まで 6 時間間隔	
層・要素	層	要素
	地上面	RAIN,RR6H,PSEA,RH
	等圧面(hPa) (1000,925,850,700,600,500,400,300,250,200,150,100,70,50,30,20,10)	Z,U,V,T
	等圧面(hPa) (1000,925,850,700,600,500,400,300)	RH,OMG
	等圧面(hPa) (850,200)	PSI,CHI
	等圧面(hPa) (500)	VOR
	等圧面(hPa) (700,600,500,400,300,250,200,150,100)	VWS
	CBTOP	Z
	最大風速面	Z,U,V,T
	圏界面	Z,U,V,T

表3.7.4 要素を表す略号の意味および単位

略記	意味	単位
VWS	鉛直ウィンドシア	kt/1000ft
PSEA	海面更正気圧	hPa
RAIN	総降水量	mm
RR6H	前 6 時間降水量	mm
P	気圧	hPa
Z	高度	m
U	風速（東西成分）	m/s
V	風速（南北成分）	m/s
T	気温	K
RH	相対湿度	%
VOR	渦度	10 ⁻⁶ /s
PSI	流線関数	m ² /s
CHI	速度ポテンシャル	m ² /s
OMG	鉛直速度	hPa/h
CLA	全雲量	(100%を 1)
CLL	下層雲量	(100%を 1)
CLM	中層雲量	(100%を 1)
CLH	上層雲量	(100%を 1)

² 飛行情報区、ICAO により制定された航空機の航行に必要な各種の情報の提供又は捜索救難活動が行われる空域。

(2) 積乱雲頂高度の診断方法の変更

2007年11月の変更前まで作成されていた、全球航空悪天GPVに含まれる積乱雲域は、観測に比べて少なすぎると言う欠点が指摘されており（山田 2006）、特に熱帯域でほとんど積乱雲が表現されていない。

2007年11月までは積乱雲の判別を特定レベル（850,700,500,300hPa）の相対湿度の値および400hPaの上昇流の有無から行っていた。新しい診断方法は、上昇流に依存する気温摂動を考慮したパーセル法に基づくLNBまたは格子スケールの上昇流がゼロになる高さによる雲頂高度の算出と、算出された雲頂高度から積乱雲の有無を判別している（工藤 2007）。モデル格子ごと（20km間隔相当）に積乱雲頂高度の算出を行った後、積乱雲ありと診断されたモデル格子について平均し、出力格子の値を算出する。ルーチン化にあたっては20kmGSMに合わせてパラメータの調整を行っている。

旧ルーチンの全球航空悪天GPVから作成した悪天予想図（図3.7.3）、20km全球モデルの予測値から新ルーチンの手法により試作した、全球航空国際悪天GPVから作成した悪天予想図（図3.7.4）および同じ対象時刻の気象衛星画像（赤外）（図3.7.5）を示す。旧ルーチンでは熱帯域にほとんど積乱雲域が表現されていない、新ルーチンの手法では定性的にはあるが熱帯域の積乱雲域の表現が改善されていることがわかる。中高緯度の積乱雲の表現について、新ルーチンで計算された積乱雲頂高度が旧ルーチンの手法により計算されたものより低くなる傾向がある。例示した双方の悪天予想図ではFL250以下の雲頂高度の積乱雲域は表現されないため、旧ルーチンで計算した中高緯度の積乱雲域がより広く表現されている。しかし、雲頂高度の低い積乱雲を含めると、両者の発生頻度に明確な差は無い（図略）。季節的に中緯度の積乱雲頂高度は低いものが多いことを考慮すると、新ルーチンの手法で計算した積乱雲域の表現がより実況に近いと思われる。

本稿執筆時点では、新モデルの予報結果に対応する期間の積乱雲の数値化された観測データ（雲量格子点情報）が十分揃っていない。このため、計算された積乱雲域と気象衛星観測の画像を主観的に比較してパラメータの調整をおこなった。今後観測データを蓄積後、統計的な評価を行い、必要であればパラメータの最適化を行う予定である。

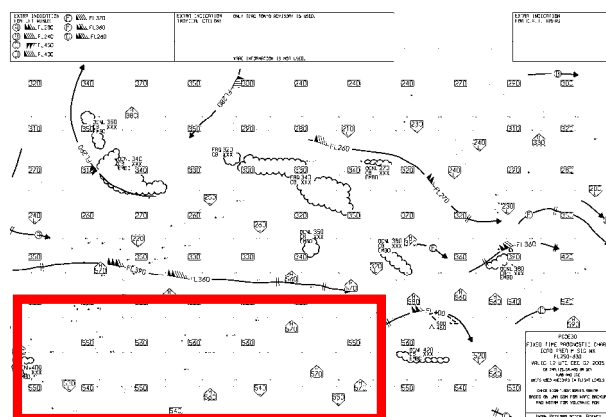


図3.7.3 旧ルーチンの全球航空悪天GPVから作成した悪天予想図（対象時刻2005年12月2日12UTC）

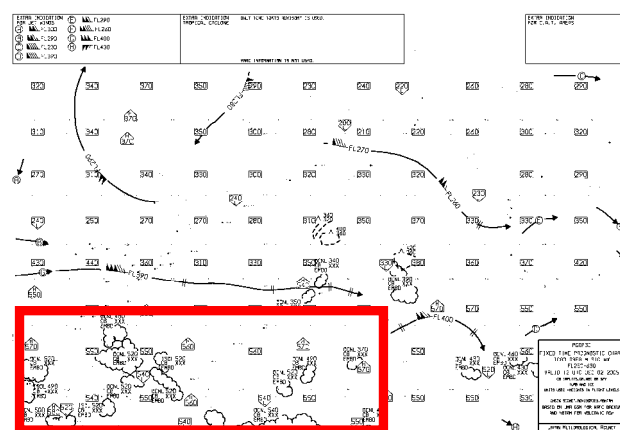


図3.7.4 新ルーチンの手法による試作全球航空悪天GPVから作成した悪天予想図

（対象時刻2005年12月2日12UTC）

※ 赤線内の積乱雲域の表現が改善されている
（スクラップで囲まれた領域が積乱雲域）

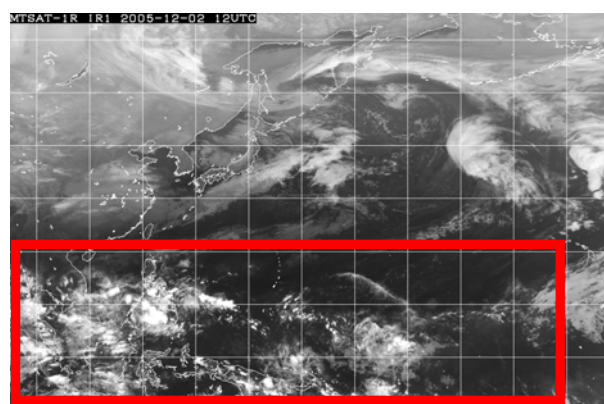


図3.7.5 気象衛星画像（赤外）

（2005年12月2日12UTC）

参考文献

- 大林正典, 榊原茂記, 2000: 航空気象予報. 数値予報課報告・別冊第47号合併号, 42-43.
- 工藤淳, 2004: 国内航空悪天GPV. 平成16年度数値予報研修テキスト, 58-62.
- 工藤淳, 2005: SK通報のないC-PIREPに対する晴れ・曇り判別法. 航空気象ノート第64号, 6-9.
- 工藤淳, 2007: 国内航空用悪天GPVの積乱雲予測手法の開発. 航空気象ノート第66号, 11-18.
- 山田雄二, 2006: 全球航空悪天GPVの精度向上に向けた調査. 航空気象ノート第65号, 8-16.

3.8 航空気象予報ガイダンス¹

3.8.1 はじめに

2007年5月16日、03,09,15,21UTC 初期値のメソ数値予報モデル(MSM)の予報時間が33時間に延長された。これに伴い、領域モデル(RSM)を利用したTAF-Lガイダンス²を廃止し、MSMを利用したTAF-Sガイダンス³の予報時間を延長することによってTAF-Lガイダンスの役割も担うように変更した。これまで航空気象予報ガイダンスは二つに分かれ、予測要素や予測特性に違いが生じていたが、この統一によって、MSMを基にした一貫性の高いガイダンスを提供できる。以下では、廃止したTAF-Lガイダンスを旧TAFL-G、2007年5月16日以前のTAF-Sガイダンスを旧TAFS-G、統一したガイダンスを新TAF-Gと呼ぶ。

新TAF-Gは03,09,15,21UTC 初期値は33時間後、00,06,12,18UTC 初期値は15時間後まで予測する。これによって、6時間ごとに27時間予報を行うTAF-Lと3時間ごとに9時間予報を行うTAF-Sをもれなく支援することができる。

新TAF-Gの予測要素は、旧TAFS-Gの予測要素の他に旧TAFL-Gの予測要素も包含している。さらに、新たに1時間ごとの風、平均視程、1600m未満の視程確率、発雷確率を追加した。表3.8.1に予測要素と手法を掲げた。なお、前3時間の最大風速、最小・平均視程、最低シーリング時の雲、卓越天気も配信しているが、これは1時間ごとの予測値から

表 3.8.1 航空気象予報ガイダンスの予測要素と手法

予報時間は03,09,15,21UTC 初期値は2-33時間(確率は6-33時間)、00,06,12,18UTC 初期値は2-15時間(確率は6-15時間)。予測地点は国内76空港。下線が新規に追加した要素。

種類	予測要素	手法
風	<u>1時間ごとの風向風速</u> 前1時間の最大風速とその風向	カルマンフィルター
視程	前1時間の最小視程と <u>平均視程</u> 前3時間に5000mおよび <u>1600m</u> 未満となる確率	カルマンフィルター
雲	3層の雲底高度と雲量(前1時間の最低シーリング時)	ニューラルネット
天気	前1時間の卓越天気と降水強度	お天気マップ
気温	最高最低気温 1時間ごとの気温	カルマンフィルター
発雷確率	<u>前3時間の発雷確率</u>	ロジスティック回帰

¹ 高田 伸一

² TAF-L(長距離飛行用飛行場予報、予報時間は9から27時間後)を支援するガイダンス。

³ TAF-S(短距離飛行用飛行場予報、予報時間は0から9時間後)を支援するガイダンス。

求めている。

新TAF-Gは、MSMの予測精度の向上および手法の一部変更により、各予測要素とも平均的には旧TAFL-Gの精度を上回っている。以下では、種類ごとに予測手法の概略、精度検証結果、利用上の留意点について述べる。なお、気温および風については第3.3節と第3.4節の中で解説されているため、ここでは省略する。

3.8.2 視程ガイダンス

視程ガイダンスは、旧TAFL-Gでは前3時間最小視程と5000m未満の視程確率、旧TAFS-Gでは前1時間最小視程を予測していた。両者ともカルマンフィルターを利用していたが、説明変数等の違いがあった。新TAF-Gでは、基本的には旧TAFS-Gの手法を引き継ぐ。予測要素は、旧TAFS-Gの前1時間最小視程に加え、旧TAFL-Gの要素であった5000m未満の視程確率、さらに平均視程と1600m未満の視程確率を追加した。

(1) 予測手法

目的変数として利用する視程観測はMETAR⁴とSPECI⁵で通報された目視観測から求めている。最小視程は、この通報から算出した前1時間の最小視程を目的変数として予測する。平均視程は、前1時間の最大視程を目的変数とした予測を行い、最小視程予測との平均によって求めている。視程確率の目的変数は、視程が基準未満か否かの二値変数(0/1)である。

各要素とも基本的には同じ予測手法を使っている。数値予報から作成する説明変数は、以下の3個としている。

- ・ $(1-RH)^{1/2}$ RH: 地上相対湿度(100%を1)
- ・ $R^{1/2}$ R: 前1時間降水量(mm)
- ・ $T \times FF$ T: 地上気温(°C)、FF: 地上風速(m/s)

1番目はエロゾルの粒径の湿度依存性、霧の発生をターゲットとしている。2番目の降水量は降ってくる雨、雪をターゲットとしている。最後の $T \times FF$ は地吹雪の効果を期待したものであり、気温がプラスの時にはゼロとしている。これらの説明変数を使って、天気ごとに以下の予測式を使っている。

- ・ 無降水 $C_0 + C_1(1-RH)^{1/2}$
- ・ 雨 $C_0 + C_1(1-RH)^{1/2} + C_2 R^{1/2}$
- ・ 雪 $C_0 + C_1(1-RH)^{1/2} + C_2 R^{1/2} + C_3 (T \times FF)$

各天気の予測のうちどれを採用するかは、後述する天気ガイダンス(第3.8.4項)によって決定している。上式の $C_0 \sim C_3$ は係数であり、カルマンフィルターを用いて3時間ごとに更新しているが、予測と観測の天気が一致した場合のみ行う。これにより各天気での説明変数と目的変数の関係を明確に表現でき、また数値予報の大外れによる不適切な係数更

⁴ 定時飛行場実況気象通報式

⁵ 特別飛行場実況気象通報式

新をある程度防ぐことができる。ただし、確率に関しては正しい確率を導くために天気の外れた場合も係数を更新している。なお、係数は空港ごとに変えている。

全予測要素とも、予測の頻度を観測の頻度に近づける頻度バイアス補正を行っている。この頻度バイアス補正も空港ごと、天気ごとに行っている。

旧 TAFS-G は、天気層別化導入の際に時刻別層別化を廃止した（高田ほか 2005）。しかし、MSM の地上湿度には時刻毎に異なった誤差傾向があり、これにより夜間に悪視程の予測頻度が多くなりすぎるといった悪影響を与えていた。このため、無降水の予測式に限って、再び時刻別層別化を行うこととした。具体的には、新 TAF-G は無降水の予測式のみ 3 時間ごと（01-03,04-06, ..., 22-00UTC ごと）に異なった係数を持つ。

視程確率も天気ごとの予測式を持っているが、確率の信頼度を上げるために、以下の 2 つの処理を加えている。

- ・ 視程確率は 3 時間幅の予測であり、3 つの 1 時間卓越天気がある。3 つの天気が同じ場合と異なる場合には確率は違うと考えられるため、各 3 つの天気の前予測確率を平均して予測値としている。
- ・ 3 時間幅の 3 つの天気全てが無降水であっても、その前後に降水が予測されている場合には確率は高くなると考えられる。そこで前後の±2 時間に雨（雪）が予測されていた場合、無降水と雨（雪）の前予測確率を平均している。

これらの処理はテクニカルであり、平均化処理の根拠は弱い。今後は条件付確率の処理を入れること、説明変数に前後の降水量予測を入れること等を検討する。

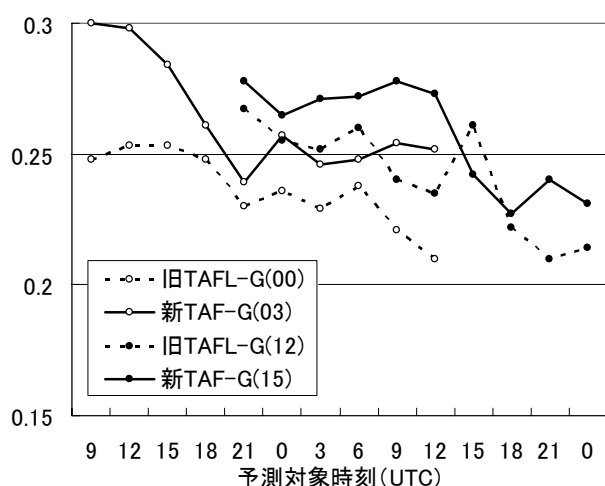


図 3.8.1 前 3 時間最小視程予測のスキルスコア

新 TAF-G の 03,15UTC 初期値、旧 TAF-G の 00,12UTC 初期値の予測を各時刻で検証した結果。スキルスコアは 800,1600,3200,5000m の閾値で分けた 5×5 分割表で計算している。検証期間は 2006 年 7 月～2007 年 6 月の 1 年間、検証地点は国内 75 空港。

(2) 精度検証

まず廃止された旧 TAF-G との比較検証を示す。2007 年 5 月 16 日に運用開始した MSM は、開発時を含めると 2006 年 7 月から継続的に予測結果があることから、2006 年 7 月～2007 年 6 月までの 1 年間で比較検証を行った。旧 TAF-G は 2007 年 5 月 16 日に廃止されたため、その後 1 か月半はルーチンと同様に作成した結果を使っている。旧 TAF-G は 3 時間最小視程と 5000m 未満の視程確率を予測しており、この 2 要素で新 TAF-G と比較検証を行った結果を示す。

図 3.8.1 は、前 3 時間最小視程予測において 5000, 3200,1600,800m の閾値で 5×5 分割した表から計算したスキルスコアで、予測対象の国内 75 空港⁶の全事例をまとめて計算している。旧 TAF-G の 00,12UTC 初期値と新 TAF-G の 03,15UTC 初期値のスキルスコアを時刻別に表示している。夜間に観測を行っていない空港が多いこと、時刻ごとに悪視程の出現率が異なるのでスムーズな線とはならないが、予報時間が進むにつれて次第に精度が落ちる傾向が出ている。03(15)UTC 初期値の新 TAF-G に対応するのが 00(12)UTC 初期値の旧 TAF-G であるが、ほぼ全ての時刻で新 TAF-G が旧 TAF-G を上回っていることがわかる。なお、図は 1 年を通してのスコアであるが、新 TAF-G の旧 TAF-G からの精度向上率は、寒候期で大きく暖候期では小さい。

図 3.8.2 には、5000m 未満視程確率(%)の各確率

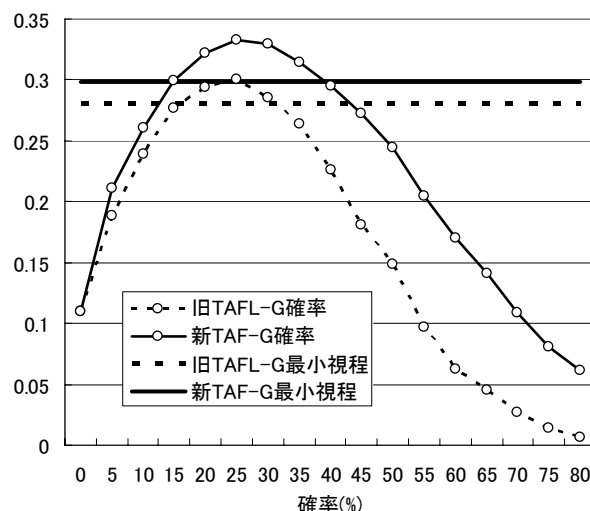


図 3.8.2 5000m 未満視程確率(%)の各確率を閾値として、視程が 5000m 未満か否かを予測した場合のスレットスコア（曲線）

参考に前 3 時間最小視程予測(m)で予測した場合のスコア（一定値）を直線で示す。対象時刻を合わせるため、新 TAF-G は 03,15UTC 初期値の 6-33 時間予測、旧 TAF-G は 00,12UTC 初期値の 9-36 時間予測でスコアを計算している。検証期間と地点は図 3.8.1 に同じ。

⁶ 予測対象空港は 76 空港であるが、三宅島空港は現在目視観測がないため、75 空港で検証する。以下の検証でも同様。

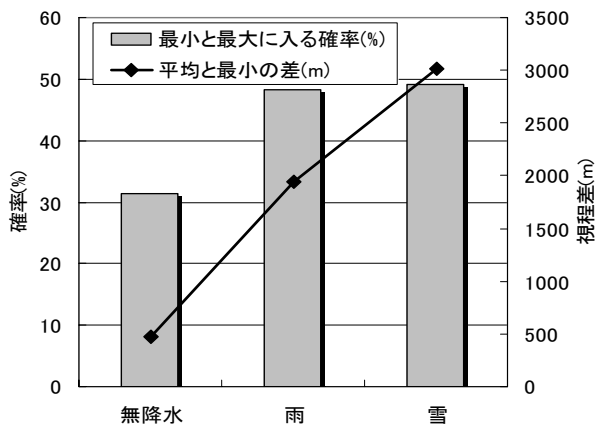


図 3.8.3 前 3 時間平均視程予測と最小視程予測の標準的な差、最小視程予測が 5000m 未満の時に観測視程が最小と最大視程予測に入る確率
最大視程は平均 + (平均 - 最小) により求めている。
検証期間と地点は図 3.8.1 に同じ。

を閾値として、視程が 5000m 未満か否かを予測した場合のスレットスコアの変化を曲線で示してある。参考に前 3 時間最小視程予測(m)により 5000m 未満か否かを予測したスレットスコア（一定値）も図示している。視程確率予測、前 3 時間最小視程予測とも新 TAF-G の精度は旧 TAFL-G を上回っている。また視程確率が 20-35% のスレットスコアは、前 3 時間最小視程予測（直線）を上回っている。

以上は 3 時間最小視程について、旧 TAFL-G と比較した検証結果である。元々の予測対象である 1 時間最小視程についての検証も別途行っている。紙面の都合で結果は省略するが、上記のスキルスコアは 3 時間最小視程とほぼ同じであり、予報時間と共に次第に精度が落ちる傾向も同じである。また、旧 TAFS-G（1 時間最小視程を予測）との比較検証では、精度の変化はほとんどない。

新 TAF-G では、新たに平均視程を予測している。図 3.8.3 は天気ガイダンスが無降水、雨、雪での最小視程と平均視程の標準的な差（平均と最小の差を二乗和して平均し、平方根を取った値）を示している。無降水では 500m の差であるが、雨で 2000m、雪で 3000m と降水時には視程の変動を大きく予測している。無降水時では、差は 500m と小さく、視程予測の標準的な誤差（約 2km）を考えると平均視程の利用価値は小さいと考えられ、主に雨・雪での利用となろう。図には最小視程の予測が 5000m 未満の時に、観測の視程が最小視程と最大視程（平均視程×2-最小視程）の間に入る確率も示している。雨と雪は 50% の割合なのに対し、無降水では 30% に留まっている。

なお、ここでの検証結果は RSM を側面境界にした現 MSM による検証結果である。2007 年 11 月からは高解像度全球モデル(20kmGSM)が側面境界になるため、この影響の調査も行った。夏・冬約 1 か月ずつの検証ではあるが、精度は夏に同程度、冬はやや向上するという結果が出ている。

(3) 利用上の留意点

- ・ 視程ガイダンスは、天気ガイダンスを使って無降水・雨・雪の 3 つの予測のうち 1 つを選択している。よって、天気ガイダンスの天気予測が外れると判断した場合には視程予測を変える必要がある。例えば実況の雨域が予測より遅い場合に悪視程予測も遅らせたり、地上気温が予測より低く経過し雨が雪になると判断した場合に下方修正するなどの修正をして頂きたい。
- ・ 無降水時の予測は数値予報の湿度のみを説明変数としている。よって数値予報で高湿度を予測できていない場合には、悪視程を予測することはできない。特に放射霧、移流霧は数値予報で表現できていない場合が多く、精度は低い。
- ・ カルマンフィルターを使って予測式を随時変化させているため、悪視程が続いた場合には悪視程が出やすい予測になっている。また、実況の後追いをするような悪視程予測となる場合もある。
- ・ 5000m 未満の視程確率 20-35% の範囲の確率値を閾値として、それ以上の場合に悪視程であると予測した場合には、最小視程予測のスレットスコアを上回る。確率も参考にして利用願いたい。また悪視程予測の捕捉率、空振り率を調整したい場合にも視程確率を利用できる。

3.8.3 雲ガイダンス

雲ガイダンスは、旧 TAFL-G が前 3 時間最低シーリング⁷時、旧 TAFS-G が前 1 時間最低シーリング時での 3 層の雲底高度と雲量を予測していた。手法は前者が診断法+カルマンフィルター（大林 2001）であったが、後者はニューラルネット（高田ほか 2005）と違いがあった。新 TAF-G は予報時間が延びた以外は旧 TAFS-G と同じである。前 3 時間最低シーリング時の雲も配信しているが、3 つの前 1 時間最低シーリングのうち最も低いものを選択している。手法等は TAFS-G を解説した高田ほか（2005）を参照願ひ、ここでは概略のみを示す。なお、シーリングの単位はフィート（以下 ft と記す）で表す。

(1) 予測手法

雲ガイダンスは、空港上空の 38 層の雲量を予測し、その 38 層の雲量を METAR の通報と同様に下層から検索することによって 3 層の雲底高度と雲量を抽出している。

予測ターゲットである目的変数は、前 1 時間の最低シーリング時における 38 層の雲量で、METAR、SPECI の目視観測から決定している。この通報には 3 層より上の情報はなため、3 層より上の雲は欠

⁷ 雲量 5/8 以上の最低雲底高度

測扱いとする。また観測には雲の厚さの情報はないので、雲の厚さは 2000ft と一定にしている。

数値予報から作成する説明変数は、MSM のモデル面のうち各 38 層に近い 3 つの面（最も近い面とそれを挟む 2 面）の湿度、および 850hPa と地上の気温差の 4 つである。後者の気温差は、夜に発生しやすい下層雲の精度向上を狙って導入している。

説明変数と目的変数を関連付ける予測手法は、ニューラルネットを利用しており、3 時間ごとに最新の観測を利用してニューラルネットの重みを変更している。また、視程ガイダンスと同様に、予測の頻度を観測の頻度に近づける頻度バイアス補正を行っているが、予測値を 2 倍以上、1/2 以下とするような過度なバイアス補正を行わないようにしている。なお、ニューラルネットの重みは各空港で変えているが、現在その他の層別化は行っていない。

(2) 精度検証

廃止された旧 TAFL-G との精度比較を示す。雲ガイダンスは、モデル面という特殊な出力値を使っているため、検証期間を長く取りにくい。ここでは、新 MSM の並行運用⁸が始まった 2007 年 4 月 17 日から 6 月 30 日までの検証を示す。旧 TAFL-G は 2007 年 5 月 16 日に廃止されたため、その後 1 か月半はルーチンと同様に作成した結果を使っている。

図 3.8.4 は、旧 TAFL-G、新 TAF-G の前 3 時間の最低シーリング予測において、各閾値でのスレツスコアとバイアススコアを示している。対象時刻を合わせるため、旧 TAFL-G は 00,12UTC 初期値の 9-36 時間予測、新 TAF-G は 03,15UTC 初期値の 6-33 時間予測に対するスコアである。検証は 75 空

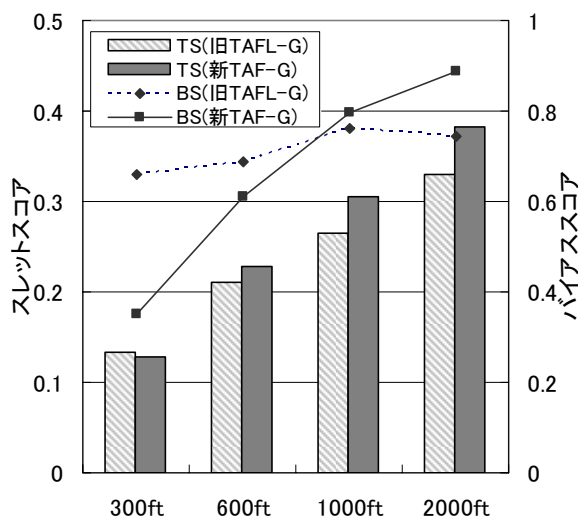


図 3.8.4 前 3 時間最低シーリング予測の各閾値でのスレツスコア (TS、棒グラフ) とバイアススコア (BS、折れ線グラフ)

検証期間は 2007 年 4 月 17 日～2007 年 6 月 30 日、検証地点は 75 空港。

⁸ 2007 年 5 月 16 日に運用開始した新 MSM と、それまで運用していた MSM との 1 か月の並行運用。

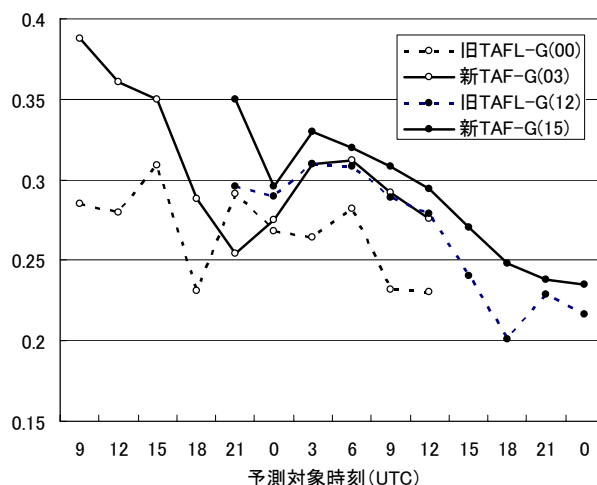


図 3.8.5 前 3 時間最低シーリングのスキルスコア

新 TAF-G の 03,15UTC 初期値、旧 TAFL-G の 00,12UTC 初期値を各時刻で検証した結果。スキルスコアは 300,600,1000,2000ft の閾値で 5 分割した表から計算している。検証期間と地点は図 3.8.4 に同じ。

港の全事例をまとめて行っている。スレツスコアをみると 300ft ではほぼ同程度であるが、その他は新 TAF-G が旧 TAFL-G を上回っている。300ft でスレツスコアが同程度なのは、新 TAF-G の 300ft のバイアススコアが 0.4 未満と低くなっているためである。これは空振りを減らすために頻度バイアス補正を抑制していることによる。

図 3.8.5 は、前 3 時間最低シーリングの予測において 300,600,1000,2000ft の閾値の 5×5 分割表から計算したスキルスコアである。旧 TAFL-G の 00,12UTC 初期値と新 TAF-G の 03,15UTC 初期値のスキルスコアを、対象時刻別に表示している。夜間に観測を行っていない空港が多いこと、時刻ごとに低シーリングの出現率が異なるのでスムーズな線とはならないが、予報時間が進むにつれて次第に精度が落ちる傾向が出ている。新 TAF-G は予報初期に精度が落ちやすいのが特徴であるが、予報時間が進んでも対応する旧 TAFL-G をほぼ上回っていることがわかる。

(3) 利用上の留意点

- ・ 雲ガイダンスは、空振りを減らすために過度な頻度バイアス補正を行わないようにしている。このため、数百フィートの低シーリングに対しては予報過少の傾向がある。
- ・ 雲ガイダンスは、時刻別層別化を行っていないため、時間的にやや緩慢な予測になっている。朝方に発生した低シーリングが日中に急速に回復するといった現象の際には、実況や現象の時間スケールを考えてメリハリを付けて頂きたい。

3.8.4 天気ガイダンス

天気ガイダンスは、旧 TAFL-G が RSM 天気予報ガイダンスの格子点値から抜き出した 3 時間の卓越

天気と降水強度を予測していた。一方、旧 TAFS-G はお天気マップ方式で 1 時間の卓越天気と降水強度を予測していた。新 TAF-G は予報時間が延びた以外は旧 TAFS-G と同じである。新 TAF-G は 3 時間の卓越天気も配信しているが、3 個の 1 時間の天気符号⁹のうち最大値を配信している。

(1) 予測手法

お天気マップ方式（第 3.9 節参照）で行っているが、以下の 2 点のみ異なる。

- ・ 雨雪判別の精度向上のために、地上気温には気温ガイダンス（第 3.3 節参照）の結果を利用している。
- ・ 降水強度の予測も配信している。降水強度を決める MSM の前 1 時間降水量(mm)の閾値は、以下の通りである。

	弱	並	強
雨	0.15～	1.5～	8.0～
雪	0.04～	0.4～	3.0～

(2) 精度検証

廃止された旧 TAFL-G との比較検証を示す。検証期間は視程ガイダンス（第 3.8.2 項）と同じ理由で 2006 年 7 月～2007 年 6 月の 1 年間としている。旧 TAFL-G は 2007 年 5 月 16 日に廃止されたため、その後 1 か月半はルーチンと同様に作成した結果を使っている。

図 3.8.6 は、飛行場予報の予報要素である並以上の降水があるか否かのスレツスコアである。旧 TAFL-G は 00,12UTC 初期値、対応する新 TAF-G は 03,15UTC 初期値の各対象時刻でのスコアである。検証は 75 空港の全事例をまとめて行っている。平均的には新 TAF-G は旧 TAFL-G に比べて精度が向

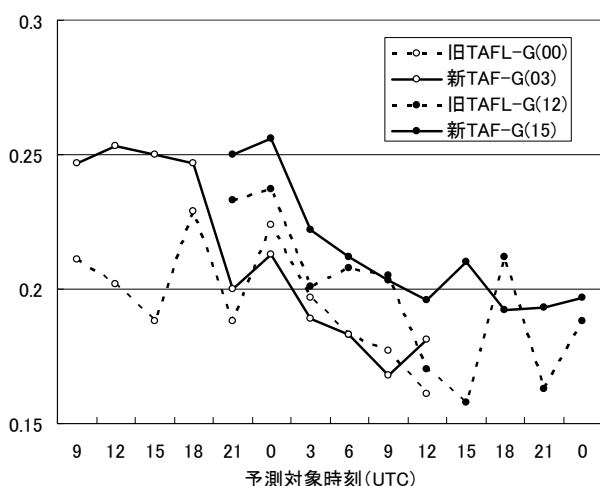


図 3.8.6 前 3 時間に並以上の降水があるか否かのスレツスコア
初期値ごとに各時刻で検証している。2006 年 7 月から 2007 年 6 月の 1 年間、75 空港の全事例をまとめてスコアを計算している。

上している。新 TAF-G はお天気マップ方式で統計手法を使っていないにも拘わらず精度が向上しているのは、利用している MSM の降水量の予測精度が高いためと考えられる。ただし、03UTC 初期値による翌日 00UTC 以降の予測は、旧 TAFL-G に比べてやや精度が落ちている。なお、弱い降水では全予報時間において、新 TAF-G の精度が旧 TAFL-G の精度を大きく上回っている（図略）。

新 TAF-G は、気温ガイダンスを利用して雨雪判別の向上を図った。2006 年 10 月～2007 年 3 月の寒候期で雪、みぞれ、雨の 3×3 分割表からスキルスコア（降水あり／なしが適中した場合における）を全 75 空港で調査したところ、0.561（旧 TAFL-G）から 0.742（新 TAF-G）へと、精度が大きく向上している。

3.8.5 発雷確率ガイダンス

雷雲は航空機の離発着に大きな影響を与えるにもかかわらず、今まで航空気象予報ガイダンスに発雷ガイダンスはなかった。平成 12 年に雷監視システム(LIDEN)が整備されて全国的な発雷データが蓄積されたこと、平成 16 年に導入された非静力学 MSM の予測データが蓄積されたことにより、新たに LIDEN による発雷データと MSM 予報値を使った発雷確率ガイダンスを開発した。

発雷確率ガイダンスは、飛行場予報のみならず、空域予報、一般予報にも利用できるように 20km 格子で予測する。航空気象予報ガイダンスでは、この格子点予測値から飛行場が含まれる格子の値を取り出して配信している。

(1) 予測手法

発雷確率は、統計手法としてロジスティック回帰を採用した。これは目的変数が 0,1 の二値データに適していると言われており、以下の式で重回帰を行う方法である(Agresti 2003)。

$$\ln(P/(1-P)) = C_0 + C_1X_1 + \dots + C_nX_n$$

ここで、P は求める発雷確率、C は重回帰係数、X は説明変数である。これは発雷の対数オッズ比 $\ln(P/(1-P))$ を目的変数とした線形重回帰と言える。SSI などの大気安定度は発雷確率とは非線形の関係にあるが、この対数オッズ比を目的変数にすることにより SSI との関係をほぼ線形にできる（図略）。

説明変数は、まず表 3.8.2 で示した 16 個の説明変数の候補（仮予測因子）を用意しておき、格子ごとに AIC¹⁰と分枝限定法（今野ほか 1982）を用いて重要と判断されたものを最大 5 個採用する。この説明変数の選択とその係数決定は、2004 年 3 月～2007 年 2 月の 3 年間で行っており、固定である。なお表には最も有効として判断された順（重回帰式作成においてより早く選択された数が多い順）に説明変数を並べている。過去から発雷予測に有効として知ら

⁹ 国際気象通報式の現在天気の符号

¹⁰ 赤池情報量基準

表 3.8.2 発雷確率ガイダンスの説明変数の候補

最も有効と判断された順に並べてある。数値に単位がないものは気圧で hPa を省略している。T は気温、TD は露点温度を示す。

SSI (ショワルターの安定指数)
SSI (925-700)。925-700 で計算した SSI
CAPE (対流有効位置エネルギー)。925 から持ち上げ
LNB (浮力がなくなる高度)。925 から持ち上げ
Total Totals(T850+TD850-2・T500)
925 と 700 の相当温位の差 (対流不安定)
K-index(T850+TD850-T700+TD700-T500)
925,850,700,600,500 の平均上昇流
CIN (対流抑止エネルギー)。925 から持ち上げ
500 の渦度 (200km 平均)
925 の相当温位傾度と風の内積
925 の比湿
850 と 500 の鉛直シア
925 の比湿×風の収束
925 の風の収束
-10℃高度

れている SSI が、主に予測に効いていることがわかる。

予測式は格子ごとに作成しており、その他に以下の層別化を行っている。

- ・ -10℃高度：1-3km、3-5km、5km- (1km 未満は全て 0%とする)
- ・ 対象時刻：-10℃高度が 5km 以上の場合のみ 6-12UTC と 12-3UTC の 2 つに分けている (12UTC の予測は両者の平均)
- ・ 予報時間：6-9 時間後、12-15 時間後、18-33 時間後

-10℃高度が 1-3km では主に冬季雷を、5km 以上では主に夏の雷を、3-5km では主に春と秋の界雷をターゲットにしている。-10℃高度が 5km 以上の場合には、午後の熱雷を区別するために対象時刻を 2 つに分けている。

(2) 発雷観測 (目的変数) について

目視観測との比較調査から、LIDEN には発雷の見逃し、空振りがあることがわかっている。この見逃しと空振りを減らすように LIDEN に対して以下の処理を行っている。

- ・ LIDEN の標定位置から 20km 以内で、標定時刻の±10 分以内に強度が 1mm/h 以上のレーダーエコー (10 分毎、1km 格子の全国合成レーダーデータを使用) がない場合、LIDEN の標定を誤りとする。
- ・ LIDEN で標定していなくても地上気象観測原簿、METAR/SPECI の飛行場観測で発雷を観測していれば発雷ありとする。地上気象観測からは記事の発雷の方向、距離を用いて発雷位置を決定する。
- ・ LIDEN は低高度で放電する冬季雷の見逃しが多い。このため、レーダーエコー頂高度が

4km 以下 (冬季雷をターゲット)、レーダーエコー強度が 9mm/h 以上、レーダーエコー頂高度の気温が-20℃未満で-10℃高度が 1.5km 以上、SSI(925-700)が-0.7 以下の条件全てが満たされた場合に発雷ありとする。ここで気温、SSI(925-700)の観測はないので、MSM から推定した値とする。

このようにして作成した発雷データの有効性を調べるために、上記で METAR/SPECI を使わずに作成した発雷データを METAR/SPECI で検証してみた。調査の結果、LIDEN の見逃しは約 5-20%減 (冬で 20%減)、空振りは約 10%減となっており、より適切な目的変数に修正できている。

発雷確率は地域確率 (地域のどこかで現象が起きる確率) であり、その確率値は面積に依存する。航空気象予報では空港周辺 20km の発雷に対して情報を発表するため、40km 四方位程度の地域確率が適当である。ただし、面積を変えて実験した結果、より広い地域確率とした方が発雷確率予測のメリハリが付いたこと、雷雲から 10km 以上離れた場所へも落雷する例があることから、やや広めの 60km 四方の地域確率とした。具体的には、発雷確率は 20km 格子ごとに作成するが、予測式は周辺 8 格子の発雷も含めて作成している。

(3) 精度検証

現 RSM 発雷確率ガイダンスと比較検証し、その特徴を示す。検証期間は視程ガイダンス (第 3.8.2 項) と同じ理由で 2006 年 7 月~2007 年 6 月としており、検証方法は以下のとおりである。以降では現 RSM ガイダンスを RSM-PoT、今回開発した MSM を用いたガイダンスを MSM-PoT と呼ぶ。

- ・ MSM-PoT は、2004 年 3 月~2007 年 2 月の 3 年間で作成されているため、2006 年 7 月から 2007 年 2 月までは従属期間の検証となってしまう。そのため 2004 年 3 月~2006 年 2 月の 2 年間で作成した予測式を別途用意し、当期間の検証はこの予測式で行う。
- ・ 00,12UTC 初期値の RSM-PoT と 03,15UTC 初期値の MSM-PoT を比較する。予測対象時刻を合わせるため、RSM-PoT の 9-36 時間後の予測と MSM-PoT の 6-33 時間後の予測を比較する。

図 3.8.7 は、両ガイダンスの各確率予測の回数と信頼度である。MSM-PoT は高い確率値を多く出すようになっていることがわかる。高確率が多くなるものの、MSM-PoT の信頼度は RSM-PoT の信頼度を大きく改善している。これは MSM-PoT が LIDEN を使って格子ごとに予測式を作成しているのに対し、RSM-PoT は東京電力から提供された関東中部地方での発雷データを用いて全国で同じ予測式としていくことが主な理由と考えられる。実際、事例検証からは RSM-PoT は北海道や沖縄で不自然な確率となる場合が多い。なお、図は省略するが、MSM-PoT

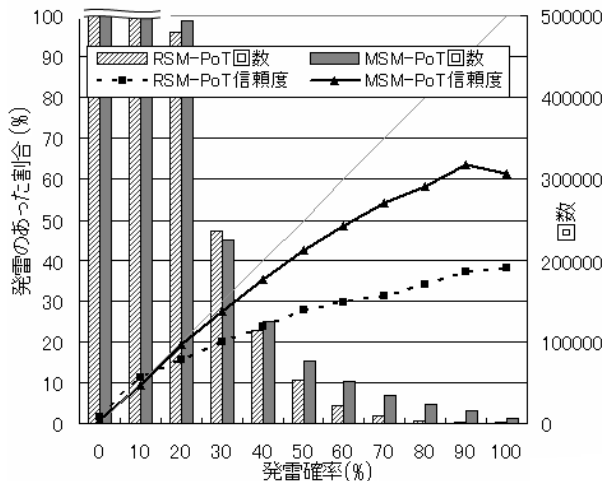


図3.8.7 MSM発雷確率ガイダンスとRSM発雷確率ガイダンスの信頼度と各確率の予測回数
検証は2006年7月～2007年6月の期間で、日本付近の2566格子で行っている。

は春に信頼度が低いこと、予報時間が進むにつれて信頼度が低下することがわかっている。

図3.8.8は、各確率を閾値として発雷ありとした場合の捕捉率（発雷予測の適中数／全発雷数）と空振り率（発雷予測が外れた数／発雷予測数）を示している。MSM-PoTはRSM-PoTに比べて捕捉率が増加し、かつ空振り率が減少して、精度が大きく向上していることがわかる。ただし、50%を閾値とした場合に捕捉できている発雷は15%程度であり、20%を閾値とした場合でも45%程度の捕捉率である。依然として実況監視に基づく対応が必要であることを示している。

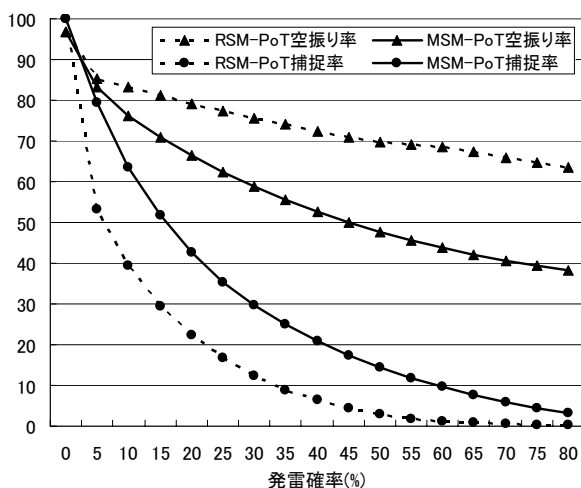


図3.8.8 各確率以上で発雷ありとした場合の空振り率と捕捉率（%）
検証期間、格子は図3.8.7に同じ。

(4) 利用上の留意点

- ・ MSM-PoTはRSM-PoTに比べて高い確率を多く出し、かつ信頼度は高まっている。ただし、80%以上でも実際に発雷する割合は60%

程度に留まっている。特に春や予報時間が先の場合に、信頼度が低い傾向がある。

- ・ MSM-PoTの20%を閾値として発雷ありとした場合に捕捉できている発雷は45%に留まっており、今後も実況監視による対応が必要である。
- ・ MSM-PoTの格子点値を面的・時間的にみることによって、確率の信頼性や高確率の要因がわかる。配信している地点予測だけでなく、平面的な格子点値も参照願いたい。
- ・ MSM-PoTは格子ごとに予測式を持っている。またMSMは積雲対流のパラメタリゼーションの作用で格子ごとの大気安定度の変動が大きい場合がある。このため周辺とかけ離れた確率値を出すことがある。この場合信頼度は低いと考えられ、旧初期値の予測との平均、周辺との平均処理を行うことも必要である。

参考文献

- 今野浩，鈴木久敏，1982：整数計画法と組合せ最適化．日科技連，48-80.
- 大林正典，2001：航空気象予報支援資料．平成13年度数値予報研修テキスト，気象庁予報部，47-49.
- 高田伸一，工藤淳，新美和造，2005：航空気象予報．平成17年度数値予報研修テキスト，気象庁予報部，49-62.
- Alan Agresti(渡辺ほか訳)，2003：カテゴリカルデータ解析入門．サイエンティスト社，141-187.

3.9 お天気マップ¹

3.9.1 判別アルゴリズム

お天気マップ（瀬上 1992）は数値予報モデルの出力を分かりやすく表示するために開発され、アルゴリズムの改良後、1993 年 3 月に L/A 端末上で利用が可能となった（萬納寺 1994）。

お天気マップの判別アルゴリズムは図 3.9.1(a)(b)の通りであり、閾値は固定で予報特性に変化が無い。お天気マップは、逐次学習により予報特性が変化する天気ガイダンスと比較するための重要な資料として利用されている。

2007 年の数値予報モデルの更新により、雲量・降水の予報特性が大きく変わる。そのため、従来の判別閾値では、お天気マップの特性が大きく変わる。特に「曇り」の予報がほとんどなくなってしまう状況を改善するために閾値を見直した。新閾値によるお天気マップは、統合ビューワの改修後に利用可能となる。

3.9.2 モデルの予報特性とお天気マップへの影響

モデルの更新により(1)降水特性の違い、(2)雲量の違いにより、お天気マップの表現が大きく変わる。モデルの特性の違いは、平成 18 年度数値予報研修テキストで詳しく述べられており、ここではお天気マップへの影響を確認しておく。

(1) 降水特性の違い

20kmGSM では、夏季の日中の不安定性降水を早い時間から広い範囲で予報する傾向がある。また、1mm/6h 以下（80km 格子平均）の弱い雨の予報頻度は、夏冬ともに実況よりも多くなっている（坂下 2006）。つまり、旧閾値を利用すると「雨」や「雪」の領域が広がる。

一方、MSM では、静力学 MSM から非静力学 MSM への変更（2004 年 9 月）に際して、弱い降水の予報頻度が小さくなっている（田中 2004）。旧閾値では、既に観測に比べて「雨」や「雪」の領域が狭くなっていたと考えられる。

(2) 数値予報モデルによる雲量の違い

20kmGSM 及び MSM（2007 年 5 月から運用が開始された MSM）による雲量は、RSM 及び旧 MSM（2007 年 5 月まで運用を行っていた MSM）と算出手法が異なるため、雲量を少なく予報する頻度が多くなる（小森・北川 2006; 原 2006）。そのため、旧閾値を利用したお天気マップでは、曇りの領域がほとんどなくなり、晴れの領域が多くなる。

¹ 安藤 昭芳

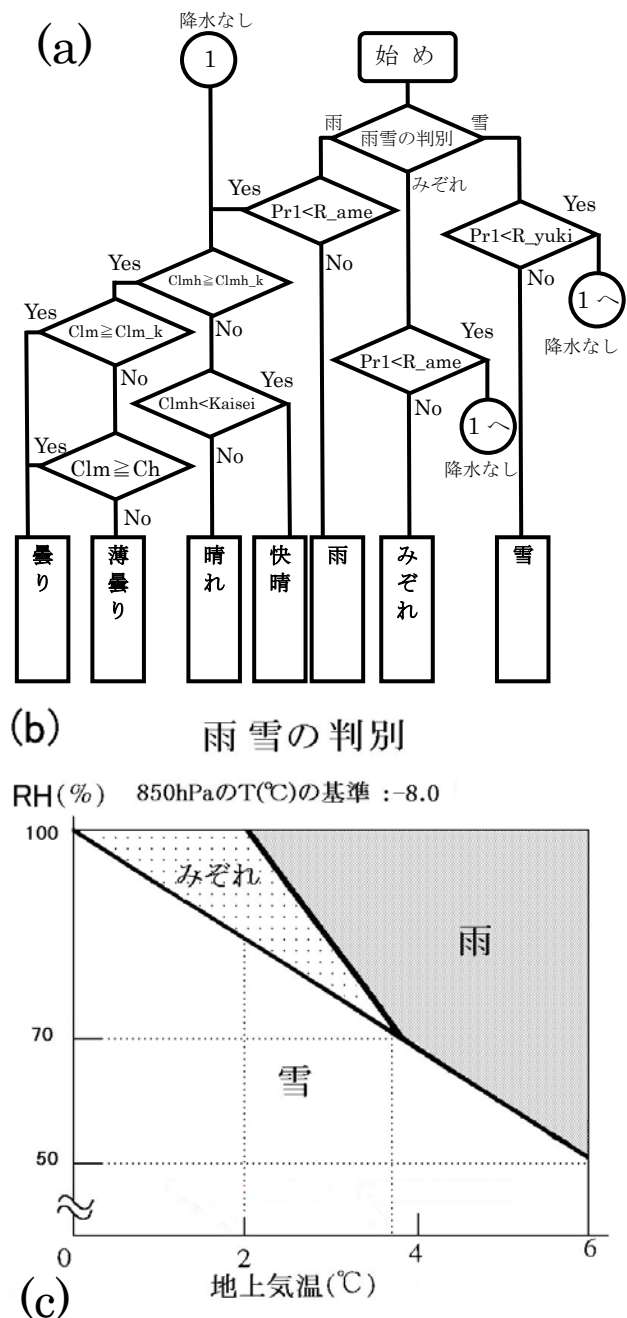


図 3.9.1 お天気マップのアルゴリズム。(a)天気判別のアルゴリズム。(b)雨雪判別のアルゴリズム。850hPa の気温が-8℃以下であれば雪。-8℃以上は図(b)に従って、雨・みぞれ・雪を判別する。(c)判別の閾値。Pr1:前 1 時間降水量、Cl:下層雲量、Cm:中層雲量、Ch:上層雲量、全雲量:Clmh=1-(1-Cl)(1-Cm)(1-Ch)、中下層雲量:Clm=1-(1-Cl)(1-Cm)。雨雪判別は Matsuo et al.(1981)に基づく。

3.9.3 統計的検証と新しい閾値

(1) 新しい閾値

試験期間²のモデル予報値と日本国内の地上観測（目視観測）を利用して、図 3.9.1(c)の新閾値を決定した。新閾値は地上観測とお天気マップの予報頻度が同程度になる値を採用している。曇り・晴れの判別に利用する旧閾値は、雲量 10 分の 9 以上を曇りとするなど地上観測の閾値と同じであったが、新閾値では異なる。また、地上観測の「前 1 時間に降水があった（地上気象通報式の現在天気 20 番台）」は降水なしとして扱っている。

(2) 曇り・晴れの統計的検証³

図 3.9.2 に、お天気マップの検証結果を示す。曇りのバイアスコアは、旧 MSM と RSM では 1 以上であり、曇りの予報頻度が過多である。一方、旧閾値を利用した MSM と 20kmGSM では、0.5 程度以下と極めて小さくなり、予報頻度が過少になる。これは、雲量の算出方法が異なり、従来よりも雲量を少なく予報する頻度が多くなっているためである。新閾値では、バイアスコアを 1 程度になるように調整している。スレトスコアは、MSM と旧 MSM、新閾値による 20kmGSM と RSM がほぼ同程度となっている。

(3) 降水の有無の統計的検証

降水の有無のバイアスコアは、旧閾値を利用すると MSM は 0.8 以下、20kmGSM は 1.2 以上であり、予報頻度が MSM では過少、20kmGSM では過多である。MSM では、閾値を 0.1mm/h 以下にした場合でもバイアスコアに大きな変化が無かったことから、新閾値に 0.1mm/h を採用した。新閾値でも、地上観測に比べて予報頻度は少ない。

スレトスコアは、新閾値を利用した MSM は、旧 MSM より良い。また、20kmGSM は RSM より精度が高く、どちらのモデルも降水の有無の判別精度が向上している。但し、第 1.2 節の降水検証で示されているように、予報初期は 20kmGSM の予報精度が低い。お天気マップも予報初期だけを検証すると、降水の有無の精度が悪くなっている。

(4) 適中率

図 3.9.3 は、お天気マップの適中率である。MSM は、7 階級（快晴・晴れ・薄曇り・曇り・雨・みぞれ・雪）の適中率は若干の改悪となっているが、3

階級（晴れ・曇り・降水あり）では改善している。7 階級で改悪となっているのは、薄曇りの予報精度が悪いためである。薄曇りと晴れの判別精度は重要性が低いことから、判別精度向上のための閾値の微調整は行なわなかった。20kmGSM は、7 階級と 3 階級のどちらも RSM の適中率を改善している。

(5) お天気マップによる予報頻度

新閾値を利用した MSM 及び 20kmGSM によるお天気マップによる各天気カテゴリーの出現頻度と、対応する時刻の地上観測の観測頻度を比較したのが図 3.9.4 である。20kmGSM では、快晴、曇りの予報頻度が実況に比べてやや多く、晴れの予報頻度が少ないが、実況と予報で頻度が極端に異なることは無い。一方、MSM では、快晴、晴れの予報頻度が少なく、薄曇りの予報頻度が観測に比べて非常に多い。MSM お天気マップの薄曇りの予報に対しては、この点に留意して利用して欲しい。

3.9.4 予報例

図 3.9.5 にお天気マップの例を示す。RSM では曇りの領域が広い。統計検証で曇りの予報頻度が過多であるとの結果に対応する。一方、旧閾値を用いた MSM と 20kmGSM では、曇りの領域が狭く、衛星画像との対応もよくない。新閾値を利用すると曇りの領域が広がり、衛星画像との対応が良くなる。日本付近の雨や雪の領域は、曇りの領域ほどにはモデルや閾値によって大きく変化していない。

3.9.5 利用上の留意点

お天気マップの「雨」と天気ガイダンスの「雨」は、どのように違うのか確認しておく。お天気マップの降水の有無は、地上観測では観測時刻の降水の有無に対応する。一方、天気ガイダンスは、前 3 時間の卓越天気として、雨では 1mm/3h、雪では 0.5mm/3h の降水の有無である。モデルやガイダンスが「1（雨の場合）または 0.5mm/3h（雪の場合）未満であるが、降水がある」と予報した場合には、お天気マップと天気ガイダンスは、一致しなくなる。

また、お天気マップの閾値は、日本国内の地上観測から決定し、全国一律である。地上観測地点の多くは、平野部に存在するため、山間部や海上、日本から遠く離れた地域では適切な閾値となっていない可能性があり、精度は劣るであろう。

雨雪判別は地上気温、地上湿度、850hPa 気温のみで判断を行っている。地上気温はモデルによる地上気温予想を利用しており、気温ガイダンスを利用している天気ガイダンスより精度が悪いと考えられる。

お天気マップは、これらの点に留意して利用して欲しい。

² 20kmGSM は 2004 年 8 から 9 月と 2005 年 12 月から 2006 年 1 月の 4 か月間、MSM は 2006 年 7 月から 2007 年 4 月の 10 か月間（境界値は RSM）を利用した。

³ 曇り・晴れの検証では、降水がある場合は曇り、薄曇り・快晴は晴れに分類して検証を行っている。

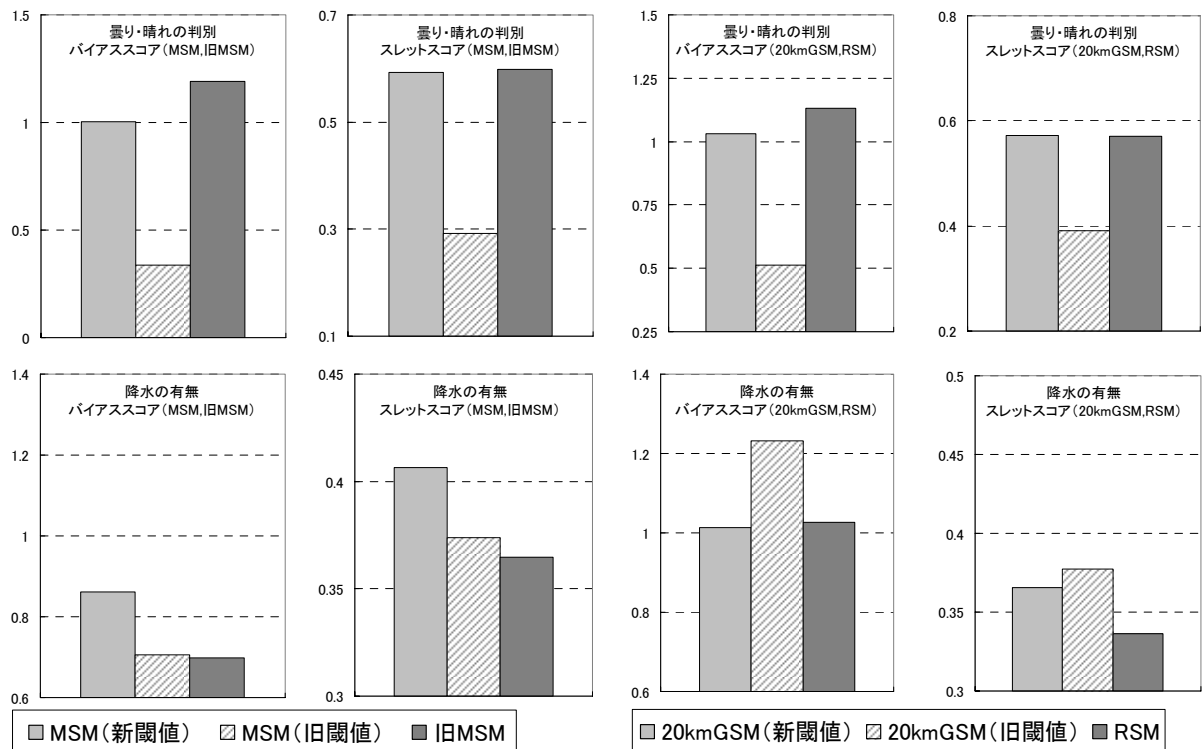


図 3.9.2 新旧閾値による MSM、旧 MSM、20km GSM、RSM によるお天気マップの検証結果。上段は曇り・晴れの判別、下段は降水の有無の検証結果。左 2 列が新旧 MSM、右 2 列が 20kmGSM と RSM。それぞれ左がバイアススコア、右がスレットスコア。MSM は 03,09,15,21UTC 初期値による 3 から 15 時間予報の検証結果。20kmGSM と RSM は、00,12UTC 初期値による 3 から 51 時間予報の検証結果。曇り・晴れのバイアススコアは 1 以上が曇りの予報が過剰。検証期間は、MSM は 2006 年 7 月から 2007 年 4 月の 10 か月間（境界値は RSM）、20kmGSM と RSM は 2004 年 8 から 9 月と 2005 年 12 月から 2006 年 1 月の 4 か月間。

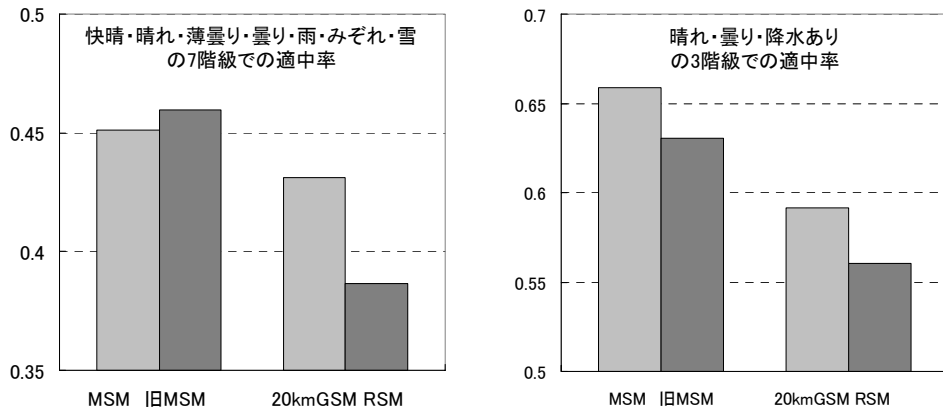


図 3.9.3 新閾値による MSM、旧 MSM、20kmGSM、RSM によるお天気マップの適中率。左は、快晴・晴れ・薄曇り・曇り・雨・みぞれ・雪の 7 階級に分類した場合の適中率。右は、晴れ（快晴・晴れ、薄曇り）・曇り・降水あり（雨・みぞれ・雪）の 3 階級に分類した場合の適中率。検証期間と対象時刻は図 3.9.2 と同じ。

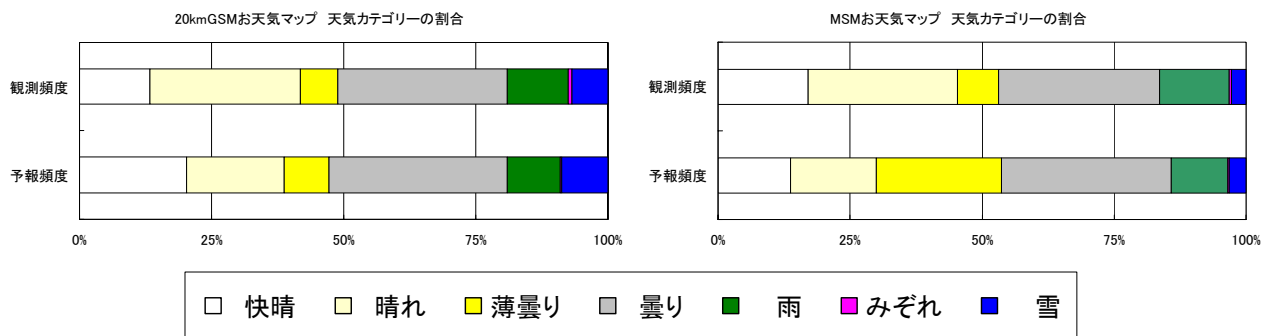


図 3.9.4 お天気マップによる各天気カテゴリーの出現頻度と、対応する時刻の地上観測の観測頻度。左は 20kmGSM、右は MSM。検証期間と対象時刻は図 3.9.2 と同じ。

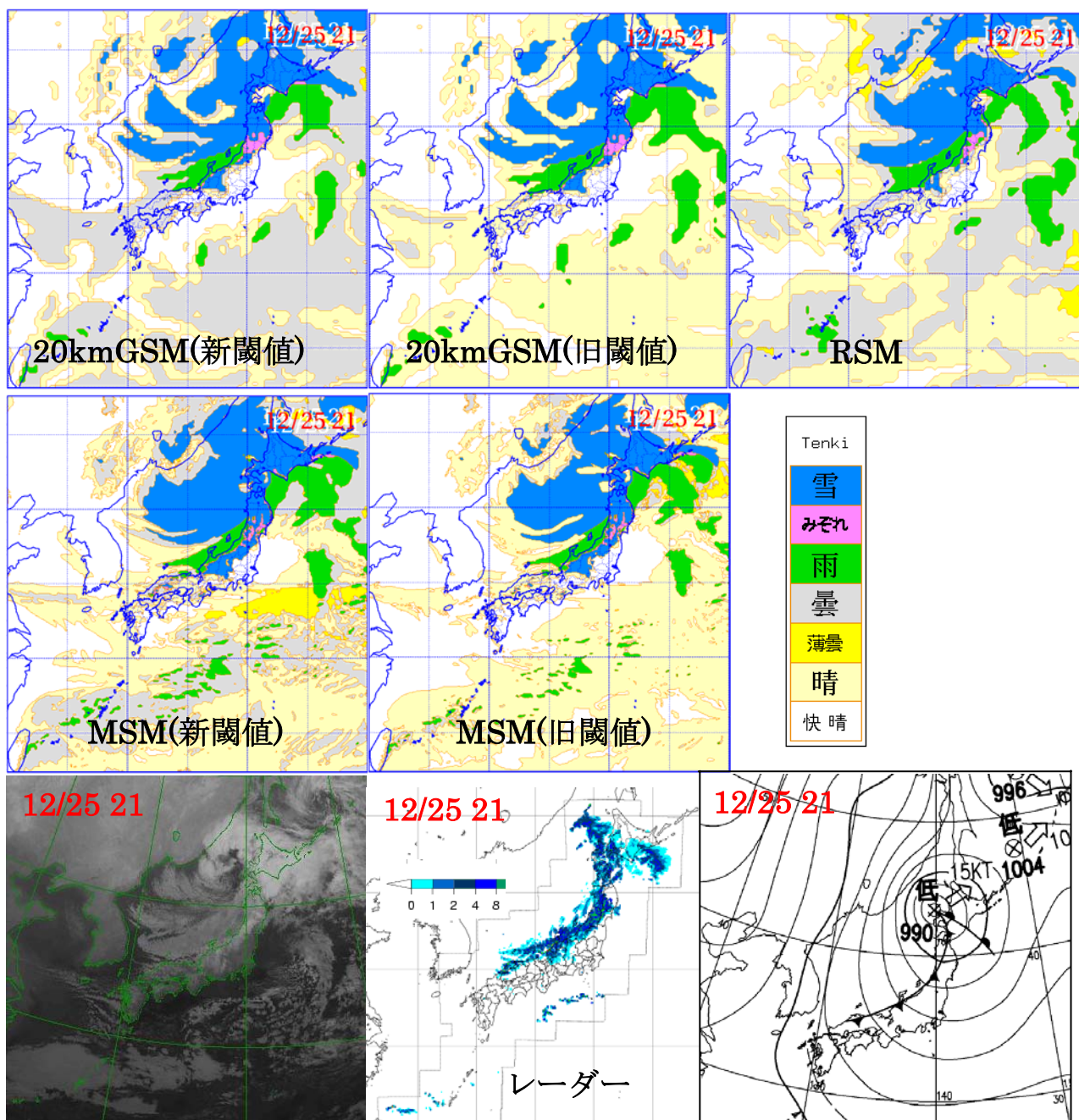


図 3.9.5 上段は、左から 20km-GSM 新閾値、旧閾値、RSM によるお天気マップ。2005 年 12 月 24 日 12UTC 初期値による 24 時間予報。中段は、左から MSM 新閾値、旧閾値によるお天気マップ。2005 年 12 月 24 日 15UTC 初期値による 21 時間予報。下段は対応する時刻(2005 年 12 月 25 日 21JST)の衛星赤外画像、レーダー画像及び地上天気図。

参考文献

- 小森拓也, 北川裕人, 2006: 20kmGSM と RSM の雲との特徴. 平成18年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 30-31.
- 坂下卓也, 2006: 全般検証. 平成18年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 14-19.
- 瀬上哲秀, 1992: お天気マップ. 平成4年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 69-81.
- 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, 11-17.
- 原旅人, 2006: 物理過程の改良とその効果. 平成18

年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 84-87.

萬納寺信崇, 1994: 数値予報の出口: 応用. 平成6年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 90-91.

Matsuo, T., Y. Sasyo and Y. Sato, 1981: Relationship between types of precipitation on the ground and surface meteorological elements. *J. Meteor. Soc. Japan*, **59**, 462-475.

第4章 トピックス

4.1 毎時大気解析の高度化¹

4.1.1 はじめに

毎時大気解析は客観解析による風と気温の3次元的な分布を示す実況監視資料である(西嶋 2004; 西嶋 2005)。解析は毎時に行われ、その結果は予報作業で用いられるとともに航空ユーザーにも提供されている。

2007年3月22日01UTC(日本時間10時)より、毎時大気解析の解析手法を従来の最適内挿法から3次元変分法に変更すると同時に、東京レーダーのドップラー速度²データの利用も開始し、精度向上を図った³。さらに、5月16日05UTC(日本時間14時)より、仙台、新潟、名古屋レーダーのドップラー速度データの利用も開始した。ここでは、毎時大気解析について行ったこれらの変更について述べる。

4.1.2 毎時大気解析の仕様

3月22日の変更前後の毎時大気解析の仕様を表4.1.1に示す。毎時大気解析では、第一推定値として解析処理開始時点で最新のメソ数値予報モデル(MSM)による予報値を用いる。MSMによる予報は3時間ごとに行われており、通常、毎時大気解析ではMSMの2~4時間予報が第一推定値として用いられる(図4.1.1)。解析は、MSMと同じ領域上で、水平方向には5km格子、鉛直方向には50層⁴で行われる。

同化される観測データは、アメダス(風・気温)、航空機自動観測(ACARS、風・気温)、毎時衛星風、ウィンドプロファイラ(風)、ドップラーレーダー(ドップラー速度)である。毎時大気解析は1日24回、毎時30分を目処にデータを配信するため、ウィンドプロファイラ以外の

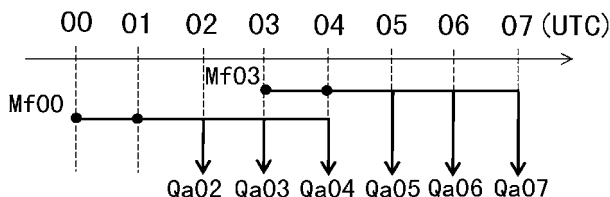


図4.1.1 毎時大気解析で通常用いられる第一推定値とMSM予報値の対応の模式図。例えば00UTC初期値のMSM(Mf00)による2時間予報値が、02UTCの毎時大気解析(Qa02)の第一推定値として用いられる。

¹ 藤田 匡

² ドップラーレーダーのビームに沿った方向の風速。

³ 空港気象レーダーによる観測データについては、従来VVP風(後述)に変換した上で同化していたが、これもドップラー速度の直接同化に変更した。

⁴ 解析はz*座標系で行われる。この座標系は2007年5月のルーチン変更より前のMSMで使われていたものである。現在のMSMでは一般鉛直ハイブリッド座標系が使われている(荒波・原 2006)。

観測のデコード処理は正時後15分に開始される。さらに、正時後20分までウィンドプロファイラデータの入電を待った後そのデコードを開始し、その後品質管理処理、次いで解析処理が実行される。

4.1.3 3次元変分法による毎時大気解析

毎時大気解析で用いる3次元変分法は、気象庁非静力学モデルに基づく変分法同化システム(本田 2007; Honda et al. 2005)⁵によるものである。

3次元変分法では、第一推定値、観測値それぞれからの乖離の度合いを示す評価関数の極小値を与える場を探索することで、解析値を求める(露木 1997; 露木 2002)。解析に用いる背景誤差は、分解能5kmのMSMによる予報誤差の統計をもとに、最適内挿法の予報誤差の設定に概ね対応するよう調整を行った。観測による修正の周囲への影響範囲のスケールは、地上で半径約25km、上空(地上以外)では半径約220kmに設定している。また、地上の修正と上空の修正との間の相関を0と置いており、地上と上空の解析はほぼ独立に行われる⁶。上空における修正の鉛直方向への影響範囲のスケールは高度に依存する。高度850hPa(高度300hPa)では、気温については上下それぞれにおおよそ50hPa程度(40hPa程度)、風については90hPa程度(60hPa程度)である。

従来の毎時大気解析の客観解析に用いられてきた最適内挿法(酒井 2001)では、同化できる観測データは解析変数と線形関係にあるものに限られていた。一方3次元変分法ではこのような制限はない。このため、3次元変分法の導入によって、従来より多様な観測データを利用できるようになるとともに、観測データの(解析変数に線形な量への変換を必要としない)より直接的な利用が可能となった(第4.1.6項参照)。

4.1.4 毎時大気解析の精度

毎時大気解析の実況監視資料としての精度を見るため、同化された観測データに対する平方根平均二乗誤差(RMSE)を示す。図4.1.2は最適内挿法、3次元変分法それぞれによるアメダス風の東西成分(図4.1.2a)、ACARS気温(図4.1.2b)に対するRMSEの時系列

⁵ このシステムは4次元変分法(数値予報モデルによる時間発展との整合性を拘束条件として課しつつ解析場を変分法により探索する高度なデータ同化手法)による解析システムとして開発された。毎時大気解析では、時間、計算資源上の制限から4次元変分法の実行は難しく、これを3次元変分法による解析システムとして用いる。

⁶ ただし、変分法による解析の後、地上の修正の影響が、第一推定値の大気境界層の高さ(MSM内で温位の鉛直プロファイルにより診断される)の範囲で上空に及ぶよう、補正を行っている。

表4.1.1 2007年3月22日01UTCの変更前後の毎時大気解析の仕様

	変更前	変更後
解析方法	最適内挿法 地上: 2次元最適内挿法、上空: 3次元最適内挿法	3次元変分法 地上と上空の解析による修正の相関を0とする。
観測値	アメダス(風、気温)、ウインドプロファイラ、 航空機自動観測(風、気温)、毎時衛星風、 ドップラーレーダー(VVP風)	アメダス(風、気温)、ウインドプロファイラ、 航空機自動観測(風、気温)、毎時衛星風 ドップラーレーダー(ドップラー速度)
解析要素	風(U, V成分)、気温	
第一推定値	解析時点における最新のMSM予報値(通常02-04時間予報)	
解析範囲	水平: MSMと同じ領域、5km格子 鉛直: η 座標系(約150hPaまで)	水平: MSMと同じ領域、5km格子 鉛直: z^* 座標系50層(領域上端約50hPa)
解析時刻	毎正時(計算開始は正時後20分頃)	

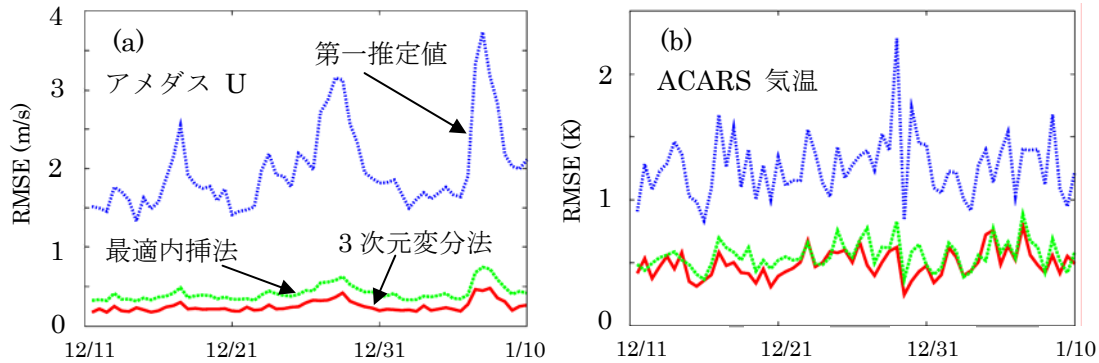


図4.1.2 毎時大気解析で同化された(a): アメダス風の東西成分、(b): 航空機自動観測(ACARS) 気温に対するRMSEの時系列。2006年12月11日12UTC～2007年1月10日00UTCの00、12 UTC。赤: 3次元変分法による解析値、緑: 最適内挿法による解析値、青: 第一推定値。

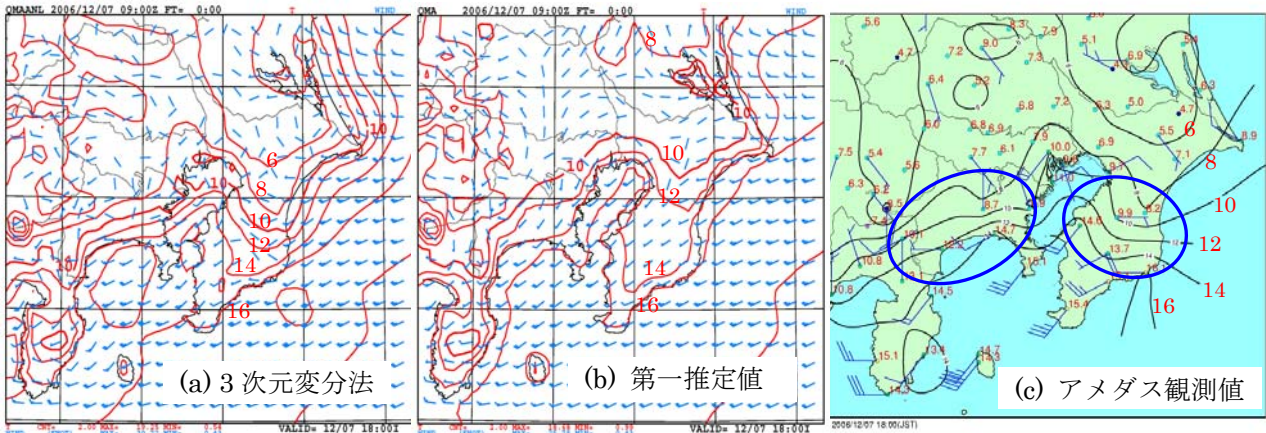


図4.1.3 2006年12月7日09UTCにおける関東地方南部の地上気温と風。(a): 3次元変分法による解析値、(b): 第一推定値、(c): アメダス地上観測値。等値線の間隔は 2°C 。矢羽の単位は、(a),(b): 長い羽10kt、短い羽5kt、(c): 長い羽2m/s、短い羽1m/s。相模湾沿岸、房総半島の収束帯(青実線の楕円領域)については本文参照。

(2006年12月11日12UTCから2007年1月10日00UTCまでの00,12UTC)である⁷。3次元変分法によるRMSEは期間を通じて、最適内挿法と同程度またはそれより小さい値となっている。同化される他のデータについても、3次元変分法は、最適内挿法と同程度のRMSEを与え(図略)、同化した観測データの情報が適切に解析場に取り込まれていることを示す。

⁷ ドップラーレーダーによる観測について、最適内挿法では空港気象レーダーのみのVVP風、3次元変分法では空港気象レーダーと東京レーダーのドップラー速度を同化している。

4.1.5 地上気温、風解析の事例

図4.1.3に2006年12月7日09UTCの毎時大気解析による関東地方南部の地上気温、風を示す。北海道付近に低気圧があり(図略)、これに向かって関東地方の南海上では暖かい南西風が吹き込んでいる。アメダスの気温観測値の分布(図4.1.3c)⁸を見ると、関東地方南岸地域では、海上からの南西風と内陸の冷たい空気との間に収束帯が形成されている(青実線楕円領域)。

この事例での第一推定値(図4.1.3b)は、MSMの12

⁸ 描画には東京管区気象台による「かさねー3D」(平原ほか 2004)を使用した。

月7日06UTC初期値の3時間予報値である。第一推定値では、房総半島全体で南西風の流入が表現されており、半島上に明瞭な収束帯は見られない。また、第一推定値では、全体的に内陸の気温が実況より高く予想されている。

3次元変分法による解析値(図4.1.3a)では、房総半島での収束帯が適切に表現され、収束帯の南北での風向と気温の違いが明瞭になっている。また、内陸の気温も修正され、相模湾沿岸での収束帯をはさんだ南北の気温変化が実況に近づいている。

この事例では、3次元変分法により、最適内挿法(図略)と同程度の表現が得られる。このように、3次元変分法の導入により、地上解析場の従来の品質を保った上で、多様な観測データの有効な利用が可能となる。

4.1.6 ドップラー速度の同化の事例

ドップラーレーダーによる観測データの扱いは、3次元変分法と最適内挿法で大きく異なっている。最適内挿法では、前述のように同化される観測要素は解析変数と線形関係にあるものに限られる。このため、レーダーにより観測されるドップラー速度を、簡略化VVP法(多田 1994)を用いて東西・南北風(VVP風)に変換した上で同化する。レーダーサイトからの距離が大きくなると簡略化VVP法による変換の誤差が大きくなるため、レーダーサイトから50km以内の観測データのみが解析に使用される(西嶋 2004)。一方、3次元変分法では、このような制限はなく、ドップラー速度に変換を加えずそのまま直接同化している(ドップラー速度の詳細については第4.2節参照)。このため、データが取得される範囲全体(空港気象レーダーではサイトから120km以内、気

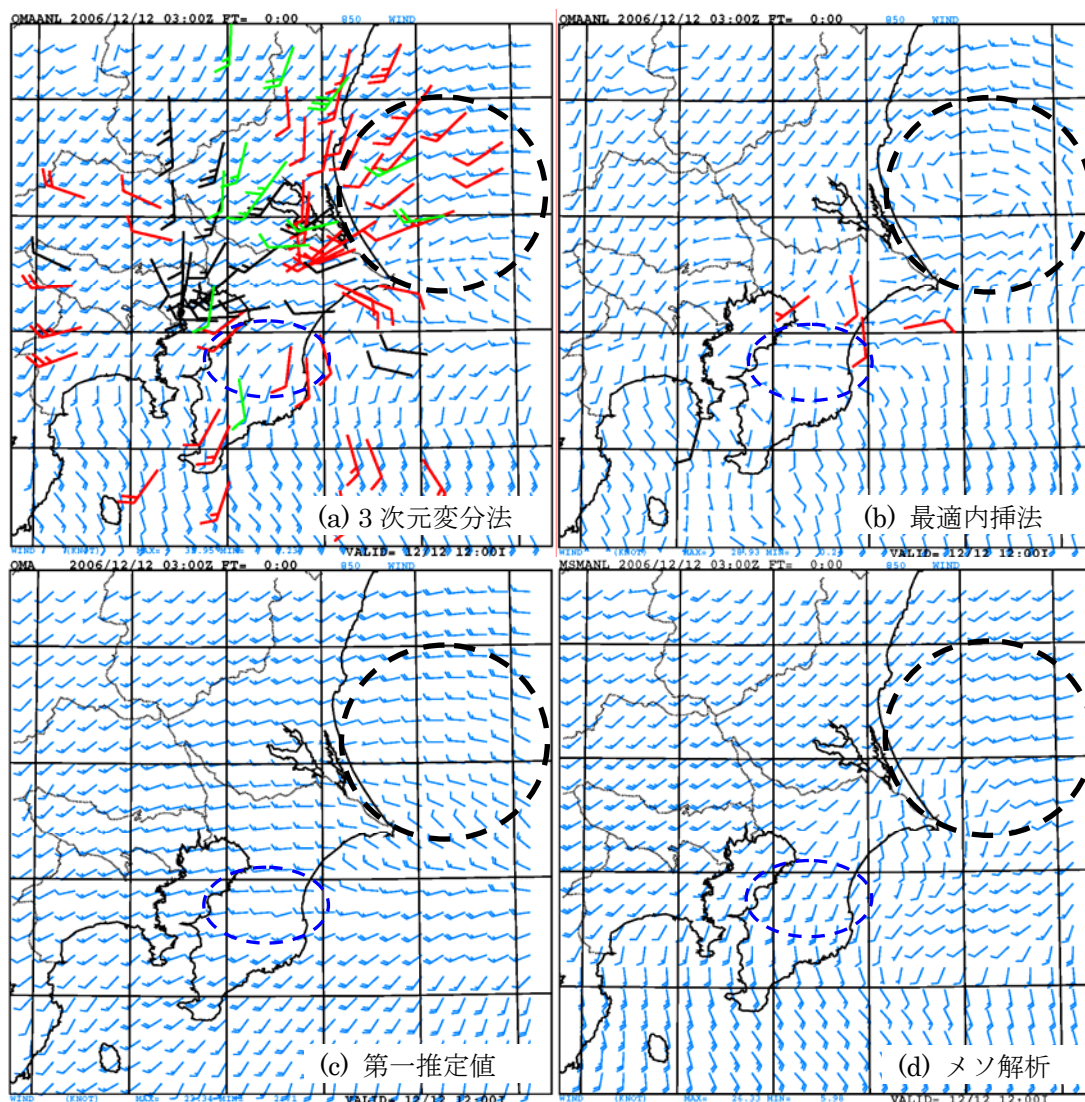


図4.1.4 2006年12月12日03UTCの関東地方における850hPa風。(a): 3次元変分法による毎時大気解析の解析値。(b): 最適内挿法による毎時大気解析の解析値。(c): 第一推定値 (MSMによる00UTC初期値の3時間予報値)、(d): メソ解析による解析値 (解析時刻03UTC)。(a)の矢羽はドップラーレーダーのドップラー速度 (矢羽の方向の速度成分)、(b)の矢羽はVVP風を示す (赤: 成田、黒: 羽田、緑: 東京、高度830-870hPaに分布するデータ)。黒破線の円は最適内挿法(b)で循環が解析されたおおよその位置を示す。青破線の楕円領域で3次元変分法、最適内挿法は異なる風向を解析している (本文参照)。矢羽は長い羽が10kt、短い羽が5ktを示す。

象官署の一般気象レーダーではサイトから150km以内)のドップラー速度データが解析に使用される。

図4.1.4に、2006年12月12日03UTCの850hPa風の分布を示す。この事例の第一推定値(図4.1.4c)はMSMによる00UTC初期値の3時間予報値である。気圧の谷の通過に伴い、関東地方では降水があり、3箇所(成田空港、羽田空港、東京)のドップラーレーダーサイトによる風の観測が得られている。

解析結果を見ると、最適内挿法による解析値(図4.1.4b:ただし当時のルーチンでの設定に合わせて東京レーダーは同化していない。)では、第一推定値には見られない高気圧性循環が茨城県沖に解析されている(黒破線円領域)。しかし、3次元変分法による解析値(図4.1.4a)ではこれが見られない。図4.1.4dに示す03UTCのメソ解析値でもこのような循環は見られず、3次元変分法による結果が正しいと考えられる⁹。

最適内挿法により同化された観測データ(図4.1.4b)を見ると、VVP風の分布(レーダーサイトから50km以内)は、循環が解析されている領域には届いていない。従って、最適内挿法において茨城県沖は観測データによる直接の情報が得られない領域となっている(この事例では、茨城県とその近海の領域で、高度850hPa付近で同化されたドップラーレーダー以外の観測値は、水戸のウィンドプロファイラのみであった)。最適内挿法では、上空において、観測による修正の周囲への影響範囲のスケールは半径2度(約220km)に設定されている。上記の循環は、(千葉県とその近海など)離れた観測点における修正の影響が茨城県沖にまで及んだため解析されたものと考えられる¹⁰。

一方、3次元変分法による解析で使用された、成田空港、東京のドップラー速度データは、茨城県沖にも分布している(図4.1.4a)。3次元変分法ではこれらの観測データからの情報が拘束条件となり循環が解析されることを防いだと考えられる¹¹。

また、房総半島中部における風についても3次元変分法の導入によって改善が見られる(図4.1.4青破線楕円領域)。この領域で、最適内挿法(図4.1.4b)では東風、3次元変分法(図4.1.4a)では南西風が解析されて

おり、3次元変分法による解析のほうがメソ解析(図4.1.4d)との整合性が良い。これも、3次元変分法では、最適内挿法に比べ、房総半島とその周辺の領域において、ドップラーレーダーによるより多くの観測データが利用可能となったためと考えられる。

このように、3次元変分法により広範囲の観測値を、もとのデータに近いかたちで解析に取り込むことができるようになり、解析値に改善が見られた。

気象庁は、気象官署の一般気象レーダーのドップラー化により、ドップラーレーダーの全国展開をさらに進める計画である(第4.2節参照)。これらの新規ドップラーレーダーによるドップラー速度データについても順次対応し、毎時大気解析に取り入れていく予定である。また、ATOVSによるリトリーブ気温など、他の観測データの新規利用を進めていくことも今後の課題である。

参考文献

- 荒波恒平, 原旅人, 2006: モデルの変更点. 平成18年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 55-58.
- 酒井喜敏, 2001: 毎時下層風解析. 平成13年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 59-61.
- 多田英夫, 1994: 1台のドップラー気象レーダーから得られる風データの数値予報での利用. レーダー観測技術資料第43号, 気象庁観測部, 21-37.
- 露木義, 1997: 変分法によるデータ同化. 数値予報課報告・別冊第43号, 気象庁予報部, 102-165.
- 露木義, 2002: 変分法によるデータ同化の基礎. 数値予報課報告・別冊第48号, 気象庁予報部, 1-16.
- 西嶋信, 2004: 毎時風解析. 平成16年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 63-65.
- 西嶋信, 2005: 毎時大気解析. 平成17年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 63-65.
- 平原洋一, 柴田のり子, 市川寿, 宮城仁史, 2004: 気象観測データ統合描画Webアプリケーションの開発. 平成15年度東京管区調査研究会誌, 東京管区気象台, CD-ROM.
- 本田有機, 2007: 次期メソ解析の開発. 気象研究ノート, 印刷中.
- 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 non-hydrostatic model at the Japan Meteorological Agency: Formulation and preliminary results. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 3465-3475.

⁹ ここで比較に用いられているメソ解析は、時間や計算資源に毎時大気解析ほど強い制約を受けず、4次元変分法により、毎時大気解析よりも数・種類ともに多くの観測データが同化されている。ただし、水平格子間隔が10km(インナーモデルは20km)と、解像度は低い。

¹⁰ 3月22日の変更で新規に加わった東京レーダーの観測もVVP風として最適内挿法での同化に加えると、位置は南にずれるものの、依然として循環が解析された(図略)。

¹¹ なお、3次元変分法でレーダーサイトから50km以内のVVP風を同化したところ、最適内挿法と同様の高気圧性循環が解析された(図略)。観測データの分布から離れており、かつ観測データによる修正の影響範囲内にある領域では、解析場の振る舞いに注意が必要である。

4.2 ドップラーレーダーデータの利用¹

4.2.1 はじめに

ドップラーレーダーは、降水粒子から反射する信号のドップラーシフトを利用して降水粒子の移動速度、すなわち降水粒子を動かす風の速度(風速)を観測することができる。ただし、ドップラーシフトを利用する観測の性質上、レーダービームに沿った方向の風速成分しか測定することができない。また、降水粒子が存在しない場所ではデータが得られない制約がある。本節では、ドップラーレーダーによって得られるビーム方向の風速を「ドップラー速度」と呼ぶ。

気象庁は、空港と気象官署に気象ドップラーレーダーを設置している。空港気象ドップラーレーダーは、平成7年度から平成17年度の間全国8箇所(新千歳、成田、東京(羽田)、中部、大阪、関西、福岡、那覇)の空港に整備され、主に現地での監視業務に使用されている。また、気象官署の一般気象レーダーは、平成17年度からドップラー化が進められ、同年度に東京レーダーが、平成18年度に仙台、新潟、名古屋レーダーがドップラーレーダーに更新された。平成19年度には7ヶ所のレーダー(釧路、函館、松江、福岡、種子島、室戸岬及び沖縄レーダー)がドップラー化される予定である。これらのドップラーレーダーによるドップラー速度データは、平成17年3月から順次メソ解析で利用が開始され、メソ数値予報モデル(以下、MSMと略す)の予報精度、特に降水予報の改善を実現している。

4.2.2 メソ解析でのデータ利用

空港気象ドップラーレーダーのデータは、サイトから半径120kmの範囲内で得られるドップラー速度について、ビーム方向5km間隔・方位角5.625度間隔のボリューム内の平均した値と、平均をとるボリューム内のサンプル数、ドップラー速度の標準偏差、ドップラー速度の最大値と最小値の差といった統計情報を付加して、スーパーコンピュータシステム(以下、NAPSと略す)に送られている。メソ解析でのドップラー速度データの品質管理には、これらのすべての要素を利用している。

一方、気象官署の気象ドップラーレーダーは、サイトから半径150km(最下仰角のみ250km)の範囲内で、ビーム方向0.5km間隔・方位角0.703度間隔の高密度なドップラー速度データのみがNAPSに送られている。このデータも空港気象ドップラーレーダーと同様にメソ解析で使用するため、ドップラー速度の空間平均値、サンプル数、標準偏差、最大値と最小値の差をNAPS上で計算して、データの品質管理に利用している。

ドップラー速度データの品質管理の詳細については、平成16年度数値予報研修テキスト(小泉2004)を参照

してもらふこととし、これ以降に改良した点は、第一にレーダーサイトの近くでの観測データの密集による悪影響を防ぐため、従来までの1仰角のボリューム内データの水平間引きから、全仰角のボリューム内の3次元間引きに変更した点である。また、第二に新潟ドップラーレーダーのように負の仰角をもつ観測データが新たに加わり、シークラッターによる偽の弱風データの混入が問題となったため、その対策としてレーダーのビーム方向に地球の曲率を考慮することと、負仰角での10m/s以下(通常5m/s以下)のドップラー速度データを使用しないことで偽の弱風の除去を行った点である。

図4.2.1に新潟ドップラーレーダーの仰角-0.3度のビームの中心高度と、ビーム幅を1.03度とした上限と下限の高度を示す。図からビーム幅の下限高度がサイトから70~180kmの距離で高度0以下になることが示され、海面上のビームの反射によるシークラッターが偽の弱風としてデータに混入する危険性が高いことがわかる。

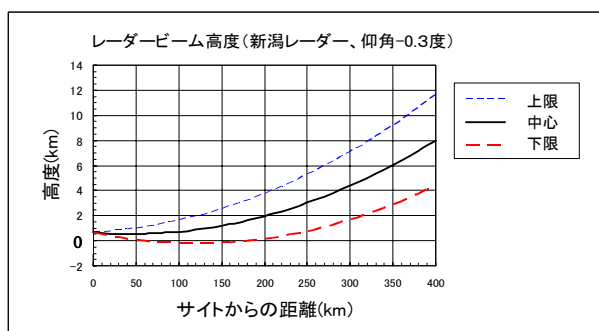


図 4.2.1 新潟レーダーの仰角-0.3度のビーム高度。実線はビームの中心、破線はビーム幅の上限と下限。

一般的にドップラー速度の不完全な風から解析で利用する風ベクトルを求めるためには、2台のドップラーレーダーが必要とされ、レーダーが近接した限られた場所でのしか観測データが得られない。しかし、メソ解析では4次元変分法が使用されているため、各サイトで観測された毎時間のドップラー速度データを同時に取り込むことができ、さらに数値モデルそのものを同化に用いることで、風だけでなく、気圧、温度も互いに整合するように解析することができる。

観測されるドップラー速度は、竜巻やダウンバーストなどの水平スケールが1km以下の現象を表す情報も含まれており、現在の4次元変分法に使用している数値モデルの水平解像度20kmと比べて細かすぎる。このため、データ利用の際には、観測データの平均や間引きを行い、観測データを数値モデルに取り込み易くしている。

4.2.3 新設レーダーの降水予報インパクト

平成18年度に更新された仙台、新潟、名古屋ドップラーレーダーについて、平成19年度にメソ解析で利用するために行った降水予報の調査事例を述べる。

本事例は、2007年7月12日に梅雨前線が九州南部から本州南岸に停滞し、その梅雨前線上のキンクに対

¹ 石川 宜広

応して、00UTC 頃に近畿中部で記録的な大雨が降ったものである。

図 4.2.2 は 2007 年 7 月 12 日 00UTC のメソ解析の地上風である。左は仙台、新潟、名古屋ドップラーレーダーを同化しない場合で、右は同化した場合である。中央は同時刻の名古屋ドップラーレーダーの仰角 0.9 度のドップラー速度である。名古屋ドップラーレーダーを使用した解析では、琵琶湖付近に明瞭なシアーラインが見られ、同様に観測されたドップラー速度にも暖色系(サイトから離れる方向)と寒色系(サイトに向う方向)の速度符号が異なる境目として、シアーラインが観測された。名古屋ドップラーレーダーを使用しない解析では、このシアーラインはあまり明瞭でない。

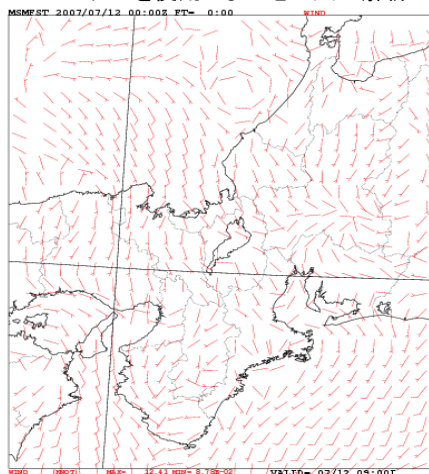
図 4.2.3 は、2007 年 7 月 12 日 00UTC を初期値とする MSM による 3 時間予報の 3 時間積算降水量である。左

はメソ解析で仙台、新潟、名古屋のドップラーレーダーを使用しなかった予報、右は使用した予報であり、中央は予報に対応する解析雨量の 3 時間積算降水量である。観測された琵琶湖を横切り東西に伸びる発達した線状降水帯が、名古屋ドップラーレーダーを使用したメソ解析による 3 時間予報では正確に表現され、琵琶湖付近のシアーラインとの対応も良い。しかし、名古屋ドップラーレーダーを使用しなかった予報では、琵琶湖付近に弱い降水があるものの、その降水量は実況と比べてかなり少ない。このことは、名古屋ドップラーレーダーによって、降水系の風の方が改善された結果と考える。

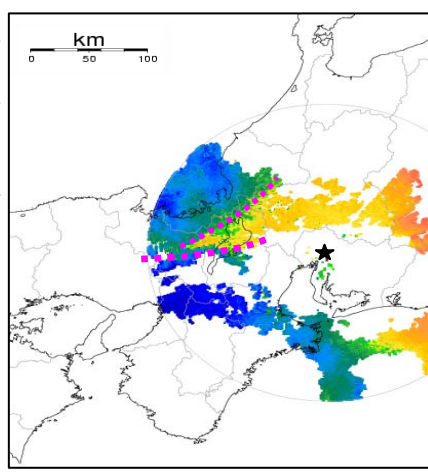
参考文献

小泉耕, 2004: 非静力学メソ数値予報モデルの現業化. 平成 16 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 71-74.

メソ解析で仙台、新潟、名古屋ドップラーレーダーを使用しない地上風の解析



名古屋ドップラーレーダーのドップラー速度(2007.07.12 00UTC、仰角 0.9 度)



メソ解析で仙台、新潟、名古屋ドップラーレーダーを使用した地上風の解析

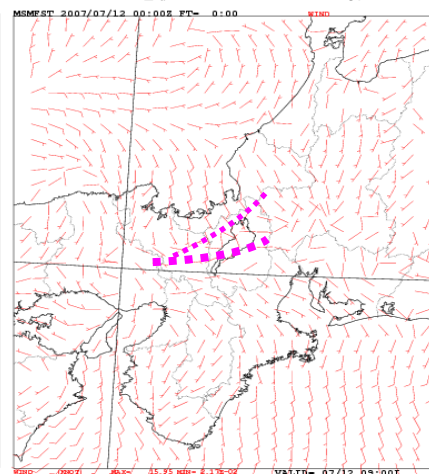
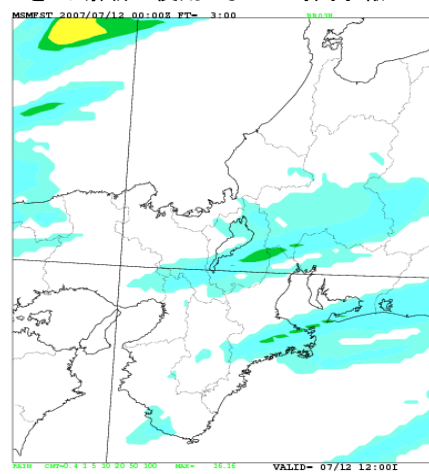
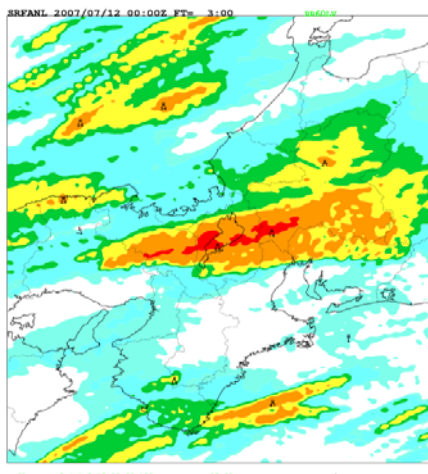


図 4.2.2 2007 年 7 月 12 日 00UTC のメソ解析の地上風。左は仙台、新潟、名古屋ドップラーレーダーを同化しない場合、右は同化した場合。中央は同時刻の名古屋ドップラーレーダーの仰角 0.9 度のドップラー速度。暖色系と寒色系はレーダーから遠ざかる風と近づく風を意味する。また、ピンクの点線はシアーラインを表す。

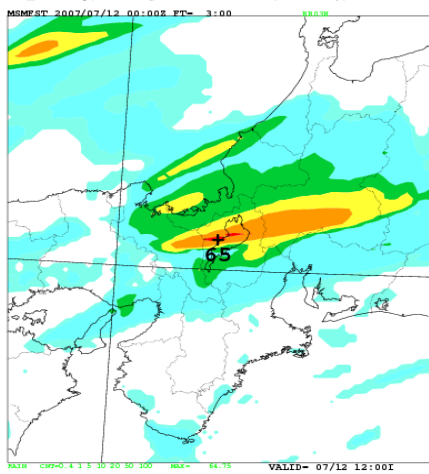
仙台、新潟、名古屋ドップラーレーダーをメソ解析に使用しない 3 時間予報



解析雨量(2007.07.12 00~03UTC)



仙台、新潟、名古屋ドップラーレーダーをメソ解析に使用した 3 時間予報



0.4 1 5 10 20 50 100 [mm/3hour]

図 4.2.3 2007 年 7 月 12 日 00UTC を初期値とする MSM による 3 時間予報の 3 時間積算降水量。左は仙台、新潟、名古屋ドップラーレーダーを同化しない予報、右は同化した予報、中央は解析雨量の 3 時間積算降水量。

4.3 衛星データ同化の最近の開発¹

4.3.1 はじめに

数値予報精度の維持・向上は、予報モデルのみならずデータ同化システムの性能に大きく依存する。中でも、近年増大・高性能化している人工衛星が観測するデータの品質や利用手法は、解析・予報精度に大きな影響を与える。

本節では、2006年4月～2007年8月の期間に行った衛星データ同化処理の変更について紹介する。この期間は、気象庁の衛星データ同化の開発の歴史の中で、処理の高度化・多様化、新規衛星の導入が最も頻繁に実行された期間である。これは、解析システムに変分法を導入し衛星データの多様かつ高度な利用法が可能となったこと、これに合わせて気象庁で衛星データ同化に関わる開発資源を拡充してきたことが大きな要因である。これらの変更によって予報成績は向上し、特に衛星データのインパクトが現れやすい南半球で顕著であった（第4.4節参照）。本節では変更の概要について簡単に記述するとともに、気象庁予報部(2007)に詳細が記されているので、興味のある読者はそちら

を参照していただきたい。参考のため、気象庁の全球・メソ解析で同化されている全衛星データを、表4.3.1に掲載した。

4.3.2 変更内容と解析・予報へのインパクト

(1) 静止衛星の大気追跡風 (AMV)

AMVは、15～60分間隔の連続した画像から、雲塊や水蒸気パターンを追跡することにより算出された大気の流れである。気象庁では、気象衛星センター(MSC)などが作成し配信しているAMVを同化している。AMVは大気の流れの情報をもつ重要なデータであるが、センサの特性や処理方法・追跡対象の違いにより、データの特性が領域・高度・衛星によって大きく異なる。そのためデータの取捨選別が不適切だと、逆に解析精度を落とす要因となる。そこで、過去データの統計調査により品質に問題があると判断された領域(例えば400～825hPaの中層風)のデータを排除するとともに、データに付属する品質指標(QI)に基づいてデータ選別を従来より厳格に行うようにした。さらに、データがなるべく均等に分布するように、解析時刻と観測時刻の時間差やQIを考慮しながらデータを間引き、約200km間隔でデータを配置するようにした。また新規デ

表 4.3.1 2007年9月時点における気象庁全球・メソデータ解析で同化されている全衛星データ。メソ解析欄の斜線はデータが(メソ解析領域内に)存在しないことを、×印は、データはあるがまだ同化されていないことを表す。網掛けは本節で説明した変更対象を表す。なおGPS掩蔽とCSRは、高解像度全球同化システムでの性能検証が十分でないため、2007年11月の高解像度全球モデル移行当初は利用を中断するが、性能確認を行った後に再導入する。

	衛星名	センサ名	同化要素		備考
			全球解析	メソ解析	
AMV	MTSAT-1R	JAMI	風	風	
	GOES11, 12	IMAGER			2006年6月21日にGOES10から11へ切替え
	METEOSAT7, 9	SEVIRI			経度0度上でMeteosat7⇒8(2006年6月14日)、8⇒9(2007年4月24日)、東経57度上でMeteosat5⇒7(2007年2月5日)へ切替え
	Aqua	MODIS	風		高緯度のみ算出
	Terra	MODIS			
サウンダ	NOAA15, 16, 17	AMSU-A, AMSU-B	輝度温度	気温	NOAA17のAMSU-Aは測器異常で機能停止
	NOAA18	AMSU-A, MHS		気温	メソ解析では2006年4月18日より利用開始 全球解析では2007年4月18日より利用開始
	Aqua	AMSU-A			気温などのリトリブデータなし
マイクロ波放射計	DMSP-F13, 14	SSM/I	輝度温度	可降水量、降水量	DMSP-F15は22GHzチャンネル不良のため、2006年8月15日より使用停止
	Aqua	AMSU-E			
	TRMM	TMI			
マイクロ波散乱計	QuikSCAT	SeaWinds	海上風	海上風	
GPS 掩蔽	CHAMP	BlackJack	屈折率	×	2007年3月22日より利用開始
CSR	MTSAT-1R	JAMI	輝度温度	×	2007年6月7日より利用開始

¹ 岡本 幸三

ータとして、MTSAT-1Rから新たに作成されるようになった、毎時のAMV(従来は6時間間隔)の利用も開始した。これらの変更により、特に南半球で2日先までの850hPa気温、500hPa高度、250hPa風速などの予報を大きく改善することを同化実験を通して確認できた。そのため、このAMVデータ処理を2006年10月18日より全球解析に導入した。メソ解析でも、2007年中に同様の変更を行うことを計画している。

この他にも衛星運用変更に対応するため、データ精度の比較検証を行った後に、METEOSAT7から8(2006年6月14日)、GOES10から11(2006年6月21日)、METEOSAT5から7(2007年2月5日)、METEOSAT8から9(2007年4月24日)への切り替えを行った。

(2) サウンダ

サウンダは、大気吸収が強い周波数帯において複数の周波数で地球大気・地表面などからの放射強度(輝度温度)を観測することにより、鉛直気温・水蒸気プロファイルや地表面の状態などの情報を取り出すセンサである。全球解析では2003年5月28日より輝度温度の同化を開始し、その後も改良を重ねている。2006年8月21日には、前処理バイアス補正量の再計算や変分法バイアス補正(後述)の説明変数の見直し、観測誤差の調整、雲判定や降水判定処理の改良などを行った。これらの変更の効果を同化実験を行って調べたところ、熱帯・南半球の気温解析誤差の減少や、特に南半球の短期予報精度の顕著な改善、台風進路予報誤差の減少などを確認した。

また、新たにNOAA18号に搭載されたATOVS²サウンダデータの利用を、メソ解析では2006年4月18日から、全球解析では2007年4月18日から開始した。既に利用していたNOAA15、16、17号にNOAA18号を加えることにより、観測の空白域が減少する。これにより、メソ解析ではデータ入電が安定し、降水予報スコアを向上した。NOAA18号はAqua衛星と軌道が近いので、全球解析においては、品質に問題があるAqua/AMSU-Aよりも優先的に利用する。この結果、500hPa高度を始めとして代表的な予報要素で全球的に改善が確認された。なお、2006年10月19日に打ち上げられたMetop衛星のATOVS輝度温度データも、同化実験によって対流圏の気温場を中心に全球的に大きな予報精度の改善を確認したので、高解像度全球モデル移行時に合わせて導入する計画である。

さらに、AP-RARS³と呼ばれる、中国・オーストラリア・韓国・昭和基地の受信局で処理・配信されたATOVS輝度温度データの利用を、2007年2月22日より開始した。

² ATOVSは、マイクロ波サウンダ AMSU-AとAMSU-B(またはMHS)、赤外サウンダ HIRS を合わせた総称である。ただし現在の気象庁の全球輝度温度同化処理では、HIRSは同化していない。

³ Asia-Pacific Regional ATOVS Retransmission Service

AP-RARS ATOVSデータは観測から配信までの時間が短いので、西太平洋・昭和基地付近において速報解析⁴で利用できるデータが増加する。これにより、成層圏の高度場などで速報解析結果がサイクル解析結果に近づくことが確認されている。同様に、欧州・北米の受信局で処理・配信されるEARS⁵と呼ばれるATOVS輝度温度データの利用も、2007年8月2日より開始した。EARS ATOVSは、AP-RARS ATOVSよりもデータ数が約3倍と多いため、解析を改善する度合いが大きく、北半球高緯度を中心に500hPa高度場の短期予報も改善している。

(3) マイクロ波放射計

マイクロ波放射計は、鉛直積算水蒸気量(可降水量)や降水粒子、地表面の状態に感度がある周波数で輝度温度観測を行う。メソ解析では、輝度温度から推定(リトリブ)した可降水量と降水量を、2003年10月15日から同化している。全球解析では、輝度温度の同化を2006年5月15日より開始した。対象とするのは、雲や降水の影響を受けていない海上データである。可降水量、海面水温、海上風速などを説明変数として変分法バイアス補正を適用する。マイクロ波放射計の輝度温度を全球で同化することにより、特に海上・南半球における豊富な水蒸気情報が活用できるようになった。これにより、可降水量の解析精度が向上し、台風進路予報や予報降水分布も改善した。

(4) GPS掩蔽(えんぺい)

GPS掩蔽観測は、米国の全球測位システム(GPS)衛星が発信した電波を、GPSよりも低い高度を飛ぶ別の衛星(LEO衛星)で受信し、受信電波の遅延量から電波が伝播してきた大気の屈折率、あるいは気温・水蒸気情報を取り出すものである。LEO衛星で受信するGPS電波は、GPS衛星とLEO衛星をまっすぐに結んだ直線上を進むのではなく、大気や電離層による屈折を受けながら進む。この実際に進む曲線に沿った光学的距離と、直線距離との差が遅延量である。

GPS掩蔽観測データは、水平分解能は粗いものの高い鉛直分解能をもつため、サウンダと相補的な関係を持つ。同化対象である屈折率データは、バイアスが対流圏下層で大きくなるので5km以下のデータは使用せず、さらに緯度・屈折率・高度を説明変数とするバイアス補正を行う。バイアス補正係数はカルマンフィルタを用いて解析毎に更新しながら求める。LEO衛星CHAMPの屈折率デ

⁴ 予報プロダクトをなるべく早く配信する必要があるため、速報解析ではデータ入電待ち時間(カットオフタイム)が2時間25分しかない。一方サイクル解析は、カットオフタイムを十分長くとり(5時間35分または11時間35分。ただし高解像度全球モデル導入後はそれぞれ20分ずつ短縮される)、データ収集・配信に時間がかかる衛星データなどをたくさん使うことにより、より高い解析精度を実現している。

⁵ EUMETSAT Advanced Retransmission Service

ータを用いた同化実験では、対流圏中層から成層圏の気温・高度場の予報がわずかながら改善することが確認できたため、2007年3月22日より利用を開始した。現状では、1衛星のデータしか同化していないのでデータ数は少ない。しかし、今後利用可能なデータが増加していくため、解析予報精度の改善に与える影響が大きくなることが期待される。

(5) 静止衛星イメージャの晴天輝度温度(CSR)

CSRは、静止衛星に搭載された高分解能赤外イメージャが観測する晴天域の輝度温度を、複数のピクセルで平均したプロダクトである。MSCで作成・配信されているMTSAT-1Rの水蒸気チャンネルCSR(以下WV-CSR)は、16×16ピクセル(約60km四方)内の晴天ピクセルの平均をとっており、対流圏中上層の水蒸気情報を持つ。MTSAT-1R WV-CSRは、観測頻度が高く、データ入電が早くかつ安定していることも大きな特徴である。

気象庁予報部(2007)においては、MTSAT-1R WV-CSRを同化することにより、熱帯の上昇(下降)流域の大気が乾燥(湿潤化)した。この結果、水蒸気に感度のある他の衛星輝度温度観測値に第一推定値が近づくなど、対流圏中上層の水蒸気場を改善した。一方、予報に関しては、熱帯域で850hPa気温場や500hPa高度場が改善したものの、南北半球では安定した改善が得られなかった。

そこで、毎時刻データではなく一時間おきのデータを同化(つまり6時間の同化窓内で3回同化)するように変更した。さらに、バイアス補正に用いる説明変数として、計算輝度温度や300hPa東西風を用いるようにした。これらの変更により、上述した水蒸気解析場や熱帯域での予報特性を大きく変えることなく、北半球でも500hPa高度場や850hPa風速場などの予報を改善し、南半球でも概ね中立の結果をもたらした。これらの結果を受けて、2007年6月7日よりMTSAT-1R WV-CSRの利用を開始した。

(6) 変分法バイアス補正の導入

変分法バイアス補正は、線形回帰式で表すバイアス補正処理の回帰係数を、変分法の解析変数として求める手法である。これにより、全ての観測や第一推定値などとバランスのとれた回帰係数を得ることができる。さらに、回帰係数が解析毎に更新されるため、測器や同化システムの変更への対処が容易といった特徴もある。変分法バイアス補正は、全球解析でのマイクロ波放射計輝度温度同化開始と合わせて、2006年5月15日に全球解析に導入された。現時点で、サウンド、マイクロ波放射計、静止衛星イメージャに対する輝度温度データ全てに適用されている。

4.3.3 まとめ

2006年4月から2007年8月にかけて、静止衛星AMVやサウンド輝度温度同化処理の改良、マイクロ波放射計

輝度温度・GPS掩蔽観測屈折率データ・MTSAT-1R晴天輝度温度などの新規導入、変分法バイアス補正の導入、静止衛星の切り替え、NOAA18号・AP-RARS・EARSのATOVSデータの導入を行った。これらの変更・新規導入により、全球解析では特に南半球や熱帯の短期予報を改善し、メソ解析ではデータ入電の安定性を高め降水予報を改善した。

しかし気象庁予報部(2007)の各章で述べられているように、これらの処理にはまだ多く改善の余地があり、今後予定されている新規衛星データへの対応も必要となる。さらに衛星データの利用がここまで進んでくると、データ分布・観測物理量・観測精度が現在既に利用している観測情報の不備を十分に補うものでなければ、単純に新規データを追加しただけでは改善の効果を得ることが難しくなっている。そこで、現在同化しているデータの基本処理(設定)の見直しも検討すべき段階にきていると考えている。例えば、現在の観測誤差は必要以上に大きな値を設定している可能性があり、また間引きの設定や鉛直内挿手法も高解像度全球モデルに合わせて調整しなおす必要があるだろう。さらに、メソ解析では、ここで取り上げた輝度温度データやGPS掩蔽観測データがまだ同化されていない。全球解析と比べメソ解析では、衛星データからの影響が及びにくく、また速報性が重視されるため利用可能な衛星データ数や計算負荷の制約が大きい。処理時間に見合う改善の効果が得られるかを精査しながら、新規データの導入や処理の高度化を進めていきたい。

参考文献

気象庁予報部, 2007: 数値予報と衛星データ 一同化の現状と課題－. 数値予報課報告・別冊第53号, 気象庁予報部, 220pp.

4.4 最近の全球モデルの成績¹

4.4.1 はじめに

本節では、短期予報を対象とした全球モデルの最近（2005年1月～2007年6月）の成績について紹介する。全球モデルは数値予報の基幹モデルであり、メソ数値予報モデルの境界値としても使われるので、モデルの変更等に伴う予報精度の変化について日常的に監視する必要がある。

全球モデルの性能は、海面更正気圧、等圧面高度、気温、湿度、降水、雲、放射などに関する様々な指標を用いて測定される。なかでも、中・高緯度の代表的な大気の流れの予報精度を表す指標として、500hPa 高度の平方根平均二乗誤差(RMSE)がよく使われる。平成 18 年度に大臣目標²として掲げられた「2010 年の全球モデル 2 日予報の精度を 2005 年に比べ 20%改善する」で使われている指標も、500hPa 高度 RMSE の北半球(20°N～90°N)年平均値である。

本節では、北半球と南半球(20°S～90°S)の気象庁の全球モデルだけでなく、世界の主要数値予報センターの全球モデルの成績も合わせて示す。他数値予報センターとの比較により気象庁モデルの相対的な成績を確認できるとともに、各数値予報センターの成績とモデル改良事項とを照らし合わせて考察することで、モデルの改良の方向性についての示唆が得られる。なお、熱帯域(20°N～20°N)の精度も重要ではあるが、紙面の都合で省略する。

4.4.2 図の内容と見方

世界の数値予報センターは、世界気象機関(WMO)が定めた標準検証手法(WMO 1992)に従って自身の全球モデルによる予報を検証し、その結果を月毎に交換している。また、検証結果の値は GDPFS レポートとして一般に公開されている (WMO 2005 など)。本節で示す結果は、4 つの主要数値予報センター(欧州中期予報センター ECMWF、気象庁 JMA、米国環境予測センター NCEP、英国気象局 UKMO)について、それぞれのモデルの解析値を真値とした北半球と南半球の 500hPa 高度予報の RMSE である。対象とする予報時間は、48 時間 (2 日予報) と 120 時間 (5 日予報) である。2 日予報の成績から、観測データ利用や同化手法改良の効果を確認することができる。一方、5 日予報の成績に及ぼす初期値の影響は相対的に小さく、主にモデルの分解能や物理過程の改良などの効果を確認することができる。

なお、季節変化を取り除くため、同月を含む過去 12 か月にわたる移動平均を示す。従って、大きな改良を加えた場合、それによる効果が導入後 1 年かけて徐々に現れることに注意されたい。

4.4.3 結果

(1) 2 日予報北半球 (図 4.4.1)

JMA の精度は、2005 年 2 月に導入された 4 次元変分法(4D-Var) (門脇 2005) により精度が大幅に向上したが、2006 年に入ってしばらく約 18m で停滞した。その後、2006 年 10 月の静止衛星風の利用高度化(山下・今井 2007)や 2007 年 4 月の NOAA18 サウンダデータの利用開始によって再び緩やかな精度向上を続けている。

他のセンターについては、ECMWF が 2006 年後半から精度向上の割合を増している。これは、2006 年 9 月に実施した変分法バイアス補正(VarBC)や雲スキーム改良などの変更と関係していると推測される。同年 12 月には COSMIC, CHAMP, GRACE-A による GPS 掩蔽観測データの利用を開始したほか、2007 年 1 月から Metop-A の AMSU-A, MHS データの利用を開始している。

UKMO については 2006 年 10 月以降の精度向上が目される。これは、2006 年 9 月からデータ打ち切り時刻を遅らせ³、より多くのデータを使うようになったことと、GPS 掩蔽観測データ⁴およびマイクロ波放射計 SSMIS データの利用を開始したことによる。さらに同年 11 月には ATOVS を同化時間窓に合わせて利用し、使用データを増やしているほか、追加の GPS 掩蔽観測として COSMIC データの利用も開始している(Lorenc 2006)。

NCEP については、2005 年 5 月にモデルの解像度を約 35km に上げるなど大幅な改訂により約 2m の精度向上を達成した後、しばらく停滞していたが、2007 年 5 月に新しい同化システム GSI(Wu et al. 2002)を導入してから再び精度を上げてきている。

(2) 2 日予報南半球 (図 4.4.2)

JMA の南半球の精度は、北半球とは異なり 2006 年以降も順調に向上している。2005 年 8 月に衛星搭載サウンダデータの利用方法を改善して使用データ数が増えたこと、2006 年 8 月に同データの利用方法をさらに改良 (岡本 2007) したことが衛星データ利用の影響の大きい南半球での継続的な精度向上をもたらしたと考えられる。その結果、2007 年 3 月には NCEP を抜いて世界第 3 位に浮上した。

¹ 竹内 義明、岩村 公太

² 正式名は、「中央省庁等改革基本法第 16 条第 6 項第 2 号の規定に基づき、国土交通大臣から通知される気象庁が達成すべき目標」。

³ 解析対象時刻後 1 時間 50 分を同 2 時間 40 分に変更した。

⁴ 9 月時点では CHAMP および GRACE の GPS 掩蔽観測データの利用が開始された。

2007年6月までの北半球500hPa高度予報誤差(48時間予報)

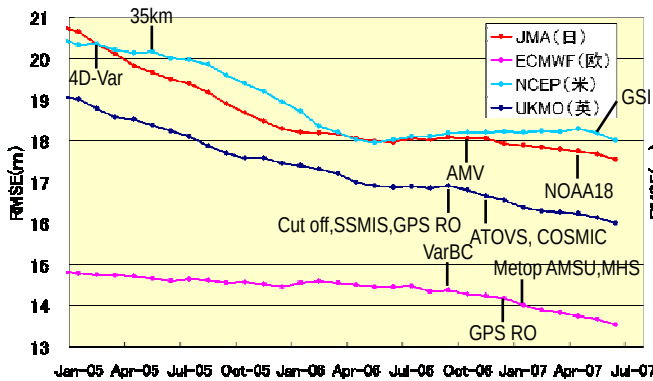


図 4.4.1 北半球域(20° N~90° N)500hPa 面高度の 48 時間予報の予報誤差(前 12 か月平均値)の推移。図中の変更項目については本文を参照のこと。

2007年6月までの南半球500hPa高度予報誤差(48時間予報)

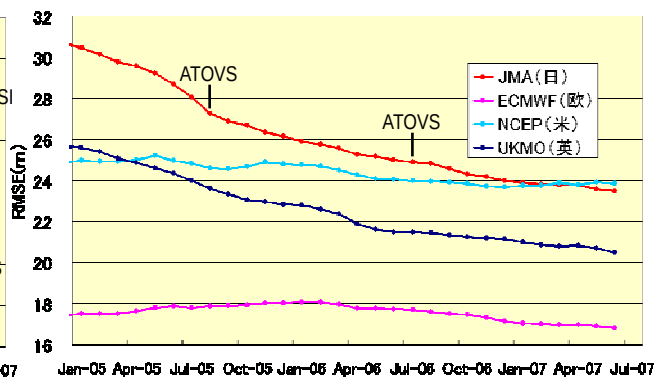


図 4.4.2 図 4.4.1 と同じ。ただし南半球域(20° S~90° S)。

2007年6月までの北半球500hPa高度予報誤差(120時間予報)

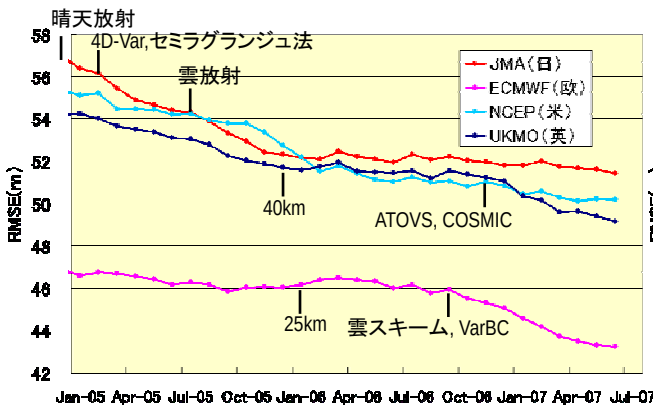


図 4.4.3 図 4.4.1 と同じ。ただし 120 時間予報の予報誤差(前 12 か月平均値)。

2007年6月までの南半球500hPa高度予報誤差(120時間予報)

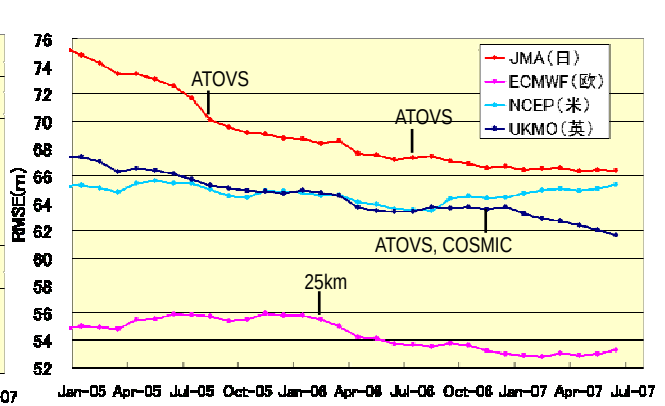


図 4.4.4 図 4.4.3 と同じ。ただし南半球域(20° S~90° S)。

ECMWF, UKMO は北半球と同様な傾向で順調に精度を上げている。

(3) 5 日予報北半球 (図 4.4.3)

JMA は 2004 年 12 月の晴天放射スキーム改良(藪ほか 2005) の効果が前 12 か月平均に表れなくなった 2005 年末以来、精度の伸び悩みが続いている。2005 年 2 月のセミラグランジュ法導入(松村ほか 2005) や、同年 7 月の雲放射等のモデル変更(北川ほか 2005) の影響は不明瞭である⁵。

UKMO は 2005 年 12 月に水平分解能約 40km 鉛直層数 50 層の新モデルを導入したがその効果は顕著ではない。2007 年 1 月からの急速な精度向上は 2 日予報精度が向上した時期とは異なっており、5 日予報に対しては使用する ATOVS データの増加や COSMIC データの利用などの効果がデータ打ち切

り時刻を遅らせる効果より大きいことを示唆している。

ECMWF の精度は、2 日予報北半球と同じく 2006 年後半から 2007 年前半にかけて大きく向上している。これには 2006 年 9 月に実施した雲スキームなど物理過程の改良と VarBC の導入が寄与していると考えられる。

(4) 5 日予報南半球 (図 4.4.4)

JMA は 2006 年を通して緩やかながら精度向上が見られた。これは 2 日予報で述べた衛星データの利用方法の改善によるものと推測される。UKMO は北半球同様、2006 年末以降大きな精度向上が見られる。ECMWF は 2006 年を通して大きな精度向上が見られ、2007 年に入ってから停滞している。これは 2006 年 2 月に水平分解能約 25km 鉛直層数 91 の新モデルを導入した効果だと考えられる。

⁵ セミラグランジュ法は計算時間の短縮が狙いであり、精度が劣化していないことが重要である。

表 4.4.1 主要数値予報センターのモデル、同化システム、使用観測データの主な違い

数値予報センター	JMA	ECMWF	NCEP	UKMO
予報モデル				
水平分解能	60km	25km	35km	40km
鉛直層数	40	91	64	50
同化システム				
データ打ち切り時間(速報解析)	2:20	4:10	2:45	2:40
データ打ち切り時間(サイクル解析)	11:30/5:30	14:00	6:00	6:00
解析手法	4D-Var	4D-Var	GSI	4D-Var
インナーモデル ^{*1} 分解能	約120km	130km/80km/ 50kmの3段階	35km	120km
同化ウィンドウ ^{*2} (速報解析)	6時間	6時間	6時間	6時間
同化ウィンドウ(サイクル解析)	6時間	12時間	6時間	6時間
観測データ(使用開始年月)				
COSMIC(GPS掩蔽観測)	-	2006.12	2007.5	2006.11
CHAMP(GPS掩蔽観測)	2007.3	2006.12	-	2006.9
AIRS(ハイパースペクトル赤外サウンダ)	-	2005.11	2005.5	2004.5
IASI(ハイパースペクトル赤外サウンダ)	-	2007.6	-	-

^{*1} 解析値を作成する際に第一推定値に対する修正量を求めるためのモデル

^{*2} 4次元変分法でモデルの時間積分を行う時間範囲

4.4.4 まとめ

JMA の全般的な傾向として、2 日予報の精度については順調に向上を続けている。一方、5 日予報の精度については 2005 年の大幅な向上の後、停滞気味である。5 日予報精度の改善については、UKMO と ECMWF が 2006 年後半に実施し、大きな効果を得たモデル変更（データ同化システムの変更、新規データ利用を含む）の内容を今後の開発の参考にできるかもしれない。

第 4.4.1 表に示した現在の各数値予報センターの比較からは、JMA の予報モデルおよび同化システムの分解能、データ打ち切り時間、観測データの利用に依然改善すべき点があることがわかる。観測データについては、GPS 掩蔽データや、ハイパースペクトル赤外サウンダ(AIRS, IASI)データの利用が他の数値予報センターに比べて進んでいない。

当面 2007 年 11 月に 20km 全球モデルが現業化されることによる精度向上が期待される（第 1.2 節を参照）。新モデルでは水平分解能や鉛直層数が増強されることから、他のセンターでも取り組んでいるように分解能に適した物理過程の改良や既存観測データの有効利用を進める必要がある。

参考ホームページ

英国気象局科学諮問委員会資料

<http://www.metoffice.gov.uk/research/nwp/publications/mosac/>

GDPFS レポート

<http://www.wmo.ch/pages/prog/www/DPFS/ProgressReports/2006/ECMWF.pdf>

<http://www.wmo.ch/pages/prog/www/DPFS/ProgressReports/2006/UnitedKingdom.pdf>

<http://www.wmo.ch/pages/prog/www/DPFS/ProgressReports/2005/UnitedStates.pdf>

参考文献

岡本幸三, 2007: ATOVS 直接同化. 数値予報課報告・別冊第 53 号, 気象庁予報部, 58-70.

門脇隆志, 2005: 全球 4 次元変分法. 数値予報課報告・別冊第 51 号, 気象庁予報部, 100-105.

北川裕人, 藪将吉, 村井臣哉, 2005: 雲-放射過程. 数値予報課報告・別冊第 51 号, 気象庁予報部, 65-66.

松村崇行, 片山桂一, 中川雅之, 2005: セミラグランジュ統一モデル. 数値予報課報告・別冊第 51 号, 気象庁予報部, 32-35.

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.

山下浩史, 今井崇人, 2007: 大気追跡風. 数値予報課報告・別冊第 53 号, 気象庁予報部, 36-56.

Lorenc, A., 2006: Global and Regional Data Assimilation Progress and Plans. MOSAC-11. [Available from <http://www.metoffice.gov.uk/research/nwp/publications/mosac/doc-2006-7.pdf>]

WMO, 1992: the Manual on the Global Data-Processing and Forecasting System, WMO No. 485, Part II, Attachment II-7, Table F.

WMO, 2005: WMO Technical Progress Report on the Global Data-Processing and Forecasting System (GDPFS) and Numerical Weather Prediction (NWP). WMO TPR-GDPFS-NWP.

Wu, W.S., R.J. Purser, and D.F. Parrish, 2002: Three-Dimensional Variational Analysis with Spatially Inhomogeneous Covariances. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 2905-2916.

付録 A 統計的検証で利用される代表的な指標¹

本テキスト内で利用されている統計的検証の指標について説明する。本テキスト内での利用箇所を、各項の見出しの後に括弧書きで記した。(ただし、平均誤差等、利用頻度の高い一般的なものと、本付録内でのみ利用されているものについては省略している。)

A.1 平均誤差、平方根平均二乗誤差、誤差の標準偏差

予報誤差を表す基本的な指標として平均誤差 (Mean Error、一般に ME、バイアスまたは系統誤差と記される) と平方根平均二乗誤差 (Root Mean Square Error、一般に RMSE と記される) がある。これらは次式で定義される。

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - a_i)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - a_i)^2}$$

ここで、 N は標本数、 x_i は予報値、 a_i は実況値 (真値) である (実況値は客観解析値や観測値で近似されることが多い)。ME は予報値の実況値からの偏りの平均である。また、RMSE は最小値 0 に近いほど予報が実況に近いことを示す。なお、RMSE は ME からの寄与を分離して、

$$RMSE^2 = ME^2 + \sigma_e^2$$

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - a_i - ME)^2$$

と表すことができる。ここで σ_e は誤差の標準偏差である。

A.2 カテゴリー検証

カテゴリー検証では、まず、対象となる現象の「あり」、「なし」を判定する基準に基づいて予報と実況それぞれにおける現象の有無を判定し、その結果により標本を分類する。そして、それぞれのカテゴリーに分類された頻度数をもとに予報の特性を検証する。

A.2.1 分割表

分割表はカテゴリー検証において、それぞれのカテゴリーに分類された頻度数を示す表である (表 A.2.1)。各スコアは、表 A.2.1 に示される各区分の頻度数を用

表 A.2.1 分割表。FO、FX、XO、XX はそれぞれの頻度数を表す。

		実況		計
		あり	なし	
予報	あり	FO	FX	FO+FX
	なし	XO	XX	XO+XX
計		M	X	N

いて定義される。なお、以下では全事例数を

$$N = FO + FX + XO + XX$$

実況「現象あり」の頻度数を

$$M = FO + XO$$

実況「現象なし」の頻度数を

$$X = FX + XX$$

で表すこととする。

A.2.2 適中率 (第 3.5 節、第 3.9 節)

$$\text{適中率} = \frac{FO + XX}{N} \quad (0 \leq \text{適中率} \leq 1)$$

適中率 (Percent Correct、Proportion Correct) は予報が適中した割合である。最大値 1 に近いほど予報の精度が高いことを示す。

A.2.3 空振り率 (第 3.6 節、第 3.8 節)

$$\text{空振り率} = \frac{FX}{FO + FX} \quad (0 \leq \text{空振り率} \leq 1)$$

空振り率 (False Alarm Ratio) は、予報「現象あり」の頻度数に対する空振り (予報「現象あり」、実況「現象なし」) の割合である。最小値 0 に近いほど空振りが少ないことを示す。また、このテキストでの使用例では分母を $FO + FX$ としているが、代わりに N として定義する場合もある。

A.2.4 見逃し率

$$\text{見逃し率} = \frac{XO}{M} \quad (0 \leq \text{見逃し率} \leq 1)$$

見逃し率 (Miss Rate、Frequency of Misses) は、実況「現象あり」の頻度数 ($M = FO + XO$) に対する見逃し (実況「現象あり」、予報「現象なし」) の割合である。最小値 0 に近いほど見逃しが少ないことを示す。また、分母を M とする代わりに、 N として定義する場合もある。

A.2.5 捕捉率 (第 3.6 節、第 3.7 節、第 3.8 節)

$$\text{捕捉率} = \frac{FO}{M} \quad (0 \leq \text{捕捉率} \leq 1)$$

捕捉率 (Probability of Detection、Prefigurance、適中率と訳されることもある) は、実況「現象あり」であつ

¹ 美濃 寛士

たときに予報が適中した割合である。最大値 1 に近いほど見逃しが少なく予報の精度が高いことを示す。ただし、この指標から空振りの頻度 (FX) を推定することはできない。ROC 曲線(第 A.3.5 項)のプロットに用いられ、この場合一般に Hit Rate と記される。

A.2.6 False Alarm Rate (第 3.7 節)

False Alarm Rate (Probability of False Detection) と呼ばれる。誤警報率、空振り率と訳されることもある)は実況「現象なし」であったときに予報が外れた割合であり、第 A.2.3 項の空振り率とは分母が異なる。

$$Fr \equiv \frac{FX}{X} \quad (0 \leq Fr \leq 1)$$

最小値 0 に近いほど空振りの予報が少なく予報の精度が高いことを示す。ROC 曲線(第 A.3.5 項)のプロットに用いられる。

A.2.7 バイアスコア

バイアスコア(Bias Score, Frequency Bias) は実況「現象あり」の頻度数に対する予報「現象あり」の頻度数の比であり、次式で定義される。

$$B \equiv \frac{FO+FX}{M} \quad (B \geq 0)$$

予報と実況で「現象あり」の頻度数が一致する場合に 1 となる。1 より大きいほど予報の「現象あり」の頻度過大、1 より小さいほど予報の「現象あり」の頻度過小である。

A.2.8 気候学的出現率

現象の気候学的出現率 P_c (一般に、現象の出現率、現象の出現相対頻度、Sample Climatology、Sample Climate、Climatological Probability、Sample Relative Frequency、Event Frequency、Base Rate などと呼ばれる)は、標本から見積もられる現象の平均的な出現確率であり、次式で定義される。

$$P_c \equiv \frac{M}{N}$$

この量は実況のみから決まり、予報の精度にはよらない。予報の精度を評価する基準を設定する際にしばしば用いられる。

A.2.9 スレットスコア

スレットスコア(Threat Score, TS, Critical Success Index と呼ばれる)は「現象あり」の場合の予報適中頻度数(FO)に着目して予報精度を評価する指標であり、次式で定義される。

$$TS \equiv \frac{FO}{FO+FX+XO} \quad (0 \leq TS \leq 1)$$

出現頻度の低い現象 ($XX \gg FO, FX, XO$) について、 XX の影響を除いて検証するのに有効である。最大値 1 に近いほど予報の精度が高いことを示す。なお、スレットスコアは現象の気候学的出現率の影響を受けやすく、例えば異なる環境下で行われた予報の比較には適さない。この問題を緩和するため次項のエクイタブルスレットスコアなどが考案されている。

A.2.10 エクイタブルスレットスコア (第 2.2 節)

エクイタブルスレットスコア(Equitable Threat Score, ETS, Gilbert Skill Score と呼ばれる)は気候学的な確率で「現象あり」が適中した頻度を除いて求めたスレットスコアであり、次式で定義される(Schaefer 1990)。

$$ETS \equiv \frac{FO-S_f}{FO+FX+XO-S_f} \quad \left(-\frac{1}{3} \leq ETS \leq 1\right)$$

ただし、

$$S_f = P_c(FO+FX), \quad P_c = \frac{M}{N}$$

である。ここで、 P_c は現象の気候学的出現率(第 A.2.8 項)、 S_f は「現象あり」をランダムに $FO+FX$ 回予報した場合(ランダム予報)の「現象あり」の適中頻度数である。最大値 1 に近いほど予報の精度が高いことを示す。ランダム予報で 0 となる。また、 $FO=XX=0$ 、 $FX=XO=N/2$ の場合に最小値 $-1/3$ をとる。

A.2.11 Heidke のスキルスコア(スキルスコア) (第 3.8 節)

気候学的確率などによる予測の難易を取り除いて、予測の技術力を評価するために考案された指数は一般にスキルスコアと呼ばれている(菊池原 1988)。その代表的なものがここに述べる Heidke のスキルスコア(Heidke's Skill Score)で、本テキストでは、「Heidke の」は省略して用いている。スキルスコアは、気候学的な確率で「現象あり」および「現象なし」が適中した頻度を除いて求める適中率であり、次式で定義される。

$$Skill \equiv \frac{FO+XX-S}{N-S} \quad (-1 \leq Skill \leq 1)$$

ただし、

$$S = Pm_c(FO+FX) + Px_c(XO+XX),$$

$$Pm_c = \frac{M}{N}, \quad Px_c = \frac{X}{N}$$

である。ここで、 Pm_c は「現象あり」、 Px_c は「現象なし」の気候学的出現率(第 A.2.8 項)、 S は現象の「あり」を $FO+FX$ 回、(すなわち、「なし」を $XO+XX$ 回)ランダムに予報した場合(ランダム予報)の適中頻度数である。

最大値 1 に近いほど予報の精度が高いことを示す。ランダム予報で 0 となる。また、 $FO = XX = 0$ 、 $FX = XO = N/2$ の場合に最小値 -1 をとる。

A.2.12 n×n 分割表とスコア (第 3.8 節、第 3.9 節)

表 A.2.1 の分割表では、事象を 3 個以上のカテゴリに分類する場合に対応できない。このとき、カテゴリの個数が n であれば、表 A.2.1 を $n \times n$ の分割表に拡張したものを使用する(表 A.2.2)。

表 A.2.2 n×n 分割表。F_iO_j はそれぞれの頻度数を表す。

		実況			
		O ₁	O ₂	...	O _n
予報	F ₁	F ₁ O ₁	F ₁ O ₂	...	F ₁ O _n
	F ₂	F ₂ O ₁	F ₂ O ₂	...	F ₂ O _n
	...	...	...	...	...
	F _n	F _n O ₁	F _n O ₂	...	F _n O _n

例えば、天気予報を「晴れ」、「曇り」、「降水あり」の 3 つのカテゴリに分類して評価する場合は、3×3 分割表($n=3$)を用いる。全事例数を

$$Nn = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n F_{ij} O_j$$

とすると、第 3.9 節で利用されている、適中率(第 A.2.2 項)は、 $n \times n$ 分割表の場合以下ようになる。

$$\text{適中率}(n \times n) = \frac{\sum_{i=1}^n F_{ii} O_i}{Nn}$$

また、第 3.8 節で利用されているスキルスコア(第 A.2.11 項)は以下ようになる。

$$\text{スキルスコア}(n \times n) = \frac{\sum_{i=1}^n F_{ii} O_i - Sn}{Nn - Sn}$$

ただし、

$$Sn = \sum_{k=1}^n \frac{\sum_{j=1}^n F_{jk} O_k \cdot \sum_{i=1}^n F_{ki} O_i}{Nn}$$

A.3 確率予報に関する指標

A.3.1 ブライアスコア (第 3.2 節)

ブライアスコア(Brier Score、BS) は確率予報の統計検証の基本的指標である。ある現象の出現確率を対象とする予報について、次式で定義される。

$$BS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - a_i)^2 \quad (0 \leq BS \leq 1)$$

ここで、 p_i は確率予報値(0 から 1)、 a_i は実況値(現象ありで 1、なしで 0)、 N は標本数である。 BS は完全に適中する決定論的な($p_i=0$ または 1 の)予報(一般に完全予報と呼ばれる)で最小値 0 をとり、0 に近いほど予報の精度が高いことを示す。また、現象の気候学的出現率 $P_c = M/N$ (M は実況「現象あり」の頻度数、第 A.2.8 項参照)を常に確率予報値とする予報(一般に気候値予報と呼ばれる)のブライアスコア BS_c は

$$BS_c = P_c(1 - P_c)$$

となる。ブライアスコアは現象の気候学的出現率の影響を受けるため、異なる標本や出現率の異なる現象に対する予報の精度を比較するのには適さない。例えば上記 BS_c は P_c 依存性を持ち、同じ予報手法(ここでは気候値予報)に対しても P_c の値に応じて異なる値をとる(Stanski et al. (1989) など)。次項のブライアスキルスコアはこの問題を緩和するため気候値予報を基準にとり、そこからのブライアスコアの変化によって予報精度を評価する。

A.3.2 ブライアスキルスコア

ブライアスキルスコア (Brier Skill Score、BSS) はブライアスコアに基づいた指標であり、気候値予報を基準とした予報の改善の度合いを示す。ブライアスコア BS 、気候値予報によるブライアスコア BS_c を用いて

$$BSS = \frac{BS_c - BS}{BS_c} \quad (BSS \leq 1)$$

で定義される。完全予報で 1、気候値予報で 0、気候値予報より誤差が大きいと負となる。

A.3.3 Murphy の分解

Murphy (1973) は、ブライアスコアと予報の特性との関連を理解しやすくするため、ブライアスコアを信頼度(reliability)、分離度(resolution)、不確実性(uncertainty)の 3 つの項に分解した。これを Murphy の分解と呼ぶ(高野 (2002) などに詳しい)。

確率予報において、確率予報値を L 個の区間に分け、標本を確率予報値の属する区間に応じて分類することを考える。確率予報値が l 番目の区間に属する標本数を N_l ($N = \sum_{l=1}^L N_l$)、このうち実況が「現象あり」であった頻度数を M_l ($M = \sum_{l=1}^L M_l$) とすると、Murphy の分解によりブライアスコアは以下のように表される(確率予報値の l 番目の区間の区間代表値を p_l とする)。

$BS = \text{信頼度} - \text{分離度} + \text{不確実性}$

$$\text{信頼度} = \sum_{l=1}^L \left(p_l - \frac{M_l}{N_l} \right)^2 \frac{N_l}{N}$$

$$\text{分離度} = \sum_{l=1}^L \left(\frac{M}{N} - \frac{M_l}{N_l} \right)^2 \frac{N_l}{N}$$

$$\text{不確実性} = \frac{M}{N} \left(1 - \frac{M}{N} \right)$$

信頼度は確率予報値(p_l)と実況での現象出現相対頻度(M_l / N_l)が一致すれば最小値 0 となる。分離度は確率予報値に対応する実況での現象の出現相対頻度(M_l / N_l)が気候学的出現率($P_c = M / N$)から離れているほど大きい値をとる。不確実性は現象の気候学出現率が $P_c = 0.5$ の場合に最大値 0.25 をとる。この項は実況のみによって決まり、予報の手法にはよらない。また、不確実性 = BS_c が成り立つ。これらを用いてブライアスキルスコアを次のように書くことができる。

$$BSS = \frac{\text{分離度} - \text{信頼度}}{\text{不確実性}}$$

A.3.4 確率値別出現率図 (第 3.2 節、第 3.6 節、第 3.8 節)

確率値別出現率図 (Reliability Diagram、Attributes Diagram と呼ばれる) は、予報された現象出現確率 P_{fcst} を横軸に、実況で現象が出現した相対頻度 P_{obs} を縦軸にとり、確率予報の特性を示した図である (図 A.3.1 参照、Wilks (2006) などに詳しい)。一般に、確率予報の特性は確率値別出現率図上で曲線として表される。この曲線を信頼度曲線 (Reliability curve) と呼ぶ。

信頼度曲線の特性は、Murphy の分解 (第 A.3.3 項) の信頼度、分離度と関連付けることができる。横軸 P_{fcst} の各値について、信頼度 (あるいは分離度) への寄与は、信頼度曲線上の点から対角線 $P_{obs} = P_{fcst}$ 上の点 (あるいは直線 $P_{obs} = P_c$ 上の点) までの距離の二乗として表現される。 P_{fcst} の各値でのこれらの寄与を、標本数に比例する重みで平均して信頼度 (あるいは分離度) が得られる。例えば、no-skill line (直線 $P_{obs} = (P_{fcst} + P_c) / 2$) 上の点では、信頼度と分離度への寄与は等しい大きさを持ち、ブライアスキルスコアへの寄与が 0 となる。また no-skill line と直線 $P_{fcst} = P_c$ との間の領域 (分離度への寄与 > 信頼度への寄与、図 A.3.1 灰色の領域) 内に位置する点は、ブライアスキルスコアに正の寄与を持つ。

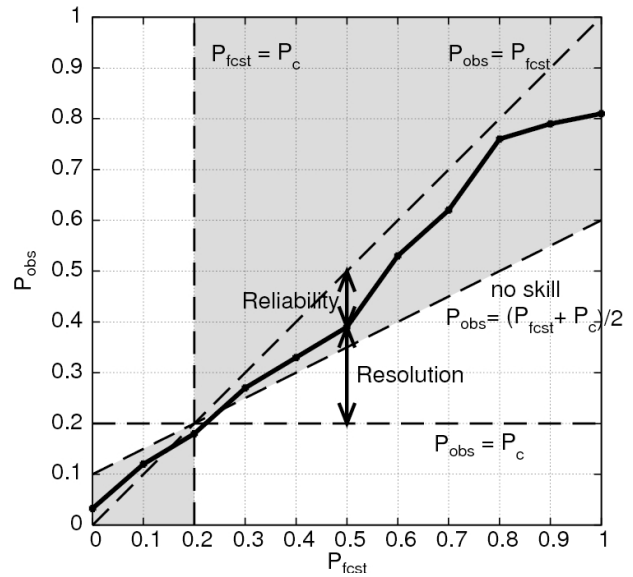


図 A.3.1 確率値別出現率図の模式図。横軸は予報現象出現確率、縦軸は実況現象出現相対頻度、実線が信頼度曲線である。対角線、直線 $P_{obs} = P_c$ からの距離の二乗がそれぞれ信頼度 (Reliability)、分離度 (Resolution) への寄与に対応している。灰色の領域内の点はブライアスキルスコアに正の寄与を持つ。

特別な場合として、気候値予報 (第 A.3.1 項参照) では 1 点 (P_{fcst}, P_{obs}) = (P_c, P_c) が信頼度曲線に対応する。また、次の 2 つの特性を示す確率予報は精度が高い。

- ・信頼度曲線が対角線に (信頼度が最小値 0 に) 近い。
- ・信頼度曲線上の大きい標本数に対応する点が点 (P_{fcst}, P_{obs}) = (P_c, P_c) (気候値予報) から離れた位置 (確率値別出現率図の左下または右上寄り) に分布する (分離度が大きい)。

A.3.5 ROC 面積スキルスコア (第 3.7 節)

確率予報では、現象の予報出現確率にある閾値を設定し、これを予報の「現象あり」「現象なし」を判定する基準とすることが可能である。さまざまな閾値それぞれについて作成した分割表をもとに、閾値が変化したときの $Fr - Hr$ 平面 (ここで Fr は False Alarm Rate (第 A.2.6 項)、 Hr は Hit Rate (第 A.2.5 項)) 上の軌跡をプロットしたものが ROC 曲線 (相対作用特性曲線、Relative Operating Characteristic curve、ROC curve) である (図 A.3.2 参照、高野 (2002) などに詳しい)。平面内の左上方の領域では $Hr > Fr$ であり、平面の左上側に膨らんだ ROC 曲線特性を持つ確率予報ほど精度が高いと言える。従って、ROC 曲線から下の領域 (図 A.3.2 灰色の領域) の面積 (ROC 面積、ROC area、ROCA) は情報価値の高い確率予報ほど大きく

なる。ROC 面積スキルスコア (ROC Area Skill Score、ROCASS) は情報価値のない予報 ($Hr = Fr$) を基準として ROC 面積を評価するものであり、次式で定義される。

$$ROCASS \equiv 2(ROCA - 0.5) \quad (-1 \leq ROCASS \leq 1)$$

完全予報で最大値 1 をとる。また、情報価値のない予報 (例えば、区間 [0,1] から一様ランダムに抽出した値を確率予報値とする予報など) で 0 となる。

参考文献

- 菊地原英和, 1988: 2 カテゴリー予測の検証と評価. 気象予測の検証と評価, 気象研究ノート, **161**, 33-58.
- 高野清治, 2002: アンサンブル予報の利用技術. アンサンブル予報, 気象研究ノート, **201**, 73-103.
- Murphy, A. H., 1973: A new vector partition of the probability score. *J. Appl. Met.*, **12**, 595-600.
- Schaefer, J. T., 1990: The critical success index as an indicator of warning skill. *Wea. Forecasting*, **5**, 570-575.
- Stanski, H. R., L. J. Wilson and W. R. Burrows, 1989: Survey of common verification methods in meteorology. *Research Report No. (MSRB) 89-5*, Forecast Research Division, Atmospheric Environment Service, Environment Canada.
- Wilks, D. S., 2006: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences; Second Edition, International Geophysical Series vol. 91*. Academic Press, 627pp.

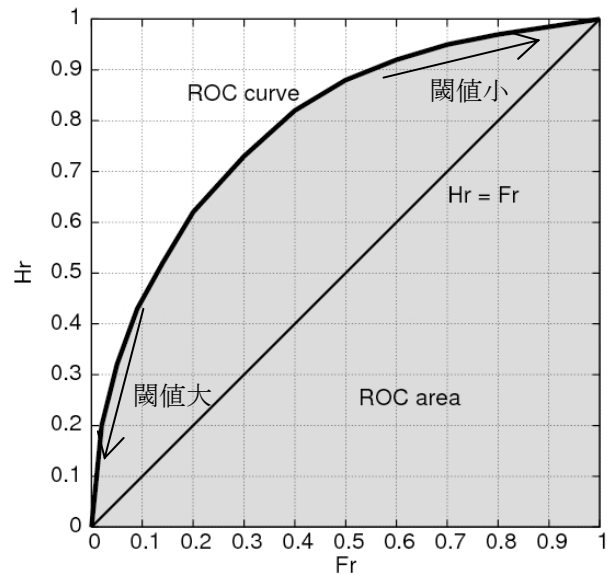


図 A.3.2 ROC 曲線の模式図。横軸は Fr、縦軸は Hr である。灰色の領域の面積が ROC 面積である。