

# 第1章 高解像度全球モデル

## 1.1 変更の概要<sup>1</sup>

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としている。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
エンベロップ山	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。

<sup>1</sup> 北川 裕人

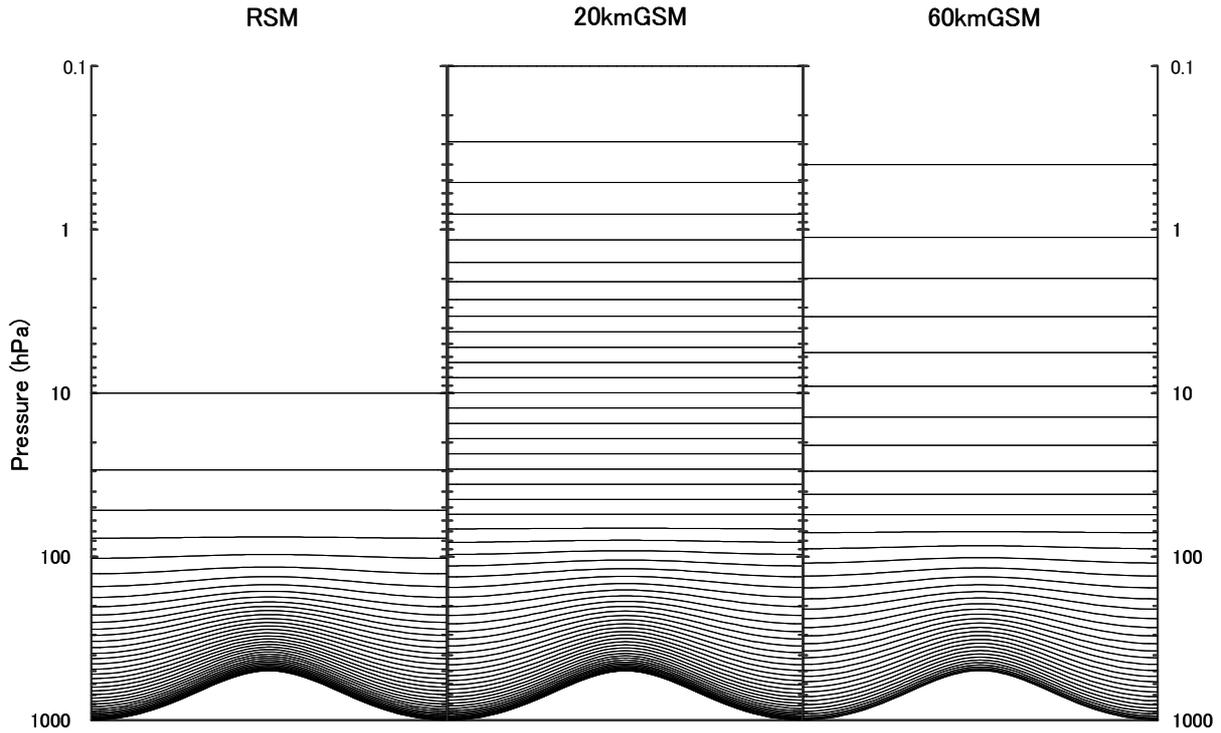


図 1.1.1 RSMと20kmGSM、60kmGSMの鉛直層の配置。各鉛直層のフルレベル気圧(層の代表気圧、層のおよそ中心に相当する)の位置を水平の線で示してある。縦軸は気圧(hPa)。

### 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。

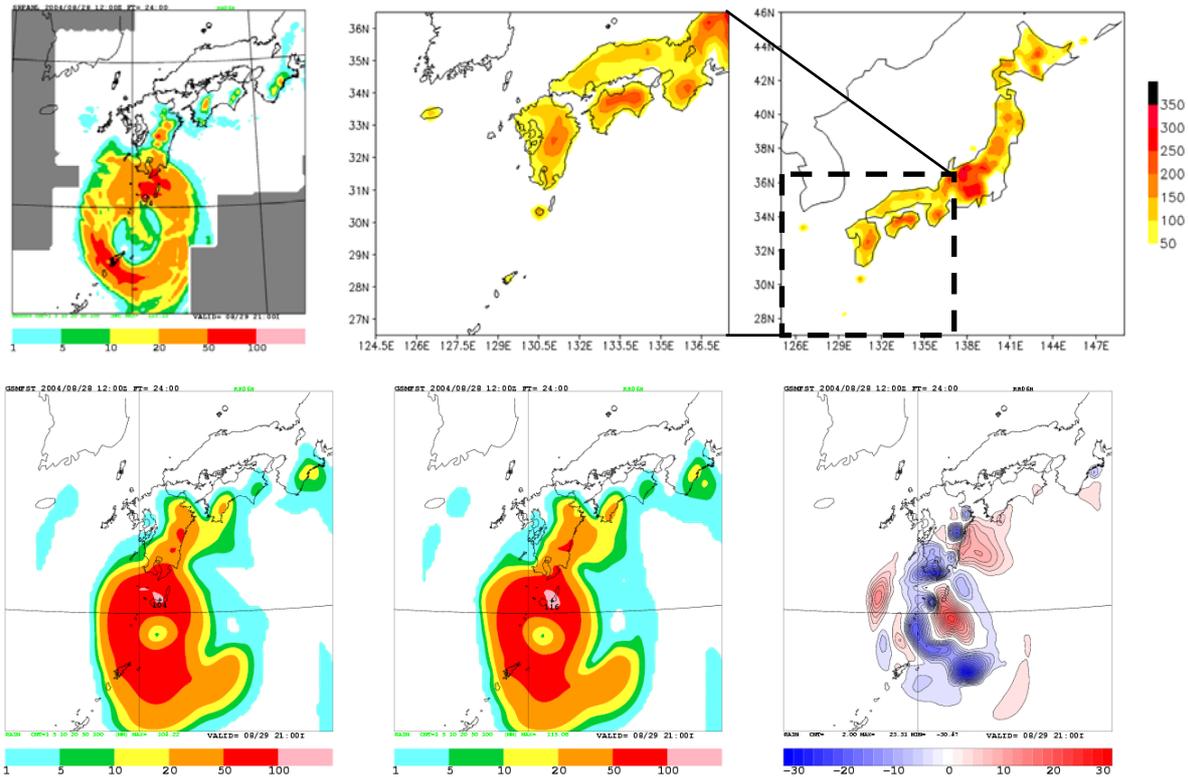


図1.1.2 降水予報におけるエンベロップ山の効果(20kmGSMによる表現)。上段は(左)解析雨量(mm)、(右・中)エンベロップによる標高かさ上げの大きさ(m)と西日本・南西諸島付近を拡大したもの。下段は(左)エンベロップ無しの場合の降水量、(中)エンベロップ有りの場合の降水量、(右)有りから無しを引いた差。2004年8月28日12UTC初期値の24時間予報(2004年台風第16号の事例)による前6時間降水量(mm)。ただし、予報モデル(20kmGSM)はどちらもDCAPE積雲対流トリガーを改良(第1.5節)したモデルを使用している。

### 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

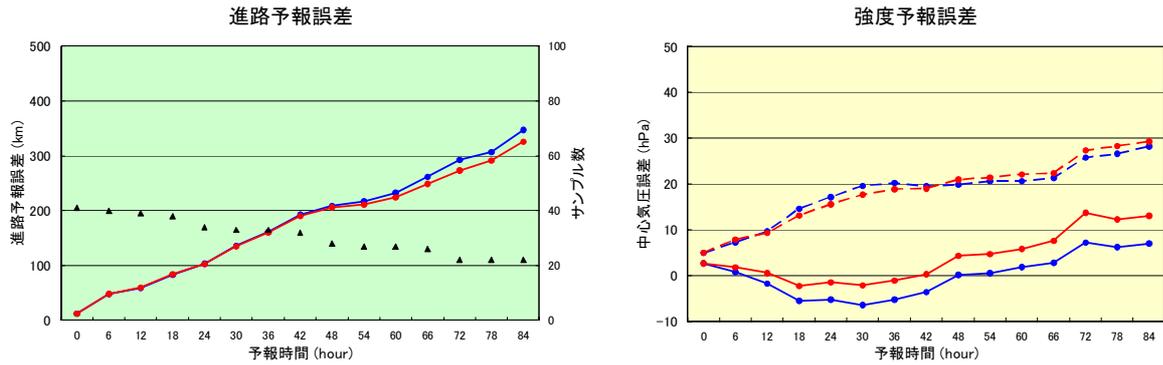


図1.1.3 SST解析値の変更による台風予報への影響(2004年台風第11号～第18号の平均)。(左)進路予報(km)と(右)中心気圧(hPa)の平均誤差(実線)、平方根平均二乗誤差(破線)。青線が数値予報課作成のSST解析値(NPDSST)、赤線が海洋気象情報室作成の高解像度SST解析値(MGDSST)を使用した場合の予報。ただし、初期値はどちらもNPDSSTを用いたデータ同化サイクルで作成されており、また20kmGSMは開発途中のものが使用されている。

についても、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<sup>1</sup>

### 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

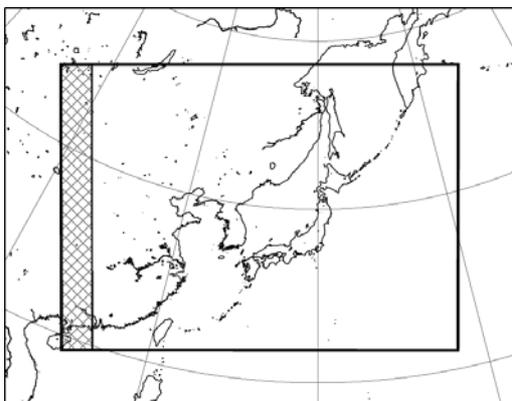


図 1.2.1 対初期値検証を行った領域（黒太線内）。上記の地図全体が RSM の計算領域、そのすぐ内側の太線の四角が検証の計算領域。ただし網掛け部分は海面気圧および 850hPa 気温の検証の対象外とする。

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 $\sigma_e$ 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 $\sigma_e$ 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

<sup>1</sup> 大河原 斉揚

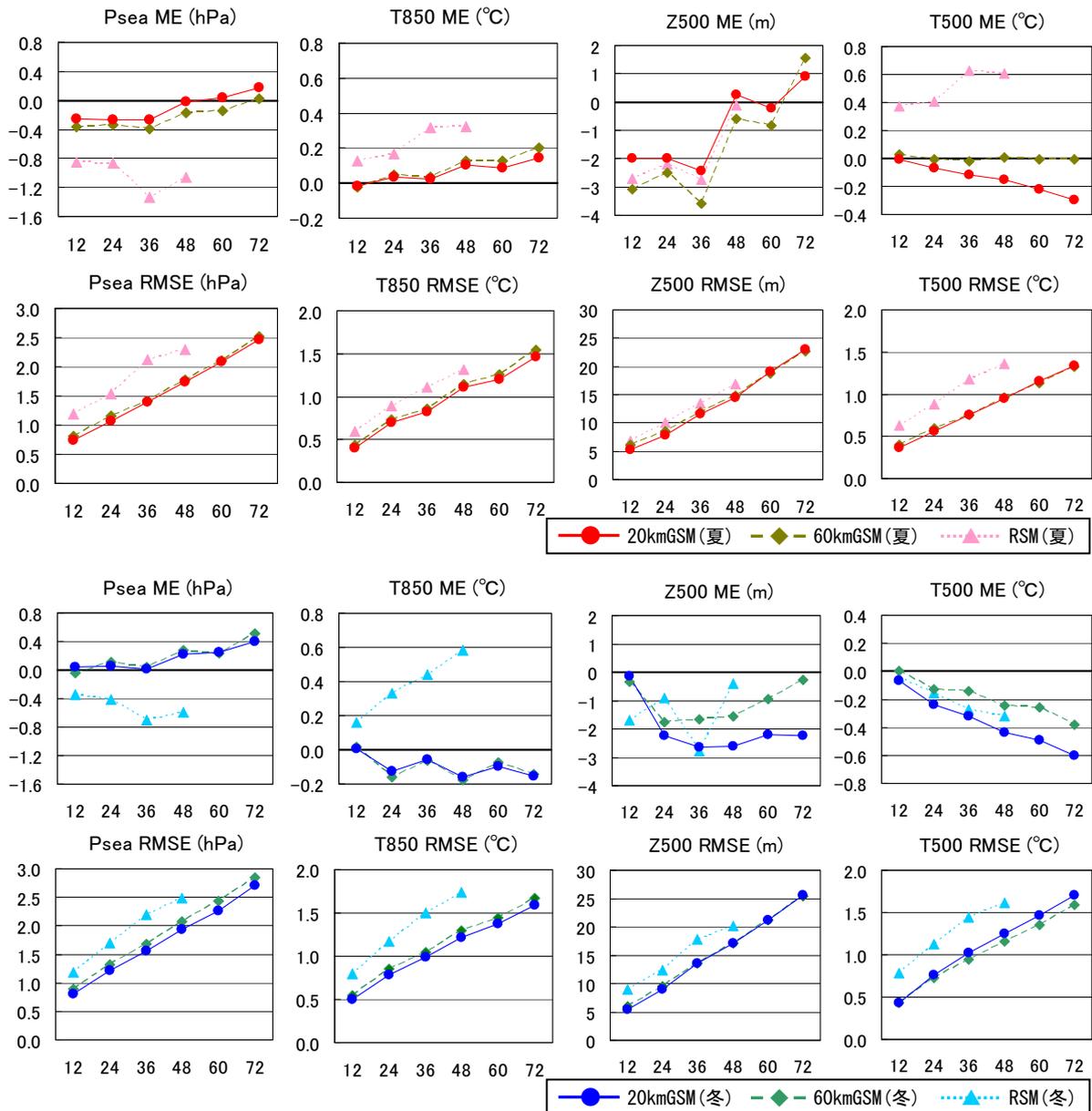


図 1.2.2 日本付近の領域 (図 1.2.1 参照) における 20kmGSM、60kmGSM 及び RSM の対初期値の各スコアの比較。最上段は夏実験の平均誤差(ME)、2 段目は夏実験の平方根平均二乗誤差(RMSE)。3 段目、4 段目はそれぞれ冬実験の ME 及び RMSE。左から順に海面気圧(hPa)、850hPa 気温(°C)、500hPa 高度(m)、500hPa 気温(°C)。グラフの横軸は予報時間 FT (単位: 時間)。 $\bullet$ 及び実線が 20kmGSM、 $\blacklozenge$ 及び破線が 60kmGSM、 $\blacktriangle$ 及び点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

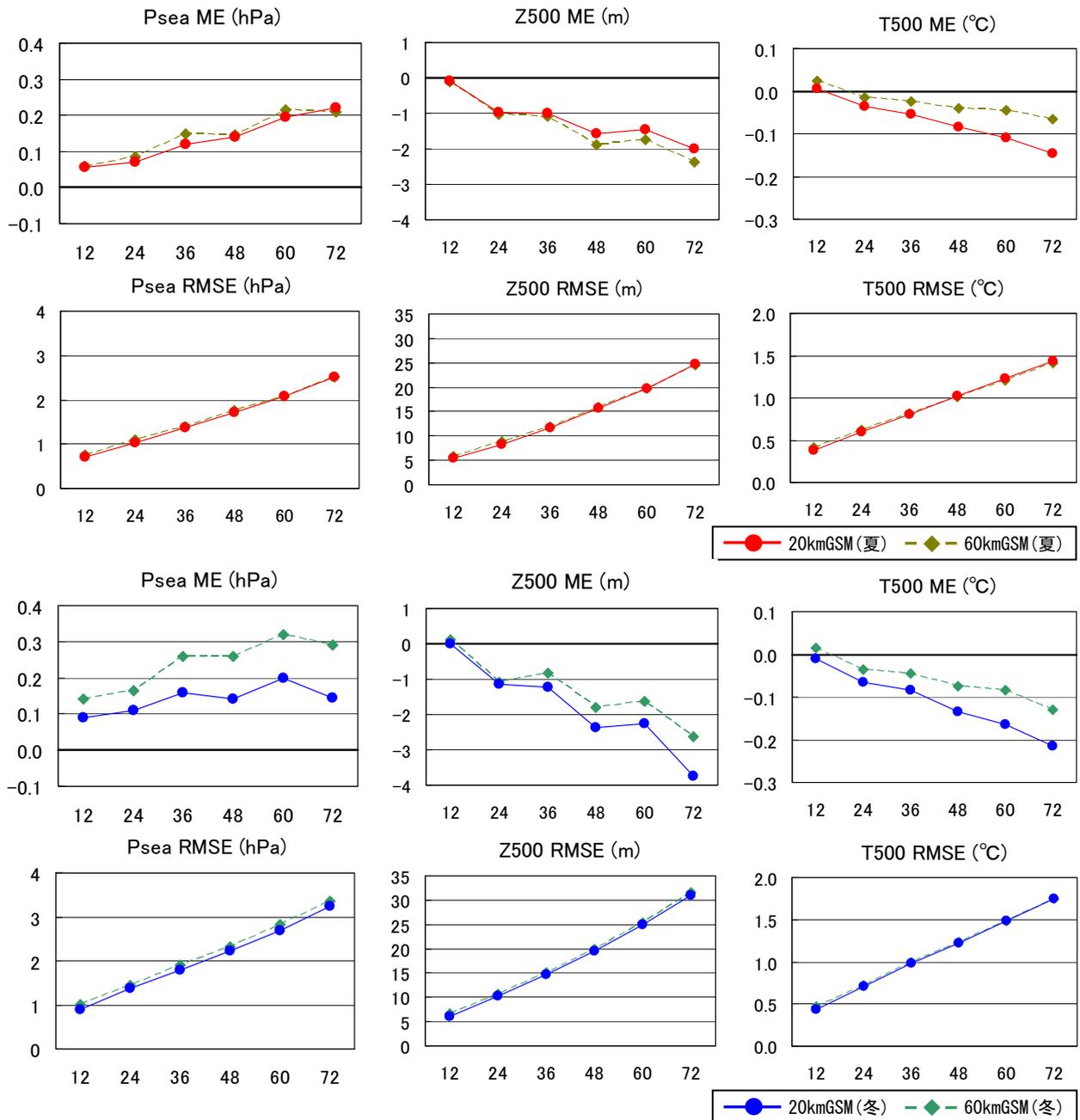


図 1.2.3 北半球領域（北緯 20 度以北）における 20kmGSM と 60kmGSM の対初期値の各スコアの比較。最上段は夏実験の平均誤差(ME)、2 段目は夏実験の平方根平均二乗誤差(RMSE)。3 段目、4 段目はそれぞれ冬実験の ME 及び RMSE。左から順に海面気圧(hPa)、500hPa 高度(m)、500hPa 気温(°C)。グラフの横軸は予報時間 FT (単位：時間)。●及び実線が 20kmGSM、◆及び破線が 60kmGSM。予報の初期時刻は 12UTC。

#### 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。

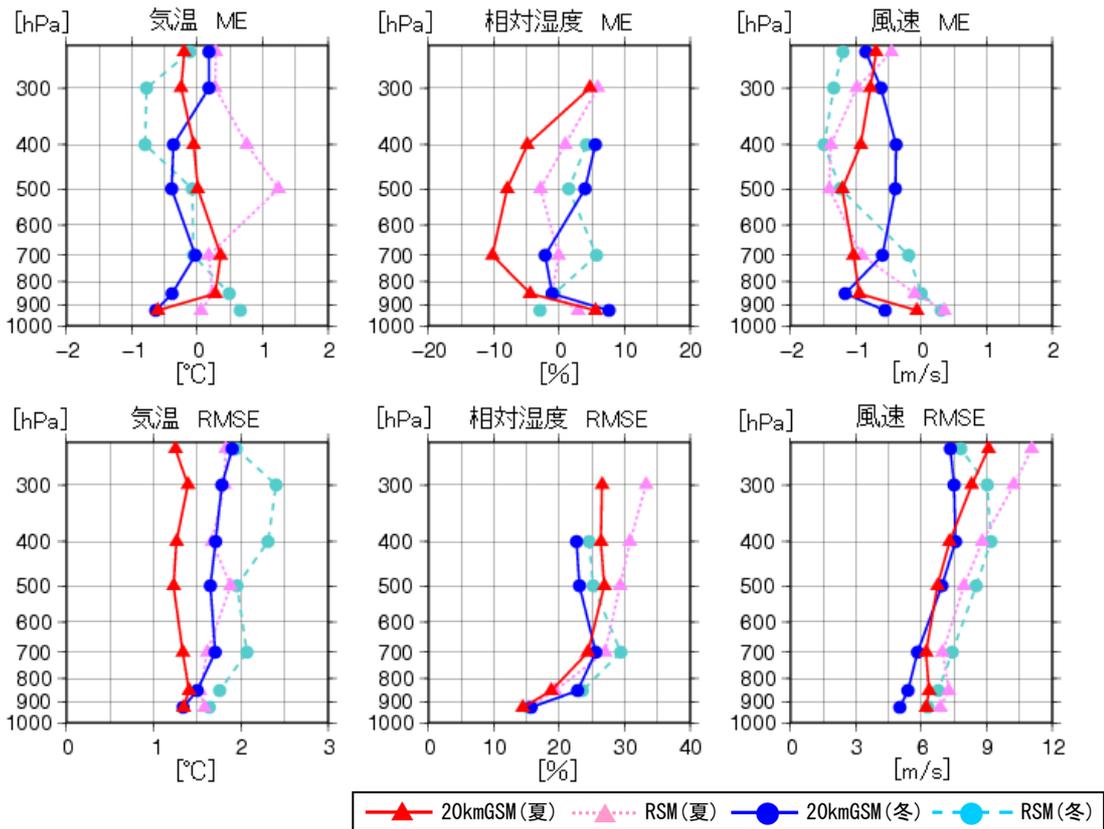


図 1.2.4 20kmGSM 及び RSM の FT=48 の予報値を指定気圧面毎にゾンデの観測値と比較検証した結果。日本国内のゾンデ (20 地点) を比較対象としている。左から気温(°C)、相対湿度(%)、風速(m/s)の鉛直分布のグラフ。上段は ME、下段は RMSE。実線は 20kmGSM、破線及び点線は RSM。▲は夏実験、●は冬実験。縦軸は気圧(hPa)。予報の初期時刻は 12UTC。夏実験の 250hPa、冬実験の 300hPa 及び 250hPa の相対湿度は、ゾンデ観測のサンプル数が少ないためスコアを記載していない。

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<sup>2</sup>。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

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

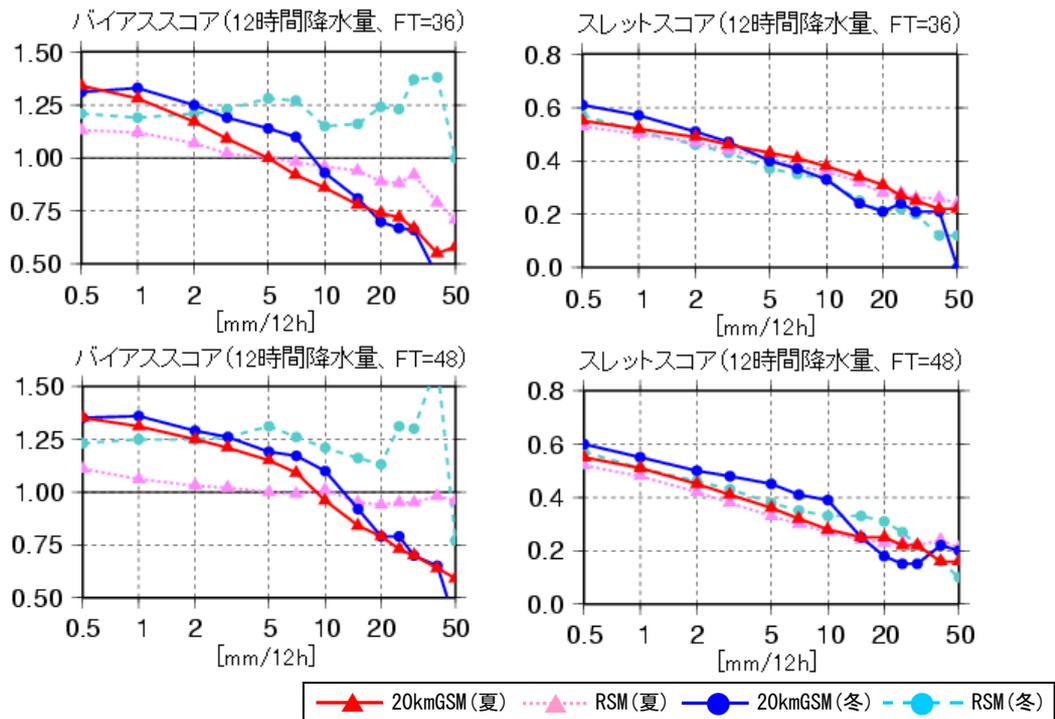


図 1.2.5 20kmGSM 及び RSM の FT=36 及び FT=48 の前 12 時間降水量予報をアメダス観測と比較したスコア。横軸は 12 時間降水量の閾値(mm/12h)、縦軸はバイアスコア (左) 及びスレットスコア (右)。実線は 20kmGSM、破線及び点線は RSM で、▲は夏実験、●は冬実験。予報の初期時刻は 12UTC。

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、バイアスコア及びスレットスコアを閾値別に示したものである<sup>3</sup>。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

<sup>3</sup>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。

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

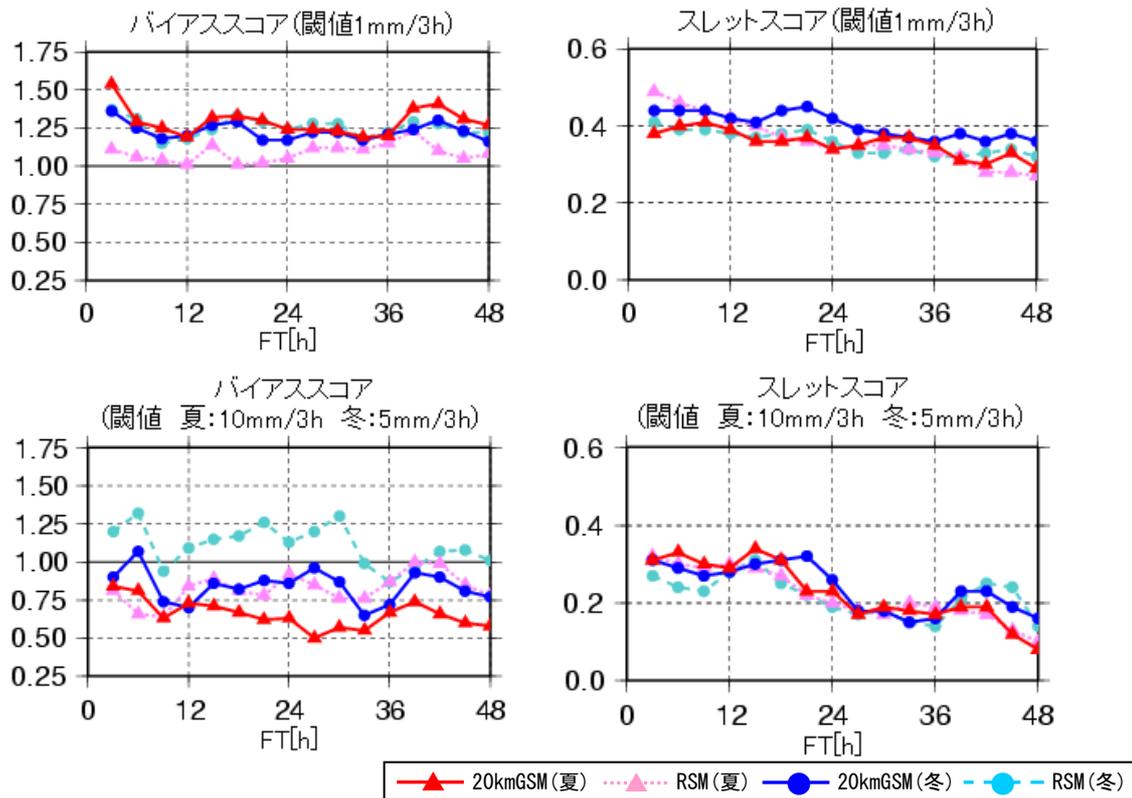


図 1.2.6 20kmGSM 及び RSM の前 3 時間降水量予報をアメダス観測と比較したスコア。横軸は予報時間 FT(単位：時間)、縦軸はバイアスコア (左) 及びスレトスコア (右)。上段は閾値 1mm/3h、下段は同 10mm/3h (夏実験) 及び 5mm/3h (冬実験) の場合についてのスコアを表す。実線は 20kmGSM、点線及び破線は RSM で、▲は夏実験、●は冬実験。予報の初期時刻は 12UTC。

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<sup>1</sup>

### 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<sup>2</sup>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T0411<sup>3</sup>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<sup>4</sup>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<sup>5</sup>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<sup>6</sup>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。

<sup>1</sup> 美濃 寛士

<sup>2</sup> 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。

<sup>3</sup> 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。

<sup>4</sup> 赤道で $f$ は0になってしまうため、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。

<sup>5</sup> 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。

<sup>6</sup> 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

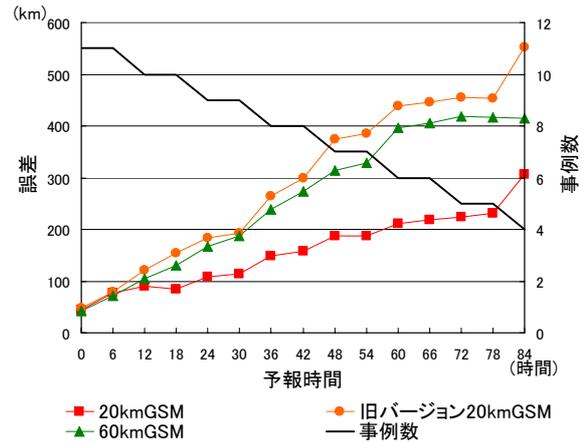


図1.3.1 20kmGSM評価試験におけるT0413の進路予報検証結果。左縦軸は平均進路予報誤差(km)、横軸は予報時間(時間)を表す。20kmGSMは赤色四角(TDボーガス半径変更あり)、旧バージョン20kmGSM(TDボーガス半径変更なし)は橙色丸印、60kmGSMは緑色三角で示している。事例数は黒線で示し、値は右縦軸に対応する。

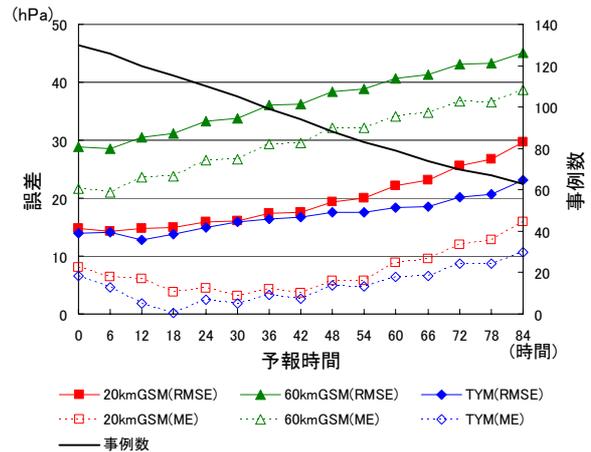


図1.3.2 20kmGSM評価試験における強度予報の検証結果。左縦軸は中心気圧の誤差(hPa)、横軸は予報時間(時間)を表す。実線と塗りつぶされた印はRMSE、破線と白抜き印はMEを示す。20kmGSMは赤色四角、60kmGSMは緑色三角、TYMは青色ひし形で示している。事例数は黒の実線で示し、値は右縦軸に対応する。

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

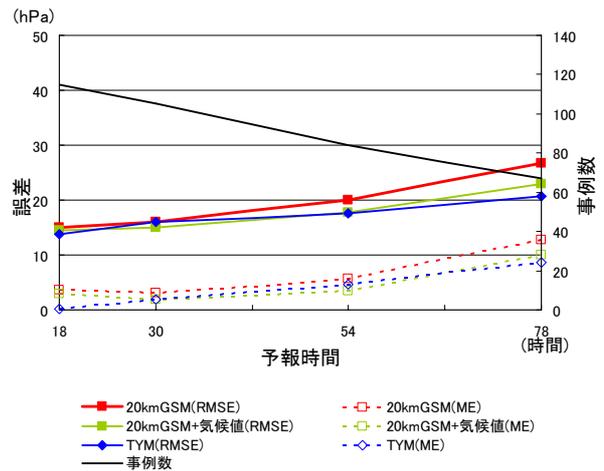


図1.3.3 20kmGSM強度予報に気候値予測を加味したものの検証結果。左縦軸は中心気圧の誤差(hPa)、横軸は予報時間(時間)を表す。太い実線と色塗りされた印はRMSE、破線と白抜き印はMEを示す。20kmGSMに気候値予測を加味したものは黄緑四角、20kmGSMは赤色四角、TYMは青色ひし形で示している。事例数は黒線で示し、値は右縦軸に対応する。

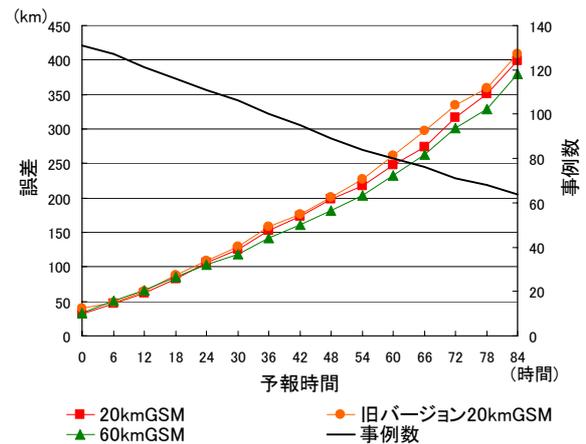


図1.3.4 20kmGSM評価試験の台風進路予報検証結果。左縦軸は平均進路予報誤差(km)、横軸は予報時間(時間)を表す。20kmGSMは赤色四角(TDボーガス半径変更あり)、旧バージョン20kmGSM(TDボーガス半径変更なし)は橙色丸印、60kmGSMは緑色三角で示している。事例数は黒線で示し、値は右縦軸に対応する。

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

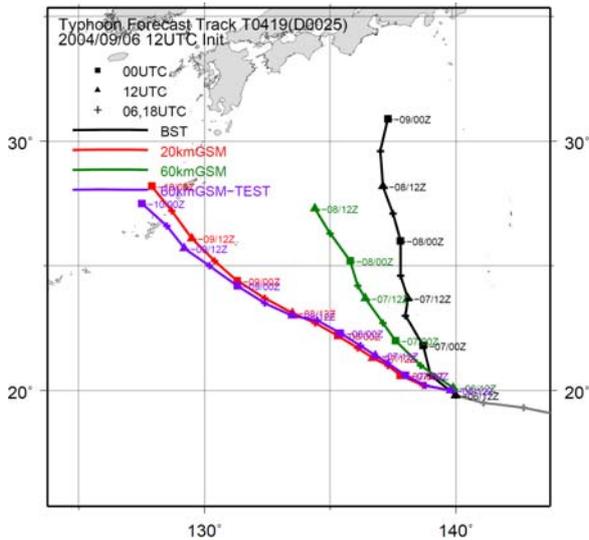


図1.3.5 台風進路予報改善に向けた調査事例。2004年9月6日12UTC初期値のT0419の進路予報結果。20kmGSMの解析予報サイクルで作成された解析値を初期値として用いた60kmGSMの予報結果を紫で示した。赤は20kmGSM評価試験、緑は60kmGSM、黒はベストトラックである。84時間予報とそれに対応する期間の実況を示している。但し、84時間予報の最後まで経路が表示されていないものは、擾乱が弱まったためにプログラムによる自動追跡が不可能となったことを意味している。進路予報位置のうち00UTCは四角、12UTCは三角、06及び18UTCは+印でプロットしている。

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と見える。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

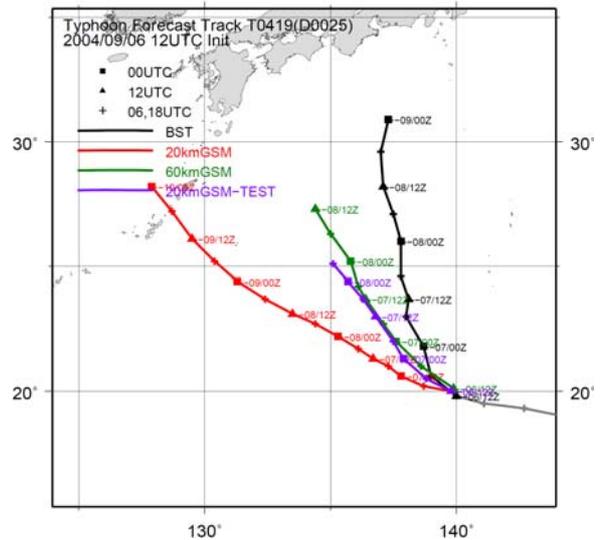


図1.3.6 台風進路予報改善に向けた調査事例。図1.3.5と同様。但し、20kmGSM評価試験と同様の条件で、2004年9月4日00UTCのサイクル解析から6日12UTCの速報解析までの間、解析システムにおける台風ボーガスの観測誤差の設定値のみを1.75倍に変更した実験結果を紫で示している。

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<sup>1</sup>

### 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<sup>2</sup>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。

<sup>2</sup> 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。

<sup>1</sup> 平井 雅之

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°C/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( $\sigma_e$ ))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 $\sigma_e$ 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、 $\sigma_e$ 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<sup>3</sup>。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°C以上の地点がある。20kmGSMはRSM

<sup>3</sup> 例えば、平井・坂下(2006)の図2.3.14を参照。

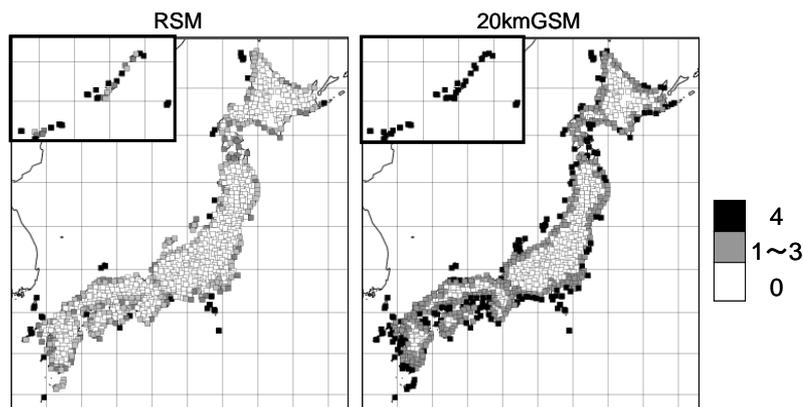


図1.4.1 モデルの予報値を各観測点へ内挿する際に用いる4格子のうち、海格子の数。左がRSM、右が20kmGSM。

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°C以上、本州日本海側で+1～2°C気温を高く予報する傾向がある。また九州沿岸でも+2～4°C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<sup>4</sup>。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こと、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<sup>5</sup>。それに加え、九州近海では海面温度が20°C以上と高く、陸上との温度差は他の地域に比べ大きいこと、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

<sup>4</sup> 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。

<sup>5</sup> 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°Cにも満たない。RSMでは、海面温度の時間変化は全くない。

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
$\sigma_e$	2.24	1.91	2.17	1.88	2.62	2.51

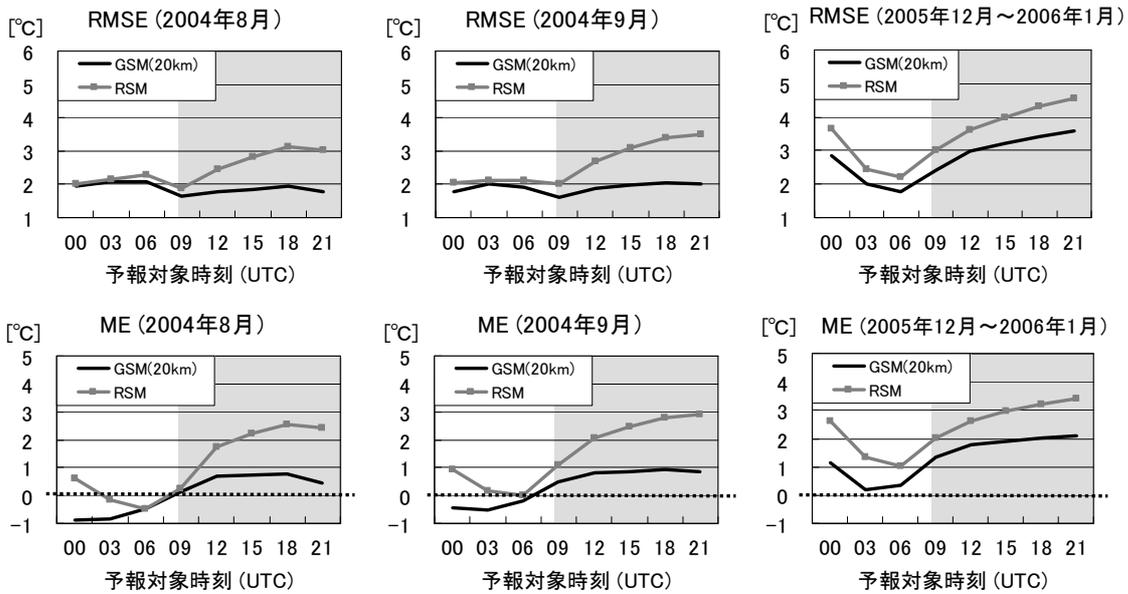


図1.4.2 RSM(灰)と20kmGSM(黒)の気温予報の予報対象時刻別の平方根平均二乗誤差(RMSE)(上段)と平均誤差(ME)(下段)。期間は左から2004年8月、2004年9月、2005年12月～2006年1月。陰影は予報対象時刻が夜間(09～21UTC)であることを示す。

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°C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°C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°C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°C以下、西日本内陸の多くの地点で0°C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°C以下の領域を広く予報し実況に近いものの、-12°C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°C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°C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.

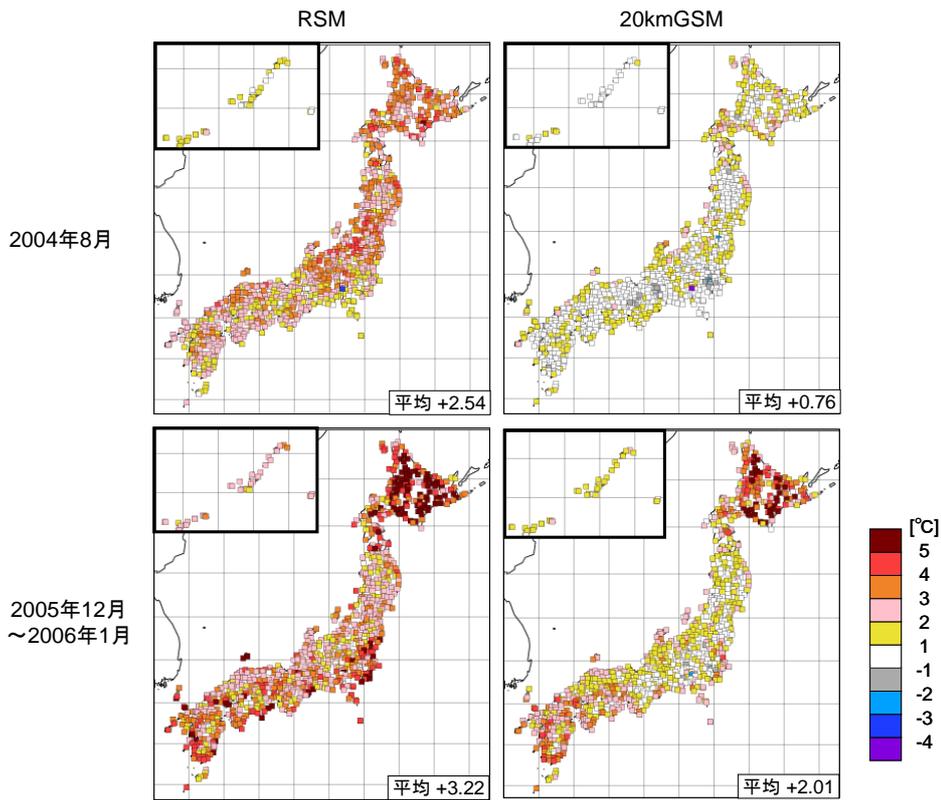


図1.4.3 2004年8月(上段)と2005年12月～2006年1月(下段)における18UTCを予報対象にした観測点別の地上気温の平均誤差。左がRSM、右が20kmGSMのスコア。

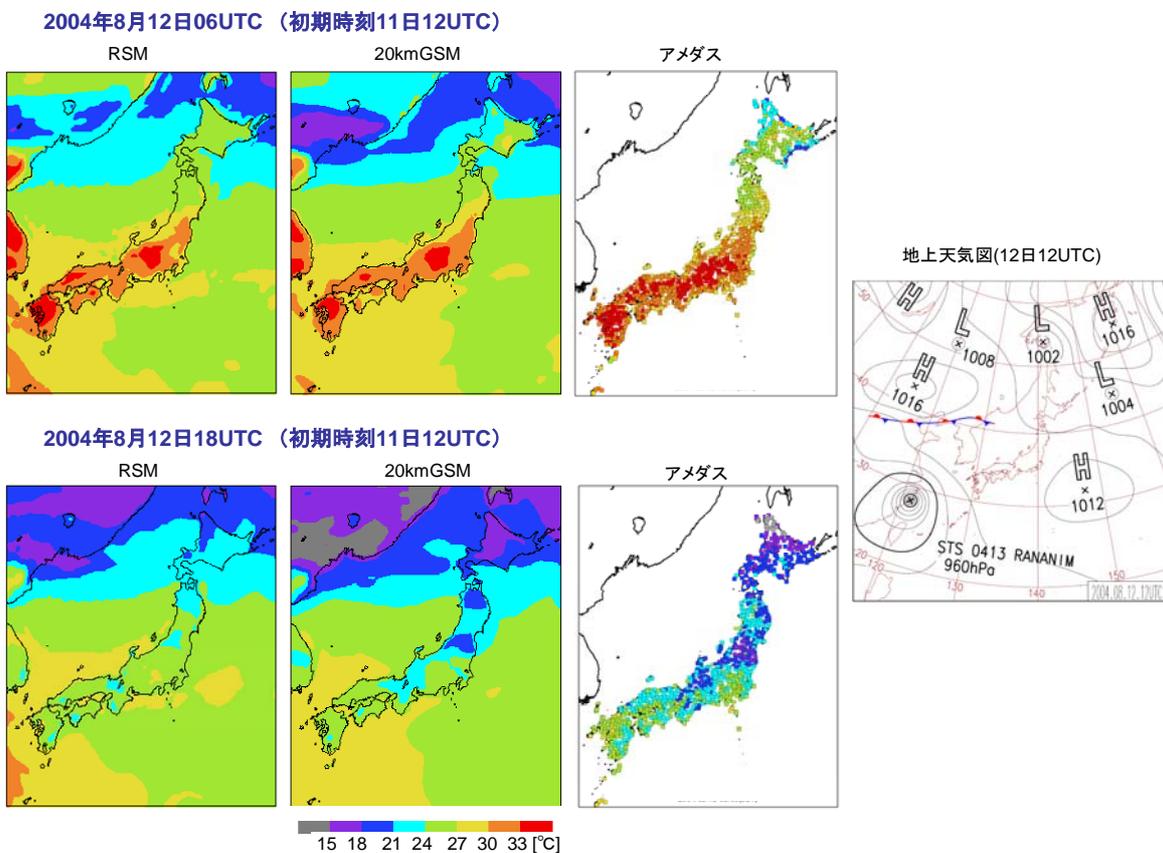


図1.4.4 2004年8月11日06UTC(上段)と18UTC(下段)のRSMと20kmGSMの気温(左から1,2列目)、アメダスによる気温観測値(同3列目)と12日12UTCにおける地上天気図(同4列目)。モデルの初期時刻は12日12UTC。気温は、 $0.65^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ の割合で、海拔0mにおける値に換算。

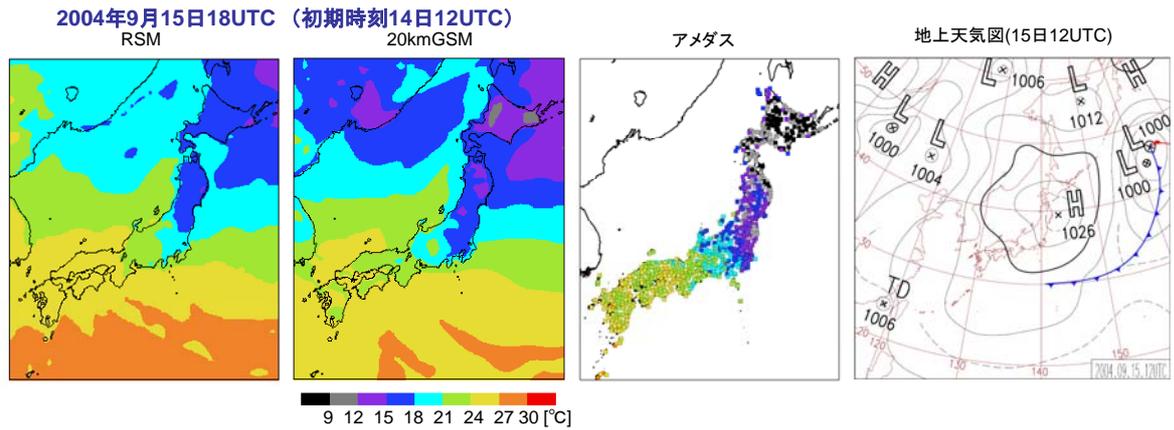


図1.4.5 図1.4.4に同じ。ただし、2004年9月14日12UTC初期値の15日18UTCの気温と15日12UTCの地上天気図を示す。

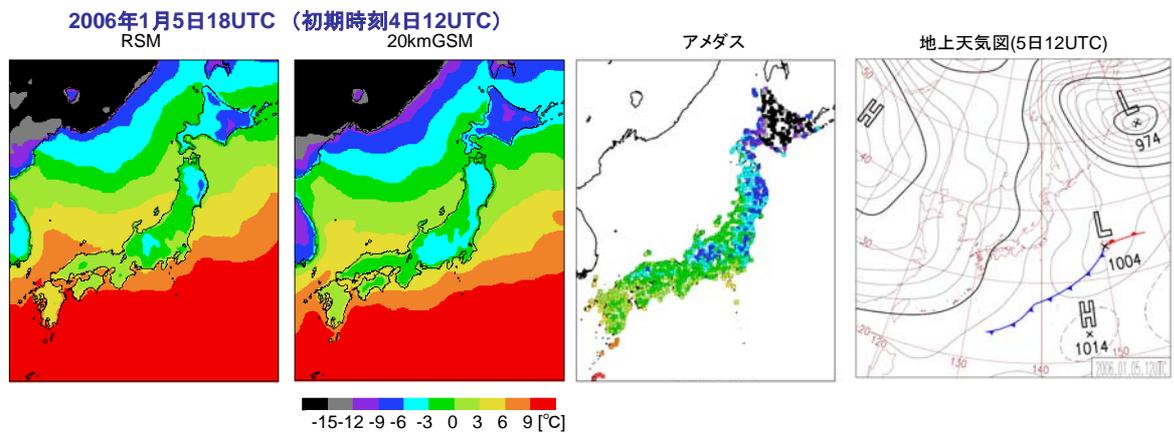


図1.4.6 図1.4.4に同じ。ただし、2006年1月4日12UTC初期値の5日18UTCの気温と5日12UTCの地上天気図を示す。

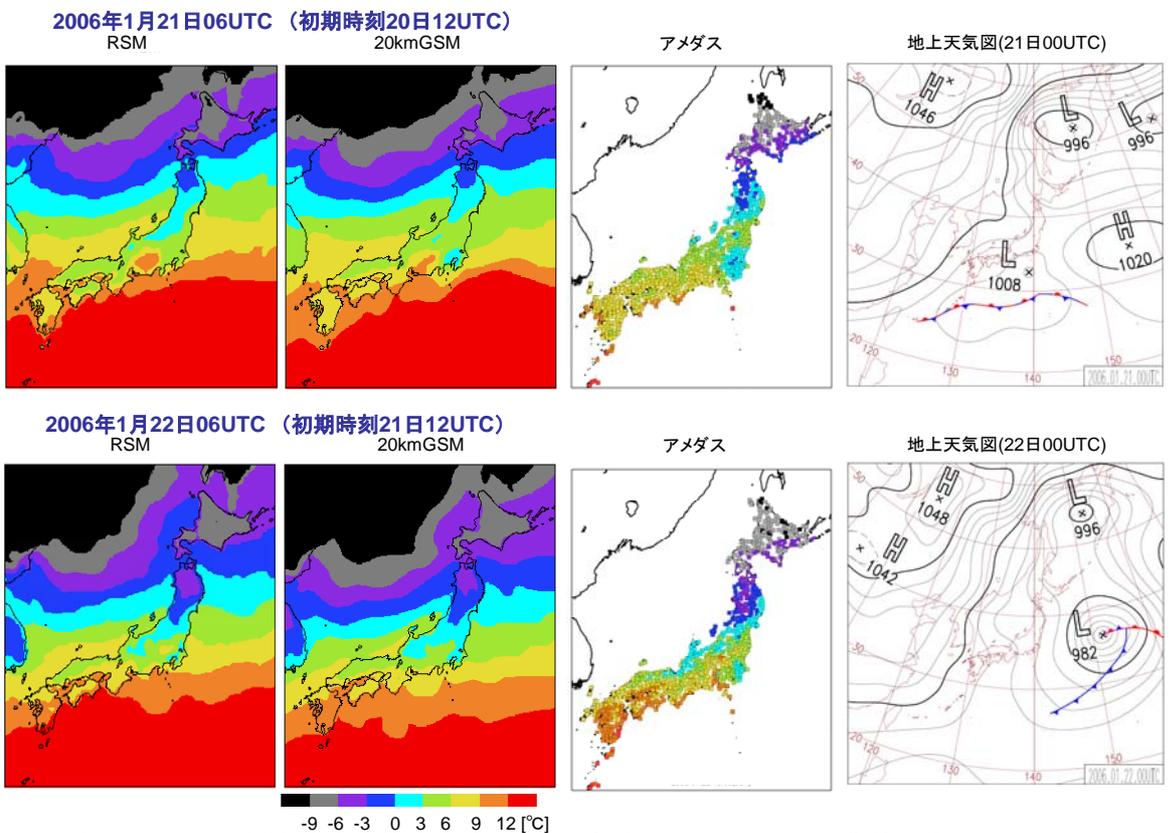


図1.4.7 図1.4.4に同じ。ただし、2006年1月20日12UTC(上)と21日12UTC(下)初期値の翌日06UTCの気温と翌日00UTCの地上天気図を示す。

## 1.5 降水<sup>1</sup>

### 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はほぼ同じである(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・シュバ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不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; 大気不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、 $\Delta t$ 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 $\Delta t$ 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、 $\bar{\quad}$ 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<sup>2</sup>。

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、 $\nabla$ は水平微分、 $\omega$ 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項は鉛直移流、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制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、抑制すべき積雲対流を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

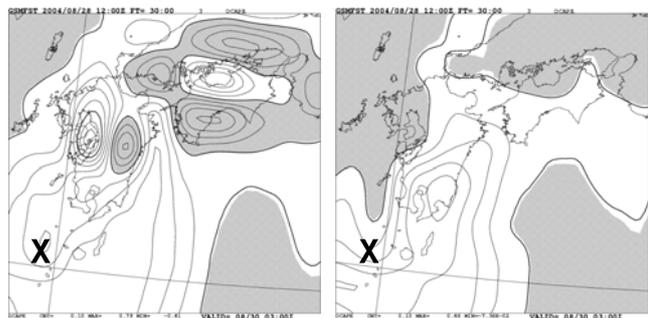


図 1.5.1 2004年8月28日12UTC初期時刻のFT=30におけるDCAPE。左:現在の手法、右:改良された手法。等値線間隔は0.1 [J/kg/秒]で、太線が0 [J/kg/秒]、陰影はDCAPEが閾値( $-1/300$  [J/kg/秒])より小さいため積雲対流が抑止されている領域、Xはこのときの台風第16号の中心位置を表す。

<sup>1</sup> 中川 雅之

<sup>2</sup> 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<sup>3</sup>。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<sup>4</sup>。

RSMの予想を見ると、20kmGSMや解析雨量よりも地形の効果強く表現している。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

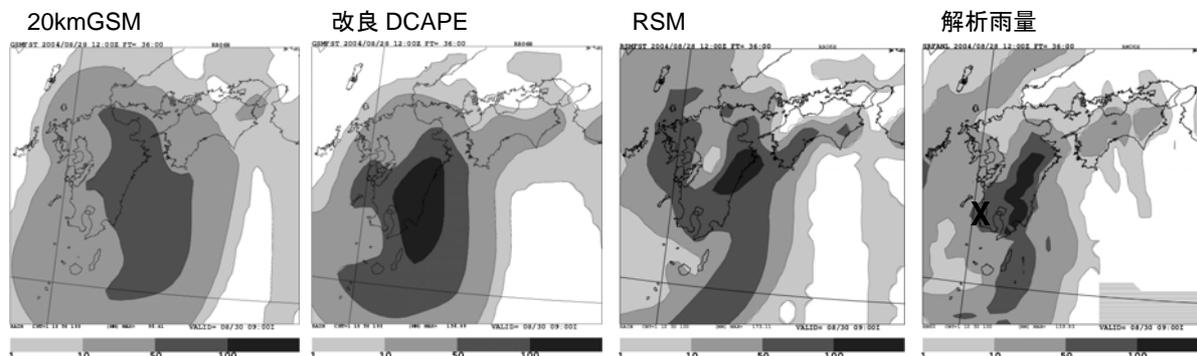


図 1.5.2 2004年8月28日12UTCを初期時刻とするFT=36における前6時間降水量(左から20kmGSM、改良DCAPE、RSM)と、対応する時刻の解析雨量。右図で右下の横線は解析値がない領域、Xは8月30日00UTCにおける台風第16号の中心位置を表す。

<sup>3</sup> 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。

<sup>4</sup> 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。

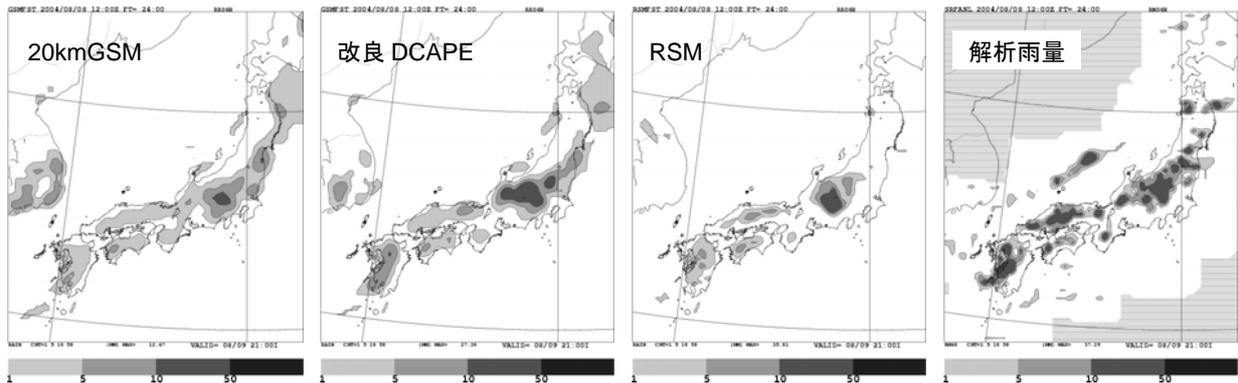


図 1.5.3 2004年8月8日12UTCを初期時刻とするFT=24における前6時間降水量(左から20kmGSM、改良DCAPE、RSM)と、対応する時刻の解析雨量。右図で横線は解析値がない領域を表す。

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<sup>1</sup>

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<sup>2</sup>、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

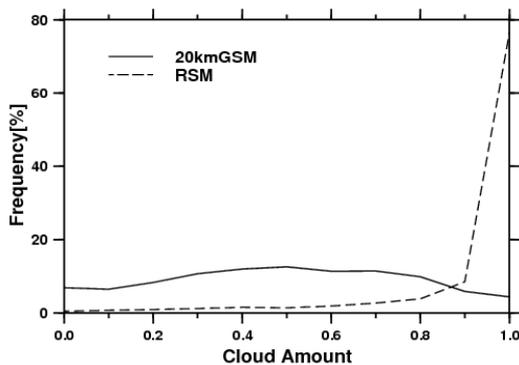


図 1.6.1 2004年8月を対象としたRSM(破線)と20kmGSM(実線)の雲量予報頻度。

<sup>1</sup> 村井 臣哉、小森 拓也、小野田 浩克

<sup>2</sup> 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<sup>3</sup>。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 $250\text{W/m}^2$ 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

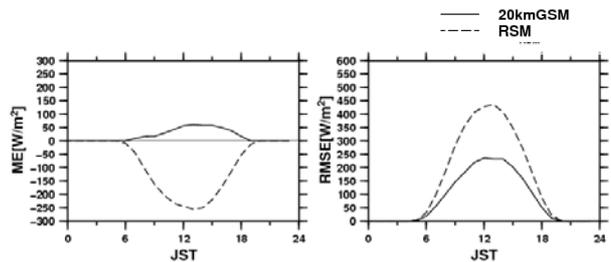


図 1.6.2 RSMと20kmGSMの地上に入射する短波放射フラックスの平均誤差(ME)(左)と平方根平均二乗誤差(RMSE)(右)。横軸は日本時間。2004年8月における22地点の平均値で、破線がRSM、実線が20kmGSM。

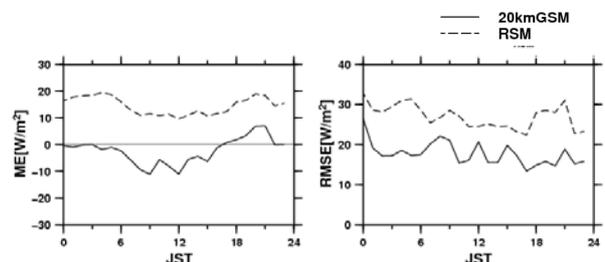


図 1.6.3 RSMと20kmGSMの地上に入射する長波放射フラックスの平均誤差(ME)(左)と平方根平均二乗誤差(RMSE)(右)。横軸は日本時間。2004年8月における館野での平均値で、破線がRSM、実線が20kmGSM。

<sup>3</sup> 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  $50\text{W/m}^2$ 程度と小さい。また  $20\text{kmGSM}$ 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  $250\text{W/m}^2$ もの短波放射フラックスのバイアスは、RSMと  $20\text{kmGSM}$ 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。 $20\text{kmGSM}$ 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<sup>4</sup>。

### 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、 $20\text{kmGSM}$ 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。

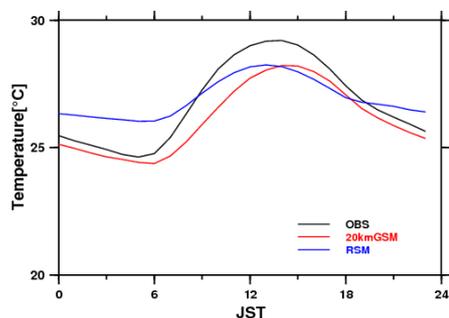


図 1.6.4 観測とモデル予報による気温の日変化。2004年8月における22地点の平均値で、横軸は日本時間。黒線が観測値、青線がRSM、赤線が  $20\text{kmGSM}$ 。

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

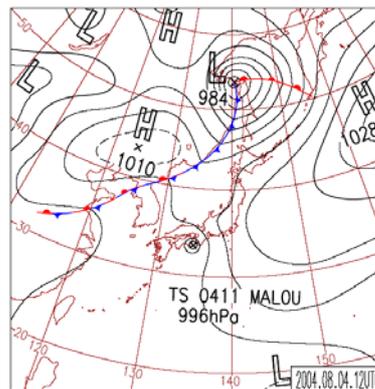


図 1.6.5 2004年8月4日12UTCの地上天気図。

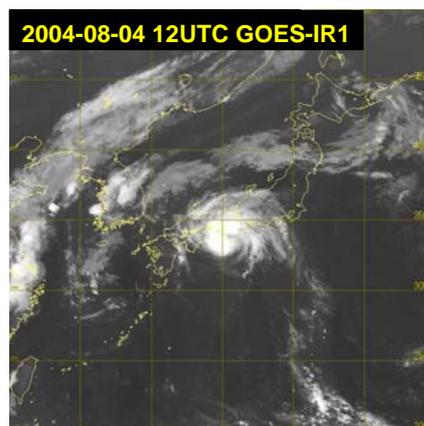


図 1.6.6 2004年8月4日12UTCのGOES-9赤外画像。

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可能性があると考えられる。 $20\text{kmGSM}$ 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  $20\text{kmGSM}$ 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  $20\text{kmGSM}$ 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<sup>5</sup>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

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

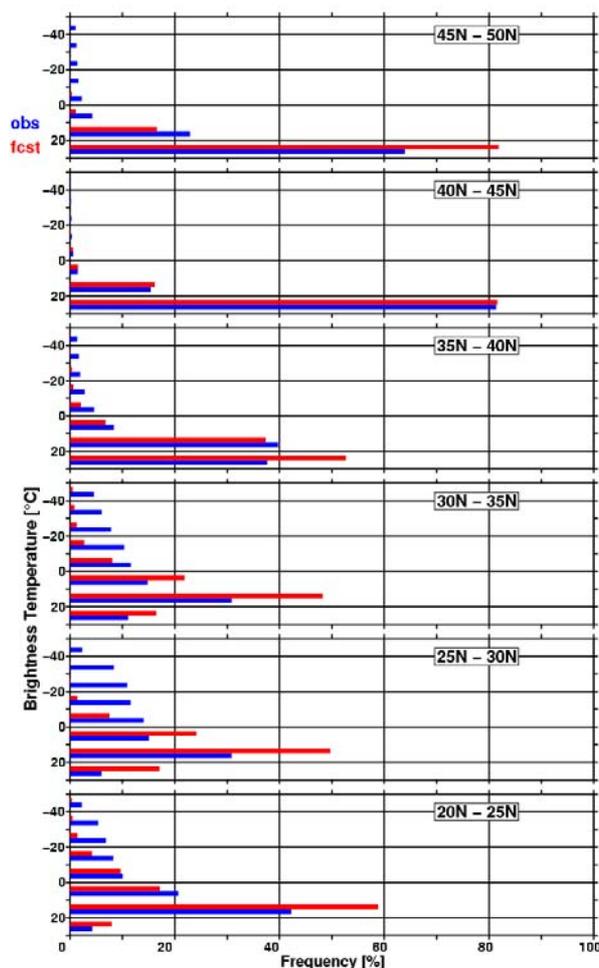


図 1.6.7 GOES-9 の観測（青）と 20kmGSM 予報値（赤）における赤外輝度温度の頻度分布。北緯 20～50 度、東経 120～150 度の範囲を南北に 5 度ずつ区切った帯状の領域での、2004 年 8 月 4 日 12UTC から 5 日 12UTC までの 1 時間毎の出力による統計。

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.

## 1.7 留意すべき予報特性<sup>1</sup>

### 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が弱い降水を広い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の予想する低気圧との比較からもわかるが多かった。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、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<sup>2</sup>。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、初期値変化に対する基本的な考え方は、初期時刻の新しい予報のほ

<sup>2</sup> 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。

<sup>1</sup> 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.