

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)	NRN	
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、それまで予報要素や使用モデル、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)						
		24 時間平均降水量 (MEAN24)		FT=24～33				
		24 時間最大降水量 (MAXP24)		FT=3～33				
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)						
		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 FT=6～84				
		24 時間平均降水量 (MEAN24)						
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に全て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			○
HOGF	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

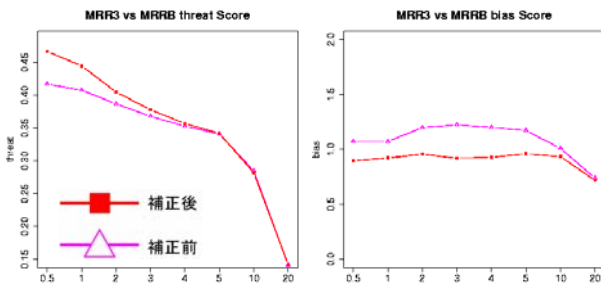


図3.2.1 MSM-MRR3のPoP3による補正前後の精度比較。2006年8月から2007年3月までの8か月間、RSMを境界値とするMSMを利用したガイダンスの検証。左はスレトスコア、右はバイアスコア。横軸は閾値、単位はmm/3h。

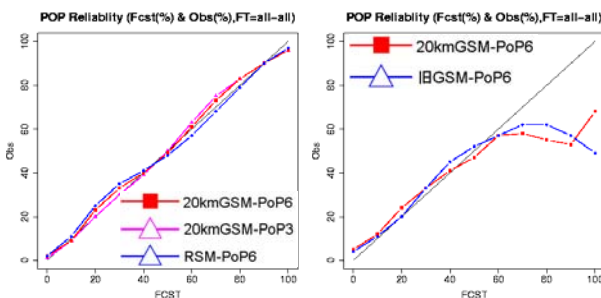


図3.2.2 PoPの信頼度曲線。横軸は観測値、縦軸は予報値とともに単位は%。左はFT=9から51まで、右はFT=57から75まで。

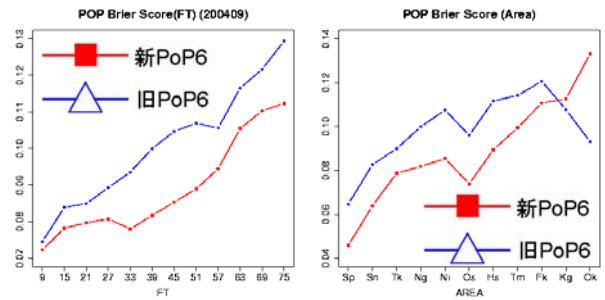


図3.2.3 PoPのブライアスコア。左はFT別のスコア。右はFT=9から51までの地方別のスコア。(左から北海道、東北、関東甲信、東海、北陸、近畿、中国、四国、九州北部、九州南部、沖縄の各地方)。

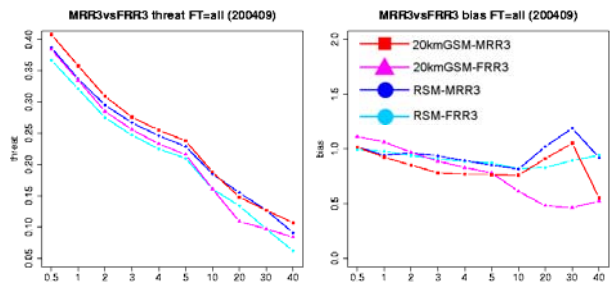


図3.2.4 20kmGSM,RSMによるMRR3とFRR3の閾値別検証結果。FT=6から51。左がスレトスコア、右がバイアスコア。横軸は閾値、単位はmm/3h。

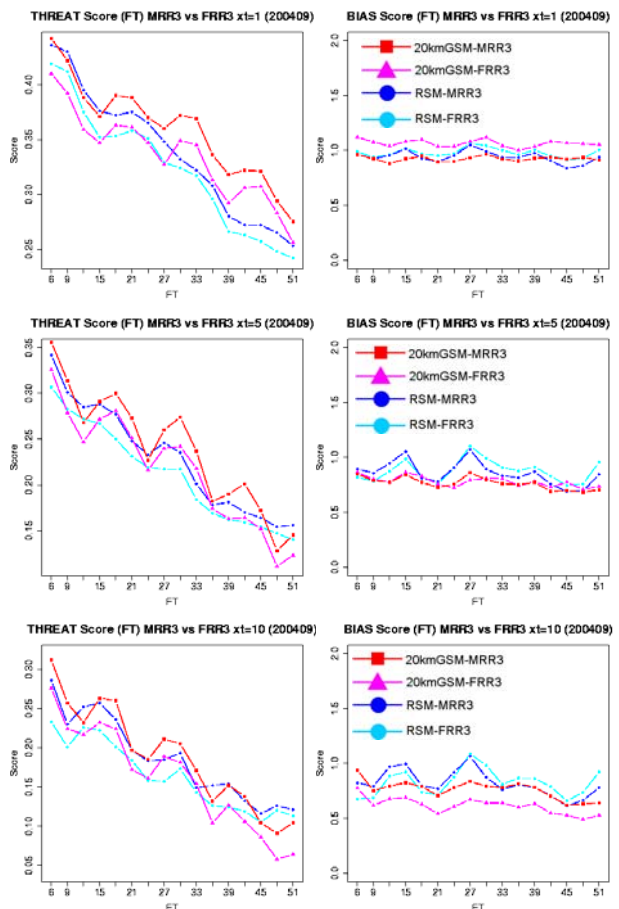


図3.2.5 20kmGSM,RSMによるMRR3とFRR3のFT別の検証結果。上段から閾値1,5,10mm/3h。左がスレトスコア、右がバイアスコア。横軸はFT。

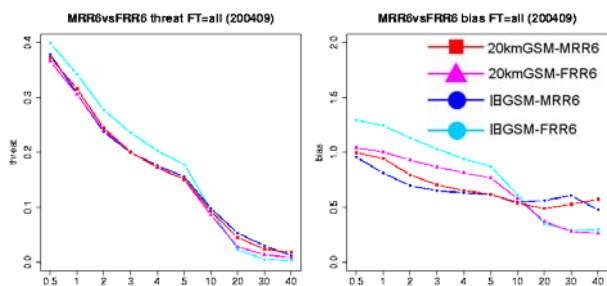


図3.2.6 20kmGSM,旧GSMによるMRR6とFRR6の閾値別の検証結果。FT=57から75まで。左がスレツスコア、右がバイアススコア。横軸は閾値、単位はmm/6h。

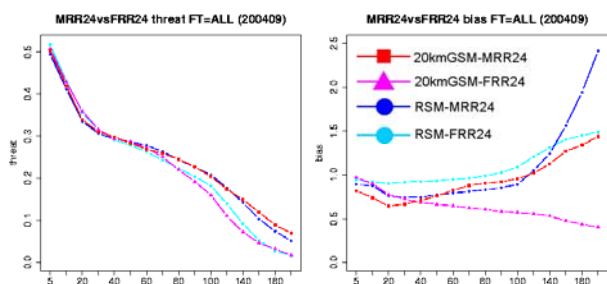


図3.2.7 20kmGSM,RSMによるMRR24とFRR24の閾値別の検証結果。FT=27から51まで。左がスレツスコア、右がバイアススコア。横軸は閾値、単位はmm/24h。

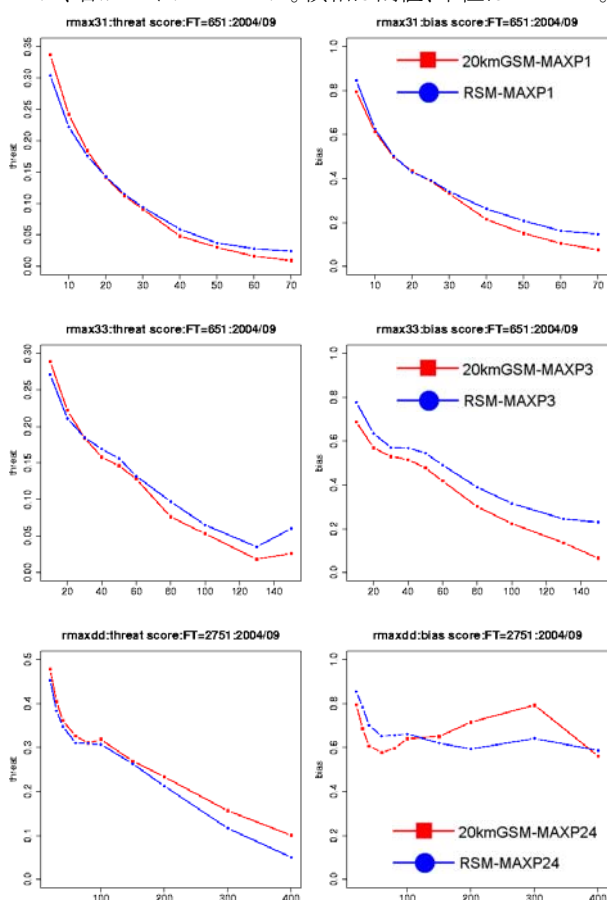


図3.2.8 上からMAXP1(FT=6から51)、MAXP3(FT=6から51)、MAXP24(FT=27,33,39,45,51)の閾値別の検証結果。左がスレツスコア、右がバイアススコア。横軸は閾値、単位はmm/h、mm/3h、mm/24h。

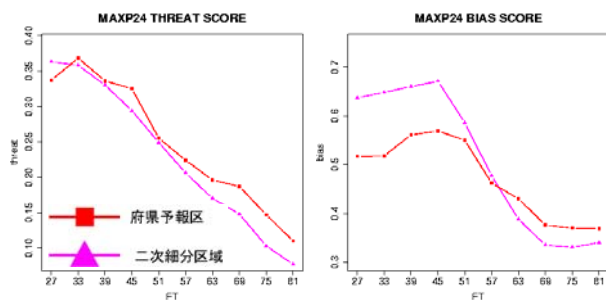


図3.2.9 MAXP24の予報時刻(FT)別の検証結果。閾値は100mm/24h。左はスレツスコア、右はバイアススコア。府県予報区は、府県予報区内に含まれる二次細分区域の最大値で検証した結果。横軸はFT。

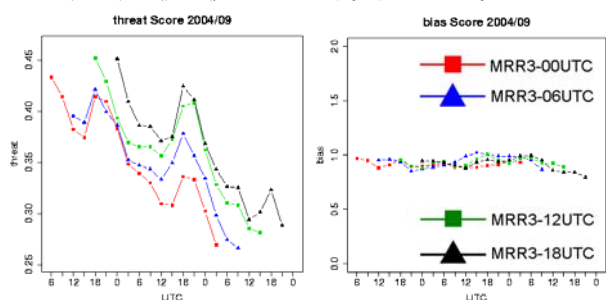


図3.2.10 20kmGSM-MRR3の閾値1mm/3hの初期時刻別の検証結果。左はスレツスコア。右はバイアススコア。横軸は予報対象時刻(UTC)。

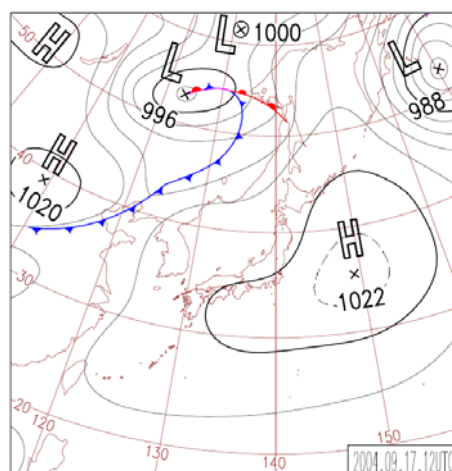


図3.2.11 2004年9月17日21時(JST)の地上天気図。

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

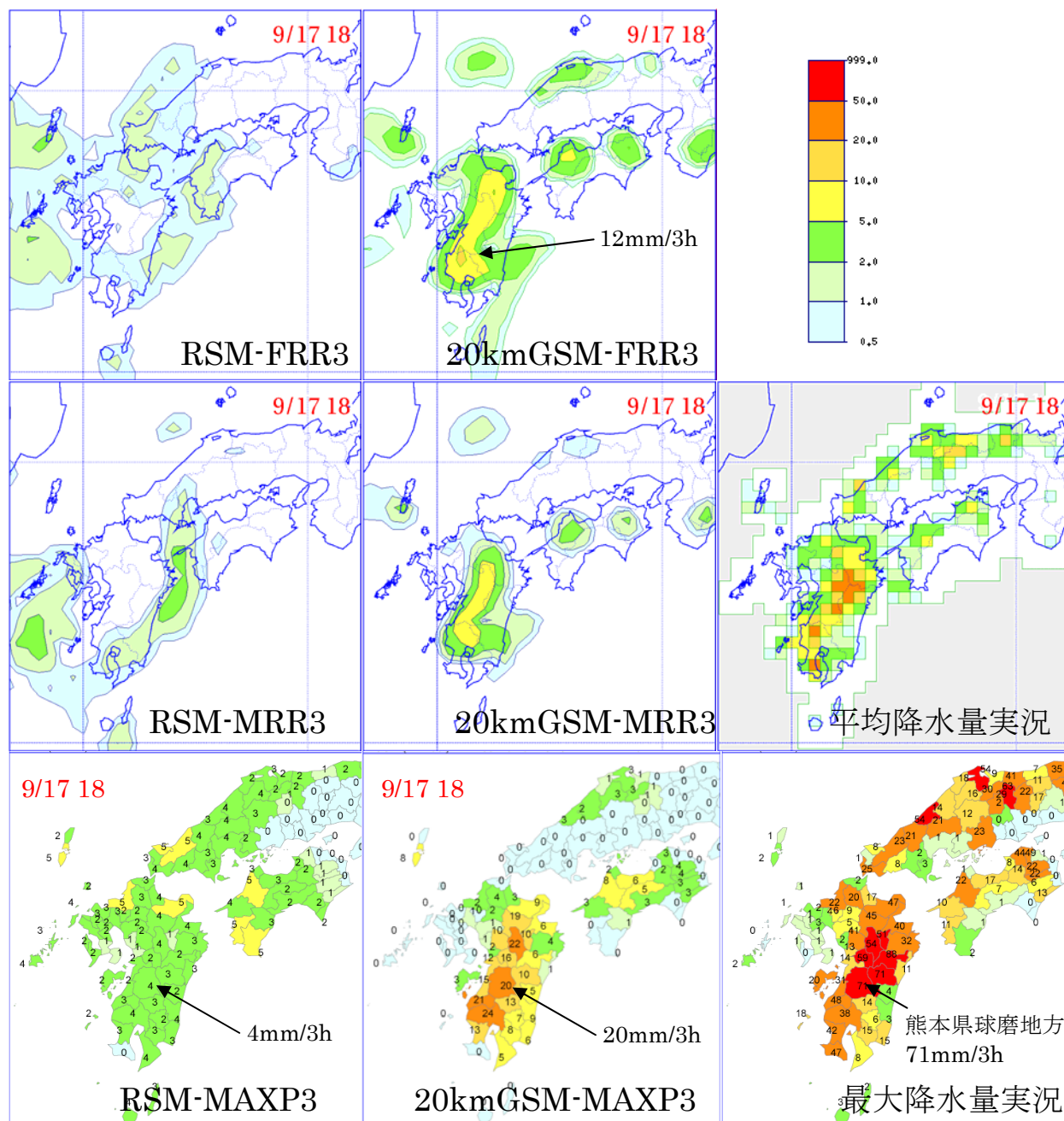


図3.2.12 2004年9月16日12UTC初期値によるFT=21の予報。上段はモデル降水量(FRR3)、中段は降水量ガイダンス(MRR3)、下段は最大降水量ガイダンスによる3時間最大降水量(MAXP3)。左列はRSM、中列は20kmGSMによるモデル降水量及びガイダンス、左列は解析雨量による実況値。降水量ガイダンスの実況値は、3時間積算解析雨量の20km格子格子平均値、最大降水量ガイダンスの実況値は、3時間積算解析雨量の二次細分区域内最大値。

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

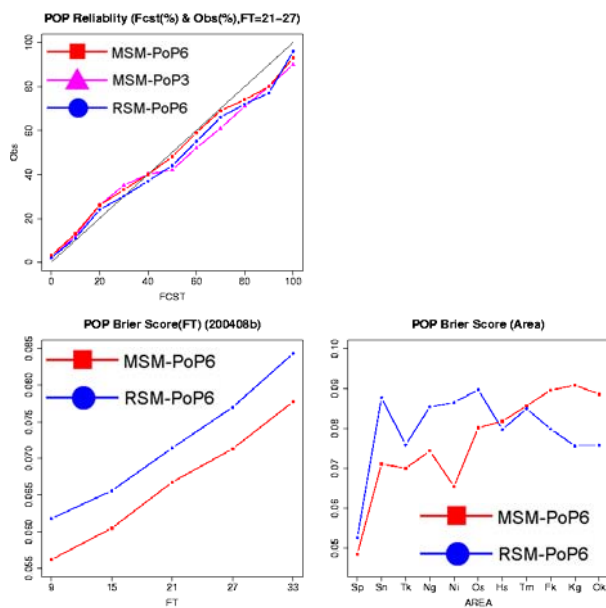


図3.2.13 左上はMSM-PoP(FT=24)の信頼度曲線。横軸は予報値、縦軸は観測値とともに単位は%。比較相手のRSM-PoP6はFT=27。左下はFT別のブライアスコア、横軸はFT (RSM-PoP6のFT)。右下は地域別のブライアスコア（左から北海道、東北、関東甲信、東海、北陸、近畿、中国、四国、九州北部、九州南部、沖縄の各領域）。MSM-PoP6はFT=24、RSM-PoP6はFT=27。

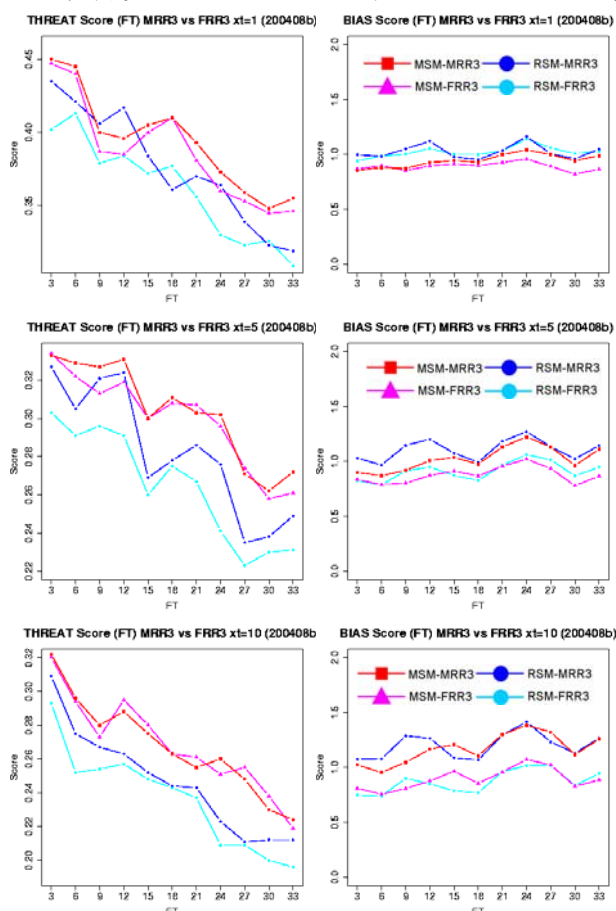


図3.2.14 RSM,MSMによるFRR3とMRR3のFT別の検証結果。上段から閾値1,5,10mm/3h。左がスレットスコア、右がバイアスコア。横軸はFT。

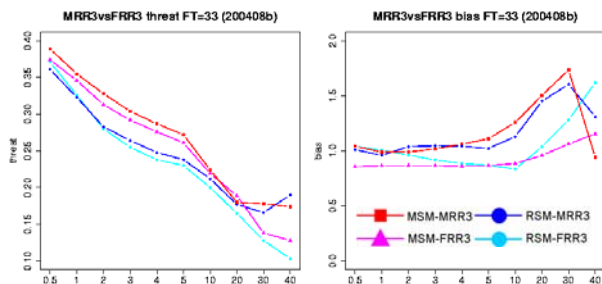


図3.2.15 RSM,MSMによるMRR3とFRR3の閾値別検証結果。MSMはFT=30、RSMはFT=33。左がスレツスコア、右がバイアススコア。横軸は閾値、単位はmm/3h。

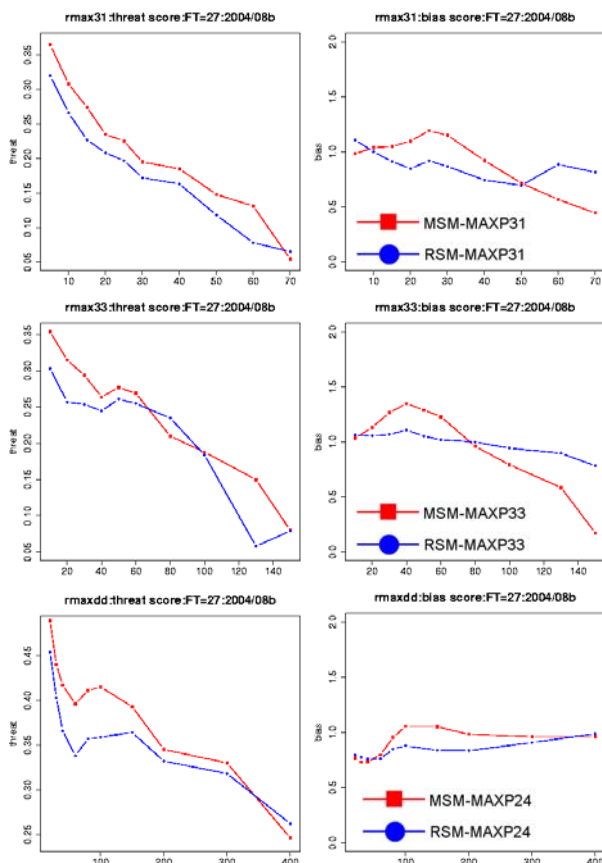


図3.2.16 RSM,MSMによる最大降水量ガイダンスの検証結果。上からMAXP1,MAXP3,MAXP24。MSMガイダンスはFT=24、RSMガイダンスはFT=27。左がスレツスコア、右がバイアススコア。横軸は閾値、単位はmm/h,mm/3h,mm/24h。

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、

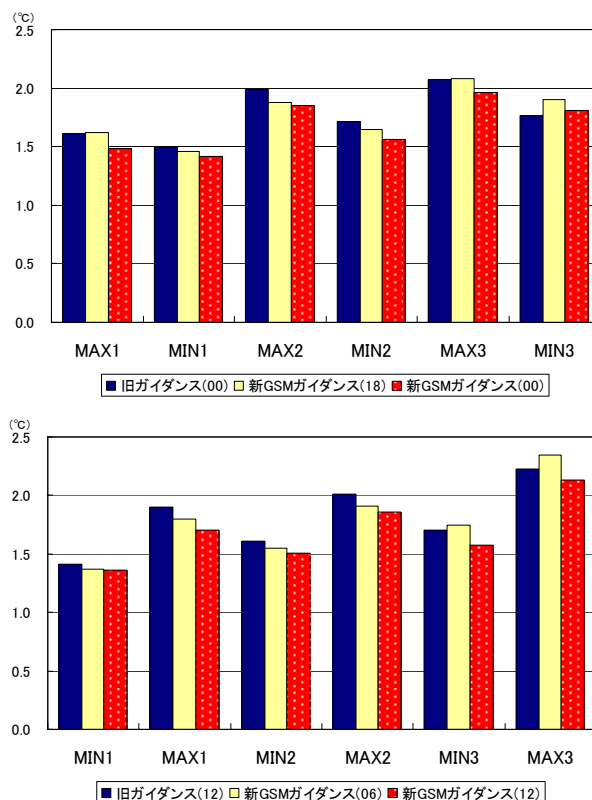


図3.3.1 2004年9月の最高・最低気温ガイダンスのRMSE。凡例の括弧の数字はガイダンスの初期時刻(UTC)を表す。

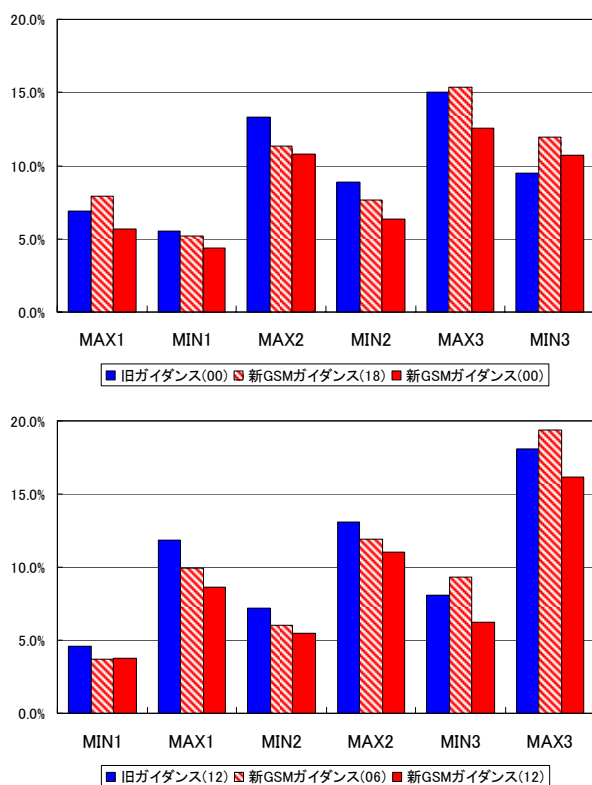


図3.3.2 2004年9月の最高・最低気温ガイダンスの3°Cはずし率。凡例の括弧の数字はガイダンスの初期時刻(UTC)を表す。

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

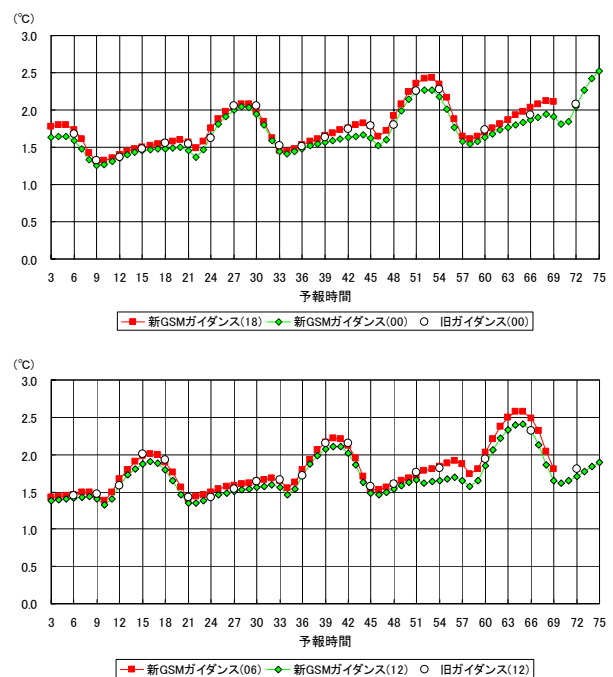


図3.3.3 2004年9月の時系列気温のRMSE。凡例の括弧の数字はガイダンスの初期時刻を表す。上段は00UTC、下段は12UTCを基準とした予報時間を横軸としている。

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、以下のようになった。

- ・ 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

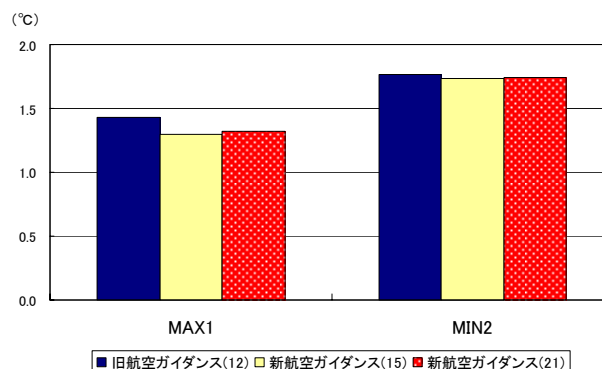
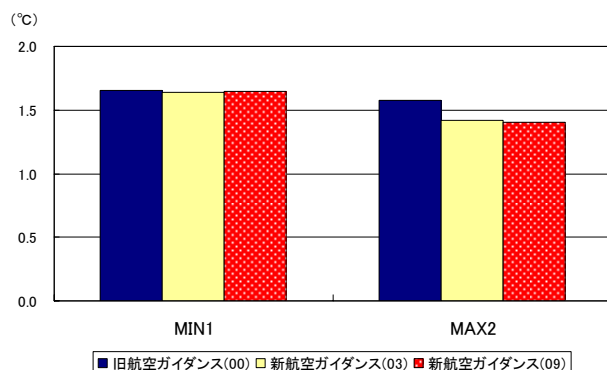


図3.3.4 最高・最低気温ガイダンスのRMSE。凡例の括弧の数字はガイダンスの初期時刻(UTC)を表す。

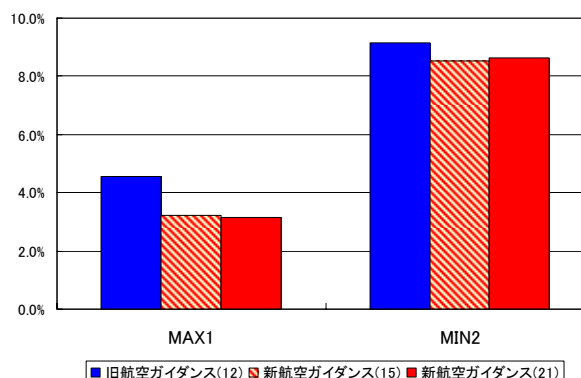
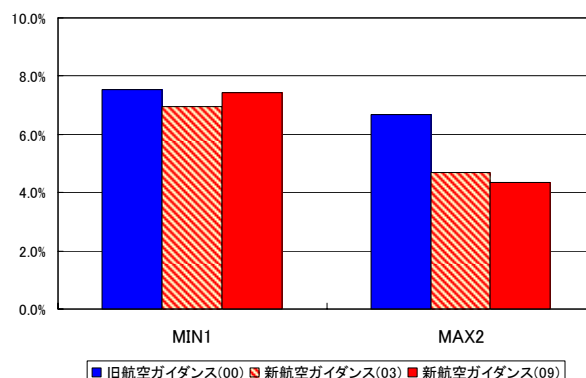


図3.3.5 最高・最低気温ガイダンスの3℃はずし率。凡例の括弧の数字はガイダンスの初期時刻(UTC)を表す。

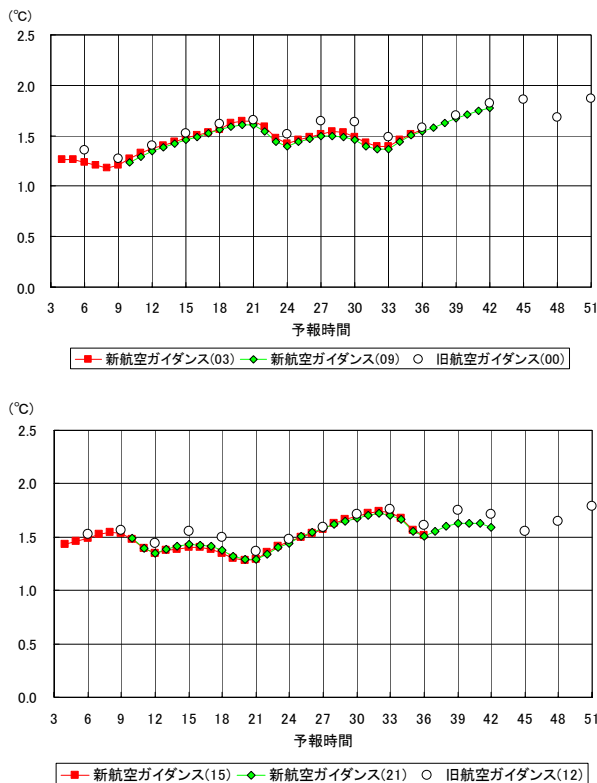


図3.3.6 時系列気温のRMSE。凡例の括弧はガイダ
ンスの初期時刻を表す。上図は00UTCを基準とし
た予報時間、下図は12UTCを基準とした予報時間
を横軸としている。

(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
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ようになった。

- ・ 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

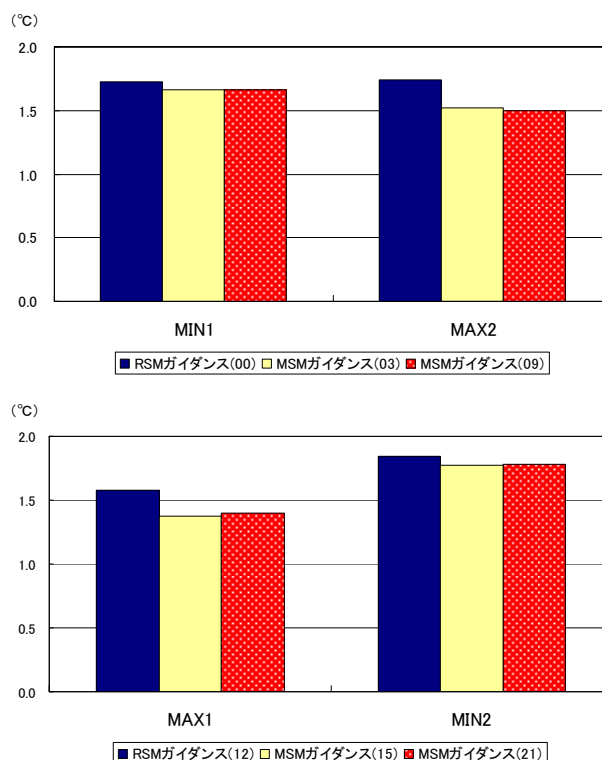


図3.3.7 最高・最低気温ガイダンスのRMSE。凡例の括弧の数字はガイダンスの初期時刻(UTC)を表す。

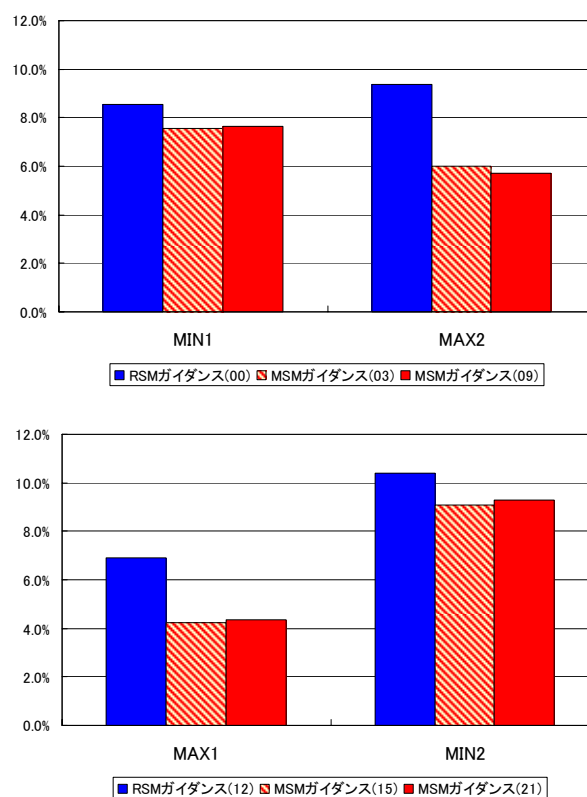


図3.3.8 最高・最低気温ガイダンスの3℃はずれ率。凡例の括弧の数字はガイダンスの初期時刻(UTC)を表す。

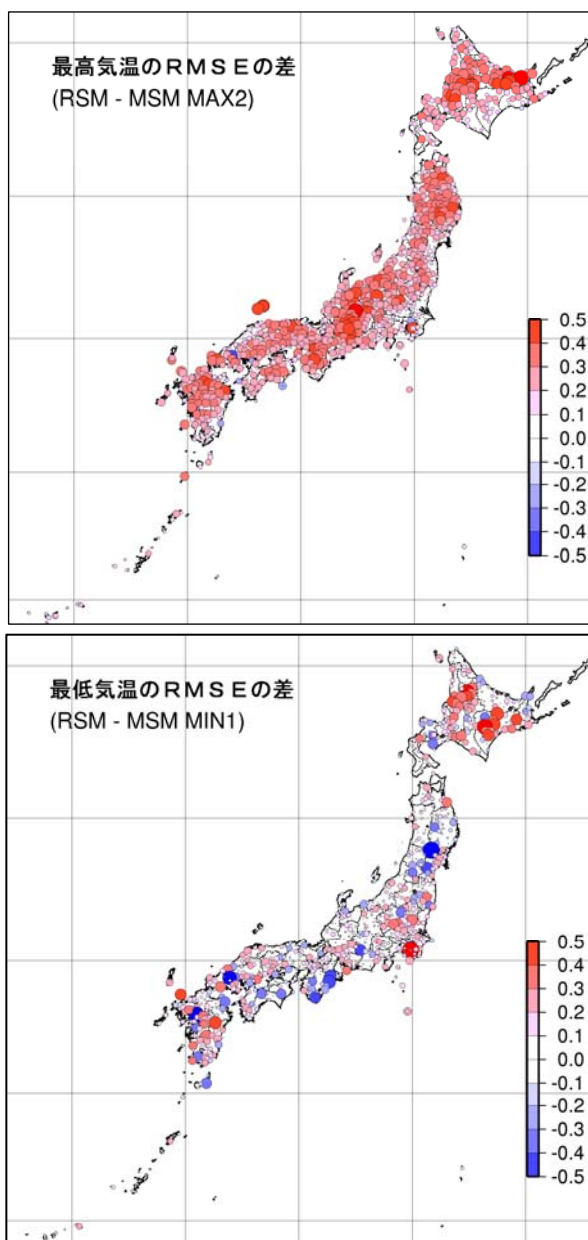


図3.3.9 最高・最低気温のRSMガイダンスとMSMガイダンスのRMSEの差の地点分布。どちらも00UTC初期値のRSMガイダンスと03UTC初期値のMSMガイダンスを比較している。赤色の地点はMSMガイダンスの方がRMSEが小さい地点。差が大きい地点ほど大きいマークでプロットしている。

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

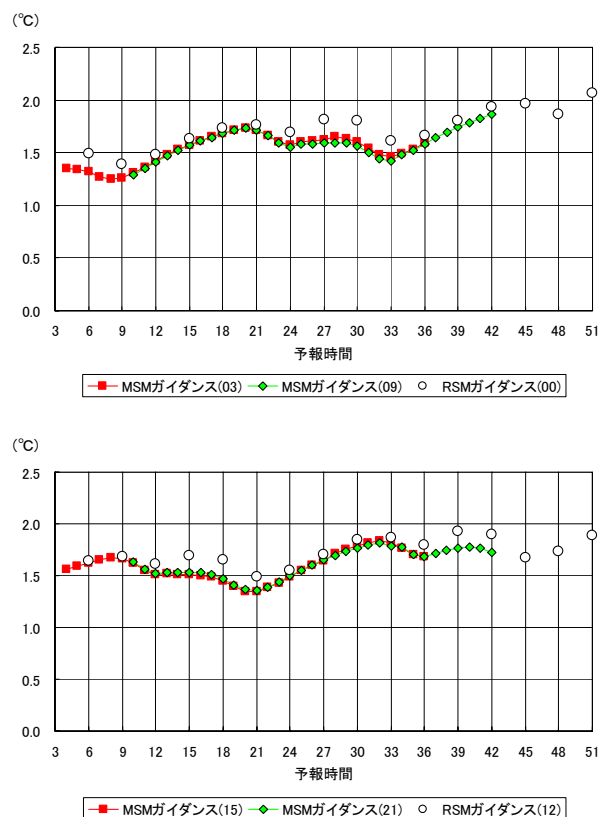


図 3.3.10 時系列気温の RMSE。凡例の括弧の数字はガイダンスの初期時刻を表す。

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	20kmGSM	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。

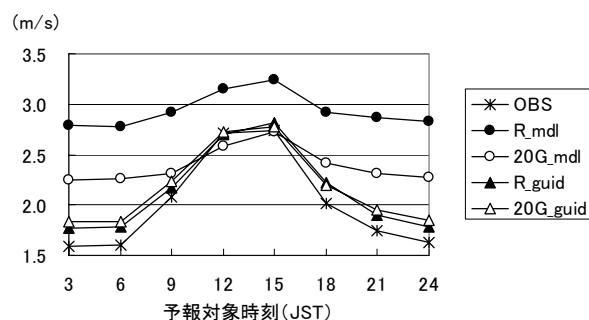


図3.4.1 3時間毎の定時風ガイダンスの、時刻別の月平均値（2004年9月）。予測値と観測値の差がMEに相当。凡例のOBSはアメダス観測値、20Gは20kmGSM、RはRSM、mdlはモデルGPV、guidはガイダンス値の意。

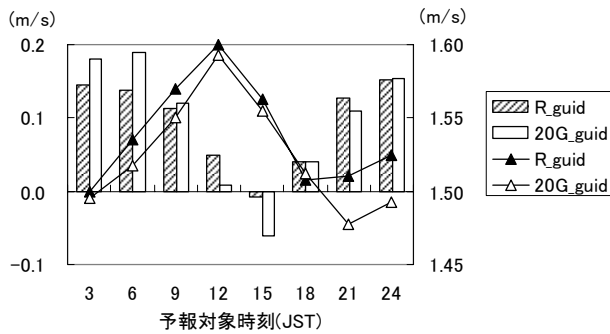


図3.4.2 3時間毎の定時風ガイダンスの、時刻別の風速のME（棒グラフ、軸は左端）とRMSE（折れ線グラフ、軸は右端）の月平均値（2006年1月）。凡例は図3.4.1と同じ。

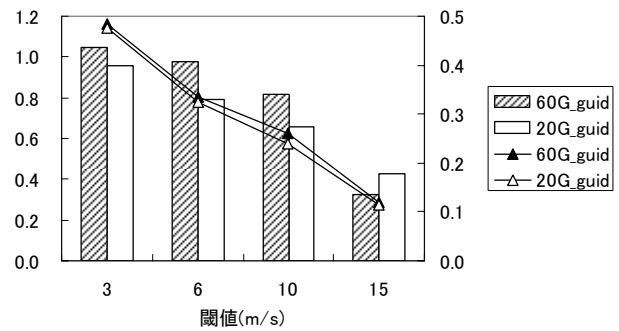


図3.4.5 3時間毎の定時風ガイダンスの、閾値別の風速のバイアススコア（棒グラフ、軸は左端）とスレットスコア（折れ線グラフ、軸は右端）の2か月平均値（2004年9月及び2006年1月）。凡例は図3.4.1と同様だが、60Gは60kmGSM。

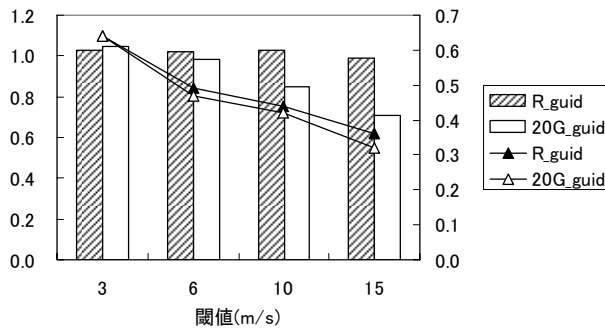


図3.4.3 前3時間最大風速ガイダンスの、閾値別の風速のバイアススコア（棒グラフ、軸は左端）とスレットスコア（折れ線グラフ、軸は右端）の月平均値（2004年9月）。凡例は図3.4.1と同じ。

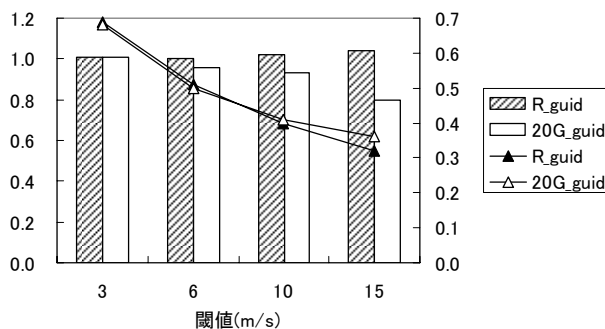


図3.4.4 前3時間最大風速ガイダンスの、閾値別の風速のバイアススコア（棒グラフ、軸は左端）とスレットスコア（折れ線グラフ、軸は右端）の月平均値（2006年1月）。凡例は図3.4.1と同じ。

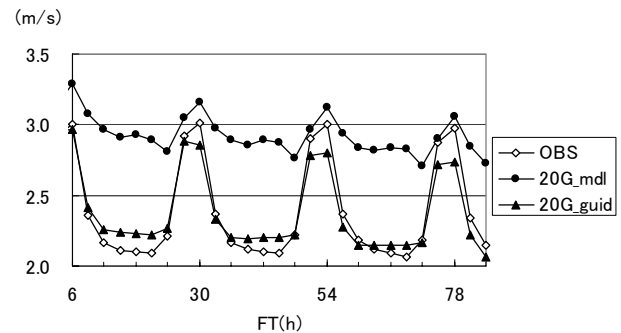


図3.4.6 20kmGSMの00UTC初期値の定時風速予報値（モデルGPV、ガイダンス）を、FT毎に観測値と比較（2006年1月で月平均）。横軸の目盛りは、ガイダンスの負バイアスが1日の中で最大となる時刻(06UTC)に対応。凡例は図3.4.1と同じ。

(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。

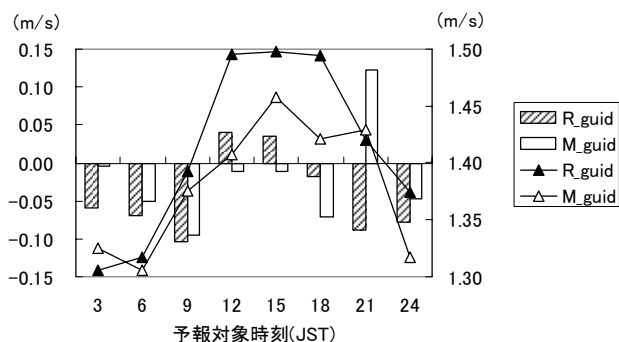


図3.4.7 前3時間内最大風速ガイダンスの、時刻別の風速のME（棒グラフ、軸は左端）とRMSE（折れ線グラフ、軸は右端）の4か月平均値（2007年5月～8月）。凡例は図3.4.1と同様で、MはMSMの意。

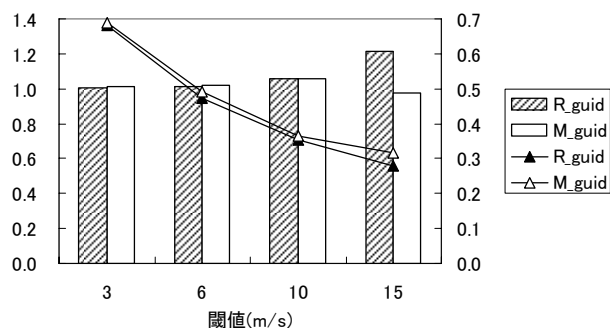


図3.4.8 前3時間内最大風速ガイダンスの、閾値別のバイアスコア（棒グラフ、軸は左端）とスレツスコア（折れ線グラフ、軸は右端）の4か月平均値（2007年5月～8月）。凡例は図3.4.7と同じ。

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。

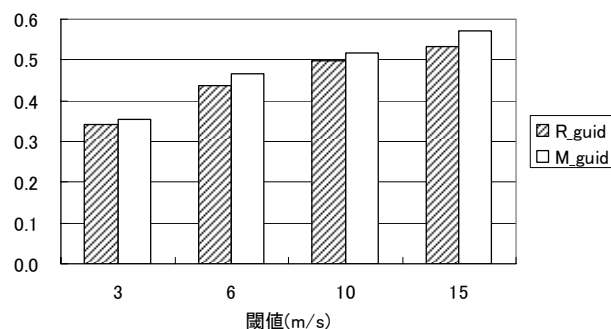


図3.4.9 前3時間内最大風速ガイダンスの、閾値別の風向適中率の4か月平均値（2007年5月～8月）。凡例は図3.4.7と同じ。

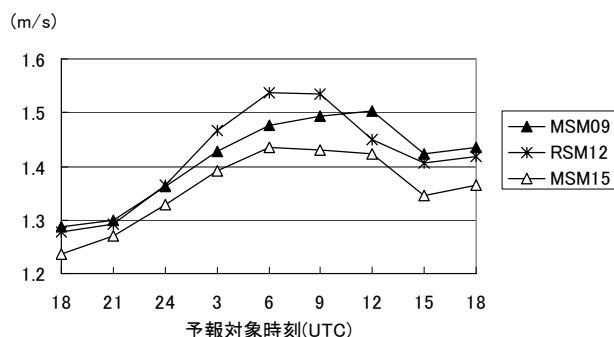


図3.4.10 前3時間内最大風速ガイダンスの、初期値別の風速のRMSEの4か月平均値。凡例はモデル名+初期値(UTC)の意。

(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）。

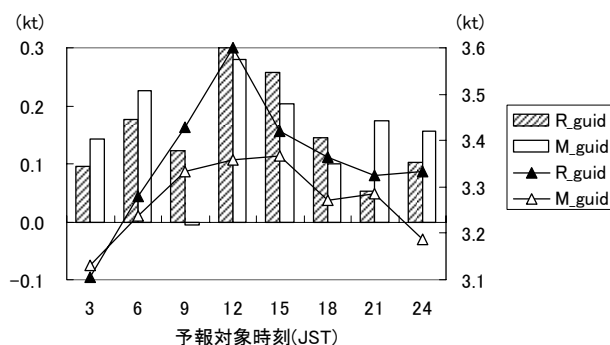


図3.4.11 TAF定時風ガイダンスの、時刻別の風速のME（棒グラフ、軸は左端）とRMSE（折れ線グラフ、軸は右端）の4か月平均値（2007年5月～8月）。凡例は図3.4.7と同じ。

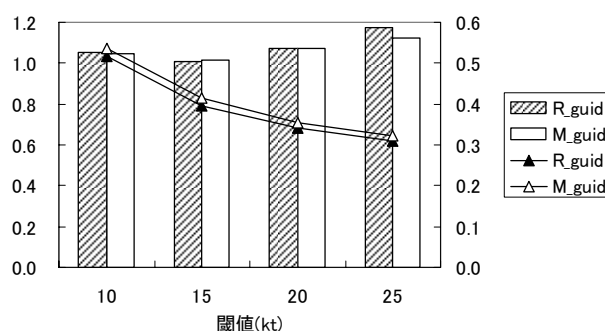


図3.4.12 TAF定時風ガイダンスの、閾値別のバイアスコア（棒グラフ、軸は左端）とスレットスコア（折れ線グラフ、軸は右端）の4か月平均値（2007年5月～8月）。凡例は図3.4.7と同じ。

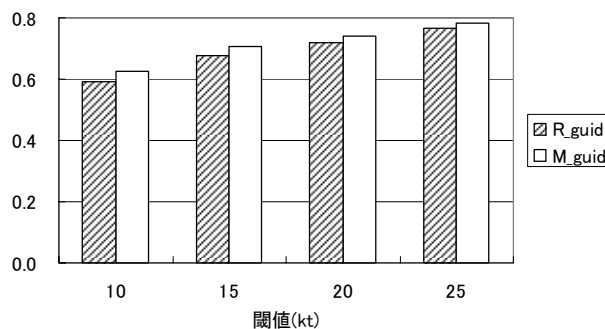


図3.4.13 TAF定時風ガイダンスの、閾値別の風向適中率の4か月平均値（2007年5月～8月）。凡例は図3.4.7と同じ。

(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。

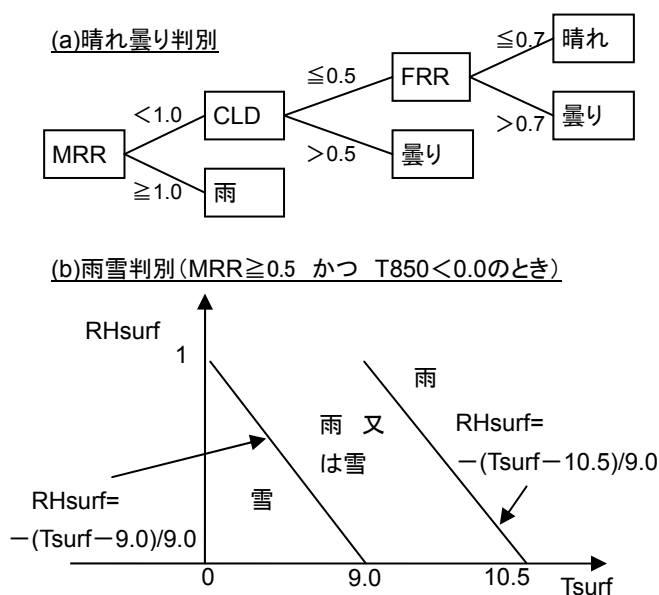


図3.5.1 天気ガイダンスの作成手法

(b)雨雪判別は「MRR≥0.5かつT850<0.0」のときに使用する。それ以外の場合は(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。

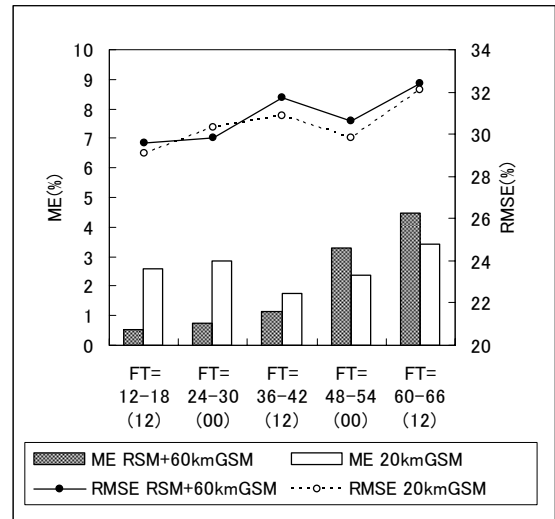


図3.5.2 日照率ガイダンス ME、RMSE（2004年9月）
カッコ内は予報初期時刻（UTC、以下の図も同様）

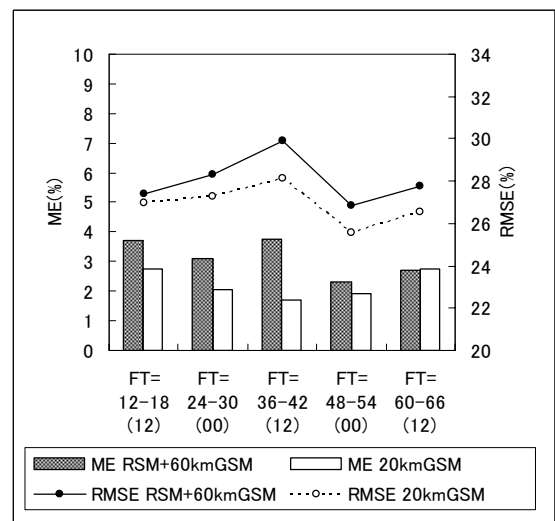


図3.5.3 日照率ガイダンス ME、RMSE（2006年1月）

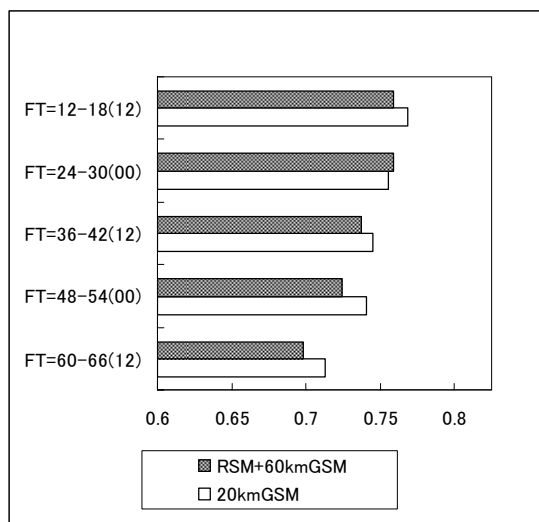


図3.5.4 日照率ガイダンス 50%適中率 (2004年9月)

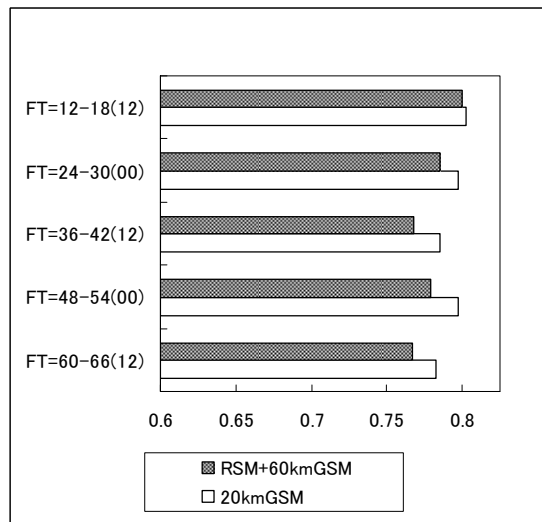


図3.5.5 日照率ガイダンス 50%適中率 (2006年1月)

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。

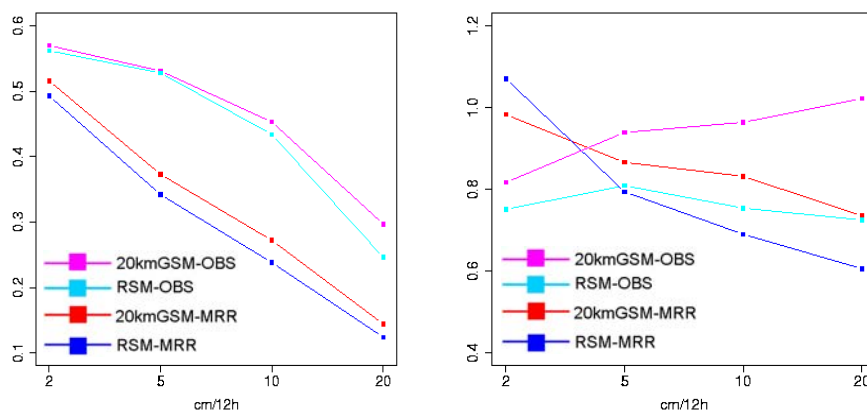


図3.6.1 雪水比ガイダンスを利用した12時間降雪量の検証結果。左はスレツスコア、右はバイアススコア。横軸は閾値 (単位cm/12h)。GSM-MRRは20kmGSM雪水比、降水量ガイダンスを利用、RSM-MRRはRSM雪水比、降水量ガイダンスを利用、GSM-OBS及びRSM-OBSは、降水量として解析雨量による実況値を利用。FT=24,36,48。

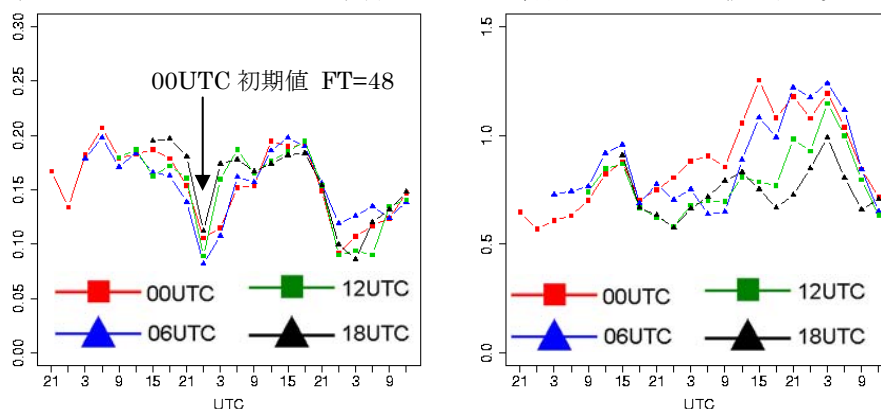


図3.6.2 20kmGSMによる雪水比、降水量ガイダンスを利用した12時間降雪量の初期値別、FT別の検証結果。左はスレツスコア、右はバイアススコア。横軸はUTC。閾値は20cm/12h。

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	FT= 45~69	
		新規	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。

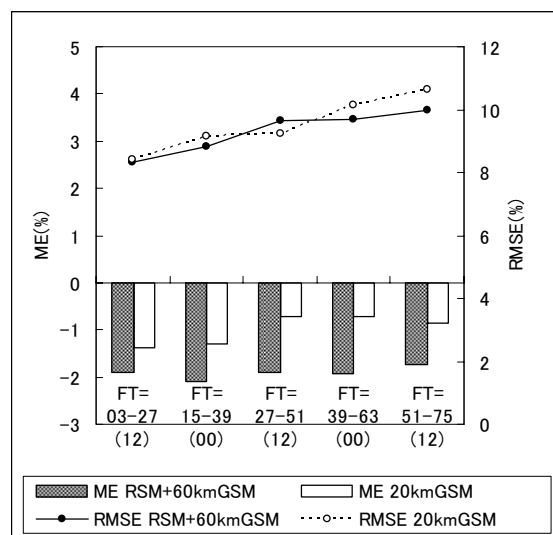


図 3.6.3 最小湿度ガイダンス ME、RMSE (2004 年 9 月)
カッコ内は予報初期時刻 (UTC、図 3.6.4 も同様)

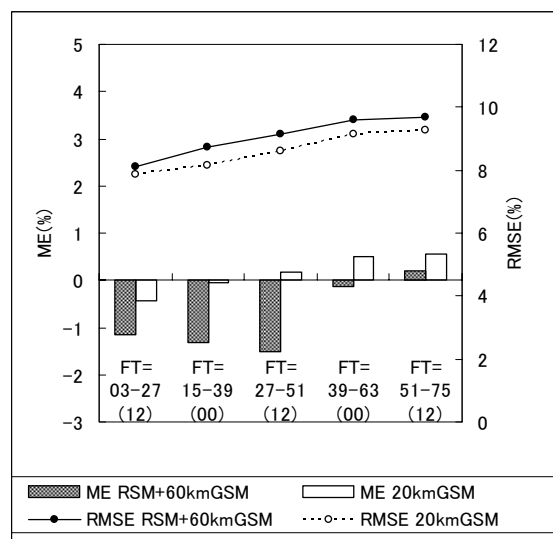


図 3.6.4 最小湿度ガイダンス ME、RMSE (2006 年 1 月)

(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。

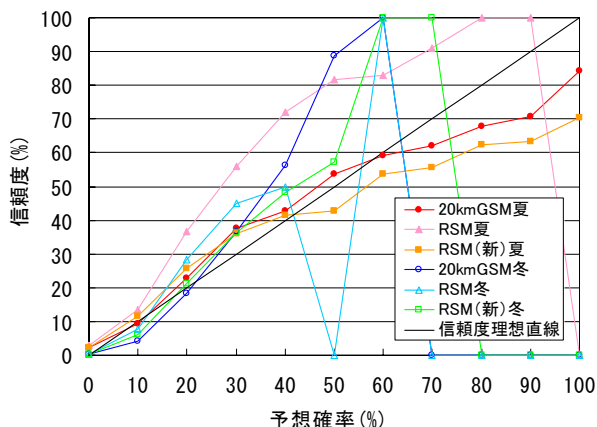


図 3.6.5 20kmGSM 大雨確率ガイダンス、RSM 大雨確率ガイダンス、変更した手法による RSM 大雨確率ガイダンスの信頼度。検証期間は夏：2004 年 8 月から 9 月、冬：2005 年 12 月から 2006 年 1 月。RSM（新）は変更した手法による RSM 大雨確率ガイダンスを表す。

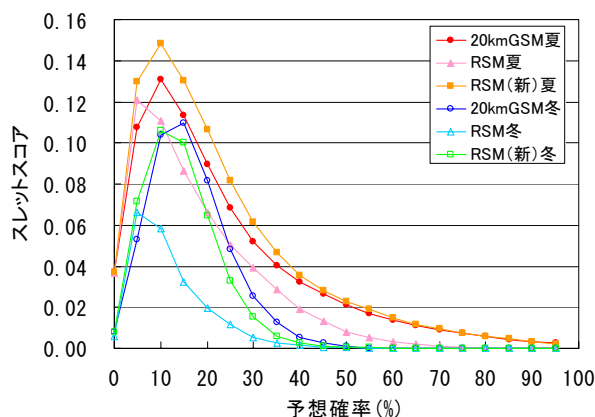


図 3.6.6 20kmGSM 大雨確率ガイダンス、RSM 大雨確率ガイダンス、変更した手法による RSM 大雨確率ガイダンスの各確率以上で大雨ありとした場合のスレツスコア。検証期間、凡例は図 3.6.5 と同じ。

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

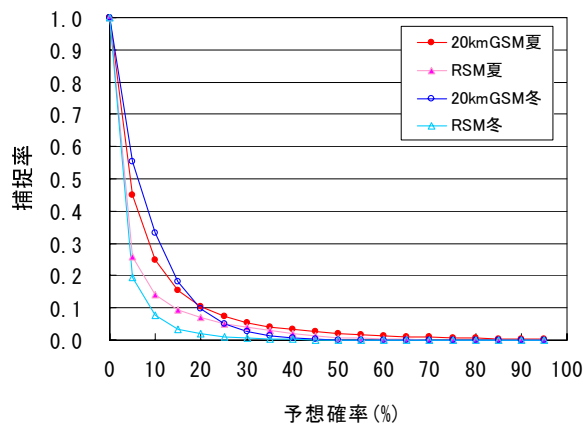


図 3.6.7 20kmGSM 大雨確率ガイダンス、RSM 大雨確率ガイダンスの各確率以上での大雨の捕捉率。検証期間は図 3.6.5 と同じ。

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 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。

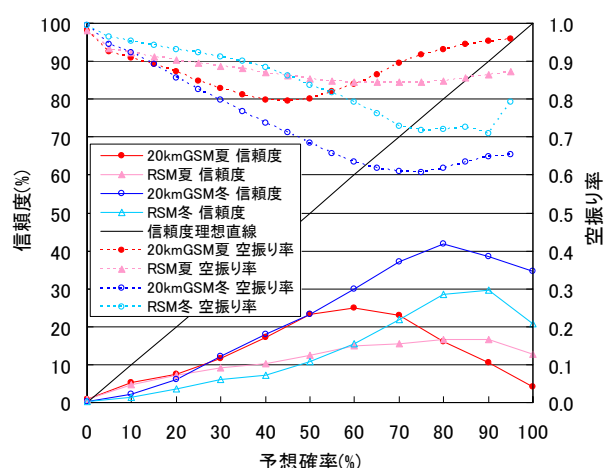


図 3.6.8 20kmGSM 発雷確率ガイダンスと RSM 発雷確率ガイダンスの信頼度と各確率以上で発雷ありとした場合の空振り率。検証期間は、夏：2004 年 8 から 9 月、冬：2005 年 12 月から 2006 年 1 月。

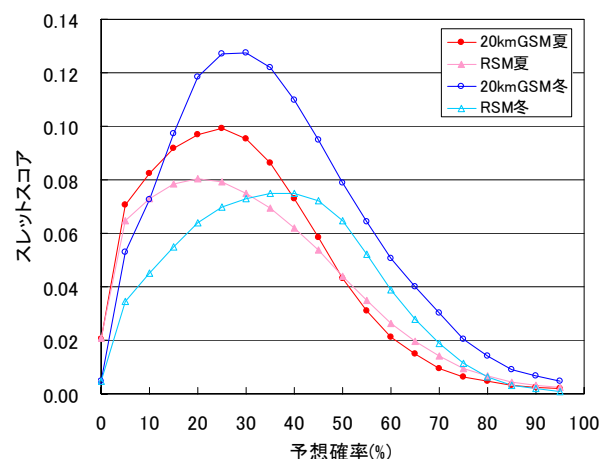


図 3.6.9 20kmGSM 発雷確率ガイダンスと RSM 発雷確率ガイダンスの各確率以上で発雷ありとした場合のスレットスコア。検証期間は図 3.6.8 と同じ。

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。

- 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。
- 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。
- 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

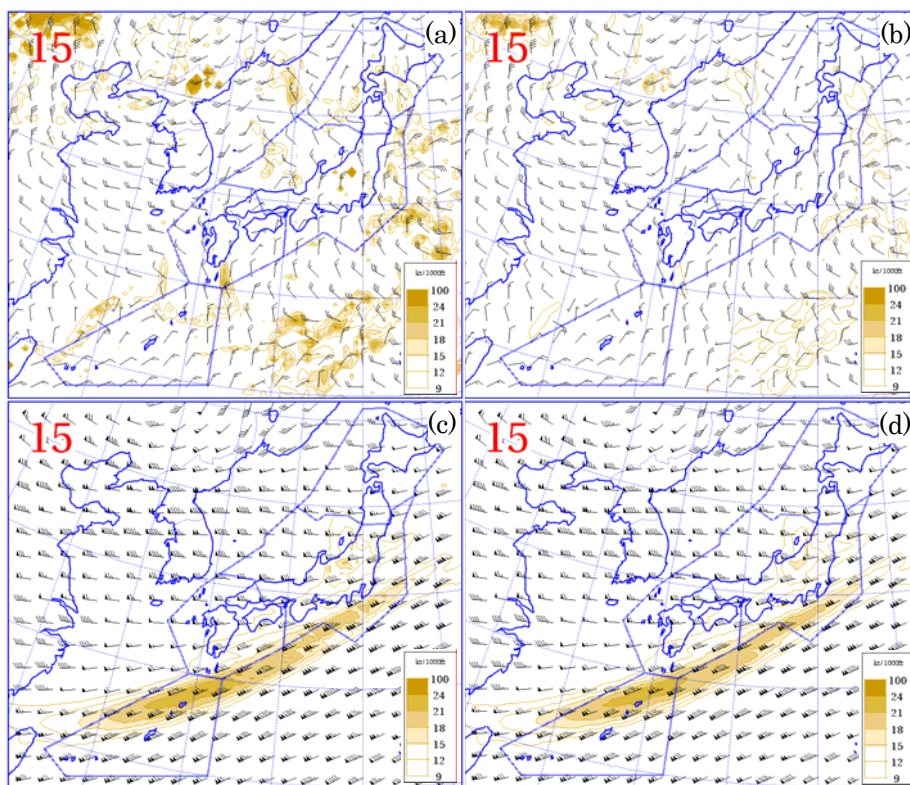


図 3.7.1 新旧手法による鉛直ウィンドシアー (TURB、単位は kt/1000ft) の表現。2007 年 1 月 29 日 09UTC 初期値の 6 時間予報。(a)旧手法 FL050、(b)新手法 FL050、(c)旧手法 FL310、(d)新手法 FL310

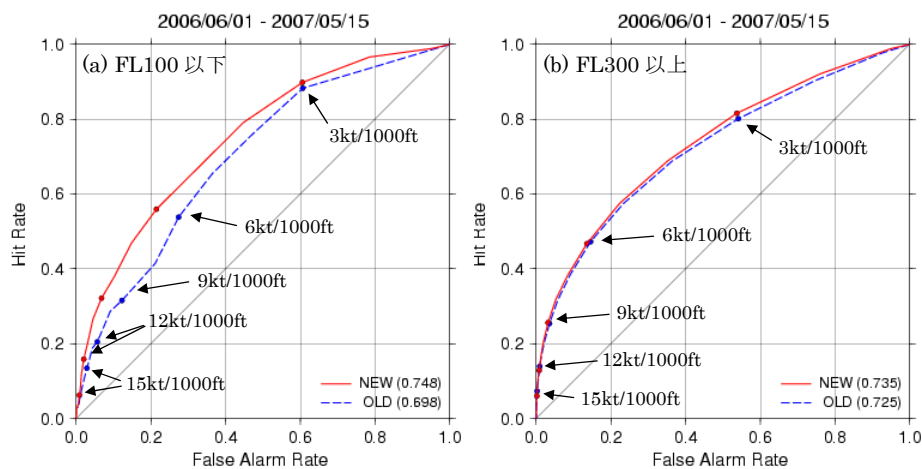


図 3.7.2 2006 年 6 月～2007 年 5 月の乱気流の予測精度。(a) FL100 以下。(b)FL300 以上。赤実線は新手法(NEW)、青破線は旧手法(OLD)での検証結果。凡例の括弧内は ROC 面積。線上の点は右上から順に、鉛直ウィンドシアーが 3, 6, 9, 12, 15kt/1000ft における結果。予報時間については FT=0～15 の結果を全て足し合わせている。

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。

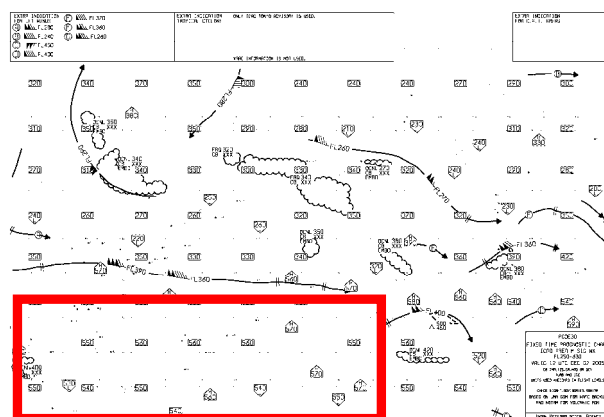


図3.7.3 旧ルーチンの全球航空悪天GPVから作成した悪天予想図（対象時刻2005年12月2日12UTC）

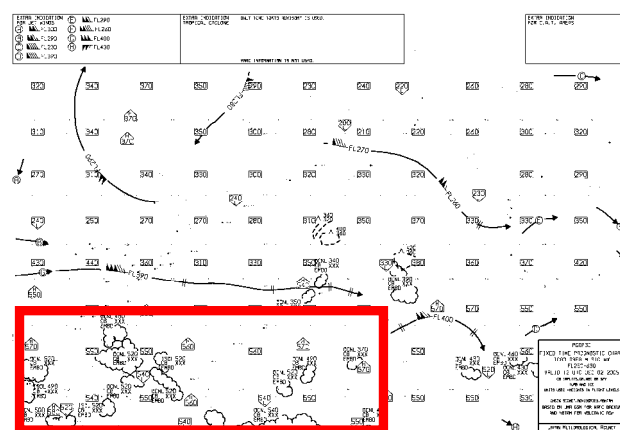


図3.7.4 新ルーチンの手法による試作全球航空悪天GPVから作成した悪天予想図

（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）

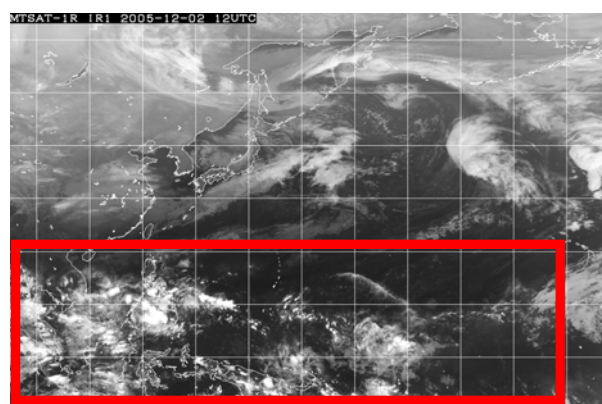


図3.7.5 気象衛星画像（赤外）

（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、説明変数等に違いがあった。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。

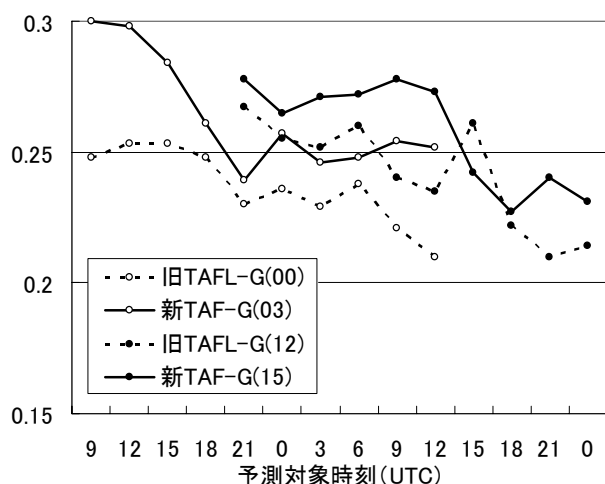


図 3.8.1 前 3 時間最小視程予測のスキルスコア

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

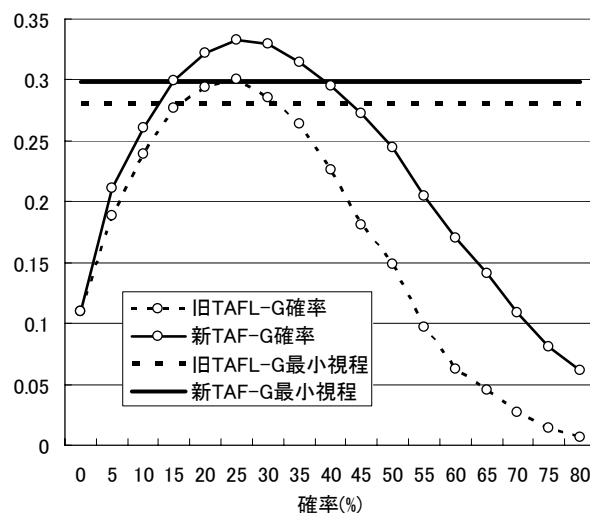


図 3.8.2 5000m 未満視程確率(%)の各確率を閾値として、視程が 5000m 未満か否かを予測した場合のスロットスコア（曲線）

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。

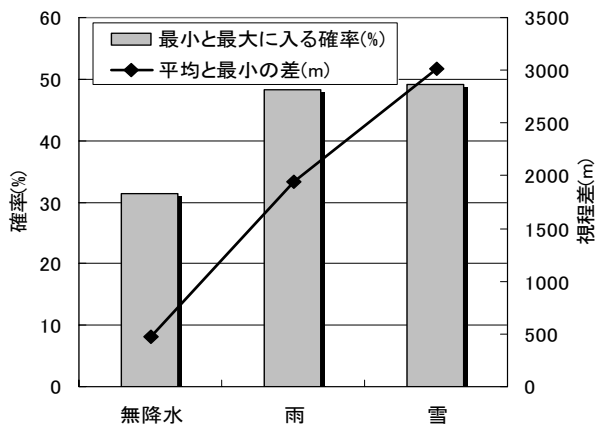


図 3.8.3 前 3 時間平均視程予測と最小視程予測の標準的な差、最小視程予測が 5000m 未満の時に観測視程が最小と最大視程予測に入る確率
最大視程は平均 + (平均 - 最小) により求めている。
検証期間と地点は図 3.8.1 に同じ。

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、各閾値でのスレット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

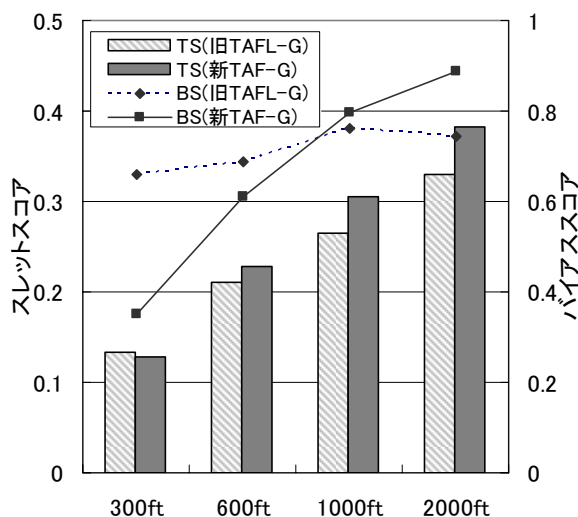


図 3.8.4 前 3 時間最低シーリング予測の各閾値でのスレットスコア (TS、棒グラフ) とバイアススコア (BS、折れ線グラフ)

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。

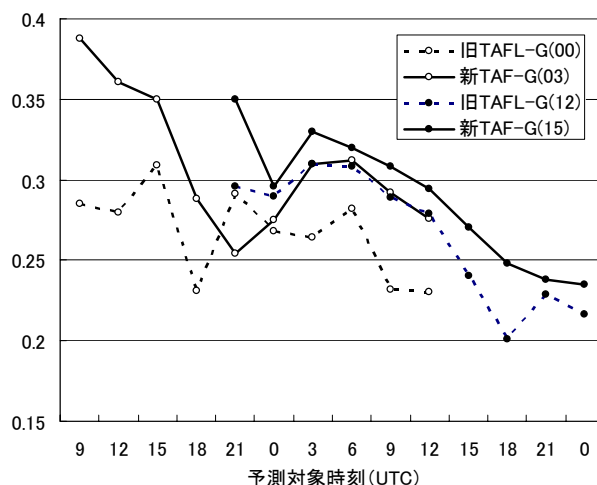


図 3.8.5 前 3 時間最低シーリングのスキルスコア

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。スレットスコアをみると 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 でスレット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

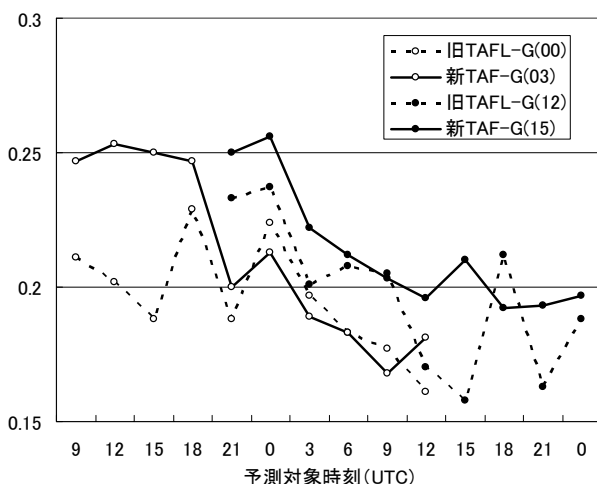


図 3.8.6 前 3 時間に並以上の降水があるか否かのスレツスコア
初期値ごとに各時刻で検証している。2006 年 7 月から 2007 年 6 月の 1 年間、75 空港の全事例をまとめてスコアを計算している。

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する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

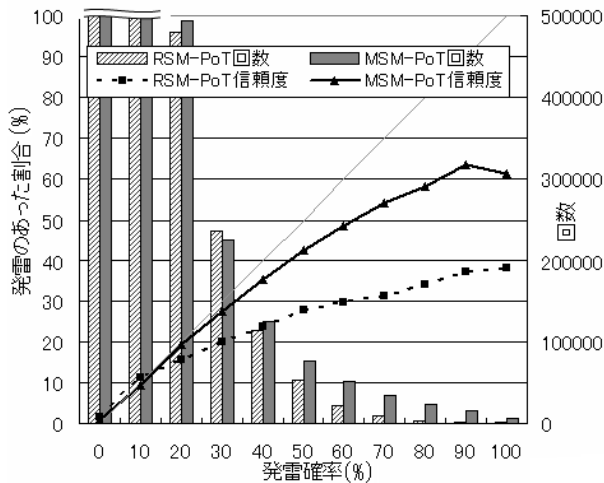


図3.8.7 MSM発雷確率ガイダンスとRSM発雷確率ガイダンスの信頼度と各確率の予測回数
検証は2006年7月～2007年6月の期間で、日本付近の2566格子で行っている。

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。

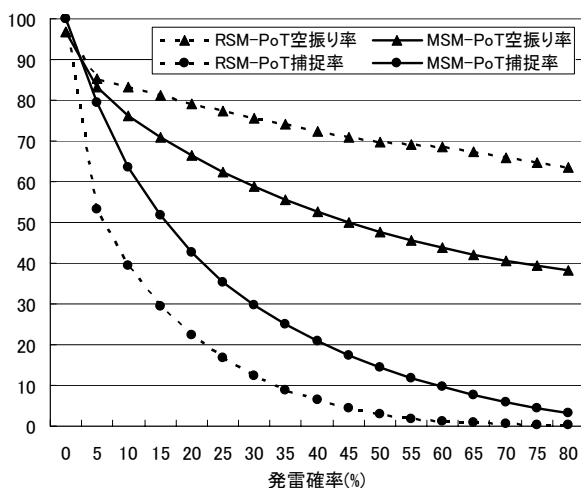


図3.8.8 各確率以上で発雷ありとした場合の空振り率と捕捉率（%）
検証期間、格子は図3.8.7に同じ。

(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。

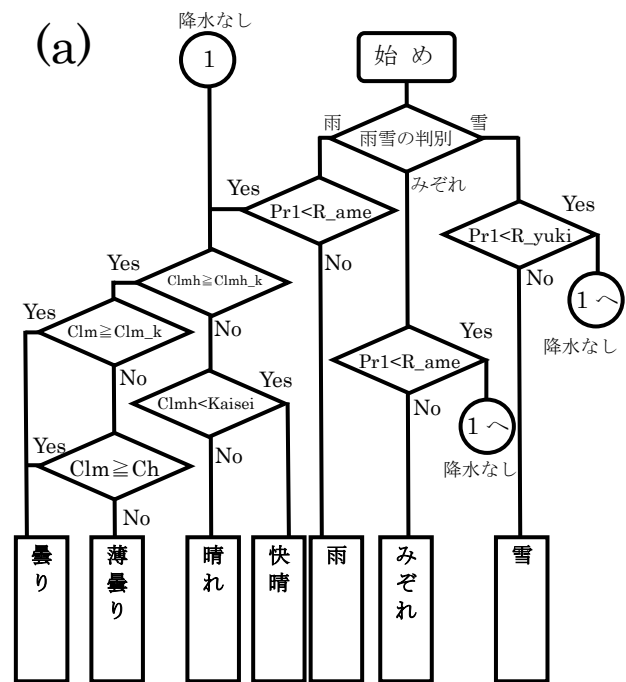
(1) 降水特性の違い

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。

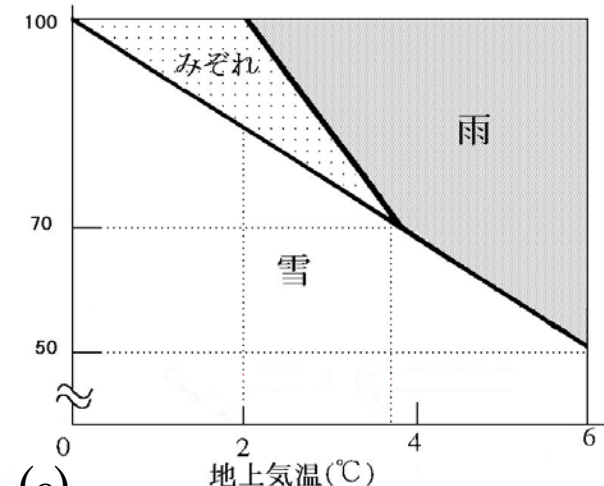
(2) 数値予報モデルによる雲量の違い

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。



(b) 雨雪の判別

RH(%) 850hPaのT(°C)の基準: -8.0



(c)

変数名	旧閾値	新閾値		閾値名
	共通	MSM	GSM	
R_yuki	0.05	0.03	0.05	Pr1
R_ame	0.2	0.1	0.4	Pr1
Clmh_k	0.9	0.4	0.4	Clmh
Clm_k	0.9	0.4	0.4	Clm
Kaisei	0.2	0.1	0.1	Clmh

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°C以下であれば雪。-8°C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。

¹ 安藤 昭芳

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。

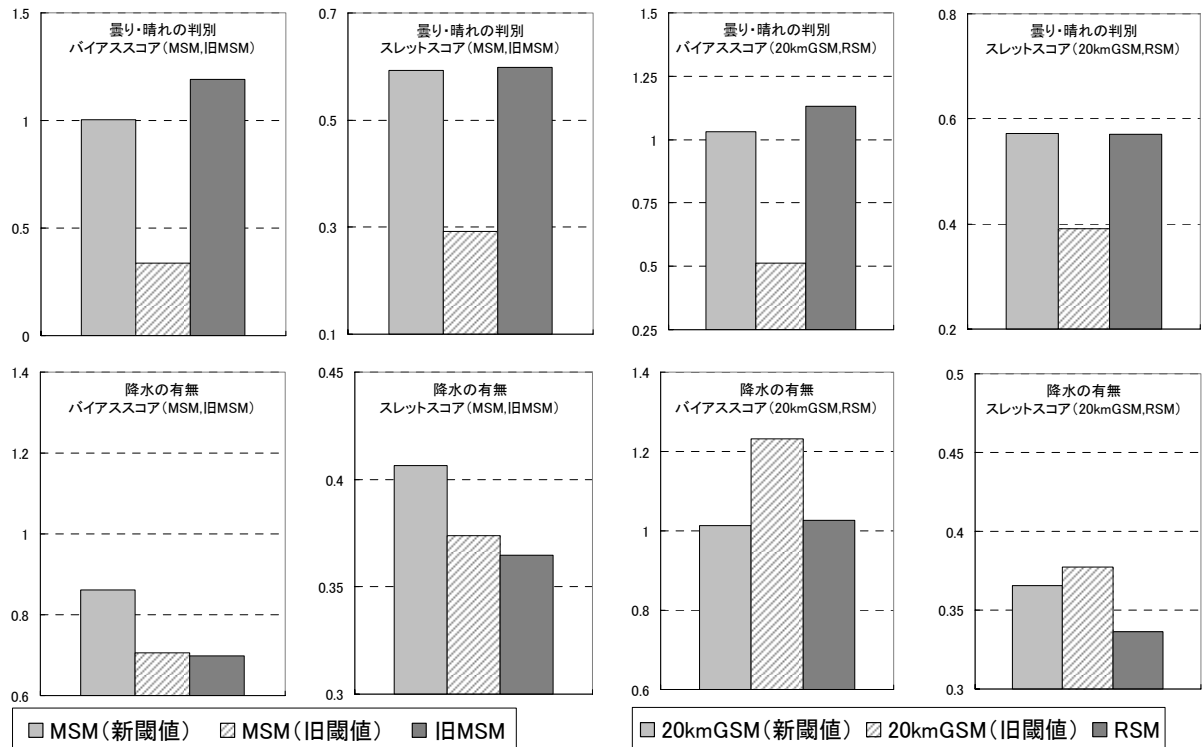


図 3.9.2 新旧閾値による MSM、旧 MSM、20km GSM、RSM によるお天気マップの検証結果。上段は曇り・晴れの判別、下段は降水の有無の検証結果。左 2 列が新旧 MSM、右 2 列が 20kmGSM と RSM。それぞれ左がバイアススコア、右がスレットスコア。MSM は 03,09,15,21UTC 初期値による 3 から 15 時間予報の検証結果。20kmGSM と RSM は、00,12UTC 初期値による 3 から 51 時間予報の検証結果。曇り・晴れのバイアススコアは 1 以上が曇りの予報が過剰。検証期間は、MSM は 2006 年 7 月から 2007 年 4 月の 10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

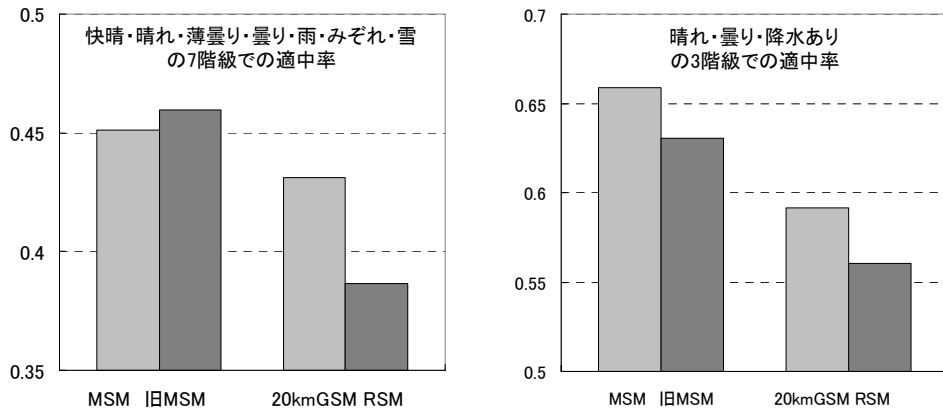


図 3.9.3 新閾値による MSM、旧 MSM、20kmGSM、RSM によるお天気マップの適中率。左は、快晴・晴れ・薄曇り・曇り・雨・みぞれ・雪の 7 階級に分類した場合の適中率。右は、晴れ（快晴・晴れ、薄曇り）・曇り・降水あり（雨・みぞれ・雪）の 3 階級に分類した場合の適中率。検証期間と対象時刻は図 3.9.2 と同じ。

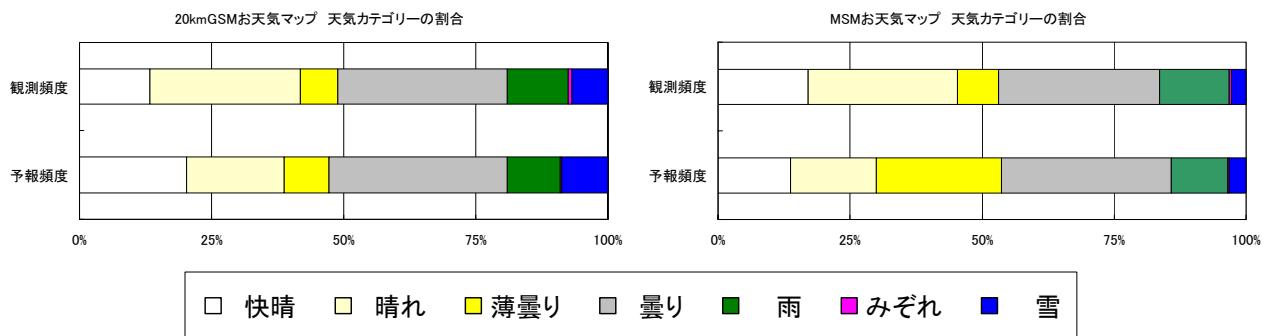


図 3.9.4 お天気マップによる各天気カテゴリーの出現頻度と、対応する時刻の地上観測の観測頻度。左は 20kmGSM、右は MSM。検証期間と対象時刻は図 3.9.2 と同じ。

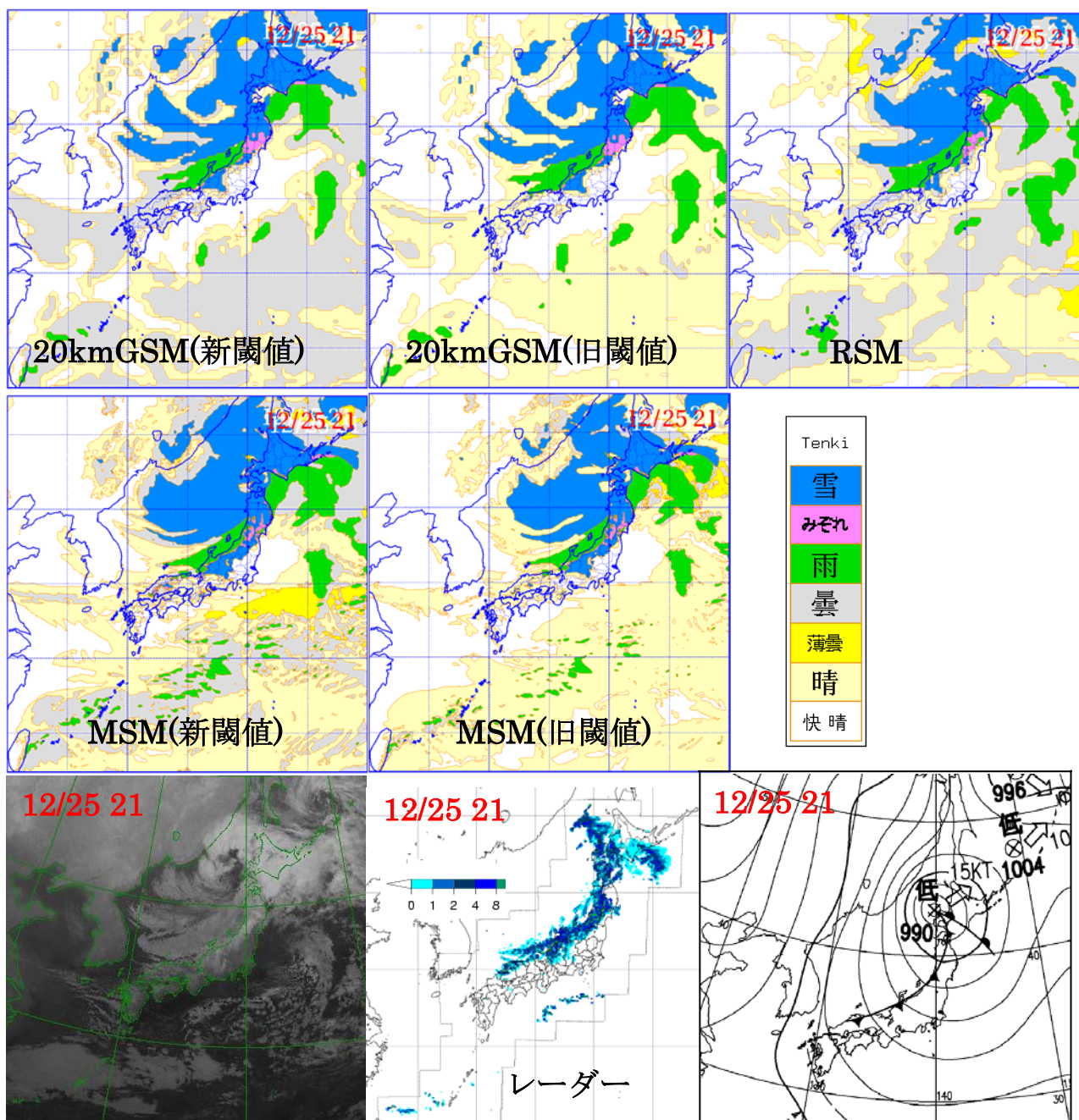


図 3.9.5 上段は、左から 20km-GSM 新閾値、旧閾値、RSM によるお天気マップ。2005 年 12 月 24 日 12UTC 初期値による 24 時間予報。中段は、左から MSM 新閾値、旧閾値によるお天気マップ。2005 年 12 月 24 日 15UTC 初期値による 21 時間予報。下段は対応する時刻(2005 年 12 月 25 日 21JST)の衛星赤外画像、レーダー画像及び地上天気図。

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.