令和元年度数値予報 研修テキスト

「最近の数値予報システムとガイダンスの改良について」 (数値予報課)

> 令和元年 12月 December 2019

気 象 庁 予 報 部

気象庁が1959年(昭和34年)に数値予報業務を開始してから今年でちょうど60年の節目を迎えた。この間、静止気象衛星やレーダーの運用開始など観測システムの高度化やスーパーコンピュータの劇的な性能向上、気象学の発展などに支えられ、数値予報は大幅な精度向上を達成した。とりわけ、1988年(昭和63年)の全球スペクトルモデルの実用化とその後の高解像度化や物理過程改良、2004年(平成16年)の非静力学モデルの現業化、2002年(平成14年)の現業領域数値予報システムとしては世界初のメソ解析に4次元変分法データ同化手法の導入、続いて2005年(平成17年)の全球解析に4次元変分法の導入による衛星データの高度利用が、大きなブレークスルーであった。昭和から平成にかけて最新の科学技術を活用し、気象情報の価値をより一層高めてきたことは、大きな成果である。

これからの令和の時代、数値予報は気象予測技術の基盤であり、天気予報や防災気象情報、 民間気象業務、ひいては社会経済活動全般を根底から支えているという認識のもと、スーパーコンピュータの性能を最大限に活かして数値予報の改良を続け、より精度の高い気象情報の発表を通じ、社会において様々な価値が産み出されていくよう、数値予報モデル開発・ 運用を継続していくことが求められている。

令和元年度の数値予報研修テキストでは、予報作業で必須となっている数値予報プロダクトの特性や利用上の注意等を把握していただくため、最新の数値予報システムとガイダンスについて解説した。

第1章では、2019年(令和元年)6月27日に本運用を開始したメソアンサンブル予報システムについて、概要と検証結果、利用上の留意点などを説明した。第2章では、メソアンサンブル予報システムに基づくガイダンスについて、仕様や作成方法、統計・事例検証などをまとめた。第3章では最近の数値予報システムの改良として、全球解析・メソ解析におけるひまわり8号など観測データ利用の改良、局地解析の高度化についてとりあげた。また、第4章では事例解析として、昨年大きな被害をもたらした平成30年7月豪雨(前線及び台風第7号による大雨)、平成30年台風第21号と第24号の数値予報資料の特性について、各種数値予報の予測結果の考察や数値予報プロダクトを利用する際のポイントという視点で解説を行った。最後の第5章では最近のガイダンスに関連するトピックスとして、部内運用を開始した48時間、72時間最大降水量ガイダンス等についてとりあげた。

特に、第1章と第2章のメソアンサンブル予報システムとそれに基づくガイダンスについては、従来のプロダクトに信頼度や予測不確実性などの付加的な情報を与えるものと位置づけており、現象の発生を確率的に捉えることが可能になる。これら新しい数値予報資料の利用方法について事例検討などを通じて知見を蓄積していくことが重要と考えている。数値予報資料の概要と特性を把握し、予報作業で適切に利用いただけるよう、本研修テキストが有効に活用されることを期待している。

^{*} 室井 ちあし

最近の数値予報システムとガイダンスの改良について

目 次

はじめに

第1章	メソアンサンブル予報システム	1
1.1	はじめに	1
1.2	仕様	1
1.3	統計検証	3
1.4	MEPS の利用と留意点 ·····	4
1.5	まとめ	14
第2章	メソアンサンブルガイダンス	16
2.1	概説	16
2.2	気温ガイダンス	17
2.3	降水ガイダンス	26
2.4	航空悪天 GPV ·····	36
2.5	その他のガイダンス (降雪、風、発雷確率)	45
第3章	観測データ利用の改良及びメソ・局地数値予報システムの改良	56
3.1	全球解析における観測データ利用の改良	56
3.2	メソ解析における観測データ利用の改良及び	
	メソ数値予報システムにおける北西太平洋高解像度日別海面水温解析の利用開始	61
3.3	局地解析の高度化	68
第4章	事例解析	70
4.1	平成 30 年 7 月豪雨(前線及び台風第 7 号による大雨等)	70
4.2	平成 30 年台風第 21 号	87
4.3	平成 30 年台風第 24 号 · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	93
第5章	ガイダンスのトピックス	100
5.1	12, 24, 48, 72 時間最大降水量ガイダンスの開発・改良	
5.2	最大降水量・降雪量・最大風速ガイダンスの精度評価	112
付録 A	数値予報システムおよびガイダンスの概要一覧表	116
付録 B	最近の改善のまとめ 1	144
付録 C	プロダクトの物理量の仕様及び算出手法	145
付録 D	数値予報研修テキストで用いた表記と統計的検証に用いる代表的な指標	147

第1章 メソアンサンブル予報システム*

1.1 はじめに

気象庁は、メソモデル (MSM: Meso-scale Model) の 予測に対して信頼度や不確実性等の情報を付加するこ とを目的に、メソアンサンブル予報システム (MEPS: Meso-scale Ensemble Prediction System) の運用を開 始した。MSM は防災気象情報、航空気象情報、天気 予報等の作成支援を目的として運用しており、メソス ケール現象を予測対象とする。これまで、同化手法の 改良や新規データ利用による初期値の改善、全球モデ ルの改良に伴う側面境界値の改善、予報モデルの改良 等の積み重ねにより、その予測精度は向上してきた。 しかしながら、災害をもたらすような局地的な集中豪 雨等のメソスケール現象を、時間と場所を特定して予 測することには、現在でも多くの困難が残されている。 同化手法や予報モデルの改良等を今後も着実に進めて いく必要がある一方、初期値等の僅かな違いにより予 測結果が大きく変わる場合があるメソスケール現象の 予測に対して、MSM のみによって決定論的に捉えよ うとすることの限界も考える必要がある。このことを 考慮すると、複数の予測結果により気象現象の発生を 確率的に捉えることができるアンサンブル予報は、メ ソスケール現象の予測に有用な資料となりうる。

このような背景から、気象庁は MEPS の開発を進め てきた。本運用に先立ち、2015年3月からは、第9世 代スーパーコンピュータシステム (NAPS9) において、 1日1回 (18 UTC 初期値)、11 メンバーの仕様で部内 試験運用を開始した。部内試験運用期間中は、MEPS の特性を確認し、正式運用に向けた改良を随時導入す るとともに、気象庁内において現業予報作業での利用 方法の検討を行ってきた。さらに、2018年6月の第10 世代スーパーコンピュータシステム (NAPS10) への更 新後は、強化された計算機能力を活かし、1日4回(00, 06, 12, 18 UTC) 実行への高頻度化、21 メンバーへの 増強といった仕様の拡張を行い、本運用と同仕様での 部内試験運用を実施した。NAPS10での部内試験運用 における検証結果から、アンサンブル予報の基本的な 性質を有すること、現業予報作業での利用における有 用性が確認されたことから、2019年6月27日より本 運用を開始した。

本稿では本運用を開始した MEPS について、第 1.2 節で仕様を、第 1.3 節で統計検証結果を、第 1.4 節で 事例を示しながら利用上の留意点を示す。

なお、これまでの MEPS の開発の技術的な詳細は小野 (2010)、小野 (2016a)、小野 (2016b) 等を、部内試験運用については石田 (2016)、小野 (2016a)、河野ほか (2018) を参照されたい。

1.2 仕様

本節では、NAPS10 における部内試験運用 (河野ほか 2018) と一部記述の重複はあるものの、改めて仕様の詳細を示す。また、本運用開始時における配信時刻やシステム障害時の対応についても記述する。第 A.1.4 項に仕様の一覧を載せてある。

1.2.1 運用形態

MSM が予測対象とするメソスケール現象の予測の不確実性は、数値予報モデルの初期値、境界値に含まれる誤差や、その時間発展の大きさ等の変化により時々刻々と変化している。この予測の不確実性の時間変動を適切に捕捉することを目的とし、実行頻度を1日4回(00,06,12,18 UTC 初期値)としている。また予報時間は全初期時刻において39時間であり、1 初期時刻あたりのメンバー数は1つのコントロールラン(摂動を与えないメンバー)と20の摂動ランから成る全21メンバーである。

プロダクトの配信時刻は初期時刻+4時間以内としている。これは、00 UTC 初期値の MEPS を午後の予報作業で利用できるようにするためである。また、プロダクト配信の即時性を重視し、計算不安定やシステム障害等で一部のメンバーの予測が作成されなかった場合はそのメンバーの再計算は行わず、21 メンバーより少ない正常終了したメンバーのみでプロダクトを作成する¹。

1.2.2 数値予報モデル、初期値、境界値

MSM の予測に対してより適切な信頼度や不確実性等の情報を提供するためには、MEPS 各メンバーの予測特性が MSM と同様であることが望ましい。そこでMEPS では、各メンバーの予測における計算領域や水平格子間隔、鉛直層配置、物理過程を含む各種設定を、全て MSM に揃えている。また、コントロールランの初期値、境界値は同初期時刻の MSM と同じものを利用しており、コントロールランは同初期時刻の MSM の予測値そのものとなっている。

コントロールランと摂動ランとの差異は、摂動ランでは以下で述べる初期摂動と側面境界摂動を考慮している点である。全球アンサンブル予報システム(GEPS;山口 2017)で導入されている、下部境界摂動やモデル摂動については考慮していない。すなわち MEPS は、MSM の初期値と側面境界値に起因する不確実性を定量化するシステムであると言える。

^{*} 河野 耕平、氏家 将志、國井 勝、西本 秀祐

¹ 本運用を開始してから本稿執筆時点(2019 年 9 月)まで にシステム障害により 1 メンバーの予測が作成されなかった ことが 1 回あった。

1.2.3 初期摂動

初期値に含まれる誤差に起因する MSM の不確実性 を少ないメンバー数で効率的に表現するため、初期摂 動作成には特異ベクトル (SV: Singular Vector; 山根 2002) 法を用いている。SV 法は指定した評価時間・領 域において線形成長率の大きい摂動を算出する手法で、 アンサンブル予報における有効な初期摂動作成手法の ひとつである。MEPSでは、気象庁全球モデルに基づ く全球特異ベクトル (GSV: 酒井 2009)²、気象庁非静 力学モデル JMA-NHM に基づく水平解像度の異なる 2 種類のメソ特異ベクトル (MSV; 小野 2010) を結合す ることにより、異なる時空間スケールの成長モードを 含んだ複数の初期摂動を作成している。具体的には、ま ず総観規模擾乱を対象とする水平格子間隔約 180 km・ 評価時間 45 時間の GSV をベースとして全般的な摂動 を確保する。次に予報期間前半の強雨についての不確 実性を考慮することを狙いとして、より時空間スケー ルの小さい現象を対象とする水平格子間隔 80 km・評価 時間 15 時間の MSV (MSV80)、水平格子間隔 40 km・ 評価時間 6 時間の MSV (MSV40) から得られる解像 度の高い摂動を合成する。それぞれの狙いに合わせて、 GSV では水平風と気温の摂動のみを求めており、MSV ではそれらに加えて水蒸気場の摂動も考慮している。初 期摂動の設計の詳細は、小野 (2016a) を参照していた だきたい。

初期摂動は10通り作成し、コントロールランの初期値に摂動を加算したものをメンバー01から10の、減算したものをメンバー11から20の初期値としている。各摂動を加減算するのは、SV法はその性質上、正負の符号は決定できないためである。

例として、図 1.2.1 に 2019 年 6 月 30 日 12 UTC 初期値の MEPS のあるメンバーの初期摂動を示す。この初期値は、日本付近に梅雨前線が停滞する中で下層の暖湿流が西日本を中心に流入し、九州等で大雨となった事例のものである。図 1.2.1 (上)の 500 hPa の気温傾度帯に対応して見られる 1000 km 程度以上の水平スケールの摂動は GSV によるものである。図 1.2.1 (下)の 850 hPa の相当温位で、四国沖から九州、東シナ海の相当温位傾度帯のすぐ南側や日本の南海上の一部の領域に見られる、数 100 km の水平スケールで数 K 程度高くしたり低くしたりする摂動は MSV によるものである。

1.2.4 側面境界摂動

領域モデルを用いたアンサンブル予報においては、 初期値の不確実性に加え、側面境界値の不確実性も合 わせて考慮する必要がある。一般に領域モデルでは予 報時間の経過に伴い、モデル領域内に側面境界値の影

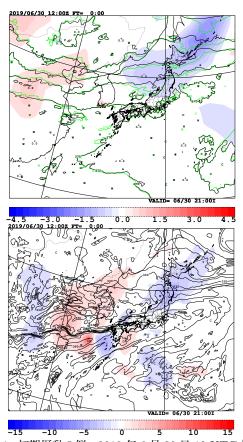


図 1.2.1 初期摂動の例。2019 年 6 月 30 日 12 UTC 初期値において、あるメンバー(メンバー07)の初期場に与えられた、(上) 500 hPa の気温 [K] および(下)850 hPa の相当温位 [K] の摂動。黒線でコントロールランの初期値を示す。500 hPa の気温にはメンバー07 の初期値を緑線で示す。

響が拡がっていく。このため、側面境界値の不確実性を考慮せず全メンバーで同一の側面境界値を用いると、予報が進むにつれ側面境界付近でアンサンブルスプレッド(以下、スプレッド)が小さくなっていき、やがてはモデル領域内の不確実性が過小評価されてしまう(小野 2016b)。

さらに側面境界摂動は、初期摂動の時間発展と矛盾しない摂動であることが望ましい。これは、例えばある擾乱を強めるような初期摂動が得られた際に、逆に擾乱を弱めるような側面境界摂動が流入すると、両者の影響が打ち消し合い、初期摂動と側面境界摂動が有する不確実性が適切に予報場に反映されなくなってしまうためである。そこでMEPSでは、初期摂動作成時に利用したGSVを時間発展させたものを側面境界摂動として利用することにより、予報期間後半においてスプレッドが過小になることを改善すると共に、領域外部にも跨る大きなスケールの不確実性を一貫して表現できるようになっている(Ono 2017)。

側面境界摂動も初期摂動と同様に 10 通り作成され、コントロールランの境界値に対しメンバー 01 から 10

² GSV は GEPS でも利用されているが、MEPS では予報時間に合わせて日本周辺域で成長率の大きいものを優先的に利用している。

はこの摂動を加算し、メンバー 11 から 20 はこの摂動 を減算して境界値とする。

1.3 統計検証

MEPS のアンサンブル予報システムとしての基本的な性能を確認するため、アンサンブル平均の二乗平均平方根誤差 (RMSE) とアンサンブルメンバーのスプレッドの関係、降水の確率予測について検証した。検証には、本運用と同仕様である NAPS10 上での部内試験運用期間中(2018 年 6 月~2019 年 6 月)の予測結果を用いた。

1.3.1 スプレッドと誤差の関係

理想的なアンサンブル予報の性質として、アンサンブ ル平均の RMSE はコントロールランと比べて小さいこ と、スプレッドの大きさはアンサンブル平均の RMSE と同程度であることが一般に成り立ち(高野 2002)、こ れらの性質は MEPS に対しても期待される。ここでは、 メソ解析を参照値としたコントロールランの RMSE と アンサンブル平均の RMSE を比較し、スプレッドとア ンサンブル平均の RMSE の関係を確認する。図 1.3.1、 図 1.3.2 はそれぞれ、夏期 (2018 年 7 月)、冬期 (2018 年 12 月) の 300 hPa, 500 hPa, 850 hPa、地上におけ るジオポテンシャル高度(地上は海面更正気圧)、気 温、東西風、露点温度のコントロールランとアンサン ブル平均の RMSE とスプレッドを示す。RMSE につ いて、アンサンブル平均がコントロールランより小さ いことは図1.3.1、図1.3.2で示した全ての要素、予報 時間について夏期、冬期ともに確認できる。夏期のス プレッドについては、アンサンブル平均予報の RMSE と比べて同程度または予報期間後半で過小になる傾向 が見られる。一方、冬期はスプレッドが予報期間後半 で過大になる傾向が 500 hPa の高度、気温、風等の多 くの要素で見られ、予報期間前半のスプレッドが過小 な傾向が850 hPaの高度、海面更正気圧、地上の気温、 露点温度で見られる。

1.3.2 降水の確率予測の検証

MEPS の利用方法として、MSM の決定論的な降水予測に対して、「10 mm/3h 以上の降水の現象出現確率」のような確率予測の利用が挙げられる。ここではMEPS の超過確率による降水確率予測の性能を表す検証結果を示す。図 1.3.3 で、夏期(2018 年 7 月)について、3 時間降水量の信頼度曲線を閾値毎に示す。横軸に超過確率による予測現象出現確率、縦軸に実際に現象が出現した相対頻度を示しており、曲線が対角線に近いほど確率予測としてより適切なことを示している(付録第 D.4.4 項を参照)。MEPS においては、降水量の閾値が小さいほど、信頼度曲線は対角線に近い。例えば、図 1.3.3 の最上段の閾値 1 mm/3h では、他の閾値に比べ信頼度曲線は対角線に近い。ただし、FT=3 に

は予報初期のモデル特性の影響3が見られ、他の予報時間に比べて信頼度曲線が対角線から離れ、予測現象出現確率が低い場合は現象出現相対頻度が高く、予測現象出現確率が高い場合は現象出現相対頻度が低い傾向がある。FT=3以外の予報時間については予報時間による特性の違いは見られない。10 mm/3h, 20 mm/3h, 30 mm/3h と強い降水になるほど、全般に予測現象出現確率は実況出現相対頻度よりも高くなる傾向がある。ただし、比較的空間スケールの大きな現象(例えば台風)に伴う強い降水事例が発生する期間に絞ると、強い降水でも比較的高い信頼度を示す(図1.3.4)。冬期(2018年12月)も夏期と同様に、強い降水になるほど、予測現象出現確率は実況現象出現相対頻度よりも高く予測する傾向がある(図1.3.5)。

MEPS の降水確率予測の気候値予測に対する優位性 を確認するため、図1.3.6 に、夏期(2018年7月)につ いて、3時間降水量の閾値別のブライアスキルスコア (以下、BSS)を示す。閾値別にみると、降水量が少な いほど大きい BSS を示す傾向がある。さまざまな現象 を含む期間統計では予報時間を通して閾値 30 mm/3h までの降水に対して BSS は 0 より大きく、気候値予測 と比べて有効な予測であることを示している。ただし、 比較的空間スケールの大きな現象(例えば台風)に伴 う強い降水事例の期間に絞ると、より強い降水に対し ても高い BSS を示す(図 1.3.7)。また、冬期は強い 降水事例が少なく、気候学的出現率も低い。この場合、 降水の現象出現確率を高く予測する傾向のあるモデル では、気候値予測に対する優位性は小さくなる。実際、 MEPS による降水予測は、夏期よりも低い BSS を示す 傾向があり、閾値 5 mm/3h までの降水に対して BSS は正の値を示している(図 1.3.8)。

ここまで示したように、今後改善の余地はあるものの、スプレッドと誤差の関係や降水確率予測等において、MEPSがアンサンブル予報システムとしての基本的な性能を有することを確認した。

1.3.3 各アンサンブルメンバーの降水予測検証

ここまでは、アンサンブル平均や着目する現象の確率予測等、アンサンブル予報としての統計的な予測検証結果を示した。一方、短期予報ではアンサンブルメンバーの1つをコントロールランとは異なるシナリオと見なす使い方の要望もある (小野 2016a)。しかし、降水予測については、(i) 統計的にはコントロールランが最も精度が高いこと、(ii) ある予報時間にコントロールランの予測精度を上回るメンバーがあったとしても、優位性の持続時間は短いこと、が検証結果から示されている。

まず、(i) について、小野 (2016a) と同様に、コント

³ 予報初期に弱い降水を広げやすい特性がある。また、予報 初期はスプレッドの拡がりが小さい影響も考えられる。

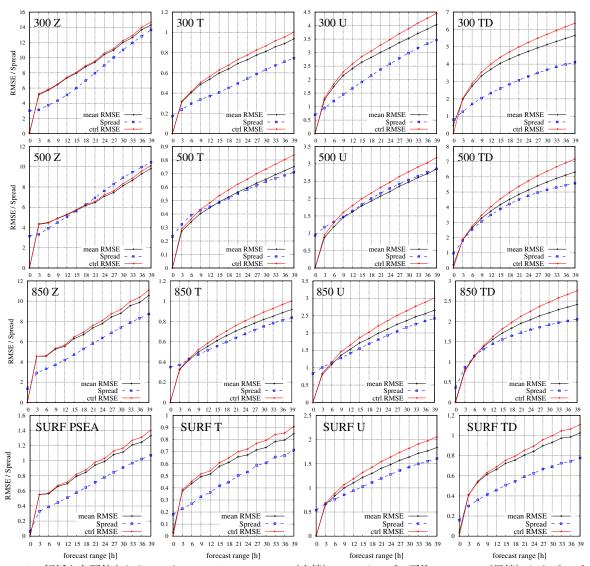


図 1.3.1 メソ解析を参照値としたコントロールランの RMSE (赤線)、アンサンブル平均の RMSE (黒線) およびスプレッド (青点線) の予報時間別の統計検証結果。統計期間は 2018 年 7 月。左からジオポテンシャル高度 [gpm] (最下段は海面更正 気圧 [hPa])、気温 [K]、東西風 [m/s]、露点温度 [K] であり、上段から 300 hPa, 500 hPa, 850 hPa、地上。横軸は予報時間 [h] を表す。

ロールランと各アンサンブルメンバーの降水予測精度の比較を示す。図1.3.9の上段はコントロールランと各メンバーの予報期間平均した3時間降水量のスレットスコアである。各メンバーはコントロールランより最大で0.05程度劣る。図1.3.9の下段に示した捕捉率では、各メンバーはコントロールランより最大で0.1程度劣る。コントロールランの初期値(メソ解析)が、それに摂動を加えた各メンバーの初期値よりも統計的に精度が良いことが現れた結果と言える。なお、図1.3.9中のアンサンブル平均と「アンサンブル最大」については第1.4.1項(1)で述べる。

(ii) について、小野 (2016a) と同様に、ある予報時間にコントロールランの予測精度を上回ったメンバーのうち、その後の予報時間に何メンバーがコントロールランを上回り続けたかを調べた結果を図 1.3.10 に示

す。本運用を開始した MEPSでも小野 (2016a) と同様の検証結果であり、ある予報時間にコントロールランの予測精度を上回るメンバーがあったとしても、優位性の持続時間は短い、という点は変わらない。したがって、利用の留意点として、ある予報時間に実況と近い予測のメンバーがあったとしても、その後もそのメンバーが良いとは限らないこと、そのため、1 つのアンサンブルメンバーのみを継続的に利用する方法は適切ではないこと、が挙げられる。

1.4 MEPS の利用と留意点

ここでは、第 1.2 節、第 1.3 節で示した、MEPS の 仕様や統計検証結果を踏まえつつ、MEPS の利用と留 意点について具体的な事例を示しながら解説する。

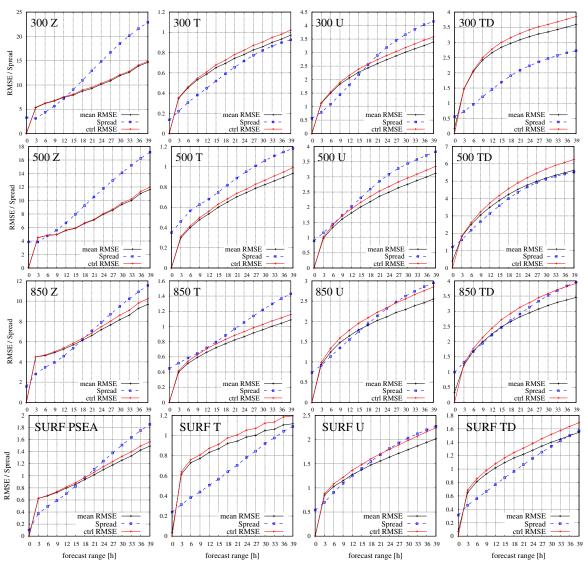


図 1.3.2 図 1.3.1 と同じ。ただし、統計期間は 2018 年 12 月。

1.4.1 MSM の不確実性の把握

(1) 降水予測の不確実性

線状降水帯の事例を基に MEPS の降水予測に関するアンサンブル統計量とその見え方を示し、どのような情報を抽出できるかを述べる。図 1.4.1 (a) には 2019年7月1日09 JST の解析雨量を示している。九州南部を中心に東西に延びる線状の50 mm/3hを超える強雨域が見られる。図 1.4.1 (b) にはコントロールランの3時間降水量の予測値を示し、20 メンバーの摂動ランの予測値を図 1.4.2 に示した。

これらの 21 メンバーの予測結果の最大値を格子ごとに抽出した「アンサンブル最大」を図 1.4.1 (c) に示す。50 mm/3h 以上の線状の強雨域が九州の北部から南部まで何本か表現されている。図 1.4.2 と図 1.4.1 (c) を見ると、50 mm/3h 以上の線状の強雨域が九州にかかる可能性がある程度高いこと(複数メンバーで表現していること)、その出現位置の不確実性は南北に大き

いこと、が把握できる。図1.3.9 に示した降水予測の統計スコアにおいて、アンサンブル最大は、捕捉率がコントロールランに比べて高いことが特徴である。この事例でも、コントロールランでは表現していない、九州南部の線状の強雨域を表現している。ただし、実況の鹿児島県と宮崎県の50 mm/3h の降水域とは30 km程度の位置ずれがある。なお、アンサンブル最大による捕捉については図1.4.6 にも例示した。

図 1.4.1 (d) に、21 メンバーの予測結果を格子ごとに平均したアンサンブル平均を示す。アンサンブル平均は、降水分布が平滑化されるため、局所的な強雨の分布やピークを捉える目的には不向きである。図 1.3.9 に示した降水予測の統計スコアにもその性質が現れており、アンサンブル平均の強い降水についてのスレットスコア、捕捉率はコントロールランに劣る。

図 1.4.3 は 3 時間降水量の超過確率で、左から閾値 10, 20, 50, 100 mm/3h である。各アンサンブルメン

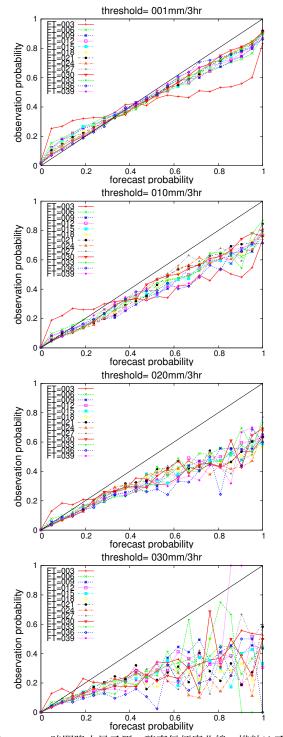


図 1.3.3 3 時間降水量予測の確率信頼度曲線。横軸は予測現象出現確率、縦軸はそれに対応する実況現象出現相対頻度。FT=3 から 39 まで 3 時間毎の信頼度曲線を色別に描いている。統計期間は、2018 年 7 月(124 初期値)。上から閾値 1, 10, 20, 30 mm/3h。観測値は解析雨量で、観測値、予測値ともに検証格子は 20 km。

バーの予測する線状降水帯は南北に位置がばらついているが、10 mm/3hでは予測するメンバーも多い上に降水帯の幅も広いためメンバー間で降水帯予測が重な

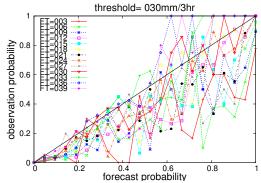


図 1.3.4 図 1.3.3 と同じ。ただし、統計期間は 2018 年台風 第 21 号を予測対象に含む 2018 年 9 月 $2\sim4$ 日(12 初期 値)。 閾値 30 mm/3h。

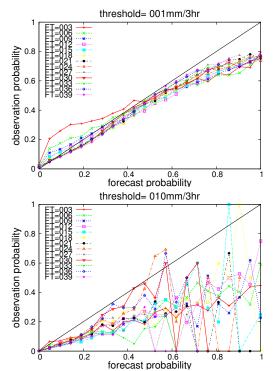


図 1.3.5 図 1.3.3 と同じ。ただし、統計期間は、2018 年 12 月(124 初期値)。上から閾値 1, 10 mm/3h。

りやすく、九州で高い超過確率を示している⁴。 閾値が 上がるにつれて、表現するメンバーが少なくなる上に表 現される降水帯の幅も狭くなることによってメンバー 間で降水帯予測が重なりにくくなり、高い確率はほと んど表現されなくなってくる。この事例では、線状降 水帯の出現位置の不確実性の南北方向の大きさに対し、 線状降水帯の現象スケールの南北の幅の大きさが相対 的に小さい。各メンバーの予測位置のばらつきが注目

⁴ なお、8割を超えるような特に高い確率は、九州のモデル 地形に対応して見られる。地形強制による降水は位置ずれが 小さく、多くのメンバーの降水予測が重なりやすい。また、 MSM の特性として、地形に沿った降水を表現しやすい性質 があり、そのようなモデル特性を反映している側面もある。

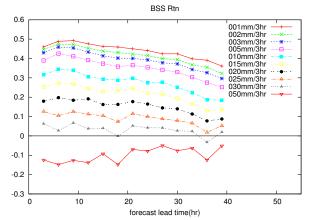


図 1.3.6 3 時間降水量の閾値別のブライアスキルスコア。閾値ごとに線の色を分けて描いている(凡例を参照)。横軸は予報時間を示す。統計期間は 2018 年 7 月(124 初期値)。

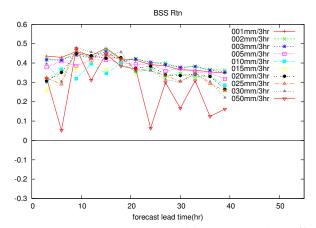


図 1.3.7 図 1.3.6 と同じ。ただし、統計期間は 2018 年台風第 21 号を予測対象に含む 2018 年 9 月 2~4 日(12 初期値)。

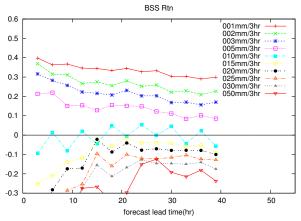


図 1.3.8 図 1.3.6 と同じ。ただし、統計期間は 2018 年 12 月 (124 初期値)。

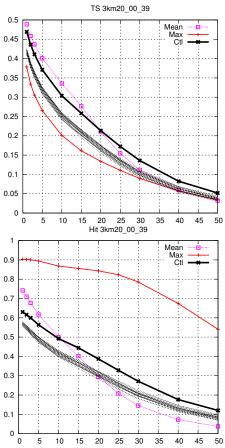


図 1.3.9 予報期間平均した 3 時間降水量の(上)スレットスコアと(下)捕捉率。統計期間は 2018 年 7 月。黒実線がコントロールラン、黒破線が各メンバー、桃色がアンサンブル平均、赤がアンサンブル最大のスコアを表す。横軸は閾値 [mm/3h]。

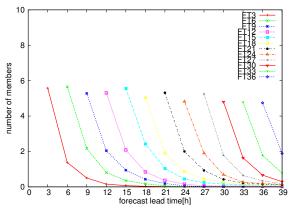


図 1.3.10 各初期値、各予報時間において、コントロールランのスレットスコアを上回ったメンバーのうち、引き続く予報時間においても上回り続けたメンバー数。 閾値 20 mm/3h。統計期間は 2018 年 7 月。横軸は予報時間、縦軸はメンバー数。

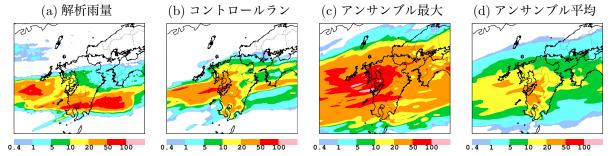


図 1.4.1 2019 年 7 月 1 日 09 JST の 3 時間降水量 [mm/3h] について、(a) 解析雨量、(b) コントロールラン、(c) アンサンブル最大、(d) アンサンブル平均。MEPS は 2019 年 6 月 30 日 00 UTC 初期値の FT=24。

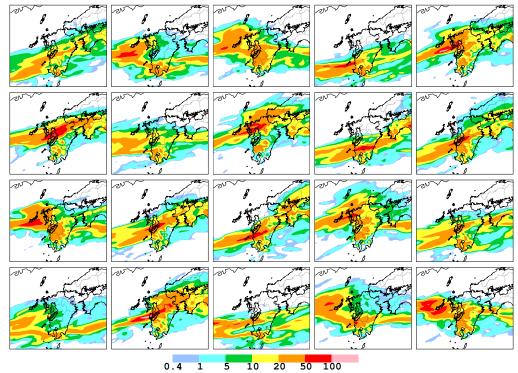


図 1.4.2 図 1.4.1 および図 1.4.3 に示したアンサンブル統計量の基となるアンサンブルメンバー(20 の摂動ラン)の 3 時間降水量の予測。この 20 メンバーとコントロールランから統計量を求めた。2019 年 6 月 30 日 00 UTC 初期値の FT=24。

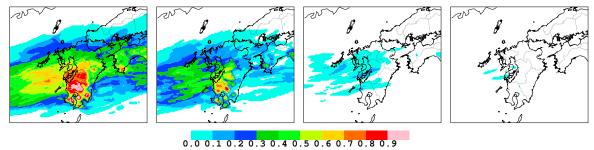


図 1.4.3 2019 年 7 月 1 日 09 JST の 3 時間降水量 [mm/3h] についての超過確率。左から、閾値 10, 20, 50, 100 mm/3h。 MEPS は 2019 年 6 月 30 日 00 UTC 初期値の FT=24。

する現象のスケールよりも大きい場合は、その現象に 関する超過確率は大きくなりにくい。

(2) スプレッドと誤差の関係

第1.3 節では、アンサンブル平均の RMSE とスプレッ

ドの大きさは、統計的には、特に夏期において同程度であることを示した。一方で、事例によってはこの関係を満たさない場合がある。例えば、MEPSでは、モデルの不完全性に由来する系統誤差は、RMSEには反映

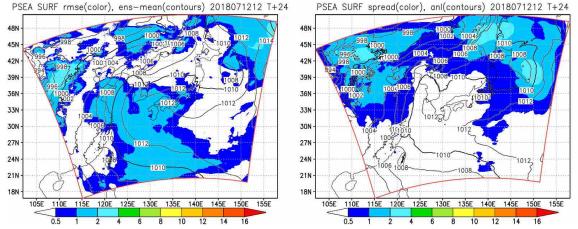


図 1.4.4 2018 年 7 月 12 日 12 UTC 初期値の FT=24 の海面更正気圧 [hPa] の予測に対する、(左) アンサンブル平均(等値線)とその絶対誤差(カラー)、(右) 解析値(等値線)とスプレッド(カラー)。

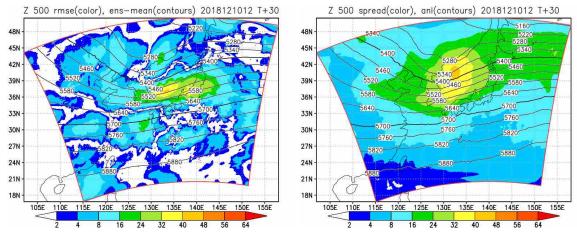


図 1.4.5 2018 年 12 月 10 日 12 UTC 初期値の FT=30 の 500 hPa のジオポテンシャル高度 [gpm] の予測に対する、(左) アンサンブル平均(等値線)とその絶対誤差(カラー)、(右) 解析値(等値線)とスプレッド(カラー)。

されるが、スプレッドには反映されない点に注意が必要である。また、第1.3.1項でも示したように、MEPSでは冬期のスプレッドが過大評価である。この理由としては、MEPSのアンサンブル摂動が予測の不確実性の起源を十分に表現できていないなかで、初期時刻の摂動の大きさを設定していることが挙げられる。ここでは、これらの点について、事例を示しながら、MEPSにおけるスプレッドと誤差の対応が良くない例を示す。

図 1.4.4 は 2018 年 7 月 12 日 12 UTC 初期値の FT=24 における、海面更正気圧のアンサンブル平均の絶対誤差とスプレッドを示している。この事例では、華中から東日本にかけてほとんどのメンバーが気圧を解析値より高く予測しており(図略)、アンサンブル平均でみても誤差が大きい。統計的には、MSM は 7 月に太平洋高気圧の西側への張り出しを強めに予測する傾向があり(図略)、図 1.4.4 で示した事例でも MSMの系統誤差が反映されている。一方で、対応する領域のスプレッドは小さい。これは、モデルの系統誤差は、

どのメンバーにも見られるため、スプレッドには反映 されないためである。

図 1.4.5 は 2018 年 12 月 10 日 12 UTC 初期値の FT=30 における、500 hPa 高度のアンサンブル平均 の絶対誤差とスプレッドを示している。この事例では、 華北からのトラフの東進に伴い、日本海上で低気圧が 発達した。トラフの前面で大きいスプレッドが見られ、 それに対応して誤差の極大も見られる。しかしながら、 誤差の大きさに対してはスプレッドは過大傾向である。 これは、アンサンブル予報の摂動として、SV法による 初期・側面境界摂動のみを考慮している点に加え、夏 期のスプレッドと誤差の関係が適切になるよう、初期 時刻の摂動の大きさを設定していることに起因してい ると考えられる。本来は、予測の不確実性の起源には、 初期値に加え、側面境界値、下部境界値、モデルの不 確実性等さまざなものがある。一方で、MEPSではSV 法による初期値、側面境界値の摂動のみを考慮してお り、不確実性の起源を完全には網羅していない。現状、

これらの摂動の初期時刻における振幅の大きさは、夏期においてスプレッドが適切になることを優先して設定されている。その反面、摂動の成長率の大きい冬期にスプレッドが過大となりやすい。

このように、現在の MEPS には、スプレッドが小さい領域でも MSM の系統誤差に伴う予測誤差が生じる、冬季の低気圧の成長に伴う不確実性を過大評価しやすい、といった傾向がある。

1.4.2 初期値更新による、予測の不確実性の変化の 追跡

図 1.4.6 に平成 30 年台風第 24 号の事例における MEPS の降水予測の初期値更新による推移を示す。こ こでは東海地方の南斜面での 100 mm/3h 以上の降水に 着目する。上段に示したのは 2018 年 10 月 1 日 00 JST を対象とした、2018年9月29日00 UTC 初期値のコ ントロールランの予測と、MEPS のアンサンブル最大 と 100 mm/3h 以上の超過確率である。図 1.4.7 に示し た予測対象時刻の解析雨量と比較すると、コントロー ルランでは注目する東海地方の南斜面での強雨域の表 現が不十分である。MEPS から得られる情報として、 アンサンブル最大では注目する強雨域が見られ、その 可能性を捕捉している。また、その可能性の大きさと しては、閾値 100 mm/3h の超過確率で 30~40%の値 (21 メンバー中 7.8 メンバーで強雨域を表現) が見ら れている。下段には上段に対して同じ対象時刻で初期 値が新しい、9月 29日 12 UTC 初期値での予測を示し ている。この初期値では、コントロールランが注目す る強雨域を表現している。 閾値 100 mm/3h の超過確 率は初期値が新しくなるにつれて大きくなり5、この初 期値での予測では70~80%の大きな値となった。注目 する東海地方の南斜面の強雨域について、新しい初期 値ほどメンバー間のばらつきが小さくなり、MSM の予 測の不確実性が小さくなっていることを示唆していた。

第 4.1.3 項では、平成 30 年 7 月豪雨の事例について、実況の大雨に対応した領域で、24 時間降水量の閾値 100 mm/24h の超過確率が新しい初期値になるほど高くなっていたことを述べている。これらの事例のように、MEPS の初期値の更新による確率予測の変化を追うことで、予測不確実性の把握や、現象発生可能性の絞り込みへの利用が可能になる。

1.4.3 予測の偏りによる複数シナリオの抽出

アンサンブル予報では、摂動を与えた複数の予測を行うことで、予測の確率分布を近似する(高野 2002)。 予測の確率分布のピークは常にコントロールランの周りにあるとは限らず、確率分布のピークが複数存在することもあり得る。この場合、アンサンブル予報としては、予測結果がある現象(降水がある閾値を超える、 気温がある閾値を超える等)を予測するメンバー群と 現象を予測しないメンバー群に分かれるといったよう な、複数シナリオの可能性を示す形で現れる。

このような、複数シナリオの可能性を MEPS から抽 出できる例として、2018年6月8日の日中の気温予測 を示す。この対象時刻は、西日本では停滞前線、北海 道では日本海の低気圧の影響で雲が多いが、関東から 東北にかけては雲がまばらで晴れるところも多い予想 であった(図1.4.8)。関東から東北にかけてはスケー ルの小さい雲域に覆われるかどうかが、気温予測に影 響する事例であった。ここでは、図1.4.8の右図に水色 の丸で示した米沢を例に取り上げる。米沢の地上気温 予測の時系列を図1.4.9に示す。コントロールランで は2018年6月8日の日中の気温を低く予測し、特に FT=30付近ではアメダス観測より6℃低い予測となっ た。MEPS では FT=30 付近で気温のばらつきが 4℃ 程度と大きくなっている。さらに、予測結果について、 コントロールランに近い気温を予測しているメンバー 群と、コントロールランより高温でより実況に近い気 温を予測しているメンバー群の2つに分かれているこ とがわかる。MEPS 各メンバーの米沢の中層雲量の予 測(図1.4.10)を見ると、コントロールランよりも雲 が少ない予測のメンバーが多く、気温予測においてコ ントロールランがメンバーの表現する確率分布の低温 側の端に位置していることとの対応が見られる。日中 は気温のばらつきが大きく、全体の分布を見ると6月 8 日昼の気温が高く推移するシナリオと低く推移する シナリオの可能性を示している。

このようにアンサンブルメンバーの予測の分布の偏りを見ることで、複数の予測シナリオを抽出することが可能である。ここで留意すべき点は、アンサンブルによる予測のばらつき方を俯瞰的に見ることであり、特定のメンバーの推移を見るのではないことである。例えば、前述の気温予測の例でいうと、6月8日昼に高温を予測し実況に近かったメンバーは、明け方の予測は実況より低く推移していた。一方で、明け方は実況に近い気温を予測していたメンバーは昼の予測は実況より低く推移していた。このことは、特定のメンバーのみを継続的に利用する予測手法は適切でないことを示している。

1.4.4 アンサンブル平均

アンサンブル平均は、コントロールランを含む各メンバー単独の予測よりも統計的に RMSE が小さいことが期待され、MEPS でもその期待に反していないことを第 1.3.1 項で確認した。ここでは、MEPS のアンサンブル平均の利用上の留意点を述べる。アンサンブル平均の気象場を見る上での一般的な留意点として、「アンサンブル平均が統計的な平均操作によって得られるものであるために、物理的な意味があるかどうかは必ずしも自明ではない」という点が高野 (2002) で説明

⁵ 初期値が新しくなるにつれて、メンバー間の台風進路予測 が揃ってきたことの影響が大きい。

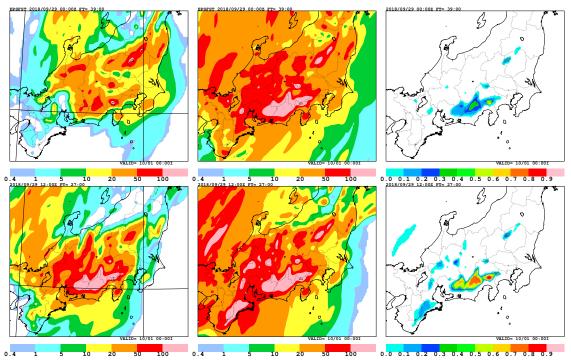


図 1.4.6 2018 年 10 月 1 日 00 JST の 3 時間降水量について、(左) コントロールラン、(中) アンサンブル最大、(右) 閾値 100 mm/3h の超過確率。上段は 2018 年 9 月 29 日 00UTC 初期値の FT=39。下段は 2018 年 9 月 29 日 12UTC 初期値の FT=27。

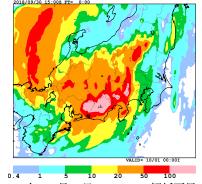


図 1.4.7 2018 年 10 月 1 日 00 JST の解析雨量による 3 時間降水量。

されており、アンサンブル平均では予測不可能な部分は打ち消し合うことにより変動の振幅が小さく、前線の動きや低気圧の示度等がぼけてしまうのはある程度仕方がない、と述べられている。この留意点は MEPSにも当てはまり、メソスケールの顕著現象を捕捉しようとする場合には、特に留意が必要な場合が多い。第1.4.1 項(1)では、線状降水帯の予測において、アンサンブル平均では、各メンバーの表現する線状の強雨域が平滑化されるため、局所的な強雨の分布やピークを捉えるには不向きである例を示した。

局所的な強雨や低気圧の中心位置や示度といった、 局所的な現象かつ位置ずれの影響が大きい例について、 アンサンブル平均を実際に現れる場の予測と考えて利 用することは適切ではない。アンサンブル平均によっ て、現象が平滑化されるためである。図 1.4.11 に梅雨 前線上に発生した低気圧の予測を例に示す。この予測 対象時刻のメソ解析は図1.4.12である。コントロール ランでは屋久島の南西海上に中心示度 1000 hPa の低 気圧を予測している。各メンバーの低気圧表現につい て 1000 hPa の等値線を描画したスパゲッティ図で確 認すると、位置がばらついており、位置のばらつきと しては東西方向に四国沖まで拡がっている。このばら つきは九州から四国の南海上に延びるスプレッドの大 きな領域として現れている。このように位置が大きく ばらついた各メンバーの低気圧予測に対して、アンサ ンブル平均では個々のメンバーが表現する低気圧の中 心示度は平滑化され、平均としての見かけ上は東西に 延びる弱い低気圧として見えている。アンサンブル平 均によって、予測の不確実性が大きい局地的な現象は 隠れてしまう点に留意が必要である。

1.4.5 予報モデルの系統誤差

第1.2節で述べたように、MEPS は、MSM と同じ設定の予報モデルを使用する。そのため、MEPS の各メンバーは、MSM の持つ系統誤差を持った上で、それぞれ摂動が加わった予報をすることになる。MEPS の各メンバーには初期値・境界値に正負の摂動を与えており、基本的にはコントロールランの周りに偏りなくばらつくことが多く、これはモデルの系統誤差には依らない。そのため、MEPS の予測結果には MSM の系

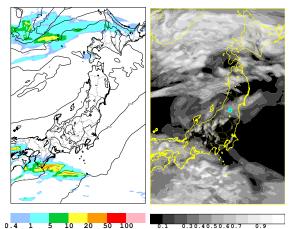


図 1.4.8 2018 年 6 月 8 日 12 JST を対象とした MSM の予測 (2018 年 6 月 7 日 00 UTC 初期値の FT=27)。(左) 海面更正気圧 [hPa] と 3 時間降水量 [mm/3h]、(右) 中層雲量。米沢は右図の水色の丸に位置する。

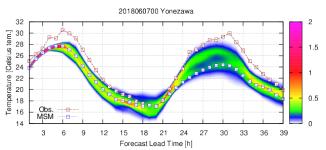


図 1.4.9 米沢における地上気温 [°C] 予測の確率密度分布の 時系列。2018 年 6 月 7 日 00 UTC 初期値。青線はコント ロールラン、赤線はアメダス観測。

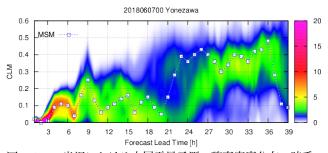


図 1.4.10 米沢における中層雲量予測の確率密度分布の時系列。2018 年 6 月 7 日 00 UTC 初期値。青線はコントロールラン。

統誤差を低減する効果は期待されない。以下では、「地表面付近の薄い冷気層」と「低気圧の発達」の予測における MSM の系統誤差を例に、その MEPS での見え方を確認する。

(1) 地表面付近の薄い冷気層の予測

MSM には、地表面付近の薄い冷気層に関連して形成される温度傾度帯を実況よりも寒気側に位置して予

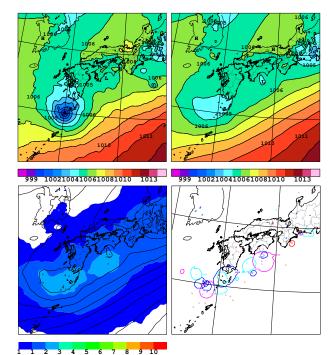


図 1.4.11 2019 年 7 月 4 日 21 JST の海面更正気圧 [hPa]。 (左上) コントロールラン、(右上) アンサンブル平均、(左下) スプレッド、(右下) 各メンバーの 1000 hPa の等値線 (線が見分けやすいよう数メンバーごとに色分けしている)。 MEPS は 2019 年 7 月 3 日 12 UTC 初期値の FT=24。

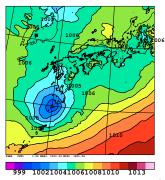


図 1.4.12 2019 年 7 月 4 日 21 JST のメソ解析の海面更正 気圧 [hPa]。

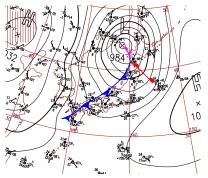
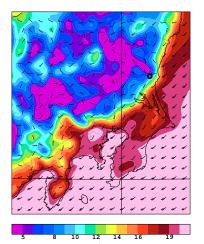
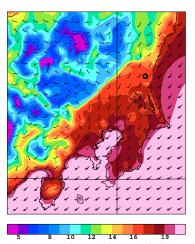


図 1.4.13 2017 年 11 月 11 日 03 JST のアジア太平洋地上 天気図。日本周辺を拡大して表示している。





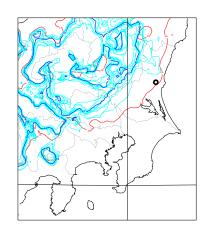


図 1.4.14 2017 年 11 月 11 日 06 JST の地上気温 [℃]。左から毎時大気解析、コントロールラン、各メンバーの 10℃ の等値線(青はコントロールラン、水色は各メンバー、赤は毎時大気解析)。水戸の位置を黒丸で示す。MEPS は 2017 年 11 月 9 日 18 UTC 初期値の FT=27。

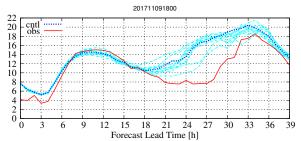


図 1.4.15 2017 年 11 月 9 日 18 UTC 初期値の MEPS による水戸の地上気温 [°C] 予測とアメダス観測値の時系列。青点線はコントロールラン、水色線は各メンバー、赤線はアメダス観測。

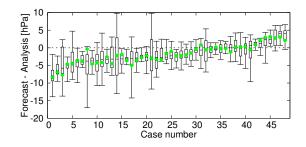


図 1.4.16 MEPS の低気圧の予測中心示度とメソ解析との差 [hPa] についての箱ひげ図。緑点はコントロールランの予 測を表す。箱の下端、上端は MEPS の予測値の第 1 四分位数、第 3 四分位数、ひげの下端、上端は最小値、最大値を表す。箱の中の横線が中央値を表す。横軸には低気圧 48 事例について、「アンサンブルメンバーの中央値からメソ解析を引いた示度差」が小さかった順(メソ解析に比べて低気圧を深めに予測した順)に並べている。

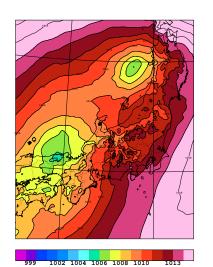
測する特性(系統誤差)がある⁶。このような温度傾度 帯の MEPS による予測を、2017 年 11 月 11 日の明け 方の関東平野の事例7で見てみる。この事例では、発 達した低気圧が日本海を北東進し、東日本は暖気内で 南寄りの風が強い場である中(図1.4.13)、関東平野 では 11 月 10 日の夜間から 11 日の朝にかけて、一般 風の南風の吹く高温域と内陸部の地表面付近に形成さ れた冷気層との間に強い温度傾度帯が形成された(図 1.4.14)。コントロールランでは、この温度傾度帯を実 況よりも内陸側に予測しており、図 1.4.14 の黒丸で示 した水戸の気温予測の時系列(図1.4.15)を見ると、実 況に比べ最大で約7℃高く予測する結果となっている。 MEPS の予測結果は、図 1.4.14 の平面図と図 1.4.15 の 時系列に水色の線で示しており、それぞれ青線で示し たコントロールランの周りにほとんど偏りなくばらつ き、MEPS の各メンバーで表現する温度傾度帯の位置 は、どのメンバーも実況より寒気側に予測した。この 項の冒頭で述べたとおり、MSM の系統誤差が各メン バーに現れた結果であり、MEPSには MSM の系統誤 差を低減する効果がないことを見ているとも言える。

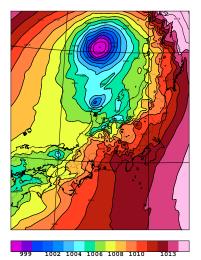
(2) 低気圧の発達予測

図 1.4.16 は、MEPS の低気圧の発達予測に関して、2018 年 4 月から 11 月の 48 事例の低気圧(台風を除く)を対象として、コントロールランと各メンバーの予測する低気圧の中心示度の関係を示した箱ひげ図である。対象とする低気圧のスケールは、停滞前線上の小低気圧から総観規模の温帯低気圧までを含んでいる。図 1.4.16 は、予測とメソ解析の低気圧中心示度の差を縦軸にとっており、負の場合はメソ解析よりも予測示

⁶ これまで原 (2014) による報告があり、現在も変わっていない。

 $^{^{7}}$ この事例は 11 メンバー仕様での部内試験運用時のものである。





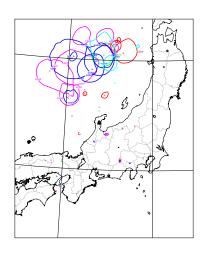


図 1.4.17 2018 年 7 月 7 日 15 JST の海面更正気圧 [hPa] について、左からメソ解析、コントロールラン、各メンバーの 1000 hPa の等値線(線が見分けやすいよう数メンバーごとに色分けしている)。MEPS は 2018 年 7 月 6 日 06 UTC 初期値の FT=24。

度が深いことを意味する。横軸には低気圧 48 事例について、「メンバーの中央値からメソ解析を引いた示度差」が小さかった順(メソ解析に比べて低気圧を深めに予測した順)に並べている。この図から、緑で示したコントロールランの予測特性としてメソ解析に比べて低気圧を深めに予測する傾向が見られる。各メンバーは概ねコントロールランの周りに偏りなくばらついており、結果的にメソ解析と比べて低気圧を深めに予測するメンバーが多い。

図 1.4.17 に示した秋田沖の低気圧は典型的な事例のひとつである。解析では 1006 hPa 程度の中心示度であるのに対し、コントロールランの予測では 998 hPaまで発達する予測であり、このコントロールランの周りにばらつく各メンバーとしても、1000 hPa の等値線を描画したスパゲッティ図では多くの閉曲線が確認され、多くのメンバーで 1000 hPa 以下まで発達させている。

また、MSM の予測特性としては上記のスケールの低気圧の他に、原・倉橋 (2017) で示された、モデルの格子間隔に近い小さなスケールの低気圧の過発達の問題がある。MEPS の各メンバーにおいても、この過発達の問題はコントロールランと同様に起こりうる。特に、コントロールランにおいて過発達が見られる場合をには、MEPS の各メンバーにおいても同様に過発達を予測するメンバーが見られることが多い。そのような場合でも、アンサンブル平均で見ると、過発達が抑えられているかのように見える場合もありうるが、それは低気圧の分布のばらつきを平滑化した結果であり、系統誤差を減少させているわけではない点に留意が必要である。

1.5 まとめ

MSM の予測に対して、ばらつきを持った複数の予測を計算し、信頼度・不確実性等の情報を提供することを目的に、MEPS の運用を開始した。統計検証の結果からアンサンブル予報として期待される基本的な性質や、降水確率予測としての有用性を確認した。

MEPS の利用と留意点について以下の点を述べた。

- MEPS メンバーの予測のスプレッドの大小から、 MSM による予測の不確実性の大小を把握することができる。留意点として、スプレッドが小さい 領域でも MSM の系統誤差に伴う予測誤差が生じる、冬期の低気圧の成長に伴う不確実性を過大評価しやすい、といった傾向がある。
- MEPS による複数の予想から、雨量や気温等の確率分布を計算でき、これを活用することで、MSMより精度の高い予報を行える可能性がある。初期値の更新による確率予測の変化を追うことで、予測の不確実性の把握や現象発生可能性の絞り込みに利用できる。
- アンサンブルメンバーの予測の分布の偏りを見る ことで、複数の予測シナリオを抽出できる場合が ある。
- MEPS の各メンバーの降水予測精度は、統計的に はコントロールランより劣る。また、ある特定メ ンバーを抽出し、このメンバーのみを継続的に利 用する予測手法は適切ではない。
- アンサンブル平均は、局地的な激しい現象を捕捉 する目的の利用には不向きである。
- MEPS は、MSM と同程度のスケールの現象を予 測対象としており、MSM で解像・予測が難しい 現象は MEPS においても同様である。MSM と同 じ設定のモデルを用いているため、MSM の系統

⁸ 原・倉橋 (2017) が示すように、局所的な強い上昇流を伴い、極端な気圧傾度の局所的な低気圧として見える。

誤差は MEPS にも含まれる。

本運用を開始した MEPS には、冬期のスプレッドの過大傾向等といった課題があり、改善の余地がある。これらの課題の解決に向けて、今後も摂動作成の改良を行っていく。また、MSM の改良による系統誤差軽減は、MEPS の改良にも直接つながるため、引き続きMSM の改良にも取り組んでいく。

参考文献

- 石田純一, 2016: はじめに. 数値予報課報告・別冊第 62 号, 気象庁予報部, 93-94.
- 小野耕介, 2010: メソ特異ベクトル法. 数値予報課報告・ 別冊第 56 号, 気象庁予報部, 93-104.
- 小野耕介, 2016a: メソアンサンブル予報システムの開発状況. 数値予報課報告・別冊第62号, 気象庁予報部, 100-113.
- 小野耕介, 2016b: メソ数値予報における側面境界条件の影響. 数値予報課報告・別冊第 62 号, 気象庁予報部, 18-21.
- 河野耕平, 西本秀祐, 三戸洋介, 2018: メソアンサンブル予報システム. 平成 30 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 9–13.
- 酒井亮太, 2009: 初期摂動作成手法. 数值予報課報告· 別冊第55号, 気象庁予報部, 117-125.
- 高野清治, 2002: アンサンブル予報の利用技術. 気象研究ノート, **201**, 73–103.
- 原旅人, 2014: 最近発生した顕著事例に関する検討. 平成 26 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 118–144.
- 原旅人, 倉橋永, 2017: メソ数値予報システムの特性の 変化. 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予 報部, 48-55.
- 山口春季, 2017: 全球アンサンブル予報システムの導入. 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報 部, 35-41.
- 山根省三, 2002: 摂動の線形発展の理論. 気象研究ノート, **201**, 21-71.
- Ono, K., 2017: Consistent Initial Lateral Boundary Perturbations in Mesoscale Ensemble System at JMA. CAS/JSC WGNE Res. Adtiv. Atmos. Oceanic Modell., 47, 5.16–5.17.

第2章 メソアンサンブルガイダンス

2.1 概説1

気象庁は日々の天気予報、防災気象情報および航空気象情報の作成支援のため、メソアンサンブル予報システム (MEPS) (第1章参照) に基づくガイダンス (MEPS ガイダンス) の開発を進めてきた。MEPS ガイダンスは、MEPS の部内試験運用開始後に、風、気温、降水などのガイダンスおよび航空悪天 GPV について、順次、部内試験運用を開始し、2019年10月現在までに表 2.1.1 に示す MEPS ガイダンスを試験運用している(高田 2017, 2018a; 三戸 2018)。

ガイダンスを作成する目的は2つある。1つは、数値予報モデルが直接予測できない要素(例えば天気や発雷確率など)を予測するためである。もう1つは数値予報モデルの地上気温や降水量などの系統誤差を減らし、予測精度を向上させるためである(高田 2018b)。MEPS ガイダンスにおいては、こうした通常の決定論的なガイダンスの目的に加えて、アンサンブル予報を利用することで、気象予測の不確実性をアンサンブルメンバーの予測のばらつき具合で表現できるため、信頼度情報などの確率的な統計量を予測に活用できる。例えば降水や風の場合、数時間から39時間先の大雨や暴風などの災害をもたらす顕著現象の出現頻度分布などの指標や確率情報が得られ、MEPS ガイダンスの高度な活用が期待できる。

部内試験運用中の MEPS ガイダンスは、MEPS の各 アンサンブルメンバーを入力とするガイダンスであり、 基本的には MSM ガイダンスの予測式をそのまま適用 して作成する (三戸 2018)。この作成方法では、MEPS ガイダンスのコントロールランと MSM ガイダンスが 同一となるため、MSM ガイダンスの気象予測の不確 定性に基づくガイダンスのアンサンブルメンバーの各 予測が得られ、ガイダンスのアンサンブル平均、超過 確率、スプレッドなど、MSM ガイダンスの信頼度情 報として、様々な統計量が活用できる。このうち、ガ イダンスのアンサンブル平均は、これまでの調査から MSM ガイダンスよりも多くの場合で予測精度が向上 することを確認しているが、その一方で最大降水量ガ イダンスなどのように、現象の最大値や最小値を予測 するガイダンスでは、むしろ予測精度が低下すること が分かっている (工藤 2018)。MEPS ガイダンスのア ンサンブルメンバーの予測の有効な利用方法は、予測 要素ごとに異なるため、それぞれの特性を十分に理解 して利用していただきたい。

本章では、第 2.2 節~第 2.4 節に気温、降水ガイダンス、航空悪天 GPV について、第 2.5 節に降雪、風、発雷確率ガイダンスについて、その仕様や作成方法、

表 2.1.1 部内試験運用中の MEPS ガイダンス一覧

天気予報ガイダンス	
ガイダンス名	予測要素
降水ガイダンス	最大降水量、平均降水量
降雪ガイダンス	降雪量(格子)、
阵ヨルイクマス	降水種別、降雪量(地点)
風ガイダンス	定時風、最大風速、
風のイクマス	最大瞬間風速
気温ガイダンス	時系列気温、最高、最低
発雷確率ガイダンス	発雷確率

航空気象予報ガイダン	/ ス
ガイダンス名	予測要素
降雪ガイダンス	降雪量
	定時風、最大風速、
風ガイダンス	ガスト発生確率、
	ガスト風速
気温ガイダンス	時系列気温、最高、最低
視程ガイダンス	視程、視程確率
雲ガイダンス	雲量、雲底高度、雲底確率
発雷確率ガイダンス	発雷確率
	乱気流指数、
	着氷指数、
航空悪天 GPV	積乱雲量・雲頂高度、
	圈界面気圧、
	気温、風、湿度等の一般要素

統計検証、事例検証および利用上の留意点などを解説する。なお、表 2.1.1 の視程と雲ガイダンスについては、現在調査中のため、本章には記載していない。今後、MEPS ガイダンスは、部内試験運用によって、プロダクトの有効性が確認できた予測要素について、アンサンブルの各メンバーのデータ提供を計画している。MEPS ガイダンスの予報作業での利用にあたり、本章の内容を役立てていただければ幸いである。

参考文献

- 工藤淳, 2018: 手法の分類. 数値予報課報告・別冊第 64 号, 気象庁予報部, 20-23.
- 三戸洋介, 2018: メソアンサンブルガイダンス. 平成 30 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 11–12.
- 高田伸一, 2017: アプリケーション. 平成 29 年度数値 予報研修テキスト, 気象庁予報部, 118–119.
- 高田伸一, 2018a: ガイダンスの今後. 数値予報課報告・別冊第 64 号, 気象庁予報部, 233-236.
- 高田伸一, 2018b: ガイダンス概論. 数値予報課報告・別冊第 64 号, 気象庁予報部, 3-8.

¹ 石川 宜広

2.2 気温ガイダンス 1

2.2.1 はじめに

MEPSに基づく気温ガイダンス(MEPS 気温ガイダンス)は、アメダス地点および国内の空港地点の気温を予測するガイダンスである。本節では、MEPS 気温ガイダンスの仕様と作成方法、統計検証結果、利用方法および事例検証について解説する。なお、統計検証は、アメダス地点と国内の空港地点の検証結果に大きな違いが見られなかったため、アメダス地点の結果のみを示す。

2.2.2 仕様と作成方法

MEPS 気温ガイダンスは、MEPS の各メンバーを入力とする気温ガイダンスであり、以下の2種類である。

- 1. 時系列気温ガイダンス
- 2. 最高・最低気温ガイダンス

各ガイダンスの仕様を、表 2.2.1 および表 2.2.2 に示す。時系列気温ガイダンスは毎正時の気温、最高気温ガイダンスは 00~18JST における最高気温、最低気温ガイダンスは 00~09JST における最低気温をそれぞれ予測するガイダンスである。また、時系列気温ガイダンスと最高・最低気温ガイダンスからは、それぞれのガイダンスの各メンバーを単純平均したアンサンブル平均を作成することができる。アンサンブル平均には、ランダム誤差を軽減する効果があるため、MSM の気温ガイダンスの精度を上回る傾向がみられている(高田 2018)。なお、時系列気温ガイダンスおよび最高・最低気温ガイダンスの詳細については、三戸(2018)を参照願いたい。

MEPS 気温ガイダンスの作成手法は、MSM 気温ガイダンスと同じカルマンフィルタ (工藤 2018)を用いるが、摂動ランの係数は学習せず、同じ初期時刻の MSM 気温ガイダンスの係数を用いる。このため、コントロールランの予測は MSM 気温ガイダンスと一致する。説明変数は、基本的には各メンバーのモデル予測値から算出するが、モデル地上気温の前日との差を表す説明変数「前日との気温差」については、以下の違いがある。前日の地上気温は各メンバーの値ではなく、コントロールランの値から算出する。これは、ある摂動ランと前日の同じメンバーとの間には直接的な関連がないことから、メンバー毎に気温差を計算するよりもコントロールランの値を適用した方が妥当と考えたためである。

2.2.3 統計検証

本項では、MEPS 時系列気温ガイダンスと、MEPS 最高・最低気温ガイダンスの超過確率予測、誤差の大きさが 3 \mathbb{C} 以上および 5 \mathbb{C} 以上であった事例数(以下、それぞれ 3 \mathbb{C} 外し事例数、5 \mathbb{C} 外し事例数)、地

域特性を検証した結果を示す。

検証期間は、2018 年 6 月 5 日から 2019 年 6 月 4 日までの 1 年間で、00, 06, 12, 18UTC の全ての初期時刻を用いた検証結果を示す。以降、2018 年 6 月 5 日から 2019 年 6 月 4 日を通年、2018 年 6 月 5 日から 2018 年 8 月 31 日を夏期、2018 年 12 月 1 日から 2019 年 2 月 28 日を冬期と表す。本項ではコントロールラン(CNTL)に対するアンサンブル平均(MEAN)の検証スコア(RMSE および 3, 5 $^{\circ}$ C 外し事例数)の改善率を次式で定義する。

改善率 [%]
$$\equiv \frac{\text{CNTL} - \text{MEAN}}{\text{CNTL}} \times 100$$
 (2.2.1)

そのほか、本項で統計的検証に用いる確率予測に関する指標は巻末付録 D.4 を参照いただきたい。

(1) MEPS 時系列気温ガイダンスの予報時間別検証

ここでは MEPS 時系列気温ガイダンスの精度を評価するため、ガイダンスの各摂動ランおよび、コントロールラン、アンサンブル平均の二乗平均平方根誤差 (RMSE) と平均誤差 (ME) を示す。検証対象は全アメダス地点、検証期間は通年で予報時間は FT=1~39 を用いる。

図2.2.1 (a) に MEPS 時系列気温ガイダンスの RMSE を示す。RMSE で見ると、アンサンブル平均が全ての予報時間で最も精度が高く、次いでコントロールラン、摂動ランの順となっている。予報時間の始めはコントロールランとアンサンブル平均の RMSE の差は小さく、予報前半に比べて後半の方がコントロールランに対するアンサンブル平均の改善率が高い。図 2.2.1 (b) に MEPS 時系列気温ガイダンスおよび MEPS モデル地上気温の ME を示す。ガイダンスはモデルの系統的な誤差を補正しているため、ガイダンスの全てのメンバーの ME は、モデルと比較して 0 にかなり近いことが確認できる。

(2) MEPS 最高・最低気温ガイダンスの精度検証

ここでは MEPS 最高・最低気温ガイダンスの精度検証として、夏期の翌日の最高気温がある値を上回る、または冬期の翌朝の最低気温がある値を下回る超過確率予測の検証結果、および 3,5 °C 外し事例数の改善率を示す。超過確率予測の検証では、最高気温は閾値を25,30,35 °C、最低気温は-3,0,3 °C とした。エクイタブルスレットスコア (ETS) では、閾値を超過すると予測したメンバー数が過半数であった場合に予測ありとして検証を行う。また、気候値ではなく MSM ガイダンスの超過確率予測(MSM ガイダンスで閾値を超える気温を予測した場合を 1、予測しない場合を 0 とする)に対するブライアスキルスコア (BSS) を 0 BSS 0 とする。

表 2.2.3 に超過確率予測に対する BSS, ETS を示す。 夏期の最高気温、冬期の最低気温共に BSS, ETS は正 で、MEPS ガイダンスは気候値予測を改善している。

¹ 山下 浩史、ただし第 2.2.3 項は井上 卓也

表 2.2.1 MEPS 時系列気温ガイダンスの仕様

作成対象地点	アメダス、空港
作成方法	カルマンフィルタ
作成数	コントロールランを含む 21 メンバー
予報対象時間	毎正時
予報期間と間隔	FT=1 から FT=39 まで 1 時間間隔
逐次学習の有無	あり(コントロールラン説明変数で学習)
説明変数	モデル予測値(地上の東・西・南・北風成分、地上風速、地上気温、中・下層雲量、気温 減率、降水量、前日との気温差(摂動の場合は前日のコントロールランとの差))
目的変数	アメダス:アメダスで観測された毎正時の気温 空港:航空気象定時観測気象報 (METAR), 航空気象自動観測気象報 (METAR AUTO) の毎正時の気温
層別化処理の対象	作成対象地点、初期時刻、予報時間、季節(暖候期(4~9月)、寒候期(10~3月)) 暖・寒候期の係数切替前に 1 か月間の事前学習を行う。

表 2.2.2 MEPS 最高・最低気温ガイダンスの仕様

作成対象地点	アメダス、空港						
作成方法	カルマンフィルタ						
作成数	コントロールランを含む 21 メンバー						
	初期値 当日 翌日 翌々日						
	00UTC (最高) 最高・最低						
予報期間(対象要素)	06UTC 最高・最低						
	12UTC 最高・最低 (最低)						
	18UTC 最高 (最高・) 最低						
	「翌日」などは、日本時間で初期時刻から見た日付を示す。() 内はアメダスのみ						
逐次学習の有無	あり (コントロールラン説明変数で学習)						
説明変数	モデル予測値(地上の東・西・南・北風成分、地上風速、地上気温、中・下層雲量、						
気温減率、降水量、前日との気温差(摂動ランの場合は前日のコントロールランとの差))							
目的変数	アメダス:アメダスの気温観測(1 分値)から算出した最高・最低気温 空港:METAR, METAR AUTO, 航空気象特別観測気象報 (SPECI) から算出した最高・最低気温 当日・翌日の、最高気温は 00~09UTC の最高気温、最低気温は 15~00UTC の最低気温。						
層別化処理の対象	作成対象地点、初期時刻、季節(暖候期(4~9月)、寒候期(10~3月))、予報対象要素 (最高気温、最低気温)、予報時間(日単位) 暖・寒候期の係数切替前に 1 か月間の事前学習を行う。						

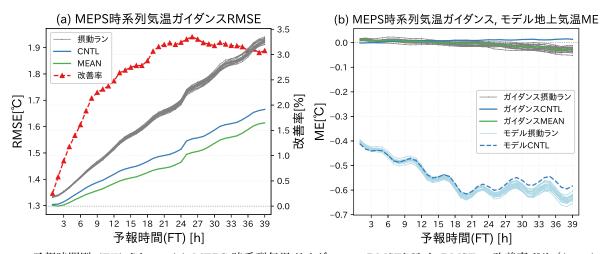


図 2.2.1 予報時間別 (FT) [h] の、(a) MEPS 時系列気温ガイダンスの RMSE[℃] と RMSE の改善率 [%] ((2.2.1) 式)、(b) MEPS 時系列気温ガイダンスと MEPS モデル地上気温の ME[℃]。青実線がコントロールラン、緑実線がアンサンブル平均、灰色実線が各摂動ランを表し、いずれも実線は MEPS 時系列気温ガイダンスを表す。(a) の赤破線はコントロールラン に対するアンサンブル平均の RMSE 改善率を表し、(b) の青破線は MEPS モデルのコントロールラン、水色破線は MEPS モデルの各摂動ランの地上気温を表す。検証期間は通年。

表 2.2.3 夏期の最高気温および冬期の最低気温における閾値の超過確率予測に対する BSS, ETS, BSS_{MSM}。

(a) 夏期の翌日の最高気温

` '			
閾値	25 °C	30 °C	35 ℃
BSS	0.72	0.72	0.56
ETS	0.68	0.69	0.52
BSS_{MSM}	0.26	0.26	0.22

(b) 冬期の翌朝の最低気温

閾値	−3 °C	0 °C	3 ℃
BSS	0.74	0.75	0.75
ETS	0.72	0.72	0.72
$\mathrm{BSS}_{\mathrm{MSM}}$	0.24	0.24	0.24

特に ${
m BSS_{MSM}}$ が正であることから、 ${
m MSM}$ ガイダンス の超過確率予測よりも ${
m MEPS}$ ガイダンスの超過確率予 測の方が精度が良い。

図 2.2.2 に確率値別出現率図(信頼度曲線)を示す。 最高気温の予測と観測出現率の対応は良く、信頼度曲 線は skill 領域²におおむね位置している。最低気温は 最高気温に比べると、予測と観測とで出現率の対応が やや悪く、閾値 -3,0°Cでは信頼度曲線が no-skill line ³と重なっている部分がある。

(3) MEPS 最高・最低気温ガイダンスの地点別検証

MEPS 最高・最低気温ガイダンスの地域特性を検証するため、夏期の翌日の最高気温、冬期の翌朝の最低気温について地点別の RMSE, ME を示す。

図 2.2.3 に RMSE の分布を示す。アンサンブル平均の RMSE の分布は、夏期は北日本の太平洋側沿岸部で誤差が大きく、タ期は北海道で誤差が大きく、コントロールラン(図略、三戸 (2018)を参考)と同様となっている。RMSE の改善率は全国的に正で、夏期の最高気温で約 4%、冬期の最低気温で約 3%となっているが、夏期の最高気温では、岩手県や宮城県の沿岸部で改悪となっている。例えば宮城県の RMSE 改善率は県平均で約 0%であるのに対し、太平洋に面していて改善率の高い千葉県は約 7%である。また、アンサンブル平均がコントロールランに対して改善していない地点には、沿岸部や島が多い。MEPS モデルで海面水温には摂動を与えていないため、島など海に面した地点では

内陸部に比べて地上気温のスプレッドが過小評価されて、アンサンブル平均の改善率が中立となることが考えられる。このように、アンサンブル平均は全国平均で精度の改善が見られるものの、改善率には地域差があることに留意が必要である。

図 2.2.4 に ME の分布を示す。アンサンブル平均の ME は、RMSE の分布もそうであったように、夏期および冬期いずれもコントロールラン(図略)と同様である。ただし、アンサンブル平均からコントロールランを減算した ME の差分は地域によって異なっていることがわかる。例えば夏期の関東平野では、アンサンブル平均の最高気温予測値はコントロールランに比べて低い。また、冬期の ME は全国的に負バイアスだが、北海道の内陸部で正バイアスとなっている。このことについて、冬期の MSM 気温ガイダンスは、北海道内陸部で放射冷却による低温を十分に補正できない特性があり (三戸 2018)、アンサンブル平均も同様の特性を持っている。

2.2.4 利用方法

MEPS 気温ガイダンスのアンサンブル平均は、コントロールランより統計的には精度が良いため、そのまま利用することで現在運用中の MSM 気温ガイダンスに比べて、精度の良い予報をすることができ、大外しを軽減することができる。しかしながら、アンサンブル平均だけでは、どの程度の誤差が生じるかという情報を得ることはできない。そこで、全メンバーを概観する手法が有効である。例えば、以下の3つの方法がある。

- 1. スパゲッティ・ダイアグラム (第 2.2.5 項 (1) の 図を参照)
- 2. 箱ひげ図 (第 2.2.5 項 (1) の図を参照)
- 3. 超過確率 (第 2.2.5 項 (3) の図を参照)

MEPS 気温ガイダンスのスパゲッティ・ダイアグラ ムは、特定の地点において、すべてのメンバーのガイ ダンスを時系列上で重ねた図で、メンバーのばらつき 具合を概観できる。箱ひげ図は、中央値、最大値、最 小値、第1四分位点、第3四分位点を表す図で、第1 四分位点と第3四分位点の間を箱とする。箱ひげ図で はメンバーのばらつき具合や分布の偏り具合を定量的 に可視化できる。超過確率では、ある閾値の気温を超 える、あるいは下回るメンバーの割合を概観できる。 これらの図を利用することにより、アンサンブル平均 がコントロールランや各摂動ランに対して、どこに位 置しているかを手早く確認できる。アンサンブル平均 がコントロールランや各摂動ランから外れている場合 は、気圧配置の変化や実況の推移、前初期値の MEPS モデルや GSM モデルの予測などをもとに最も実現確 率の高い予測を選択することになる。また、第2.2.3項 (1) の結果から、MEPS 気温ガイダンスの各摂動ラン は、MSM 気温ガイダンスよりも精度が悪いため、単

 $^{^2}$ BSS に正の寄与を持つ領域のこと。図 2.2.2 では灰色で示されている。

³ 信頼度と分離度への寄与が等しい大きさを持ち、BSSへの寄与は0となる直線のこと。

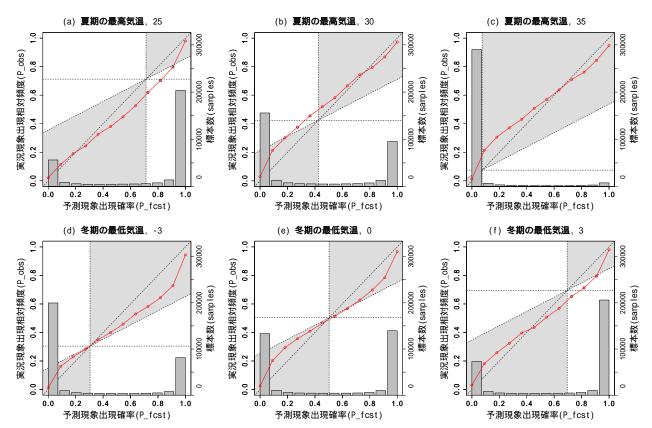


図 2.2.2 最高・最低気温ガイダンスの確率値別出現率図(信頼度曲線)。上段が夏期の翌日の最高気温、下段が冬期の翌朝の最低気温。 関値は (a) が 25 °C, (b) が 30 °C, (c) が 35 °C, (d) が -3 °C, (e) が 0 °C, (f) が 3 °C。縦軸左は実況現象出現相対頻度、縦軸右が標本数、横軸が予測現象出現確率(閾値の超過を予測した事例の出現確率)。赤線が信頼度曲線で、棒グラフが出現標本数を表す。

表 2.2.4 夏期および冬期における翌日の最高気温、翌朝の最低気温の 3,5 $^{\circ}$ 外し事例数。CNTL はコントロールラン、MEAN はアンサンブル平均。改善率は (2.2.1) 式を用いた。

· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·								
3 ℃ 外し事例数			5 ℃ 外し事例数			全観測事例数		
		CNTL	MEAN	改善率 [%]	CNTL	MEAN	改善率 [%]	土既侧肀仍奴
夏期	翌日の最高気温	27,690	24,833	10.3	3,765	2,756	26.8	325,979
发 规	翌朝の最低気温	8,207	7,307	11.0	517	410	20.7	326,050
冬期	翌日の最高気温	11,998	11,204	6.6	1,771	1,270	28.3	333,208
今州	翌朝の最低気温	33,396	30,895	7.49	6,770	5,787	14.5	333,222

独での利用は推奨しない。

2.2.5 事例検証

(1) アンサンブル平均の予測がコントロールランの予測を改善した事例

アンサンブル平均の予測がコントロールランの予測を改善した事例として、2018 年 9 月 12 日 00UTC 初期値の 9 月 13 日を予測対象とした長野県南信濃の事例を示す。図 2.2.5 (a) は、2018 年 9 月 13 日 00UTC の日本域地上天気図である。長野県南信濃では高気圧後面にあたり、 $11\sim12$ JST にかけて日照があったものの、前線の影響を受けて、おおむね曇りであった。図 2.2.5 (b) と (c) に、南信濃の MEPS 気温ガイダンスのスパゲッティ・ダイアグラムと箱ひげ図をそれぞれ

示す。時系列気温ガイダンスの FT=24~33 に着目すると、ばらつきが大きいことが分かる。これは、日本の東からの高気圧の西への張り出しの強弱により、晴れおよび曇や雨のメンバーが見られるなど、天気に差があったためである。その中において、アンサンブル平均がコントロールランに比べて、観測値に近い。このように、本事例ではアンサンブル平均の予測がコントロールランの予測を改善し、第2.2.3 項(1) で示した結果が表れている。

(2) シナリオが 2 つに分かれる事例

MEPS の予測シナリオが 2 つに分かれた事例として、2018 年 12 月 11 日 12UTC 初期値の東京の事例を示す。 図 2.2.6 (a) は、2018 年 12 月 12 日 00UTC の日本域

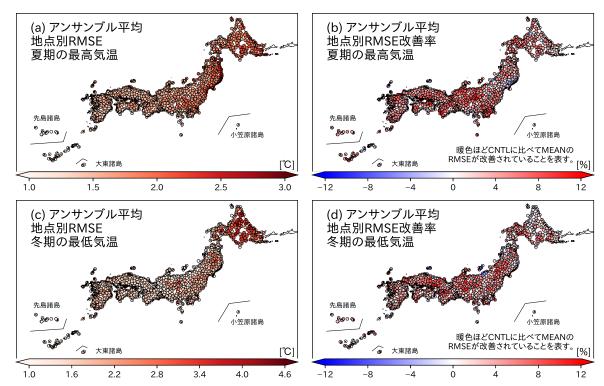


図 2.2.3 夏期の翌日の最高気温および冬期の翌朝の最低気温の地点別 RMSE 分布図。上段は夏期の翌日の最高気温、下段は冬期の翌朝の最低気温で、左列はアンサンブル平均の RMSE[°C]、右列はアンサンブル平均のコントロールランに対する RMSE 改善率 [%] を表す。夏期、冬期共に、コントロールランの RMSE[°C] の分布はそれぞれのアンサンブル平均 (a), (c) と同様であったため、図は省略した。おおむね同様の条件の MSM ガイダンスの分布図として、三戸 (2018) を参考にしていただきたい。

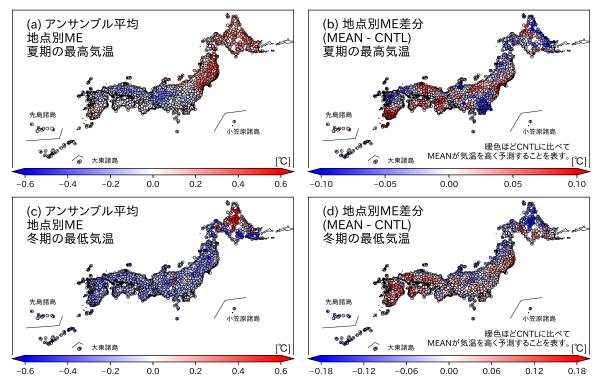


図 2.2.4 夏期の翌日の最高気温および冬期の翌朝の最低気温の地点別 ME 分布図。上段は夏期の翌日の最高気温、下段は冬期の翌朝の最低気温で、左列はアンサンブル平均の ME[°C]、右列は ME の差分(アンサンブル平均 – コントロールラン)[°C] を表す。図 2.2.3 と同様に、コントロールランの ME の分布はアンサンブル平均と同様であったため、図は省略した。おおむね同様の条件の MSM ガイダンスの分布図として、三戸 (2018) を参考にしていただきたい。

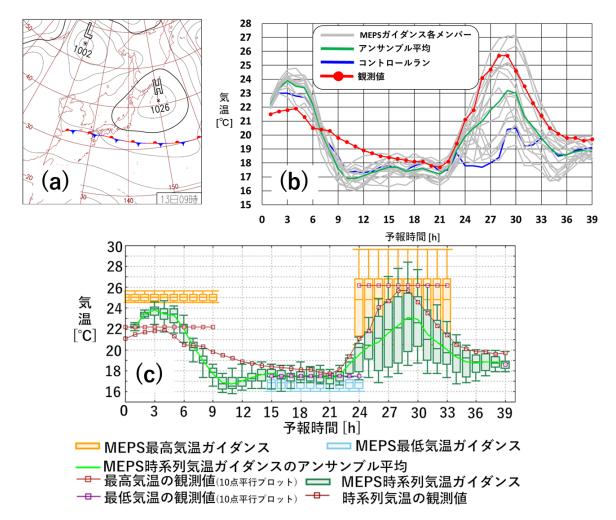


図 2.2.5 (a) 2018 年 9 月 13 日 00UTC の日本域地上天気図、(b) 2018 年 9 月 12 日 00UTC 初期値の長野県南信濃を対象とした時系列気温ガイダンスのスパゲッティ・ダイアグラム、(c) 2018 年 9 月 12 日 00UTC 初期値の長野県南信濃を対象とした時系列気温ガイダンスの箱ひげ図。

地上天気図である。前線を伴った発達中の低気圧が本 州の南岸を、また、別の低気圧が日本海を東進してい る。図 2.2.6 (b) は、東京における MEPS 時系列気温 ガイダンスの予測と実況を示す。FT=12~21 に着目す ると、コントロールランよりも気温予測が高いシナリ オと低いシナリオに分かれていることが分かる。アン サンブル平均は、全メンバーの分布の中央にあり、コ ントロールランに近い値を予測している。そこで、気 温予測が高いアンサンブルメンバー6と低いアンサン ブルメンバー4のモデル予測を確認する。図 2.2.6 (c) と (d) は、MEPS の FT=15 におけるメンバー 6 およ び4の地上気圧、前3時間降水量および地上風である。 メンバー6では、大陸からの高気圧の張り出しにより、 北西風が卓越する場となり、天気が回復する予測となっ ている。一方で、メンバー4では、上空の気圧の谷が西 日本に残り、天気回復が遅れる予測となっている。実 況は、図 2.2.6 (a) の天気図の通り、メンバー 4 の予測 に近く、アンサンブル平均やコントロールラン予測は

実況から外れる結果となった。このような場合、実況の推移、前初期値の MEPS モデルや GSM モデルの予測などを併用して気温予測を行うことが推奨される。それでも気温予測が難しい場合は、アンサンブル平均を利用することで大外しを軽減できる。

(3) フェーン現象による高温事例

MEPS のばらつきが不十分だった事例として、2019 年 5 月 25 日 12UTC 初期値の北海道佐呂間の事例を示す。図 2.2.7 (a) は、2019 年 5 月 26 日 00UTC の日本域地上天気図である。2019 年 5 月 26 日は、東北地方から北海道にかけて大陸で形成された暖気が入り込んだことと下層の西風が北見山地を越えたことによるフェーン現象の影響で、北海道東部を中心に高温となった(図 2.2.7 (b))。特に、佐呂間では午後 2 時過ぎに5 月として全国の史上最高気温となる 39.5 ℃ を観測した。佐呂間における GSM、MSM および MEPS の各最高気温ガイダンスはいずれも 35 ℃以上の猛暑日を予測していた。ただし、39 ℃以上を予測できた最高気温

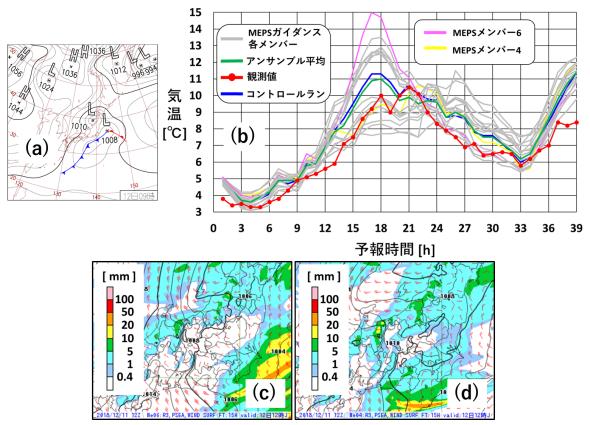


図 2.2.6 (a) 2018 年 12 月 12 日 00UTC の日本域地上天気図、(b) 2018 年 12 月 11 日 12UTC 初期値の東京を対象とした MEPS 時系列気温ガイダンス、(c) と (d) は 2018 年 12 月 11 日 12UTC 初期値の FT=15 における MEPS メンバー 6 とメンバー 4 のモデル予測値の前 3 時間降水量 [mm/3h]、海面更正気圧 [hPa]、地上風[ノット]。

ガイダンスはなく、MEPS 最高気温ガイダンスの1つ のメンバーにおける 37.9 ℃ の予測が最高値であった。 気温の急上昇から最高気温が観測された時間帯である FT=8~18 に着目すると、GSM, MSM および MEPS の各時系列気温ガイダンスの予測は、観測値に比べ低 かった (図 2.2.7 (c)) が、GSM や MSM のモデル値と 比較すると観測値に近づく修正(例えば13JSTでおよ そ 2~7 °C) を行っていた。MEPS 時系列気温ガイダン スのメンバーの分布に着目すると、気温が上昇する時 間帯はばらつきが小さいが、30 ℃ を超える時間帯から ばらつきが大きくなる傾向が見られた。アンサンブル 平均は MSM ガイダンスとほぼ同じであった。MEPS 気温ガイダンスの予測特性は MSM 気温ガイダンスと 同様であり、MSM ガイダンスにおける極端な高温を 予測しづらい傾向があるという利用上の留意点 (三戸 2018) は MEPS 気温ガイダンスにも当てはまる。

続いて、本事例での超過確率の利用事例を紹介する。 MEPS の気温ガイダンスから超過確率を利用することで、猛暑日の基準となる 35 $^{\circ}$ C を超える確率がどの時間帯に出現するか確認できる(図 2.2.7 (d))。図から読み取れることとして、12JST から 15JST までに 35 $^{\circ}$ C を超える可能性があり、超過確率は最大 40 % と見る

ことができる。

(4) オホーツク海高気圧の張り出しによる低温事例

2018年6月17日、北日本から関東はオホーツク海 に中心を持つ高気圧圏内で気温が上がらず (図 2.2.8 (a), (b))、最高気温は4月下旬から5月上旬並となり、 北海道では平年より8℃以上低い所があった。根室を 例に GSM, MSM および MEPS の各ガイダンスの予測 結果を確認する (図 2.2.8 (c))。図から、どのガイダン スもモデルよりも高めの気温を予測していたことが確 認できる。MEPS ガイダンスに着目すると、実況を予 測できていたメンバーはなかった。MEPS の各時系列 気温ガイダンスに着目すると、(3)の事例に比べて、ば らつきが小さく、アンサンブル平均が MSM ガイダン スとほぼ同じであった。本事例は、実況では下層雲に覆 われて終日気温が低かったのに対し、モデルでは下層 雲の予測が不十分で、MSM のお天気マップでは、おお むね晴れを予測していた(図略)。この下層雲は MEPS のメンバーでも予測できておらず(図略)、MEPS 気 温ガイダンスの予測が大きく外れる要因となった。な お、GSM のお天気マップでは、おおむね曇りを予測し ていたため、実況値に近い予測となっていた。モデル の予測が苦手な事例では MEPS 気温ガイダンスの予測

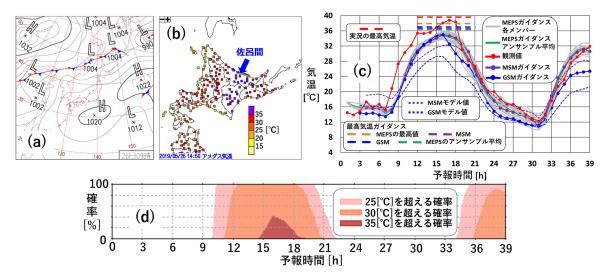


図 2.2.7 (a) 2019 年 5 月 26 日 00UTC の日本域地上天気図、(b) 2019 年 5 月 26 日 0550UTC の北海道のアメダス地上気温分布、(c) 2019 年 5 月 25 日 12UTC 初期値の佐呂間における GSM と MEPS 気温ガイダンスの予測および、5 月 25 日 15UTC 初期値の MSM 気温ガイダンスの予測と実況、(d) 2019 年 5 月 25 日 12UTC 初期値の佐呂間の MEPS 時系列気温ガイダンスの超過確率。

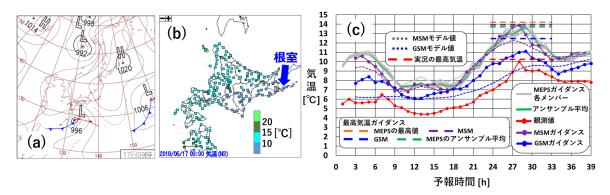


図 2.2.8 (a) 2018 年 6 月 17 日 00UTC の日本域地上天気図、(b) 2018 年 6 月 17 日 00UTC の北海道のアメダス地上気温分布、(c) 2018 年 6 月 16 日 00UTC 初期値の根室における GSM と MEPS 気温ガイダンスの予測および、2018 年 6 月 16 日 03UTC 初期値の MSM 気温ガイダンスの予測と実況。

も不十分になることを示している。

2.2.6 まとめ

最後に、MEPS 気温ガイダンスの前項までのまとめを以下に記す。MEPS 気温ガイダンスを利用する際の参考にしていただきたい。

仕様と作成手法

- 1. 時系列気温ガイダンスおよび最高・最低気温ガイダンスを作成する。
- 2. 作成手法はカルマンフィルタで MSM ガイダンス と同じだが、摂動ランの係数は学習せず、同じ初 期時刻の MSM 気温ガイダンスの係数を用いる。

統計検証と利用方法

1. MEPS 気温ガイダンスのアンサンブル平均は MSM 気温ガイダンスの予測精度を上回り、最高・最低

気温の大外し事例数も減少するため、アンサンブ ル平均の利用を推奨する。

- 2. 最高・最低気温ガイダンスのアンサンブル平均は、 沿岸部や島を中心に MSM 気温ガイダンスを改善 できないアメダス地点があるなどの地域差が存在 するため、注意する必要がある。
- 3. 最高・最低気温ガイダンスのアンサンブル平均の ME は、夏期は東日本で正バイアス傾向、西日本 は負バイアス傾向、冬期は全国的に負バイアス傾 向(北海道内陸部を除く)であるので、注意する 必要がある。
- 4. MEPS 気温ガイダンスの各摂動ランは、MSM 気温ガイダンスよりも精度が悪いため、単独での利用は推奨しない。

事例検証

- 1. シナリオが2つに分かれる事例の対処法は、実況 の推移、前初期値の MEPS モデルや GSM モデル の予測などを併用して気温予測を行うことが推奨 される。それでも気温予測が難しい場合は、アンサンブル平均を利用することで大外しを軽減できる。
- 2. フェーン現象による高温事例は、MEPS 気温ガイダンスのアンサンブル平均が MSM 気温ガイダンスとほぼ同じであった。MEPS 気温ガイダンスの予測特性が MSM 気温ガイダンスと同様であることから、極端な高温を予測しづらい傾向があるという利用上の留意点 (三戸 2018) は、MEPS 気温ガイダンスにも当てはまる。
- 3. オホーツク海高気圧の張り出しによる低温事例では、モデルの下層雲予測が不十分で、初期の段階から観測値から外れ、MEPS 気温ガイダンスの予測も大きく外れる要因となった。モデルの予測が苦手な事例では、MEPS 気温ガイダンスの予測も不十分になることを示している。

参考文献

- 工藤淳, 2018: カルマンフィルタ. 数値予報課報告・別冊第 64号, 気象庁予報部, 62-70.
- 三戸洋介, 2018: 気温ガイダンス. 数値予報課報告・別冊第64号, 気象庁予報部, 132-143.
- 高田伸一, 2018: 統合型ガイダンス. 数値予報課報告・ 別冊第 64 号, 気象庁予報部, 234-235.

2.3 降水ガイダンス1

2.3.1 はじめに

降水ガイダンスは、日々の天気予報から警報・注意報 といった防災気象情報の発表のための予測資料として、 また降雪量ガイダンス等の入力値としても用いられる 等、予報作業において幅広く使われている。MEPS の 現業予報作業における活用法としては、顕著現象のポ テンシャル把握や早期注意情報 (警報級の可能性) の判 断等への活用が検討されてきており(河野・西本 2018)、 MEPS 降水ガイダンスにおいても降水量予測がある閾 値を超える確率(超過確率)が有効な資料の1つとし て挙げられている (三戸 2018)。本節では、MEPS 降水 ガイダンスと、それを入力にして得られる超過確率を はじめとした各種統計量について解説する。まず、第 2.3.2 項で MEPS 降水ガイダンスの仕様と作成方法を 説明し、続いて第2.3.3項と第2.3.4項で統計検証と事 例検証の結果を示す。最後に、第2.3.5 項と第2.3.6 項 で本節のまとめと今後の展望について述べる。

2.3.2 仕様と作成方法

MEPS 降水ガイダンスの仕様は、コントロールラン を含めて21メンバー分のガイダンスを作成する点と、 初期時刻が 00, 06, 12, 18UTC の 6 時間毎で予報時間 が初期時刻に依らずいずれも FT=39 までである点を除 けば、MSM 降水ガイダンスと同一である。また、作成 方法についても基本的に MSM 降水ガイダンスと同一 である。MSM 降水ガイダンスの仕様や作成方法および 作成に用いる統計手法の詳細については、白山 (2018) および工藤ほか (2018) を参照いただきたい。MEPS 降 水ガイダンスの作成には、各メンバーについて MEPS のモデル予測値およびそれらを変換した値を説明変数 に用いている。ただし、カルマンフィルタや頻度バイ アス補正等で用いる係数は、いずれのメンバーの予測 に対しても MSM 降水ガイダンスで学習・更新して作成 したものを利用する。また、ニューラルネットワークや 線形重回帰にて用いる予測式についても、MSM 降水ガ イダンスの予測式と同一である。したがって、MEPS 降水ガイダンスのコントロールランの予測は MSM 降 水ガイダンスの予測と一致する。

2.3.3 統計検証

第2.3.2 項で述べたように、MEPS 降水ガイダンスは各種統計処理の中で用いる係数や予測式を MSM 降水ガイダンスと共有しており、MEPS 降水ガイダンスのコントロールランの予測は MSM 降水ガイダンスの予測と一致する。MSM 降水ガイダンスは 2019 年7月4日に改良を行っている(詳細は第5.1 節を参照)ため、この変更を反映した MEPS 降水ガイダンスについて、1年間分(2018年6月5日から2019年6月4日

まで)の統計検証の結果を示す。検証には、MEPSの モデル降水量および MEPS 降水ガイダンスの各予測要 素について、いずれの検証でも全初期時刻 (00,06,12, 18UTC) 分のデータを用いる。検証に用いる予報時間 は、MEPSの3時間降水量予測 (FRR3) や MEPS 降水 ガイダンスの3時間平均降水量 (MRR3)、1時間最大降 水量 (RMAX31) および 3 時間最大降水量 (RMAX33) については、FT=3から FT=39まで、24 時間最大降水 量 (RMAX24) については、FT=24 から FT=39 まで の3時間おきである。検証対象格子は、それぞれ全国の 陸上および周辺の海上格子である(詳細は白山 (2018) を参照)。MEPS 降水ガイダンスから得られるアンサン ブル平均(21メンバーの予測結果を格子ごとに平均) やアンサンブル最大(21メンバーの予測結果の最大値 を格子ごとに抽出)、超過確率の検証についてもこれに 準じる。

また、本項では先述の検証期間の中で台風事例とそれ以外(以下、非台風事例)で分けてそれぞれ検証を行っている。これは、台風事例と非台風事例とでは MEPS 降水ガイダンスの予測特性が大きく異なるためである。表 2.3.1 に、本節の検証において台風事例として扱った期間を示す。抽出した期間は、いずれも台風が日本に接近または上陸し、広い範囲に強い降水をもたらした時刻周辺の日に絞っており、台風の影響による先行降水の事例等は必ずしも含まれない。

(1) MEPS 降水ガイダンス

図 2.3.1 に、MRR3 と FRR3 の閾値別バイアススコ ア (BI) およびエクイタブルスレットスコア (ETS) の 比較結果を示す。まず、モデルとガイダンスのコント ロールランを比較すると、非台風事例では、モデルが もつ予測頻度の過多傾向をガイダンスが抑制し、特に 80 mm/3h 以下の降水については概ね適切な予測頻度 となっている。また、ETS も概ね80 mm/3h 程度ま では改善または中立で、予測精度が向上している。一 方、台風事例では、80 mm/3h 以下の降水については ガイダンスの予測頻度がモデルよりも大幅に過多傾向 となっており、ETSもモデルと比較して劣っている。 100 mm/3h 以上の降水ではモデルとの ETS の差が更 に大きくなっており、本検証期間の台風事例ではガイダ ンスがモデルを適切に修正できていない場合が多かっ たといえる。この傾向は、2017年の通年を対象とした 同様の検証でも、ガイダンスとモデルの精度差は比較 的小さかったものの同様であった(図略)。T1821が 25年ぶりに非常に強い勢力で上陸した台風であったこ と、T1812 が近畿地方に上陸後、西日本を東から西に 横断した初めての台風であったこと等、2018年は特異 な強度や進路の台風が多かったことを踏まえると、特 にこのような台風に対してはガイダンスの改悪傾向が 顕著になる可能性があるため、留意が必要である。続 いて、ガイダンスのコントロールランと摂動ランを比

¹ 森 祐貴

表 2.3.1 台風	🗓事例として扱った期間の-	一覧。	各期間の 00,	$03, \cdots$, 21JST を対象と	する予測を検証に用いる。
------------	---------------	-----	----------	--------------	--------------	--------------

期間(年/月/日)	関連する台風	備考
2018/07/02-2018/07/04	T1807	沖縄・九州地方に接近
2018/07/29	T1812	強い勢力で近畿地方に上陸、その後西日本を西進
2018/08/15	T1815	九州地方に上陸
2018/08/23-2018/08/24	T1820	強い勢力で四国地方に上陸
2018/09/04	T1821	非常に強い勢力で四国地方に上陸
2018/09/29-2018/10/01	T1824	強い勢力で近畿地方に上陸

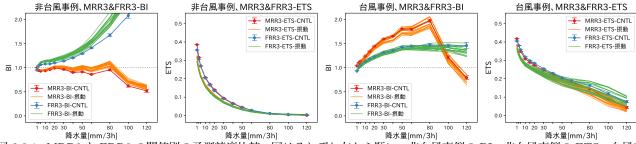


図 2.3.1 MRR3 と FRR3 の閾値別の予測精度比較。図はそれぞれ左から順に、非台風事例の BI、非台風事例の ETS、台風事例の BI、台風事例の ETS を示す。青線はコントロールランの FRR3、緑線は摂動ランの FRR3、赤線はコントロールランの MRR3、橙線は摂動ランの MRR3 について、BI または ETS をそれぞれ表し、エラーバーはブートストラップ法で求めた 95%信頼区間を表している。

較すると、非台風事例・台風事例のいずれも、摂動ランのBIはコントロールランの変化傾向に概ね対応した予測特性となっているが、非台風事例では摂動ランのほうがBIが低い傾向がみられた。これについてはモデルにおいても同様の傾向がみられ、ガイダンスはこれに準じる形となっていると考えられる。また、摂動ランのETSもコントロールランの変化傾向に概ね対応した予測特性となっているが、コントロールランと比較して一段劣ることが分かる。

図 2.3.2 に、RMAX31 と RMAX24 の閾値別 BI および ETS の比較結果を示す。これらの要素についても、摂動ランの BI および ETS はコントロールランの変化傾向に概ね対応した予測特性となっており、摂動ランの ETS はコントロールランと比較して一段劣る傾向がみられるが、RMAX31 は非台風事例でコントロールランよりも BI がやや高く、RMAX24 は非台風事例・台風事例のいずれもコントロールランよりも BI がやや低い傾向がみられた。また、RMAX33 についてはRMAX31 と同様の傾向がみられた(図略)。

(2) アンサンブル平均およびアンサンブル最大

図 2.3.3 に、非台風事例における MEPS 降水ガイダンスの MRR3, RMAX33 および RMAX24 のアンサンブル平均とコントロールランの閾値別 BI および ETS の比較結果を示す。いずれの予測要素についても強雨を中心にアンサンブル平均の予測頻度は大幅な過少傾向がみられ、ETS もコントロールランと比較して劣っている。これは、第1章でも述べられているとおり、アンサンブル平均によって各メンバーの表現する降水の分布やピークが平滑化されるためであり、降水量のアンサンブル平均は強雨の分布やピークを捉えるには不

向きであることを示している。なお、台風事例の検証 (図略) ではコントロールランの予測頻度の過多傾向を アンサンブル平均による平滑化によって打ち消すこと で、BIやETSが見かけ上改善している場合もみられた が、降水量のアンサンブル平均は強雨の分布やピーク を捉えるには不向きであるという点については同様で ある。図2.3.4に、非台風事例および台風事例における MEPS 降水ガイダンスの RMAX31, RMAX33 および RMAX24 のアンサンブル最大とコントロールランの 捕捉率および空振り率の比較結果を示す。非台風事例 および台風事例のいずれも、アンサンブル最大は全て の閾値で空振り率が高くなっている一方で捕捉率が高 く、例えば非台風事例における RMAX31 の 50 mm/h や RMAX24 の 200 mm/24h ではコントロールランの 2倍以上の捕捉率であることが分かる。降水の予測に おいては、防災上の観点から見逃しが少ないことは重 要であり、アンサンブル最大は顕著現象のポテンシャ ルを把握する上で有効な資料の1つとなると考えられ る。ただし、空振り率が高いことを踏まえ、後述の超 過確率と併せて現象および目的に応じて使い分けるこ とが重要である。

(3) 超過確率

超過確率は主に顕著現象のポテンシャル把握や早期注意情報(警報級の可能性)の判断等への活用を想定しているため、ここでは MEPS の最大降水量ガイダンス (RMAX31, RMAX33, RMAX24) から作成した超過確率の検証結果を示す。

図 2.3.5 に、非台風事例における RMAX31, RMAX33, RMAX24 の超過確率の信頼度曲線とブライアスキルスコア (BSS) を降水量の閾値ごとに示す。いずれについても強い降水ほど信頼度曲線が理想直線

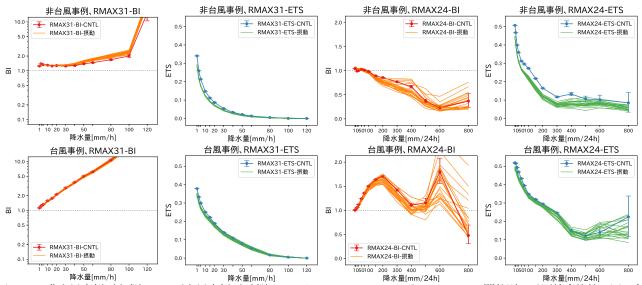


図 2.3.2 非台風事例(上段)および台風事例(下段)における RMAX31 および RMAX24 の閾値別の予測精度比較。図は左から順に RMAX31 の BI、RMAX31 の ETS、RMAX24 の BI、RMAX24 の ETS を示す。赤線はコントロールランの BI、橙線は摂動ランの BI、青線はコントロールランの ETS、緑線は摂動ランの ETS をそれぞれ表す。エラーバーは図 2.3.1 と同じ。なお、RMAX31 の BI については対数軸で描画している。

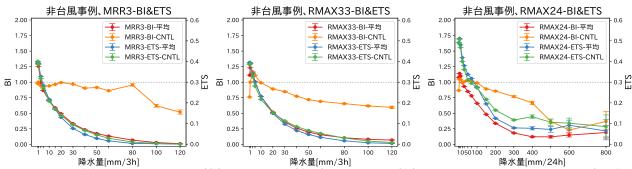


図 2.3.3 非台風事例における、MRR3 (左)、RMAX33 (中央)、RMAX24 (右) のコントロールランとアンサンブル平均の 閾値別の BI および ETS の比較。各要素について、赤線はアンサンブル平均の BI、橙線はコントロールランの BI、青線はアンサンブル平均の ETS、緑線はコントロールランの ETS を表し、エラーバーは図 2.3.1 と同じ。

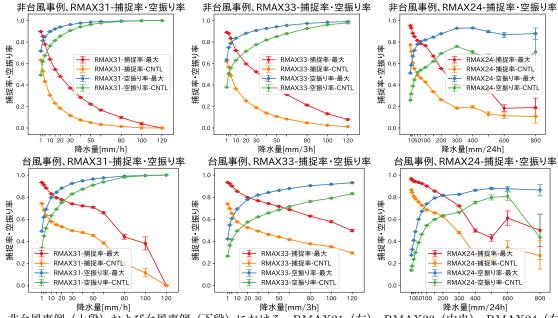


図 2.3.4 非台風事例(上段)および台風事例(下段)における、RMAX31 (左)、RMAX33 (中央)、RMAX24 (右) のコントロールランとアンサンブル最大の閾値別の捕捉率および空振り率の比較。各要素について、赤線はアンサンブル最大の捕捉率、橙線はコントロールランの捕捉率、青線はアンサンブル最大の空振り率、緑線はコントロールランの見逃し率を表し、エラーバーは図 2.3.1 と同じ。

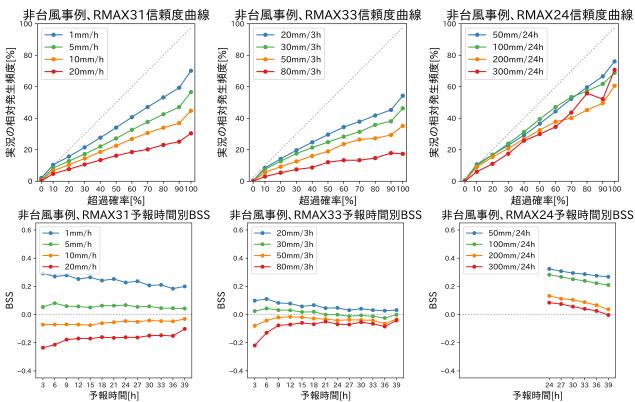
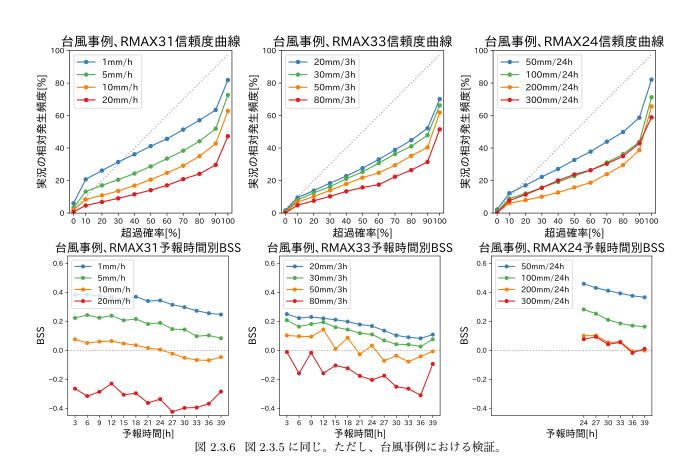
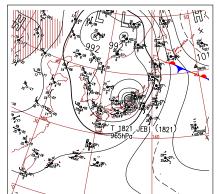
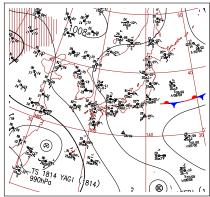


図 2.3.5 非台風事例における RMAX31 (左)、RMAX33 (中央)、RMAX24 (右) の超過確率の信頼度曲線(上段)および BSS (下段) の検証結果。青線、緑線、橙線、赤線の順に低い閾値の超過確率を表しており、各要素の閾値はそれぞれ低い順 に、RMAX31 は 1, 10, 20, 30 mm/h、RMAX33 は 20, 30, 50, 80 mm/3h、RMAX24 は 50, 100, 200, 300 mm/24h で ある。







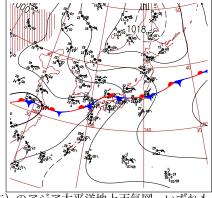


図 2.3.7 2018 年 9 月 4 日 (左)、2018 年 8 月 12 日 (中央)、2018 年 7 月 6 日 (右) のアジア太平洋地上天気図。いずれも日本時間の 15 時の天気図で、日本周辺を拡大して表示している。

から大きく離れて予測の過大傾向が強まり、BSS も全体的に下がる傾向がみられる。超過確率の気候値予測に対する予測スキルをもつ閾値はそれぞれ、RMAX31 は 5 mm/h、RMAX33 は 20-30 mm/3h、RMAX24 は 300 mm/24h(ただし冬季に絞った検証(図略)では、RMAX31 は 1 mm/h、RMAX33 は 10 mm/3h、RMAX24 は 50 mm/24h)程度までが目安である。

続いて、図 2.3.6 に、台風事例における RMAX31, RMAX33, RMAX24 の超過確率の信頼度曲線と BSS を降水量の閾値ごとに示す。いずれについても非台風事例の予測特性と概ね同様の傾向がみられるが、高確率の予測を中心に信頼度曲線が理想直線に近づいて予測の過大傾向が弱まっており、BSS は非台風事例と比較して全体的に若干高くなる傾向がみられる。超過確率の気候値予測に対する予測スキルを持つ閾値はそれぞれ、RMAX31 は 5-10 mm/h、RMAX33 は 30-50 mm/3h、RMAX24 は 200-300 mm/24h 程度までが目安である。

RMAX24の超過確率についてはある程度の大雨事例に対しても統計的には一定の予測スキルを有しており、有効に活用できる場面は多いと考えられるが、一方でRMAX31やRMAX33(特にRMAX31)の超過確率については予測スキルが十分でないため、例えば早期注意情報(警報級の可能性)の判断等への活用という観点では、有効に活用できる場面は限定的であると考えられる。このように、各要素の超過確率の予測スキルは、防災気象情報への利活用の観点でそれぞれ大きく異なる点には留意が必要である。

2.3.4 事例検証

ここでは、MEPS 降水ガイダンスおよび超過確率の 予測特性や利用上の留意点を表す事例を3つ紹介する。 まず、本項で示す事例の天気図を図2.3.7にまとめて示 す。1つ目は、台風が非常に強い勢力を維持しつつ日本 の南から北進して徳島県に上陸し、台風からの湿った 空気の影響で、四国から東海地方の太平洋側を中心に 大雨となった事例(左)である。2つ目は、暖湿気の流 入や日中の昇温の影響で全国的に広い範囲で大気が不 安定となり、午後には西日本から東日本にかけて雷雨 となった事例(中央)である。3つ目は、九州から関東 地方にかけて停滞する前線の活動が活発となり、西日 本を中心に多くの地点で日降水量の観測史上1位の記 録を更新した平成30年7月豪雨の事例(右)である。

台風に伴う降水事例

図 2.3.8 は、2018 年 9 月 4 日 15 時を対象とした MEPS 降水ガイダンスのコントロールランの RMAX33 (左) および RMAX33 の 50 mm/3h を閾値とする超過確率 (中央) と、対応する観測の降水量 (右) である。RMAX33 の超過確率は、実況で閾値を超過した格子が多い紀伊半島南部を中心に高い確率を予測し、淡路島から琵琶湖付近へと北東に伸びる強雨域については 50%程度の確率を表現している。また、一部の格子で局地的に閾値を超過している四国や静岡県の内陸部等でも実況の降水分布に対応して確率分布を表現している等、実況を確率的に捕捉できていることが分かる。

図 2.3.9 は、図 2.3.8 と同じ時刻を予測の対象とした、 24 時間後の初期時刻の MEPS 降水ガイダンスにおける コントロールランのRMAX33 (左) およびRMAX33の 50 mm/3h を閾値とする超過確率 (中央) と、RMAX33 のアンサンブル最大(右)である。図 2.3.8 と比較す ると、紀伊半島南部ではいずれもコントロールランで 強い降水を予測しており、これに対応して超過確率で も引き続き高い確率値を予測している。一方、淡路島 から琵琶湖付近へと北東に伸びる強雨域に対応する領 域については、超過確率はより高い確率を予測してメ リハリの付いた分布を表現している。これは、リード タイムが短くなったことで当該地域におけるメンバー 間の降水量予測のばらつきが相対的に小さくなり、降 水量が 50 mm/3h を超える雨域の分布の確実性が高 まっていることを示唆しており、実際に実況との対応 も比較的良いことが分かる。また、超過確率とアンサ ンブル最大を比較すると、両者の関係から自明ではあ るが、アンサンブル最大で50 mm/3h以上の降水域は 50 mm/3h を閾値とする超過確率の分布と対応してい ることが見て取れる。実際に、超過確率とアンサンブ ル最大のいずれも、コントロールランでは捕捉しきれ

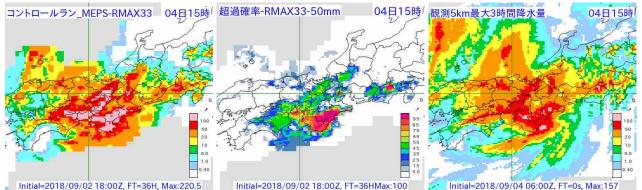


図 2.3.8 2018 年 9 月 4 日 15 時を対象とする、MEPS 降水ガイダンスのコントロールランの RMAX33[mm/3h] (左) および 50 mm/3h を閾値とする超過確率 [%] (中央) と、観測の 5 km 格子最大 3 時間降水量 [mm/3h] (右)。MEPS 降水ガイダンスの初期時刻および予報時間は、2018 年 9 月 2 日 18UTC 初期値の FT=36。

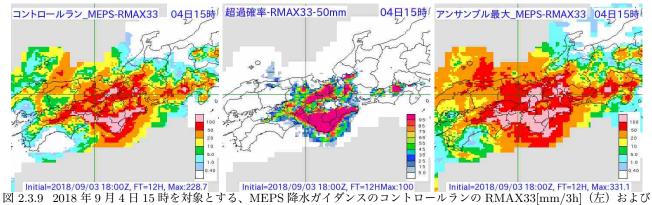


図 2.3.9 2018 年 9 月 4 日 15 時を対象とする、MEPS 降水ガイダンスのコントロールランの RMAX33[mm/3h](左)および 50 mm/3h を閾値とする超過確率 [%](中央)と、アンサンブル最大 [mm/3h](右)。MEPS 降水ガイダンスの初期時刻お よび予報時間は、2018 年 9 月 3 日 18UTC 初期値の FT=12。

ていない兵庫県北部の50 mm/3h以上の降水について 概ね捕捉できていることが分かる。ただし、アンサンブル最大は実況と比較して予測の空振りが非常に目立ち、また、確率的な情報を持たない決定論的な予測資料であるため、防災気象情報の発表の判断等において直接活用するには適してない。このため、基本的には 超過確率を参考に現象発生の可能性や範囲を見積もりつつ、予測を組み立てていくことが推奨される。

このように、超過確率は MEPS 降水ガイダンスの予測のばらつきに対応した確率分布を表現しており、実況を広く捕捉しつつ予測の不確実性を確率値として把握することができる。また、初期時刻毎の確率値の変化を追うことで大雨の範囲の絞り込みに利用できる等、リードタイムに応じた防災気象情報の発表の判断等において有効に活用できると考えられる。

夏季の不安定降水の事例

図 2.3.10 に、2018 年 8 月 12 日 18 時を対象とした MEPS 降水ガイダンスのコントロールランの RMAX31 (左) および摂動メンバーの1つ (メンバー12) (中央) と、対応する観測の降水量 (右)を示す。中部地方を中心とした強雨については、ガイダンスのコントロールランは多少の位置ずれや空振り等はみられるものの、実況に近い強い降水は予測しており、強雨のシグナルをある程度表現できていると考えられる。しかしその

一方で、九州・四国・中国地方の降水についてはほとんど表現できていない。これに対してメンバー 12 では、中部地方を中心とした強雨については全く予測できてない一方で、九州・四国・中国地方の降水についてはある程度表現できていることが分かる。

続いて、図 2.3.11 に、図 2.3.10 に対応する RMAX31 の 20 mm/h (左) および 1 mm/h (中央) を閾値とした 超過確率と、MEPS 降水ガイダンスのアンサンブル最 大を示す。図 2.3.10 で示したとおり、本事例では MEPS 降水ガイダンスの予測は各メンバーでばらつきが非常 に大きく、例えば 20 mm/h を閾値とする超過確率は岐 阜県内を中心に数 10%程度と表現されるのみである。 しかし、例えば1 mm/h を閾値とした超過確率をみる と、実況で強い降水が集中している中部地方を中心に 確率値を広く表現しており、不安定降水のポテンシャ ルについては確率的に表現できていることが分かる。 ただし、この場合の超過確率の確率値については強雨 のポテンシャルを直接的に表したものではなく、定性 的に捉える必要がある点には留意が必要である。アン サンブル最大についても、降水を広く予測して不安定 降水のポテンシャルを表現している点については同様 であるが、確率的な情報をもたないという点で超過確 率にはやや劣ると言える。その一方で、アンサンブル 最大は予測される強雨の程度を降水量分布として表現

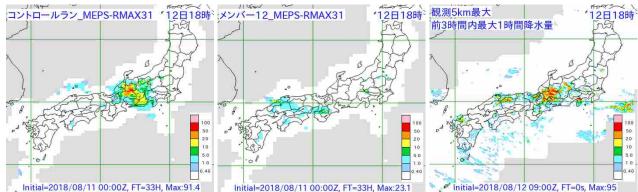


図 2.3.10 2018 年 8 月 12 日 18 時を対象とする、MEPS 降水ガイダンスのコントロールランの RMAX31[mm/h] (左) および 摂動メンバーの 1 つ (メンバー 12) [mm/h] (中央) と、観測の 5 km 格子最大前 3 時間内最大 1 時間降水量 [mm/h] (右)。 MEPS 降水ガイダンスの初期時刻および予報時間は、2018 年 8 月 11 日 00UTC 初期値の FT=33。

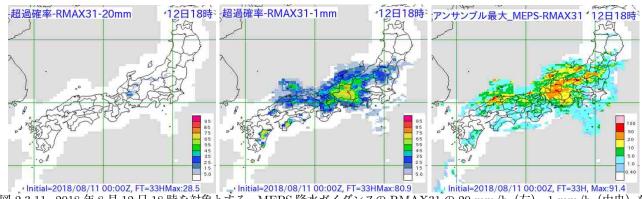


図 2.3.11 2018 年 8 月 12 日 18 時を対象とする、MEPS 降水ガイダンスの RMAX31 の 20 mm/h(左)、1 mm/h(中央)を 関値とする超過確率 [%] と、アンサンブル最大 [mm/h](右)。MEPS 降水ガイダンスの初期時刻および予報時間は、2018 年 8 月 11 日 00UTC 初期値の FT=33。

することで、強雨のポテンシャルを表現しており、実際に中部・中国地方の強雨との対応も良い。この点では、アンサンブル最大は超過確率にない特長をもっていると言える。

このように、本不安定降水事例のような局地的・短時間に発生する降水現象の予測においては、MEPS 降水ガイダンスのアンサンブルメンバーの個々の予測は他の事例に比べてばらつきが非常に大きく、超過確率については特に高い閾値において確率値を適切に表現できない場合が多い。不安定降水のポテンシャルの確率的な把握にあたっては低い閾値の超過確率の分布を参照することが有効であるが、強雨のポテンシャルについてはアンサンブル最大の分布を参照することが有効であると考えられ、目的に応じて両者を使い分けることが重要である。

前線に伴う降水事例(平成30年7月豪雨)

図 2.3.12 に、2018 年 7 月 6 日 15 時を対象とした MEPS 降水ガイダンスのコントロールランの RMAX24 (左) および 200 mm/24h を閾値とする超過確率(中央)と、対応する観測の降水量(右)を示す。高知県東部や近畿地方、岐阜県周辺等、コントロールランの予測値や超過確率の分布は概ね実況と良く対応していることが分かる。一方で、九州北部の 200 mm/24h を超える降水については、超過確率では確率値がほとん

ど表現されておらず、実況を十分に捕捉できていると は言い難い。

続いて、図 2.3.13 に、図 2.3.12 に対応した MEPS 降水ガイダンスの RMAX24 の 150 mm/24h (左) お よび 100 mm/24h (中央) を閾値とする超過確率と、 アンサンブル最大(右)を示す。九州北部ではアンサ ンブル最大で 100 mm/24h や 150 mm/24h を超える 予測の格子はある程度面的な広がりをもっており、こ れに対応して超過確率の分布もそれぞれ表現されてい ることが分かる。一方、九州北部ではアンサンブル最 大で 200 mm/24h を超える予測の格子はほとんどな く、超過確率の分布もこれに対応している。一般に、 超過確率はアンサンブルメンバーの予測のばらつきの 幅を超えて確率値を表現することはできず、また、ア ンサンブル最大付近を閾値とした場合にも、超過確率 の面的な分布を適切に表現することは難しい。このた め、本事例でも九州北部においてアンサンブル最大に 迫る 200 mm/24h を閾値とした超過確率の分布を参照 するのは適切ではないと考えられる。このような強雨 のポテンシャルについては、アンサンブル最大の分布 や 100 mm/24h あるいは 150 mm/24h といった少し低 い閾値の超過確率を参考に、定性的な見積もりを行う のが適当であると考えられる。

このように、本事例のような空間的・時間的に連続

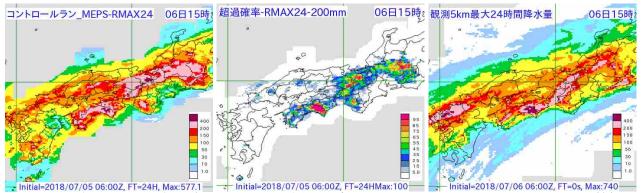


図 2.3.12 2018 年 7 月 6 日 15 時を対象とする、MEPS 降水ガイダンスのコントロールランの RMAX24[mm/24h](左)および 200 mm/24h を閾値とする超過確率 [%](中央)と、観測の 5 km 格子最大 24 時間降水量 [mm/24h](右)。MEPS 降水ガイダンスの初期時刻および予報時間は、2018 年 7 月 5 日 06UTC 初期値の FT=24。

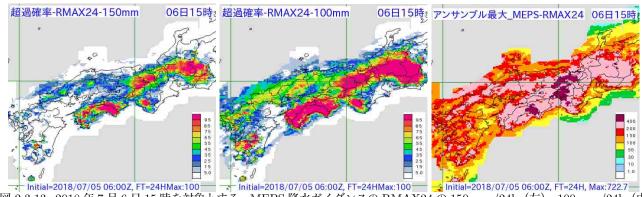


図 2.3.13 2018 年 7 月 6 日 15 時を対象とする、MEPS 降水ガイダンスの RMAX24 の 150 mm/24h(左)、100 mm/24h(中央)を閾値とする超過確率 [%] と、アンサンブル最大 [mm/h](右)。MEPS 降水ガイダンスの初期時刻および予報時間は、2018 年 7 月 5 日 06UTC 初期値の FT=24。

的な降水現象の予測においても、超過確率はガイダンスのアンサンブルメンバーの予測のばらつきの幅を踏まえて閾値を適切に選択する必要がある点には留意が必要である。強雨のポテンシャルの定性的な見積もりにあたっては、まずアンサンブル最大の分布を確認し、ある程度面的な分布が表現されている少し低めの閾値の超過確率を参考にする、といった工夫が必要であると考えられる。

2.3.5 まとめ

MEPS 降水ガイダンスは、MEPS の各メンバーの予測値を入力とするガイダンスであり、MSM 降水ガイダンスの係数や予測式を用いて作成する。コントロールランは MSM 降水ガイダンスと同一であり、各メンバーの予測のばらつきを利用することで、MSM 降水ガイダンスに関する確率情報等の作成が可能となる。その1つとして、アンサンブルメンバーの降水量予測がある閾値を超える確率(超過確率)が挙げられる。本節では、MEPS 降水ガイダンスと、超過確率をはじめとした各種統計量について精度検証および事例検証を行った。これらの結果について、利用上の留意点と併せて以下にまとめる。

MEPS 降水ガイダンスについて

非台風事例の検証では、ガイダンスはモデルを適切に修正し、予測頻度・予測精度ともに改善がみられる。一方で、台風事例の検証ではガイダンスはモデルよりも更に予測頻度過多かつ予測精度もやや劣る結果となり、ガイダンスがモデルを適切に修正できていない。摂動ランの予測特性は、非台風事例・台風事例のいずれもコントロールランの変化傾向に概ね対応する形となっており、予測精度はコントロールランと比較して一段劣る傾向がみられる。また、予測要素によってコントロールランよりも摂動ランのほうが BI がやや高いあるいはやや低い傾向がある場合もみられる。

アンサンブル平均およびアンサンブル最大について

アンサンブル平均については平均処理によって各メンバーの表現する降水の分布やピークが平滑化されるため、強雨の分布やピークを捉えるのには適さない。アンサンブル最大についてはコントロールランと比較して捕捉率が高く、顕著現象のポテンシャルを把握する上で有効な資料の1つとなると考えられる。ただし、空振り率が高い点には十分に留意が必要であり、例えば不安定降水事例における強雨のポテンシャルの見積もりへの利用等、現象や目的に応じた超過確率との使い分けが重要である。

超過確率について

超過確率の検証では、いずれの要素についても強 い降水ほど予測の過大傾向が強まり、予測精度も低 下する傾向がみられた。非台風事例と台風事例とで は、全体としては後者の方が予測精度が高くなる傾 向が見られ、統計的な目安としては、RMAX31は5-10 mm/h、RMAX33 は 20-50 mm/3h、RMAX24 は 200-300 mm/24h (冬季では、RMAX31 は 1 mm/h、 RMAX33 は 10 mm/3h、RMAX24 は 50 mm/24h) 程 度までは気候値予測に対してスキルがあると考えられ、 各要素の超過確率の予測スキルは、防災気象情報への 利活用の観点でそれぞれ大きく異なる点には留意が必 要である。超過確率は MEPS 降水ガイダンスの予測 のばらつきに対応した確率分布を表現でき、実況を広 く捕捉しつつ予測の不確実性を確率値として把握する ことができる。また、初期時刻毎の確率値の変化に着 目することで、リードタイムに応じた防災気象情報の 発表の判断等において有効に活用することが可能であ る。ただし、不安定降水のように各メンバーの予測の ばらつきが非常に大きい事例では、超過確率が適切に 表現されない場合もみられる。このような場合、不安 定降水のポテンシャルの確率的な把握にあたっては低 い閾値の超過確率の分布を参照することが有効である が、強雨のポテンシャルについてはアンサンブル最大 の分布を参照することが有効である。また、空間的・時 間的に連続的な降水事例においても、アンサンブルメ ンバーの予測のばらつきの幅を踏まえて超過確率の閾 値を適切に選択する必要がある点には留意が必要であ る。強雨のポテンシャルの定性的な見積もりにあたっ ては、アンサンブル最大の分布を踏まえつつ、少し低 めの閾値の超過確率を参考にする、といった工夫が必 要である。

今回の MEPS 降水ガイダンスの検証では、台風事例においてガイダンスがモデルを適切に修正できていない場合が多いことが示唆された。ただし、これは MEPS 降水ガイダンスの課題ではなく、 MSM 降水ガイダンスとしての課題である。このため、今後も MSM 降水ガイダンスの改良に継続的に取り組んでいくことが重要である。

2.3.6 今後の展望

上述の通り、超過確率は確率情報としてある程度の予測スキルを有しているものの、RMAX31 やRMAX33 の超過確率等については、例えば早期注意情報(警報級の可能性)の判断等への活用という観点では十分でなく、より高い精度をもつ確率情報の作成が重要である。そこで以下では、現在開発を行っている、予測の時空間的なずれや地形等を考慮した確率情報(以下、補正超過確率)について、作成方法や事例検証の結果を簡単に紹介する。

(1) 補正超過確率の作成方法

まず、補正超過確率の作成において精度向上の寄与 が最も大きい手法である Neighbourhood Processing に ついて紹介する。Neighbourhood Processing は、英国 気象局等で降水確率等の確率情報を作成する際に用い られている手法の1つで、ある閾値を超える格子のカ ウントにおいて対象格子の周辺の格子も参照する手法 である (Clark et al. 2016; Schwartz et al. 2010)。図 2.3.14 に、Neighbourhood Processing のイメージ図を 示す。Neighbourhood Processing では、各メンバーの 各格子について、その格子を含む周辺の 11 × 11 格子 のうち何格子が閾値を超えるかをカウントし、それら を全メンバー分足して、周辺格子を含む全参照格子数 に対する割合を求める。アンサンブルのメンバー数を M、ある閾値を超える格子の数の合計をNとした場 合、計算される確率値は $100 \times N/(11 \times 11 \times M)$ % と なる。この値は、超過確率を 11×11 個の周辺格子で 平均した値と同じである。

次に、補正超過確率の作成方法について簡単に解説する。まず、上述のNeighbourhood Processing において、周辺格子について対象格子との水平距離や標高差が大きいほど重みが小さくなるように重み付けをして計算を行う。続いて、各FT・各格子で計算されたこの値について、前後のFTの同一格子とで重み付き平均(予報時間後半ほど前後のFTの重みを徐々に大きくする)を行う。これにより、予測の時空間的なずれおよび地形を考慮することができる。

(2) 補正超過確率の事例検証

図 2.3.15 に、図 2.3.8 の 12 時間後を予測対象とした 200 mm/24h を閾値とする RMAX24 の超過確率 (左) および補正超過確率 (中央) と、対応する観測の降水 量(右)を示す。超過確率および補正超過確率は高確 率格子と実況との対応が良く、四国東部・紀伊半島・岐 阜県北西部・東海地方内陸部のそれぞれについて、実況 で 200 mm/24h を超えた格子の周辺にピークを持つ確 率分布が表現されている。一方で、静岡県と長野県の 県境付近(図中の四角枠内)に着目すると、実況では 長野県の南部まで 200 mm/24h を超えている格子が広 がっているが、超過確率は長野県内では概ね0%となっ ている。これに対し、補正超過確率は長野県南部まで 40%前後の確率を表現しており、実況を確率的に捕捉 できている。また、滋賀県と三重県の県境付近(図中 の破線枠内中央付近)では補正超過確率の分布がやや シャープに表現されており、地形に沿って確率分布を 広げていることが分かる。本事例の場合、当該地域に おいて実況で 200 mm/24h を超えた格子は 1 格子のみ ではあるものの、降水量はその周辺と比較すると相対 的に多くなっており、補正超過確率は地形による降水 特性の違いを反映した分布を表現していると言える。

このように、補正超過確率は予測の位置ずれ等を考

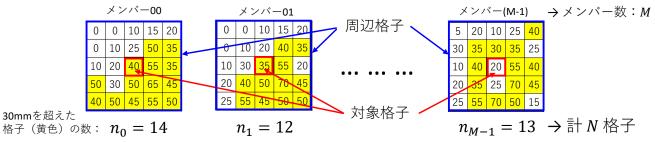


図 2.3.14 Neighbourhood Processing のイメージ図。アンサンブルメンバー数を M、閾値を 30 mm とした場合の例を示す。 閾値を超えた格子を黄色で塗りつぶして示しており、それらの格子数の全メンバー分の合計を N としている。なお、ここでは簡単のため、対象格子が参照する周辺格子を 5×5 (本来は 11×11)の格子で図示している。

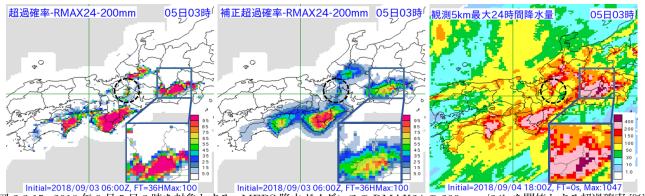


図 2.3.15 2018 年 9 月 5 日 3 時を対象とする、MEPS 降水ガイダンスの RMAX24 の 200 mm/24h を閾値とする超過確率 [%] (左) および補正超過確率 [%] (中央) と、観測の 5 km 格子最大 24 時間降水量 [mm/24h] (右)。四角枠線内は拡大図も示している。MEPS 降水ガイダンスの初期時刻および予報時間は、2018 年 9 月 3 日 06UTC 初期値の FT=36。

慮して超過確率の分布を広げることで、実況を確率的に捕捉しやすくなっている一方で、地形が急峻な領域では確率分布の広がりを抑え、ある程度地形に沿った確率分布の表現が可能であることが分かる。

今後、超過確率の代わりとなるより精度の高い確率 情報の作成を目指し、補正超過確率のさらなる改良に 取り組んでいく。

参考文献

- 河野耕平, 西本秀祐, 2018: MEPS の利用方法の検討. 平成 30 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 10-11.
- 工藤淳,後藤尚親,高田伸一,2018: ガイダンスの作成 技術. 数値予報課報告・別冊第64号,気象庁予報部, 19-85.
- 三戸洋介, 2018: メソアンサンブルガイダンス. 平成 30 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 11–12.
- 白山洋平, 2018: 降水ガイダンス. 数値予報課報告・別冊第 64 号, 気象庁予報部, 95-118.
- Clark, Peter, Nigel Roberts, Humphrey Lean, Susan P. Ballard, and Cristina Charlton-Perez, 2016: Convection-permitting models: a step-change in rainfall forecasting. *Meteorol. Appl.*, 23, 165–181.
- Schwartz, Craig S., John S. Kain, Steven J. Weiss, Ming Xue, David R. Bright, Fanyou Kong, Kevin W. Thomas, Jason J. Levit, Michael C. Coniglio,

and Matthew S. Wandishin, 2010: Toward Improved Convection-Allowing Ensembles: Model Physics Sensitivities and Optimizing Probabilistic Guidance with Small Ensemble Membership. *Wea. Forecasting*, **25**, 263–280.

2.4 航空悪天 GPV¹

2.4.1 はじめに

MEPS に基づく航空悪天 GPV(以下、MEPS 航空 悪天 GPV)は、MSM に基づく航空悪天 GPV(以下、国内航空悪天 GPV)と同じ手法で作成される空域予報用 GPV である。各アンサンブルメンバーの予測値や、アンサンブル予報から算出される平均値、超過確率、スプレッドなどの統計量は、空域予報のほか、将来の航空交通システムでも利用される予定である。MEPS 航空悪天 GPV は 2015 年 4 月から 1 日 1 回 11 メンバーで部内試験運用されており、2018 年 6 月には 1 日 4 回 21 メンバーに増強されている。

本節では MEPS 航空悪天 GPV の主な要素である乱 気流指数、着氷指数、および積乱雲量のアンサンブル 平均や超過確率などの検証結果と予測事例を示し、利 用上の留意点を述べる。

2.4.2 仕様

MEPS 航空悪天 GPV は国内航空悪天 GPV と同じ領域・座標系・要素で作成しており、MEPS と同様に1日4回21メンバーでの予測を行う。MEPS 航空悪天 GPV の各要素は国内航空悪天 GPV と同じ手法・係数・パラメータで作成されており、コントロールランの予測は同じ初期時刻の国内航空悪天 GPV と同一である。国内航空悪天 GPV の詳細な仕様は付録 A.2.10 を、各要素の作成方法は井藤 (2018a,b) および工藤 (2018a,b) を参照していただきたい。

2.4.3 統計検証

以下では MEPS 航空悪天 GPV の乱気流指数、着氷指数、積乱雲量について、アンサンブル平均や超過確率とコントロールランを比較した検証結果を述べる。検証期間は 1 日 4 回 21 メンバーでの部内試験運用を開始した 2018 年 6 月 5 日 00 UTC 初期値から 2019 年 6 月 4 日 18 UTC 初期値までの 1 年間で、00,06,12,18 UTC の全ての初期時刻を用いた検証結果を示す。

(1) 乱気流指数の検証

ここでは MEPS 航空悪天 GPV から算出した乱気流 指数のアンサンブル平均と超過確率をコントロールラ ンと比較した検証結果を示す。また比較のために、鉛 直シアーのアンサンブル平均とコントロールランの検 証結果も示す。

各統計量のうち、乱気流指数 (TBindex) の超過確率 (p (TBindex > 3)) は並 (MOD) 以上の乱気流を予測する目安である TBindex が 3.0 を超えたメンバーの割合に 100 を掛けた値、鉛直シアー (VWS) のアンサンブル平均は各メンバーの単純平均とする。 TBindex については、アンサンブル平均は各メンバーの単純平均ではなく、ロジスティック回帰で求めた確率値のアンサ

ンブル平均から算出した TBindex とする。この理由は次のとおりである。TBindex はロジスティック回帰で確率値を求めた後に以下の変換を行うことで算出している (工藤 2018a)。

$$TBindex = \frac{\ln p - \mu}{\sigma} + 3.0 \tag{2.4.1}$$

ここで μ と σ は調整パラメータ、p はロジスティック 回帰で求めた確率値である。この TBindex を単純にアンサンブル平均すると、p の相乗平均に対して (2.4.1) 式を適用することになる。一方で、アンサンブル平均 の方法としては p の相加平均に対して (2.4.1) 式を適用することも考えられる。事前調査の結果、相加平均を用いた方が予測精度が高かったため、ここでは p の相加平均から算出した TBindex を TBindex のアンサンブル平均 (TBindex(MEAN)) とし、次式で定義する。

TBindex(MEAN)
$$\equiv \frac{\ln(\frac{1}{M}\sum_{m}p_{m}) - \mu}{\sigma} + 3.0$$
 (2.4.2)

ここでm は各アンサンブルメンバーを、M はアンサンブルメンバー数を表す。

検証では、C-PIREP²による乱気流観測を実況データとして利用する。実況と比較する予測値は、実況があった時刻・地点に最も近い格子の値を用いる。なお、乱気流の遭遇地点については、「地点 A で揺れた」と通報される場合と、「地点 A から地点 B まで揺れた」と通報される場合の2つのパターンがある。後者の場合は2地点間の中点を実況があった場所とするが、2地点間の距離が水平240 km 以上または鉛直6,000 ft 以上離れていた場合は中点に代表性がないと判断し、検証には使用しない。また、天候状態(晴天、雲中など)による区別はしない。

図 2.4.1 に MOD 以上の乱気流に対する MEPS 航空 悪天 GPV の高度別・閾値別のスキルスコアを示す。図の FL はフライトレベル³を表す。スキルスコアの最大値で 比べると、TBindex(MEAN) と p (TBindex>3) は、高度と FT によらずコントロールラン (TBindex(CNTL))を上回っており、予測精度が高いといえる。スキルスコアが最大となる p (TBindex>3) の閾値は 20–30%付近であり、これを目安とすることで TBindex(CNTL) よりも精度が高く最適な予測を行うことができる。

¹ 工藤 淳

² PIREP は Pilot Report (操縦士報告)の略。C-PIREP は Common-PIREP の略で、従来は各航空会社内でのみ利用されていた PIREP (カンパニー PIREP)を国土交通省航空局のシステムで集約して形式を統一した PIREP。乱気流、着水、天候状態などが報じられる。乱気流の強さは、静穏 (SMTH)、弱 (LGTM)、弱 (LGT)、弱+ (LGTP)、並 (MOD)、強 (SEV)の6段階、着氷の強さは、弱 (LGT)、並 (MOD)、強 (SEV)の3段階で報じられる。天候状態は、晴天 (CLR)、雲中 (INC)、雲頂 (TOP)、雲底 (BSE) などが報じられる。

 $^{^3}$ 標準大気の気圧高度 [ft] を 100 で割った高度。「FL100」など "FL" に続けて 3 桁の数値で表される。FL100 = 10,000 ft、1 ft $\simeq 0.3048~\rm m$ 。

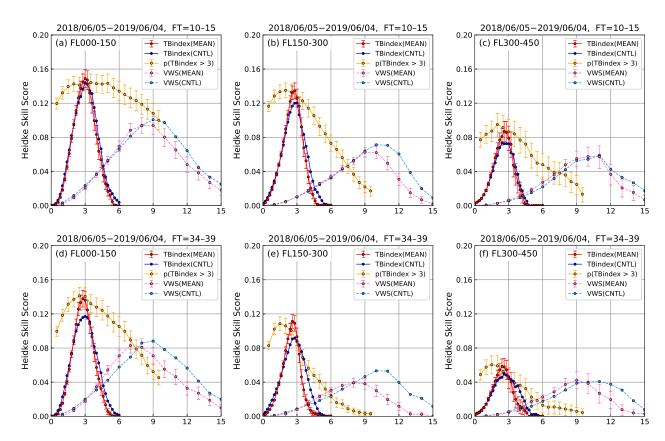


図 2.4.1 MOD 以上の乱気流に対する MEPS 航空悪天 GPV の高度別・閾値別のスキルスコア。(a)~(c) はそれぞれ FT=10-15 の (a) FL000-FL150, (b) FL150-FL300, (c) FL300-FL450 の検証結果、(d)~(f) はそれぞれ FT=34-39 の (d) FL000-FL150, (e) FL150-FL300, (f) FL300-FL450 の検証結果。TBindex(MEAN) は確率のアンサンブル平均から求めた乱気流指数、TBindex(CNTL) はコントロールランの乱気流指数、p (TBindex > 3) は TBindex が 3.0 を超える超過確率、VWS(MEAN) は鉛直シアーのアンサンブル平均、VWS(CNTL) はコントロールランの鉛直シアーの検証結果。横軸は TBindex の値または p (TBindex > 3) [%] または VWS [kt/1000ft] を表すが、同一の図に表示するために、p (TBindex > 3) は確率値 [%] を 10 で割った値で示している。TBindex は 0 から 0.2 毎に、VWS は 0 から 1 kt/1000ft 毎に検証した結果を、p (TBindex > 3) は 5%から 95%まで 5%毎に検証した結果を示している。TBindex(MEAN)、p (TBindex > 3), VWS(MEAN) にはブートストラップ法で求めた 95%信頼区間を示すエラーバーを付加している。

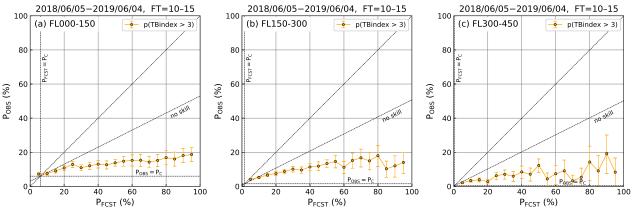


図 2.4.2 MOD 以上の乱気流に対する p (TBindex > 3) の信頼度曲線。FT=10-15 の (a) FL000-FL150, (b) FL150-FL300, (c) FL300-FL450 の検証結果。図の見方は付録 D.4.4 を参照。エラーバーはブートストラップ法で求めた 95%信頼区間。

FT=10-15 では、TBindex(MEAN) でスキルスコアが最大となる閾値は 3.0 付近であり、TBindex(CNTL) と比べて利用上も大きな違いはない。一方 FT=34-39 では、TBindex(MEAN) でスキルスコアが最大となる閾値は 3.0 よりも $0.2 \sim 0.6$ 小さくなっている。これは予報時間の後半でアンサンブルのばらつきが大きくなり、

アンサンブル平均することで予測のピーク値が小さくなるためである。このため、予報時間後半でアンサンブル平均の TBindex を用いる場合には閾値を下げて利用する必要がある。

鉛直シアーについて、アンサンブル平均とコントロールランを比較すると(図 2.4.1 の VWS)、FL300 以下

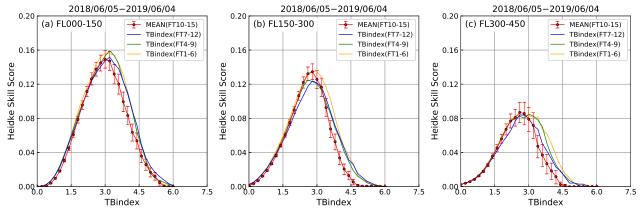


図 2.4.3 MEPS 航空悪天 GPV のアンサンブル平均の乱気流指数と 3, 6, 9 時間後の初期値の国内航空悪天 GPV の乱気流指数の比較。(a) FL000-FL150, (b) FL150-FL300, (c) FL300-FL450 の検証結果。MEAN は MEPS 航空悪天 GPV のアンサンブル平均の乱気流指数を、TBindex は国内航空悪天 GPV の乱気流指数の検証結果を示す。アンサンブル平均の乱気流指数は 00, 06, 12, 18 UTC 初期値の FT=10-15 の検証結果、国内航空悪天 GPV の乱気流指数は、青が 03, 09, 15, 21 UTC 初期値の FT=7-12 の検証結果、緑が 06, 12, 18, 翌日 00 UTC 初期値の FT=4-9 の検証結果、橙色が 09, 15, 21, 翌日 03 UTC 初期値の FT=1-6 の検証結果。MEAN にはブートストラップ法で求めた 95%信頼区間を示すエラーバーを付加している。

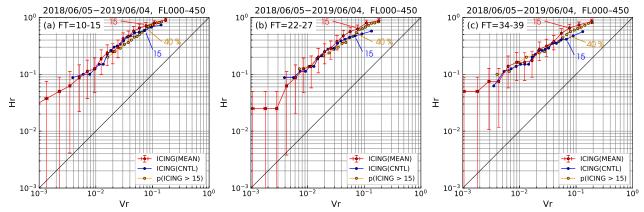


図 2.4.4 MOD 以上の着氷に対する MEPS 航空悪天 GPV の捕捉率 (Hr) –体積率 (Vr) の関係。(a) FT=10–15, (b) FT=22–27, (c) FT=34–39 の検証結果。ICING(MEAN) は着氷指数のアンサンブル平均、ICING(CNTL) はコントロールランの着氷指数、p (ICING > 15) は ICING が 15 を超える超過確率 [%] についての検証結果。ICING(MEAN) にはブートストラップ法で求めた 95%信頼区間を示すエラーバーを付加している。

ではアンサンブル平均の方がスキルスコアのピーク値がやや小さく、予測精度はやや悪いといえる。またアンサンブル平均では、スキルスコアが最大となる閾値はコントロールランよりも低めにシフトしており、コントロールランと同じ閾値で予測することは適切ではない。

図 2.4.2 に、p (TBindex > 3) の信頼度曲線を高度別に示す。いずれの高度でも、信頼度曲線が理想直線(図中の 45 度の直線)よりも下にあって大きく離れており、予測確率が実況と比べて過大であることを示している。p (TBindex > 3) はあくまで超過確率であり、値そのものを現象の発生確率と見ることはできない。一方、予測の確率が高くなるほど実況の確率も高くなる傾向があり、超過確率が高いほど乱気流の可能性が高いとみて利用することはできる。

ここまでで示したように、TBindex(MEAN) はTBindex(CNTL) よりも予測精度が高い、すなわち、TBindex(MEAN) は同一初期時刻の国内航空悪天 GPV

の TBindex よりも予測精度が高いといえる。しかしながら国内航空悪天 GPV は 1 日 8 回作成されることから、MEPS 航空悪天 GPV よりも新しい初期値の情報を利用できるというメリットがある。そこで新しい初期値の国内航空悪天 GPV と比較した場合にそれ以前の初期値の TBindex(MEAN) がどの程度有効か確認する。

図 2.4.3 に、00, 06, 12, 18 UTC 初期値の FT=10-15 の TBindex(MEAN) に対する、3 時間後の初期値の FT=7-12、6 時間後の初期値の FT=4-9、および、9 時間後の初期値の FT=1-6 の国内航空悪天 GPV の TBindex のスキルスコアを示す。図から、3 時間後の初期値の予測(青線)と比べて TBindex(MEAN) は同等または予測精度が高く、特に FL150-300 では、9 時間後の初期値と同程度の精度を持っていることがわかる。図には示さないが、同様の検証をほかの FT に対して行ったところ、TBindex(MEAN) が優位である期間は予報時間後半ほど長くなる傾向が見られた。

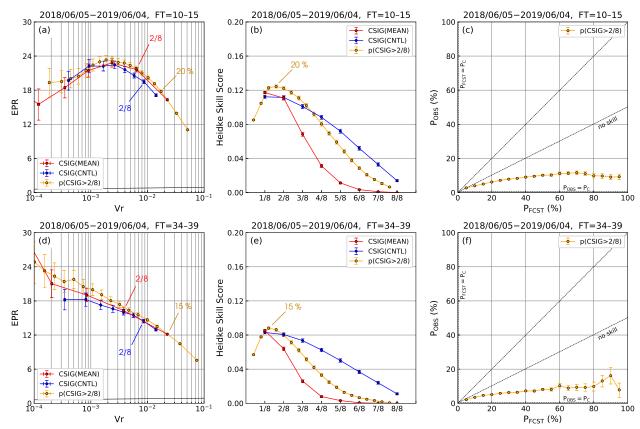


図 2.4.5 MEPS 航空悪天 GPV の積乱雲量の検証結果。(a)~(c) はそれぞれ FT=10-15 の (a) 体積率–遭遇率比、(b) スキルスコア、(c) 信頼度曲線。(d)~(f) はそれぞれ FT=34-39 の (d) 体積率–遭遇率比、(e) スキルスコア、(f) 信頼度曲線。 CSIG(MEAN) は積乱雲量のアンサンブル平均、CSIG(CNTL) はコントロールランの積乱雲量、p(CSIG>2/8) は CSIG が 2/8 を超える超過確率 [%]。積乱雲量は 1/8 から 8/8 まで 1/8 毎に検証した結果を、p(CSIG>2/8) は 5%から 95%まで 5%毎に検証した結果を示している。(b), (e) の横軸は積乱雲量 [0-1] または p(CSIG>2/8) [%] を表すが、同一の図に表示するために p(CSIG>2/8) は確率値 [%] を 100 で割った値で示している。信頼度曲線の見方は付録 D.4.4 を参照。エラーバーはブートストラップ法で求めた 95%信頼区間。

このように、TBindex(MEAN) は新しい初期値の国内航空悪天 GPV と比べても同等以上の予測精度を持つことから、基本的には最新の MEPS 航空悪天 GPV を利用することで精度の高い予測ができる。特に予測場のランダム誤差が大きくなる予報時間の後半では、アンサンブル平均による予測精度の改善幅が大きくなる。

(2) 着氷指数の検証

ここでは MEPS 航空悪天 GPV から算出した着氷指数のアンサンブル平均と超過確率、コントロールランの検証結果を示す。着氷指数 (ICING) のアンサンブル平均 (ICING(MEAN)) は各メンバーの単純平均で、超過確率 (p(ICING>15)) は MOD 以上の着氷の目安としている ICING が 15 を超えるメンバーの割合に 100を掛けた値とする。実況データは C-PIREP による着氷観測を利用し、前項の乱気流実況と同様に取り扱う。

図 2.4.4 に MOD 以上の着氷に対する予報時間別の捕捉率 (Hr) と体積率 (Vr) の関係を示す。着氷は実況の通報数が非常に少ないため、高度別には検証せず、FL000-450 でまとめた検証結果を示している。体積率が等しい予測を比べた場合には捕捉率が大きいほど実況を多く捉えた良い予測であり、捕捉率が等しい予測を

比べた場合には体積率が小さいほど予測領域を限定した良い予測といえるため、図では線が左上にあるほど予測精度が高いといえる。ICING=15 付近の閾値で比べると、ICING(MEAN) は予報時間に関わらずコントロールランの着氷指数(ICING(CNTL))の予測精度を上回っている。また、ICING(MEAN) は ICING(CNTL) よりも体積率が若干大きいことから、アンサンブル平均の方がコントロールランよりも広めに予測しているといえるが、それ以上に捕捉率が大きくなり予測精度としては向上している。p(ICING>15)の体積率・捕捉率が ICING=15と同程度となる超過確率 40%の閾値で比較すると、p(ICING>15)は ICING(CNTL)と同等以上の予測精度を持つが、ICING(MEAN)と比べると精度が低い。

(3) 積乱雲量の検証

ここでは MEPS 航空悪天 GPV から算出した積乱 雲量のアンサンブル平均、超過確率とコントロールランの検証結果を示す。積乱雲量 (CSIG) のアンサンブル平均 (CSIG(MEAN)) は各メンバーの単純平均で、超過確率 (p(CSIG>2/8)) は国内悪天 12 時間予想 図 (FBJP112) で積乱雲域を予測する閾値である CSIG

が 2/8 を超えるメンバーの割合に 100 を掛けた値とする。検証では工藤 (2007) と同様に LIDEN による雷観 測を用い、予報対象時刻の前後 30 分以内に MEPS 航空悪天 GPV の格子内で対地雷が 1 回以上観測された 場合に実況ありとする。

図 2.4.5 に積乱雲量と超過確率の閾値別検証結果を示す。図の上段 $(a)\sim(c)$ は FT=10-15 の検証結果を、下段 $(d)\sim(f)$ は FT=34-39 の検証結果を示している。図 2.4.5 (a), (d) は遭遇率比 (EPR) と体積率 (Vr) の関係である。遭遇率比は付録 D.3.1 の分割表を用いて、

$$EPR = \frac{FO/(FO + FX)}{(FO + XO)/(FO + FX + XO + XX)} (2.4.3)$$

であり、全領域での積乱雲の発生率(気候値的発生率)に対する積乱雲を予測した領域での実況の発生率の比を表す。同じ体積率の予測を比べた場合、遭遇率比が大きいほど予測精度が高いと見ることができる。図 (a), (d) を見ると、いずれの予報時間でもp(CSIG>2/8)はコントロールラン (P(CSIG)) を上回っていることがわかる。 関値 P(CSIG) を上回っていることがわかる。 関値 P(CSIG) を当高いといえる。しかし、P(CSIG) と比べて体積率が小さくなっており、P(CSIG) を関値とすると予測領域が狭くなってしまう。

図 2.4.5 (b), (e) は閾値別のスキルスコアである。スキルスコアの最大値で比べると、いずれの FT でも p(CSIG>2/8) が最も高く、予測精度が高いことがわかる。スキルスコアが最大となる p(CSIG>2/8) の閾値は 15–20%付近であり、これを目安とすることで CSIG(CNTL) よりも精度が高く最適な予測を行うことができる。CSIG(MEAN) は閾値 1/8 では同等か精度が悪い。p(CSIG>2/8) が 15–20% であるときの体積率(図 2.4.5 (a), (d))を見ると、CSIG(CNTL)=2/8 の体積率よりも大きくなっている。体積率が大きくなって予測精度が高くなる理由は第 2.4.4 項 (3) の事例で示す。

図 2.4.5 (c), (f) は p (CSIG>2/8) の信頼度曲線である。いずれの予報時間でも、信頼度曲線は理想直線の下にあって大きく離れており、予測確率が実況と比べて過大であることを示している。一方、確率 60%程度までは予測の確率が高くなるほど実況の確率も高くなる傾向を示しており、超過確率が高いほど積乱雲発生の可能性が高くなる傾向があるといえる。p (CSIG>2/8) はあくまで閾値を超えたメンバーの割合であり、値そのものを現象の発生確率と見ることはできないが、発生のしやすさを表す指標としては利用できる。

2.4.4 事例検証

以下では統計検証期間中に発生した、乱気流、着氷、 積乱雲の事例を示し、それぞれについて、コントロー ルランとアンサンブル平均、超過確率の予測結果を比 較する。

(1) 乱気流指数の予測事例

2018年11月22日は低気圧と前線に伴う雲域の雲頂付近でMODの乱気流が多数発生した。図2.4.6は11月22日00UTCの高頻度衛星雲観測プロダクトの雲頂高度情報である。22日00UTCの地上天気図(図略)によると、関東と四国の南海上に前線を伴った低気圧があり、これらの低気圧と前線に伴う雲域が西日本から東日本の広い範囲に広がっている。西日本から関東付近の雲の雲頂高度はFL200-270(20,000-27,000 ft)付近で、紀伊半島周辺など一部ではトランスバースバンド状の雲となり雲頂高度がFL300を超えているところもある。

図 2.4.7 は 11 月 22 日 00 UTC の前後 1 時間以内に C-PIREP で報じられた MOD 以上の乱気流実況である。22 日は西日本から関東の広い範囲で MOD の乱気流が報じられており、その発生高度は主に FL200-300 であった。

図 2.4.8 に 11 月 21 日 12 UTC 初期値の FT=12 の MEPS 航空悪天 GPV による FL270 の乱気流予測を示す。乱気流指数の色はそれぞれ、LGTM, LGT, LGTP, MOD, SEV の目安となる閾値で塗り分けており、黄色が MOD 以上の乱気流の目安となる TBindex > 3.0 の領域を示している。コントロールランの乱気流指数(左図)では、西日本や関東の東海上での乱気流指数(左図)では、西日本や関東の東海上での乱気流は捕捉できているものの実況よりも予測領域が狭い。一方アンサンブル平均の乱気流指数(中図)では、東海地方や関東南部など、より広い領域で MOD 以上の乱気流が予測されている。また、p (TBindex > 3)(右図)でも、20-30%を閾値とするとアンサンブル平均と同様に乱気流を捕捉できている。中図や右図では、個別のメンバーの予測が平滑化されることでランダム誤差が軽減され、より実況に近い予測となっている。

図 2.4.9 に、乱気流発生時刻の直前の初期値である、11 月 21 日 21 UTC 初期値の国内航空悪天 GPV による FT=3, FL270 の乱気流指数の予測を示す。最新初期値の MSM に基づく乱気流予測では、12 UTC 初期値のコントロールラン(図 2.4.8 左)と比べて予測領域に大きな差はなく、依然として不十分であった。この例のように雲頂付近での鉛直シアーの強まりなどに伴う乱気流では、アンサンブル平均や超過確率を利用することで位置ずれが緩和され、最新初期値の MSM の予測よりも予測精度が高くなる場合がある。

図2.4.10は図2.4.8と同じ初期時刻と対象時刻の鉛直シアーの予測である。コントロールランの鉛直シアーでは、近畿・中国・四国地方の一部で、空域予報で晴天乱気流を予測する目安である12kt/1000ftを超える値が予測されている。一方アンサンブル平均の鉛直シアーでは、平均化によりピークが弱まっていることがわかる。この事例のように、鉛直シアーのアンサンブル平均で乱気流を予測する場合にはコントロールランよりも低い閾値を用いる必要があるが、統計検証(図

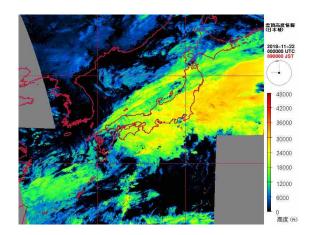


図 2.4.6 2018 年 11 月 22 日 00 UTC の高頻度衛星雲観測プロダクトの雲頂高度情報。

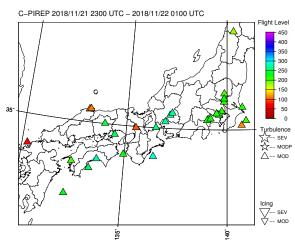


図 2.4.7 2018 年 11 月 22 日 00 UTC の前後 1 時間以内に C-PIREP で通報された MOD 以上の乱気流の実況。△ は MOD の乱気流を、色は高度 (FL) を示す。

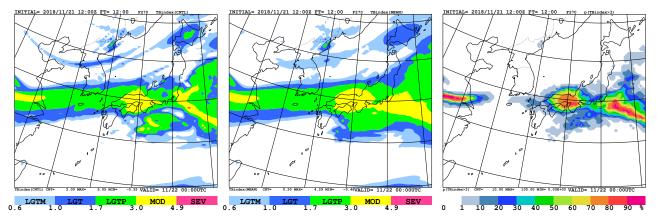


図 2.4.8 2018 年 11 月 21 日 12 UTC 初期値の MEPS 航空悪天 GPV の FT=12, FL270 の乱気流予測。(左)TBindex(CNTL)、(中)TBindex(MEAN)、(右)p(TBindex>3) [%]。

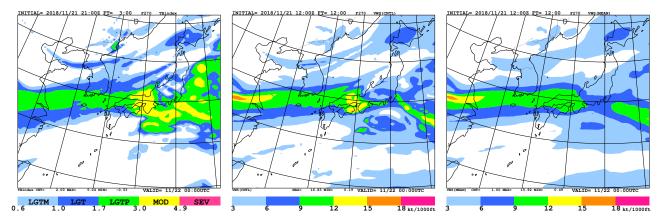


図 2.4.9 2018 年 11 月 21 日 21 UTC 初期値の国内航空悪天 GPV の FT=3, FL270 の TBindex の予測。

図 2.4.10 2018 年 11 月 21 日 12 UTC 初期値の MEPS 航空悪天 GPV の FT=12, FL270 の予測。(左) VWS(CNTL) [kt/1000ft]、(右) VWS(MEAN) [kt/1000ft]。

2.4.1) で示したように、その予測精度はコントロールランと比べても低い。

(2) 着氷指数の予測事例

2018年12月4日07 UTC 頃、和歌山県上空で MOD の着氷が観測された。図 2.4.11 は12月4日07 UTC の高頻度衛星雲観測プロダクトの雲頂高度情報である。

4日 06 UTC の地上天気図(図略)によると、北海道にある低気圧からのびる寒冷前線が日本海から東シナ海にあり、前線と低気圧に伴う雲域が近畿地方を含む日本の広い範囲に広がっている。

図 2.4.12 は 12 月 4 日 07 UTC の前後 1 時間以内に C-PIREP で報じられた MOD 以上の着氷実況である。

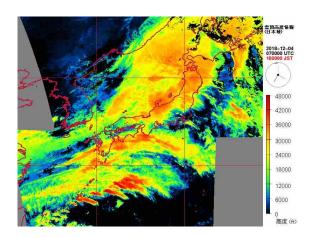


図 2.4.11 2018 年 12 月 4 日 07 UTC の高頻度衛星雲観測プロダクトの雲頂高度情報。

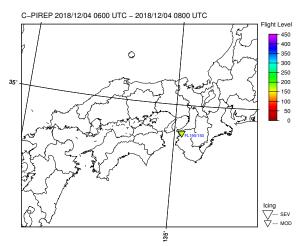


図 2.4.12 2018 年 12 月 4 日 07 UTC の前後 1 時間以内に C-PIREP で通報された MOD 以上の着氷の実況。 ▽ は MOD の着氷を、色とシンボル横の数値は高度 (FL) を示す。

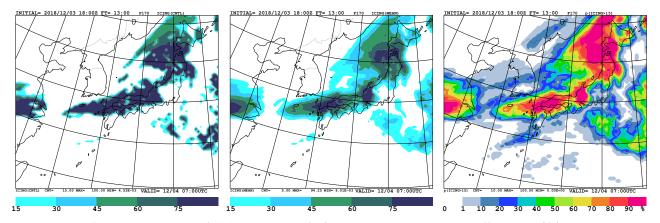


図 2.4.13 2018 年 12 月 3 日 18 UTC 初期値の MEPS 航空悪天 GPV の FT=13, FL170 の着氷予測。(左)ICING(CNTL)、(中)ICING(MEAN)、(右)p (ICING > 15) [%]。

和歌山県上空の FL190-150 で MOD の着氷が報じられている。

図 2.4.13 に 12月 3日 18 UTC 初期値の FT=13の MEPS 航空悪天 GPV による FL170 の着水予測を示す。コントロールランの予測(左図)では、着氷指数 15 を閾値とした場合、和歌山上空での着氷を捕捉できていない。一方アンサンブル平均の着氷指数(中図)では、紀伊半島でも 15 以上の予測となっており、着氷を予測できている。また、p(ICING>15)(右図)でも、 30–40%を閾値とするとアンサンブル平均と同様に着氷を捕捉できている。

(3) 積乱雲量の予測事例

2019年3月12日は日本海などで対流雲に伴う雷が 観測された。図2.4.14は2019年3月12日12 UTCの 地上天気図である。日本海に低気圧があり、寒冷前線 が対馬海峡にのびている。

図 2.4.15 は 2019 年 3 月 12 日 12 UTC の前後 30 分 以内に LIDEN で観測された対地雷の実況である。低 気圧中心と寒冷前線付近およびその前面の所々で雷が 観測されている。

図 2.4.16 は 2019 年 3 月 12 日 00 UTC 初期値の FT=12の MEPS 航空悪天 GPV による積乱雲量の予 測である。コントロールランの積乱雲量(左図)は、 低気圧と寒冷前線近傍で積乱雲が予測されているが、 積乱雲量 2/8 以上の予測領域は LIDEN の実況と比べ て狭い。アンサンブル平均の積乱雲量(中図)でも、 低気圧と寒冷前線近傍で積乱雲が予測されているが、 アンサンブル平均することで雲量の値が全般に小さく なっており、コントロールランと同じ雲量 2/8 を閾値 とすると予測領域はかなり狭くなってしまう。一方、 p(CSIG > 2/8) (右図) では、コントロールランと比 べて広がりを持った予測となっており、20%程度を閾 値とすることで低気圧と前線付近の雷との対応が良い。 また、東北の日本海側や北陸、近畿および太平洋上の 散発的な雷については、コントロールランやアンサン ブル平均ではほとんど捕捉できていないが、右図では ある程度捕捉できている。

現在の積乱雲量の予測では対象時刻の瞬間値における気温や水蒸気の予測を用いており、時間的な広がりはほぼ考慮していない。このためコントロールランのように時間的な広がりのない予測となってしまうのだ

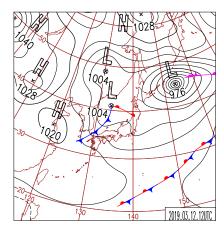


図 2.4.14 2019 年 3 月 12 日 12 UTC の日本域地上天気図。

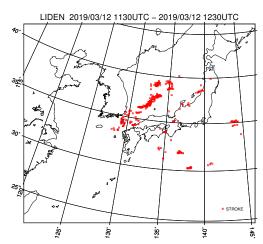


図 2.4.15 2019 年 3 月 12 日 12 UTC の前後 30 分以内に LIDEN で観測された対地雷の実況。

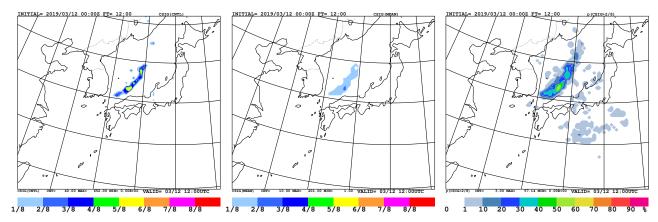


図 2.4.16 2019 年 3 月 12 日 00 UTC 初期値の MEPS 航空悪天 GPV の FT=12 の積乱雲予測。(左)CSIG(CNTL)、(中) CSIG(MEAN)、(右)p (CSIG>2/8) [%]。

が、超過確率ではアンサンブルメンバーのばらつきにより空間的な広がりを持った予測となり、予測精度が 高くなる。

2.4.5 利用上の留意点

統計検証の結果から、アンサンブル平均の乱気流指数と乱気流指数が3.0を超える超過確率は、コントロールランの乱気流指数と比べて予測精度が高く、国内航空悪天 GPV の乱気流指数をこれらに置き換えて利用することが可能である。アンサンブル平均の乱気流指数を用いる場合、空域予報で主に利用する FT=15 程度までは3.0を閾値とすることで適切な予測を行うことができるが、それ以降の予報時間では閾値を下げて利用する必要がある。また、乱気流指数が3.0を超える超過確率を用いる場合には、20-30%を閾値とすることで適切な予測を行うことができるが、信頼度曲線は理想直線を大きく下回っており、超過確率を現象の発生確率として利用することはできない。

アンサンブル平均の鉛直シアーはコントロールラン の鉛直シアーと同等か精度が悪く、またスキルスコア が最大となる閾値もアンサンブル平均とコントロール ランとで異なる。このため鉛直シアーを用いて乱気流 を予測する場合には、アンサンブル平均ではなく、コントロールランを利用することを推奨する。

着氷指数のアンサンブル平均は、コントロールランの 着氷指数と比べて予測精度が高く、国内航空悪天 GPV の着氷指数を単純に置き換えて利用することが可能で ある。コントロールランと比べてアンサンブル平均で は全般に値が小さくなり、閾値 15 以上の領域は多少広 がるが、それ以上に捕捉率が高くなるため予測精度が 向上している。

積乱雲量が2/8を超える超過確率は、閾値15-20%でコントロールランの積乱雲量よりも予測精度が高い。ただし信頼度曲線は理想直線から大きく下回っており、超過確率を現象の発生確率として利用することはできない。積乱雲量のアンサンブル平均はコントロールランと比べても予測精度が低く、利用には適さない。

2.4.6 まとめ

本節では MEPS 航空悪天 GPV の予測精度と予測事例を示した。 MEPS 航空悪天 GPV から算出する乱気流指数のアンサンブル平均((2.4.2) 式)と超過確率、着氷指数のアンサンブル平均、積乱雲量の超過確率は、コントロールランすなわち国内航空悪天 GPV を上回

る予測精度を持つ。予報作業においては、国内航空悪天 GPV の予測を MEPS 航空悪天 GPV に置き換えて利用することも可能であり、空域予報の予測精度向上に寄与するものと思われる。本節では示さなかったが、積乱雲の雲頂高度が FL300 を超える超過確率や、LGT以上の乱気流が予測される超過確率、風の予測誤差が大きい領域の予測などにも MEPS 航空悪天 GPV が利用できると考えられる。前項で述べた点に留意し、空域予報などに有効に活用していただきたい。

参考文献

- 井藤智史, 2018a: 着氷指数. 数値予報課報告・別冊第 64号, 気象庁予報部, 219-225.
- 井藤智史, 2018b: 積乱雲量・雲頂高度. 数値予報課報告・別冊第64号, 気象庁予報部, 226-232.
- 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, 気象庁航空気象管理官, 11–18.
- 工藤淳, 2018a: 乱気流指数. 数値予報課報告・別冊第 64号, 気象庁予報部, 204-218.
- 工藤淳, 2018b: 国内航空悪天 GPV および LFM 航空 悪天 GPV の改良. 平成 30 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 32-41.

2.5 その他のガイダンス (降雪、風、発雷確率) 1

2.5.1 はじめに

前節までに MEPS を入力としたガイダンスなどの応用プロダクトである、気温ガイダンス・降水ガイダンス・航空悪天 GPV について解説してきた。本節では、第 2.1 節の MEPS ガイダンスのうち、降雪ガイダンス・風ガイダンス・発雷確率ガイダンスについて紹介する。本節で紹介するガイダンスは、統計検証や事例検証についてこれから新たな知見が蓄積されていくプロダクトではあるが、これまでの検証から得られた結果や利用方法について紹介する。

次項から降雪ガイダンス、風ガイダンス、発雷確率ガイダンスの順に仕様と統計検証を述べる。仕様では各 MEPS ガイダンスで作成する要素と作成方法を、統計検証では MSM ガイダンスとの予測特性の違いを中心に述べる。降雪ガイダンスと発雷確率ガイダンスについては、統計検証の後で事例を紹介する。最後に、第2.5.5 項でガイダンス毎の利用上の留意点をまとめる。

2.5.2 降雪ガイダンス

(1) 仕様

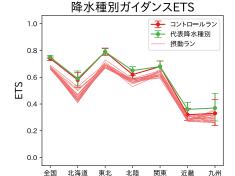
MEPS 降雪ガイダンスでは、MSM 降雪ガイダンスと同様に降水種別、降雪量(格子)²、降雪量地点の3つのガイダンスを作成する。各ガイダンスは対応するMSM ガイダンスと同じ手法を MEPS の各メンバーに適用することにより作成する。ただし、降雪量地点ガイダンスではニューラルネットワークおよび頻度バイアス補正の係数に MSM ガイダンスの係数を利用し、MEPS 降雪ガイダンスでは係数更新を行わない。予測手法の詳細については土田 (2018a) を参照頂きたい。

(2) 統計検証

MEPS 降雪ガイダンスの統計検証の結果を示す。はじめに降水種別ガイダンスの予報要素および超過確率の検証結果、次に降雪量(格子)、降雪量地点の順に両ガイダンスの予報要素の検証結果、最後に降雪量(格子)および降雪量地点ガイダンスの超過確率の検証結果を示す。検証期間は 2018 年 12 月~2019 年 2 月である。

降水種別ガイダンス

全国の地上気象官署(特別地域気象観測所を含む)における天気の観測を降水種別とした降水種別ガイダンスの検証結果を示す。まず、降水種別のカテゴリ検証の結果を示す。地上気温の観測値が −3 ~5 °C かつ



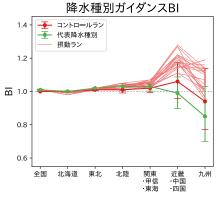


図 2.5.1 降水種別ガイダンスの雪予測の地域別 ETS(上) および BI(下)の比較。赤線は各メンバー(太線がコントロールラン、細線が摂動ラン)、緑線は代表降水種別で、それぞれ左から全国、北海道、東北、北陸、関東・甲信・東海、近畿・中国・四国、九州の順に地域ごとの検証結果を示す。エラーバーはブートストラップ法による 95%信頼 区間を示す。

降水(みぞれ・あられなどは除く)が観測されている場 合(天気が霧雨、地雨、しゅう雨、地雪、しゅう雪の 場合)のみを検証対象とし、降水種別を「雨」と「雪」 の2カテゴリに分類して実施した。実況の降水種別は、 天気が霧雨、地雨、しゅう雨を「雨」、地雪、しゅう雪 を「雪」とし、予報の降水種別は、「雨か雪」を「雨」、 「雪か雨」を「雪」として扱う。なお、アンサンブルメ ンバーを代表する降水種別(以下、代表降水種別)は、 「雨か雪」または「雨」のメンバーが半数以上を占めれ ば「雨」、「雪か雨」または「雪」のメンバーが半数以 上を占めれば「雪」であるとした検証結果を示す。検 証地点の予報値には最近接格子の値を用いた。また、 検証は 00, 06, 12, 18UTC 初期値の FT=15 ~ 36 に対 して実施した。図 2.5.1 に「雪」予測を現象あり、「雨」 予測を現象なしとした地域別のエクイタブルスレット スコア (ETS) およびバイアススコア (BI) を示す。

代表降水種別について、ETS は北陸と西日本でコントロールランを上回っており、雪予測を改善する。そのほかの地域ではコントロールランと同等である。BI は北陸でコントロールランより高く、雪予測を増やしている一方、西日本ではコントロールランよりも低く、雪

¹ 小林 大輝 (第 2.5.1 項、第 2.5.5 項)、土田 尚侑 (第 2.5.2 項、第 2.5.4 項)、井藤 智史 (第 2.5.3 項)

² これまで「最大降雪量ガイダンス」と呼称していたが、本テキスト以降は「降雪量ガイダンス」と呼称する。ただし、本節のように降雪量地点ガイダンスと区別する必要がある場合は「降雪量(格子)ガイダンス」と格子形式のガイダンスであることを注記する。

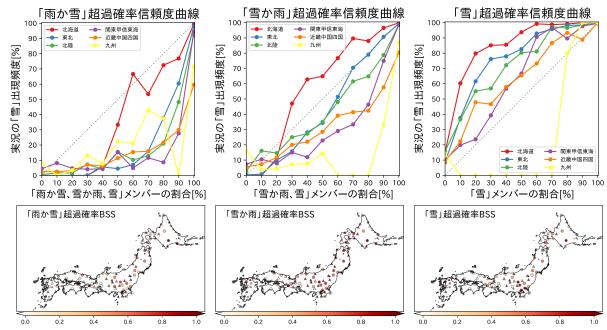


図 2.5.2 降水種別ガイダンスの雪予測に対する超過確率の信頼度曲線(上段)と BSS のスコアマップ(下段)。左から「雨か雪」超過確率、「雪か雨」超過確率、「雪」超過確率の順に示す。信頼度曲線は赤線が北海道、青線が東北、緑線が北陸、紫線が関東・甲信・東海、橙線が近畿・中国・四国、黄線が九州の各地域毎の検証結果を示す。BSS のスコアマップで丸印は有人官署、三角印は特別地域気象観測所を表し、灰色の点は検証期間中に対象となるカテゴリを超える予測と雪の観測がともになかった地点を表す。

予測を減らしている。そのほかの地域ではコントロールランと同等である。コントロールランでは BI が 1 を超えていた近畿・中国・四国では 1 に近づき適切な頻度での予測となったが、1 を下回っていた九州では予測頻度がより過小な傾向となっている。なお、西日本で雪予測を減らしているにもかかわらず ETS がコントロールランを上回っているのは、捕捉数を維持しつつ空振りを減らしているためである(図略)。

摂動ランについて、各メンバーのETS はコントロールランと比較して全国的に低くなっており、統計的な予測精度は低いことがわかる。各メンバーのBI は北日本ではコントロールランと同等であるが、東日本~西日本ではコントロールランよりも大きく予測頻度が過大になっている³。

次に「雪」の観測に対して各カテゴリを超える超過確率の検証結果を示す。検証対象の初期値や観測値による対象事例の抽出方法はカテゴリ検証と同じである。図 2.5.2 に、実況の「雪」出現頻度に対する「雨か雪」・「雪か雨」・「雪」を予測したメンバーの割合(以下、「雨か雪」超過確率)、「雪か雨」・「雪」を予測したメンバーの割合(以下、「雪か雨」超過確率)、「雪」を予測したメンバーの割合(以下、「雪」超過確率)の地域別の信頼度曲線および BSS のスコアマップを示す。

「雨か雪」超過確率の信頼度曲線は北海道の 60%以上では傾き 45 度の理想直線に近く比較的予測頻度が適切であるが、北海道の 50%以下とそのほかの地域では理想直線の下にあり、予測頻度が過大である。「雪か雨」超過確率の信頼度曲線は東北の 70%以上では理想直線上にあり予測頻度が適切である。北海道では 30%以上で理想直線より上にあり予測頻度が過小、東北の 60%以下とそのほかの地域では理想直線の下にあり予測頻度が過大である。「雪」超過確率の信頼度曲線は実況の事例がなかった九州の 70%以下を除き理想直線の上にあり、予測頻度が過小である。

ここで各カテゴリを超える超過確率のBSSのスコアマップ⁴を比較すると、北海道から近畿・中国・四国までは「雪か雨」超過確率のスコアが高く、九州では「雪」超過確率のスコアが高い地点が多い。地域ごとにまとめて検証した結果では、北海道、東北、北陸、関東・甲信・東海は「雪か雨」超過確率、近畿・中国・四国は「雪か雨」超過確率および「雪」超過確率、九州では「雪」超過確率のスコアがそれぞれ最も高くなっている(図略)。この結果は各地域の信頼度曲線が最も理想直線に近くなるカテゴリとも対応が良い。各地域でBSSが最も高くなるカテゴリの超過確率を、代表降水

³ 北日本ではコントロールランと比べて空振り事例と見逃し 事例がどちらも多い一方で、東日本〜西日本ではコントロー ルランと比べて空振り事例のみが多く、見逃し事例は同等の ためである(図略)。

⁴ 自動観測地点では地上気温などに応じた雨雪判別を行うが、雨雪予測が難しい0℃付近では「みぞれ」が観測される事が多い。しかし「みぞれ」は検証対象に含まれないことから、自動観測地点では目視観測地点よりも BSS が高めの傾向があることに留意していただきたい。

種別による雪予測の補助資料としていただきたい。

以上より降水種別ガイダンスでは、代表降水種別を 用いてカテゴリ予測を行った場合に統計的な予測精度 が最も高くなる。また、北海道、東北、北陸、関東・甲 信・東海では「雪か雨」超過確率、近畿・中国・四国 では「雪か雨」または「雪」超過確率、九州では「雪」 超過確率を目安とすることで雪予測の補助資料として 利用できる。

降雪量(格子)ガイダンス

全国のアメダス地点で観測された 1 時間積雪深差から求めた降雪量を観測値とした 6, 12, 24 時間の降雪量 (格子) ガイダンスの検証結果を示す。まずアンサンブル平均および摂動ランの検証結果について、図 2.5.3 および図 2.5.4 に降雪量閾値別の ETS および BI を示す。検証地点の予測値は、検証地点の周囲の 4 格子点の値を線形内挿することにより求めた。検証対象は 00, 06, 12, 18UTC 初期値で、予報時間は 6 時間降雪量が FT= $9\sim30$ 、12 時間降雪量が FT= $15\sim36$ 、24 時間降雪量が FT= $27\sim36$ を対象とした。

アンサンブル平均について、ETS は 6, 12, 24 時間降雪量のそれぞれで 3 cm/6h, 5 cm/12h, 10 cm/24h 程度までの降雪量を閾値とした場合はコントロールランと同等であるが、それ以上の降雪量を閾値とした場合にはコントロールランを下回っている。BI は 6, 12, 24 時間降雪量のそれぞれで 3 cm/6h, 5 cm/12h, 10 cm/24h程度まではコントロールランより高く、それよりも大きな降雪量閾値では低くなっている。アンサンブル平均では各メンバー予測値が平滑化されるため、強い降雪が予測されにくい。

摂動ランについて、ETS はほぼすべての降雪量閾値に対してコントロールランを下回っており、統計的な予測精度は低い。BI は概ねコントロールランの周りでばらついているが、6, 24 時間降雪量のそれぞれで30 cm/6h, 40 cm/24h 以上および 12 時間降雪量の 30 ~ 40 cm/12h を閾値とした場合にはコントロールランよりも低くなる傾向が見える。

次にアンサンブル最大の検証結果について、図 2.5.5 に降雪量閾値別の捕捉率、図 2.5.6 に降雪量閾値別の ETS と BI を示す。検証設定はアンサンブル平均および摂動ランと同様だが、各初期値、予報時間に対し都道府県毎5の最大の予測値と観測値を用いた検証を実施した(地域最大の予測精度検証)。

アンサンブル最大の捕捉率は全閾値でコントロールランを上回っており、コントロールランで予測できていない大雪を捕捉可能なことがわかる。また、ETS は 6時間降雪量の 7 cm/6h 以上でコントロールランを上回っており、12,24 時間降雪量でも 15 cm/12h,30 cm/24h以上でコントロールランと同等か上回っていることか

ら、都道府県単位を対象とした大雪可能性の検討資料として利用できると考えられる。また、6 時間降雪量はコントロールランの BI が大雪予測に対して 1 を大きく下回っているため、アンサンブル最大で BI が 1 に近づき適切な予測頻度となっている。そのため、6 時間降雪量は都道府県単位の短時間の大雪に対する定量的な資料としても利用可能である。

以上より、降雪量(格子)ガイダンスはアンサンブル最大を用いた大雪可能性の検討資料として利用できる。特に6時間降雪量では定量的な大雪予測資料としても利用できる。ただし地点単位規模では予測頻度がかなり過大となるため(図略)、今回検証図を示した都道府県単位(北海道は地方単位)規模以上での利用を推奨する。

降雪量地点ガイダンス

全国のアメダス地点で観測された 1 時間積雪深差から求めた降雪量による 6, 12, 24 時間の降雪量地点ガイダンスの検証結果を示す。まずアンサンブル平均および摂動ランの検証結果について、図 2.5.7 および図 2.5.8 に降雪量閾値別の ETS および BI を示す。検証対象の初期値、予報時間は降雪量(格子)ガイダンスと同様である。

アンサンブル平均について、ETS は 6 時間降雪量では 7 cm/6h 程度まではコントロールランを上回っているか同等であるが、それ以上の降雪量を閾値とした場合はコントロールランを下回る。一方 12, 24 時間降雪量は全ての閾値でコントロールランを上回っているか同等である。BI は 6, 12, 24 時間降雪量のそれぞれで 3 cm/6h, 5 cm/12h, 10 cm/24h 程度まではコントロールランよりも高く、それよりも大きな降雪量閾値では低くなっており、アンサンブル平均することで強い降雪が予測されにくくなることを示している。なお、第 1.4 節でも示されている通りアンサンブル平均では予測値が平滑化されるため、予測の不確実性が大きい現象は表現できない。降雪量地点ガイダンスでも予測のばらつきが大きな事例では大雪が表現できないため、アンサンブル平均の利用は推奨しない。

摂動ランについて、ETS はほぼすべての降雪量閾値に対してコントロールランを下回っている。BI は概ねコントロールランの周りでばらついているが、6,12,24時間降雪量のそれぞれで30 cm/6h,30 cm/12h,40 cm/24h以上を閾値とした場合にはコントロールランよりも低くなる傾向が見える。

次にアンサンブル最大の検証結果について、図 2.5.9 に降雪量閾値別の捕捉率、図 2.5.10 に降雪量閾値別の ETS と BI を示す。検証設定は降雪量(格子)ガイダンスと同様である。

アンサンブル最大の捕捉率は全閾値でコントロール ランを上回っており、コントロールランで予測できて いない大雪を捕捉可能なことがわかる。しかしながら

⁵ 北海道は地方毎。関東および東海の太平洋側と四国、九州 は検証対象外。

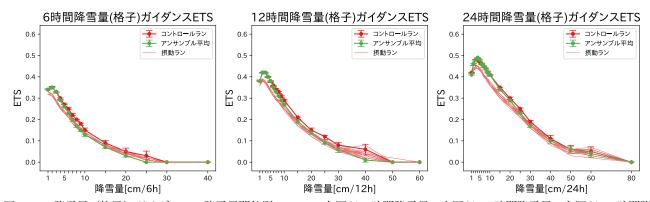


図 2.5.3 降雪量(格子)ガイダンスの降雪量閾値別の ETS。左図が 6 時間降雪量、中図が 12 時間降雪量、右図が 24 時間降雪量を対象とした検証で、線種は図 2.5.1 と同じである。

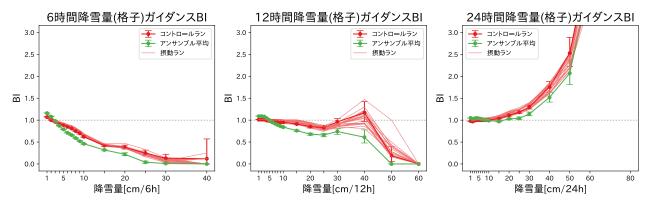


図 2.5.4 降雪量(格子)ガイダンスの降雪量閾値別の BI。図の見方は図 2.5.3 と同じ。

ETS は全閾値でコントロールランを下回っており、定量的な資料としてはコントロールランを改善しない。BIがコントロールランよりもかなり大きく予測過大傾向を示しており、捕捉の改善よりも空振りの増加の影響が大きいと考えられる。コントロールランの時点で捕捉率が高いことから、アンサンブル最大では予測過大となる事例が多いと考えられる。低気圧の接近に伴う降雪事例など、予測のばらつきが大きくコントロールランでの捕捉率が比較的低い事例において、大雪可能性の検討資料として利用いただきたい。

以上より、降雪量地点ガイダンスでは予測のばらつきが大きい事例において、アンサンブル最大がコントロールランの補助資料となり、都道府県単位規模以上での大雪可能性の検討に利用できる。降雪量(格子)ガイダンスのアンサンブル最大よりも捕捉率が高いことから、降雪量(格子)ガイダンスのアンサンブル最大が示す大雪範囲を広げる場合の検討資料などに利用いただきたい。

降雪量超過確率

降雪量(格子) および降雪量地点ガイダンスの超過 確率の検証結果を示す。検証対象の初期値は00,06,12, 18UTCで、予報時間は信頼度曲線が各ガイダンスの検 証と同じFTを、予報時間別のBSSは6時間降雪量が ${
m FT}=9\sim39$ 、12 時間降雪量が ${
m FT}=15\sim39$ 、24 時間降雪量が ${
m FT}=27\sim39$ のそれぞれ 3 時間毎を対象とした。図 2.5.11 に 6, 12, 24 時間降雪量の超過確率の信頼度曲線と予報時間別 BSS を示す。それぞれ破線が降雪量(格子)ガイダンス、実線が降雪量地点ガイダンスである。

信頼度曲線を見ると、両ガイダンスとも図に示した 全閾値について傾き45度の理想直線より下にあり、予 測頻度が過大であることがわかる。また、閾値が大き いほど理想直線から下に離れており、予測頻度がより 過大になる。ただし両ガイダンスを同じ閾値同士で比 較すると、降雪量地点ガイダンスの方が理想直線に近 く、超過確率と実況の出現頻度との対応が良い。ここ で予報時間別の BSS を見ると、両ガイダンスを同じ閾 値同士で比較した時に降雪量地点ガイダンスの方が予 測精度が高く、また降雪量地点ガイダンスの方がより 大きな閾値まで BSS>0 であり気候値予測に対して予 測スキルを持っていることがわかる。面的な確率分布 を降雪量(格子)ガイダンスで把握し、超過確率の値 は降雪量地点ガイダンスを用いて大雪可能性を検討す るといった利用方法が有効であると考えられる。ただ し、予測のばらつきが大きい事例では、アンサンブル 平均によって現象が平滑化されるように、超過確率は 各地点において低い値を示すことしかできず、有効に

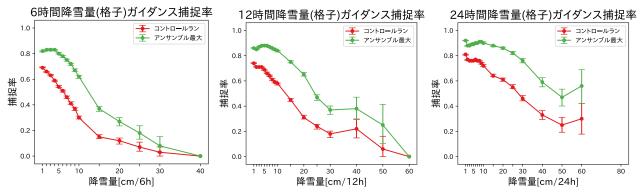


図 2.5.5 降雪量(格子)ガイダンスのアンサンブル最大の降雪量閾値別の捕捉率。左図が 6 時間降雪量、中図が 12 時間降雪量、右図が 24 時間降雪量を対象とした検証で、赤線がコントロールラン、緑線がアンサンブル最大である。エラーバーはブートストラップ法による 95%信頼区間を示す。

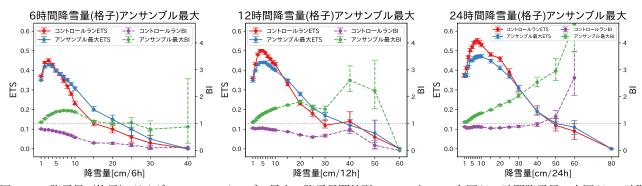


図 2.5.6 降雪量(格子)ガイダンスのアンサンブル最大の降雪量閾値別の ETS と BI。左図が 6 時間降雪量、中図が 12 時間降雪量、右図が 24 時間降雪量を対象とした検証で、赤線がコントロールランの ETS、青線がアンサンブル最大の ETS で、紫線がコントロールランの BI、緑線がアンサンブル最大の BI である。エラーバーはブートストラップ法による 95%信頼区間を示す。

利用することはできない。そのような事例では降雪量(格子)および降雪量地点ガイダンスのアンサンブル最大を利用して大雪可能性を検討いただきたい。なおここで示した検証結果は全国を対象としたものであるが、地域別で見ると降雪量地点ガイダンスが気候値予測に対して予測スキルを持つ閾値は北海道で10 cm/12h、東北で30 cm/12h、北陸、関東・甲信・東海、近畿・中国・四国で20~30 cm/12h 程度までである(図略)。

(3) 事例

最後に、降雪量(格子)および降雪量地点ガイダンスでアンサンブル最大が大雪可能性を示すことができた事例を紹介する。図 2.5.12 は 2018 年 2 月 5 日から7日にかけて北陸地方の平野部を中心に大雪となった事例について、石川県から福井県にかけて降雪が強まった時間帯の予測事例である。6 日 03UTC までの 12 時間で石川県から福井県にかけての平野部で 40 cm を超える大雪を観測したが、MSM ガイダンスは平野部では 40 cm を超える降雪は予測できなかった。また、特に降雪が強まる位置の予測は降雪量(格子)ガイダンスでは南側にずれていた。これに対し MEPS ガイダンスのアンサンブル最大は降雪量(格子)、地点ガイダ

ンスともに 40 cm を超える値を予測しており、コントロールランの予測値よりも大雪となる可能性を示していた。また、降雪量(格子)ガイダンスでは実際に大雪となった石川県~福井県の平野部で降雪が特に強まる可能性を示すことができている。

2.5.3 風ガイダンス

(1) 仕様

MEPS 風ガイダンスでは、国内のアメダス観測地点および空港地点の地上風を予測している。ガイダンスの種類として、正時の風速と風向を予測する定時風ガイダンス、前3時間または前1時間内の最大風速とその風向を予測する最大風速ガイダンス、前3時間内にガストが発生する確率を予測するガスト発生確率ガイダンス、前1時間内のガスト風速とその風向を予測するガスト風速ガイダンス、前1時間内の最大瞬間風速とその風向を予測する最大瞬間風速ガイダンスがある。

MEPS 風ガイダンスの作成手法は、MSM 風ガイダンスと同じ手法を用いているため詳しい内容は松本(2018)を参照して頂きたい。なお、MEPS 風ガイダンスの係数は MSM 風ガイダンスで学習した係数を利用し、各アンサンブルメンバーに同じ係数を使用して

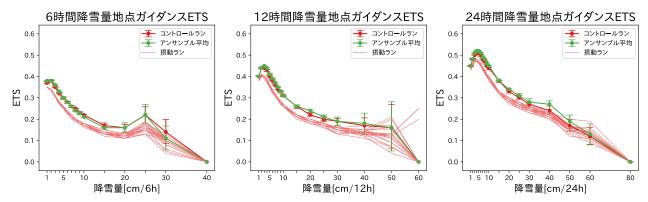


図 2.5.7 降雪量地点ガイダンスの降雪量閾値別の ETS。図の見方は図 2.5.3 と同じ。

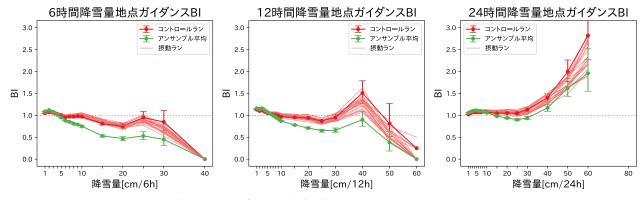


図 2.5.8 降雪量地点ガイダンスの降雪量閾値別の BI。図の見方は図 2.5.3 と同じ。

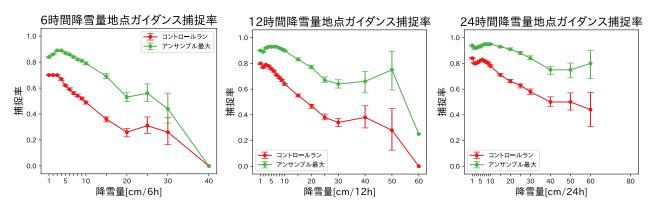


図 2.5.9 降雪量地点ガイダンスのアンサンブル最大の降雪量閾値別の捕捉率。図の見方は図 2.5.5 と同じ。

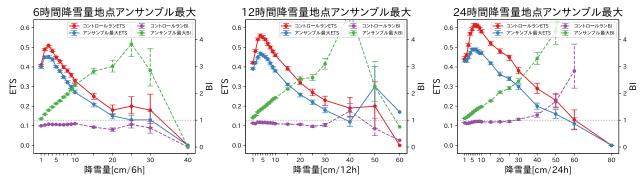


図 2.5.10 降雪量地点ガイダンスのアンサンブル最大の降雪量閾値別の ETS と BI。図の見方は図 2.5.6 と同じ。

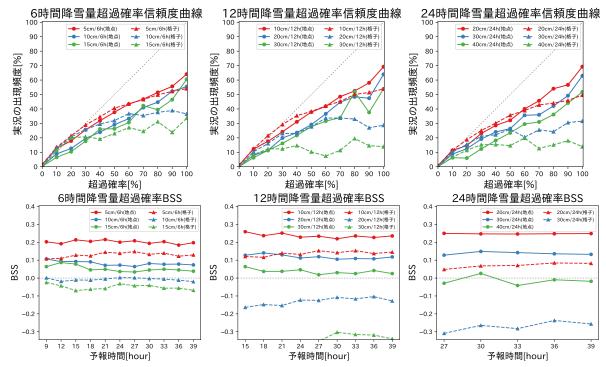


図 2.5.11 降雪量(格子)ガイダンスおよび降雪量地点ガイダンスの超過確率の信頼度曲線(上段)と予報時間別の BSS(下段)。 左図が6時間降雪量、中図が12時間降雪量、右図が24時間降雪量を対象とした検証を示す。破線が降雪量(格子)ガイダンス、実線が降雪量地点ガイダンスを示し、それぞれ6時間降雪量は赤線が5 cm/6h、青線が10 cm/6h、緑線が15 cm/6h、12時間降雪量は赤線が10 cm/12h、青線が20 cm/12h、緑線が30 cm/12h、24時間降雪量は赤線が20 cm/24h、青線が30 cm/24h、緑線が40 cm/24hを関値とした超過確率の検証結果を示す。(降雪量(格子)ガイダンスの40 cm/24hの検証結果は負の方向に大きくスケールアウトしているため非表示とした。)

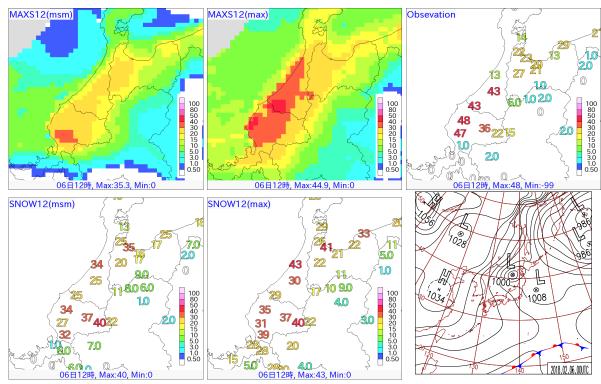


図 2.5.12 2018 年 2 月 6 日 03UTC を対象とした 12 時間降雪量の予測事例。予測の初期時刻は 4 日 18UTC。上段左から MSM 降雪量(格子)ガイダンス、MEPS 降雪量(格子)ガイダンスのアンサンブル最大、アメダスによる前 1 時間積雪深差の 12 時間積算値、下段左から MSM 降雪量地点ガイダンス、MEPS 降雪量地点ガイダンスのアンサンブル最大、6 日 00UTC の日本域地上天気図。降雪量の単位は [cm/12h]。

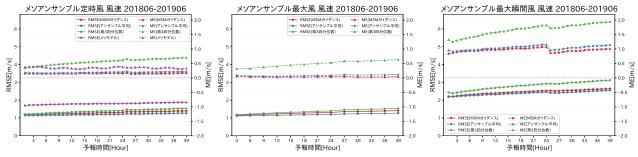


図 2.5.13 予報時間毎の風速の RMSE (実線) と ME (破線)。(左) 定時風、(中) 最大風、(右) 最大瞬間風。赤線が MSM ガイダンス、青線がアンサンブル平均、緑線が第 3 四分位数、紫線がメソモデルのスコアを示す。

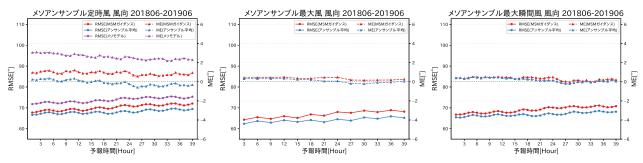


図 2.5.14 図 2.5.13 と同じ。ただし、予報時間毎の風向のスコアを示す。

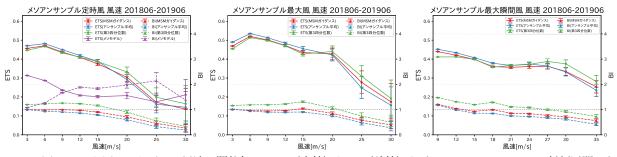


図 2.5.15 図 2.5.13 と同じ。ただし、風速の閾値毎の ETS (実線) と BI (破線) を示し、エラーバーは 95%信頼区間である。

いる。

(2) 統計検証

MEPS 風ガイダンスの統計検証の結果を示す。検証期間は2018年6月5日から2019年6月4日までの1年間で、アメダス地点での検証である。検証には00,06,12,18UTC初期値のガイダンスを用いた。空港地点のMEPS 風ガイダンスは作成開始が2019年2月であり、検証期間が短いことから本項では省略する。

図 2.5.13 に、予報時間毎の風速の二乗平均平方根誤差 (RMSE) と平均誤差 (ME) を示す。左から定時風、最大風、最大瞬間風のガイダンスの検証結果を示している。定時風ガイダンスの結果を見ると、ME は MSM ガイダンス (赤線) が最も 0 に近く、次いでアンサンブル平均⁶ (青線) が 0 に近くなっている。第 3 四分位数⁷ (緑線) は最も正バイアスが大きくなっている。

RMSE は、アンサンブル平均が最も小さく、MSM ガイダンス、第3四分位数、メソモデルの順に大きくなる。また、予報時間初期は RMSE にあまり差はないが、予報時間が先になるほどそれぞれのスコアの差が大きくなっており、アンサンブル平均の優位性が高くなることが分かる。このことは、最大風、最大瞬間風のガイダンスの結果でも同様である。

図 2.5.14 に、予報時間毎の風向の RMSE と ME を示す。こちらは全てのガイダンスで ME, RMSE ともに、アンサンブル平均 8 が最もスコアが良い。

以上から、基本的には MEPS 風ガイダンスのアンサンブル平均を利用すれば、統計的には最も予測精度が高くなると言える。ただし、風速の閾値毎の ETS とBI を示した図 2.5.15 を見ると、風速 20 m/s 未満ではアンサンブル平均の ETS が最も高いが、20 m/s 以上では第 3 四分位数の方が ETS は高くなっている。これは、風ガイダンスでは風速が 20 m/s 以上では BI が 1

⁶ 風速のアンサンブル平均は、メンバー毎の風速をスカラー 平均して求めた。ベクトル平均するよりも精度が良かったた め、スカラー平均としている。

⁷ 第3四分位数は、アンサンブルメンバー毎の風速を小さい順に並べた時の75%に位置する値として求めた。

⁸ 風向のアンサンブル平均は、メンバー毎の風の単位ベクトルを平均して求めた。ベクトル平均するよりも精度が良かったため、単位ベクトル平均としている。

より小さくなっており、アンサンブル平均を取ることで、さらに BI が小さくなるためである。第 3 四分位数は捕捉率が高く(図略)、アンサンブル平均や MSM ガイダンスより BI が 1 に近いので ETS が高い。このため、常にアンサンブル平均を利用するのではなく、風速 20 m/s 以上の強風が予測されるような場合では、第 3 四分位数の利用も検討して欲しい。

2.5.4 発雷確率ガイダンス

(1) 仕様

MEPS 発雷確率ガイダンス(以下、MEPS-PoT)は、MEPS を入力とし MSM 発雷確率ガイダンス(以下、MSM-PoT)と同様の手法で作成する。ただし MEPS-PoT 独自で係数は作成せず、MSM-PoT の係数を各メンバーの予測に適用する。また、LAF (Lagged Average Forecast) 法による重み付け平均はコントロールランのみ行い、摂動メンバーでは実施しない。MEPS-PoT のLAF では過去 2 初期値のそれぞれ FT=39 までを利用し、最新初期値と過去初期値を 2 対 1 の割合で重み付け平均を行う9。そのほか予測手法の詳細は土田 (2018b)を参照頂きたい。

(2) 統計検証

MEPS-PoT の統計検証の結果を示す。なお、MEPS-PoT のコントロールランと MSM-PoT の LAF を適用 した予測値はわずかに異なるが、統計的な精度は同一 のため検証図では MEPS-PoT のみ示す。図 2.5.16 は MEPS-PoT のコントロールラン、アンサンブル平均、 摂動ランの予測精度比較で、閾値別の ETS、予報時間別 の BSS、信頼度曲線を示している。検証期間は 2018 年 6月5日~2019年6月4日である。検証対象は00,06, 12, 18UTC 初期値で、ETS と信頼度曲線は FT=15 ~ 36 を、予報時間別の BSS は FT=6 ~ 39 の 3 時間毎を それぞれ対象とした。まず図 2.5.16 (a) より、MEPS-PoT のコントロールラン、アンサンブル平均、摂動ラ ンはいずれも発雷確率 20%を閾値とした検証で ETS が ピーク値をとり、20%を閾値として発雷の有無を判断 した場合にそれぞれの予測精度が最も良いことがわか る。したがって、MEPS-PoT と MSM-PoT の間で判 断の閾値を変更することなく利用できる。

続いてアンサンブル平均の精度を確認する。図 2.5.16 (b) より、信頼度曲線が理想直線よりも上にあり、実況の出現頻度よりも低めの確率となる傾向があることがわかる。また、その傾向はコントロールランよりも強い。図 2.5.16 (c) からは、BSS はコントロールランと同等か、予報時間の後半ではコントロールランをやや上回っていることがわかる。ここで図 2.5.16 (a) を見ると、閾値 10 ~ 20%まではコントロールランの ETS

を上回っているが、25%以上では逆にコントロールランを下回っていることがわかる。信頼度曲線からもわかる通りアンサンブル平均することにより高い確率値が予測されにくくなるため、高確率を閾値とした場合には見逃しが増えてしまう。その一方で空振りを大きく減らすことができ、10~20%を閾値とすればコントロールランよりも多くの発雷を捕捉することができる。以上のようにアンサンブル平均の発雷予測精度は統計的にはコントロールランと同等か、予報後半でコントロールランを上回っている。一般に予報時間が長いほど予測のばらつきは大きいことから、高確率を閾値とした場合の空振りを減らし、低確率を閾値とした場合の空振りを減らし、低確率を閾値とした場合の空振りを減らし、低確率を閾値とした場合の空振りを減らし、低確率を閾値とした場合の空振りを減らし、低確率を閾値とした場合の空振りを減らしていては不確実性が取り込まれた情報として参考にできる可能性がある。

最後に摂動ランについて、信頼度曲線は理想直線よ りも下にあり、実況の出現頻度よりも高めに確率を予 測する傾向があることがわかる。また、BSS はコント ロールランを下回っていることから、ある固定のメン バーを常に利用しつづけた場合にはコントロールラン を改善しない。その一方で、閾値50%以上では摂動ラ ンの ETS はコントロールランと同等であることがわか る。これは閾値50%以上を発雷の判断基準とした場合 には、摂動ランは空振りが増えるものの、コントロール ランよりも多くの発雷を捕捉できていることを意味す る。ここで、発雷の有無の判断閾値である20%を境と して、GSM ガイダンス(以下、GSM-PoT)が 20%以 上、MSM-PoTが20%未満を予測しているような事例 を考える。土田 (2018b) に示されている通り高確率を 閾値とした場合は GSM-PoT の ETS が MSM-PoT を 上回る。このような事例で GSM-PoT の BSS は FT 後 半については MSM–PoT を上回るものの、FT 前半で は MSM-PoT の方が高いため GSM-PoT を採用する ことが難しい場合が多い。このとき、MEPS-PoTの アンサンブル最大を判断基準とすることで、FT 前半 も含めて GSM-PoT を採用することが可能である。図 2.5.17 は GSM-PoT が 20%以上、MSM-PoT が 20%未 満を予測している事例を対象とした、GSM-PoT およ び MSM–PoT の予報時間別の BSS である。図 2.5.17 (b), (c) に示したとおり、アンサンブル最大の予測値 20%以上を閾値として GSM-PoT を採用すれば MSM-PoT を改善可能であり、予測値 50%を閾値とした場合 に MSM-PoT に対する GSM-PoT の改善率が最も大 きくなる。

(3) 事例

MSM-PoT と GSM-PoT で予測が異なった場合に、 MEPS-PoT メンバーの予測が参考となった事例を紹介する。図 2.5.18 は 2018 年 6 月 24 日 15JST を対象 とした事例で、北海道では寒冷前線の通過に伴い発雷 が観測された。この北海道での発雷予測に着目すると、

⁹ ガイダンス実行の初期値間隔が MSM-PoT とは異なるため、LAF 法の重み付けの仕様は MEPS-PoT のコントロールランと MSM-PoT で統一していない。このため両者の予測結果にはわずかながら差が生じる。

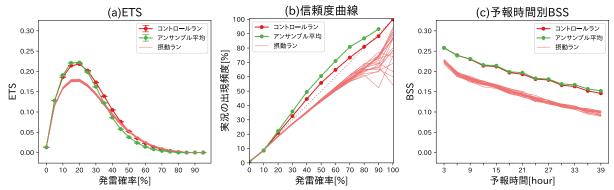


図 2.5.16 検証期間 2018 年 6 月 5 日~2019 年 6 月 4 日を対象とした MEPS-PoT の精度比較。(a) は閾値別の ETS、(b) 信 頼度曲線、(c) は予報時間別の BSS で、赤線が各メンバー(太線がコントロールラン、細線が摂動ラン)、緑線がアンサンブル平均を示す。(a) のエラーバーはブートストラップ法による 95%信頼区間を表す。

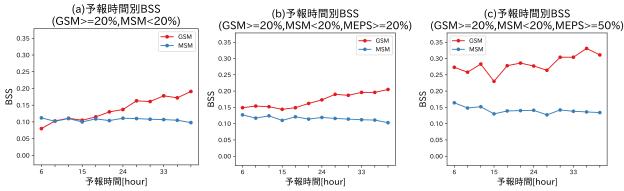


図 2.5.17 GSM-PoT が 20%以上かつ MSM-PoT が 20%未満である事例を対象とした予報時間別の BSS。検証期間は 2018 年 6 月 5 日~2019 年 6 月 4 日で、検証対象は GSM, MSM ともに 00, 06, 12, 18UTC 初期値。(a) は MEPS-PoT を参照せずに各ガイダンスを利用した場合、(b) は MEPS-PoT のアンサンブル最大が 20%以上の条件で各ガイダンスを利用した場合、(c) は MEPS-PoT のアンサンブル最大が 50%以上の条件で各ガイダンスを利用した場合の検証結果を示す。

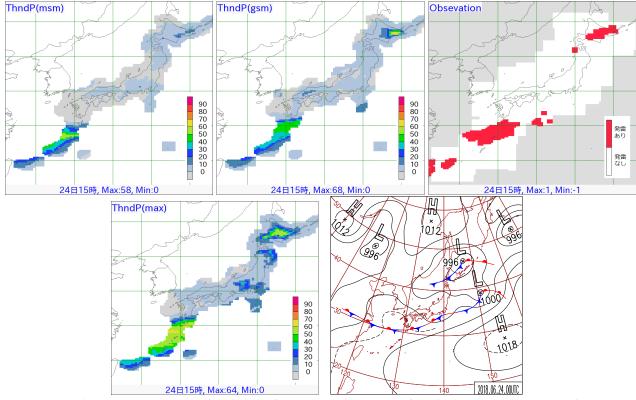


図 2.5.18 2018 年 6 月 24 日 06UTC の前 3 時間を対象とした予測事例。予測の初期時刻は 23 日 00UTC。上段左から MSM-PoT[%]、GSM-PoT[%]、発雷実況、下段左から MEPS-PoT[%] のアンサンブル最大、2018 年 6 月 24 日 00UTC の日本域地上天気図。発雷実況は赤い格子が発雷ありを示す。

GSM-PoT は範囲は狭いが高い確率値を予測している一方で、MSM-PoT は確率値が低く、予測範囲も狭い。このとき MEPS-PoT のアンサンブル最大を確認すると、北海道に高い確率値が予測されていた。このような場合、北海道地方の発雷確率については GSM-PoT の予測を採用することで、MSM-PoT の予測を改善することが可能である。また、前線に伴う発雷が観測された鹿児島県の種子島や屋久島付近についても同じ理由で GSM-PoT の予測を採用することで MSM-PoT の予測を改善できる。

2.5.5 まとめ

各ガイダンスについて、利用上の留意点を中心にま とめを記す。

降雪ガイダンス

降水種別ガイダンスでは、代表降水種別を用いてカテゴリ予測を行った場合に、統計的な予測精度でMSMガイダンスを改善する。また、雨雪判別の確率的予測資料として、北海道、東北、北陸、関東・甲信・東海では「雪か雨」超過確率、近畿・中国・四国では「雪か雨」または「雪」超過確率、九州では「雪」超過確率が利用できる。

降雪量(格子)ガイダンスおよび降雪量地点ガイダンスではアンサンブル最大を大雪可能性の検討資料として利用できる。まず降雪量(格子)ガイダンスで面的な大雪範囲を検討し、より捕捉率の高い降雪量地点ガイダンスによりその範囲を広げる検討を行うといった利用方法を推奨する。なお、6時間降雪量(格子)ガイダンスのアンサンブル最大は7 cm/6h以上の降雪について MSM ガイダンスの予測精度を上回るため、短時間の大雪に対する定量的な予測資料としても利用できる。利用上の留意点として、アンサンブル最大は地点単位規模では予測頻度がかなり過大なため、都道府県単位での最大値を見るなど、ある程度の広さの中で利用していただきたい。また、降雪量地点ガイダンスについては特に予測頻度が過大となることから、主に予測のばらつきが大きい事例での大雪捕捉に利用いただきたい。

降雪量超過確率は降雪量(格子)ガイダンスよりも 降雪量地点ガイダンスの方が予測精度が高いことから、 面的な確率分布を降雪量(格子)ガイダンスの超過確 率で把握し、超過確率の値には降雪量地点ガイダンス を用いて大雪可能性を検討するといった利用方法を推 奨する。利用上の留意点として、予測のばらつきが大 きい事例では超過確率は低い値しか示すことができな いため、そのような事例ではアンサンブル最大を利用 して大雪可能性を検討していただきたい。

風ガイダンス

MEPS 風ガイダンスでは、基本的にアンサンブル平

均の方が MSM 風ガイダンスより予測精度が高いが、風速 20 m/s 以上の強風時には第 3 四分位数の方が予測精度が高くなる。このため、常にアンサンブル平均を利用するのではなく、強風が予測される場合は予測地点の箱ひげ図を見るなど、第 3 四分位数の予測も活用していただきたい。

発雷確率ガイダンス

アンサンブル平均は MSM ガイダンスと比べると確 率値と実況出現率との対応が悪くなるが、発雷の予測 精度は MSM ガイダンスを改善する。10~20%を閾値 に MSM ガイダンスの補足情報として利用いただきた い。摂動ランは50%以上を閾値とすることで統計的に は MSM ガイダンスと同等の予測精度で利用できる。 ただし、各メンバーの予測値をその都度検討すること は難しいことから、アンサンブル最大を MSM ガイダ ンスを改善するための補助資料として利用いただきた い。例えば、GSM ガイダンスで 20%以上の予測があ るが MSM ガイダンスでは 20%未満の場合に、MEPS ガイダンスのアンサンブル最大が20%以上であれば、 当該地域では MSM ガイダンスではなく GSM ガイダ ンスを利用した方が予測精度が高い。また、MEPS ガ イダンスのアンサンブル最大の閾値を50%以上とすれ ば、実況との対応がさらに良くなる。

以上のように、必ずしもアンサンブル平均の精度が良いというわけではなく、比較的強い現象を予測する場合は風ガイダンスのように第3四分位数の予測を利用するなど、利用方法を検討する必要があり、今後の開発課題となっている。本節で紹介した MEPS ガイダンスについて、現象の強さを予測するために有効な情報を提供できるよう開発を続けている。

参考文献

土田尚侑, 2018a: 降雪ガイダンス. 数値予報課報告・別冊第64号, 気象庁予報部, 119–131.

土田尚侑, 2018b: 発雷確率ガイダンス. 数値予報課報告・別冊第64号, 気象庁予報部, 165-176.

松本智文, 2018: 風ガイダンス. 数値予報課報告・別冊 第 64 号, 気象庁予報部, 144-153.

第3章 観測データ利用の改良及びメソ・局地数値予報システムの改良

3.1 全球解析における観測データ利用の改良1

3.1.1 はじめに

本節では、2018年4月から2019年3月までの間に 気象庁全球数値予報システムに導入した、観測データ の利用に関する各改良項目について述べる。

3.1.2 ひまわり 8 号のバンド 9, 10 及び Meteosat のチャンネル 6 の晴天放射輝度温度 (CSR: clear-sky radiance) データの追加利用

(1) はじめに

気象庁全球解析 では、日本の静止気象衛星ひまわ り、米国の GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) 2 機、及び、欧州の Meteosat2 機 の計5機の静止気象衛星による観測データからそれぞ れ作成される CSR のデータを同化している。CSR と は、静止気象衛星に搭載された赤外イメージャにより 観測された輝度温度データを、ある領域(ひまわり8 号の場合は約32 km × 32 km) の晴天域だけについて 平均した輝度温度の値である。主な目的は、対流圏の 水蒸気に関する情報を持つ水蒸気バンドの CSR を同 化することで、初期値における水蒸気場の解析精度を 向上させることである。ひまわり8号には水蒸気バン ドが3つ (バンド8,9,10)、Meteosat には水蒸気チャ ンネルが2つ(チャンネル5,6)あるが、本改良によ り未使用となっていたひまわり 8 号バンド 9,10 の陸 域の CSR データ 2 、Meteosat のチャンネル 6 の CSR データを追加利用することとした。これらのバンド・ チャンネル³ (以下、チャンネル) の CSR データを利 用するために必要な品質管理手法の改良を行った。以 下、CSR の利用チャンネル拡大のための新しい品質管 理手法の概要と、上記の改良を適用した実験の結果に ついて報告する。

(2) 品質管理手法の改良

今回、追加利用したチャンネルの波長帯は、これまで利用してきたチャンネルよりも下層まで感度がある。そのため、冬期の中国大陸上など大気が非常に乾燥し、水蒸気量が少ない場合には、地表面からの放射の影響が無視できなくなる。そこで、地表面からの放射の影響をより正確に見積もるために、計算輝度温度4の算出

¹ 第 3.1.1 項 村田 英彦、第 3.1.2 項 岡部 いづみ、第 3.1.3 項 村田 英彦、亀川 訓男 に必要な地表面に関する 2 種類のデータを、より現実を反映したものに変更した。1 つ目は地表面射出率で、これまで利用していた固定値 (0.90) から、季節変化や地表面の植生の違いを反映した気候値を利用するよう変更した。2 つ目は地表面温度で、これまでの気象庁全球モデルの地表面温度予測値に替えて、窓チャンネル5の CSR データから算出した地表面温度を使うよう変更した。

また、標高の高い領域では大気中に存在する水蒸気量が通年で少なく CSR データが持つ水蒸気に関する情報が希薄である割に、モデルと現実の地形の差に起因する第一推定値の誤差が大きく同化の効果が小さいことから、モデル標高が 4000 m以上の地点⁶において全ての CSR データを利用しない変更も併せて行った。さらに、GOES と Meteosat の CSR データに適用していた 2 時間ごとの時間間引き処理を廃止し、ひまわり8号と同様に 1 時間毎に同化するよう変更した⁷。

(3) 解析・予測への影響

2018年6月時点の全球数値予報システムと同等の設定とする全球解析予報サイクル実験を CNTL, CNTL に (1), (2) で示した変更を加えた実験を TEST とした。実験期間は、2017年6月10日~10月11日と 2017年11月10日~2018年3月11日である。以下、第一推定値に関する検証の統計期間は実験期間始めの10日間は含まず、予測値に関する検証の統計期間は夏は 2017年7月~9月、冬は2017年12月~2018年2月の各3か月とした。

図3.1.1 に、本改良とは独立な観測データで、CNTL, TEST 共通に利用しているマイクロ波水蒸気サウンダ MHS (Microwave Humidity Sounder) と、マイクロ波気温サウンダ AMSU-A (Advanced Microwave Sounding Unit-A) の観測値と第一推定値の差 (FG departure) の標準偏差の TEST の CNTL に対する変化率を示す。図から TEST では、CNTL よりも FG departure の標準偏差が小さくなったことがわかる8。特に対流圏の水蒸気に感度のある MHS でその変化は大きい。これは、TEST に加えられた改良により、第一推定値の水蒸気場が改善し、他の観測データと整合するように変化したことを意味する。冬期間について実施した CNTL、TEST の結果からも、同様に第一推定値と他の観測デー

² 陸域では輝度温度同化のための放射計算に与える地表面温度や地表面射出率の第一推定値が十分な精度を持っていることが確認されていなかったため、これらのデータは未使用としていた(計盛 2016)。

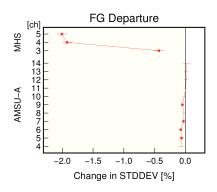
³ それぞれの静止気象衛星運用機関が各々のイメージャの仕様を説明する際の呼称であり、本質的な違いはない。

⁴ CSR などの輝度温度データを同化する際に第一推定値として使われる値。計算には RTTOV v10 (Hocking et al. 2010) という放射伝達モデルを利用している。

[・]中心波長 10~11 μm の大気の透過率の高いチャンネル。ひまわり 8 号のバンド 13、Meteosat-8, -11 のチャンネル 9。・主にチベット高原が該当する。

⁷ 時間間引き処理の導入当時より静止気象衛星の世代交代が進み CSR の水平解像度が向上したことに伴い、時間方向の観測誤差相関が減少したと考えられるため、ひまわり 8 号の CSR は利用開始時から 1 時間ごとの同化とした。これを他の衛星の CSR にも適用した。

⁸ 標準偏差の減少と併せて、利用データ数の増加も確認した。



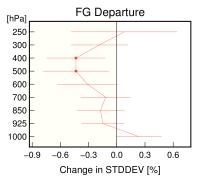


図 3.1.1 TEST の CNTL に対する FG departure 標準偏差 (STDDEV) の変化率 [%]。上図がマイクロ波水蒸気サウンダ MHS とマイクロ波気温サウンダ AMSU-A、下図が ラジオゾンデ観測データの相対湿度。エラーバーは 95%信頼区間、丸印は変化率の正負が統計的に有意な差であることを示す。縦軸はチャンネル [ch] または気圧高度 [hPa]。統計期間は、2017 年 6 月 20 日~10 月 11 日。

タとの整合性の向上が見られた(図略)。第一推定値は、ひとつ前のサイクルにおける解析値を初期値とした短時間予測値であることから、その精度向上は解析値の精度向上を示唆する。さらに、CNTL, TESTに対して共に独立な参照値として、複数の他数値予報機関の解析値を使用し予測精度検証を実施した。その結果、熱帯・中緯度の対流圏中層を中心に、比湿等の2日予測までの精度が改善したことが確認された。ここでは、欧州中期予報センター(ECMWF)解析値9に対する検証結果を示す(図 3.1.2)。冬期間の実験でも同様の結果が確認された(図略)。

(4) まとめ

気象庁全球解析において、以下の変更を加え実験を 行った。

- ひまわり8号水蒸気バンド9,10の陸域でのCSR を追加利用する。
- Meteosat の水蒸気チャンネル6の CSR データを 追加利用する。
- ひまわり 8 号と Meteosat の CSR 全チャンネルの 計算輝度温度算出の際に用いる地表面射出率と地

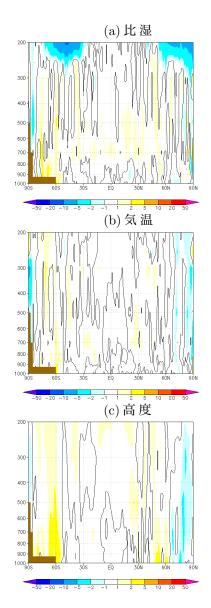


図 3.1.2 対 ECMWF 解析値検証における 48 時間予測値の改善率 [%] の緯度別鉛直分布。ECMWF の解析値を参照値とした二乗平均平方根誤差について、 (CNTLTEST) / CNTL を改善率とした。正の値(暖色)は改善、負の値(寒色)は改悪を意味する。気象要素は (a) 比湿、(b) 気温、(c) 高度。縦軸は気圧 [hPa]、横軸は緯度。黒曲線は、ゼロ値の等値線。茶色の部分はデータのない南極大陸付近についてマスキングした領域を示す。検証期間は 2017 年 7 月から 9 月の 3 か月間。

表面温度を変更する。

- Meteosat と GOES に適用していた時間間引き(2 時間ごと)を廃止し毎時データを利用する。
- 標高 4000 m 以上の地点で全 CSR を利用しない。 その結果から、上記の改良により対流圏の第一推定 値の水蒸気場の精度が改善したことが示された。また、 ECMWF 等他センターの解析値検証の結果から、熱帯・ 中緯度の対流圏中層を中心に比湿などの 2 日予測まで の精度が改善したことが示された。2018 年 10 月 18 日 より、本改良を数値予報現業システムに適用した。

 $^{^9}$ 世界天気研究計画 (WWRP) の下で実施されている TIGGE (https://doi.org/10.1175/2010BAMS2853.1) の データを利用。

3.1.3 NOAA-20 搭載 ATMS および CrIS 輝度温度 データの利用開始

(1) はじめに

2017 年 11 月 18 日に打ち上げられた NOAA-20 は、米国海洋大気庁 (NOAA) の次世代現業極軌道 衛星 JPSS (Joint Polar Satellite System) シリーズ 衛星の 1 号機で、JPSS シリーズの準備衛星である Suomi-NPP (Suomi National Polar-orbiting Partnership) (2011年10月28日打ち上げ) と同様のセンサー が搭載されている。気象庁では既に、Suomi-NPP 搭載 のマイクロ波サウンダ ATMS (Advanced Technology Microwave Sounder) および、ハイパースペクトル赤外 サウンダ CrIS (Cross-track Infrared Sounder) の輝度 温度データを 2017年3月29日より全球解析で利用し ており (平原 2017; 亀川・計盛 2017)、NOAA-20 につ いても ATMS および CrIS の輝度温度データの利用を 2019年3月5日より開始した。本項では、新規に利用 を開始したこれらのデータによる解析・予測への影響 について解説する。

(2) ATMS および CrIS について

ATMS および CrIS は、いずれもサウンダ(鉛直探査計)と呼ばれるタイプのセンサーである。衛星に搭載されたサウンダは、複数の波長で地球大気や地表面からの放射強度(輝度温度)を測定することにより、大気における気温や水蒸気の鉛直分布に関する情報を広範囲にわたって取得することができるため、数値予報にとっては非常に重要な観測手段である(岡本 1999)。

ATMSを含むマイクロ波サウンダは、酸素の60 GHz 吸収帯や水蒸気の183 GHz 吸収帯などを用い、気温や水蒸気の鉛直分布に関する情報を取得するセンサーである。ATMS は、米国の現業極軌道衛星シリーズ NOAA や欧州の現業極軌道衛星シリーズ Metop 等に搭載された気温サウンダ AMSU-A および水蒸気サウンダ MHS の後継センサーで、これらのセンサーと概ね同等の波長帯を合わせた22 チャンネルで構成されている。ATMSの主要諸元については、岡本(2007)にまとめられているほか、ATMSの利用方法の詳細については平原(2017)に記載されているので参照されたい。2019 年10 月時点で、ATMS については気温チャンネル6-9(主に対流圏の気温に感度)および水蒸気チャンネル18-22(主に対流圏中上層の水蒸気量に感度)をデータ同化に利用している。

CrIS を含むハイパースペクトル赤外サウンダは、赤外波長帯に高い波数分解能で数千ものチャンネルを有しており、二酸化炭素や水蒸気などの吸収帯を用いて気温や水蒸気の鉛直分布に関する情報を取得するセンサーである。CrIS を含むハイパースペクトル赤外サウンダの主要諸元については、岡本 (2011) にまとめられているほか、CrIS の利用方法の詳細については亀川・計盛 (2017) に記載されているので参照されたい。2019

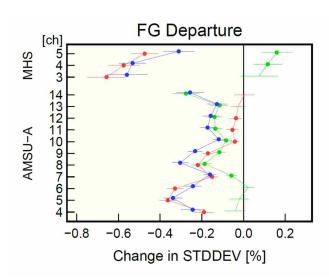


図 3.1.3 マイクロ波気温サウンダ AMSU-A およびマイクロ波水蒸気サウンダ MHS に関する、FG departure (観測値と第一推定値の差)の標準偏差 (STDDEV)のコントロール実験に対する変化率。NOAA-20/ATMS のみを追加した実験(TEST1、赤線)、NOAA-20/CrIS のみを追加した実験(TEST2、緑線)、NOAA-20/ATMS およびCrIS を合わせて追加した実験(TEST3、青線)についての結果。横軸は変化率 [%] 、縦軸はチャンネル番号。エラーバーは95%信頼区間、丸印は変化率の正負が統計的に有意であることを示す。統計期間は2018年8月1日~10月31日。統計対象領域は全球。

年 10 月時点で、CrIS については、数値予報での利用を目的に全 2211 チャンネルから抽出して作成・配信されている 431 チャンネルのデータセットのうち、気温に感度のある 27 チャンネルをデータ同化に利用している。

なお、ATMS および CrIS ともに、今後も NOAA の JPSS シリーズ衛星に搭載予定であり、当庁の数値予報システムでも継続してデータを利用する予定である。

(3) データ品質および同化設定

NOAA-20 のデータ品質については、全球数値予報システムを用いた計算輝度温度との比較調査により、Suomi-NPP と比較して、ATMS の気温チャンネルはノイズが少なく品質が若干良いこと、水蒸気チャンネルは同程度の品質であることが確認された。また CrISについても同程度以上の品質が確認された。

間引き距離や観測誤差といった同化に用いる設定値は、Suomi-NPPとのデータ品質の差異が同程度または若干の改善程度であったことから、既に利用中のSuomi-NPPと同じ値を適用した。ただし、スキャンバイアス補正量(観測視野ごとの補正量)については衛星・センサー固有の値が必要なため、上記の調査結果から統計処理により求めた。

NOAA-20 の追加による利用データ数は、Suomi-NPP の観測と重複する領域においてどちらか一方の衛星のデータのみを使用するという間引きが適用され

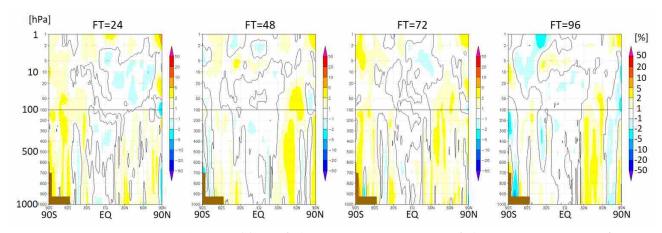


図 3.1.4 NOAA-20/ATMS および CrIS を追加した実験 (TEST3) の、コントロール実験 (CNTL) に対するジオポテンシャル高度の改善率 [%] の緯度別鉛直分布。それぞれの実験の解析値を参照値とした二乗平均平方根誤差 (RMSE) について、(CNTL-TEST3) / CNTL を改善率とした。正の値(暖色)は改善、負の値(寒色)は改悪を意味する。左図から予測時間 24 時間、48 時間、72 時間および 96 時間を対象とした結果。黒曲線は、ゼロ値の等値線。図中の茶色の部分はデータのない 南極大陸付近についてマスキングした領域を示す。統計期間は 2018 年 8 月 1 日~10 月 31 日。

た結果、ATMS および CrIS のいずれについても、追加前のデータ量と比較して 1.8 倍程度となった。

(4) 解析・予測への影響

NOAA-20/ATMS および CrIS の解析・予測への影響を確認するため、2018年夏季を対象に全球解析予報サイクル実験を実施した。NOAA-20 を利用しない実験(コントロール実験、CNTL)に対し、NOAA-20/ATMS のみを追加した実験(TEST1)、NOAA-20/CrIS のみを追加した実験(TEST2)、ならびに NOAA-20/ATMS および CrIS を同時に追加した実験(TEST3)をそれぞれ実施した。検証期間は 2018年8月1日~10月31日とした。

上記の NOAA-20 データを追加した各実験におい て、利用された観測データの FG departure の標準偏 差のコントロール実験に対する変化率を確認した(図 3.1.3)。ここでは、各実験において共通に利用されてい て、ATMS や CrIS と同様に気温や水蒸気の鉛直分布に 感度があり、今回は利用方法を変更していない AMSU-A および MHS についての結果に着目する。変化率が 負の場合は、追加されたデータにより第一推定値が観 測データと整合するように変化したことを意味し、観 測データに対する第一推定値の誤差が減少し、精度が 改善したことを示す。第一推定値の精度向上は、解析 予報サイクルを通じて同化される観測値の影響を受け た結果であり、解析値の精度が向上したことを示唆す る。NOAA-20/ATMS のみを追加した実験(TEST1、 赤線)では、ATMSで同化した気温チャンネル 6-9 に 相当する AMSU-A のチャンネル 5-8 (主に対流圏の気 温に感度)を中心に、標準偏差の減少が確認できる。ま た水蒸気チャンネル 18-22 に相当する MHS のチャン ネル 3-5 (主に対流圏中上層の水蒸気量に感度) の標 準偏差の減少も確認できる。NOAA-20/CrIS のみを追 加した実験(TEST2、緑線)では、雲域の影響を受けない成層圏に感度のある CrIS のチャンネルが多く利用されたことに対応し、AMSU-A のチャンネル 8-14 (主に成層圏の気温に感度)を中心に標準偏差の減少が確認できる。NOAA-20/ATMS および CrIS を合わせて追加した実験(TEST3、青線)では、ATMS、CrIS それぞれを単体で追加した効果を合算したような結果となり、ここに示した AMSU-A および MHS の全チャンネルにわたって標準偏差の減少が確認できる。その他の観測データについても、AMSU-A や MHS にみられた結果に整合的な標準偏差の減少が確認できた(図省略)。

予測への影響について、NOAA-20/ATMS および CrIS を追加した実験 (TEST3) における、ジオポテンシャル高度予測の解析値に対する二乗平均平方根誤差 (RMSE) の改善率の緯度別鉛直分布を図 3.1.4 に示す。中緯度帯を中心に対流圏から成層圏にわたって全体的に改善しており、特に北半球で顕著であった。

(5) まとめと今後

NOAA-20 に搭載されているマイクロ波サウンダ ATMS およびハイパースペクトル赤外サウンダ CrIS の輝度温度データを利用した全球解析予報サイクル実験を実施した。その結果、第一推定値における他の観測データとの整合性の向上により、解析値における気温や水蒸気量の誤差の減少が示唆されたほか、予測値では主に中緯度帯において対流圏から成層圏にわたるジオポテンシャル高度の精度向上が確認できた。この結果を受け、2019年3月5日より、NOAA-20の ATMS および CrIS 輝度温度データの全球数値予報システムでの利用を開始した。

今後の課題として、ATMS に関しては、概ね成層圏 に感度のあるチャンネル 10–15 (AMSU-A のチャンネ

ル9-14 に相当)の利用が挙げられる。2019 年 10 月時点の利用方法では、上記の ATMS チャンネルの利用により、既存の AMSU-A 観測値において第一推定値との整合性が悪化する傾向を示すことから (平原 2017)、バイアス補正の見直しなど適切な対処が必要と考えられる。CrIS に関しては、水蒸気に感度のあるチャンネルの利用が今後の課題として挙げられる。さらには、メソ解析や局地解析における ATMS、CrIS の利用開始に向けた開発や、観測誤差の最適化、観測誤差相関の考慮などの課題について取り組む必要がある。

参考文献

- 岡本幸三, 1999: サウンダ. 数値予報課報告・別冊第 45 号, 気象庁予報部, 44-72.
- 岡本幸三, 2007: ATOVS 直接同化. 数値予報課報告・ 別冊第 53 号, 気象庁予報部, 57-70.
- 岡本幸三, 2011: ハイパースペクトル赤外サウンダ. 数値予報課報告・別冊第 57 号, 気象庁予報部, 25-36.
- 計盛正博, 2016: ひまわり 8 号晴天放射輝度温度の利 用開始. 平成 28 年度数値予報研修テキスト, 気象庁 予報部, 46–49.
- 亀川訓男, 計盛正博, 2017: 全球解析における Suomi-NPP/CrIS 輝度温度データの利用開始. 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 73–74.
- 平原洋一, 2017: 全球解析における Suomi-NPP/ATMS 輝度温度データの利用開始. 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 70-72.
- J. Hocking and P. Rayer and R. Saunders and M. Matricardi and A. Geer and P. Brunel, 2010: RT-TOV v10 Users Guide. NWPSAF-MO-UD-023, EUMETSAT.

3.2 メソ解析における観測データ利用の改良及び メソ数値予報システムにおける北西太平洋高 解像度日別海面水温解析の利用開始¹

3.2.1 はじめに

気象庁メソ数値予報システムに、2019 年 3 月 26 日 に次の 5 つの改良を導入した。

- 静止気象衛星ひまわり8号から算出される晴天放 射輝度温度 (CSR: clear-sky radiance) データの利 用拡大(第3.2.2項)
- 高解像度のマイクロ波散乱計 Advanced Scatterometer (ASCAT) 海上風データの利用開始 (第 3.2.3 項)
- 航空機気温データバイアス補正の導入 (第3.2.4項)
- 地上 GNSS (Global Navigation Satellite Systems)² 可降水量データの利用手法の改良 (第 3.2.5 項)
- 北西太平洋高解像度日別海面水温解析 (HIMSST) の利用開始 (第 3.2.6 項)

本節では、これらの改良の概要や解析・予報への影響を解説し、第3.2.7項にて、全ての変更を加えた実験結果を示す。最後に第3.2.8項で、本節のまとめを示す。

3.2.2 ひまわり 8 号のバンド 9, 10 の CSR データ の追加利用

メソ解析では、ひまわり8号による観測データから

作成した水蒸気バンド 8 (中心波長は 6.2 μm) の CSR データを利用してきた (計盛 2016)。この水蒸気バン ド8は、主に対流圏上層の水蒸気の情報を持つバンド である。今回、第3.1.2項で示した全球解析における CSR の利用高度化で採用した手法と同じ品質管理手法 を適用し、メソ解析でも、バンド8より下層の水蒸気の 情報を持つバンド 9, 10 (中心波長はそれぞれ 6.9 μm, 7.3 µm)の CSR データを利用開始した。観測誤差や グロスエラーチェックの閾値は、メソ解析においてバ ンド8のCSRに適用しているものと同じ設定とした。 ひまわり 8 号バンド 9, 10 の CSR を同化すること により、対流圏中下層の水蒸気場の改善が期待される。 期待される効果が見られるか確認するため、2018年10 月時点の現業メソ数値予報システムと同等の実験シス テムをベース(以下、ベース実験)として、それにひ まわり8号バンド9,10のCSRを利用するよう変更を 加えた実験(以下、追加実験)を夏(2017年6月27 日~7月31日)·冬(2017年12月11日~2018年1月 15日)のそれぞれ約1か月間実施した。その結果、他 の対流圏の水蒸気場に感度のある観測データの観測値 と第一推定値の差 (FG departure) の標準偏差が、追加実験ではベース実験と比較し減少したことが確認された。対流圏水蒸気場に感度のある観測データの例として、ベース実験と追加実験で共に利用されているマイクロ波水蒸気サウンダ (MHS: Microwave Humidity Sounder) の FG departure の標準偏差の変化率と、追加実験でのひまわり 8 号バンド 9 の CSR 利用データ数の水平分布を図 3.2.1 に示す。夏・冬期間とも、それぞれ CSR の利用データ数が多い領域とその周辺で、MHS の FG departure の標準偏差の減少が顕著に見られる。これは、追加したバンドの CSR の同化により、第一推定値の水蒸気場が改善したことを示している3。

3.2.3 高解像度 ASCAT 海上風の利用開始

マイクロ波散乱計(以下、散乱計)は、地球に向かってマイクロ波を放射して地表面での後方散乱強度を測定する能動型の測器で、海面の状態を介して海上の風ベクトルを推定することができる⁴。メソ解析では 2015 年12 月より、オランダ王立気象研究所 (KNMI: the Royal Netherlands Meteorological Institute) により作成された ASCAT 海上風プロダクトをデータ同化に利用している (守谷 2016)。ASCAT は欧州気象衛星開発機構が運用する極軌道衛星 Metop シリーズに搭載されている散乱計であり、現在、Metop-A 衛星および Metop-B 衛星による ASCAT 海上風プロダクトを利用している。2018 年 11 月に打ち上げられた Metop-C 衛星による ASCAT 海上風プロダクトも今後利用する予定である。

プロダクト作成元の KNMI では海上風を導出する際の空間平滑化の処理の違いにより、「25 km 風プロダクト」と「沿岸風プロダクト」と呼ばれる2種類の水平解像度の ASCAT 海上風プロダクトを配信している。今回、メソ解析において、これまで利用していた25 km 風プロダクトに代えて、新しくより高解像度な沿岸風プロダクトの利用を開始した。沿岸風プロダクトは12.5 km 間隔で風ベクトルを算出しており、25 km 風プロダクトと比較してデータは密に存在するが、観測誤差の空間的な相関を除去するために従来通り0.5°間隔で間引き処理を行う。このため、利用される海上風データの空間密度は変わらないが、より海岸近くまでデータが利用できるため、全体的に利用されるデータ数は増加する(図3.2.2)。

¹ 太田 行哉、岡部 いづみ、小屋松 進、西本 秀祐、谷 寧人 (企画課防災企画室)

² 全球航法衛星システム。米国の全球測位システム GPS (Global Positioning System) を含む国際的な測位衛星システムの総称。

³ 同化する観測データを増やした場合、解析値はその観測データに寄り、他の観測データへは近づいたり遠のいたりするが、それぞれの観測値の誤差を考慮した上で尤もらしい値を算出したのが解析値なので、観測データへの整合性の変化から解析値の精度の変化を評価するのは難しい。短時間予測である第一推定値は、解析値や観測値より誤差が大きいため、改良とは独立の観測データとの整合性が向上すれば、それは解析精度が改善したからであると考えることが出来る。

⁴ 散乱計の詳細な観測原理については太原 (1999) を参照。

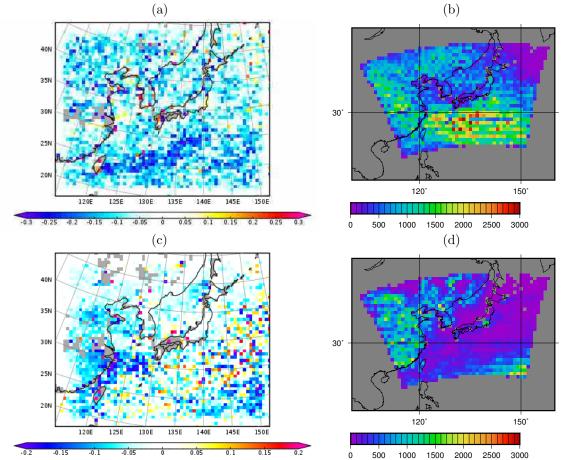


図 3.2.1 (a), (c) はマイクロ波水蒸気サウンダのチャンネル 4 において、ベース実験に対するバンド 9, 10 追加実験の FG departure の標準偏差の変化率 [%]。(b), (d) はバンド 9, 10 追加実験における、ひまわり 8 号バンド 9 の CSR 利用データ 数。統計期間は、(a), (b) が 2017 年 6 月 27 日~7 月 31 日(夏期間)、(c), (d) が 2017 年 12 月 11 日~2018 年 1 月 15 日 (冬期間)。

3.2.4 航空機気温データバイアス補正の導入

航空機の気温データには、機体毎に固有のバイアス があることが知られている (Ballish and Kumar 2008)。 全球解析では機体・高度別に気温データの FG departure の前月統計値からバイアス補正値を算出して、当月の 航空機気温データを補正する手法 (酒匂 2010) を 2010 年に導入した。メソ解析おいても FG departure の統 計から、日本付近の航空機気温データのバイアスがラ ジオゾンデ気温データと比較して全体的に高温バイア スである(図3.2.3)ことから、バイアス補正の必要性 が生じている。そこで、メソ解析に全球解析で算出し たバイアス補正値を利用する手法を導入した。この手 法は全球モデルの第一推定値のバイアスに依存するが、 各機体の気温データには気象場によらず一定のバイア スが生じていることが多いこと、打ち切り時間が長い 全球解析の方が統計に必要なサンプル数が多いこと、 後で示すようにメソ解析でもバイアス補正の効果が見 られたことから、この手法を採用することにした。

このバイアス補正手法の効果を確認するため、2018 年 6 月 12 日から 7 月 21 日までのデータ同化実験を実施 した。図 3.2.4 に、航空機気温データの FG departure 統計値のバイアス補正導入前実験とバイアス補正導入 後実験の比較図を示す。バイアス補正によって、航空 機気温データの高温バイアスが減少した。さらに、バ イアス補正をすることで、各データの第一推定値に対 するばらつきが小さくなり、FG departure の標準偏差 も大幅に減少した。航空機気温データのバイアスは一 律に高温ではなく、機体によって異なったバイアス量 を持つため、FG departure のばらつきの要因となって いたためである。

3.2.5 地上 GNSS 可降水量データの利用手法の改良

メソ解析と局地解析では、国土地理院の整備するGEONET (GNSS Earth Observation NETwork system)から取得した約1300地点の地上 GNSS 観測点のデータから、気象官署の地上気圧、地上気温データを用いて可降水量データを算出し同化している。小司・国井(2008)や石川(2010)は、降水域の地上 GNSS 可降水量データには第一推定値に対して負バイアスを持っていることを示した。そのため、2009年10月28日からのメソ解析における GNSS 可降水量データの利用開始時には、解析雨量で1.5 mm/h以上の降水が観測された地点では、可降水量データを使用しないこととし

ていた。

しかし、近年の GNSS 可降水量データを用いた再調 査では、第一推定値に対する負バイアスが見られないこ とがわかった。図 3.2.5 に、2018 年 8 月の現業メソ解析 で降水域と判定された可降水量データの FG departure ヒストグラムを示す。比較のために非降水域の可降水 量データも載せている。この調査の結果、降水域の可 降水量データにはバイアスが認められなかった。調査 可能な 2015 年 6 月以降、現在までの可降水量データ でも同様であった。観測機器や可降水量データ算出ア ルゴリズムは利用開始当時から変わらないため、バイ アスが見られなくなった要因は、主に第一推定値側の 変化であると考えられる。近年の数値予報システムの 改良によって、モデルの降水域における水蒸気の表現 が改善したためと推測される。これらの結果を受けて、 メソ解析での解析雨量による品質管理処理を廃止し、 降水域を含めた可降水量データの利用を開始した。

併せて、2018年3月に気象庁で入手したGEONET

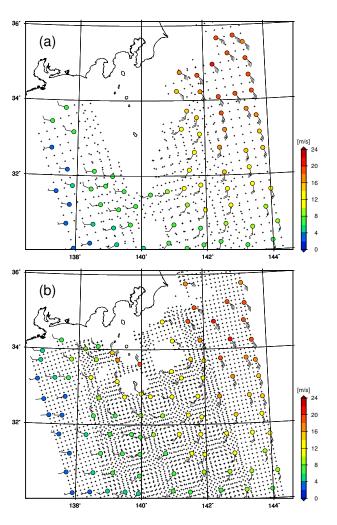


図 3.2.2 2016 年 8 月 16 日 12UTC のメソ解析における (a) ASCAT 25 km 風プロダクト、および (b) 沿岸風プロダクトのデータ分布。品質管理または間引き処理によりデータ 同化に利用されないデータを黒十字で、同化に利用されるデータを風速 [m/s] に応じた色つきの丸と矢羽で表す。

FG departure profile of aircraft and radiosonde temperature

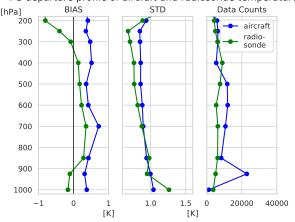


図 3.2.3 日本付近にある航空機気温データの FG departure 統計の鉛直分布(青)とラジオゾンデ気温データの FG departure 統計の鉛直分布(緑)。左から、FG departure の平均 (BIAS)、標準偏差 (STD)、データ数 (Data Counts)。航空機気温データはラジオゾンデ観測時刻に近い 00UTCと 12UTC 付近を選んでいる。統計期間は 2018 年 6 月 12日から 7 月 21 日まで。

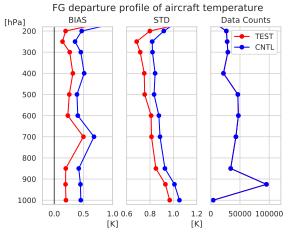


図 3.2.4 日本付近の航空機気温データの FG departure 統計の鉛直分布。バイアス補正導入後実験(赤)とバイアス補正導入前実験(青)。図の並びや統計期間は図 3.2.3 と同じ。航空機気温データは全時刻を用いて、データ数はどちらの実験もほぼ変わらない。

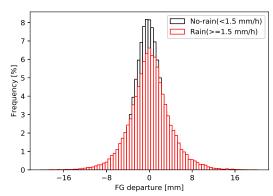


図 3.2.5 地上 GNSS 可降水量データの FG departure ヒストグラム。非降水域 (黒) と降水域 (赤)。統計期間は 2018 年 8 月の 1 か月。

観測の地点数が約100地点増加したため、可降水量データの品質に問題がないことを確認し、それらの地点を追加利用した。

3.2.6 HIMSST の利用開始

(1) 変更の概要

メソ数値予報システムの下部境界条件に使われている海面水温 (SST: Sea Surface Temperature) を、全球日別海面水温解析 (MGDSST: Merged satellite and in-situ data Global Daily Sea Surface Temperature; 栗原ほか 2006) から北西太平洋高解像度日別海面水温解析 (HIMSST: High-resolution Merged satellite and in-situ data Global Daily Sea Surface Temperature; 気象庁地球環境海洋部 2016) に変更した。HIMSST は MGDSST が利用している観測データに加えてひまわり 8 号の高解像度・高頻度の観測データを用いて計算した海面水温解析である。

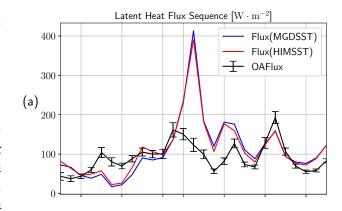
(2) メソモデル (MSM) における SST の役割

SST は海上における数値予報モデルの下部境界条件の役割を持ち、海面と大気の間の熱・水蒸気の輸送(潜熱・顕熱フラックス)等の計算に用いられる。詳細については草開(2012)等を参照されたい。

(3) SST 変更によるインパクト

HIMSST, MGDSST はどちらも解析対象時刻以前の観測データを用いて解析時刻における SST を計算している。そのため SST の変動が観測船やブイによる観測データよりも遅れる傾向があり、HIMSST や MGDSSTをもとに計算する顕熱・潜熱フラックス等の精度に影響を与えている。しかし、HIMSST はひまわり 8号の高頻度な観測データを用いることにより、MGDSST よりも SST 変動の遅れが小さいことが分かっている (気象庁地球環境海洋部 2016)。SST を HIMSST に変更したことにより、潜熱フラックスの対 OAFlux (Objectively Analyzed air-sea heat Fluxes) 意差に減少が見られた。その実例を 1 つ示す。

図 3.2.6 (a) は、2018 年 7 月 2 日に台風第 7 号が通過した 28.5°N、127.5°E の地点における潜熱フラックスの時系列図である。2018 年 6 月 19 日から 7 月 15 日における、SST にそれぞれ MGDSST、HIMSST を用いた場合の MSM の FT=6 の潜熱フラックスと OAFlux 解析値をプロットしている。同様に図 3.2.6 (b) は同じ地点における SST の時系列図であり、それぞれ MGDSST、HIMSST、MGDSST 遅延解析6をプロットしている。



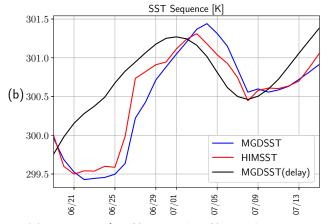


図 3.2.6 2018 年 6 月 19 日から 7 月 15 日までの、28.5°N, 127.5°E における (a) 潜熱フラックス [Wm⁻²] と (b) SST[K] の時系列。(a) において、青、赤はそれぞれ SST に MGDSST, HIMSST を用いた場合の FT=6 における MSM の潜熱フラックス、黒は OAFlux 解析値を表す。また (b) において、青、赤、黒はそれぞれ MGDSST, HIMSST, MGDSST 遅延解析の値を表す。

台風の接近に伴い MGDSST 遅延解析では 7 月 1 日 ごろから海面水温の低下を表現し始めるのに対して、HIMSST は 7 月 3 日ごろから、MGDSST は 7 月 4 日 ごろから海面水温の低下を表現し始める。台風通過後の数日間、MSM の潜熱フラックスは HIMSST を利用した場合、MGDSST を利用した場合のどちらにおいても対 OAFlux で大きな正の誤差がある。しかし HIMSST の方が MGDSST よりも早く海面水温低下を表現し始めるため、HIMSST を利用した結果の方が潜熱フラックスは小さくなり、対 OAFlux 誤差も小さくなる。

このように、下部境界条件に用いる SST を HIMSST に変更したことにより、SST 変動の遅れに伴う潜熱フラックスの誤差が減少する。特に台風や前線の移動に伴って激しく SST が変動する夏に誤差の減少は大きくなる。

3.2.7 解析・予報への影響

2018 年 10 月時点の現業メソ数値予報システムと同等の対照実験 (CNTL) と、本節で述べた5つの改良をすべて加えたテスト実験 (TEST) を行い、解析や予報への効果を確認した。実験期間は2018 年 6 月 18 日か

⁵ WHOI (Woods Hole Oceanographic Institution) が作成しているプロダクトの名称。ECMWF、NCEP の全球再解析、観測船や衛星の観測データをもとに推定した全球の顕熱・潜熱フラックスの日別解析値が含まれる。詳しくは Yu et al. (2008) を参照。

⁶ 気象庁海洋気象情報室が約5ヶ月後に作成する MGDSST の再解析。解析対象時刻よりも後の時刻の観測データも用いて解析を行う。

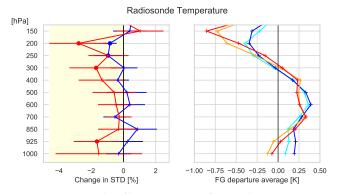


図 3.2.7 データ同化で使用したラジオゾンデの気温データの FG departure 統計の鉛直分布。左図は TEST の CNTL に対する FG departure の標準偏差の変化率 [%]。赤色が 夏実験、青色が冬実験。エラーバーは 95%の信頼区間、丸 印は変化率の正負が統計的に有意な差であることを示す。 右図は FG departure の平均。赤線が TEST の夏実験、橙 線が CNTL の夏実験、青線が TEST の冬実験、水色線が CNTL の冬実験。

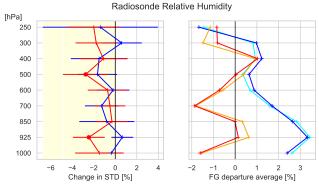


図 3.2.8 図 3.2.7 と同じ。ただしラジオゾンデの相対湿度 データの FG departure 統計。

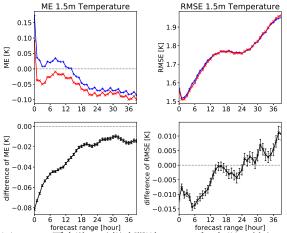


図 3.2.9 夏実験の予報時間別のアメダス気温に対する検証結果。左図は平均誤差 (ME)、右図は二乗平均平方根誤差 (RMSE)。上段が TEST (赤)、CNTL (青) それぞれの誤差の値。下段が TEST と CNTL の差 (TEST-CNTL)、エラーバーは 95%の信頼区間を示す。

ら7月23日(夏実験)、2017年12月23日から2018年1月27日(冬実験)である。データ同化実験は、上記期間の5日前から行った。

今回の改良には直接関係していないラジオゾンデ観 測データを用いて、第一推定値への影響を確認した7。 図 3.2.7 のラジオゾンデの気温データの FG departure 統計から、主に航空機気温データバイアス補正の効果 によって、CNTL と比べて TEST では対流圏上層の 200 hPa~300 hPa⁸で第一推定値の高温バイアス(負の FG departure) が減少したことがわかる。一方、CNTL と比べて TEST では、対流圏下層で夏実験の最下層を 除き、低温バイアスが増加(FG departure が正の方向 に変化) した。また、夏季の対流圏でFG departure の 標準偏差が減少した。続いて、図3.2.8のラジオゾンデ の相対湿度データの FG departure 統計から、夏季の 下層乾燥バイアス(正の FG departure)が減少し、夏 季、冬季ともに対流圏で FG departure の標準偏差が 減少したことがわかる。これは主に CSR の利用高度化 による効果である。ラジオゾンデ気温・相対湿度の FG departure の標準偏差が減少したことから、今回の改 良によって第一推定値の精度が改善したことを確認し た。ラジオゾンデ以外の各種衛星センサーにおいても 同様の効果を確認した。このことから、本改良によっ て解析値・第一推定値の精度が向上したと言える。

図3.2.9に夏実験の予報時間別のアメダス気温に対する検証結果を示す。二乗平均平方根誤差(右図)は24時間予報まで減少し、気温場の解析精度改善の効果が現れている。一方、平均誤差(左図)では予報時間の経過に伴う負バイアスがわずかに拡大した。これは、航空機気温データバイアス補正で解析値の下層気温を低下させた影響が大きい。冬実験でも同様の結果であった(図略)。

図3.2.10 に夏実験の降水統計検証結果を示す。多くの閾値でバイアススコアが減少し、閾値10 mm/3h から30 mm/3hまでバイアススコアが1に近づいて改善した。エクイタブルスレットスコアでは閾値10 mm/3h以外で改善した。空振り率が全ての閾値で減少し改善した一方、15 mm/3h以下の弱い降水の閾値で見逃し率が増加した。閾値10 mm/3hの改悪は、特に閾値10 mm/3hの見逃し率が大きかったことに起因する。冬実験では大きな違いは見られなかった(図略)。

降水予測が改善した 2018 年 7 月 6 日 15UTC 初期値 の事例を図 3.2.11 に示す。九州地方に東西にのびる降

⁷ 同化する観測データを増やした場合、解析値はその観測データに寄り、他の観測データへは近づいたり遠のいたりするが、それぞれの観測値の誤差を考慮した上で尤もらしい値を算出したのが解析値なので、観測データへの整合性の変化から解析値の精度の変化を評価するのは難しい。短時間予測である第一推定値は、解析値や観測値より誤差が大きいため、改良とは独立の観測データとの整合性が向上すれば、それは解析精度が改善したからであると考えることが出来る。

⁸ 一般的な航空機の巡航高度

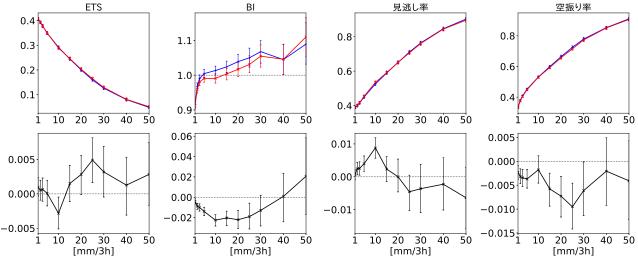


図 3.2.10 夏実験の解析雨量に対する 3 時間降水量の閾値別の統計検証結果。検証格子は 20 km。左からエクイタブルスレットスコア (ETS)、バイアススコア (BI)、見逃し率、空振り率。上段が TEST (赤)、CNTL (青) それぞれのスコア。下段が TEST と CNTL の差 (TEST-CNTL)、エラーバーは 95%の信頼区間を示す。

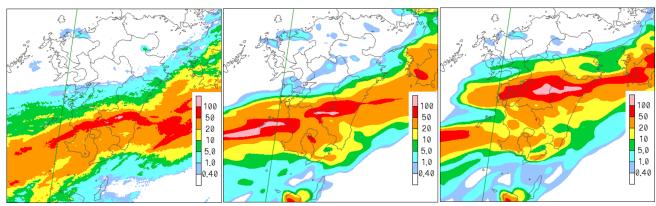


図 3.2.11 2018 年 7 月 7 日 03UTC の前 3 時間降水量 [mm/3h]。左から解析雨量、TEST 予測値、CNTL 予測値。予測値は 2018 年 7 月 6 日 15UTC 初期値の FT=12 の降水量を示す。

水域が CNTL では北にずれていたが、TEST ではより 南側に予測しており、解析雨量に近づいていた。観測 データ利用の改良や HIMSST の導入により、全体的に 気温や水蒸気の解析値の精度が改善したことによって、 このように降水帯の予測位置が改善した事例が、初期 値に近い予報期間前半を中心にいくつか見られた。

3.2.8 まとめ

2019年3月26日、メソ数値予報システムに本節で述べた5つの改良を導入した。ひまわり8号バンド9,10のCSRデータを利用することにより、対流圏中下層の水蒸気の解析精度が向上した。高解像度ASCAT海上風を利用することにより、海岸付近までの海上風データが利用可能になった。航空機気温データバイアス補正を導入することで対流圏上層および下層の高温バイアスを軽減させた。地上GNSSでは、解析雨量による品質管理処理を廃止し、降水域を含めた可降水量データを利用可能とした。北西太平洋高解像度日別海面水温解析(HIMSST)を利用することで、台風や前線

の移動による SST の変動により迅速に追従するようになり、それに伴い潜熱フラックスの誤差が減少した。

解析・予報への主な効果は以下の通りである。ラジオゾンデなどの観測データとの比較により、気温や水蒸気の解析精度の改善を確認した。アメダス気温に対する検証では、24時間予報まで二乗平均平方根誤差の減少が見られたが、それ以降の予報時間では気温の負バイアスがわずかに拡大することになった。降水スコアは、夏実験においてバイアススコアや空振り率の減少が見られ、エクイタブルスレットスコアが改善したことを確認した。気温や水蒸気の解析精度が改善したことによって、降水帯の予測位置が改善した事例が、予報期間前半を中心にいくつか見られた。

参考文献

石川宜広, 2010: 地上 GPS データのメソ解析での利用. 数値予報課報告・別冊第 56 号, 気象庁予報部, 54-60. 計盛正博, 2016: ひまわり 8 号晴天放射輝度温度の利 用開始. 平成 28 年度数値予報研修テキスト, 気象庁

- 予報部, 46-49.
- 気象庁地球環境海洋部, 2016: 北西太平洋高解像度日別 海面水温解析格子点資料の提供について. 配信に関 する技術情報(海洋編)第444号.
- 草開浩, 2012: 地表面過程. 数値予報課報告・別冊第 58 号, 気象庁予報部, 29-41.
- 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, S1-S18.
- 酒匂啓司, 2010: 航空機気温データの全球解析での利用. 平成 22 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 33-37.
- 小司禎教, 国井勝, 2008: 地上 GPS 観測網による可降 水量の同化. 気象研究ノート, 228–238.
- 太原芳彦, 1999: マイクロ波散乱計. 数値予報課報告・ 別冊第 45 号, 気象庁予報部, 27-43.
- 守谷昌己, 2016: マイクロ波散乱計の全球解析での利用 方法の変更及びメソ解析での利用開始. 平成 28 年度 数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 55–57.
- Ballish, B. A. and K. Kumar, 2008: Systematic differences in aircraft and radiosonde temperatures. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **89**, 1689–1708.
- Yu, L., X. Jin, and R. A. Weller, 2008: Multidecade Global Flux Datasets from the Objectively Analyzed Air-sea Fluxes (OAFlux) Project: Latent and Sensible Heat Fluxes, Ocean Evaporation, and Related Surface Meteorological Variables. *Technical Report OA-2008-01, Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, MA*.

3.3 局地解析の高度化1

3.3.1 はじめに

局地予報の初期値を作成する局地解析では、変分法バイアス補正手法によって衛星輝度温度・土壌水分量のバイアスを逐次的に補正しデータ同化をしている(幾田2017)。2019年3月26日の局地解析の更新では、変分法バイアス補正手法の高度化、衛星輝度温度観測データの品質管理処理の変更、北西太平洋高解像度日別海面水温解析(HIMSST)の利用開始(第3.2.6項)と地上 GNSS 可降水量データの利用地点の拡大(第3.2.5項)を実施した。本節では、変分法バイアス補正手法の高度化及び衛星輝度温度観測品質管理の変更について概要を述べる。

3.3.2 変分法バイアス補正の高度化

局地解析の変分法バイアス補正の背景誤差の計算方法を佐藤・石橋の方法 (佐藤 2007; 石橋 2008) から Cameron の方法 (Cameron and Bell 2018) に変更した。どちらの変分法バイアス補正の背景誤差の計算式にも、開発者が決めるパラメータが含まれている。佐藤・石橋の方法では観測データ数の下限値を開発者が与え、Cameronの方法では観測データ数の下限値と補正係数の収束期間の半減期を開発者が与える。Cameronの方法は、半減期のパラメータによって学習速度を制御できるため、より柔軟な設定が可能となり、将来的に様々な観測データへの適用や機能拡張の際にも個別に設定が可能で実装上の利便性が大きい。

3.3.3 衛星輝度温度観測データの品質管理の変更

局地解析のデータ同化本体では、変分法バイアス補 正の導入 (幾田 2017) によって衛星輝度温度観測デー タのバイアスは除かれているが、品質管理プログラム では全球解析で求めたバイアス補正係数と説明変数で バイアスを補正した観測データで品質管理を行う仕様 となっていた。幾田 (2017) で述べられているように、 全球解析のバイアス補正係数では局地解析で利用する 衛星輝度温度観測データのバイアスを適切に補正する ことはできない。そのため、局地解析では観測データ にバイアスが残った状態で品質管理を行っており、図 3.3.1 の青色実線のように D 値(観測値と第一推定値の 差)が正負で偏った観測データが選択されていた。現 在のデータ同化システムは、誤差が正規分布に従うこ とを仮定している。このように偏ったデータを利用す ることは、本来利用可能なデータを排除するだけでな く、解析値の誤差を拡大する原因となる。そこで局地 解析の変分法バイアス補正係数と説明変数を使用する ように変更し、観測データのバイアスが補正された状 態で品質管理を行えるようにした。その結果、図 3.3.1 の赤色実線のように、偏りの無い正規分布に近い状態 で衛星輝度温度観測データを利用できるようになった。

3.3.4 まとめ

本節では2019年3月に行われた局地解析の更新のうち、変分法バイアス補正手法の高度化、衛星輝度温度観測データの品質管理処理の変更を概説した。変分法バイアス補正手法の高度化は、より柔軟なバイアス補正処理を可能とすることに加え、今後の拡張において重要な役割を果たすものでもある。また衛星輝度温度観測データの品質管理処理の変更により品質管理で不当に排除されていた観測データを救うことが可能となり、観測データの持つ情報を一層有効に活用できるようになった。これらの変更によって局地解析は、データ同化システムとして柔軟でより正しい実装へと更新されたことになる。

参考文献

幾田泰醇, 2017: 局地数値予報システムにおける新規観 測データの利用開始及び同化手法の高度化. 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 82-85.

石橋俊之, 2008: 変分法バイアス補正の性質. 2008 年度 日本気象学会秋季大会公演予稿集, 268, D101.

佐藤芳昭, 2007: 変分法バイアス補正. 数値予報課報告・ 別冊第 53 号, 気象庁予報部, 171–173.

Cameron, James and William Bell, 2018: The testing and implementation of variational bias correction (VarBC) in the Met Office global NWP system. Weather Science Technical Report No: 631, Met Office, 1–22.

¹ 幾田 泰酵

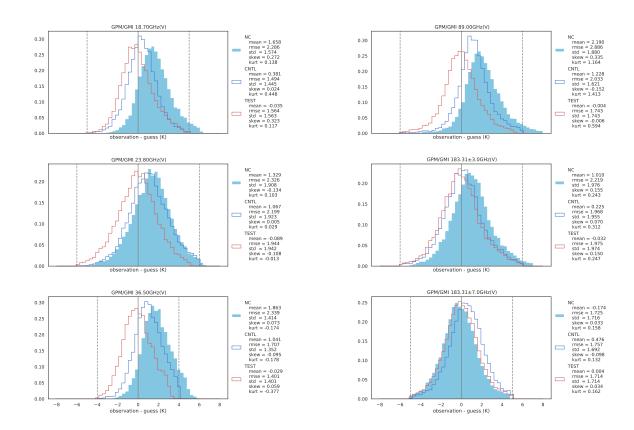


図 3.3.1 局地解析の衛星輝度温度観測データの品質管理プログラムで計算された異なる周波数の GPM/GMI の D 値ヒストグラム。統計期間は 2016 年 7 月 5 日 00UTC から 2016 年 8 月 22 日 21UTC とし、変分法バイアス補正の高度化と品質管理を変更した実験を TEST、変更前の実験を CNTL とする。青色の実線は CNTL、赤色の実線は TEST のバイアス補正済みの D 値ヒストグラム、水色の塗りつぶしはバイアス補正なしの D 値ヒストグラムを表す。また、図中の mean は平均値、rmse は二乗平均平方根誤差、std は標準偏差、skew は歪度、kurt は尖度を表す。

第4章 事例解析

4.1 平成30年7月豪雨(前線及び台風第7号による大雨等)¹

4.1.1 はじめに

平成30年7月豪雨は、6月28日から7月8日にかけて西日本を中心に全国的に広い範囲で記録的な大雨を観測した豪雨である(気象庁2018)。この節では、平成30年7月豪雨の期間中の数値予報の予測状況を確認する。大雨を引き起こした気象現象が期間と場所によって異なるため、要因の異なる大雨の予測状況を個別に確認する必要がある。はじめに大雨をもたらした要因を簡単に述べる。

東・西日本で発生した大雨の要因を時間順に記述す ると以下のようになる。(1)華中から日本海を通って北 日本付近に停滞していた前線の影響により、6月28日 から29日に東日本と西日本の一部で大雨となった。6 月29日に台風第7号は日本の南海上で発生し、7月1 日に沖縄の西海上を通り東シナ海へ進み、7月2日か ら3日にかけて東シナ海を北北東進した。②台風第7 号は、7月3日夜には北東に向きを変えて対馬海峡を 通過して、7月4日に日本海中部で温帯低気圧に変わっ た。台風第7号の南東側の東・西日本で激しい雨を観 測した地域があった。(3)7月5日朝には台風第7号か ら変わった温帯低気圧は津軽海峡に進み、活発化しな がら南下してきた前線によって、7月5日も東日本と 西日本の太平洋側などで大雨となった。(4)7月6日夜 に朝鮮半島付近に近づいてきた上空のトラフの南東側 で活発化した前線が北上したため、西日本から東日本 で激しい雨となり、⑤7月7日に東・西日本を通過し たトラフの暖域側で局地的な激しい雨が継続する場所 があった。⑥東・西日本への下層の暖湿気の流入は7 月8日も継続し、局地的な激しい雨を観測する場所が あった。

この期間中、東・西日本以外の地域でも大雨や暴風が発生している。台風第7号の接近・通過による影響で南西諸島では大雨と暴風が発生しており、台風第7号から変わった温帯低気圧の影響によって北日本でも大雨が発生している。

本節では、以下の降水の要因とスケールの異なる3つの期間の大雨について数値予報の予測結果を確認する。

- (A) 7月3日から4日の台風第7号による東・西日本の大雨(上記の②の期間の大雨)
- (B) 7月6日から7日の前線活発化による九州北部・ 中国地方の大雨(④と⑤の期間の大雨)
- (C) 7月8日の東・西日本の局地的な激しい雨(⑥の期間の激しい雨)

図 4.1.1 と図 4.1.2 に 7 月 3 日から 8 日の天気図、衛

星水蒸気画像、3時間解析雨量を示す。

- (A) は、台風第7号が九州の西を北北東進し、7月3日夜に北東に向きを変えて対馬海峡を通過し、山陰沖を通過して、日本海中部に達するまでの期間である。図4.1.1の(a)から(c)の期間の解析雨量の分布が示すように、大雨が降ったのは、台風の中心に近い九州と、台風の影響によって暖湿気が流入した東・西日本太平洋側の地域であった。
- (B)は、7月6日夜に朝鮮半島付近にあった上層のトラフの接近により活発な前線が西日本を北上して九州北部や中国地方を中心に大雨が継続した後、7月7日日中に東・西日本を通過した前線の暖域側に局地的な激しい雨が継続した期間である。図4.1.1の(g),(h)と図4.1.2の(i)の期間の解析雨量の分布は、7月6日から7日日中にかけて激しい雨が同じ地域で継続したことを示している。
- (C) の期間には、7月8日9時の水蒸気画像で上層トラフに対応する明瞭な暗域が東日本に進み、地上の前線の暖域側の岐阜県などで局地的な激しい雨が発生した。図4.1.2の(k)の衛星水蒸気画像と解析雨量は、上層の明瞭なトラフが通過した後の九州南部や四国でも7月8日日中に下層の暖湿気の流入(図略)による局地的な大雨が降ったことを示している。

以降、本節では、第4.1.2項で(A)の期間について、 台風第7号の全球モデル (GSM) と全球アンサンブ ル予報システム(全球 EPS)の進路予測等の結果と、 GSM24 時間最大降水量ガイダンス (GSM-RMAX24) の結果を確認する。第4.1.3項では、(B)の期間につい て、GSM、全球 EPS、メソモデル (MSM)、メソアンサ ンブル予報システム (MEPS)、局地モデル (LFM) の予 測の初期値毎の変化と、GSM-RMAX24 と MSM24 時 間最大降水量ガイダンス (MSM-RMAX24) と MSM3 時間最大降水量ガイダンス (MSM-RMAX33)の予測 について述べる。第4.1.4項では(C)の期間について、 全球モデルでは予測できなかった局地的な激しい雨を MSM と LFM がどのように予測していたかを示す。第 4.1.5 項では、これらの3つの期間の予測結果について まとめ、数値予報プロダクトの利用者が留意すべき点 について述べる。

24 時間最大降水量ガイダンスについては、第5.1 節で2019年7月4日に改良したことを報告している。本節では、現象発生当時の資料である改良前の結果を示し考察しているが、本事例解析から示唆される結果やプロダクト利用上の留意点については、改良前後で大きな違いはない。

¹ 坂本 雅巳、草開 浩、白山 洋平

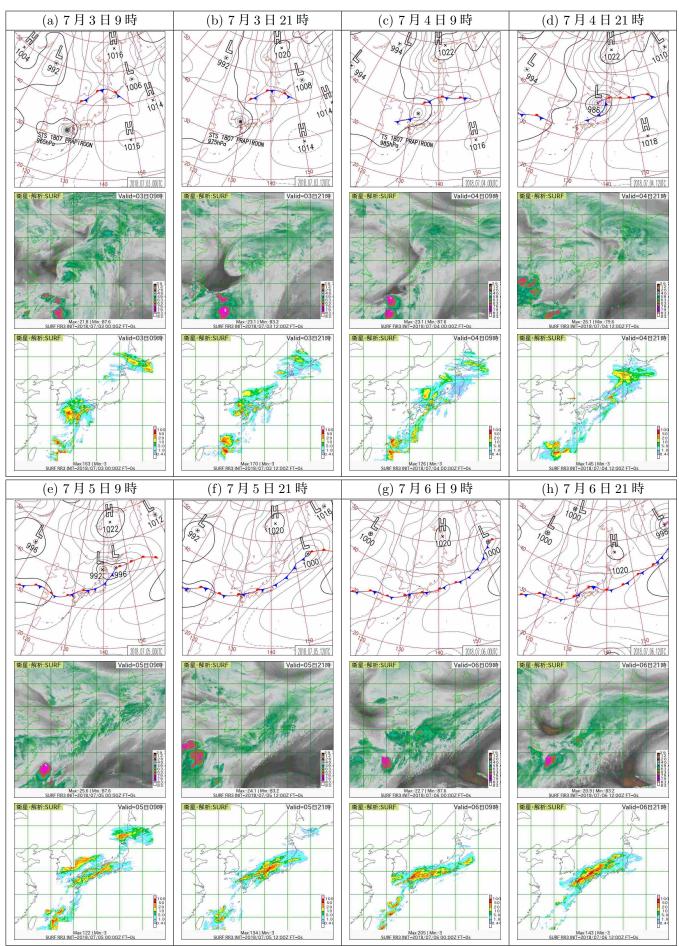


図 4.1.1 2018 年 7 月 3 日 9 時から 6 日 21 時の期間の 12 時間毎の天気図(各枠内の上図)、ひまわり 8 号水蒸気バンドの輝度温度 [℃](中図)と解析雨量による 3 時間降水量 [mm](下図)。

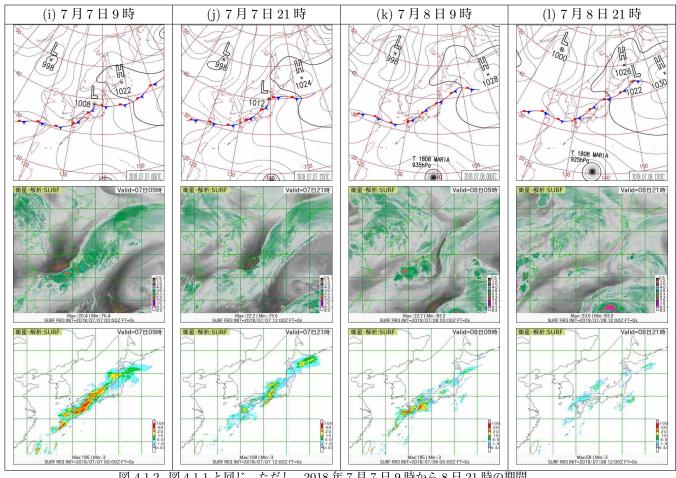


図 4.1.2 図 4.1.1 と同じ。ただし、2018 年 7 月 7 日 9 時から 8 日 21 時の期間。

4.1.2 7月3日から4日 台風第7号による東・西 日本の大雨

(1) 全球モデルと全球アンサンブル予報システムの台 風第7号の予測

図 4.1.3 に GSM と海外の数値予報センターの全球決 定論モデルの台風第7号の予測結果と気象庁の台風解 析の比較図を示す。海外数値予報センターのモデルに ついては本田・坂本 (2018) などを参照いただきたい。

台風第7号は7月1日21時頃に沖縄の西海上を通 過して、7月2日21時頃まで九州の西海上を北北東進 した。この間も中心気圧が下がり、中心付近の最大風 速も大きくなった。その後、7月3日21時頃に対馬海 峡を中心が通過し、7月4日15時に日本海中部で温帯 低気圧に変わった。この間、中心気圧が徐々に上がり、 最大風速も小さくなった。

図 4.1.3 の a) と b) が示すように、6 月 30 日の初期 値では、どのセンターのモデルも台風が東シナ海を北 上して3日朝までに朝鮮半島に上陸して、急速に弱ま る予測であった。当庁を含めた4つのセンターの予測 は、台風の進路を解析より西側のコースを北上させる 点で一致しているだけでなく、どのセンターも解析よ り北上する速度を速めに予測していた。6月29日まで の初期値の予測も同様であった (図略)。

図 4.1.3 の c) と d) に示すように、7月1日を初期 値とする予測では、どのセンターのモデルも台風第7 号の中心が3日夜に対馬海峡を通過する予測に変わっ た。モデルの中心気圧の予測は、台風解析の値とは一 致しないが、2日の夜から3日朝をピークとして、そ の後徐々に弱まっていく傾向などは、どのセンターの 予測にも共通しており、この傾向は台風解析と整合し

図 4.1.4 に全球 EPS の予測結果を示す。6 月 30 日 を初期値とする予測(図 4.1.4 の a) と b)) は、どのメ ンバーも中心が朝鮮半島を通過する予測となっており、 実況の進路を捕捉できていなかった。一方、下2枚の 図に示した7月1日を初期値とする予測は、黒線で示 した解析の進路の周辺に各メンバーの予測が分布して おり、実況を捕捉できていた。7月1日以降は、新し い初期値ほどばらつきが小さくなる予測であった。

以上のことから、7月1日00UTCの全球速報解析 により初期値に最新の観測情報が反映され、台風の進 路予測が実況に近いものになったと考えられる。

図 4.1.5 に、7 月 1 日 00UTC の全球速報解析を行う 時点で入手できた台風第7号の中心付近の観測データ の分布図を示す。7月1日9時の時点では、台風第7号 は沖縄の南海上にある。海洋上に中心がある台風の解

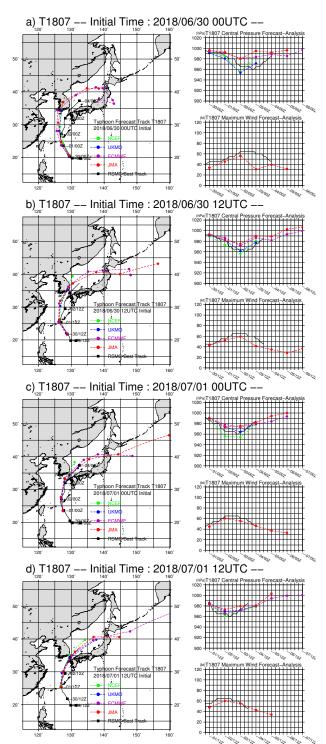


図 4.1.3 当庁を含めた 4 つのセンターの全球決定論モデルの平成 30 年台風第 7 号の進路(各図の中の左図)、中心気圧 [hPa] (右上図)、最大風速 [ノット] (右下図)の予測結果の比較。黒は気象庁の解析(ベストトラック)。赤はGSM の予測。緑は米国環境予測センター、青は英国気象局、紫は欧州中期予報センターの全球決定論モデルによる予測結果。上から順に、a) 6 月 30 日 00UTC、b) 6 月 30 日 12UTC、c) 7 月 1 日 00UTC、d) 7 月 1 日 12UTC を予報初期時刻とする予測結果。

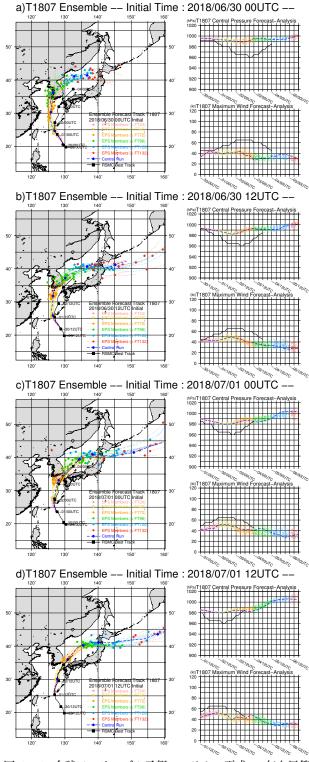


図 4.1.4 全球アンサンブル予報システムの平成 30 年台風第7号の進路(各図の中の左図)、中心気圧 [hPa](右上図)、最大風速 [ノット](右下図)の予測結果の比較。黒は気象庁の解析(ベストトラック)。青の破線はコントロールラン(摂動を加えない予測)。点線は摂動を加えたメンバーの予測で、初期値から 24 時間後までを桃色、48 時間後までを黄色、72 時間後までを橙色、96 時間後までを緑色、120 時間後までを水色、それ以降を赤色で示す。上から順に、a)6月30日00UTC、b)6月30日12UTC、c)7月1日00UTC、d)7月1日12UTCを予報初期時刻とする予測結果。

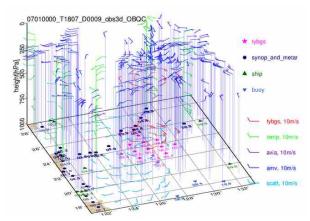


図 4.1.5 7月1日00UTCの全球速報解析で用いた観測の台風第7号付近での分布図。桃色の星マークは台風ボーガスの気圧、黒丸はSYNOPとMETARの気圧、緑三角はSHIP通報の気圧、青三角はブイ観測の気圧、赤矢羽は台風ボーガスの風、緑矢羽はゾンデ観測の風、紫矢羽は航空機観測の風、青矢羽は大気追跡風の風、水色矢羽は散乱計導出風。縦軸は気圧 [hPa] 高度、手前から奥への座標は北緯 [deg]、横軸は東経 [deg]。この図に示されている観測以外に、衛星観測輝度温度、衛星 GNSS 掩蔽や地上 GNSS大気遅延量のデータも利用された。

析では台風ボーガスが注目される場合もあるが、この時刻の解析には台風ボーガスだけではなく、多くの観測が全球速報解析で利用されたことがわかる。7月1日00UTCの全球速報解析では、台風第7号の中心を少し南東側に移動させるような修正が行われた(図略)。

7月1日00UTC 初期値と6月30日12UTC 初期値の GSM の海面気圧の予測結果の比較を図4.1.6に示す。7月1日00UTC の初期値は、6月30日12UTC 初期値の予測と比較して、台風第7号の中心が少し南東側に解析されている(図4.1.6のa))。台風の中心位置の違いは予報が進むとともに明確になり、中心が朝鮮半島に上陸することなく日本海に進んだ7月4日9時(図4.1.6のd))の時点では、7月1日00UTC 初期値のGSMの予測は6月30日12TUC 初期値のものと比較して、台風の中心から南側と東側の海面気圧が低くなる予想に変わっている。

図 4.1.7 には、7月1日00UTC初期値のGSMの850hPaの風の予測と、6月30日12UTC初期値の予測との風速の差を示した。7月1日9時(図 4.1.7のa))には、台風中心の南側や東側では両者の風速にほとんど違いはない。台風が九州西海上に進んだ7月3日9時(図 4.1.7のc))には、7月1日00UTC初期値の予測は6月30日12UTCの予測より10ノット以上強い風を予測している。7月4日9時(図 4.1.7のd))になると、7月1日00UTC初期値の予測は西日本の太平洋側から東日本の風速を6月30日12UTC初期値の予測よりも強めている。東・西日本と、その太平洋側の海上での下層の西南西から南西の流れは、台風の

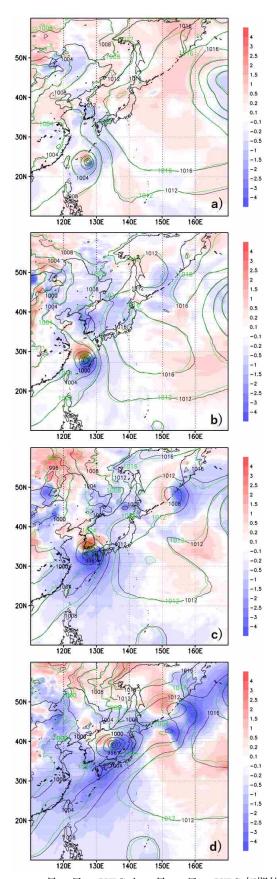


図 4.1.6 7月1日00UTC と 6月30日12UTC 初期値のGSMの海面気圧 [hPa] の予測。黒線が7月1日00UTC 初期値の予測、緑線は6月30日12UTC 初期値の予測。色は7月1日00UTC 初期値の予測から6月30日12UTC 初期値の予測を引いた差。予報対象時刻は上からa)7月1日9時、b)7月2日9時、c)7月3日9時、d)7月4日9時。

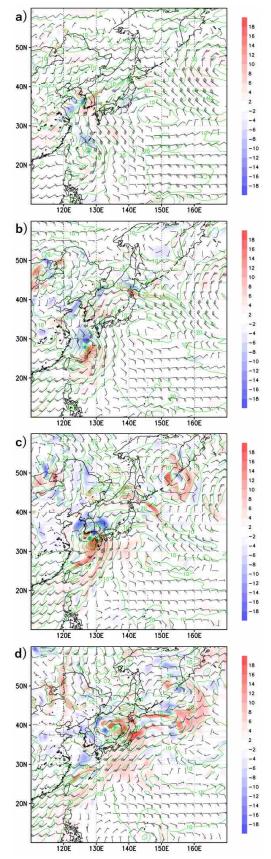


図 4.1.7 7月1日00UTC 初期値の GSM の 850 hPa の風の予測と、6月30日12UTC 初期値の風速の予測との比較。黒矢羽は7月1日00UTC 初期値の 850 hPa の風の予測、緑線は風速 [ノット] の等値線。色は7月1日00UTC 初期値の風速の予測値から6月30日12UTC 初期値の予測を引いた差 [ノット]。予報対象時刻は上からa)7月1日9時、b)7月2日9時、c)7月3日9時、d)7月4日9時。

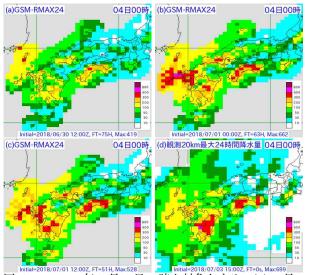


図 4.1.8 2018 年 7 月 4 日 0 時を対象とする、(a) 6 月 30 日 12UTC 初期値の GSM-RMAX24、(b) 同 7 月 1 日 00UTC 初期値、(c) 同 7 月 1 日 12UTC 初期値、(d) 観測の 20km 格子最大 24 時間降水量。降水量の単位はいずれも mm/24h。

南東側の暖湿流に対応している。次の(2)で示すように、7月1日00UTC初期値で強く予想されるようになった下層暖湿流の影響を受けた地域は、7月3日から4日にかけての大雨が発生し、それが予測できた地域に概ね対応している。

7月1日00UTC初期値では、海外の数値予報センターでもそれ以前の初期値の予測に比べて、台風の中心を南東側に解析する変化が見られた。また、図4.1.3では、この初期値以降の台風第7号の予測が進路だけでなく、中心示度や強度の変化傾向についても実況に近づく変化があったことが確認できる。7月1日00UTCの台風の中心位置を含めた初期値の修正により、7月4日までの台風の進路や、中心示度と強度の変化傾向が予測できるようになった事例であったと考えられる。

(2) で示すように、台風の進路予測が実況に近づいた7月1日00UTCの予報初期時刻からこの期間の大雨の予測も実況に近づいた。東・西日本の大雨を対象に考えると、2から3日程度前の予報初期時刻から大雨の期間と場所が概ね予測できた事例であった。

(2) 全球モデルのガイダンス

図 4.1.8 は、台風第 7 号が九州の西海上から対馬海峡を通過し日本海に達した 7 月 4 日 0 時を対象とする、GSM-RMAX24 と対応する観測値である。観測値からは、日本海に進む台風に向かって吹く南風によって九州南部や四国地方といった太平洋側の地域では300 mm/24hを超える大雨となっていることが分かる。前述の通り、台風第 7 号の予測進路や強度予測は 7 月 1 日 00UTC 初期値を境に概ね実況と一致するように変わっており、ガイダンスについても同じ 1 日 00UTC 初期値以降で九州や四国の降水量予測が一段と増え、実況に近づいていた。図 4.1.8 (b) 及び (c) からは、九州

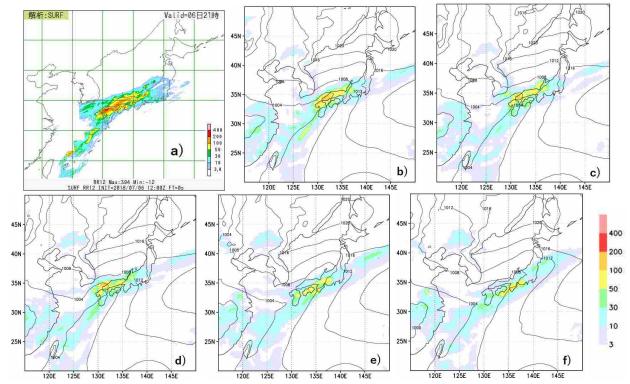


図 4.1.9 a) 7月6日21時までの12時間解析雨量 [mm] と、GSM の7月6日21時を対象とする海面気圧 [hPa] の予測値(コンター)と7月6日21時までの12時間降水量の予測値 [mm] の分布(色)。予報初期時刻はそれぞれ、b) 7月6日00UTC、c) 7月5日12UTC、d) 7月5日00UTC、e) 7月4日12UTC、f) 7月4日00UTC。

北部地方では観測に比べて過剰な予測になっているものの、太平洋側の地域には 300 mm/24h を超える大雨を予測しており、GSM-RMAX24 では概ね 2 日前の時点で西日本の広い範囲での大雨の発生を予測していたと言える。

4.1.3 7月6日から7日 前線活発化による九州北 部・中国地方の大雨

(1) 全球モデルと全球アンサンブル予報システムの 予測

7月6日に活発な前線がトラフの接近により日本海側まで北上し、九州北部と中国地方で広く大雨が発生して、7日に入ってトラフの東進・通過に伴い、その暖域側で局地的に活発な対流が発生した。線状降水帯などのメソモデル・局地モデルが予測対象とする局地的な集中豪雨の予測結果については(2)で述べる。ここでは、7月6日21時までの12時間降水量の予測の変化に着目して、GSMと全球EPSが、どの予報初期時刻から大雨発生を広域に予測できたのかを確認する。

図 4.1.9 に、7月6日21時までの解析雨量による12時間降水量と、GSMの7月6日21時までの12時間降水量の予測を示す。7月4日12UTCまでの初期値の予測(図 4.1.9のe)とf))では、50 mm/12h以上の降水を西日本の太平洋側と東海地方に予想している。7月5日以降の初期値(図 4.1.9のb)、c)、及びd))では、実況(図 4.1.9のa))で大雨が観測された中国地方や

九州北部に大きな降水量を予測していた。

図 4.1.10 に、7月6日 21 時までの 12 時間に 50 mm 以 上の降水量を予測した全球 EPS のメンバーの割合(超 過確率)の分布を示す。7月4日の 00UTC と 12UTC 初期値の全球 EPS の予測 (図 4.1.10 の d) と e)) では、 東・西日本に閾値 50 mm/12h の超過確率を予測でき ているが、予測された場所の多くは西日本の太平洋側 と東海地方で、実況 (図 4.1.9 の a)) で降水の多かった 九州北部・中国地方にはあまり予測されていない。九 州北部・中国地方に閾値 50 mm/12h の超過確率を予 測できるようになるのは7月5日 00UTC(図 4.1.10 の c)) を初期時刻とする予測からである。GSM は全 球 EPS とは水平格子間隔の異なるモデルを使用してい るが、全球 EPS の超過確率は概ね図 4.1.9 の降水量予 測と同様の分布になっている。7月5日以降の初期値 では、九州北部・中国地方に予測される降水量が多く なるとともに、大雨の発生確率も大きく予測されたこ とを示している。

西日本の太平洋側と東海地方に大雨を予測していた 7月4日12UTCの48時間予報値と7月6日12UTCの解析値との比較を図4.1.11に示す。a)の300 hPaの風速の予測では朝鮮半島付近のトラフ周辺で解析値と比べて風速が弱い誤差があった。また、b)の500 hPa高度では、7月4日12UTC初期値の予測は解析値よりも太平洋高気圧の日本の南海上での張り出しが弱かった。朝鮮半島付近にあった500 hPaのトラフは浅く予

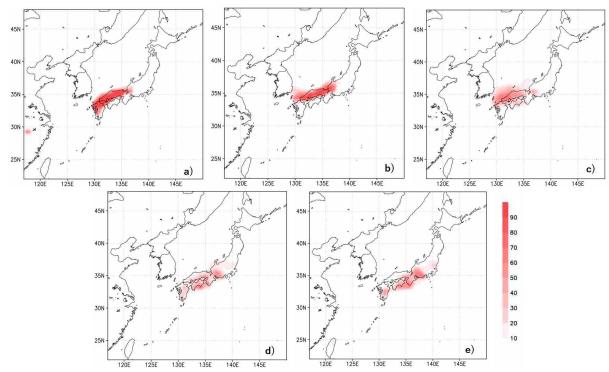


図 4.1.10 全球 EPS の 7月 6日 21 時までの 50 mm/12h を閾値とする超過確率 [%]。予報初期時刻はそれぞれ、a) 7月 6日 00UTC、b) 7月 5日 12UTC、c) 7月 5日 00UTC、d) 7月 4日 12UTC、e) 7月 4日 00UTC。

想されており、c) の 850 hPa では、東・西日本付近のシアーラインの南東側の南西流は解析値よりも弱く予想されている。この下層の南西流によって運ばれる暖湿気は解析値で北九州や中国地方の日本海側に達しており(図略)、実際の下層暖湿流の収束する場所は7月4日12UTCの予測よりもかなり北であった。図 4.1.11の右下図でも九州北部から中国地方の辺りで解析の方が予測より海面気圧が低くなっており、前線の位置が予測より地であったことが示されている。

図 4.1.12 は、7月5日12UTC 初期値の GSM の 24 時間予報と予測対象となる7月6日12UTC の解析を比較した図である。図 4.1.11と比較すると、500hPaの朝鮮半島付近のトラフが浅く、太平洋高気圧の南海上での張り出しが弱いなど、予報誤差の出現パターンに共通する特徴が見られる。その一方で、予報対象となる時刻の解析値との差は、どの要素についても小さくなっている。7月4日00UTC 以降の7月6日21時を対象とする全ての予測結果(図略)を確認すると、どの初期値からの予測にも図 4.1.11と図 4.1.12に共通する特徴があるが、新しい初期値ほど誤差が小さくなっていることが確認できる。

この予報対象時刻の気象状況については、日本の南海上の太平洋高気圧の張り出しや朝鮮半島付近のトラフの深さの誤差が、初期時刻によらず同様の誤差パターンが成長しやすい事例であったものと考えられる。このように、GSMが同様な誤差を成長させやすい状況の場合は、過去の初期値の予測からの変化も参考にしな

がら、最新の初期値を使って予報の修正を検討し続ける必要がある。GSM は、いつも高気圧の張り出しを弱く予測するわけではなく、トラフを毎回浅く予想するわけではない。常に同様な誤差が成長しやすい状況が継続するとは限らないので、前の初期値の GSM や全球 EPS の予測結果、予測同士の違いを比較しながら状況を把握する必要がある。

(2) メソモデル・局地モデルの予測

本期間の MSM および LFM の予測結果について報告する。

まず、24 時間降水量について予測結果を確認する。図 4.1.13 に 7月 7日 0 時までの解析雨量と MSM の 24 時間降水量を示す。39 時間予報(7月 5日 00UTC 初期値)の段階から中部・中国・四国地方で 200 mm/24hを超える雨量を予測しており、前線に伴うスケールの大きな降水については、比較的早い段階からこれらの地域で大雨が発生する可能性を捉えていたといえる。MSM の一般的な予測特性として、予報後半は側面境界条件を与える GSM の影響を強く受ける。本事例において、7月 5日以降の初期値の GSM では総観場をよく再現できており(図 4.1.12)、このことが MSM でも大雨発生の可能性を捉えられたことの一因と考える。

中国地方については、広島県での 200 mm/24h を超える大雨は予測していたが、その面積は実況と比べて広く、岡山県や鳥取県での予測降水量は過大であった。九州北部地方の降水については 36 時間予報 (7月5日 03UTC 初期値) の結果が実況と最も近く、長崎

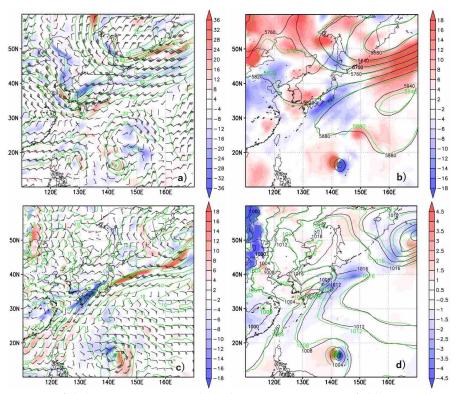


図 4.1.11 7月4日12UTC を初期値とする GSM の 48 時間予報と7月6日12UTC の解析値との比較。a) は、300 hPa の風 [ノット] の予測値(黒羽根)、風速の予測値の分布(緑線)、風速の予測値から解析値を引いた差(色)。b) は、500 hPa ジオポテンシャル高度 [m] の予測値(黒線)、解析値(緑線)、予測値から解析値を引いた差(色)。c) は、850 hPa の風 [ノット] の予測値(黒羽根)、風速の予測値の分布(緑線)、風速の予測値から解析値を引いた差(色)。d) は、海面気圧 [hPa] の予測値(黒線)、解析値(緑線)、予測値から解析値を引いた差(色)。

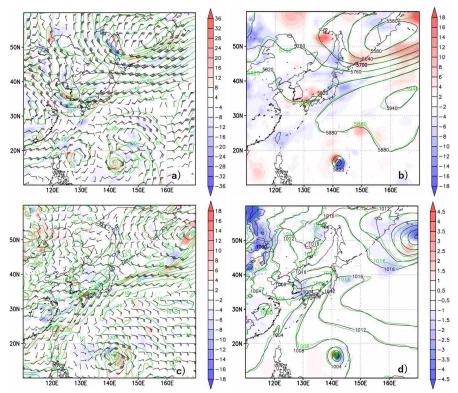


図 4.1.12 7月5日 12UTC を初期値とする GSM の 24 時間予報と7月6日 12UTC の解析値との比較。図の配置と表示要素は図 4.1.11 と同じ。

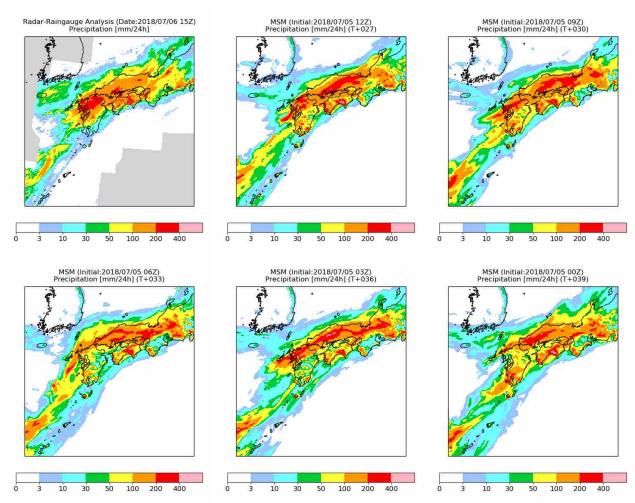


図 4.1.13 2018 年 7 月 7 日 0 時を対象とする 24 時間降水量。左上から、解析雨量、7 月 5 日 12UTC 初期値、09UTC 初期値、06UTC 初期値、03UTC 初期値、00UTC 初期値の MSM 予想降水量。単位はいずれも mm/24h。

県・佐賀県・福岡県での 400 mm/24h を超える大雨を 予測している。しかし、各初期時刻ごとの予測を比べ ると 200 mm/24h 以上の雨量の予測にばらつきが大き く、初期値が新しくなるにつれて実況の降水量・分布 に近くなるという一般的な傾向は見られなかった。

大雨の可能性について MEPS (当時は試験運用期間 中)の結果を用いた降水量の超過確率を確認する。図 4.1.14 に、7月7日0時までの24時間降水量について、 100 mm/24h, 200 mm/24h をそれぞれ閾値とする超過 確率を示す。中国地方の降水について図 4.1.13 の解析 雨量と対応させて確認すると、100 mm/24h を閾値と する超過確率は39時間予報(7月5日00UTC初期値) では40%以上で、初期値が新しくなるとともに確率が 上がり、27時間予報(7月5日12UTC初期値)では広 範囲で90%を超えていた。実況で200 mm/24hを超え た広島県や九州北部地方の超過確率について、39時間 予報 (7月5日00UTC初期値)、33時間予報 (7月5 日 06UTC 初期値) では 10%未満であったが、27 時間 予報(7月5日12UTC初期値)では広島県で40%以 上、九州北部地方で30%以上となっており、初期値が 新しくなるとともに超過確率が高くなっていた。

次に、24時間より短い時間での局地的な大雨につい て、その予測結果を確認する。図 4.1.15 に、7月6日 21 時までの解析雨量、MSM, LFM の 3 時間降水量を 示す。清野ほか (2018) によると、本期間中に線状降水 帯が複数形成されており、特に、広島県や九州北部地方 に形成された線状降水帯が平成30年7月豪雨期間中の 総降水量に対して4割から6割の寄与をしていたこと が示されている。図4.1.15に示した解析雨量でも、広 島県付近に線状降水帯に対応した降水分布が確認でき る。広島県志和では 20 時の 3 時間降水量が 112.5 mm を記録するなど、この降水帯が形成された地域では局 地的な大雨となった。MSM でも線状の降水域を予測し ており、その位置と強度は7月6日00UTC初期値より 新しい初期値から実況に近い予測となっていた。LFM では9時間予報(7月6日03UTC初期値)の段階か ら線状の降水域を予測していた。降水量は実況と同様 に 100 mm/3h を超える大雨を予測しているが、降水 域は MSM よりもやや北に予測していた。

九州北部地方では線状降水帯により、佐賀県嬉野で 18時10分の3時間降水量が175 mm を記録するなど、 局地的な大雨となった。7月6日21時までの3時間降水

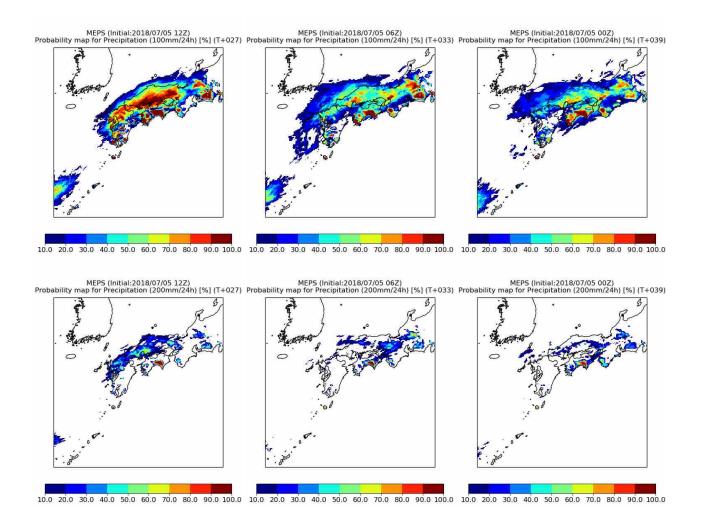


図 4.1.14 2018 年 7 月 7 日 0 時を対象とする MEPS の 24 時間降水量の超過確率 [%]。上段は 100 mm/24h を閾値とする超過確率、下段は 200 mm/24h を閾値とする超過確率。左列から、7 月 5 日 12UTC 初期値、06UTC 初期値、00UTC 初期値の MEPS 予想降水量から算出した。

量について、MSMでは24時間予報(7月5日03UTC 初期値)の段階で九州北部地方で100 mm/3h以上の降水を予測しているが、初期値ごとに降水帯の位置や強度は大きく異なっていた(図略)。リードタイムが短い3時間予報(7月6日09UTC 初期値)、6時間予報(7月6日06UTC 初期値)では実況に近い予測ができていた。LFMでは9時間予報(7月6日03UTC 初期値)の段階から継続して実況に近い降水分布を予測していたが、降水域の面積は実況やMSMと比べて狭かった。

さらに細かい時間間隔で雨量分布を実況とモデル予測で比較する。図 4.1.16 に、7月6日18 時から 21 時までをそれぞれ対象とする1時間降水量を示す。時間経過と強雨域の位置に着目すると、実況では広島県付近に 50 mm/h を超える強雨域が 3 時間にわたって停滞しており、「数時間にわたってほぼ同じ場所で通過または停滞する」という線状降水帯の特徴が現れている。一方、LFM の予測について 50 mm/h 以上の雨域の動きに着目して比較すると、同じ場所に停滞することなく、上空の気流と同じ北西方向に移動していることがわかる。多くの場合、線状降水帯はバックビルディン

グ型の構造(暖湿気流入側で次々と積乱雲が発生、発達・衰弱しながら風下に移動する)を持っていることが知られており、清野ほか (2018) では今回の事例でも同様の構造であった可能性を指摘している。LFM が予測した雨量分布から推測すると、暖湿気流入側での積乱雲の持続的な発生が表現できておらず、このため降水帯が同じ場所に停滞できていないと考えられる。

短時間の局地的な大雨の発生確率について、MEPS の予測値を用いて確認する。図 4.1.17 に、7月6日21時までの 3 時間降水量について、50 mm/3h, 100 mm/3h をそれぞれ閾値とする超過確率を示す。九州北部地方の大雨については 24 時間予報(7月5日12UTC 初期値)でも 50 mm/3h を閾値とする超過確率が 20%程度となっており、複数のアンサンブルメンバーによって降水が表現されていたことがわかる。一方、広島県付近の大雨については 12 時間予報(7月6日00UTC初期値)の段階で 30%以上となっているが、それ以前の初期値による予報では 10%程度もしくはそれ未満であった。また、100 mm/3h を閾値とする超過確率はどちらの地域でも 10%未満であった。アンサンブル各メンバーが予測した 100 mm/3h 以上の降水域(図 4.1.17

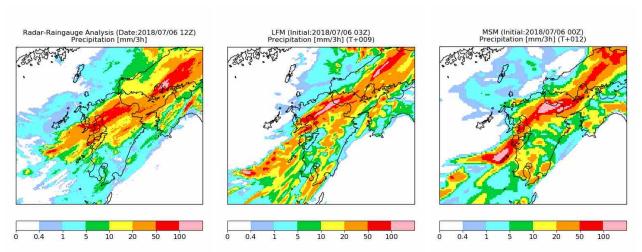


図 4.1.15 2018 年 7 月 6 日 21 時を対象とする 3 時間降水量。左から、解析雨量、7 月 6 日 03UTC 初期値 LFM 予想降水量、7 月 6 日 00UTC 初期値 MSM 予想降水量。単位はいずれも mm/3h。

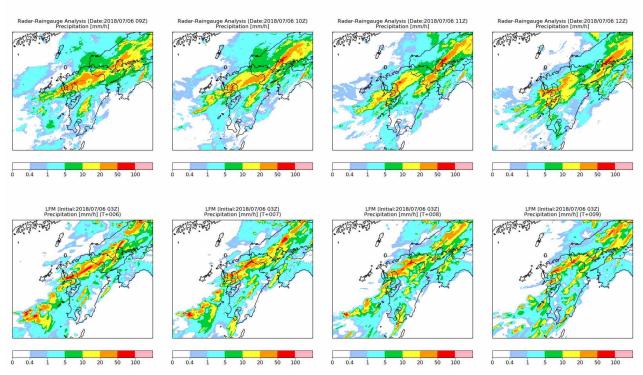


図 4.1.16 2018 年 7 月 6 日 18 時から 21 時をそれぞれ対象とする 1 時間降水量。上段は、解析雨量、下段は 7 月 6 日 03UTC 初期値 LFM 予想降水量。単位はいずれも mm/h。

下段の桃色線)を見ると、どの初期値でもいずれかのメンバーが九州北部地方の大雨を予測していたことがわかる。事後検証の観点では、大雨の可能性を捉えていたと見ることもできるが、大雨をこれから予測する立場で予測資料を見た場合、半日以上のリードタイムをもって短時間大雨を予測することは困難であったといえる。

(3) 全球及びメソモデルのガイダンス

図 4.1.18 に 7 月 7 日 0 時を対象とする GSM-RMAX24と対応する観測値を示す。前述の通り、GSM は初期時刻が古い予測ほど西日本の太平洋側や東海地方を中心に大雨を予測する傾向があり、大雨特別警報

が発表された九州北部地方や中国地方に 200 mm/24h を超える大雨を予測するようになったのは 7月5日の 初期値になってからであった。この GSM の予測に対応して、4日12UTC 初期値の GSM-RMAX24 は西日本の太平洋側や東海地方が降水予測の中心になっており、注目される中国地方には 100 mm/24h を超える降水はほぼ予測されていなかった(図 4.1.18 (a))。5日 00UTC 初期値の GSM-RMAX24 では、中国地方を含む西日本のほぼ全域で 100 mm/24h 以上、場所によっては 200 mm/24h を超える大雨を予測するようになったものの、300~400 mm/24h の大雨が観測され、大雨特別警報が発表された九州北部地方や中国地方に対す

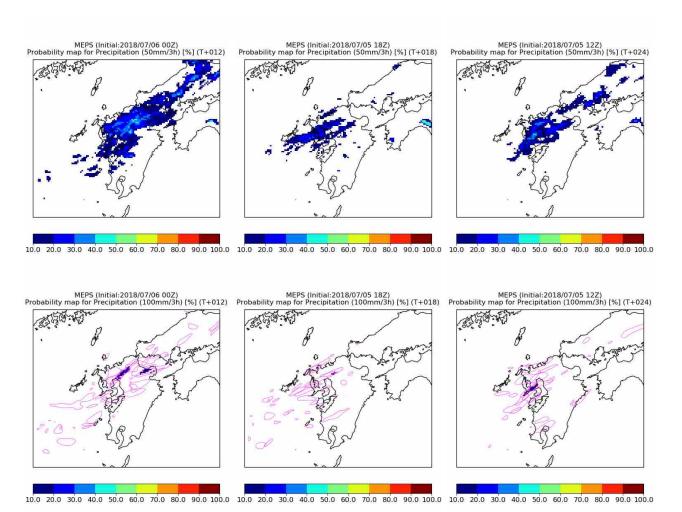


図 4.1.17 2018 年 7 月 6 日 21 時を対象とする MEPS の 3 時間降水量の超過確率 [%]。上段は 50 mm/3h を閾値とする超過確率、下段は 100 mm/3h を閾値とする超過確率。左列から、7 月 6 日 00UTC 初期値、7 月 5 日 18UTC 初期値、12UTC 初期値の MEPS 予測値。桃色線は MEPS 各アンサンブルメンバーの 3 時間降水量で 100 mm/3h の等値線のみ示した。

る予測は不十分なままであった(図 4.1.18 (b))。

図 4.1.19 に同じ 7 月 7 日 0 時を対象とする MSM-RMAX24 と対応する観測値を示す。5 日 00UTC 初期値の FT=39 では、西日本のほぼ全域で 100 mm/24h以上、所々200 mm/24hを超える大雨を予測しており(図 4.1.19 (a))、同じ初期時刻の GSM-RMAX24 と同程度に広範囲での大雨の発生のポテンシャルを表現していた。直近の予測となる5日12UTC 初期値では、広島県、岡山県、佐賀県、長崎県、福岡県において周囲よりも降水を集中させる傾向が明瞭になったが、九州北部地方については観測された 300~400 mm/24hの大雨は予測できていなかった(図 4.1.19 (b))。

次に短時間での局地的な大雨に対する予測結果を確認する。図 4.1.20 に、7月6日18時及び21時を対象とする MSM-RMAX33 と対応する MSM の 3 時間降水量予測、観測値を示す。前述の通り、MSM は位置や強度、時間に実況とのずれはあるものの、広島県や佐賀県で観測された局地的な大雨に対応する線状の降水域を予測しており、大雨が発生するシグナルを表現していた。MSM-RMAX33 は、MSM の降水予測に対応し

て広島県付近や九州北部地方で降水を予測しているが、 6日21時を対象とする九州北部地方の降水予測につい ては、MSM の予測した 100 mm/3h を超える降水は下 方修正されている。この下方修正は、MSM-RMAX33 のベースになっている MSM3 時間平均降水量ガイダン スが MSM よりも降水量を少なく予測したことが原因 である。下方修正によってガイダンスの方が実況に近 くはなっているが、局地的な大雨が発生するかもしれ ないという MSM のシグナルは却って見えにくくなっ ていると言える。通常 MSM3 時間平均降水量ガイダン スでは、MSM の降水量予測を下方修正することで予 測頻度を適切に保っている (白山 2018) が、この補正 が影響したと考えられる。同様の理由でガイダンスが モデルより降水量を少なく予測したことで大雨のシグ ナルを見えにくくしてしまう例は、平成29年7月九州 北部豪雨でも発生しており (欠畑・白山 2018)、このよ うな特徴は顕著な大雨の発生が想定される状況ほど留 意する必要があると考えられる。

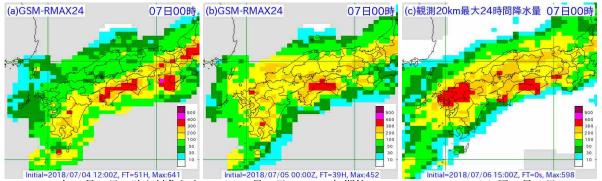


図 4.1.18 2018 年 7 月 7 日 0 時を対象とする、(a) 7 月 4 日 12UTC 初期値の GSM-RMAX24、(b) 同 7 月 5 日 00UTC 初期値、(c) 観測の 20km 格子最大 24 時間降水量。降水量の単位はいずれも mm/24h。

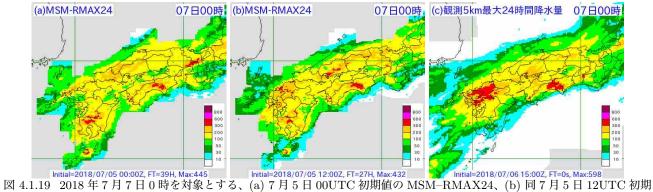


図 4.1.19 2018 年 7 月 7 日 0 時を対象とする、(a) 7 月 5 日 00UTC 初期値の MSM-RMAX24、(b) 同 7 月 5 日 12UTC 初期値、(c) 観測の 5km 格子最大 24 時間降水量。降水量の単位はいずれも mm/24h。

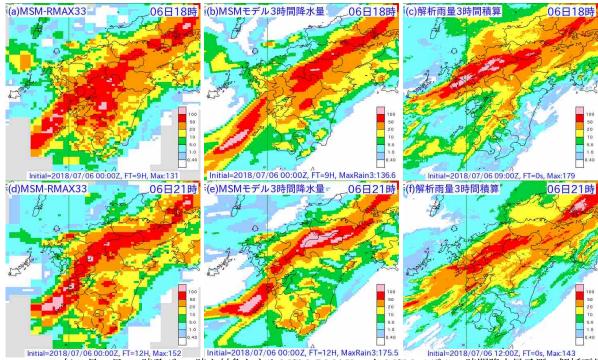


図 4.1.20 2018 年 7 月 6 日 18 時及び 21 時を対象とする MSM-RMAX33 と MSM モデル 3 時間降水量予測、解析雨量の 3 時間積算。(a) 及び (b) は 7 月 6 日 00UTC 初期値の FT=9、(d) 及び (e) は同 FT=12、降水量の単位はいずれも mm/3h。

4.1.4 7月8日 東・西日本の局所的な激しい雨

7月8日は、上空のトラフは西日本を通過しさらに 東進するが、九州・四国地方では南からの下層暖湿気 の流入が継続しており、前線による広範囲の大雨や大 気不安定による局地的な大雨が主体となった。 図 4.1.21 に、7月8日6時までの解析雨量、MSM, LFM の 3時間降水量を示す。四国地方では、連日の大雨に加えて、8日の朝にかけて、高知県宿毛で263 mm/3hを記録するなどの局地的な大雨が発生したことにより、同日6時に愛媛県および高知県に大雨特別警報が発表された。

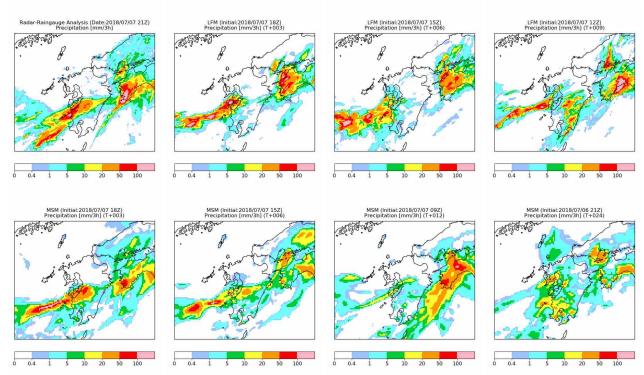


図 4.1.21 2018 年 7 月 8 日 6 時を対象とする 3 時間降水量。上段: 左から、解析雨量、LFM 予測降水量(左から、7 月 7 日 18UTC, 15UTC, 12UTC 初期値)。下段: MSM 予測降水量(左から 7 月 7 日 18UTC, 15UTC, 09UTC、7 月 6 日 21UTC 初期値)。単位はいずれも mm/3h。

愛媛県や高知県での降水予測に着目すると、MSM で は、初期値によって位置が大きく異なっていた。LFM では実況と同様に 100 mm/3h を超える降水量が予測 されているものの、MSM と同じく降水域の位置が初期 値ごとで大きく変わっていた。3時間予報では、MSM・ LFM ともに、観測データ同化による初期値改善によ り最も実況に近い降水分布を予測しているが、それよ り長いリードタイムでの予測は困難であったといえる。 予測された強雨域の特徴については、実況では強雨域 が沿岸部から内陸へ伸びているのに対し、LFM の予測 は沿岸部の降水がほとんど表現されておらず、強雨域 は実況よりも北にずれている。このことは、これまで に知見として得られている「LFM では対流活動の発生 が実況と比べて遅い」こと (原ほか 2015)、したがって 実況と比べて強雨域が風下にずれることと深く関連し ていると考えている。

図 4.1.22 に MSM および LFM の 975 hPa 高度の相当温位と風の予測を示す。両モデルとも、どの初期値においても、相当温位 350 K以上の暖湿気が九州南部・四国地方の西側に流れ込んでいる様子がわかり、成層不安定な場がモデルで予測されていることがわかる。豊後水道付近ではどの初期値でも南風~南南西風が卓越しており、高知県や愛媛県への暖湿気流入が確認できる。また、四国西部沿岸域では、いくつかの初期値で南風と南南西風の収束を予測しており、対流活動が発生しやすい環境であったといえる。

九州南部にかかる降水帯に対応した九州の西海上の

相当温位不連続帯について、MSMでは初期値が新しくなるにつれてより南側に予測しており、降水帯の位置や強度も実況に近づいている。九州南部におけるLFMの予測雨量は MSM よりも実況に近いが、LFM が予測した不連続帯は MSM やメソ解析よりも北にずれており、それと対応して降水帯の位置も実況より北にずれていた。

4.1.5 予測結果のまとめ

本節では、第 4.1.1 項で平成 30 年 7 月豪雨の概要を述べた後、異なるスケールの現象によって大雨が発生した 3 つの期間に着目して数値予報の予測結果を確認した。

第4.1.2項の台風第7号は7月1日00UTC初期値の段階で中心位置等が精度良く解析されたことで、大雨の2から3日前から予測ができた事例であった。GSMと全球EPSだけでなく海外数値予報センターのモデルでも同等のリードタイムをもって予測が実況に近づいた。台風の予測が実況に近づくことで、24時間最大降水量ガイダンスの予測も実況に近づいた。

第4.1.3 項の活発な前線による大雨の発生自体はある程度リードタイムを持って予測できたが、GSM と全球 EPS は、この事例について太平洋高気圧の張り出しとトラフの深さに予報時間と共に増大する誤差が生じる状況であった。この誤差は予報時間が短くなると共に小さくなった。大雨が発生する場所を特定できるリードタイムは1.5 日程度だった。MSM は当時39時間予報を行っており、MSM の予測対象期間に入る時

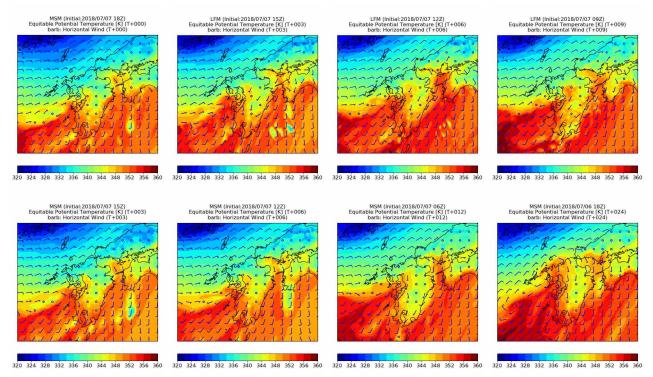


図 4.1.22 2018 年 7 月 8 日 3 時を対象とする 975hPa 高度の相当温位 [K] と風 [m/s]。上段:左から、メソ解析、LFM 予測 (左から、7 月 7 日 15UTC, 12UTC, 09UTC 初期値)。下段:MSM 予測 (左から 7 月 7 日 15UTC, 12UTC, 06UTC、7 月 6 日 18UTC 初期値)。

期には側面境界条件を与える GSM の予報誤差がある程度小さくなっており、MSM には GSM の気圧配置に関する予報誤差の影響は小さかった。 GSM 及び MSM の 24 時間最大降水量ガイダンスは、それぞれのモデルの予測に準じたリードタイムで大雨の発生は予測していたが、大雨特別警報が発表された九州北部地方や中国地方で観測された降水量には達しない予測であった。前線の暖域側に線状降水帯が発生することを MSM と LFM は、ある程度予測できていたが、発生場所や激しい雨の継続する期間を精度良く予測できてはいなかった。 MSM の 3 時間最大降水量ガイダンスは、概ね MSM の予測に即して局地的な大雨を予測していたが、予測頻度を保つために行う補正が却って MSM が予測した大雨のシグナルを見えにくくする例も見られた。

第4.1.4項の事例については、解析雨量やレーダー反射強度といった降水現象と関連するデータを初期場の作成に使用する MSM や LFM でも 6 時間以上前に激しい雨の発生する場所を特定するのは難しく、LFM では激しい雨の発生する場所が初期値毎に異なり、直前の初期値になるまで、実況に近い位置に激しい雨を予測できなかった。7月8日の大雨については長いリードタイムをもって予測するのは困難な事例であったといえる。モデルで再現できなかった背景には、対流活動の発生や維持についてまだまだ未解明なことが多く、それらをモデルに取り込めていないことや、モデルが持つ系統誤差(例えば、地上日射量や下層水蒸気量の過少傾向など)によって対流発生に必要な環境場が十

分に再現できない場合がある、などの理由がある。今後も、様々な検証や改良を通じて数値予報の精度向上 に努めていきたい。

この節に示したように、大雨等の要因となる気象現象のスケールを理解して、そのスケールに合わせた数値予報モデルのプロダクトを利用する必要がある。2日以上のリードタイムを持って広範な大雨のポテンシャルを予測する場合は GSM、全球 EPS が適しているが、十分なリードタイムをもって予測することが困難なシアーラインや地形性収束による小さなスケールの現象は MSM, LFM の予測を参照することが一般的には有効である。また、MSM の予報の不確かさは MEPS を参照していただきたい。

数値予報モデルが予測対象とする現象スケールなど を理解した上で、数値予報モデルの誤差の傾向を把握 することが重要になってくる。適正な初期値を作成す ることでかなり長いリードタイムをもって予測できる 現象もあれば、モデルの系統誤差が同じような分布で 継続する事例や、予報対象時刻の直前にならなければ 予測が難しいような事例もあることを示した。前の初 期値からの予測の変化なども考慮して、数値予報シス テムの予測結果と実況の違いに注意を払い、数値予報 プロダクトを利用していく必要がある。

参考文献

欠畑賢之, 白山洋平, 2018: 事例調査: 平成 29 年 7 月九 州北部豪雨. 平成 30 年度数値予報研修テキスト, 気 象庁予報部, 48-53.

- 気象庁, 2018: 平成 30 年 7 月豪雨(前線及び台風第 7 号による大雨等. 災害をもたらした気象事例 平成 30 年 7 月 13 日.
- 白山洋平, 2018: 降水ガイダンス. 数値予報課報告・別冊第 64号, 気象庁予報部, 95-118.
- 清野直子, 津口裕茂, 廣川康隆, 加藤輝之, 2018: 平成 30年7月豪雨の局地的な特徴. 気象庁気象研究所研究成果報告会 平成 30年11月10日, URL http://www.mri-jma.go.jp/Topics/H30/301110/all.pdf.
- 原旅人, 伊藤享洋, 松林健吾, 2015: asuca が導入された局地数値予報システムの特性. 平成 27 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 9-23.
- 本田有機, 坂本雅巳, 2018: 気象庁全球モデルの展望. 数値予報課報告・別冊第65号, 気象庁予報部, 12-15.

4.2 十成 30 平日風第 21 与

4.2.1 はじめに

8月28日03時にマーシャル諸島近海で発生した平成30年(2018年)台風第21号(T1821)は西へ進み、31日09時にマリアナ諸島の西海上で勢力が最大となり猛烈な台風(最大風速55 m/s、中心気圧915 hPa)となった。T1821は北西に進路を変えて日本の南を北上し、9月4日03時に四国の南に達した。その後、北北東に進路を変えて非常に強い勢力を保ったまま、4日12時前、徳島県南部に上陸し、4日14時前には、兵庫県神戸市付近に再上陸、本州を通過し日本海を北上、5日09時に間宮海峡で温帯低気圧となった。T1821の上陸・通過に伴い、西日本から北日本にかけて大荒れの天気となり、特に四国地方や近畿地方では、猛烈な風が吹き、猛烈な雨が降ったほか、記録的な高潮となり、大阪府および兵庫県内で浸水害が発生した(大阪管区気象台2019)。

本節では、T1821の事例を取り上げ、数値予報モデルによる進路予測、ガイダンスによる降水および風の予測について検証した結果を解説し、最後に利用上の留意点について述べる。

4.2.2 T1821 の進路予測

(1) 全球モデルによる進路予測

図 4.2.1 に、T1821 に対する全球モデル (GSM) の 8 月 28 日 00UTC から 9 月 4 日 12UTC まで 12 時間 ごとの初期値について、132 時間先までの進路予測を 気象庁ベストトラック (ベストトラック) と比較して 示す。8 月 29 日 12UTC 初期値まではベストトラック より東よりの進路を予測し、それ以降の初期値から日本の南で北西に進路を変えた 9 月 1 日 00UTC 初期値 まではベストトラックより西寄りに予測する場合が多かった。9 月 1 日 12UTC 初期値以降は、北上の遅れが みられた初期値はあるものの進路予測はベストトラックに近い予測となった²。

(2) 全球アンサンブル予報システムによる進路予測

図4.2.2 に、T1821 に対する全球アンサンブル予報システム (GEPS) の進路予測を示す。8月31日12UTC 初期値(図4.2.2 上図)では、各メンバーの予測はコントロールランを中心に東西に広く分布しており、予測の不確実性が大きいことを示している。多くのメンバーは日本の南で転向し本州を指向していたが、西側の進路を予測したメンバーの中には南西諸島を指向したものが6メンバーあった。大きく西側に外れるメンバーが相当数みられたのは9月1日00UTC初期値までで、9月1日12UTC初期値(図4.2.2 下図)以降は

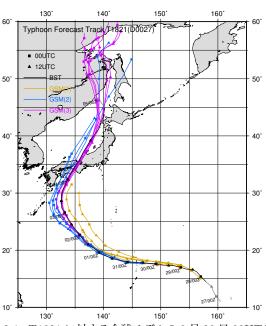


図 4.2.1 T1821 に対する全球モデルの 8 月 28 日 00UTC から 9 月 4 日 12UTC まで 12 時間ごとの初期値について、132 時間先までの進路予測。黄土線は 8 月 28 日 00UTC から 8 月 29 日 12UTC 初期値までの予測、青線は 8 月 30 日 00UTC から 9 月 1 日 00UTC 初期値までの予測、紫線は 9 月 1 日 12UTC から 9 月 4 日 00UTC 初期値までの予測、黒線は気象庁ベストトラックによる解析。

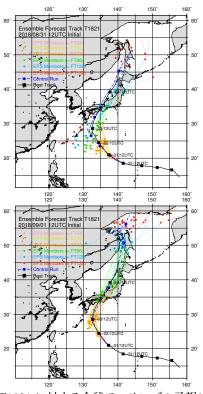


図 4.2.2 T1821 に対する全球アンサンブル予報システムの 進路予測。上図は 8 月 31 日 12UTC 初期値、下図は 9 月 1 日 12UTC 初期値の進路予測。点線はアンサンブルメン バーによる進路予測。青色の点線はコントロールラン、そ の他の色の点線は各メンバーの予報対象期間を示し、桃色 が FT=0 から FT=24 まで、黄色が FT=24 から FT=48 まで、橙色が FT=48 から FT=72 まで、緑色が FT=72 から FT=96 まで、水色が FT=96 から FT=120 まで、赤 色が FT=120 から FT=132 まで。黒線は気象庁ベストト ラック。

¹ 成瀬 由紀子(第 4.2.1 項および第 4.2.2 項)、山田 和孝(第 4.2.3 項、第 4.2.4 項および第 4.2.5 項)

² ただし、2019 年 9 月 2 日 00UTC 初期値では 9 月 1 日 00UTC 初期値と同様に西寄りに予測していた。

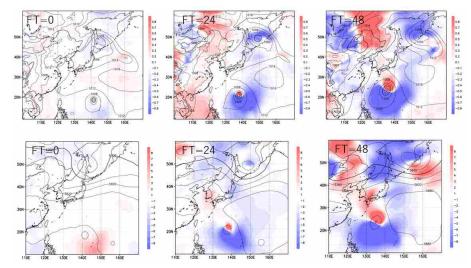


図 4.2.3 図 4.2.2 の 8 月 31 日 12UTC 初期値(上図)で、コントロールランより大きく西側へ外れた 6 メンバーの平均とコントロールランを含む全メンバーの平均の差。上段は海面更正気圧 [hPa]、下段は 500 hPa ジオポテンシャル高度 [gpm]。実線は全メンバーの平均値、陰影は 6 メンバーの平均と全メンバーの平均の差を示す。左図が FT=0、中央図が FT=24、右図が FT=48。

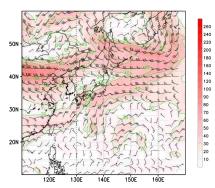


図 4.2.4 全球解析における 9 月 2 日 12UTC の 300 hPa 風。陰影と緑実線は風速、矢羽は水平風。単位はいずれも ノット。

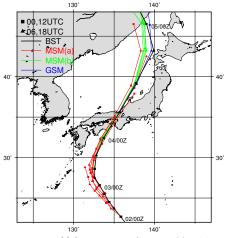


図 4.2.5 T1821 に対するメソモデルの9月2日00UTCから9月4日06UTCまで6時間ごとの初期値について、39時間先までの進路予測。赤線はメソモデルによる9月2日00UTCから9月3日00UTC初期値までの予測、緑線はメソモデルによる9月3日06UTCから9月4日06UTC初期値までの予測、青線は全球モデルによる9月4日06UTC初期値の予測。黒線は気象庁ベストトラックによる解析。

全メンバーが四国地方から近畿地方を指向する予測になった。GEPSで大きく西側へ外れるメンバーがなくなったタイミングは、GSMの進路予測がベストトラックに近い予測となったタイミングと一致していた。

図 4.2.3 に、進路が南西諸島を指向した 6 メンバーの 平均と、コントロールランを含めた全メンバーの平均 の海面更正気圧 (PSEA) と 500 hPa ジオポテンシャル 高度 (Z500) の差を示す。FT=0 (図 4.2.3 左図) をみ ると、6メンバーの平均は全メンバーを平均した台風 中心より東から南側で PSEA は負偏差、Z500 は正偏 差となっていた。その後、FT=24(図4.2.3中央図)、 FT=48 (図 4.2.3 右図) と予測が進むと PSEA、Z500 ともに台風中心の南から南西側で負偏差となり、進路 が南西側にずれていったことを示している。進路の予 測が大きく西側へ外れたメンバーの初期摂動の入り方 には、T1821の事例では、台風中心の南東側で PSEA を低く、Z500を高くするという特徴があった。図 4.2.4 に、T1821 が日本の南を北西進した 9 月 2 日 12UTC の 300 hPa 風の全球解析値を示す。図 4.2.4 をみると、 日本の南には太平洋高気圧縁辺流に対応する南風が解 析されているが、東経135度より西側(チベット高気 圧の東側にあたる)では弱風または北から北東の風が 卓越していた。このことは、少し西寄りの進路を予測 するだけで台風の北上は遅くなり、8月31日12UTC 初期値の一部のアンサンブルメンバーにみられるよう な西側に流される予測になることと整合している。

(3) メソモデルによる進路予測

図 4.2.5 に、T1821 に対するメソモデル (MSM) の 9 月 2 日 00UTC から 9 月 4 日 06UTC まで 6 時間ごと の初期値について、39 時間先までの進路予測を示す。 9 月 2 日 00UTC から 9 月 3 日 00UTC 初期値までは、

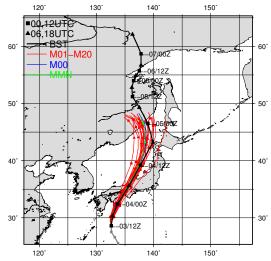


図 4.2.6 T1821 に対するメソアンサンブル予報システムに よる 9 月 3 日 12UTC 初期値の進路予測。青線がコント ロールラン、赤線が各メンバー、緑線がアンサンブル平 均を示す。

MSM はベストトラックより西寄りを予測しており北上も遅かった。その後、台風の進路が北へと変わった9月3日06UTC 以降の初期値では、やや北上の遅れはみられるものの進路予測のベストトラックとの整合性はよくなった。また、9月3日06UTC 初期値以降でも日本海中部まではベストトラックとの整合性はよかったが、北海道の西海上を北上し間宮海峡へ進んだ期間は、ベストトラックおよび GSM より西寄りを予測しており予測誤差が大きかった。

(4) メソアンサンブル予報システムの進路予測

日本海中部までの進路予測で、MSM の予測がベストトラックとの整合性がよくなった9月3日12UTC初期値について、当時は部内試験運用中³であったメソアンサンブル予報システム (MEPS) による T1821 に対する進路予測を図 4.2.6 に示す。MEPS の進路予測では、日本海に抜けた後の予測のばらつきが大きくなっている。これは、上層の寒冷渦の予測のばらつきが大きい(図略)ことに対応していると考えられる。MSMによる予測はベストトラックから西側へのずれがあったが、MEPS は実況を捕捉しており、MSM による予測の不確実性が大きいことを表現できていた。

4.2.3 降水予測について

前項において、GSM 及び MSM の進路予測について確認した。その結果、GSM については日本に上陸した2日半前の9月1日12UTC 初期値以降、MSM については9月3日06UTC 初期値以降、ベストトラックに近い予測が出来ていたことを示した。本項では降水量予測について示す。

台風の接近と上陸に伴い、四国地方や近畿地方、東

海地方で総降水量が 300 ミリを超えたところがあり、台風接近に伴う短時間強雨も観測された (大阪管区気象台 2019)。以下では、GSM と MSM による 24 時間降水量ガイダンス (白山 2018) の予測結果を確認した後、MSM と LFM による短時間強雨の予測を確認する。なお、ここで示す 24 時間降水量ガイダンスの予測結果は現象発生当時の降水ガイダンスに基づくもので、第5.1節で解説する改良後のガイダンスで再計算したものではない。本事例では改良前後の予測結果に大きな違いは見られなかった。

図 4.2.7 は、24 時間降水量がピークを迎えた 9 月 5 日 03 時の観測の 24 時間最大降水量と 9 月 3 日 00UTC 初期値及び9月1日12UTC初期値のGSM24時間最 大降水量ガイダンス (GSM-RMAX24) の予測結果を、 図 4.2.8 は 9 月 5 日 03 時の観測の 24 時間最大降水量と 9月3日15UTC初期値及び9月3日03UTC初期値の MSM24 時間最大降水量ガイダンス (MSM-RMAX24) の予測結果を、それぞれ示す。図 4.2.7 によると、GSM-RMAX24 は 3 日前(1 日 12UTC 初期値)には、四国 地方や近畿地方、東海地方で300ミリを超える予測を するなど、実況に近い分布で大雨を予測できていた。 また、前日(3日00UTC初期値)には3日前より、東 海地方の予測が更に実況に近くなっている。図 4.2.8 に よると、MSM-RMAX24の初期値変わりは小さく、実 況で大雨となった徳島・高知、紀伊半島、東海地方、東 海~北陸の山間部での大雨を予測していた。

続いて、MSM の 3 時間降水量の予測について、台 風が四国に上陸する直前の 9 月 4 日 12 時と日本海に抜 けた 9 月 4 日 18 時の結果を確認する。図 4.2.9 に 9 月 4 日 12 時を対象とした実況と予測を示す。39 時間予 測では、台風中心位置が実況よりも南寄りに予測され ていたが、それより新しい初期値では、台風の位置は 実況と対応が良くなり、台風による降水、下層暖湿気 流入に伴う四国南部から東海での南斜面での降水をよ く表現できていた。一方で、中国地方については、実 況よりも降水量が多く予測される傾向が見られた。ま た、図 4.2.10 に 9 月 4 日 18 時を対象とした実況と予 測を示す。MSM による台風の位置の予測が良好であっ たため、台風本体による降水域や、下層暖湿気流入に よる東海地方の降水について、39 時間予測でもよく表 現できていた。

図4.2.11 に、9月4日12時を対象とした実況とLFM による予測を示す。LFM では、東海地方から関東地方 にかけて、線状に延びる降水域をより明瞭に表現している。しかし、これらの局地的な強雨域の表現については実況からの位置ずれが見られ、初期値変わりが大きい。

4.2.4 風の予測について

本台風では、四国地方や近畿地方では猛烈な風が観 測され、観測史上1位を更新したところが多数あった

^{3 2019} 年 6 月 27 日 00UTC 初期値より正式運用を開始した。

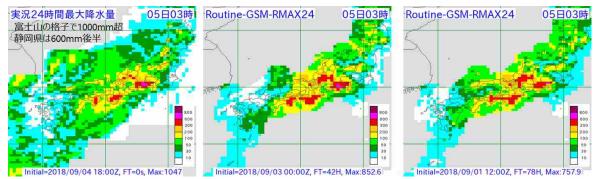


図 4.2.7 9月5日 03 時までの観測の 24 時間最大降水量と GSM-RMAX24 の比較。左から、観測の 24 時間最大降水量 [mm/24h]、3日 00UTC 初期値の 42 時間予測値の GSM-RMAX24[mm/24h]、1日 12UTC 初期値の 78 時間予測値の GSM-RMAX24[mm/24h]。

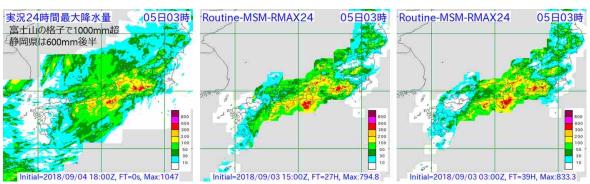


図 4.2.8 9月5日 03 時までの観測の 24 時間最大降水量と MSM-RMAX24 の比較。左から、観測の 24 時間最大降水量 [mm/24h]、3 日 15UTC 初期値の 27 時間予測値の MSM-RMAX24[mm/24h]、3 日 03UTC 初期値の 39 時間予測値の MSM-RMAX24[mm/24h]。

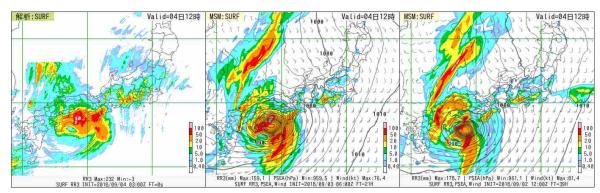


図 4.2.9 9月4日12時までの観測の3時間降水量と MSM による3時間降水量予測の比較。左から、観測の前3時間降水量 [mm/3h]、3日06UTC 初期値の21時間予測値 [mm/3h]、2日12UTC 初期値の39時間予測値 [mm/3h]。予測値の実線は 海面更正気圧 [hPa]、矢羽は地上面の風 [ノット]。

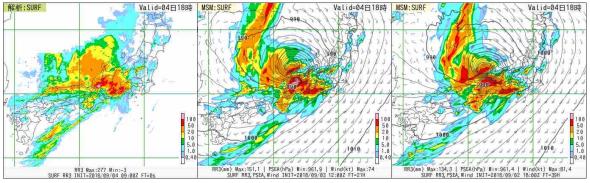


図 4.2.10 9月4日18時までの観測の3時間降水量と MSM による3時間降水量予測の比較。左から、観測の前3時間降水量 [mm/3h]、3日12UTC 初期値の21時間予測値 [mm/3h]、2日18UTC 初期値の39時間予測値 [mm/3h]。予測値の実線は海面更正気圧 [hPa]、矢羽は地上面の風 [ノット]。

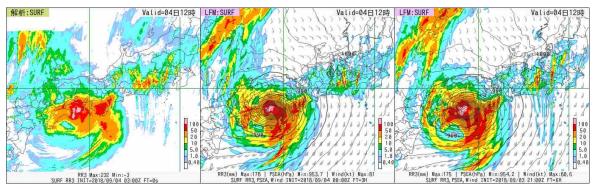


図 4.2.11 9月4日12時までの観測の3時間降水量とLFMによる3時間降水量予測の比較。左から、観測の前3時間降水量 [mm/3h]、4日00UTC初期値の3時間予測値 [mm/3h]、3日21UTC初期値の6時間予測値 [mm/3h]。予測値の実線は海面更正気圧 [hPa]、矢羽は地上面の風 [ノット]。

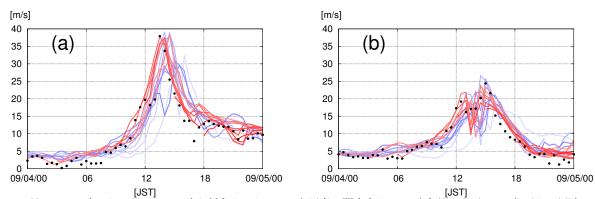


図 4.2.12 9月4日00時から9月5日00時を対象とした、(a) 大阪府の関空島と (b) 兵庫県の明石の30分ごとの風速 [m/s] の実況(黒)と MSM による地点予測時系列(9月3日12UTC初期値以降を赤、それ以前を青で表示。色が濃いほど新しい初期値による予測結果)を示す。

(大阪管区気象台 2019)。ここでは、MSM による風の予測について、地上観測地点の観測値と比較する。代表的な地点として、図 4.2.12 に、9月4日00時から9月5日00時を対象とした、大阪府の関空島と兵庫県の明石の30分ごとの風速の観測値と MSM の予測値の時系列を示す。MSM による台風の位置の予測がベストトラックに近づいた9月3日12UTC 以降の初期値では、風速の変化傾向がよく表現されるようになった。

4.2.5 まとめ

T1821 の事例について、数値予報モデルとガイダンスの予測結果を確認した。

進路予測については、北上の遅れが見られた初期値はあるものの、GSMは日本に上陸した2日半前の9月1日12UTC初期値以降、MSMは9月3日06UTC初期値以降、ベストトラックに近い予測となった。それ以前の初期値については、日本の南海上で北西に進路を変える頃を中心にベストトラックと比較して西寄りの進路を予測する傾向が見られた。また、MSMでは台風が北海道の西海上を北上する期間にベストトラックおよびGSMより西寄りを予測し予測誤差が大きくなった。GEPSでは、9月1日00UTC初期値まではベストトラックより大きく西側に外れ南西諸島を指向し

たメンバーがあったが、9月1日12UTC初期値以降は全メンバーが四国地方から近畿地方を指向する予測となった。大きく西側に外れる進路予測をするメンバーがなくなったタイミングは、GSMの進路予測がベストトラックと近い予測になったタイミングと一致していた。部内試験運用中であった MEPS では、MSM の予測誤差が GSM の予測誤差より大きかった期間について予測のばらつきが大きくなっており、MSM による予測の不確実性が大きいことを表現できていた。

本事例については、台風の進路予測が実況に近づいてからは、四国地方や近畿地方、東海地方の大雨の分布や、近畿地方での強風の時間変化がよく予測できていた。LFM による強雨の予測は、初期値毎に位置ずれ、強度のばらつきなどが見られた。

この事例による予測結果を踏まえて、数値予報システムの予測結果の利用に際しては、MSM の進路予測は必ずしも GSM の進路予測より予測誤差が小さいとは限らないことに留意する必要がある。台風の予測位置は風や雨の量的な予測に大きな影響を与える。MSMの予測がどの程度ばらつく可能性があるかを検討する際の参考として MEPS の予測結果を活用していただきたい。

参考文献

大阪管区気象台, 2019: 災害時気象報告「平成 30 年台風 第 21 号による 9 月 3 日から 5 日にかけての暴風、高 潮等」. 災害時自然現象報告書 2019 年第 1 号, 1–153. 白山洋平, 2018: 降水ガイダンス. 数値予報課報告・別 冊第 64 号, 気象庁予報部, 95–118.

4.3 平成 30 年台風第 24 号1

4.3.1 はじめに

平成30年(2018年)台風第24号(T1824)は、9月21日15時にマリアナ諸島近海で発生し、沖縄の南を北西に進んだ。9月28日から29日にかけて、非常に強い勢力で沖縄地方に接近した。29日12時以降は北東に向きを変え、徐々に加速しながら、30日20時頃に和歌山県田辺市付近に上陸した。その後、東日本から北日本を縦断し、10月1日9時に日本の東海上で温帯低気圧に変わった。T1824の接近・通過に伴い、広い範囲で暴風、大雨、高波、高潮となり、特に南西諸島及び西日本・東日本の太平洋側を中心に、これまでの観測記録を更新する猛烈な風または非常に強い風を観測した所があったほか、紀伊半島などで過去の最高潮位を超える高潮を観測した所があった(気象庁2019)。

ここでは、T1824の進路と強度、降水、風の数値予報モデルによる予測について調査した結果を説明する。まず、第 4.3.2 項は全球モデル (GSM) とメソモデル (MSM)、メソアンサンブル予報システム (MEPS) による台風予測結果、第 4.3.3 項は MSM と MEPS による降水予測、第 4.3.4 項は MSM による風の予測結果を示す。第 4.3.5 項ではガイダンスによる降水量予測結果を示す。最後に、数値予報モデルとガイダンスによる予測結果についてまとめる。

4.3.2 GSM と MSM、MEPS による台風予測

T1824 に対する GSM と MSM の台風進路とベストトラックとの比較結果を図 4.3.1 に示す。比較する予測期間は初期値において T1824 の中心位置が MSM の予測領域に存在した 2018 年 9 月 25 日 12UTC から 10 月 1 日 00UTC まで、12 時間ごとである。GSM は 84 時間予測まで、MSM は 51 時間予測(当時は部内試験運用中)まで描画する。

GSM による進路予測を見ると、2018 年 9 月 25 日 12UTC の初期値では西北西に逸れる。9 月 26 日 00UTC 初期値では転向するものの、予報初期に西進し過ぎてベストトラックより西に逸れる。全球アンサンブル予報システムでも 2018 年 9 月 26 日 00UTC まで実況を捕捉できていなかった(図略)。9 月 26 日 12UTC から 27 日 12UTC までの初期値では、予報初期に実況から西にずれる傾向が徐々に小さくなり、ベストトラックに近づく。9 月 28 日 00UTC 以降の初期値ではほぼベストトラックに沿って進行した。2018 年 9 月 26 日 00UTC から 28 日 12UTC までの6時間ごとの11 初期値で平均した72時間進路予測誤差は186 km で、2017年の72時間進路予測誤差の平均値(295 km, Japan Meteorological Agency (2018)の表4.8)と比べて小さく、日本に接近、上陸してからの進路予測精度は高い事

例であった。120 時間進路予測誤差は 566 km で、2017 年の 120 時間進路予測誤差の平均値(478 km, Japan Meteorological Agency (2018) の表 4.8)と比べて大きく、予測時間によって進路予測精度が大きく異なっていた(図略)。予測初期の精度が良くとも予測後半まで良いとは限らないので、なるべく最新の予測結果を参照する必要がある。

MSM の進路予測を見ると、9月27日12UTC以前の初期値ではGSMと同様にベストトラックの西側に逸れる傾向が見られた。9月28日00UTC以降の初期値では、進路予測は概ねベストトラックに沿うが、日本に上陸するあたりから北西側にずれる傾向が見られた。また、9月28日00UTCから9月29日00UTC初期値の予測では進行が早かった。36時間進路予測誤差は9月26日00UTCから29日00UTCまでの6時間ごとの13初期値の平均でMSMは73km、GSMは50kmで、この事例ではGSMの方が進路予測誤差が小さかった。

本事例において MEPS (当時は部内試験運用中)による進路予測が実況をどのように捉えていたのか調査するため、図 4.3.2 に進路予測結果を示す。2018 年 9月 26日 12UTC と 9月 27日 00UTC の進路予測は、すべてのメンバーが MSM と同様にベストトラックの西側に逸れてしまい、実況を捕捉できていなかった。9月 27日 12UTC から 9月 28日 12UTC までの初期値では、予測した進路がベストトラックの周りにばらついており、実況を捕捉できていた。9月 29日 00UTC 以降は予測期間後半でのばらつきが大きくなり、かつ北側にずれるメンバーが多くなっていた。

中心気圧の予測を見ると (図 4.3.3 上図)、2018 年 9 月 26 日から 29 日まではベストトラックに比べて GSM は初期値が 10-15hPa 浅く、MSM は 5-10 hPa 浅かっ た。GSM、MSM どちらも予測時間が長くなるほど過 発達傾向であり、GSM は 72 時間予測で 20hPa ほど深 まる事例が見られた。米原 (2017) より、GSM1705 で は 2015 年 6 月 20 日から 10 月 11 日の夏期試験におけ る72時間予測のバイアスはほぼゼロだが、事例別に見 ると ±20 hPa の誤差を持つこともあるのが分かる。米 原 (2017)の図 1.2.8 を見ると、ベストトラックに比べ て発達期では中心気圧の予測が浅いのに対し、衰弱期 では衰弱傾向が予測できずに過発達になることが示さ れている。図 4.3.3 で見られた GSM の過発達傾向は米 原 (2017)で示された発達ステージに応じた誤差特性と 矛盾しない。MSM による T1824 の予測は、FT=18 で 平均的にバイアスはゼロとなり、それ以降は過発達し て実況より 5-10 hPa ほど深まる傾向であった。9月30 日から 10月1日にかけての上陸に伴う衰弱は、GSM と MSM ともに変化傾向をよく捉えていた。

¹ 沢田 雅洋(第 4.3.1 項から第 4.3.4 項)、白山 洋平(第 4.3.5 項、第 4.3.6 項)

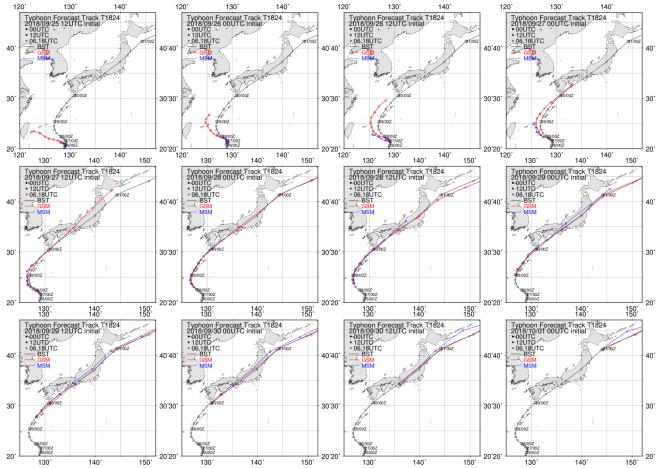


図 4.3.1 GSM と MSM による 2018 年台風第 24 号の予測結果。黒線がベストトラック、赤線が GSM による予測、青線が MSM による予測。予測初期時刻 2018 年 9 月 25 日 12UTC から 10 月 1 日 00UTC までの結果を左上から右下の順に並べる。

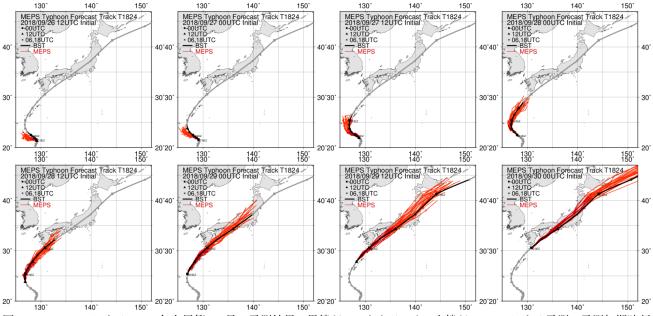


図 4.3.2 MEPS による 2018 年台風第 24 号の予測結果。黒線がベストトラック、赤線が MEPS による予測。予測初期時刻 2018 年 9 月 26 日 12UTC から 9 月 30 日 00UTC までの結果を左上から右下の順に並べる。

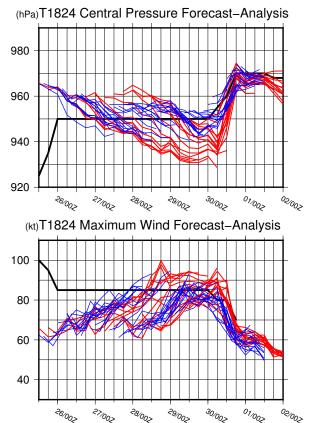


図 4.3.3 GSM と MSM による 2018 年台風第 24 号の予測 結果。上が中心気圧 [hPa]、下が最大風速 [ノット] の予測 結果。黒線がベストトラック、赤線が GSM による予測、 青線が MSM による予測。

最大風速²の予測を見ると(図 4.3.3 下図)、初期値では GSM と MSM ともに、実況より 10-20 ノットほど弱かった。予測時間が長くなるとどちらのモデルの予測も発達して実況の強度に近づく。しかし、ベストトラックで見られる通り実況ではほぼ定常か衰弱過程にある。モデルの初期値が実況より弱い時は、モデルの台風が実況の強度に達するまで発達することがある。本事例で見られるように、予測初期で起こるモデルの発達過程(あるいはスピンアップ)を見て、実況でも発達過程にあると判断すると、実況とは異なる解釈をする可能性がある。

4.3.3 MSM と MEPS による降水量予測

MSM と MEPS による降水分布予測の様子を示すため、解析雨量との比較結果を図 4.3.4 に示す。対象事例は 2018 年 9 月 30 日 06UTC の 6 時間降水量で、解析雨量によると九州で 200 mm/6h 以上、四国で 150 mm/6h以上の降水量があった。MSM による予測は一貫して降水量の多かった地域(九州、四国地方)を捉えていた。しかし、実況に比べて降水量を過大に予測する初期時刻が多かった。9 月 28 日 15UTC から 9 月 29 日 12UTC

初期値(39-18時間予測)では、四国において実況で見 られない 200 mm/6h 以上の降水を予測していた。加 えて、9月30日00UTC初期値(6時間予測)でも九州 において 200 mm/6h 以上の降水域、四国沖北部におい て 60 mm/6h 以上の降水域が実況よりも広がっていた ことが確認できる³。MSM による降水量が過大だった のは、台風予測の位置ずれ、MSM の台風過発達傾向、 MSM の降水過多バイアスなどの複数の要因が重なって 生じたと考えられる。9月28日15UTCから9月29日 03UTC 初期値(39-27 時間予測)は台風が実況より北 東側に先行し、四国南に位置している。このため、台風 の壁雲などに伴う強雨が四国地方の過大な降水量をも たらす要因の1つとなった。台風の強度について注目 すると、9月28日15UTCから9月29日03UTC初期 値(39-27時間予測)の中心気圧は946-948 hPa、9月 29 日 06UTC から 9 月 29 日 21UTC 初期値(24-9 時 間予測) は950-952 hPa と長い予測時間ほどベストト ラックの 955 hPa より深かった。台風に伴う降水は強 い台風ほど増える傾向があるので(例えば、Yokoyama and Takayabu 2008)、長い予測時間では過発達した台 風に伴う降水が降水量増加に寄与した可能性がある。 降水過多バイアスについては、MSM の特性として夏 季の降水バイアススコアは強い降水ほど1より大きい 傾向があることが報告されている(安斎 2018)。台風の 位置ずれが比較的小さい 9月 29日 18UTC から 9月 30 日 00UTC 初期値 (12-6 時間予測) において過大な降 水量となったのは、降水過多バイアスが影響している と考えられる。

本事例における降水を MEPS でどの程度捉えていたのか調べるため、各格子において MEPS の 21 メンバーの予測の中で最大となる 6 時間降水量(以下、メンバー最大降水量)および 100 mm/6h の超過確率を図 4.3.5 に示す。メンバー最大降水量を見ると、36 時間予測でも実況で大雨となった九州、四国地方を捉えていた。初期値が変わっても、メンバー最大降水量分布は一貫して大雨となった地域を捉え、新しい初期値ほど強い降水域の広がりが限定されていた。強い降水域の広がりが狭まったのは、新しい初期値ほど台風の位置のばらつきは小さく(図 4.3.2)、台風に伴う強い降水域は限定されたことが要因の1つと考えられる。

超過確率分布を見るとメンバー最大降水量分布で見られた傾向と同じく、新しい初期値ほど強雨域が絞られていく。超過確率 90%以上の地域は、実況の 100 mm/6hの雨となる領域とほぼ重なっていた。実況で 100 mm/6hの雨がなかった地域に注目すると、瀬戸内海や中国地方において 9月 28日 18UTC 初期値(36 時間予測)では超過確率が 50%に達する地域が見られるが、9月 29日 18UTC 初期値(12 時間予測)では 10%未満となることが確認できる。ただし、新しい初期値では実況と

² 最大風速は、台風中心位置から半径 500km 以内の高度 10m の最大風速である。

³ ただし、海上における解析雨量の精度は雨量計による補正 ができないため、陸上に比べて劣る可能性がある。

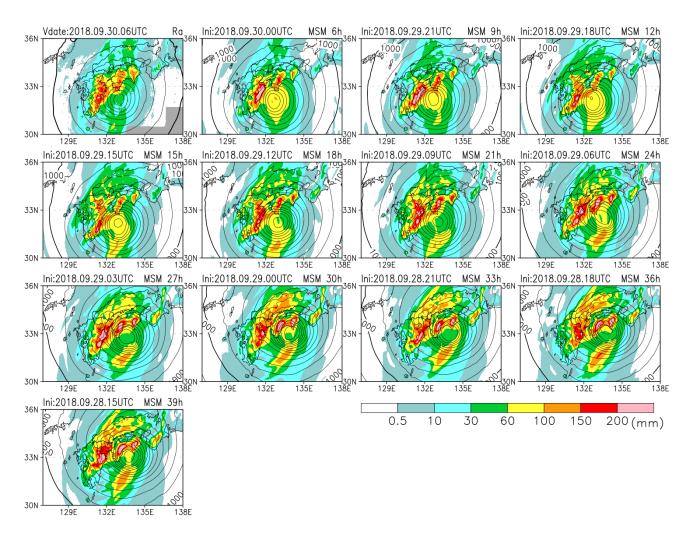


図 4.3.4 2018 年 9 月 30 日 06UTC を対象時刻とする、6 時間降水量の解析雨量と MSM による予測。左上が解析雨量とメソ解析の等圧線、左から 2 番目が 30 日 00UTC 初期値の MSM による予測で、以降は MSM の初期値を 3 時間ごとにずらして表示。等圧線は 5 hPa 間隔。降水量の単位は mm/6h。

比べて MEPS の 100 mm/6h の強雨域は狭く、見逃し が生じていた。実況で 100 mm/6h の降水があった鹿 児島県に注目すると、9月28日18UTCから9月29 日 12UTC 初期値 (36-18 時間予測) では超過確率が 10-30%、9月29日18UTC初期値(12時間予測)で は超過確率が60%あったにもかかわらず、9月30日 00UTC 初期値(6 時間予測)では超過確率が 10%未満 となり、実況の大雨を見逃していた。加えて、日向灘で は 9 月 29 日 06UTC から 29 日 18UTC 初期値(24-12 時間予測)の超過確率が50%を超える地域があるが、 9月30日00UTC初期値(6時間予測)では超過確率 が10%未満となる地域が確認された。このように本事 例では24時間以上前から大雨となる大半の地域を高い 確度で予測しつつも、一部見逃しが見られた。現時点 においては、見逃しを軽減するには、MEPSだけでは なく GSM や LFM による降水予測、降水ガイダンス なども併せて参照する必要がある。

4.3.4 MSM による風の予測

台風に伴う風速分布の予測結果について確認するため、MSMによる風速分布予測とメソ解析の比較結果を図 4.3.6に示す。メソ解析では台風の東から南東側で風速 30-35 m/s の暴風が見られるのに対して、MSMでは予測時間が長いほど最大風速が大きく、南東象限にピークが見られた。予測時間が長いほど最大風速が強い傾向は、ベストトラックとの比較でも見られ(図 4.3.3)、メソ解析とベストトラックのどちらと比べても最大風速が強めの傾向であった。面的な観点で見ると、9月29日09UTCから9月29日21UTC初期値(21-9時間予測)では、メソ解析より35 m/s以上の風速域が広がっていた。さらに、9月28日15UTCから9月29日06UTC初期値(39-24時間予測)では、メソ解析では見られない40 m/s以上の風速域が予測されていたことが確認できる。

本節での比較結果の注意点として、メソ解析は台風ボーガスの影響を受けるため強度・構造が実況とは異

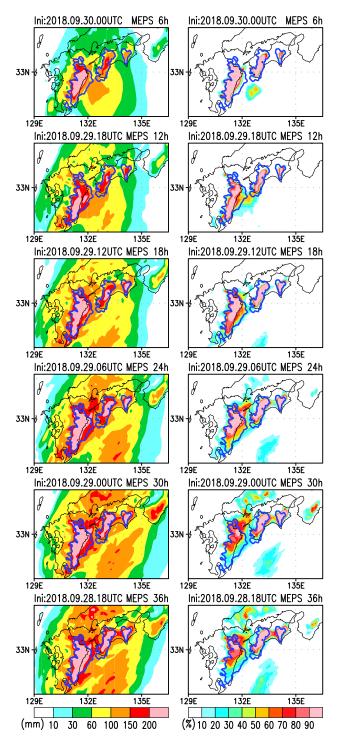


図 4.3.5 MEPS によるメンバー最大 6 時間降水量予測(左、単位は mm/6h)と 100 mm/6h 以上となる超過確率分布(右、単位は%)。対象時刻は 2018 年 9 月 30 日 06UTC。青線は実況で 100 mm/6h となった領域。上から 30 日 00UTC 初期値の MSM による予測で、以降は MSM の初期値を 6時間ごとにずらして表示。下の図ほど初期値が古くなる。

なる可能性もあり、メソ解析が真値とは限らないことが挙げられる。対象時刻 2018 年 9 月 30 日 06UTC で同化された台風ボーガスは 952 hPa で、第一推定値を

強めるインクリメントが解析されている(図略)。ベストトラックと比較すると、対象時刻 2018 年 9 月 30 日 06UTC での中心気圧と最大風速はそれぞれ 955 hPa、80 ノット (約 40 m/s) に対し、メソ解析は 957 hPa、35 m/s で、実況より弱めの可能性がある。より実況に即した比較をするには、地上レーダー観測などとの比較が必要である。

4.3.5 降水ガイダンスの予測

前項では、数値予報の予測結果についての調査結果を述べた。本項では、降水ガイダンス (白山 2018) の予測結果について述べる。なお、GSM24 時間最大降水量ガイダンスについては、第5.1 節で2019年7月4日より改良したことを報告している。本項では、現象発生当時の資料である改良前の結果を示しているが、本事例解析から示唆される結果については改良前後で大きな違いはない。

図 4.3.7 は、T1824 が西日本の太平洋側を北東進した9月30日の日降水量に対応する、10月1日0時のGSM24時間最大降水量ガイダンス (GSM-RMAX24)とそれに対応する観測値である。前項で述べた通り、GSM の予測進路は27日12UTC 初期値以降はベストトラックに近づき、多くの初期値で30日夜に紀伊半島付近に上陸する予測になっていた。このような GSMの予測に対して GSM-RMAX24 も、西日本太平洋側の広い範囲に300 mm/24hを超える大雨を一貫して予測しており、これらの地域には2日以上のリードタイムを持った大雨の予測ができていた4。

次に短時間の降水予測に注目する。図4.3.8 は、T1824 が紀伊半島に上陸する直前、四国沖を東北東へ進んで いた 9月 30 日 18 時を対象とする、MSM1 時間最大降 水量ガイダンス (MSM-RMAX31) とそれに対応する 観測値である。MSM の台風の予測進路が概ね適切で あったため、1日先の MSM-RMAX31 の降水予測の範 囲は概ね適切であったが、紀伊半島や四国、中国地方 では 50 mm/h 以上の非常に激しい雨の予測範囲が観 測よりも広く、また所によっては 100 mm/h を超える 過剰な降水を予測してしまっている。このような傾向 は GSM1 時間最大降水量ガイダンスも同様で (図略)、 本事例では台風上陸時の短時間の降水を対象とした降 水ガイダンスの予測は過大傾向が非常に強かった。両 ガイダンスに見られたこの過剰な降水予測は、1時間 最大降水量ガイダンスの計算に用いる3時間平均降水 量ガイダンス (MRR3) 時点の予測が多かったことや、 MRR3 に乗じる 3 時間平均と 1 時間最大の比率(1 時 間最大/3時間平均)が大き過ぎたことが原因と考えら れる。前者については、本事例では GSM, MSM ともに

⁴ 予報時間が長いほど 600 mm/24h を超える大雨を広く予測する傾向が見られる。これは当時の GSM-RMAX24 の課題であった、予報後半ほど大雨の予測頻度が高くなる傾向に対応しているが、この傾向は 2019 年7月に実施したガイダンスの改良 (5.1) によって解消されている。

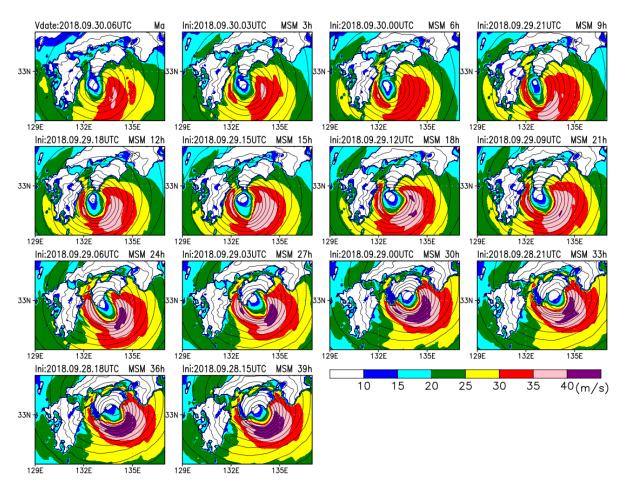


図 4.3.6 2018 年 9 月 30 日 06UTC を対象時刻とする、高度 10 m のメソ解析による風速分布と MSM による予測の風速分布。 左上がメソ解析、左から 2 番目が 30 日 03UTC 初期値の MSM による予測で、以降は MSM の初期値を 3 時間ごとにずら して表示。等圧線は 5 hPa 間隔。風速の単位は m/s。

数値予報モデルの降水量予測の時点で観測値より多い 傾向が見られた他、特に GSM3 時間平均降水量ガイダ ンスではガイダンスによるモデル降水量の上方修正に 過剰傾向があったことも MRR3 時点の予測が多くなっ たことに影響していた。後者の MRR3 に乗じる比率に ついては、図 4.3.9 に MSM-RMAX31 の例を示す。図 4.3.9 (a) の MSM-RMAX31 の算出に用いた予測の比 率は、台風本体の降水域において低くても1倍である が、図 4.3.9 (b) の観測の 20 km 格子平均 3 時間降水 量と 20 km 格子最大前 3 時間最大 1 時間降水量から算 出した観測の比率は 0.7 倍前後になっており、予測の 比率は観測の比率よりも高かったことが分かる。降水 が格子内で偏在しやすく格子平均と格子最大の比率が 大きくなりやすい不安定性の降水現象であれば1倍以 上の比率で問題ないが、本事例のような台風本体によ る降水では格子平均と格子最大の降水量の比が1倍を 下回ることが殆どであるため、この高い比率がガイダ ンスの予測が過剰になる原因になっている。

このように現在の1時間最大降水量ガイダンスでは、 現象によっては格子平均と格子最大の比率を適切に求 めることが出来ていないと考えられる。このような場合には、1時間最大降水量ガイダンスの予測をその算出の基になっている3時間平均降水量ガイダンス程度まで、またはこれよりさらに少ない降水量まで下方修正を検討することが必要である。なお1時間最大降水量ガイダンスについては、最後にニューラルネットワークの重み係数を最適化したのが2010年であるため、その後の数値予報モデルの改良による予測特性の変化に対応させるための再学習が必要と考えている(白山2018)。この再学習に併せて、現在よりも適切な比率が算出できるように手法の改良を検討していく計画である。

4.3.6 まとめ

本節では、T1824の事例について数値予報モデルと 降水量ガイダンスの予測結果を確認した。

GSM による進路予測結果については、2018 年 9 月 26 日以前の初期値では転向を捕捉できず、進路予報誤差が大きくなった。9 月 26 日から 9 月 29 日の初期値では、GSM の 72 時間進路予測は 2017 年平均進路予測誤差と比較して誤差が小さく、また 36 時間進路予測は

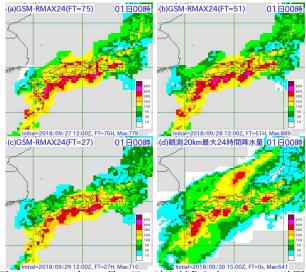


図 4.3.7 2018 年 10 月 1 日 0 時を対象とする GSM24 時間最大降水量ガイダンスと対応する観測値。(a) は 9 月 27 日 12UTC 初期値の FT=75、(b) は 9 月 28 日 12UTC 初期値の FT=51、(c) は 9 月 29 日 12UTC 初期値の FT=27、(d) は観測の 20km 格子最大 24 時間降水量。

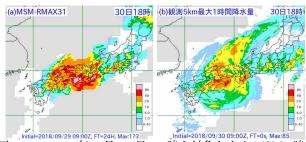


図 4.3.8 2018 年 9 月 30 日 18 時を対象とする MSM1 時間最大降水量ガイダンスと対応する観測値。(a) は 29 日 09UTC 初期値の FT=24、(b) は観測の 5km 格子最大前 3 時間最大 1 時間降水量。

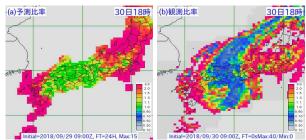


図 4.3.9 2018 年 9 月 30 日 18 時を対象とする (a)MSM1 時間最大降水量ガイダンスの計算に用いる 3 時間平均と 1 時間最大の比率、(b) 観測の 20 km 格子最大前 3 時間最大 1 時間降水量と 20 km 格子平均 3 時間降水量の比率。

同期間の MSM の進路予測と比べても誤差が小さかった。しかし、120 時間進路予測で見ると、2017 年の平均進路予測誤差と比較して約 90 km 大きかった。

MSM と MEPS の降水予測については、36 時間前から大雨となる地域をある程度捕捉していたが、初期値によっては降水の過多傾向が見られたり、予測時間が6時間でも大雨地域の見逃しが生じていた。MSM の風予測はベストトラックやメソ解析と比較して、風速が大きい傾向が見られた。

降水量ガイダンスについては、西日本太平洋側の広範囲での大雨を GSM24 時間最大降水量ガイダンスは2 日以上のリードタイムを持って予測できていた。一方で、台風上陸時の短時間の降水を対象とした1 時間最大降水量ガイダンスには、観測値よりも過剰な降水を予測する傾向が見られた。

数値予報資料については、予測初期が実況と合っていても予報時間後半では誤差が大きくなりうるため、可能な限り最新の予測結果を参照して頂きたい。また、大雨の見逃しを軽減するため、1つの数値予報プロダクトだけでなく、ガイダンスを含む複数のプロダクトを併せて参照して頂きたい。降水量ガイダンスについては、気象現象に応じた層別化はしていないため、統計関係は発生頻度の多い気象現象に対して最適化されやすい。そのため、台風などの相対的に頻度の少ない現象に対しては適切な予測が出来ない場合があることに留意して、適切に修正して利用する必要がある。

参考文献

安斎太朗, 2018: メソモデル、局地モデルの検証. 平成30年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 43-45. 気象庁, 2019: 災害時気象報告「平成30年台風第24号による9月28日から10月1日にかけての暴風・大雨等」. 災害時自然現象報告書2019年第3号, 191pp. 白山洋平, 2018: 降水ガイダンス. 数値予報課報告・別冊第64号, 気象庁予報部, 95-118.

米原仁, 2017: 全球数値予報システムの特性の変化. 平成29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 8–30. Japan Meteorological Agency, 2018: Annual report on the Activities of the RSMC Tokyo - Typhoon center 2017.

Yokoyama, C. and Y. N. Takayabu, 2008: A Statistical Study on Rain Characteristics of Tropical Cyclones Using TRMM Satellite Data. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 3848–3862.

5.1 12, 24, 48, 72 時間最大降水量ガイダンスの開発・改良1

5.1.1 はじめに

気象庁では、2019年7月4日からGSM48時間及び72時間最大降水量ガイダンスとGSM及びMSM12時間最大降水量ガイダンスの部内運用を新たに開始した。これらは、2日から3日先までの総降水量の予測支援や冬季の降雪量予測の支援を目的に新規に開発したガイダンスであり、その予測手法には24時間最大降水量ガイダンスと同じ線形重回帰を採用している。また新ガイダンスの部内運用開始と同時に、GSM及びMSM24時間最大降水量ガイダンスの改良を実施した。

本節では、まず第 5.1.2 項で新ガイダンスの予測手法をベースとした 24 時間最大降水量ガイダンスの予測手法について述べる。次に第 5.1.3 項と第 5.1.4 項で旧 24 時間最大降水量ガイダンスの課題とその解決のために実施した改良点について述べる。さらに第 5.1.5 項と第 5.1.6 項で各ガイダンスの検証結果と予測事例を紹介し、最後に第 5.1.7 項でまとめと利用上の留意点について述べる。本節では、新規に開発したまたは改良したガイダンスを総称して新ガイダンス、改良前のガイダンスを旧ガイダンスと表記する。また、改良した 24 時間最大降水量ガイダンスに関しては、改良後を新(要素名)、改良前を旧(要素名)のように新・旧を付し、数値予報を区別する場合には新 GSM-(要素名)や MSM-(要素名)のように数値予報の名前を付して表記する。

5.1.2 新ガイダンスの予測手法

12 時間、48 時間及び 72 時間最大降水量ガイダンス (以下、RMAX12, RMAX48 及び RMAX72) には、既 存の 24 時間最大降水量ガイダンス(以下、RMAX24) の予測手法をベースに改良を加えた手法を採用した。 本項では、改良前の RMAX24 の予測手法の概略を説 明する。なお、手法の詳細は白山 (2018) を参照してい ただきたい。

RMAX24 は、統計手法には線形重回帰を用いて、格子内最大の24時間降水量を予測するガイダンスである。説明変数には、24時間平均降水量ガイダンス(以下、MRR24)と数値予報モデルのGPVから計算した17個の説明変数の上位7位の主成分を用いている。予測式は過去データを用いた一括学習により作成し、予測精度の向上を狙って予測対象格子とMRR24によって層別化(工藤 2018)する。また予測式の作成時は、MRR24は観測の24時間平均降水量に置き換える。説明変数の1つであるMRR24は、3時間平均降水量ガイダンス(以下、MRR3)を24時間積算した後に頻

5.1.3 旧 24 時間最大降水量ガイダンスの課題

旧 RMAX24 には、大雨の予測頻度が過多である点と、稀に周囲格子より突出した異常値が生じる点の2つの課題があった。これらの課題を残したまま RMAX48 や RMAX72 を開発したところ、同様に大雨の予測頻度が過多になり、また異常値が生じることが確認されたため、予測手法の改良を実施した。本項では、これらの課題について簡単に解説する。

図 5.1.1 は、2014 年から 2017 年までの 4 年間を対象 とした旧GSM ガイダンスの検証図で、(a) はRMAX24 の降水量閾値別エクイタブルスレットスコア (以下、 ETS) 及びバイアススコア (以下、BI)、(b) は同予報 時間別 BI、(c) は MRR24 とその頻度バイアス補正前 の 24 時間降水量である MRR24A の降水量閾値別 BI、 (d) は (c) の縦軸方向の拡大図である。図 5.1.1 より、 旧 GSM-RMAX24 には大雨を観測に比べて高い頻度 で予測したり、予報時間に依って予測頻度が大きく変 動したりする傾向があることが分かる。この傾向は検 証対象とする年に依らず、その原因は予測に用いる旧 GSM-MRR24 の予測頻度が観測頻度に比べて高いこ とであった。また、この大雨ほど予測頻度が高くなる という特徴は、RMAX24の利用上の留意点として挙げ ている現実離れした予測 (白山 2018) の発生の原因に もなっている。

もう1つの課題の例を図5.1.2 に示す。図5.1.2 は、2018年3月9日12時を対象とする旧GSM-RMAX24, MRR24, ガイダンスの比率 (RMAX24/MRR24)と対応する時刻の観測の20km格子最大24時間降水量である。図5.1.2より、栃木県の1格子だけ突出した400mm/24hを超える予測になっており、周囲格子との比較や観測値との比較からも明らかに異常な予測であることが分かる。調査の結果、この異常値は当該格子において旧GSM-MRR24が80mm/24h以上の場合に用いる予測式が、作成時に利用したデータに過度に適合していることが原因と判明した。一般にデータ数が少ない状態で作成された予測式は、その係数の推

度バイアス補正 (高田 2018) して予測頻度を補正した格子平均の 24 時間降水量である。RMAX24 の予測式作成時には MRR24 を観測値に置き換えているため、RMAX24 の予測には MRR24 の予測精度が高く、予測頻度が適切であることが重要となる。MRR24 の頻度バイアス補正パラメータは、予測対象格子でのみ層別化し、MRR3 などの他のガイダンスのように初期時刻や予報時間による層別化は行っていない。これは、MRR24 は 24 時間を対象とするため降水の日変化を考慮する必要がなかったり、予報時間によるモデル予測特性の変化が MRR3 の計算時点で考慮されている、といった考えに沿って仕様を決定したためである。

¹ 白山 洋平

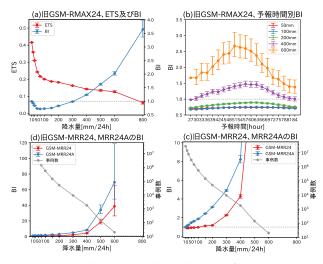


図 5.1.1 2014 年から 2017 年の 4 年間を対象とした旧 GSM ガイダンスの検証図。(a) は旧 GSM-RMAX24 の降水量 閾値別 ETS 及び BI、(b) は同予報時間別 BI、(c) は旧 GSM-MRR24 及び MRR24A の降水量閾値別 BI、(d) は (c) の縦軸方向の拡大図。各図ともエラーバーはブートストラップ法で求めた 95%信頼区間を表し、各線色は図中の凡例の通り。

定精度が低いと考えられるため、旧RMAX24の予測式作成時には、平均降水量による層別化毎に一定数(50個)以上のデータ数を要求し、不足する場合にはその層の予測式は作成しないこととしている。しかし、旧ガイダンスではこの要求するデータ数が50個と少な過ぎたため、異常値の発生に繋がる係数の推定精度の低い予測式が作成されてしまったと考えられる。実例は第5.1.4項(4)で改良点と併せて示すが、この他にも予測式作成に用いる観測データの特性によって、予測式が周囲の格子や前後の平均降水量の層別化と異なる特性を持ってしまう例を確認している。ガイダンスの精度や利用しやすさの向上のために、このような予測式の作成方法に起因する異常値の発生を可能な限り抑制する必要があった。

5.1.4 予測手法の改良点

第 5.1.3 項で述べた旧 RMAX24 の課題に対応するため、加えて RMAX24 と同じ予測手法を新ガイダンスに適応しやすくするために、大きく分けて以下の 5 つの改良を行った。そして、改良した新しい手法を用いて GSM 及び MSM-RMAX12 と GSM-RMAX48 及び RMAX72 の開発を実施した。改良点は、最大降水量ガイダンスの入力となる平均降水量ガイダンスの作成部分($(1)\sim(3)$)と最大降水量ガイダンスの予測式の作成部分((4) 及び (5))に分けられる。主に $(1)\sim(3)$ が大雨の予測頻度が過多である点に、(4) が周囲格子より突出した異常値が生じる点に対する変更、(5) は課題とは別にガイダンスの予測精度改善のための変更である。以下では、これらを順に述べる。なお、変更前後の仕様の一覧を表 5.1.1 に示す。

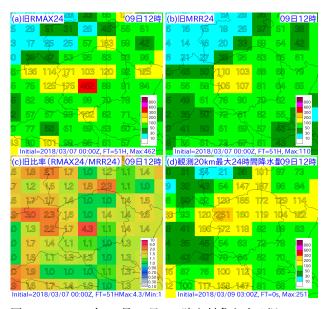


図 5.1.2 2018 年 3 月 9 日 12 時を対象とする旧 GSM-RMAX24の異常値例。(a) から (c) は旧 GSM-RMAX24, MRR24、ガイダンスの比率 (RMAX24/MRR24)、(d) は観測の 20 km 格子最大 24 時間降水量。

(1) 積算する3時間降水量の変更

第5.1.3 項に示した通り、旧 GSM-MRR24 に大雨ほ ど予測頻度が過多になる傾向があり、これが旧 GSM-RMAX24の予測頻度の過多傾向を招いていた。これは、 旧 GSM-MRR24A から旧 GSM-MRR24 への頻度バイ アス補正による予測の下方修正が十分に機能していない ことが原因である。図 5.1.3 (a) は、この予測頻度の過 多傾向を違う形で示した図で、旧 GSM-MRR24A, 旧 GSM-MRR24、観測値の事例数の棒グラフである。頻 度バイアス補正は、予測と観測の事例数を等しくするよ うに予測値の補正を行う手法であるため、仮に適切な予 測頻度に補正できていれば旧 GSM-MRR24 と観測値 の棒グラフは同程度の長さになるはずである。しかし図 示した通り、旧ガイダンスでは 200 mm/24h 以上で下 方修正が不十分になっており、大雨ほど予測頻度を適切 に補正できていないことが分かる。この原因は頻度バイ アス補正で設定している閾値の最大値が 200 mm/24h であり、観測値の取りうる範囲をカバーしきれていない ことが一因であると考えられるため、単純にはより大き な閾値を追加して予測の下方修正を強めていけば良い。 一方で、GSM-RMAX48 や GSM-RMAX72 の予測に 用いる補正前の48時間や72時間平均降水量ガイダン スを同じ手法で作成することを想定すると、閾値をさ らに大きな値に設定する必要があることや、またその ような大きな閾値は逐次更新することが困難になると 考えられるため、安易な閾値の追加は好ましくない。そ こで、GSM-MRR24AからMRR24への補正が上方修 正となるように変えることを目的に、積算する3時間 降水量を MRR3 からカルマンフィルタによる降水量予 測である MRRA に変更した (図 5.1.4)。これは、カル マンフィルタのような統計的な手法を用いて作成した

表 5.1.1 12 時間、24 時間、48 時間、72 時間最大降水量及び平均降水量ガイダンスの新・旧仕様の比較。

,, ,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	旧ガイダンス(24 時間のみ)	新ガイダンス
作成対象	GSM: 20 km 格子、MSM: 5 km 格子	
作成方法	平均降水量:3時間平均降水量ガイダンス (MRR3)を積算し、頻度バイアス補正で予測頻度を補正。最大降水量: 線形重回帰	平均降水量:GSM:カルマンフィルタによる3時間降水量予測 (MRRA)を積算し、頻度バイアス補正で予測頻度を補正。 MSM:3時間平均降水量ガイダンス (MRR3)を積算し、頻度バイアス補正で予測頻度を補正。最大降水量:線形重回帰
予報対象時間単位	24 時間	12 時間最大・平均降水量:12 時間 24 時間最大・平均降水量:24 時間 48 時間最大・平均降水量:48 時間 72 時間最大・平均降水量:72 時間
予報期間と間隔	GSM:FT=27 から FT=84 まで MSM:FT=24 から FT=39(51) まで 括弧は 00 及び 12UTC 初期値の場合 どちらも 3 時間間隔	GSM: 12 時間最大・平均降水量:FT=15 から FT=84 まで 24 時間最大・平均降水量:FT=27 から FT=84 まで 48 時間最大・平均降水量:FT=51 から FT=84 まで 72 時間最大・平均降水量:FT=75 から FT=84 まで MSM: 12 時間最大・平均降水量:FT=12 から FT=39 (51) まで 24 時間最大・平均降水量:FT=24 から FT=39 (51) まで 括弧は 00 及び 12UTC 初期値の場合、いずれも 3 時間間隔
逐次学習の有無	平均降水量:あり (頻度バイアス補正)、	、最大降水量:なし
説明変数	数値予報の GPV から算出した説明変数(付録 A.2.1)の主成分上位 7 位と24 時間平均降水量ガイダンス	数値予報の GPV から算出した説明変数(付録 A.2.1)の主成分上位 7 位と各予報対象時間単位の平均降水量ガイダンス
目的変数	解析雨量(1 km 格子)から算出した G	SM は 20 km, MSM は 5 km 格子内の降水量の最大値。
層別化処理の対象	平均降水量:格子毎、初期時刻(MSM のみ、00,06,12,18UTCとそれ以外)、 最大降水量:格子毎	平均降水量:格子每、初期時刻、予報時間(6時間区切り)、 最大降水量:格子每、平均降水量
平均降水量による 予測式の層別化	24 時間: 0~3, 3~5, 5~10, 10~20, 20~30, 30~40, 40~80, 80~120, 120 mm 以上の計 9 通り	12 時間: 0~3, 3~5, 5~10, 10~20, 20~30, 30~40, 40 mm 以上の7通り 24 時間: 0~3, 3~5, 5~10, 10~20, 20~30, 30~40, 40~80, 80 mm 以上の8通り 48 時間及び72 時間: 0~3, 3~5, 5~10, 10~20, 20~30, 30~40, 40~80, 80~120, 120~200, 200 mm 以上の10通り。
頻度バイアス補正 の観測の閾値	24 時間:3, 10, 30, 50, 70, 100, 150, 200 mm/24h	12 時間:1, 3, 5, 10, 30, 50, 100, 200 mm/12h 24 時間:3, 5, 10, 30, 50, 100, 200, 300 mm/24h 48 時間:5, 10, 30, 50, 100, 200, 300, 400 mm/48h 72 時間:10, 30, 50, 100, 200, 300, 400, 600 mm/72h
予測式の作成期間	2008 年 7 月から 2011 年 12 月	2013 年 9 月から 2016 年 12 月
備考	予測式作成に用いるデータ数が 50 個 に満たない場合は予測式を作成しない。	予測式作成に用いるデータ数が 100 個に満たない場合は予測 式を作成しない。
	予測時には作成できている予測式を降順に探索し、最初に見つかった式を利用する。	

予測式は相対的に発生頻度の高い現象に最適化されやすく、大雨ほど予測頻度は実況の発生頻度に比べて少なくなるために、これを積算した降水量も実況の発生頻度に比べて少ない予測になることを念頭に入れた変更である。このように頻度バイアス補正が上方修正になるように補正前の降水量の作り方を変更することで、大きな閾値の追加を最小限に留めることができる。実際に、MRRAを積算する方法に変更した例が図 5.1.3 (b) である。図のように、200 mm/24h を超える大雨でも頻度バイアス補正による予測頻度の補正が適切に働くようになる。また、GSM-MRR24 や RMAX24 の予測精度の改善も確認している。なお、MSM ガイダンスには本変更は適用せず、引き続き MRR3 を積算する手法を継続する(図 5.1.4 (b))。

(2) 頻度バイアス補正の閾値の見直し

MRR24の閾値については、変更前よりも大雨の予測頻度を適切に補正できるようにするため、これまでの最大の閾値 200 mm/24h より大きい 300 mm/24h を追加した。また、少ない降水量に対する予測頻度の補正や設定する閾値の個数が多くなり過ぎないことも念頭に、5 mm/24h の閾値を追加、70,150 mm/24h の閾値を削除した(表 5.1.1)。12 時間、48 時間、72 時間平均降水量ガイダンス(以下、MRR12, MRR48, MRR72)の閾値については、MRR24 の設定を基に MRR12 であれば 1 mm を加えて 300 mm を除き、MRR48 であれば 3 mm を除いて 400 mm を追加する、というように決定した。

(a) MRR3の積算値を頻度バイアス補正した場合 100000000 MRR24A ■ MRR24 1000000 事例数 ■観測24時間降水量 10000 100 10 30 50 100 300 500 600 降水量[mm/24h]

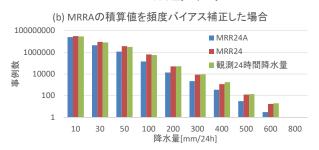


図 5.1.3 GSM-MRR24A 及び GSM-MRR24、観測の 20 km 格子平均 24 時間降水量の事例数の棒グラフ。(a) が旧ガイダンス、(b) が新ガイダンスの棒グラフ、青色は 頻度バイアス補正前の GSM-MRR24A、赤色が頻度バイアス補正後の GSM-MRR24、緑色が観測の 20 km 格子 平均 24 時間降水量を表す。

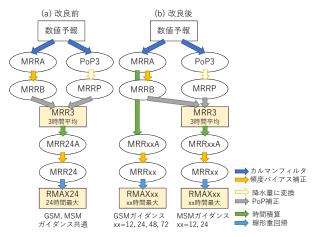


図 5.1.4 降水ガイダンスの構成図。(a) が改良前、(b) が改良後、図中の矢印は右下に示した統計手法を、薄橙色の四角で表した要素は降水ガイダンスの要素を、楕円で表した要素はガイダンス計算過程の中間製品であることを表す。なお、本図では本改良には関わらない降水ガイダンスのプロダクトやその算出過程は図から省略している。また、図中の MRRA, MRRB, MRRP, PoP3 といったプロダクトの詳細や PoP3 から MRRP への変換方法、PoP 補正の詳細については白山 (2018) を参照していただきたい。

(3) 頻度バイアス補正への初期時刻と予報時間による 層別化の導入

旧 GSM-MRR24 では、頻度バイアス補正について 初期時刻及び予報時間による層別化は行っておらず、全 初期時刻、全予報時間で同じ頻度バイアス補正のパラメータを利用して補正を行っていた。旧 MSM-MRR24では、初期時刻については 00, 06, 12, 18UTC 初期値 とそれ以外の 2 通りには層別化していたが、予報時間による層別化は行っていなかった。このような仕様としていた理由は第 5.1.2 項で述べた通りであるが、両

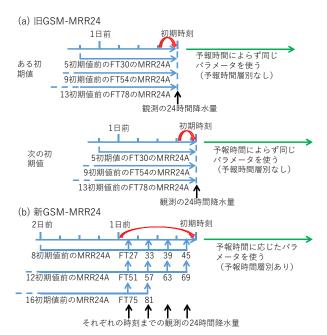


図 5.1.5 初期時刻と予報時間による層別化の導入前後の頻度 バイアス補正パラメータ更新の模式図。図は GSM-MRR24 の場合で、(a) が層別化導入前、(b) が層別化導入後。(a) の赤い矢印は 1 初期値前の頻度バイアス補正パラメータを 更新することと、(b) の赤い矢印は 4 初期値前の初期値の 頻度バイアス補正パラメータを更新することを表す。

層別化が無いため次のようなデメリットがあると考え られた。初期時刻による層別化がない場合は、図5.1.5 (a) に示すように、GSM-MRR24 では 6 時間前の初期 値で更新・利用した頻度バイアス補正パラメータを、 過去初期値の予測値と最新の観測値を用いて更新する。 そのため一度大雨が発生した場合には、一連の現象で 複数回、同じ方向への逐次更新が行われる場合があり、 これが過剰なパラメータ更新の原因や後追い予測、予 測精度の低下の一因になっていたと考えられる。予報 時間による層別化がない場合は、MRR24Aの予報時間 方向の頻度特性や予測自体の不確実性を考慮したパラ メータの更新が行われないため、図 5.1.1 (b) のように 予報時間によって BI が大きく変動する原因になってい たと考えられる。これらのデメリットに対応するため、 初期時刻と予報時間による2つの層別化を導入したと ころ、予測精度を改善し、また予報時間別の予測頻度 をほぼ適切に補正できることが確認できた。初期時刻 及び予報時間による層別化を導入した頻度バイアス補 正パラメータは、例えば GSM-MRR24 であれば初期 時刻の24時間前を初期値とする予測の頻度バイアス補 正パラメータを、初期時刻の24時間前から初期時刻ま での各時刻の観測値と初期時刻の48,72,96時間前を 初期値とする頻度バイアス補正前の降水量を組みわせ て更新する (図 5.1.5 (b))。MRR12, MRR48, MRR72 についても同様に両層別化を導入する。各平均降水量 ガイダンスの違いは頻度バイアス補正パラメータの予 報時間による層別化の数だけで、更新の仕組みは同じ である。



図 5.1.6 2018 年 3 月 9 日 12 時を対象とする、予測式の作成 方法を変更した GSM ガイダンスの予測結果。(a) は変更後 の RMAX24、(b) は変更後の比率 (RMAX24/MRR24)。 なお、MRR24 については図 5.1.2 と同じものを使用。

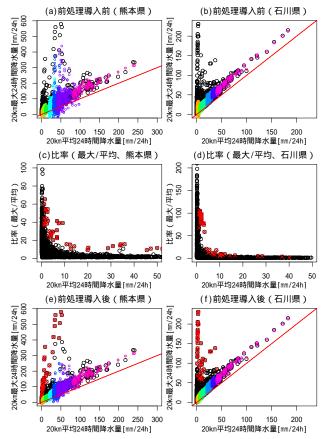


図 5.1.7 格子平均降水量に対して格子最大降水量が大きい格子の例。(a) 及び (b) は観測の 20 km 格子平均 24 時間降水量と 20 km 格子最大 $24 \text{ 時間降水量の散布図に前処理導入前の手法で作成した従属予測結果を重ねた図、(c) 及び (d) は観測の <math>20 \text{ km}$ 格子平均 24 時間降水量と 20 km 格子最大 $24 \text{ 時間降水量の比率の散布図、(e) 及び (f) は (a) 及び (b) と同じ観測値の散布図に前処理導入後の従属予測結果を重ねた図。左列は熊本県のある格子、右列は石川県のある格子を対象としており、各図の黒丸は観測データを、色付きの点は従属予測を、赤線は <math>y=x$ の対角線を、黒丸に付した赤×は前処理によって予測式作成に利用しなくなったデータを表す。また、従属予測の色の違いは平均降水量による層別化を表す。

(4) 予測式の層別化の変更と予測式作成データに対する前処理の導入

第5.1.3 項で述べたような異常値の発生を抑制することを狙って、予測式の作成方法を3点変更した。

1点目に、予測式の平均降水量による層別化の見直しを行った。適切な層別化は予測精度の改善に寄与するが、発生頻度の少ない大雨用の予測式を少ないデータ数で作成することは、予測係数の推定精度を下げ、予測精度の低下や異常値の発生を招くと考えられる。そこで、旧RMAX24の平均降水量による層別化の精査を行い、大雨の予測に有効でないと判断した 120 mm/24h以上の予測式は、新RMAX24では作成しないように変更した。RMAX12, RMAX48及びRMAX72についても同様の視点で検討を進め、RMAX12の予測式は120 mm/12h以上に加えて80 mm/12hの予測式も作成しない仕様に、RMAX48とRMAX72については120 mmの予測式は残しつつ、200 mm以上の予測式を追加する仕様にした。

2点目に、予測式作成時に要求するデータ数の制限を 従来の50個から100個に変更し、よりデータ数の多い 層でのみ予測式を作成するようにした。1点目の変更と 同じく、少ないデータ数で作成した予測式の係数は推 定精度が低いと考えられるためであり、この変更も予 測精度の低下や異常値の発生の防止に寄与すると考え られる。第5.1.3項で述べた栃木の事例(図5.1.2)は、 この変更によって問題の発生していた 80 mm/24h 以 上用の予測式が作成されなくなり、周囲より突出した 予測は発生しなくなることを確認している(図5.1.6)。 3点目に、予測式作成に使用するデータへの前処理 を新たに導入した。図 5.1.7 は、熊本県と石川県のあ る格子の予測式作成データへの前処理の導入例である。 (a) 及び (b) は観測の 20 km 格子平均 24 時間降水量と 20 km 格子最大 24 時間降水量の散布図に前処理導入 前の手法で作成した従属予測結果を重ねた図、(c) 及び (d) は観測の 20 km 格子平均 24 時間降水量と 20 km 格子最大 24 時間降水量の比率の散布図、(e) 及び (f) は (a) 及び (b) と同じ観測値の散布図に前処理導入後 の従属予測結果を重ねた図である。全国の予測対象格 子の中には、図 5.1.7 のように格子平均の降水量に対 して非常に大きい格子内最大の降水量が観測される格 子が存在するが、旧RMAX24ではこのようなデータ であっても特別な処理を施さず予測式を作成していた。 そのため、熊本県の例では 50 mm/24h 前後の青色や 紫色の層の予測式が、石川県の例では平均降水量が少 ない層の予測式が非常に大きな最大降水量を再現する ような予測特性を持っており、周囲の格子や前後の平 均降水量による層別化と傾向の異なる予測が生じ、異 常値の発生や予測精度の低下を招いていたと考えられ る。観測結果を再現するような予測式を作成するとい う観点では、傾向の異なるデータを除去せずに予測式 を作成するのが正しいと考えられるが、利用のしやす さや予測精度を念頭に作成手法を変更した。具体的に は、最大降水量と平均降水量の比に着目し、この比を 基準にして各層毎に傾向の外れたデータを除去してか ら予測式を作成した。データ除去の基準は調査結果を

踏まえて、また格子によって外れ値が出現しやすい平均降水量が異なる点にも対応できるように、層毎の比の平均を μ 、標準偏差を σ として、 μ +4 σ 以上に設定した。このような前処理を導入することで傾向の異なるデータが予測式作成に使われることが減るため、異常値の発生頻度が減少したり、予測精度が向上する。

(5) 予測式作成期間の更新

2013年3月に運用を開始した旧ガイダンスの予測式 は、2008年7月から2011年12月までの3年6か月の 当時の数値予報ルーチンのデータを用いて作成してい る。2019年10月現在運用されている数値予報モデル (GSM は GSM1705; (米原 2017)、MSM は asuca; (原 2017)) の予測特性は旧ガイダンスの予測式作成当時か ら変化しているため、予測式をこの運用中の数値予報 モデルの予測特性に近い GPV データから再作成する ことで予測精度の改善が期待できる。そこで RMAX24 の予測式を、2013年9月から2016年12月の3年4か 月のデータを用いて再作成した。この作成期間は、予測 式作成を旧ガイダンスと同程度の期間を用いて行うこ と、また独立検証期間を確保しつつ可能な限り最新の 数値予報モデルと同じ予測特性のデータが多く含まれ るようにすることを考慮して設定した。また、3年4か 月の期間のうち、GSM1705 や GSM1603 (米原 2016)、 asuca への数値予報モデルの変更時に実施された再予 報が存在する期間については再予報のデータを優先し て使用し、残りの期間については数値予報ルーチンの データを利用した。RMAX48 などの新ガイダンスにつ いても、同じ 2013 年 9 月から 2016 年 12 月のデータ を用いて予測式を作成した。

5.1.5 統計検証

新規開発または改良した最大降水量ガイダンスについて、統計検証を基に改善点や利用上の留意事項について述べる。検証期間は 2017, 2018 年の 2 年間、検証領域は全国を対象、検証に用いた初期値は GSM ガイダンスが全初期値 (00, 06, 12, 18UTC)、MSM ガイダンスが 03, 09, 15, 21UTC 初期値である。ガイダンスの計算には、GSM は GSM1705 (米原 2017)、MSM は asuca (原 2017) による再予報または数値予報ルーチンによる計算結果を用いている。なお、GSM ガイダンスと MSM ガイダンスを比較する場合には、MSM ガイダンスを 20 km 格子中に含まれる 5 km 格子の最大値に変換して格子サイズを揃えてから検証している。

(1) 48 時間、72 時間最大降水量

図 5.1.8 は、GSM-RMAX48 及び GSM-RMAX72 と新 GSM-RMAX24 の積算値の予測精度比較で、上段から順に降水量閾値別 BI, ETS、空振り率を示している。検証した予報時間は GSM-RMAX48 が FT=51 から 84, GSM-RMAX72 が FT=75 から 84 で、比較対象に示している新 GSM-RMAX24 の積算値は、GSM-RMAX24 の積算値は、GSM-RMAX48 が GSM-RMAX24 の積算値は GSM-RMAX48 が GSM-RMAX48 が GSM-RMAX48 が GSM-RMAX48 が GSM-RMAX48 が GSM-RMAX48 が GSM-RMAX44 の積算値は GSM-RMAX44 の積算値は GSM-RMAX44 の積算値は GSM-RMAX44 の積算値は GSM-RMAX44 の積算値は GSM-RMAX44 の積算値は GSM-RMAX44 の積算値 GSM-RMAX44 GAMA GSM-RMAX44 GAM

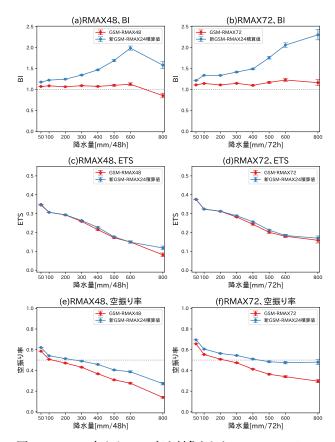


図 5.1.8 2017 年から 2018 年を対象とした、GSM-RMAX48 及び RMAX72 と新 GSM-RMAX24 の積算値との予測精 度比較図。(a), (c) 及び (e) は GSM-RMAX48 と新 GSM-RMAX24 の積算値の降水量閾値別 BI, ETS 及び空振り率、 (b), (d) 及び (f) は GSM-RMAX72 と新 GSM-RMAX24 の積算値の降水量閾値別 BI, ETS 及び空振り率。各図と もエラーバーはブートストラップ法で求めた 95%信頼区間 を表し、各線色は図中の凡例の通り。

RMAX48 に対しては新 GSM-RMAX24 を 2 時刻分積算した降水量、GSM-RMAX72 に対しては 3 時刻分積算した降水量の検証結果である。図 5.1.8 より、GSM-RMAX48 及び GSM-RMAX72 は 800 mm の大雨までほぼ適切な予測頻度で予測しており、新 GSM-RMAX24 の積算値に見られるような大雨を予測し過ぎる傾向は見られない。予測精度は、新 GSM-RMAX24 の積算値に 400 mm 以上で劣る場合が見られるが、予測頻度や空振り率の違いを考慮すれば、総合的に見て GSM-RMAX48 や GSM-RMAX72 の方が 2 日から 3 日先までの総降水量の予測に有用と考えられる。

図 5.1.8 は非降水事例も含む検証結果であるため、GSM-RMAX48 や GSM-RMAX72 の利用が想定される顕著な大雨事例に絞った検証も実施した。この検証では、2017 年から 2018 年の 2 年間について、GSM-RMAX48 または観測の 48 時間降水量が 400 mm を超えた格子が 50 格子を超えた日を大雨事例、抽出されなかった残りの日を非大雨事例とした²。大雨事例として

² GSM-RMAX72 または観測の 72 時間降水量が 400 mm を基準に抽出した場合と事例が大きく変わらなかったため 48 時間降水量で抽出した。

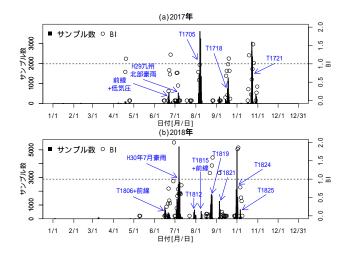


図 5.1.9 2017 年から 2018 年を対象とした、日々の GSM-RMAX48 または観測の 48 時間降水量が 400 mm を超えたサンプル数の時系列図。(a) が 2017 年、(b) が 2018 年、丸印は日々の GSM-RMAX48 の BI を表す。なお、図中の T から始まる表記は、例えば T1705 であれば 2017 年台風第 5 号を指す。

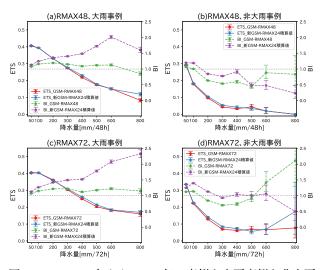


図 5.1.10 2017 年から 2018 年の事例を大雨事例と非大雨事例に分けた場合の GSM-RMAX48 及び RMAX72 の新 GSM-RMAX44 の積算値との予測精度比較図。(a) は GSM-RMAX48 の大雨事例、(b) は GSM-RMAX48 の非大雨事例、(c) は GSM-RMAX72 の大雨事例、(d) は GSM-RMAX72 の非大雨事例を対象とした、新 GSM-RMAX24 の積算値との降水量閾値別 ETS 及び BI の比較図。図の見方は、図 5.1.8 に同じ。

抽出した日は、図 5.1.9 に示した平成 30 年 7 月豪雨などの台風や総観スケールの現象が該当しており、これらの事例で適切な予測精度になっていれば新ガイダンスはその役目を十分達成できると考えられる。このようにして分離した大雨事例と非大雨事例について、GSM-RMAX48 及び RMAX72 と新 GSM-RMAX24 の積算値の検証を実施した結果が図 5.1.10 である。なお、検証した予報時間は図 5.1.8 と同じである。図 5.1.10 より、大雨事例に絞った検証を実施しても GSM-RMAX48 とRMAX72 は積算値よりも予測頻度が適切かつ予測精度

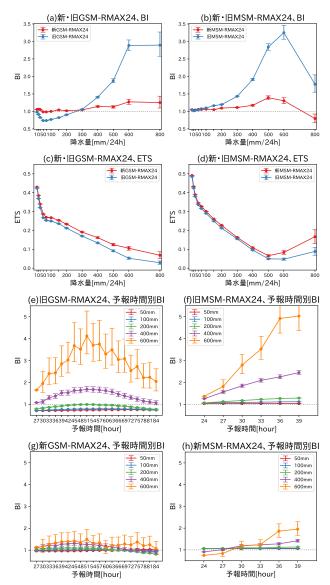


図 5.1.11 2017 年から 2018 年の 2 年間を対象とした、新・旧 GSM 及び MSM-RMAX24 の予測精度比較図。(a), (c), (e) 及び (g) は新・旧 GSM-RMAX24 の降水量閾値別 BI 及び ETS、旧 GSM-RMAX24 の予報時間別 BI、同新 GSM-RMAX24、(b), (d), (f) 及び (h) は新・旧 MSM-RMAX24 の降水量閾値別 BI 及び ETS、旧 MSM-RMAX24 の予報時間別 BI、同新 MSM-RMAX24 を表す。その他の図の見方は、図 5.1.8 に同じ。

を維持しており、利用が想定されるような台風や総観スケールの現象による総降水量の見積もりに有効に利用できると考えられる。非大雨事例については積算値よりも予測頻度・精度ともに劣る傾向が見られ、その予測精度も大雨事例に比べて大幅に低い。そのため、GSM-RMAX48やRMAX72は大雨事例として抽出されたような時間・空間スケールともに大きい現象以外での利用は有効でなく、ガイダンスの利用場面の選択が必要である。

(2) 24 時間最大降水量

図 5.1.11 は、GSM 及び MSM の新・旧 RMAX24 の予測精度比較で、上から降水量閾値別 BI, ETS、旧

RMAX24 と新 RMAX24 の予報時間別 BI を示している。検証した予報時間は、GSM ガイダンスが FT=27 から 84, MSM ガイダンスは FT=24 から 39 である。新 GSM 及び MSM-RMAX24 は、ともに大雨ほど予 測頻度が過多になる傾向が改善し、予測精度も改善していることが分かる。また両ガイダンスとも第5.1.3 項で述べた大雨の予測頻度が過多であったり、予報時間に依って予測頻度が大きく変動する傾向が改善しており、防災気象情報などの降水量予測の見積もりにおいて利用しやすくなると言える。

図 5.1.12 は、GSM 及び MSM の新 RMAX24 同士 の予測精度比較で、降水量閾値別 ETS 及び予報時 間別 ETS を示している。検証した予報時間は、新 GSM-RMAX24がFT=27から42 (予報時間別ETSは 84)、新 MSM-RMAX24 は FT=24 から 39、新 GSM-RMAX24 と比較するために、新 MSM-RMAX24 は前 述の方法で 20 km 格子に変換してから検証している。 図 5.1.12 より、予測精度は新 MSM-RMAX24 の方が 良い傾向はあるものの、予報時間後半や 400 mm/24h を超える大雨については同等か新 GSM-RMAX24 の 方が良い場合もあることが分かる。予報時間後半ほど MSM-RMAX24のGSM-RMAX24に対する優位性が 小さくなる点や、400 mm/24h を超える大雨に対しては GSM-RMAX24の方が精度の良い傾向がある点は、白 山 (2018) に示した 2016 年を対象とした検証結果3と同 様であり、利用に際して留意が必要である。本改良では 新 GSM-RMAX24 の方が予測精度の改善幅が大きかっ たため、2016年の検証結果よりも両ガイダンスの精度 差が縮まっている。また白山 (2018) では、RMAX24 は台風をはじめとした顕著な大雨時に現実離れした予 測をする場合があるため、このような場合にはガイダ ンスの量的な予測をそのままは使用せずに大雨のポテ ンシャルを表す定性的な情報として取り扱う必要があ ると指摘している。この点については、本改良によっ て大雨の予測頻度が大きく観測頻度に近づいているた め、このような現実離れした予測の発生回数が大きく 減ることを確認している。ただし、現実離れした予測 が全く発生しなくなるわけではないので、ガイダンス と過去の観測値との比較などから過大な予測の可能性 が疑われる場合には、引き続きその利用方法に留意す る必要がある。

(3) 12 時間最大降水量

RMAX12 は降雪量の予測支援を目的としたガイダンスであるため、寒候期の検証結果を示す。図 5.1.13 は、2018 年 9 月から 2019 年 2 月を対象とした GSM 及び MSM-RMAX12 の検証結果で、全国を対象とした降水量閾値別 BI 及び ETS, 5 mm/12h の BI の格子検証図である。検証した予報時間は、GSM ガイダンスがFT=15 から 84, MSM ガイダンスは FT=12 から 39 で

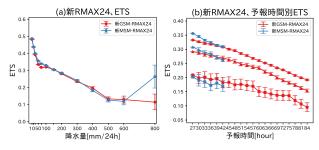


図 5.1.12 2017 年から 2018 年の 2 年間を対象とした、新 GSM-RMAX24 と新 MSM-RMAX24 の予測精度比較図。
(a) は降水量閾値別 ETS、(b) は予報時間別 ETS。(b) の 降水量閾値は、100 mm/24h(丸)、200 mm/24h(三角)、400 mm/24h(四角)である。また、(b) は横軸に新 GSM-RMAX24 の予報時間をとり、新 MSM-RMAX24 は予報 対象時刻が揃うように 3 時間ずらしてプロットしている。その他の図の見方は図 5.1.8 に同じ。

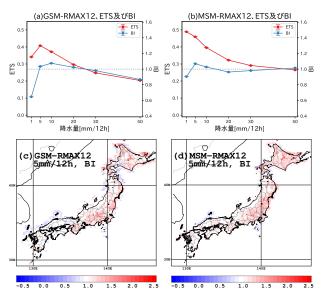


図 5.1.13 2018 年 9 月から 2019 年 2 月を対象とした、GSM 及び MSM-RMAX12 の検証結果。(a) は GSM-RMAX12 の降水量閾値別 BI 及び ETS、(b) は同 MSM-RMAX12、(c) は GSM-RMAX12 の 5 mm/12h の BI の格子検証図、(d) は同 MSM-RMAX12。(a) 及び (b) の図の見方は、図 5.1.8 に同じ。

ある。閾値検証図より、GSM-RMAX12の1 mm/12hには予測頻度の過少傾向が見られるものの、これ以外の閾値については概ね適切な予測頻度になっていることが分かる。一方で、格子検証図から予測頻度の傾向を地域別に見ていくと、太平洋側の地域や北海道を中心に予測頻度がやや高い傾向があるが、東北地方の日本海側や北陸地方については適切な予測頻度であることが見て取れる。この地域差の原因は、観測の降水頻度が季節や地域によって変化することと頻度バイアス補正が観測特性の季節変化に弱いことである。降水頻度の多い暖候期の観測特性に応じて更新された補正傾向が、降水頻度の少ない寒候期に残ってしまい補正が不十分になっていると考えられる。利用に際しては地域による予測頻度特性の違いに留意する必要がある。

³ 図 4.2.11 を参照。

5.1.6 事例検証

新規開発または改良した最大降水量ガイダンスについて、改善点や利用上の留意点、活用例を表す事例を紹介する。なお、図 5.1.14 から図 5.1.17 に示している予測誤差の差分図は、比較する両予測の予測誤差の絶対値の差を図示している。

(1) GSM-RMAX48 の新 GSM-RMAX24 の積算値に 対する改善例 (平成 30 年台風第 24 号)

平成 30 年台風第 24 号 (T1824) は、9 月 30 日 20 時頃 に和歌山県に上陸した後、北東に進んだ。図5.1.14は、 2018年10月1日0時を対象としたGSM-RMAX48や 新 GSM-RMAX24 の積算値などである。図示した 27 日 12UTC 初期値の GSM の T1824 の進路予測は、そ れまでの初期値の予測よりもベストトラックに近づき、 GSM-RMAX48 は西日本の太平洋側を中心とした大雨 を 2 日前時点で予測できていた。この GSM-RMAX48 の予測を新 GSM-RMAX24 の積算値と比べると、地 域毎の予測のピーク値や赤色で表される 300 mm/48h 以上の広がり方がより実況に近く、また予測誤差は東 海地方から西日本、南西諸島にかけていずれの地域で も減少しており改善が確認できる。これは、新 GSM-RMAX24の積算値は2時刻分の予測を積算するために 降水量が多くなりやすいことや、統計手法を用いて直 接 48 時間降水量を求める GSM-RMAX48 の方が積算 値よりも大雨の予測頻度が適切である傾向(図5.1.8) を示している。

(2) 顕著な大雨事例 (平成30年7月豪雨)

図5.1.15及び図5.1.16は、平成30年7月豪雨での新・ 旧 GSM 及び MSM-RMAX24 と GSM-RMAX48 及び RMAX72 とそれぞれに対応する観測値などである。こ こでは、大雨特別警報が発表された6日から7日にかけ ての大雨について、数値予報モデルが西日本での前線 の停滞を予測し始めた 5 日 00UTC 初期値以降のガイ ダンスを示す。図5.1.15は、6日の日降水量を対象とす る新・旧 MSM-RMAX24 と、7日の日降水量を対象と する新・旧 GSM-RMAX24、観測値、新・旧ガイダンス それぞれの予測誤差の差分図である。MSM-RMAX24 については新・旧ガイダンスの予測に大きな傾向の違い はなく、また予測誤差も増減が混在しているため、中 立な結果となっている。一方、GSM-RMAX24につい ては中国地方を中心に新ガイダンスの方が実況に近い 予測となっており改善していることが分かる。この改 善は、RMAX24の入力に用いるMRR24が実況に近づ いたことが主な要因であることを確認しており、平均 降水量ガイダンスの作成方法の変更による改善例と言

図 5.1.16 は、6~7 日の総降水量を対象とした GSM-RMAX48 と、8 日 12 時までの 72 時間を対象とした GSM-RMAX72 と対応する新 GSM-RMAX24 の積算 値、観測値、新ガイダンスと積算値それぞれの予測誤 差の差分図である。GSM-RMAX48, RMAX72のどちらも太平洋側の地域ではやや改善が卓越しているが、中国地方では新 GSM-RMAX24 の積算値の方が実況に近い予測となっている。この原因は、RMAX48 や RMAX72の入力に用いる MRR48 や MRR72 が少なかったためであることを確認しており、長時間続く大雨の少ない地域であるほど統計的な手法で 48 時間や72 時間降水量を求めることが難しいことを示している。図 5.1.9 で抽出したような太平洋側の地域での大雨事例では、RMAX48 や RMAX72 を基本に据えた利用で問題ないと考えられるが、長時間続く大雨事例の少ない地域においては RMAX24 の積算値の方が実況に近いケースが確認されている点には留意する必要がある。

(3) RMAX24 の改善例 (平成 29 年台風第 21 号)

図 5.1.17 は、平成 29 年台風第 21 号 (T1721) 事例で の 2017 年 10 月 23 日 0 時を対象とした新・旧 GSM-RMAX24 と対応する観測値である。T1721 では、東西 日本の広い範囲で 100 mm/24h を超える大雨となり、 特に紀伊半島の南東側では 600 mm/24h を超える大雨 となった。この事例では、GSM は初期時刻が古いほど T1721の予測進路を西寄りに、また北上速度を遅く予 測していたこともあり、(a) の旧 GSM-RMAX24 (19 日 12UTC 初期値)では紀伊半島に降水予測が集中し、 観測値とピーク値で比較して 200 mm 程度多い予測と なっていたが、(b) の新 GSM-RMAX24 ではやや軽減 されていることが分かる。旧ガイダンスでは MRR24 の下方修正が効きづらいために大雨や予報時間後半の 予測頻度が過多であった傾向が、改良によって軽減され た例と考えられる。また、(c) の予測誤差の差分からは 東西日本の広い範囲で新 GSM-RMAX24 が予測誤差 を減らしていることも分かる。これは、図 5.1.11 に示 した 50~100 mm/24h を中心とした予測頻度の改善に 対応しており、頻度バイアス補正の設定変更や MRRA 積算への変更の効果と考えられる。(e) ~ (g) 図に、 GSM の予測進路が 19 日 12UTC 初期値よりもベスト トラックに近づいた 21 日 12UTC 初期値のガイダンス を示す。同様に紀伊半島のピーク値で比較すると、旧 GSM-RMAX24 は観測値より 100 mm 程度少ない予 測、新 GSM-RMAX24 は観測値より 80 mm 程度多い 予測になっているため、この点では新 GSM-RMAX24 は改善しているとは言えないが、紀伊半島以外の地域 については新 GSM-RMAX24 の方が予測誤差を減ら しており、改善していることが確認できる。

(4) RMAX12 の活用例

図 5.1.18 は、2018 年 12 月 18 日 21 時を対象とした MSM-RMAX12, MSM12 時間降雪量ガイダンス (土田 2018)、これらに対応する 12 時間降水量と 12 時間降雪量の観測値である。この日は、西から冬型の気圧配置が緩む中、上空には強い寒気が入っており、北海道では空知地方から上川地方南部で降雪が続いたため、日降雪

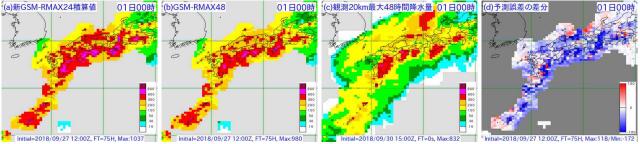


図 5.1.14 T1824 事例での 2018 年 10 月 1 日 0 時を対象とする、(a) 新 GSM-RMAX24 の積算値、(b) GSM-RMAX48、(c) 観測の 20 km 格子最大 48 時間降水量、(d) 両予測の予測誤差の差分図。(a) 及び (b) は 2018 年 9 月 27 日 12UTC 初期値の FT=75、(d) は青い (赤い) ほど GSM-RMAX48(新 GSM-RMAX24 の積算値)の予測誤差が少ないことを表す。

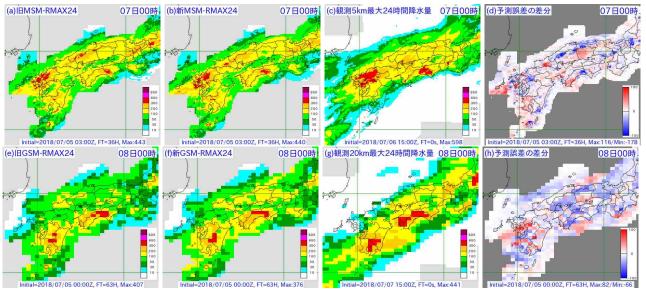


図 5.1.15 平成 30 年 7 月豪雨事例での新・旧 GSM 及び MSM-RMAX24 の予測結果。(a) ~ (d) は 7 月 6 日の日降水量を対象とする、旧 MSM-RMAX24、新 MSM-RMAX24、観測の 5 km 格子最大 24 時間降水量、新・旧ガイダンスの予測誤差の差分図。(e) ~ (h) は 7 月 7 日の日降水量を対象とする、旧 GSM-RMAX24、新 GSM-RMAX24、観測の 20 km 格子最大 24 時間降水量、新・旧ガイダンスの予測誤差の差分図。(a) 及び (b) は 7 月 5 日 03UTC 初期値の FT=36、(e) 及び (f) は 7 月 5 日 00UTC 初期値の FT=63、(d) 及び (h) は青い(赤い)ほど新ガイダンス(旧ガイダンス)の予測誤差が少ないことを表す。

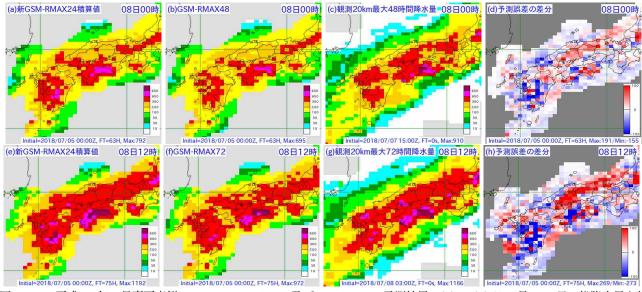


図 5.1.16 平成 30 年 7 月豪雨事例での GSM-RMAX48 及び RMAX72 の予測結果。(a) ~ (d) は 7 月 6~7 日の総降水量を対象とする、新 GSM-RMAX24 の積算値、GSM-RMAX48、観測の 20 km 格子最大 48 時間降水量、両ガイダンスの予測誤差の差分図。(e) ~ (h) は 7 月 8 日 12 時までの 72 時間降水量を対象とする、新 GSM-RMAX24 の積算値、GSM-RMAX72、観測の 20 km 格子最大 72 時間降水量、両ガイダンスの予測誤差の差分図。いずれも 7 月 5 日 00UTC 初期値、(a) 及び (b) は FT=63、(e) 及び (f) は FT=75、(d) 及び (h) は青い(赤い)ほど GSM-RMAX48 または RMAX72(新 GSM-RMAX24 の積算値)の予測誤差が少ないことを表す。

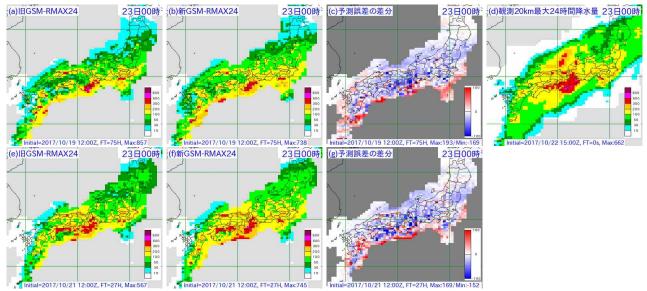


図 5.1.17 T1721 事例での 2017 年 10 月 23 日 0 時を対象とする、新・旧 GSM-RMAX24 の予測結果。(a) 及び (b) は 19 日 12UTC 初期値の旧 GSM-RMAX24 と新 GSM-RMAX24、(c) は新・旧ガイダンスの予測誤差の差分図、(d) は観測の 20 km 格子最大 24 時間降水量、(e) 及び (f) は 21 日 12UTC 初期値の旧 GSM-RMAX24 と新 GSM-RMAX24、(g) は新・旧ガイダンスの予測誤差の差分図。(c) 及び (g) は青い(赤い)ほど新ガイダンス(旧ガイダンス)の予測誤差が少ないことを表す。

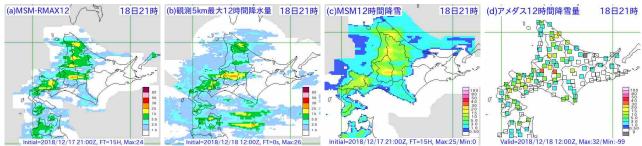


図 5.1.18 2018 年 12 月 18 日 21 時を対象とする、MSM 最大降水量及び降雪量ガイダンスの予測結果。(a) は MSM-RMAX12、(b) は観測の 5 km 格子最大 12 時間降水量、(c) は MSM12 時間降雪量ガイダンス、(d) はアメダスによる観測の 12 時間降雪量。(a) 及び (c) は 2018 年 12 月 17 日 21UTC 初期値の FT=15。(d) の橙色の 2 地点が美唄及び富良野。

量が美唄で 45 cm、富良野で 41 cm と共に 12 月の極値を更新した。図 5.1.18 の MSM12 時間降雪量ガイダンスに注目すると、空知地方から上川地方南部にかけてピーク値で 25 cm/12h の予測をしており、実際に大雪となった地域は捉えているものの、観測値に比べるとやや少ない予測になっている。ここで MSM-RMAX12に注目すると、同地域には 20 mm/12h 以上、ピーク値では 25 mm/12h の予測をしている。降雪時の気温が-1°C から-3°C と低いため雪水比(降水量から降雪量への換算比率(降雪量/降水量 [cm/mm]))を 1 倍以上として降雪量を見積もると、降雪量ガイダンス程度の降雪となりうることのほか、局地的にはさらに多くなる可能性を検討することも可能と考えられる。

5.1.7 利用上の留意点と今後の課題

12 時間・48 時間・72 時間最大降水量ガイダンスの 新規開発と 24 時間最大降水量ガイダンスの改良を実施 した。統計検証及び事例検証の結果から、48 時間及び 72 時間最大降水量は台風や総観スケールの現象による 大雨を中心とした 2 日から 3 日先までの総降水量の見 積もりに、12 時間最大降水量は日本海側を中心とした 予測降雪量の見積もりに利用できると考えられる。また、24 時間最大降水量ガイダンスについては、GSM, MSM ガイダンスともに予測精度や予測頻度特性が改善 しており、従来よりも降水量予測の見積もりに利用し やすくなると言える。これらの新ガイダンス及び改良 した 24 時間最大降水量について、第 5.1.5 項と第 5.1.6 項を踏まえた特徴と利用上の留意点について以下にま とめる。

① 48 時間及び 72 時間最大降水量ガイダンスは、新 24 時間最大降水量ガイダンスの積算値よりも予測 頻度が適切で予測精度は同程度である。台風や総 観スケールの現象による大雨に事例を絞った検証 でも同様の傾向を確認しており、総降水量の見積 もりに有効に利用できる。ただし、長時間続く大 雨が少ない地域においては、24 時間最大降水量ガイダンスの積算値の方が実況に近いケースも確認しているため、利用に際しては留意が必要である。

- ② 新 GSM 及び MSM24 時間最大降水量ガイダンスの優劣は、旧 24 時間最大降水量ガイダンスの場合 (白山 2018)と変わらず基本的には MSM ガイダンスの方が優位であるが、精度差は改良前よりも縮まっている。ただし、予報時間後半になるほど MSM ガイダンスの優位性が小さくなる点や、400 mm/24h を超える大雨の予測精度は GSM ガイダンスの方が良い傾向である点に留意が必要である。
- ③ 旧24時間最大降水量ガイダンスには、台風をはじめとした顕著な大雨時に現実離れした予測をする場合があった(白山 2018)が、今回の改良によってそのような予測の回数が大きく減少する。ただし、現実離れした予測やこれまで観測したことがない予測が全く発生しなくなるわけではないため、ガイダンスと過去の観測値との比較などから過大な予測の可能性が疑われる場合には、引き続き利用方法に留意する必要がある。また、同じ予測手法を採用した12時間・48時間・72時間最大降水量についても、利用に際して同様の留意が必要である。
- ④ 12時間最大降水量ガイダンスは、寒候期、全国平均及び 1 mm/12h の予測頻度に過少傾向が見られる他は概ね適切な予測頻度で予測することを確認している。しかし、太平洋側の地域や北海道では予測頻度がやや高い傾向を確認しているため、利用に際して留意する必要がある。

これらの点に留意して、各最大降水量ガイダンスを有効に活用していただきたい。

今後の課題としては、まず MSM12 時間または 24 時 間平均降水量ガイダンスの計算のために積算する3時 間降水量を、GSM ガイダンスの場合と同じ MRRA に 変更することが挙げられる (第5.1.4項(1))。GSM ガ イダンスと同様に、本変更を行うことで予測精度の改 善が期待できるためである。第5.1.5項(3)では、寒候 期の RMAX12 の予測頻度に地域差があり、その原因 が MRR12 の頻度バイアス補正の逐次学習にあると述 べた。より寒候期に適応した統計関係になるよう、頻 度バイアス補正や最大降水量の予測式に新たな層別化 を導入することなどを検討したい。また、本節で報告 した最大降水量ガイダンスは MRR3 やその作成過程の MRRA が入力値になっているため、さらなる予測精度 の改善のためにはこれら入力値の予測精度向上が必要 である。MRR3やMRRAについては、説明変数の見 直しやカルマンフィルタの各種パラメータなどの統計 関係の再作成が必要と考えており(白山 2018)、今後開 発を進めていく計画である。

参考文献

工藤淳, 2018: 手法の分類. 数値予報課報告・別冊第 64 号, 気象庁予報部, 20-23.

- 白山洋平, 2018: 降水ガイダンス. 数値予報課報告・別冊第 64号, 気象庁予報部, 95-118.
- 高田伸一, 2018: 頻度バイアス補正. 数値予報課報告・ 別冊第 64 号, 気象庁予報部, 78–80.
- 土田尚侑, 2018: 降雪ガイダンス. 数値予報課報告・別冊第 64号, 気象庁予報部, 119-131.
- 原旅人, 2017: メソ数値予報システムの改良の概要. 平成29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 42-47.
- 米原仁, 2016: 全球数値予報システムの物理過程改良の 概要. 平成 28 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予 報部. 1-3.
- 米原仁, 2017: 全球数値予報システムの改良の概要. 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1-7.

5.2 最大降水量・降雪量・最大風速ガイダンスの精 度評価¹

5.2.1 はじめに

気象庁が GSM や MSM の予測結果から日々作成するガイダンスのうち、最大降水量、降雪量(格子形式)、最大風速の各ガイダンスは、大雨や大雪、暴風(強風)・暴風雪(風雪)といった警報・注意報の発表や、防災気象情報に掲載される降水量や降雪量、風速の量的な予報値の検討を目的として、これまでは気象庁内でのみ利用されてきた。今般、報道機関や民間気象会社が防災気象情報の解説を行う際に利用することなどを想定して、これら3つのガイダンスの提供を2019年11月から開始した。本節では、GSM 及び MSM の最大降水量、降雪量(格子形式)、最大風速の各ガイダンスの最新の精度検証結果について解説する。なお、各ガイダンスの作成手法や詳細な仕様、利用上の留意点については数値予報課報告・別冊第64号第4章(気象庁予報部2018)及び第5.1節を参照いただきたい。

5.2.2 最大降水量ガイダンス

配信を開始する最大降水量ガイダンスには、GSM から作成する GSM 最大降水量ガイダンス(20 km 格子)と MSM から作成する MSM 最大降水量ガイダンス(5 km 格子)があり、それぞれ 1 時間最大降水量(RMAX31)、3 時間最大降水量(RMAX33)、24 時間最大降水量(RMAX24)の3つの要素から構成される。これらの最大降水量ガイダンスでは、格子内最大の降水量をニューラルネットワークや線形重回帰を用いて、格子内平均の降水量である平均降水量ガイダンスと数値予報モデルの GPV から計算した説明変数から予測する。

まず、数値予報モデルの降水量予測に対する最大降 水量ガイダンスの利点を述べる。図 5.2.1 は、2018 年 6月20日18時を対象とするGSMの24時間降水量 予測と GSM ガイダンスの RMAX24、24 時間積算し た解析雨量、20日9時の日本域地上天気図である。こ の日は梅雨前線上の低気圧が東進したことで西日本を 中心に大雨となり、九州から近畿地方までの広範囲で 100 mm/24h、局地的には九州地方で 300 mm/24h を 超える大雨を観測した。この大雨に対して、前日の19 日 00UTC を初期時刻とする GSM は、まとまった降水 を西日本の広い範囲に予測するものの、100 mm/24h を超える予測範囲は観測値よりも狭く、また九州地方 の降水量予測の最大値は観測値の半分以下であった。こ れは、主に数値予報モデルの降水量は予測対象である モデル格子の平均的な降水量を表すために、より水平 格子間隔の細かい解析雨量と比較すると降水量が過小 になる傾向があったり、モデルが表現できる空間スケー

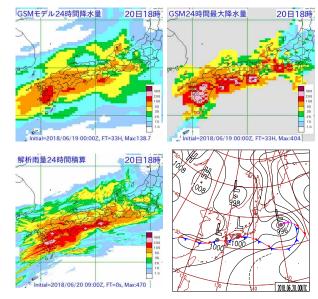


図 5.2.1 2018 年 6 月 20 日 18 時を対象とする、GSM の 24 時間降水量予測 (左上)、GSM24 時間最大降水量ガイダンス (右上)、解析雨量の 24 時間積算 (左下)、20 日 9 時の日本域地上天気図 (右下)。降水量の単位はいずれも mm/24h。

ルよりも小さい現象によって降水が発生することがあるためである。一方で、最大降水量ガイダンスはモデルよりも 100 mm/24h を超える大雨を広く予測し、また九州地方でも最大で 400 mm/24h 近い降水を予測しており、モデルの降水量予測よりも観測値に近くなっている。最大降水量ガイダンスは、予測対象格子に含まれる降水量の最大値を予測対象とした統計手法を用いることで、格子の平均的な降水量を予測する数値予報モデルでは予測できない、観測値に近い降水量を予測することができる。

次に、GSM 及び MSM 最大降水量ガイダンスについての統計検証の結果を示し、その結果から読み取れる特徴を説明する。なお、本項で示す検証結果は、第5.1節で解説した改良後のガイダンスを対象にしたものである。

図5.2.2 は夏期 (2018年6~8月) を検証対象期間とし た GSM 及び MSM ガイダンスの RMAX31, RMAX33 の比較図、図 5.2.3 は通年(2018 年 1 年間)を対象とし たRMAX24の比較図で、両図とも左から降水量の閾値 別エクイタブルスレットスコア (ETS)、バイアススコ ア (BI)、予報時間別の ETS を示している。検証に用い た初期値は、GSM ガイダンスが 00, 06, 12, 18UTC 初 期値、MSM ガイダンスが 03, 09, 15, 21UTC 初期値で ある。また予報時間は、図 5.2.2 では GSM ガイダンス が FT=6 から 27 (予報時間別 ETS は FT=84)、MSM ガイダンスが FT=3 から 24(同 FT=39)、図 5.2.3 で は GSM ガイダンスが FT=27 から FT=42 (予報時間 別 ETS は FT=84)、MSM ガイダンスが FT=24 から FT=39である。なお、格子サイズの異なる GSM ガイ ダンスと MSM ガイダンスを比較するために、MSM ガ イダンスを 20 km 格子中に含まれる 5 km 格子の最大

¹ 白山 洋平(第 5.2.1 項、第 5.2.2 項)、土田 尚侑(第 5.2.3 項)、井藤 智史(第 5.2.4 項)

値に変換することで格子サイズを揃えてから検証して いる。

図 5.2.2 の RMAX31 及び RMAX33 については、 80 mm/h 以上や 100 mm/3h 以上といった対象事例 が少ない大雨を除けば、MSM ガイダンスの方が GSM ガイダンスよりも予測精度が高くなっており、MSM ガ イダンスの方が夏期の短時間の降水予測に優れている と言える。また、予報時間別 ETS 図からは、MSM の 予報時間内は MSM ガイダンスの方が GSM ガイダン スより精度が高いこと、また予報時間半日程度までが 特に高いことが分かる。これらは、MSM の方が数値 予報モデルの水平格子間隔が細かく地形の表現が精緻 で強雨の表現が良いこと、またメソ解析において解析 雨量やレーダー反射強度データを同化 (本田ほか 2018) するなど初期時刻に近い予報時間の降水表現が良いこ とが、ガイダンスにも反映されているためと考えられ る。BI については、RMAX31 では 80 mm/h 以上で 観測よりも高い頻度で大雨を予測したり、RMAX33で は雨量が多くなるほど観測に比べて予測頻度が低くな る傾向が見られるため、利用に際して予測の空振りや 見逃しに留意する必要がある。

図 5.2.3 の RMAX24 については、閾値別 ETS から 400 mm/24h だけ GSM ガイダンスの精度が MSM ガ イダンスを上回っているものの、これ以外では MSM ガ イダンスの方が精度が高くなっていることが分かる。ま た、予報時間別 ETS から予報時間後半ほど MSM ガイ ダンスの GSM ガイダンスに対するアドバンテージが小 さくなる傾向も見て取れる。BIについては、RMAX31 や RMAX33 とは異なり、両ガイダンスとも概ね適切 になっており、実際に大雨が観測される頻度と同程度 の頻度で大雨を予測する傾向があることが分かる。以 上のことから、MSM の予測する気象場と実況の対比 や、気象場に依存する MSM と GSM の誤差特性の比 較から MSM ガイダンスの利用を控えるべき理由があ る場合を除いて、基本的には MSM ガイダンスの予報 時間内では GSM ガイダンスよりも MSM ガイダンス の利用を優先することを推奨する。

5.2.3 降雪量ガイダンス²

降雪量ガイダンスは全国の 5 km 格子毎を対象に降雪量を予測する格子形式のガイダンスであり、GSM 及び GSM ガイダンスから作成される GSM 降雪量ガイダンスと、MSM 及び MSM ガイダンスから作成される MSM 降雪量ガイダンスがある。予報要素は前 3 時間降雪量、前 6 時間降雪量、前 12 時間降雪量、前 24 時間降雪量である。降雪量の予測には、予測降水量に気温に応じた経験的な雪水比を掛けて降雪量を見積もる雪水変換法を使用する。本ガイダンスを利用することで、全国の降水及び気温の予測分布に対応した降雪

量の予測分布を直接把握できる。

ここでは、全国のアメダス地点で観測された 1 時間 積雪深差から求めた降雪量を観測値とした降雪量ガイダンスの検証結果を示す。検証は 6, 12, 24 時間降雪量を対象に行った。検証対象の初期値は GSM ガイダンスが 00, 06, 12, 18UTC、MSM ガイダンスが 03, 09, 15, 21UTC である。予報時間は、6 時間降雪量は GSM ガイダンスが $FT=9\sim30$ 、MSM ガイダンスが $FT=6\sim27$ 、12 時間降雪量は GSM ガイダンスが $FT=12\sim33$ 、24 時間降雪量は GSM ガイダンスが $FT=12\sim33$ 、24 時間降雪量は GSM ガイダンスが $FT=27\sim36$ 、MSM ガイダンスが $FT=24\sim33$ を対象とした。なお、検証地点の予測値は周囲の 4 格子点を線形内挿することにより求めた。

図 5.2.4 に降雪量閾値別の ETS 及び BI を示す。ETS は全予報要素で MSM ガイダンスが GSM ガイダンスを 上回っており、MSM ガイダンスの方が予測精度が高い ことが分かる。これは入力となる降水量ガイダンスや 気温ガイダンスの予測精度が MSM ガイダンスの方が 高いことによると考えられる。BIは6、12時間降雪量 では降雪量が多いほど値が小さく、それぞれ 10 cm/6h, 20 cm/12h 以上の降雪に対しては1を下回っており、 観測頻度よりも予測頻度が少ない。6.12時間降雪量は 大雪の見逃しに留意が必要である。一方、24時間降雪 量のBIは降雪量が多いほど値が大きく、観測頻度より も予測頻度が多い。ただし、観測の降雪量は1時間積 雪深差から求めているため、圧密などによる新積雪の 沈降により実際よりも観測頻度が少ないことを考慮す る必要がある。24時間降雪量の検証ではこの影響が大 きいことから、実際の降雪量に対しては検証結果で示 したほど予測頻度は過大でないと考えられる。

5.2.4 最大風速ガイダンス

最大風速ガイダンスは、GSMから作成されるGSM最大風速ガイダンスと、MSMから作成されるMSM最大風速ガイダンスがあり、それぞれアメダス地点の前3時間内の最大風速とその風向(16方位)を3時間間隔で予測している。現在配信している風ガイダンスは1時間毎の定時の風を予測する定時風ガイダンスであるため、前1時間内に観測された最大風速と比較すると弱めの値となる。このため、今回配信を開始する最大風速ガイダンスの方が、防災気象情報への解説などの利用には適していると言える。

最大風速ガイダンスの統計検証結果を図 5.2.5 と図 5.2.6 に示す。検証期間は 2018 年の 1 年間で、GSM 最 大風速ガイダンスは 00, 06, 12, 18UTC 初期値、MSM 最大風速ガイダンスは 03, 09, 15, 21UTC 初期値の検 証結果である。図 5.2.6 の予報時間は、GSM 最大風速ガイダンスが FT=9, 12、MSM 最大風速ガイダンスが FT=6, 9 を利用した。全ての予報時間を用いない理由 は、事例数の少ない強風時の検証での事例依存を軽減

² これまで「最大降雪量ガイダンス」と呼称していたが、本 テキスト以降は「降雪量ガイダンス」と呼称する。

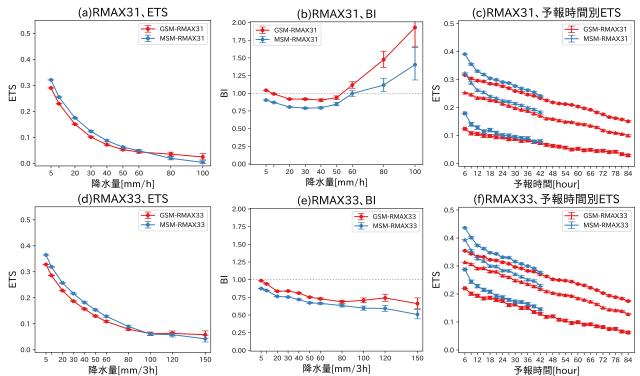


図 5.2.2 GSM 及び MSM の RMAX31, RMAX33 の予測精度比較。検証対象期間は 2018 年 6 月~8 月で、(a) ~ (c) は RMAX31 の ETS, BI 及び予報時間別 ETS、(d) ~ (f) は RMAX33 の ETS, BI 及び予報時間別 ETS。(c) 及び (f) の横 軸には GSM-RMAX31 または RMAX33 の予報時間をとり、MSM-RMAX31 または RMAX33 は 3 時間ずらしてプロットしている。また、(c) 及び (f) の降水量閾値は、5 mm/h または 5 mm/3h(丸)、10 mm/h または 10 mm/3h(三角)、30 mm/h または 30 mm/3h(四角)である。各図ともエラーバーはブートストラップ法で求めた 95%信頼区間を、赤線は GSM-RMAX31 または RMAX33、青線は MSM-RMAX31 または RMAX33 を表す。

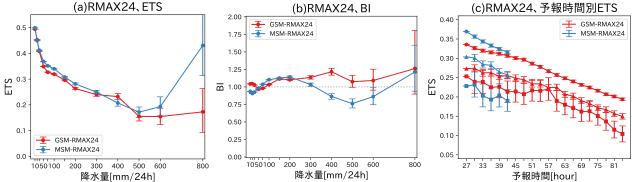


図 5.2.3 GSM-RMAX24 と MSM-RMAX24 の予測精度比較。検証対象期間は 2018 年の 1 年間で、(a) は ETS、(b) は BI、(c) は予報時間別 ETS。(c) の降水量閾値は、100 mm/24h(丸)、200 mm/24h(三角)、400 mm/24h(四角)で、赤線は GSM-RMAX24、青線は MSM-RMAX24 を表す。また、(c) は横軸に GSM-RMAX24 の予報時間をとり、MSM-RMAX24 は予報対象時刻が揃うように 3 時間ずらしてプロットしている。その他の図の見方は、図 5.2.2 に同じ。

するためであり、ある予報対象時刻の観測に対して複数の初期時刻のガイダンス値で検証しないように予報 時間を設定している。

図 5.2.5 に予報時間毎の風速の二乗平均平方根誤差 (RMSE) と平均誤差 (ME) を示す。ME を見ると、GSM 最大風速ガイダンスは負バイアス、MSM 最大風速ガイダンスは正バイアスとなっているが、いずれも概ね 0.1 m/s 以下と誤差は小さい。RMSE は、いずれも予報時間が進むほど誤差が大きくなっていることが分かる。また、FT=30 以降は同じ程度の誤差となっているが、FT=27 までは MSM 最大風速ガイダンスの

方が誤差は小さくなっており、基本的には MSM ガイダンスの方が精度が高くなっている。

一方で、風速毎のETSとBIを示した図5.2.6では、風速20 m/sまではMSM最大風速ガイダンスの方がETSが高いものの、それより大きな風速ではGSM最大風速ガイダンスの方がETSが高くなっていることが分かる。これはGSM最大風速ガイダンスでは風速20 m/sより大きいにも関わらずBIが1に近いのに対して、MSM最大風速ガイダンスではBIが1より小さくなっているためである。このため、風速20 m/sを超えるような強風時においては、GSM最大風速ガイダ

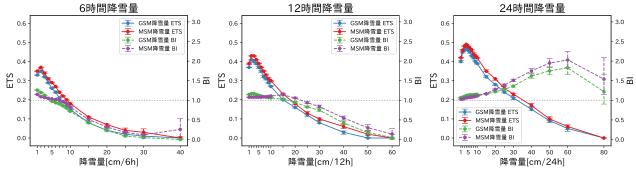


図 5.2.4 降雪量ガイダンスの降雪量閾値別の ETS 及び BI。検証期間は 2017 年 12 月~2018 年 2 月及び 2018 年 12 月~2019 年 2 月の 2 か年。左が 6 時間降雪量、中が 12 時間降雪量、右が 24 時間降雪量を対象とした検証で、青線が GSM ガイダンスの ETS、赤線が MSM ガイダンスの ETS、緑線が GSM ガイダンスの BI、紫線が MSM ガイダンスの BI である。エラーバーはブートストラップ法で求めた 95%信頼区間を表す。

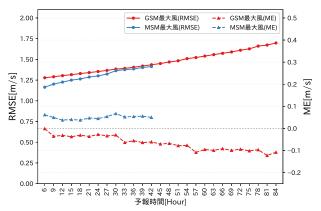


図 5.2.5 最大風速ガイダンスの予報時間毎の風速の RMSE (実線、左軸) と ME (破線、右軸)。赤線が GSM 最大風速ガイダンス、青線が MSM 最大風速ガイダンスを示す。 予報時間は GSM 最大風速ガイダンスから見た予報時間であり、MSM 最大風速ガイダンスは予報対象時刻が同じになるように 3 時間ずらしてプロットしている。

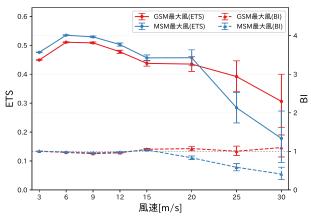


図 5.2.6 最大風速ガイダンスの風速の閾値毎の ETS (実線、左軸) と BI (破線、右軸)。赤線が GSM 最大風速ガイダンス、青線が MSM 最大風速ガイダンスを示し、エラーバーはブートストラップ法で求めた 95%信頼区間である。

参考文献

気象庁予報部, 2018: ガイダンスの解説. 数値予報課報告・別冊第64号, 気象庁予報部, 94-232.

本田有機,藤田匡,計盛正博,室井ちあし,佐藤芳昭, 2018: データ同化. 平成 30 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 84-89.

ンスの利用も検討して欲しい。

付録 A 数値予報システムおよびガイダンスの概要一覧表

数値予報課が所掌する数値予報システムとガイダンスの概要、およびプロダクトの送信時刻に関する情報を以下の表に示す(2019 年 10 月現在)。表中の用語については、平成 30 年度数値予報研修テキスト第 II 部「数値予報の基礎知識」も参照のこと。

A.1 数値予報システム1

A.1.1 全球数値予報システム(全球モデル(GSM)・全球解析(GA))

数値予報モデル	
水平分解能	TL959(格子間隔約 20 km: 0.1875°) ²
鉛直層数	100層(最上層 0.01 hPa)
初期時刻	00, 06, 12, 18UTC
7 40 th 10	132 時間(初期時刻:00, 06, 18UTC)
予報時間	264 時間(初期時刻:12UTC)
境界値	
地中温度	予測する (初期値は解析値3)
土壌水分	飽和度を予測する(初期値は気候値)
積雪被覆	予測した積雪水当量を用いて積雪被覆率を診断する(初期値は全球積雪深解析を日
	本域の観測で修正したもの)
海面水温	全球海面水温解析値(海洋気象情報室作成:0.25°格子)の平年偏差を、予報時間に
 	より季節変動する気候値に加えたもの
	南北半球ごとの全球海氷密接度解析値(海洋気象情報室作成:0.25°格子)の海氷面
海氷分布	積平年偏差を維持するように、海氷密接度の初期偏差固定予測値を気候値で修正し
	たもの
解析(データ同化)システム	
データ同化手法	4 次元変分法
水平分解能	アウターモデル ⁴ の水平分解能:TL959(格子間隔約 20 km:0.1875°) ²
	インナーモデル ⁴ の水平分解能:TL319(格子間隔約 55 km : 0.5625°) ²
鉛直層数	100層(最上層 0.01 hPa)+地上 ⁵
解析時刻	00, 06, 12, 18UTC
同化ウィンドウ	各解析時刻の3時間前から3時間後まで
	速報解析 ⁶ :2 時間 20 分
観測の待ち受け時間	サイクル解析 ⁶ :11 時間 50 分(初期時刻:00, 12UTC)
	7 時間 50 分(初期時刻:06, 18UTC)
	ラジオゾンデ (気圧、気温、湿度、風)、ウィンドプロファイラ (風)、航空機 (気
	温、風)、地上(気圧5、積雪深7)、船舶・ブイ(気圧5)、アメダス(積雪深7)、地上
利用する主な観測(観測デー	GNSS (大気遅延量)、衛星可視赤外イメージャ (大気追跡風)、衛星マイクロ波散
タもしくは <u>算出データ</u>)	乱計 (海上風)、衛星マイクロ波サウンダ (輝度温度)、衛星マイクロ波イメージャ
	(輝度温度)、衛星ハイパースペクトル赤外サウンダ (輝度温度)、静止衛星赤外イ
/ Id 10 10	メージャ(輝度温度)、衛星 GNSS 掩蔽(屈折角)
台風ボーガス	擬似観測値(海面更正気圧、風)を利用

¹ 計盛 正博

 $^{^2}$ T は三角形波数切断を、L は線形格子を、数字は切断波数をそれぞれ表す。

³ 観測データは同化されておらず、解析システム内で予測された値が利用されている。

⁴ アウターモデルは第一推定値の計算に用いるモデル。インナーモデルは解析修正量を求める計算に用いるモデル。

⁵ 地上観測および船舶・ブイ観測の気温・風・湿度のデータは、2次元最適内挿法による地上解析値作成に利用される。ただし、この地上解析値はモデルの初期値としては使われない。

 $^{^6}$ 全球解析には予報資料を作成するために行う速報解析と観測データを可能な限り集めて正確な実況把握のために行うサイクル解析の 2 種類の計算がある。

⁷ 積雪深のデータは積雪被覆の初期状態を計算するために利用される。

A.1.2 全球アンサンブル予報システム (GEPS)⁸

数値予報モデル						
水平分解能	TL479(格子間隔約 40 km	TL479(格子間隔約 40 km : 0.375°) ²				
鉛直層数	100 層(最上層 0.01 hPa)					
初期時刻	00, 06, 12, 18UTC ⁹	00, 06, 12, 18UTC ⁹				
予報時間	132 時間(初期時刻:06, 1	.8UTC) ⁹				
1、北村1日	264 時間(初期時刻:00, 1	2UTC)				
メンバー数	27 メンバー(26 摂動ラン	+コントロールラン)				
初期値および摂動作成手法						
初期値	全球解析値を TL479 へ解修	象度変換したもの				
初期摂動作成手法	特異ベクトル (SV) 法およ	び局所アンサンブル変換カル	レマンフィルタ (LETKF)			
モデルアンサンブル手法	確率的物理過程強制法(摂	動ランのみ)				
下部境界摂動作成手法	海面水温摂動(摂動ランの	(み)				
SV 計算の詳細						
SV 計算の対象領域	北半球領域	熱帯領域	南半球領域			
3~日 昇・ノハ 3~限・攻	30°-90°N	30°-30°N	30°-90°S			
接線形・随伴モデルの分解能	TL63(格子間隔約 270 km	1)2、鉛直層数 40				
	初期値化、水平拡散、境界					
接線形・随伴モデルの物理過程	層、地表面フラックス	重力波抵抗、長波放射、雲	 (北半球領域と同じ)			
DAMAND RELIGIONAL		水、レイリー摩擦、乾燥対	(ALL PARKET CITYO)			
		流調節				
評価時間	48 時間	24 時間	(北半球領域と同じ)			
摂動の大きさの評価(ノルム)	湿潤トータルエネルギー					
	モデル第 15 層(約					
初期摂動の振幅	500 hPa) の気温の二乗	,	(北半球領域と同じ)			
	平均平方根が 0.23 K	平均平方根が 0.20 K				
SV から初期摂動を合成する手法	バリアンスミニマム法					
利用する SV の数	それぞれの領域で 25 個					
LETKF 計算の詳細						
水平分解能	TL319(格子間隔約 55 km	$1:0.5625^{\circ})^2$				
鉛直層数	100 層(最上層 0.01 hPa)					
メンバー数	50 メンバー 10					
観測データの利用方法	全球解析に準ずる。但し、	衛星ハイパースペクトル赤魚	外サウンダは利用しない。			

[®] GEPS は台風情報、週間天気予報、早期天候情報、2 週間気温予報および 1 か月予報を支援しているが、ここでは台風情報 及び週間天気予報への支援に関わる情報のみを記述している。

⁹ GEPS の 06, 18UTC 初期時刻は 1 日 2 回を最大として、全般海上予報区(赤道 −60°N、100°−180°E)内に台風が存在する、 または同区内で24時間以内に台風になると予想される熱帯低気圧が存在する場合、または、全般海上予報区外に最大風速34 ノット以上の熱帯低気圧が存在し、24時間以内に予報円または暴風警戒域が同区内に入ると予想された場合に実行される。

¹⁰ LETKF による摂動を求めるため、プロダクト作成用途と別にアンサンブル計算を行っており、ここではそのメンバー数を示 している。

A.1.3 メソ数値予報システム (メソモデル (MSM)・メソ解析 (MA))

数値予報モデル	
水平格子間隔と計算領域	格子間隔:5 km、計算領域:東西 4,080 km × 南北 3,300 km
鉛直層数	76 層(最上層約 22 km)
初期時刻	00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21UTC
予報時間	51 時間(初期時刻:00, 12UTC), 39 時間(初期時刻:03, 06, 09, 15, 18, 21UTC)
境界値	
地中温度	予測する(メソ解析では 4 層とし、初期値の第 1, 2 層は解析値 ³ 、第 3 ,4 層は気
	候値で与え、それを数値予報モデルで用いる9層に内挿する)
土壌水分	体積含水率を予測する(初期値は解析値 ³)
積雪被覆	全球積雪深解析(日本域以外)および観測で修正したオフライン陸面モデル(日
(傾当恢復	本域)の被覆分布に固定
海面水温	北西太平洋高解像度海面水温解析値(海洋気象情報室作成:0.1°格子)に固定
海氷分布	北半球海氷解析値(海洋気象情報室作成:0.1° 格子)に固定
側面境界	全球モデル予報値12
解析(データ同化)システム	
データ同化手法	4 次元変分法
水平格子間隔	アウターモデル 4 の水平格子間隔: 5 km
八十七丁间隔	インナーモデル ⁴ の水平格子間隔:15 km
鉛直層数	48 層 ¹¹ (最上層約 22 km) +地上 ⁵
解析時刻	00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21UTC
同化ウィンドウ	各解析時刻の3時間前から解析時刻まで
観測の待ち受け時間	50 分
	ラジオゾンデ(気圧、気温、湿度、風)、ウィンドプロファイラ(風)、航空機(気温、
	風)、地上(気圧 5 、積雪深 7)、船舶 \cdot ブイ(気圧 5)、アメダス(積雪深 7)、地上 GNSS
利用する主な観測(観測データもしくは <u>算出データ</u>)	(可降水量)、空港気象レーダー(ドップラー速度)、気象レーダー(解析雨量、ドッ
	プラー速度、反射強度 ¹³)、衛星可視赤外イメージャ(<u>大気追跡風</u>)、衛星マイク
	口波散乱計(<u>海上風</u>)、衛星マイクロ波サウンダ(輝度温度)、衛星マイクロ波イ
	メージャ(<u>降水強度</u> 、輝度温度)、静止衛星赤外イメージャ(輝度温度)、衛星二
	周波降水レーダー(反射強度 ¹³)、衛星 GNSS 掩蔽(<u>屈折率</u>)
台風ボーガス	擬似観測値(海面更正気圧、風)を利用

¹¹ 計算の便宜上設定している最上層と最下層を除く。

 $^{^{12}}$ 例えば、初期時刻 00 UTC の全球モデル予報値を初期時刻 03 , 06 UTC のメソモデルの側面境界値として利用する。

¹³ 反射強度から相対湿度プロファイルを推定して、相対湿度として同化している。

A.1.4 メソアンサンブル予報システム (MEPS)

数値予報モデル	
水平格子間隔と計算領域	格子間隔:5 km、計算領域:東西 4,080 km × 南北 3,300 km
鉛直層数	76 層(最上層約 22 km)
初期時刻	00, 06, 12, 18 UTC
予報時間	39 時間
メンバー数	21 メンバー(20 摂動ラン + コントロールラン)
初期値および摂動作成手法	
初期値	メソ解析値
初期摂動作成手法	特異ベクトル (SV) 法: 水平格子間隔 40 km のメソ SV (MSV40) + 水平格子間
	隔 80 km のメソ SV (MSV80) + 全球モデルに基づく全球 SV (GSV)
モデルアンサンブル手法	なし
側面境界摂動作成手法	SV 法 (GSV)
下部境界摂動作成手法	なし
SV 計算の詳細	
SV 計算の対象領域	MSV40: 125°-145°E, 25°-45°N, MSV80: 125°-145°E, 25°-45°N, GSV: 110°-
	170°E, 15°–50°N
接線形・随伴モデルの格子間	MSV40: 水平格子間隔 40 km, 鉛直層数 38, MSV80: 水平格子間隔 80 km, 鉛直
隔	層数 38, GSV: 全球アンサンブル予報システム (GEPS) と同じ
評価時間	MSV40: 6 時間、MSV80: 15 時間、GSV: 45 時間
摂動の大きさの評価 (ノルム)	MSV: 湿潤トータルエネルギー, GSV: 乾燥トータルエネルギー
初期摂動の振幅	SV の絶対値の領域平均が基準値(風 1.8 m/s, 温位 1 K, 水蒸気 0.001 kg·kg ⁻¹ と
	なるように倍率を定めた後、上限値(風 6 m/s、温位 4 K、水蒸気 0.006 kg·kg ⁻¹)
	により倍率を修正
SV から初期摂動を合成する	バリアンスミニマム法
手法	
利用する SV の数	MSV40: 10, MSV80: 10, GSV: 20

A.1.5 局地数値予報システム (局地モデル (LFM)・局地解析 (LA))

水平格子間隔と計算領域	格子間隔:2 km、計算領域:東西 3,160 km × 南北 2,600 km
鉛直層数	58 層(最上層約 20 km)
初期時刻	毎正時
予報時間	10 時間
境界値	
地中温度	予測する (初期値は解析値3)
土壌水分	体積含水率を予測する(初期値は解析値)
積雪被覆	メソモデルで利用している積雪被覆の内挿値に固定
海面水温	北西太平洋高解像度海面水温解析値(海洋気象情報室作成:0.1° 格子)に固定
海氷分布	北半球海氷解析値(海洋気象情報室作成:0.1° 格子)に固定
側面境界	メソモデル予報値 14
解析(データ同化)システム	
データ同化手法	3 次元変分法 ¹⁵
水平格子間隔	格子間隔:5 km
鉛直層数	48 層(最上層約 22 km) +地上
解析時刻	毎正時
同化ウィンドウ	各解析時刻の3時間前から解析時刻まで
観測の待ち受け時間	30分
	ラジオゾンデ (気圧、気温、湿度、風)、ウィンドプロファイラ (風)、航空機
利用する主な観測(観測デー	(気温、風)、地上(気圧、湿度)、船舶・ブイ(気圧)、アメダス(気温、風)、
タもしくは算出データ)	地上 GNSS(<u>可降水量</u>)、空港気象レーダー(ドップラー速度)、気象レーダー
	$(ドップラー速度、反射強度^{13})、衛星可視赤外イメージャ(大気追跡風)、衛星$
	マイクロ波散乱計 (土壌水分)、衛星マイクロ波サウンダ (輝度温度)、衛星マ
	イクロ波イメージャ(輝度温度、土壌水分)、静止衛星赤外イメージャ(輝度温
	度)
台風ボーガス	利用しない

A.1.6 毎時大気解析

数値予報モデル

解析(データ同化)システム	
データ同化手法	3 次元変分法16
水平格子間隔と計算領域	格子間隔:5 km、計算領域:東西 3,600 km × 南北 2,880 km
鉛直層数	48 層(最上層約 22 km) +地上 ¹⁷
解析時刻	毎正時
観測の待ち受け時間	18分
利用する主な観測(観測デー	ウィンドプロファイラ(風)、航空機(気温、風)、アメダス 18 (気温、風)、空
夕もしくは算出データ)	港気象レーダー (ドップラー速度)、気象レーダー (ドップラー速度)、衛星可
プリレベは 昇山 / 一 ブ	視赤外イメージャ(大気追跡風)
台風ボーガス	利用しない
備考	出力要素:風、気温

¹⁴ 局地モデル実行開始時の最新のメソモデル予報値を側面境界値として利用する。初期時刻、日々の計算時間によって変動するものの、通常、局地モデル初期時刻の 1~4 時間前を初期時刻とするメソモデル予報値を利用する。

 $^{^{15}}$ 解析時刻の 3 時間前を、メソモデル予報値を第一推定値として 3 次元変分法により解析する。その後、その解析値からの 1 時間予報値を推定値として 3 次元変分法により解析する。これを 3 回繰り返す。なお、第一推定値として用いるメソモデル予報値は、通常 FT=0, 1, 2 を利用する。例えば、初期時刻 00UTC のメソモデル予報値を、FT=0 は 03UTC の、FT=1 は 04UTC の、FT=2 は 05UTC の局地解析の第一推定値にそれぞれ利用する。

¹⁶ メソモデル予報値を第一推定値として、3 次元変分法により解析する。なお、第一推定値として用いるメソモデル予報値は、通常 FT=2, 3, 4 を利用する。例えば、初期時刻 00UTC のメソモデル予報値を FT=2 は 02UTC の、FT=3 は 03UTC の、FT=4 は 04UTC の毎時大気解析の第一推定値としてそれぞれ利用する。

¹⁷ 地上と上空を独立に解析した後、境界層内については地上と上空の修正量の線形結合をとり、これを修正量とする。

¹⁸ 特にアメダス観測については、解析値を観測値に強く寄せる設定を用いている。また、海岸付近のアメダス観測の強い影響 が海上に及ばないよう、解析を実行した後にフィルタを適用している。

A.1.7 数値予報モデル(全球モデル、メソモデル、局地モデル)の鉛直層と対応する気圧

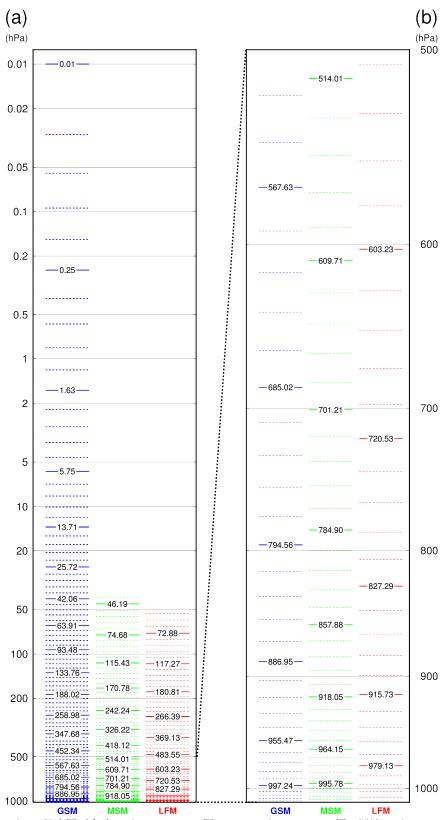


図 A.1.1 数値予報モデルの鉛直層(全球モデル GSM 100 層、メソモデル MSM 76 層、局地モデル LFM 58 層)と対応する 気圧。縦軸は気圧 [hPa]。図中の値は、標準大気を仮定した場合の数値予報モデルの鉛直層と気圧であり、気圧の値は 5 層刻 みで表示。(a) GSM, MSM, LFM について最下層気圧から 0.01 hPa までを示した図、(b) 最下層気圧から 500 hPa までを 拡大した図。GSM は下部境界の気圧を参照する σ - ρ ハイブリッド座標での気圧の値を示しており、MSM, LFM は幾何高度 を参照するハイブリッド座標で下部境界が 0 m(平均海面)の場合の幾何高度を気圧に変換した値を示している。全球アン サンブル予報システムと GSM、メソアンサンブル予報システムと MSM は、それぞれ同じ鉛直層を使用している。

表 A.1.1 全球モデル GSM の鉛直 100 層と対応する気圧と高度。標準大気を仮定した場合の鉛直層と気圧、高度を表示。

層番号	気圧 [hPa]	高度 [m]	層番号	気圧	高度	層番号	気圧	高度	層番号	気圧	高度
100	0.01	79302.24	75	25.72	24845.38	50	188.02	12175.79	25	685.02	3181.74
99	0.03	73057.64	74	28.61	24153.96	49	200.81	11758.43	24	707.88	2923.98
98	0.05	69245.56	73	31.69	23495.23	48	214.29	11346.42	23	730.34	2677.18
97	0.09	65561.32	72	34.95	22865.38	47	228.47	10939.56	22	752.32	2441.49
96	0.15	62007.05	71	38.40	22260.98	46	243.37	10535.93	21	773.75	2217.03
95	0.25	58590.99	70	42.06	21679.00	45	258.98	10133.79	20	794.56	2003.88
94	0.38	55318.92	69	45.93	21116.73	44	275.31	9733.61	19	814.67	1802.10
93	0.58	52194.38	68	50.03	20571.80	43	292.35	9335.91	18	834.03	1611.71
92	0.84	49235.13	67	54.39	20042.10	42	310.11	8941.19	17	852.56	1432.71
91	1.18	46498.87	66	59.01	19524.85	41	328.55	8549.98	16	870.22	1265.07
90	1.63	44019.67	65	63.91	19018.66	40	347.68	8162.80	15	886.95	1108.72
89	2.18	41788.18	64	69.12	18521.76	39	367.45	7780.18	14	902.72	963.58
88	2.86	39774.66	63	74.66	18033.03	38	387.84	7402.64	13	917.48	829.53
87	3.68	37953.26	62	80.54	17551.54	37	408.82	7030.72	12	931.21	706.44
86	4.64	36301.40	61	86.81	17076.50	36	430.33	6664.94	11	943.88	594.14
85	5.75	34799.34	60	93.48	16607.29	35	452.34	6305.82	10	955.47	492.43
84	7.02	33429.74	59	100.57	16143.41	34	474.79	5953.88	9	965.98	401.09
83	8.45	32177.35	58	108.12	15684.47	33	497.60	5609.62	8	975.41	319.89
82	10.05	31024.42	57	116.15	15230.21	32	520.73	5273.51	7	983.75	248.54
81	11.80	29954.95	56	124.69	14780.45	31	544.10	4945.97	6	991.02	186.75
80	13.71	28959.63	55	133.76	14335.10	30	567.63	4627.42	5	997.24	134.17
79	15.79	28030.63	54	143.39	13894.12	29	591.25	4318.25	4	1,002.43	90.44
78	18.03	27160.84	53	153.61	13457.58	28	614.88	4018.80	3	1,006.64	55.15
77	20.42	26343.82	52	164.44	13025.57	27	638.44	3729.38	2	1,009.91	27.86
76	22.99	25573.75	51	175.90	12598.24	26	661.85	3450.28	1	1,012.28	8.08

表 A.1.2 メソモデル MSM の鉛直 76 層、局地モデル LFM の 58 層と対応する気圧と高度。標準大気を仮定した場合の鉛直層と気圧、高度を表示。

	MS	SM	LFM			MSM		LFM	
層番号	気圧 [hPa]	高度 [m]	気圧 [hPa]	高度 [m]	層番号	気圧 [hPa]	高度 [m]	気圧 [hPa]	高度 [m]
76	41.75	21801.00			38	552.55	4834.10	305.74	9049.50
75	46.19	21150.83			37	571.72	4576.53	326.33	8608.00
74	51.03	20512.93			36	590.79	4327.25	347.47	8177.50
73	56.27	19887.18			35	609.71	4086.17	369.13	7758.00
72	61.96	19273.48			34	628.47	3853.17	391.26	7349.50
71	68.08	18671.73			33	647.03	3628.16	413.82	6952.00
70	74.68	18081.83			32	665.36	3411.03	436.76	6565.50
69	81.77	17503.66			31	683.42	3201.68	460.02	6190.00
68	89.37	16937.13			30	701.21	3000.00	483.55	5825.50
67	97.50	16382.12			29	718.67	2805.89	507.30	5472.00
66	106.18	15838.55			28	735.80	2619.24	531.20	5129.50
65	115.43	15306.29			27	752.56	2439.95	555.20	4798.00
64	125.26	14785.26			26	768.93	2267.92	579.23	4477.50
63	135.70	14275.33			25	784.90	2103.03	603.23	4168.00
62	146.76	13776.42			24	800.43	1945.20	627.14	3869.50
61	158.45	13288.41			23	815.51	1794.30	650.89	3582.00
60	170.78	12811.20			22	830.13	1650.25	674.42	3305.50
59	183.77	12344.69			21	844.25	1512.93	697.65	3040.00
58	197.41	11888.77	53.68	20189.50	20	857.88	1382.23	720.53	2785.50
57	211.72	11443.34	59.53	19528.00	19	870.99	1258.07	742.98	2542.00
56	226.70	11008.29	65.92	18877.50	18	883.57	1140.32	764.95	2309.50
55	242.24	10583.52	72.88	18238.00	17	895.62	1028.89	786.37	2088.00
54	258.23	10168.92	80.42	17609.50	16	907.11	923.67	807.17	1877.50
53	274.65	9764.40	88.60	16992.00	15	918.05	824.57	827.29	1678.00
52	291.48	9369.84	97.45	16385.50	14	928.42	731.46	846.68	1489.50
51	308.68	8985.15	106.99	15790.00	13	938.22	644.25	865.28	1312.00
50	326.22	8610.21	117.27	15205.50	12	947.44	562.84	883.02	1145.50
49	344.09	8244.92	128.31	14632.00	11	956.09	487.13	899.85	990.00
48	362.24	7889.19	140.16	14069.50	10	964.15	416.99	915.73	845.50
47	380.66	7542.90	152.84	13518.00	9	971.63	352.34	930.60	712.00
46	399.29	7205.95	166.38	12977.50	8	978.54	293.07	944.41	589.50
45	418.12	6878.24	180.81	12448.00	7	984.86	239.07	957.13	478.00
44	437.11	6559.65	196.15	11929.50	6	990.60	190.25	968.72	377.50
43	456.23	6250.10	212.43	11422.00	5	995.78	146.48	979.13	288.00
42	475.44	5949.47	229.66	10925.50	4	1000.38	107.68	988.33	209.50
41	494.71	5657.66	247.68	10440.00	3	1004.42	73.74	996.31	142.00
40	514.01	5374.57	266.39	9965.50	2	1007.91	44.54	1003.02	85.50
39	533.30	5100.08	285.75	9502.00	1	1010.85	20.00	1008.45	40.00

A.1.8 数値予報モデル(全球モデル、メソモデル、局地モデル)の陸面過程における地表面からの土壌の深さ

表 A.1.3 数値予報モデル(全球モデル、メソモデル、局地モデル)の陸面過程における地表面からの土壌の深さ [m]。 全球アンサンブル予報システムと全球モデル、メ<u>ソアンサンブル</u>予報システムとメソモデルは、それぞれ同じ土壌層を使用している。

	GSM	MSM	LFM
地表層	_	0.0025	0.0025
第1層	0.010	0.0085	0.0085
第2層	0.045	0.0173	0.0173
第3層	0.130	0.0309	0.0309
第4層	0.340	0.0536	0.0536
第5層	0.740	0.0936	0.0936
第6層	1.490	0.1681	0.1681
第7層	2.740	0.3146	0.3146
第8層	_	0.6076	0.6076

A.2 ガイダンス¹

A.2.1 降水ガイダンス

平均降水量ガイダンス	$(MRR)^2$
/cd set &	GSM, GEPS: 20 km 格子
作成対象	MSM, LFM: 5 km 格子
	GSM, MSM, GEPS:カルマンフィルタによる予測降水量を頻度バイアス補正後、降水確率
作成方法	(PoP) で補正。
1198月伍	LFM:初期時刻の異なる複数の 1 時間降水量のアンサンブル平均(LAF 法)を求めた後、
	頻度バイアス補正。
作成対象とするモデル	GSM, MSM, LFM, GEPS (GEPS は各メンバー)
予報対象時間単位	GSM, MSM, GEPS:3 時間
17 形/13 8 时间 中位	LFM:1 時間
	GSM: FT=6 から FT=84 まで 3 時間間隔
 予報期間と間隔	MSM: FT=3 から FT=39(00, 12UTC 初期値は 51)まで 3 時間間隔
1 大大約11日 こ 1日1時	LFM: FT=1 から FT=10 まで 1 時間間隔
	GEPS: FT=6 から FT=132(00, 12UTC 初期値は 219)まで 3 時間間隔
逐次学習の有無	あり
	GSM, MSM, GEPS:モデル予測値 ³ (NW85, NE85, SSI, PCWV, QWX, EHQ, OGES,
説明変数	DXQV, FRR)
	LFM:モデル予測値 ³ (FRR)
目的変数	解析雨量(1 km 格子)とアメダスの降水量から算出した 20 km(MSM, LFM は 5 km)格
1117230	子内の平均降水量。
 層別化処理の対象	格子毎、初期時刻、予報時間(GSM, MSM:6 時間区切り、LFM:1 時間区切り、GEPS は
7831878.3.7.3.7	12 時間区切り)
備考	・GSM, MSM, GEPS は頻度バイアス補正の閾値に 0.5, 1, 5, 10, 20, 30, 50, 80, 120 mm/3h
	を使用する(GSM の 11~4 月は 1, 3, 50, 80 mm/3h を使用し、GEPS は 120 mm を使用し
	ない)。LFM は 0.5, 1, 3, 5, 10, 20, 30 mm/h を使用する。
	・平均降水量ガイダンス (GEPS) の各メンバー予測は、GEPS のコントロールランを用い
	て最適化した係数で計算する。
	・平均降水量ガイダンス (GEPS) は最大降雪量ガイダンス (GEPS) の入力として利用する。

¹ 石川 宜広

NW85: 850 hPa の北西成分の風速 NE85: 850 hPa の北東成分の風速

SSI:ショワルターの安定指数 (850 – 500 hPa)

PCWV:可降水量×850 hPa 風速×850 hPa 鉛直速度

 $\mathrm{QWX}: \sum$ (鉛直速度 × 比湿 × 湿度 × 層の厚さ)、 \sum は各層の和を示す(以下同じ) $\mathrm{EHQ}: \sum$ (基準湿度からの超過分 × 比湿 × 湿潤層の厚さ)、湿潤層は基準湿度(気温で変化)を超える層(以下同じ)

OGES: 地形性上昇流 × 比湿 × 湿潤層の厚さ

DXQV: 冬型降水の指数 「風向別降水率 × 850 hPa の風速 × (海面と下層温位の飽和比湿差)」

FRR:モデル降水量予報値 RH85: 850 hPa 相対湿度

NW50: 500 hPa の北西成分の風速 NE50: 500 hPa の北東成分の風速

ESHS: ∑ (比湿 × 湿潤層の厚さ) / ∑ 飽和比湿

HOGR: 地形性上昇流 × 相対湿度

CFRR:モデル降水量予報値の変換値 「FRR²/(FRR²+2)」

D850: 850 hPa 風向 W850: 850 hPa 風速 OGR: 地形性上昇流 × 比湿

10Q4: 1000 hPa の比湿と 400 hPa の飽和比湿の差

DWL:湿潤層の厚さ

² 詳細は数値予報課報告・別冊第64号第4.2節、本テキスト第2.3節を参照のこと。

³ 降水ガイダンスに使用する説明変数は以下のもの。

降水確率ガイダンス (P	降水確率ガイダンス (PoP) ²				
作成対象	GSM, GEPS: 20 km 格子				
1F/X/138	MSM: 5 km 格子				
作成方法	カルマンフィルタ				
作成対象とするモデル	GSM, MSM, GEPS (GEPS は各メンバー)				
予報対象時間単位	6時間				
	GSM: FT=9 から FT=81 まで 6 時間間隔				
	MSM:				
	00, 12UTC 初期値:FT=9 から FT=51 まで 6 時間間隔				
予報期間と間隔	03, 15UTC 初期値:FT=6 から FT=36 まで 6 時間間隔				
	06, 18UTC 初期値:FT=9 から FT=39 まで 6 時間間隔				
	09, 21UTC 初期値:FT=6 から FT=36 まで 6 時間間隔				
	GEPS: FT=9 から FT=129(00, 12UTC 初期値は 219)まで 6 時間間隔				
逐次学習の有無	あり				
説明変数	モデル予測値 ³ (NW85, NE85, RH85, NW50, NE50, ESHS, HOGR, DXQV, CFRR)				
目的変数	解析雨量(1 km 格子)とアメダスの降水量から算出した 20 km(MSM は 5 km)格子内				
日刊复数	の降水の有無の平均 (実況降水面積率に同じ)。				
層別化処理の対象	格子毎、初期時刻、予報時間(6 時間区切り、GEPS は 12 時間区切り)				
備考	降水確率ガイダンス (GEPS) の各メンバーの予測は、GEPS のコントロールランを用いて				
加力	最適化した係数で計算する。				

最大降水量ガイダンス	$(RMAX)^2$
作成対象	GSM, GEPS: 20 km 格子 MSM, LFM: 5 km 格子
作成方法	1, 3 時間最大降水量 (GSM, MSM, GEPS) および 24 時間最大降水量 (GEPS): ニューラルネットワーク (3 層:中間層はロジスティック関数 ⁴ 、出力層は線形関数を使用) 1 時間最大降水量 (LFM): モデルの降水量予測のばらつきを利用した手法 12, 24 時間最大降水量 (GSM, MSM) および 48, 72 時間最大降水量 (GSM): 線形重回帰
作成対象とするモデル	
予報対象時間単位	1,3時間最大降水量(GSM, MSM):3時間、1時間最大降水量(LFM):1時間 12時間最大降水量(GSM, MSM):12時間、24時間最大降水量(GSM, MSM):24時間 48時間最大降水量(GSM):48時間、72時間最大降水量(GSM):72時間
予報期間と間隔	GSM: 1, 3 時間最大降水量: FT=6 から FT=84 まで 3 時間間隔 12 時間最大降水量: FT=15 から FT=84 まで 3 時間間隔 24 時間最大降水量: FT=27 から FT=84 まで 3 時間間隔 48 時間最大降水量: FT=51 から FT=84 まで 3 時間間隔 72 時間最大降水量: FT=75 から FT=84 まで 3 時間間隔 72 時間最大降水量: FT=75 から FT=84 まで 3 時間間隔 MSM: 1, 3 時間最大降水量: FT=3 から FT=39 (00, 12UTC 初期値は 51) まで 3 時間間隔 12 時間最大降水量: FT=12 から FT=39 (00, 12UTC 初期値は 51) まで 3 時間間隔 24 時間最大降水量: FT=24 から FT=39 (00, 12UTC 初期値は 51) まで 3 時間間隔 LFM: 1 時間最大降水量: FT=24 から FT=10 まで 1 時間間隔 GEPS: 1, 3 時間最大降水量: FT=6 から FT=219 (06, 18UTC 初期値は 132) まで 3 時間間隔 24 時間最大降水量: FT=6 から FT=219 (06, 18UTC 初期値は 132) まで 3 時間間隔
逐次学習の有無	なし
説明変数	・1,3時間最大降水量 (GSM, MSM, GEPS) および24時間最大降水量 (GEPS):モデル予測値 ³ (D850, W850, SSI, OGR, 10Q4, DWL) と3時間 (GEPS は24時間) 平均降水量・1時間最大降水量 (LFM):モデル予測値 ³ (FRR) の標準偏差と1時間平均降水量・12,24時間最大降水量 (GSM, MSM) および12,24,48,72時間最大降水量 (GSM):モデル予測値 ³ (500 hPa 高度、500 hPa 温位、850 hPa 鉛直 P 速度、850 hPa 相当温位、SSI (850 - 500 hPa)、SSI (925 - 700 hPa)、500 hPa 渦度、500 m 高度水蒸気フラックス、500 m 高度相当温位、500 m 高度と 700 hPa の風速鉛直シアー、地形性上昇流(下層代表風と風向に応じた地形勾配の積)と下層比湿の積、可降水量、EHQ、ESHS、等温位面渦位(305,345,355 K)の上位主成分から7つ)及び各予報対象時間単位の平均降水量ガイダンス
目的変数	解析雨量(1 km 格子)から算出した 20 km(MSM, LFM は 5 km)格子内の降水量の最大値。ただし、MSM の 1, 3 時間最大降水量は、5 km 格子を中心とする 20 km 格子内の最大を目的変数としている。
層別化処理の対象 備考	格子毎、平均降水量 ・1,3時間最大降水量 (GSM, MSM, GEPS) および24時間最大降水量 (GEPS) は、ニューラルネットで比率(最大降水量/平均降水量)を予測し、平均降水量ガイダンス (MRR) に比率を掛けて最大降水量を予測する。 ・1時間最大降水量 (LFM) は、平均降水量ガイダンスにモデルの降水量予測のばらつきに応じた降水量を加え、さらに解析雨量から作成した関係式で変換して予測する。 ・12または24時間最大降水量 (GSM, MSM) および48または72時間最大降水量 (GSM) は、各予報対象時間単位の平均降水量ガイダンス及びモデル予測値の主成分から線形重回

 $^{^4}$ 入力を x とした時に、出力が $1/\left(1+\exp\left(-wx\right)\right)$ の形で表される関数 (w は係数)。

A.2.2 降雪ガイダンス

降雪量ガイダンス ⁵	
作成対象	5 km 格子
作成方法	平均降水量ガイダンスに雪水比をかけて算出する。雪水比は、ロジスティック関数による 非線形回帰で決定した回帰式 ⁶ に、格子形式気温ガイダンスを入力して予測する。 1時間毎の降雪量(1時間に線形内挿した 3 時間平均降水量ガイダンス×1時間雪水比)を 計算し、それを積算して 3, 6, 12, 24 時間降雪量を算出。
作成対象とするモデル	GSM, MSM
予報対象時間単位	3, 6, 12, 24 時間
予報期間と間隔	GSM:3 時間:FT=6 から FT=84 まで 3 時間間隔 6 時間:FT=9 から FT=84 まで 3 時間間隔 12 時間:FT=15 から FT=84 まで 3 時間間隔 24 時間:FT=27 から FT=84 まで 3 時間間隔 MSM:3 時間:FT=3 から FT=39(00, 12UTC 初期値は 51)まで 3 時間間隔 6 時間:FT=6 から FT=39(00, 12UTC 初期値は 51)まで 3 時間間隔 12 時間:FT=12 から FT=39(00, 12UTC 初期値は 51)まで 3 時間間隔 24 時間:FT=24 から FT=39(00, 12UTC 初期値は 51)まで 3 時間間隔
逐次学習の有無	なし (入力としている平均降水量ガイダンスはあり)
説明変数	平均降水量:A.2.1 降水ガイダンス参照 雪水比:格子形式気温ガイダンス
層別化処理の対象	雪水比:降水量
備考	・GSM, MSM の雪水比は格子形式気温ガイダンス(A.2.3 参照)を回帰式に入力して予測する。 ・GSM, MSM は、1 時間毎の降雪量(3 時間平均降水量ガイダンスを 3 等分× 1 時間雪水比)を計算し、それを積算して 3, 6, 12, 24 時間降雪量を算出。 ・天気ガイダンス(降水種別)(A.2.5 参照)が「雨」の場合または、格子形式気温ガイダンスの地上気温が+2°C 以上の場合には降雪量を 0 cm とする。

⁵ 詳細は数値予報課報告・別冊第 64 号第 4.3 節を参照のこと。今回、以前の最大降雪量ガイダンスから降雪量ガイダンスに改 名した。

⁶ 雪水比のような上下限値を持つ連続な目的変数に用いられる回帰分析。ロジスティック関数を用いて、最小二乗法で回帰係数 を求める。

降雪量地点ガイダンス ⁵	
作成対象	積雪深計設置のアメダス
佐井子 汁	GSM, MSM:ニューラルネットワーク(3 層:中間、出力ともロジスティック関数 ⁴ を使
	用)による予測に頻度バイアス補正を行う。
作成方法	GEPS:最大降雪量ガイダンスと同じ手法(ただし、格子ではなくアメダス地点で計算)
	による予測に頻度バイアス補正を行う。
作成対象とするモデル	GSM, MSM, GEPS
予報対象時間単位	6, 12, 24 時間(GEPS は 24 時間のみ)
	GSM:6 時間:FT=9 から FT=84 まで 3 時間間隔
	12 時間:FT=15 から FT=84 まで 3 時間間隔
	24 時間:FT=27 から FT=84 まで 3 時間間隔
予報期間と間隔	MSM:6 時間:FT=6 から FT=39(00, 12UTC 初期値は 51)まで 3 時間間隔
	12 時間:FT=12 から FT=39(00, 12UTC 初期値は 51)まで 3 時間間隔
	24 時間:FT=24 から FT=39(00, 12UTC 初期値は 51)まで 3 時間間隔
	GEPS:24 時間:FT=27 から FT=219 まで 6 時間間隔
逐次学習の有無	GSM, MSM: あり (ニューラルネットワーク、頻度バイアス補正)
(2)八丁日 少 日無	GEPS:あり(頻度バイアス補正)
	GSM, MSM:モデル予測値(地上・925・850・700・500 hPa の気温、地上・925・850・
	700 hPa の相対湿度、700・500 hPa の高度、925・850・700・500 hPa の風向、925・850・
説明変数	700・500 hPa の風速、「海面水温 – 925 hPa の気温」、925・850・700 hPa の上昇流、「地
	上 – 850 hPa」・「925 – 700 hPa」の SSI³、地形性降水指数、降水量、地上気圧、気温で
	層別化した雪水比にモデル降水量を乗じた降雪量)
目的変数	GSM, MSM: アメダスの積雪深計で観測された 6, 12 時間降雪量
口印及奴	GEPS:アメダスの積雪深計で観測された 24 時間降雪量
層別化処理の対象	GSM, MSM:作成対象地点、初期時刻、予報時間(3時間毎1日分)
	GEPS:作成対象地点、初期時刻、予報時間
備考	・GSM, MSM:頻度バイアス補正の閾値は 6 時間降雪量が 1, 5, 15, 30 cm、12 時間降雪
	量が 3, 10, 20, 40 cm を使用。24 時間降雪量は 12 時間降雪量を積算して算出。
	・GEPS:頻度バイアス補正の閾値は 24 時間降雪量が 1, 5, 10, 30, 50, 80 cm を使用。説
	明変数は降雪量ガイダンスを参照。

A.2.3 気温ガイダンス

時系列気温ガイダンス 7			
作成対象	アメダス、空港		
作成方法	カルマンフィルタ		
作成対象とするモデル	アメダス:GSM, MSM, GEPS(GEPS は各メンバー)		
TFIXAISC 9 SC/ル	空港:MSM		
予報対象時間	毎正時		
	GSM: FT=3 から FT=84 まで 1 時間間隔		
予報期間と間隔	MSM: FT=1 から FT=39(00, 12UTC 初期値は 51)まで 1 時間間隔		
	GEPS: FT=3 から FT=219 まで 3 時間間隔		
逐次学習の有無	あり		
説明変数	モデル予測値(地上の西・東・南・北風成分、地上風速、地上気温、中・下層雲量、気温		
1017124	滅率、降水量、前日との気温差)		
	アメダス:アメダスで観測された毎正時(GEPS は 3 時間毎の正時)の気温		
目的変数	空港:航空気象定時観測気象報 (METAR) または航空気象自動観測気象報 (METAR AUTO)		
	の毎正時の気温		
層別化処理の対象	作成対象地点、初期時刻、予報時間、季節(暖候期(4~9月)、寒候期(10~3月))		
	暖・寒候期の係数切替前に 1 か月間の事前学習を行う。		
備考	時系列気温ガイダンス (GSM, MSM) を格子に分配して格子形式気温ガイダンスが作成さ		
	れ、降雪量ガイダンス(雪水比)、天気ガイダンス(降水種別)に利用される。		

⁷ 詳細は数値予報課報告・別冊第 64 号第 4.4 節を参照のこと。

最高・最低気温ガイダンス ⁷						
作成対象	アメダス、空港					
作成方法	カルマンフィルタ					
作成対象とするモデル	アメダス:GSM, MSM 空港:MSM					
予報対象時間単位	9 時間(最低気温 15~00UTC、最高気温 00~09UTC) 24 時間(週間予報用の明後日の最高・最低気温)					
	GSM:アメ	ダス				
	初期値	当日	翌日	翌々日	3 日後	
	00UTC	最高	最高・最低	最高・最低	最低	
	06UTC		最高・最低	最高・最低	最高・最低	
	12UTC		最高・最低	最高・最低	最高・最低	
	18UTC	最高	最高・最低	最高・最低	最低	
		ダス、空港				
	初期値	当日	翌日	翌々日		
予報期間 (対象要素)	00UTC	(最高)	最高・最低	(最低)		
	03UTC		最高・最低			
	06UTC		最高・最低			
	09UTC		最高・最低	(最低)		
	12UTC		最高・最低	(最高・最低)		
		最高(・最低)	(最高・) 最低			
	18UTC	最高	(最高・) 最低			
	21UTC	最高	(最高・) 最低			
	_	は、日本時間で初期	期時刻から見た日伯	寸を示す、() 内は	アメダスのみ	
逐次学習の有無	あり					
説明変数	モデル予測値(地上の西・東・南・北風成分、地上風速、地上気温、中・下層雲量、					
100719294	気温減率、降水量、前日との気温差)					
目的変数	アメダス:アメダスの気温観測(1 分値)から算出した最高・最低気温					
	空港:METAR, METAR AUTO、特別飛行場実況観測 (SPECI) から算出した最高・最低					
	気温					
	当日・翌日の、最高気温は 00~09UTC の最高気温、最低気温は 15~00UTC の最低気温 作成対象地点、初期時刻、季節(暖候期(4~9月)、寒候期(10~3月))、予報対象要素					
				月)、寒候期(10	~3月))、予報	対象要素
層別化処理の対象	(最高気温、最低気温)、予報時間(日単位) 暖・寒候期の係数切替前に1か月間の事前学習を行う。					
	暖・寒候期	の係数切替前に 1	か月間の事前学習	を行う。		

A.2.4 風ガイダンス

定時風ガイダンス8			
作成対象	アメダス、空港		
作成方法	カルマンフィルタによる予測に風速の頻度バイアス補正を行う。		
作成対象とするモデル	アメダス:GSM, MSM		
下級対象とするモブル	空港:MSM		
予報対象時間	3 時間毎の正時 (GSM)、毎正時 (MSM)		
	アメダス (GSM):FT=3 から FT=84 まで 3 時間間隔		
予報期間と間隔	アメダス (MSM):FT=1 から FT=39(00, 12UTC 初期値は 51)まで 1 時間間隔		
	空港 (MSM):FT=2 から FT=39(00, 12UTC 初期値は 51)まで 1 時間間隔		
逐次学習の有無	あり		
説明変数	モデル予測値(地上風の東西・南北成分)		
	実況とモデルの地上風の東西・南北成分との差		
目的変数	アメダス:アメダスで観測された 1,3 時間毎の正時の風の東西・南北成分		
	空港:METAR, METAR AUTO(毎正時)の風の東西・南北成分		
層別化処理の対象	作成対象地点、初期時刻、予報対象時刻(1時間毎1日分)、		
	風向(4 方位:北東、南東、南西、北西)		
備考	頻度バイアス補正の閾値はアメダスには 2.5, 5.5, 9.5, 13.0 m/s、空港には 5.0, 11.0, 18.0,		
	24.0 ノットを使用。		

最大風速ガイダンス8			
作成対象	アメダス、空港		
作成方法	カルマンフィルタによる予測に風速の頻度バイアス補正を行う。		
作成対象とするモデル	アメダス:GSM, MSM, GEPS (GEPS は各メンバー)		
TENNAME OF SICIAL	空港:MSM		
予報対象時間単位	3 時間 (アメダス)、1 時間 (空港)		
	アメダス (GSM):FT=3 から FT=84 まで 3 時間間隔		
 予報期間と間隔	アメダス (MSM):FT=3 から FT=39(00, 12UTC 初期値は 51)まで 3 時間間隔		
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	アメダス (GEPS):FT=3 から FT=219 まで 3 時間間隔		
	空港 (MSM):FT=2 から FT=39(00, 12UTC 初期値は 51)まで 1 時間間隔		
逐次学習の有無	あり		
説明変数	モデル予測値(地上風の東西・南北成分)		
	実況とモデルの地上風の東西・南北成分との差		
目的変数	アメダス:前3時間の最大風速時(10分毎の観測から算出)の風の東西・南北成分		
口印及数	空港:前1時間の最大風速時(METAR, SPECI, METAR AUTO から算出)の風の東西・		
	南北成分		
層別化処理の対象	作成対象地点、初期時刻、予報対象時刻(1 時間毎 1 日分、GEPS は 3 時間毎 1 日分)、		
	風向(4 方位:北東、南東、南西、北西)		
備考	頻度バイアス補正の閾値はアメダスには 3.0, 7.0, 11.0, 15.0 m/s、空港には 6.0, 13.0, 20.0,		
	25.0 ノットを使用。		

⁸ 詳細は数値予報課報告・別冊第 64 号第 4.5 節を参照のこと。

ガスト発生確率ガイダンス ⁸		
作成対象	空港	
作成方法	ロジスティック回帰	
作成対象とするモデル	MSM	
予報対象時間単位	3時間	
予報時間と間隔	FT=3 から FT=39(00, 12UTC 初期値は 51)まで 3 時間間隔	
逐次学習の有無	なし	
説明変数	下表にガスト発生確率ガイダンスの説明変数をまとめる。	
目的変数	空港における前3時間のガスト通報の有無(METAR, SPECI, SCAN, METAR AUTO か	
	ら算出)	
層別化処理の対象	作成対象地点、風向(8 方位:北、北東、東、南東、南、南西、西、北西)	

ガスト発生確率ガイダンスの説明変数			
説明変数	内容		
	モデルが予測した地上 10 m の風速(地上風速)と乱流による風速の変動の前 1 時間最		
	大値の和。乱流による地上 10 m 風速の変動とは、次の式で定義される平均風速の揺ら		
	ぎ $C_{ugn}\sigma_u$ のことである。		
地上風速最大値(地上風 速の前 1 時間最大値)	$\sigma_u = 2.29u_* \cdot \max\left[\left(1 - \frac{1}{24} \frac{z_i}{L}\right)^{\frac{1}{3}}, 1.0\right]$		
	ここで、 $C_{ugn}=7.71$ 、 $z_i=1000$ m、 L は Monin-Obukov 長、 u_* は摩擦速度 $u_*=$		
	$\left(\overline{u'w'}^2+\overline{v'w'}^2 ight)^{rac{1}{4}}$ ొన్న \circ		
	境界層に含まれる気圧面風速の最大値。境界層を「地上から上層までの大気が混合し得		
境界層最大風速	る領域」と定義し、地上から等温位または不安定である層を判定して境界層の高さと算		
	出する。気圧の上限は 500 hPa とする。		
水平風の鉛直シアー	地上風と境界層最大風との差分ベクトルの風速を 1000 ft 当たりに換算した値。地上と		
	最大風の気圧面との高度差が 1000 ft 未満の場合は、差分ベクトルの値とする。		
SSI	ショワルターの安定指数 (850 hPa–500 hPa)。		
$\omega 925$	925 hPa 面の鉛直 p 速度。		

ガスト風速、最大瞬間風流	東ガイダンス ⁸
发出社会	ガスト風速:空港
作成対象	最大瞬間風速:アメダス
	ガスト風速 A:カルマンフィルタ
	ガスト風速 B:カルマンフィルタによる予測に風速の頻度バイアス補正を行う。
	※ モデルの地上風速が 10 m/s 未満の場合はガスト風速 A を、10 m/s 以上の場合はガ
	スト風速Bをガスト風速ガイダンスの予測値とする。
作成方法	
	最大瞬間風速 A、最大瞬間風速 B:カルマンフィルタによる予測に風速の頻度バイアス
	補正を行う。
	※ モデルの地上風速が 10 m/s 未満の場合は最大瞬間風速 A を、10 m/s 以上の場合は
	最大瞬間風速 B を最大瞬間風速ガイダンスの予測値とする。
作成対象とするモデル	MSM
予報対象時間単位	1時間
予報時間と間隔	ガスト風速 A、ガスト風速 B:FT=2 から FT=39(00, 12UTC 初期値は 51)まで 1 時
1. 北州1日1 〇 1日1143	間間隔
	最大瞬間風速 A、最大瞬間風速 B:FT=1 から FT=39(00, 12UTC 初期値は 51)まで
	1時間間隔
逐次学習の有無	あり
	ガスト風速 A、最大瞬間風速 A:モデル予測値(地上風速最大値、地上風速、境界層最
説明変数	大風速) (ガスト発生確率ガイダンスの説明変数を参照)
	ガスト風速 B、最大瞬間風速 B:モデル予測値(地上風速の東西・南北成分)
	ガスト風速 A、最大瞬間風速 A:実況と地上風速最大値との差
	ガスト風速 B、最大瞬間風速 B:実況とモデルの地上風速の東西・南北成分との差
目的変数	※ 実況: ガスト風速は空港における前3時間のガストの最大値(METAR, SPECI, SCAN,
	METAR AUTO でガストの通報があった場合に限る)、最大瞬間風速はアメダスで観測
	された 1 時間毎の最大瞬間風速の東西・南北成分
	ガスト風速 A:作成対象地点、初期時刻、予報対象時刻(3 時間毎 1 日分)
層別化処理の対象	ガスト風速 B:作成対象地点、初期時刻、予報対象時刻(3 時間毎 1 日分)、風向(4 方
	位:北東、南東、南西、北西)
	最大瞬間風速 A、最大瞬間風速 B:作成対象地点、初期時刻、予報対象時刻(1 時間毎 1
	日分)
頻度バイアス補正の閾値	ガスト風速 B には、1.0, 25.0, 35.0 ノット。
/// 「 / / /	最大瞬間風速 A と最大瞬間風速 B には、13.0, 18.0, 23.0 m/s。

A.2.5 天気ガイダンス

日照率 (曇天率) ガイダンス ⁹			
作成対象	20 km 格子 (GSM)、5 km 格子 (MSM)		
作成方法	ニューラルネットワーク		
作成対象とするモデル	GSM, MSM		
予報対象時間単位	前 3 時間		
予報期間と間隔	GSM: FT=6~84 の 3 時間間隔、		
1、北州山口 C 旧州	MSM: FT=3~39(00, 12UTC 初期値は 51)の 3 時間間隔		
逐次学習の有無	ab		
	各層 (1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300 hPa) の前 3 時間平均相対湿度 [%]、		
説明変数	前 3 時間平均気温差 (850 hPa-500 hPa) [K]、		
机炉及数	前 3 時間降水量 (FT-3 h, FT±0 h, FT+3 h) [mm]		
	ただし、降水量は $\log_{10}\left(1+$ 降水量 $\right)$ で変換する。		
目的変数	12, 15JST の前 3 時間日照率(観測された前 3 時間の日照時間を 3 時間で割った値)。		
層別化処理の対象	対象地点、暖候期(4~9月)と寒候期(10~3月)		
	暖・寒候期の係数切替の 30 日前から事前学習を行う。		
	アメダス地点でニューラルネットワークを作成し、それを元に格子形式の日照率を計算す		
備考	る。		
	予測結果は曇天率(1 – 日照率)として配信する。		

天気ガイダンス ⁹			
作成対象	20 km 格子 (GSM)、5 km 格子 (MSM)		
作成方法	日照率、降水量、降水種別から天気を判別。		
	天気を晴れ、曇り、雨、雨または雪、雪に判別。		
作成対象とするモデル	GSM, MSM		
予報対象時間単位	前 3 時間		
予報期間と間隔	GSM: FT=6~84 の 3 時間間隔、MSM: FT=3~39(00, 12UTC 初期値は 51)の 3 時間間		
	隔		

⁹ 詳細は数値予報課報告・別冊第 64 号第 4.6 節を参照のこと。

A.2.6 発雷確率ガイダンス

発雷確率ガイダンス10			
作成対象	GSM: 20 km 格子、MSM: 5 km 格子		
作成方法	ロジスティック回帰		
予報対象時間単位	3時間		
予報期間と間隔	GSM: FT=6~84 の 3 時間間隔、		
J, 北沿山口 C 旧山區	MSM: FT=3~39(00, 12UTC 初期値は 51)の 3 時間間隔		
逐次学習の有無	なし		
説明変数	下表に発雷確率ガイダンスの説明変数をまとめる。		
目的変数	対象とする 20 km 格子を含む周囲 9 格子(60 km 四方)における前 3 時間の発雷の有無。		
	LIDEN、飛行場観測、地上気象観測から作成する。		
層別化処理の対象	地域、-10℃ 高度、予報時間、予報対象時刻。		
備考	予測は LAF(過去初期値との重み付き平均)ありと LAF なしを作成する。		

	変数名	発雷確率ガイダンスの説明変数					
必須変数	FRR3	数値予報モデルの 3 時間降水量予測 [mm/3h]。log ₁₀ (1 + FRR3) と変換する。					
	CAPE	対流有効位置エネルギー $[\mathrm{J~kg}^{-1}]$ 。モデル地上面および $925~\mathrm{hPa}$ 面から持ち上げた CAPE					
		のうち大きい方を選択。CAPE×1/1000 と変換する。					
	SSI	ショワルター安定指数。−10℃ 高度が 3 km 未満の場合には 925 hPa と 700 hPa の間で計					
		算した SSI9 を用いる。					
	ZM10	-10°C 高度 [km](大気の温度が −10°C となる高度)。					
	LLU	地上から 700 hPa の間の平均風の東西成分 [m/s]。−10℃ 高度が 3 km 以上のときは最大					
		15 m/s に制限する。					
	LLV	地上から 700 hPa の間の平均風の南北成分 [m/s]。−10℃ 高度が 3 km 以上のときは最大					
		15 m/s に制限する。					
候補変数	TPWR	気柱相対湿度。鉛直方向に飽和していると仮定した飽和可降水量に対する可降水量の比率。					
	VOR5	500 hPa 渦度 [10 ⁻⁶ s ⁻¹]。最大 99×10 ⁻⁶ s ⁻¹ に制限する。					
	LAPS	地上から 850 hPa の間の気温減率 [℃ km ⁻¹]。					
	DXQV	冬型の降水指数。風向別降水率 ×850 hPa の風速 [m/s]× 海面と下層温位の飽和比湿差					
		$[\mathrm{g~kg}^{-1}]$ 。詳細は降水ガイダンス(付録 A.2.1)を参照。					
	VSHR	850 hPa と 500 hPa の間の風ベクトル差の大きさ [m/s]					

¹⁰ 詳細は数値予報課報告・別冊第 64 号第 4.7 節を参照のこと。

A.2.7 湿度ガイダンス

最小湿度ガイダンス11										
作成対象	気象官署(特別地域気象観測所含む)									
作成方法	ニューラルネットワーク									
作成対象とするモデル	GSM, MSM									
予報対象時間単位	24 時間 (15~15UTC)									
	使用する数値予報モデルと予報対象日は以下のとおり。「翌日」等は、日本時間で初期時刻									
	から見た日付を示す。									
	モデル	初期時刻	当日	翌日	2日後	3日後				
		00UTC		0	0					
	$ _{\text{GSM}}$	06UTC		0	0	0				
	GSM	12UTC		0	0	0				
		18UTC		0	0					
 初期時刻と予報対象日		00UTC		0						
		03UTC		0						
		06UTC		0						
	MOM	09UTC		0						
	MSM	12UTC		0	0					
		15UTC	0							
		18UTC								
		21UTC		0						
		1					,			
逐次学習の有無	あり									
	予報対象日における、									
	03, 12, 21JST の地上気温、03, 12, 21JST の 850 hPa 風速、									
	03, 12, 21JST の 3 層 (1000, 925, 800 hPa) 平均相対湿度、									
説明変数	03, 12, 21JST の 1000–700 hPa 間気温減率、地上最高気温、									
	地上と 925 hPa の日最高気温出現時の比湿、地上最小比湿、地上最小湿度、									
	各層(地上、1000, 925, 850, 700, 500 hPa)の日平均相対湿度									
目的変数	観測された日最小湿度(1 分値から算出)									
層別化処理の対象	作成対象地点、夏期(4~9月)、冬期(10~3月)。									

¹¹ 詳細は数値予報課報告・別冊第 64 号第 4.8 節を参照のこと。

時系列湿度ガイダンス ¹¹										
作成対象	気象官署 (特別地域気象観測所含む)									
統計手法	カルマンフィルタ									
予報対象とするモデル	GSM, MS	SM								
予報対象時間	毎正時									
予報期間と間隔	GSM: FT=3 から FT=84 まで 1 時間間隔									
	MSM: FT=1 から FT=39(00, 12UTC 初期値は 51)まで 1 時間間隔									
逐次学習の有無	あり									
	モデル予測値(地上相対湿度、地上の東・西・南・北風成分、地上風速、中・下層雲量、前									
	1 時間降水量、海面更正気圧)									
説明変数	ただし、各風成分と地上風速は作成対象地点に最も近い格子点のモデル予測値を使用し、									
	それ以外	は GSM で	は周囲	の 4 格	子から絹	泉形内挿	、MSM ではモデルの海陸分布を考慮し			
	た内挿値	を用いる。								
目的変数	1	直 – モデル								
層別化処理の対象	作成対象地点、初期時刻、予報時間									
	予測した毎正時の湿度から、日平均湿度と実効湿度を予測している。									
	日平均湿度と実効湿度の初期時刻に対する予報対象日は以下のとおり。									
	「翌日」等は、日本時間で初期時刻から見た日付を示す。									
	モデル	初期時刻	当日	翌日	2日後	3日後				
		00UTC		0	0					
	GSM	06UTC		0	0	0				
	GSW	12UTC		0	0	0				
備考		18UTC		0	0					
yin 3		00UTC		0						
		03UTC		0						
	MSM	06UTC		0						
		09UTC		0						
		12UTC		0	0					
		15UTC	0							
		18UTC								
		21UTC								

A.2.8 視程ガイダンス

視程ガイダンス ¹²								
作成対象	空港							
作成方法	カルマンフィルタの予測に頻度バイアス補正を行う。							
作成対象とするモデル	MSM							
予報対象時間単位	1時間(視程)、3時間(視程確率)							
予報期間と間隔	視程:FT=2 から FT=39(00, 12UTC 初期値は 51)まで 1 時間間隔							
	視程確率:FT=6 から FT=39(00, 12UTC 初期値は 51)まで 3 時間間隔							
逐次学習の有無	あり							
説明変数	モデル予測値(地上相対湿度、雲水量、地上気温、地上風速、降水量)							
	視程:前1時間の最小視程と平均視程。							
予測対象	視程確率:前 3 時間最小視程が 5 km, 1.6 km 未満 (1) か否か (0)							
	観測は METAR, SPECI, SCAN をから利用し、METAR AUTO は利用しない。							
層別化処理の対象	作成対象地点(空港)、天気(無降水、雨、雪)、予報対象時刻(3時間毎1日分、無降水							
周	のみ)							
	頻度バイアス補正の閾値には以下を使用する。							
備考	視程:0.8, 1.6, 3.2, 5.0, 10.0 km							
	視程確率:0.0, 0.2, 0.35, 0.5, 0.65, 1.00							

視程ガイダンス (格子形式、MSM) ¹²								
作成対象	5 km 格子(等緯度経度格子)							
	消散係数による診断法							
	視程 VIS = $3/(\sigma_p + \sigma_c + \sigma_r + \sigma_s)$ [km]							
 作成方法	$\sigma_p = 0.12 (1 - \text{RH})^{-0.5}$: 浮遊塵の消散係数							
IF/9/JIA	$\sigma_c = 12.0 \times \mathrm{QC}^{0.9}$:雲の消散係数							
	$\sigma_r = 0.45 \times \text{RAIN}^{0.55}$:雨の消散係数							
	$\sigma_s = 7.5 \times \text{SNOW}^{0.7} + 0.07 \times \text{FF}$:雪の消散係数							
作成対象とするモデル	MSM							
予報対象時間単位	3時間							
予報期間と間隔	FT=3 から FT=39(00, 12UTC 初期値は 51)まで 3 時間間隔							
逐次学習の有無	なし							
	モデル予測値							
	$\mathrm{QC}:$ モデル面第 $2{\sim}9$ 層の雲水量の和 $[\mathrm{g~kg^{-1}}]$							
説明変数	RAIN :モデル内の前 1 時間降水量(雨)の予測 [mm/h]							
100.91 × 300	SNOW :モデル内の前 1 時間降水量(雪、霰、雲氷)の予測 [mm/h]							
	RH :モデル面第1層の湿度 [%]。85%を上限。							
	FF :モデル面第 1 層の風速 [m/s]							
目的変数	各格子の前 3 時間の最小視程							
層別化処理の対象	なし							
	・MSM(ランベルト)とガイダンス(等緯度経度)の座標系の違いにより、南北端で一部							
備考	欠損値が入る。							
C. niv	・視程 VIS の他に雲の消散係数 σ_c から計算した視程、雨の消散係数 σ_r から計算した視							
	程、雪の消散係数 σ_s から計算した視程も作成している。							

¹² 詳細は数値予報課報告・別冊第 64 号第 4.9 節を参照のこと。

視程ガイダンス (格子形式、 GSM) 12								
作成対象	20 km 格子(等緯度経度格子)、赤道 -65°N, 100°-180°E							
	消散係数による診断法							
	視程 VIS = $3/(\sigma_p + \sigma_c)$ [km]							
	$\sigma_p = 0.162 (1 - \text{RH})^{-0.5}$: 浮遊塵の消散係数							
作成方法	$\sigma_c = 22.7 \times \text{CWC}_3^{0.96}$:雲の消散係数(オホーツク海: $45^\circ - 60^\circ \text{N}$ 、 $140^\circ - 155^\circ \text{E}$)							
	$\sigma_c = 29.3 imes \mathrm{CWC}_2^{0.96}$:雲の消散係数(オホーツク海以外)							
	$\sigma_r = 0.403 \times \mathrm{RAIN}^{0.5}$:雨の消散係数							
	$\sigma_s = 2.14 \times \text{RAIN}^{0.7} + 0.167 \times \text{FF}$:雪の消散係数							
作成対象とするモデル	GSM							
予報対象時間単位	3 時間							
予報期間と間隔	FT=3 から FT=84 まで 3 時間間隔							
逐次学習の有無	なし							
	モデル予測値							
	CWC ₃ :地表気圧より上層の P 面 3 層の雲水量の和 [g kg ⁻¹]							
説明変数	CWC ₂ :地表気圧より上層の P 面 2 層の雲水量の和 [g kg ⁻¹]							
100.91XX	RH :地上面の湿度 [%]。85%を上限。							
	RAIN :降水量(3 時間内の 1 時間降水量の最大)[mm/h]							
	FF :地上面の風速 [m/s]							
目的変数	各格子の前3時間の最小視程							
層別化処理の対象	なし							
	・降水の雨雪判別は天気ガイダンス(降水種別)に準じている。							
備考	・視程 VIS の他に雲の消散係数 σ_c から計算した視程、雨の消散係数 σ_r から計算した視							
	程、雪の消散係数 σ_s から計算した視程も作成している。							

A.2.9 雲ガイダンス

雲ガイダンス ¹³	
作成対象	空港
作成方法	ニューラルネットワーク(3層:中間、出力ともにロジスティック関数4を使用)による予
TFIXATA	測に頻度バイアス補正を行う。
作成対象とするモデル	MSM
予報対象時間単位	1時間
予報期間と間隔	FT=2 から FT=39(00, 12UTC 初期値は 51)まで 1 時間間隔
逐次学習の有無	あり and
説明変数	モデル予測値(モデル面湿度、降水量、925 hPa(松本空港は 850 hPa)と地上の平均気温
1001交级	減率)
目的変数	METAR, SPECI から算出した上空 38 層の雲量。METAR がない時間帯は METAR AUTO
口时交级	を利用。
	作成対象地点(空港)、予報対象時刻(1時間毎1日分)、季節(暖候期(4~10月)、寒候
層別化処理の対象	期(11~3月))
	寒・暖候期の係数切替前に 30 日間の事前学習を行う。
	・ニューラルネットで空港上空の 38 層の雲量を求め、それを下から検索することによって
備考	3層の雲層を抽出している。
	・頻度バイアス補正の閾値は 0/8, 1/8, 3/8, 5/8, 8/8 雲量を使用。

雲底確率ガイダンス ¹³	
作成対象	空港
作成方法	ロジスティック回帰
作成対象とするモデル	MSM
予報対象時間単位	3時間
予報期間と間隔	FT=6 から FT=39(00, 12UTC 初期値は 51)まで 3 時間間隔
逐次学習の有無	なし
説明変数	下表に示す雲底確率ガイダンスの説明変数から6つ選択する。
目的変数	METAR, SPECI から算出した前 3 時間の最低シーリングが 1000 ft および 600 ft 未満 (1)
口印及奴	か否か (0)。METAR がない時間帯は METAR AUTO を利用。
層別化処理の対象	作成対象地点(空港)、季節(暖候期(4~10月)、寒候期(11~3月))、予報時間(6時間
川田川山で子の川家	区切り)、予報対象時刻(3 時間毎 1 日分)

	雲底確率ガイダンスの説明変数
必須選択	前3時間における相対湿度の最大値
(元)(大)(元)(元)(元)(元)(元)(元)(元)(元)(元)(元)(元)(元)(元)	前 3 時間における雲量 (CVR) の最大値
二者択一	降水量の前 3 時間積算を周囲 20 km で平均した値
一有扒一	雪の降水量の前 3 時間積算を周囲 20 km で平均した値
	前 3 時間における地上と 925 hPa との間で算出した平均気温減率の平均値
3つ選択	前3時間における東西風の平均値
	前3時間における南北風の平均値
	前 3 時間における雲水量と雲氷量の和 (CWC) の最大値

¹³ 詳細は数値予報課報告・別冊第 64 号第 4.10 節を参照のこと。

A.2.10 航空悪天 GPV¹⁴

航空悪天 GPV			
作成対象とするモデル	MSM, LFM		
//c rt - 54-65	MSM: 40 km	各子(ポーラーステレオ座標)	
作成対象	LFM: 10 km 柞	各子(ポーラーステレオ座標)	
		風のX・Y方向成分、気温、相対湿度、高度、海面更正気圧、圏界面気圧、	
	地上面	積算降水量、中層雲量、下層雲量、積乱雲量(LFM は付録 A.2.8 の視程分	
作成層と要素		布予想に示した視程も含む)	
1790月 C 女术	FL 面 ¹⁵	風の X・Y・Z 方向成分、気温、相対湿度、高度、乱気流指数、鉛直シアー、	
	тьш	着氷指数(LFM は水蒸気混合比も含む)	
	積乱雲頂高度	高度、気圧	
	乱気流指数16:	ロジスティック回帰	
作成方法(モデル直接	着氷指数 ¹⁷ :診断法 積乱雲量・雲頂高度 ¹⁸ :パーセル法に基づく診断法		
出力を除く)			
	圏界面気圧:第1圏界面の定義(高層気象観測指針第2.3.1節)に基づく診断法		
予報対象時間	毎正時		
予報期間と間隔	MSM: FT=0	から FT=39(00, 12UTC 初期値は 51)まで 1 時間間隔	
	LFM: FT=0 だ	から FT=10 まで 1 時間間隔	
逐次学習の有無	なし		

北太平洋航空悪天 GPV	•		
作成対象とするモデル	GSM		
作成対象	格子間隔 0.5°	(等緯度経度座標)、20°S −65°N, 80°E −110°W	
	地上面	地上面 風の東西・南北成分、気温、相対湿度、海面更正気圧、積算降水量、全雲 量、下層雲量、中層雲量、上層雲量	
作成層と要素	FL 面 ¹⁵	風の東西・南北成分、鉛直 P 速度、気温、相対湿度、高度、乱気流指数、 鉛直シアー、着氷指数	
	積乱雲頂高度	高度	
	最大風速面	高度、気圧、風の東西・南北成分、気温	
	圏界面	高度、風の東西・南北成分、気温	
	乱気流指数 16 : ロジスティック回帰		
作成方法(モデル直接	着氷指数17:診断法		
出力を除く)	積乱雲頂高度 ¹⁸ :パーセル法に基づく診断法		
	圏界面高度:第1圏界面の定義(高層気象観測指針第2.3.1 節)に基づく診断法		
予報対象時間	3 時間毎の正時		
予報期間と間隔	FT=0 から FT	Y=42 まで 3 時間間隔	
逐次学習の有無	なし		

.

¹⁴ 統計処理を行っていないモデルの直接出力の要素も含んでいるが、航空悪天 GPV の仕様を示すために、全ての要素を示す。

¹⁵ MSM と北太平洋は FL010 から FL550 まで 2000 ft 間隔。LFM は FL010 から FL450 まで 1000 ft 間隔。FL はフライトレベルで、標準大気における気圧高度 [ft] を 100 で割った値。

¹⁶ 詳細は数値予報課報告・別冊第 64 号第 4.11 節を参照のこと。

¹⁷ 詳細は数値予報課報告・別冊第 64 号第 4.12 節を参照のこと。

¹⁸ 詳細は数値予報課報告・別冊第64号第4.13節を参照のこと。

全球航空悪天 GPV			
作成対象とするモデル	GSM		
作成対象	格子間隔 1.25°	(等緯度経度座標)	
	気圧面 ¹⁹	乱気流指数、鉛直シアー	
 作成層と要素	積乱雲頂高度	高度	
TF 外間で安米	最大風速面	高度、風の東西・南北成分、気温	
	圏界面	高度、風の東西・南北成分、気温	
作成方法(モデル直接	乱気流指数16:	ロジスティック回帰	
出力を除く)	積乱雲頂高度1	8:パーセル法に基づく診断法	
四月で除て月	圏界面高度:第1圏界面の定義(高層気象観測指針第2.3.1 節)に基づく診断法		
予報対象時間	6 時間毎の正時		
予報期間と間隔	FT=0 から FT=36 まで 6 時間間隔		
逐次学習の有無	なし		

 $[\]overline{}^{19}$ 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100 hPa

A.3 プロダクトの送信時刻1

2019 年 10 月現在のプロダクト送信終了時刻を、表 A.3.1 に示す。なお、解析や予測にかかる計算時間は日々変化するため、送信終了時刻も日々変動する。これらの変動も考慮し、プロダクト利用者には気象業務支援センターを通じてあらかじめ表 A.3.2 のように周知している。

表 A31	プロダク	トの送信終了時刻	(2019年10	月現在)
4X A.J.I	/ 4 / /	1 7/2210/03 1 10/30	14019 10	/ 1 2000 1 1 1

数値予報モデル等と初期時刻		プロダクトの送信終了時刻2
全球モデル	00, 06, 12, 18UTC	初期時刻 + 3 時間 45 分程度
主体でデル	延長プロダクト ³ 12UTC	初期時刻 + 6 時間 30 分程度
全球アンサンブル予報モデル	00UTC	初期時刻 + 5 時間 55 分程度
(週間プロダクト)	12UTC	初期時刻 + 7時間 55 分程度
全球アンサンブル予報モデル4	06, 18UTC	初期時刻 + 5 時間 40 分程度
(台風プロダクト)	(台風が存在する時のみ)	(2019年 11 月正式提供開始)
メソモデル	00, 03, 06, 09,	初期時刻 + 2 時間 15 分程度
), , c , , ,	12, 15, 18, 21UTC	为别的外 2 时间 10 万程及
メソアンサンブル予報モデル	00, 06, 12, 18UTC	初期時刻 + 3 時間 40 分程度
局地モデル	毎正時	初期時刻 + 1 時間 20 分程度
毎時大気解析	毎正時	初期時刻 + 27 分程度

表 A.3.2 プロダクト利用者にあらかじめ周知した送信時刻 (2019 年 10 月現在)

数値予報モデル等と初期時刻		周知したプロダクト送信時刻 ⁵
全球モデル	00, 06, 12, 18UTC	初期時刻 + 4 時間以内
(GPV、ガイダンス、FAX)	延長プロダクト ³ 12UTC	初期時刻 + 7 時間以内
全球アンサンブル予報モデル	00UTC	初期時刻 + 6 時間以内
(週間プロダクト GPV/FAX)	12UTC	初期時刻 + 8 時間以内
全球アンサンブル予報モデル4	06, 18UTC	初期時刻 + 6 時間以内
(台風プロダクト GPV)	(台風が存在する時のみ)	(2019 年 11 月正式提供開始)
メソモデル	00, 03, 06, 09,	初期時刻 + 2 時間 30 分以内
(GPV、ガイダンス、FAX ⁶)	12, 15, 18, 21UTC	初朔时刻 + 2 时间 50 万以内
メソアンサンブル予報モデル	00, 06, 12, 18UTC	初期時刻 + 4 時間以内
(GPV)	00, 00, 12, 180 10	初類時刻十年時間以内
局地モデル (GPV)	毎正時	初期時刻 + 1 時間 30 分以内
毎時大気解析 (GPV)	毎正時	初期時刻 + 30 分以内

(補足) 周知した送信時刻より 30 分以上の遅延が生じるか遅延が見込まれる場合には、その旨を伝える連絡報を発信する。送信時刻は以下の文書を参照。

「配信資料に関する技術情報(気象編)第514号」(令和元年6月4日)

「配信資料に関する技術情報(気象編)第 505 号」(平成 31 年 1 月 31 日、令和元年 6 月 4 日訂正)

「お知らせ(配信資料に関する技術情報(気象編)第 480 号関連)」(平成 30 年 5 月 29 日)

「配信資料に関する技術情報(気象編)第389号」(平成26年1月27日)

「配信資料に関する技術情報(気象編)第388号」(平成26年1月27日)

「お知らせ(配信資料に関する技術情報(気象編)第383号関連)」(平成26年1月23日)

「配信資料に関する技術情報(気象編)第373号」(平成25年5月15日)

「配信資料に関する技術情報(気象編)第 269 号」(平成 19 年 9 月 27 日)

「お知らせ(配信資料に関する技術情報(気象編)第 205 号関連)」(平成 18 年 2 月 6 日)

「配信資料に関する技術情報(気象編)第196号」(平成17年4月28日)

¹ 片山 桂一

² スーパーコンピュータシステムから気象情報伝送処理システム (アデス) 等への送信が終了した時刻のこと。

 $^{^3}$ 延長プロダクトの予測時間は $135\sim264$ 時間である。但し一部の延長プロダクトについては 87 時間から配信される。

⁴ アデスから気象業務支援センターのみへ配信される。

⁵ 気象業務支援センターへの配信が終了する時刻のこと。

⁶ 国内航空路 6, 12 時間予想断面図、および国内悪天 12 時間予想図を送信している。

付録B 最近の改善のまとめ*

2018 年 11 月から 2019 年 10 月までに実施した数値 予報システム、数値予報プロダクトの変更を表 B.1.1 にまとめた。以下にこれらの概略を記す。

B.1 数値予報システムの変更

2019年3月5日に全球モデル (GSM) の初期値を作成する全球解析において、米国の極軌道気象衛星 NOAA-20 搭載のマイクロ波サウンダ (ATMS) 及びハイパースペクトル赤外サウンダ (CrIS) の観測データの利用を開始した(第 3.1.3 項)。

2019年3月5日に全球アンサンブル予報システムの初期摂動の作成手法を改良した。

2019年3月26日にメソモデル (MSM) の初期値を作成するメソ解析において、静止気象衛星ひまわり8号から算出される晴天放射輝度温度 (CSR) データの利用を拡大した。また、高解像度のマイクロ波散乱計ASCAT 海上風データの利用を開始するとともに、航空機観測データ及び地上 GNSS 可降水量データの利用手法を改良した。さらに MSM の海面水温データとして、北西太平洋高解像度日別海面水温解析格子点資料の利用を開始した(第3.2.1項)。

2018年1月8日以降、全球解析において米国静止気象衛星 GOES-East 領域での晴天輝度温度の利用が中断していたが、2019年6月18日より GOES-East 領域の米国静止気象衛星 GOES-16 CSR データの利用を開始した。

2019 年 6 月 27 日にメソアンサンブル予報システム の運用を開始した(第 1 章)。

B.2 数値予報プロダクトの変更

数値予報プロダクトの変更では、2019年3月5日にメソ数値予報モデル GPV、局地数値予報モデル GPV 及び MSM ガイダンスについて、延長した予報時間での配信を開始した。局地数値予報モデル GPV の予報時間延長に合わせて LFM 降水量ガイダンスと LFM 航空悪天 GPV の予報時間も延長した。2019年6月27日にメソアンサンブル予報 GPV の提供を開始した。

また、2019年7月4日にGSM12時間・48時間・72時間最大降水量ガイダンス、MSM12時間最大降水量ガイダンスの部内運用を開始した。また、GSM及びMSM24時間最大降水量ガイダンスの改良を実施した(第5.1節)。

表 B.1.1 2018 年 11 月から 2019 年 10 月までに実施した数値予報システム、数値予報プロダクトの主な変更

変更日	概要	参考文献
2019年3月5日	メソ・局地数値予報モデル GPV 及び MSM ガイダンス	配信資料に関するお知らせ(2019年
	について、延長した予報時間での配信開始	2月20日)、配信資料に関する技術
		情報 第 500 号(2018 年 11 月 1 日、
		2019年2月20日訂正)
2019年3月5日	LFM 降水量ガイダンスと LFM 航空悪天 GPV の予報時	
	間の延長	
2019年3月5日	衛星データの新規利用開始による全球モデルの予測精度	配信資料に関するお知らせ(2019年
	向上	2月26日)、第3.1.3項
2019年3月5日	全球アンサンブル予報システムの予測精度向上	配信資料に関するお知らせ (2019 年
		3月4日)
2019年3月26日	メソ解析における観測データ利用の改良	配信資料に関するお知らせ(2019年
		3月22日)、第3.2.1項
2019年6月18日	米国静止気象衛星 GOES-16 CSR データの利用開始	
2019年6月27日	メソアンサンブル予報システムの運用開始	配信資料に関する技術情報 第 505 号
		(2019年1月31日、2019年3月28
		日訂正、2019年6月4日訂正)、配
		信資料に関するお知らせ(2019年 6
		月4日)、第1章
2019年7月4日	12 時間・48 時間・72 時間最大降水量ガイダンスの部内	第 5.1 節
	運用開始、24 時間最大降水量ガイダンスの改良	

^{*} 計盛 正博、石川 宜広

付録 C プロダクトの物理量の仕様及び算出手法*

2019 年 10 月時点における、気象業務支援センターを通じて提供する数値予報資料として、全球数値予報モデル GPV、週間アンサンブル予報モデル GPV、メソ数値予報モデル GPV 及び局地数値予報モデル GPV がある。ここでは、これらに含まれる物理量及びその算出手法についてまとめた。

C.1 全球数値予報モデル GPV 及び週間アンサンブル予報モデル GPV

地上	
YZZZZEE D. 1	地上気圧及び静力学平衡を仮定して算出した地上気温から、温度減率 5 K km ⁻¹ を仮定
海面更正気圧 [Pa]	して標高 0 m の気圧を算出する。
地上気圧 [Pa]	予報変数でありそのまま値を格納する。
届 [m /a]	高度 10 m の値として接地境界層の安定度を考慮して算出する。東西風と南北風の 2 成
風 [m/s]	分。草開 (2012) も参照。
気温 [K]	高度 2 m の値として接地境界層の安定度を考慮して算出する。草開 (2012) も参照。
相対湿度 [%]	高度 2 m の値として接地境界層の安定度を考慮して算出する。草開 (2012) も参照。
積算降水量 [kg·m ⁻²]	予報初期時刻から対象となる予報時間まで積算した値。
	まず、雲スキーム (中川 2012) を用いて、モデル面の各鉛直層における雲量を算出する。
上層雲量、	続いて、下層・中層・上層に含まれる鉛直層での雲量を用い、マキシマムランダムオー
中層雲量、	バーラップ (長澤 2008) を仮定して下層雲量、中層雲量、上層雲量を算出する。ここで、
下層雲量、	地上気圧を 1000 hPa とした時に、850 hPa となる鉛直層及び 500 hPa となる鉛直層を
全雲量 [%]	決定し、それぞれ下層と中層の境界及び中層と上層の境界とする。さらに、全雲量は全
	ての鉛直層の雲量からマキシマムランダムオーバーラップを仮定して算出する。
日射量 [W·m ⁻²]	放射過程で計算したモデル面各層の雲量と大気による散乱・吸収を考慮して、地表に到
	達した下向き短波放射フラックス。
気圧面	
高度 [gpm]	ジオポテンシャル高度である。ただし、重力加速度は一定値を用いる。モデル面各層か
HJ/X [Spiii]	ら鉛直内挿して算出する。気圧面が地上気圧より低い場合は温度減率 5 K km ⁻¹ で鉛直
	外挿する。
 風 [m/s]	東西風と南北風の2成分。モデル面各層から鉛直内挿して算出し、高度が標高より低い
),2N [111/ [5]	場合はモデル面最下層の値を与える。
気温 [K]	モデル面各層から鉛直内挿して算出し、高度が標高より低い場合は温度減率 5 K km ⁻¹
Num [11]	で鉛直外挿する。
上昇流 [Pa·s ⁻¹]	鉛直p速度である。モデル面各層から内挿し、高度が標高より低い場合はモデル面最下
<u></u>	層の値を与える。
	氷に対する飽和水蒸気量を考慮して算出する。−15℃以下では氷に対する飽和水蒸気量
相対湿度 [%]	を、0℃以上では水に対する飽和水蒸気量を、−15℃~0℃ では両者を線形内挿した値を
	それぞれ用いる。モデル面各層から内挿し、高度が標高より低い場合は最下層の値を与
	える。

^{*} 計盛 正博

C.2 メソ数値予報モデル GPV、メソアンサンブル予報モデル GPV 及び局地数値予報モデル GPV

地上	
海面更正気圧 [Pa]	モデル面の下から 2 層目の気圧及び仮温度から、仮温度減率 5 K km $^{-1}$ として標高 0 m の気圧を算出する。
地上気圧 [Pa]	モデル面の下から 2 層目の気圧及び仮温度から、仮温度減率 $5~{ m K~km^{-1}}$ としてモデル標高の気圧を算出する。
風 [m/s]	高度 10 m の値として接地境界層の安定度を考慮して算出する。東西風と南北風の 2 成分。 原 (2008a)、草開 (2012) も参照。
気温 [K]	高度 1.5 m の値として接地境界層の安定度を考慮して算出する。原 (2008a)、草開 (2012) も参照。
相対湿度 [%]	高度 1.5 m の値として接地境界層の安定度を考慮して算出する。原 (2008a)、草開 (2012) も参照。
時間降水量 (メソ) [kg·m ⁻²]	対象となる予報時間の 1 時間前から予報時間まで積算した値。
積算降水量 (局地) [kg·m ⁻²]	予報初期時刻から対象となる予報時間まで積算した値。
上層雲量、 中層雲量、 下層雲量、	まず、部分凝結スキーム (原 2008b) を用いて、モデル面各鉛直層で各層における雲量を算出する。続いて、上層・中層・下層に含まれる鉛直層での雲量を用い、マキシマムオーバーラップ (長澤 2008) を仮定して算出する。下層と中層の境界となる気圧を地上気圧×0.85とし、中層と上層の境界となる気圧を下層と中層の境界の気圧×0.8と 500 hPa の小さい
全雲量 [%]	方とする(地上気圧が 1000 hPa の場合、境界はそれぞれ 850 hPa と 500 hPa となる)。全 雲量は上層雲・中層雲・下層雲からマキシマムオーバーラップを仮定して算出する。
日射量 [W·m ⁻²]	放射過程で計算したモデル面各層の雲量と大気による散乱・吸収を考慮して、地表に到達 した下向き短波放射フラックス。
気圧面	
高度 [gpm]	ジオポテンシャル高度である。ただし、重力加速度は一定値を用いる。モデル面各層から 鉛直内挿して算出する。気圧面が地上気圧より低い場合は温度減率 5 K km ⁻¹ で鉛直外挿 する。
風 [m/s]	東西風と南北風の2成分。モデル面各層から鉛直内挿して算出し、高度が標高より低い場合はモデル面最下層の値を与える。
気温 [K]	モデル面各層から鉛直内挿して算出し、高度が標高より低い場合は温度減率 5 K km ⁻¹ で 鉛直外挿する。
上昇流 [Pa·s ⁻¹]	鉛直 p 速度であり数値予報モデルの予報変数である風の鉛直成分及び密度を用いて算出する (藤田 2004)。モデル面各層で算出した鉛直 p 速度を内挿し、高度が標高より低い場合はモデル面最下層の値を与える。なお、初期値において風の鉛直成分をゼロとして計算を行っているため、初期値における上昇流はゼロとしている。
相対湿度 [%]	氷に対する飽和水蒸気量を考慮して算出する。−15°C以下では氷に対する飽和水蒸気量を、0°C以上では水に対する飽和水蒸気量を、−15°C~0°Cでは両者を線形内挿した値をそれぞれ用いる。モデル面各層から内挿し、高度が標高より低い場合は最下層の値を与える。

参考文献

草開浩, 2012: 地表面過程. 数値予報課報告・別冊第 58 号, 気象庁予報部, 29-41.

中川雅之, 2012: 雲過程. 数値予報課報告・別冊第 58 号, 気象庁予報部, 70-75.

長澤亮二, 2008: 放射過程. 数値予報課報告・別冊第 54 号, 気象庁予報部, 149-165.

原旅人, 2008a: 地上物理量診断. 数值予報課報告·別冊第54号, 気象庁予報部, 181-184.

原旅人, 2008b: 部分凝結スキーム. 数値予報課報告・別冊第 54 号, 気象庁予報部, 133-137.

藤田司, 2004: メソ数値予報狭域 GPV. 平成 16 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 43.

付録 D 数値予報研修テキストで用いた表記と統計的検証に用いる代表的な指標*

数値予報研修テキストで使用した表記と統計的検証 に用いる代表的な指標などについて以下に説明する。

D.1 数値予報研修テキストで用いた表記

D.1.1 時刻の表記について

本テキストでは、時刻を表記する際に、通常国内で用いられている日本標準時 (JST: Japan Standard Time) のほかに、協定世界時 (UTC: Coordinated Universal Time) を用いている。数値予報では国際的な観測データの交換やプロダクトの利用などの利便を考慮して、時刻は UTC で表記されることが多い。JST は UTC に対して 9 時間進んでいる。また、単に「時」を用いる場合は、日本標準時を意味する。

D.1.2 分解能の表記について

本テキストでは、全球モデルの分解能について、xx を 水平方向の切断波数、yy を鉛直層数として、"TxxLyy"¹ と表記することがある。また、セミラグランジアンモデルで線形格子 (北川 2005) を用いる場合は "TLxxLyy"² と表記する。北緯 30 度において、TL959 は約 20 km 格子、TL479 は約 40 km 格子、TL319 は約 55 km 格子、TL159 は約 110 km 格子に相当する。

D.1.3 予測時間の表記について

数値予報では、統計的な検証や事例検証の結果を示す際に、予報対象時刻のほかに、初期時刻からの経過時間を予報時間 (FT: Forecast Time³) として表記している。

本テキストでは、予報時間を

「予報時間」=「予報対象時刻」-「初期時刻」で定義し、例えば、6時間予報の場合、FT=6と表記しており、時間の単位 [h] を省略している。

D.1.4 アンサンブル予報の表記について

アンサンブル予報では、複数の予測の集合(アンサンブル)を統計的に処理し、確率予測などの資料を作成する。本テキストでは、予測の集合の平均を「アンサンブル平均」、個々の予測を「メンバー」と呼ぶ。また、摂動を加えているメンバーを「摂動ラン」、摂動を加えていないメンバーを「コントロールラン」と呼ぶ。全メンバーの数に対する、予測がある閾値を超える(または下回る)メンバーの数の割合を超過確率と呼ぶ。

¹ T は三角形 (Triangular) 波数切断、L は層 (Level) を意味する。

D.1.5 緯度、経度の表記について

本テキストでは、緯度、経度について、アルファベットを用いて例えば「北緯 40 度、東経 130 度」を「40°N, 130°E」、「南緯 40 度、西経 130 度」を「40°S, 130°W」などと略記する。

D.2 統計的検証に用いる代表的な指標

D.2.1 平均誤差、二乗平均平方根誤差、誤差の標準 偏差、改善率

予測誤差を表す基本的な指標として、平均誤差(ME: Mean Error、バイアスと表記する場合もある)と二乗平均平方根誤差 (RMSE: Root Mean Square Error) がある。これらは次式で定義される。

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (x_i - a_i)$$
 (D.2.1)

RMSE
$$\equiv \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (x_i - a_i)^2}$$
 (D.2.2)

ここで、N は標本数、 x_i は予測値、 a_i は実況値である。 ME は予測値の実況値からの偏りの平均であり、0 に近いほど実況からのずれが小さいことを示す。 RMSE は最小値の 0 に近いほど予測が実況に近いことを示す。

RMSE は ME の寄与とそれ以外を分離して、

$$RMSE^2 = ME^2 + \sigma_e^2$$
 (D.2.3)

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - a_i - ME)^2$$
 (D.2.4)

と表すことができる。 σ_e は誤差の標準偏差である。 本テキストでは、予測に改良を加えた際の評価指標 として、RMSE の改善率 (%) を用いる場合がある。 RMSE の改善率は次式で定義される。

RMSE 改善率
$$\equiv \frac{\text{RMSE}_{\text{cntl}} - \text{RMSE}_{\text{test}}}{\text{RMSE}_{\text{cntl}}} \times 100 \text{ (D.2.5)}$$

(RMSE 改善率 ≤ 100)

ここで、RMSE_{cntl} は基準となる予測の、RMSE_{test} は 改良を加えた予測の RMSE である。

D.2.2 スプレッド

スプレッドは、アンサンブル予報のメンバーの広がりを示す指標であり、次式で定義される。

スプレッド
$$\equiv \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} \left(\frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M} (x_{mn} - \overline{x_n})^2 \right)}$$
 (D.2.6)

^{*} 大脇 良夫

² TL の L は線形 (Linear) 格子を意味する。

³ 英語圏では Forecast Range などと記述されることも多い。

ここで、M はアンサンブル予報のメンバー数、N は標本数、 x_{mn} は m 番目のメンバーの予測値、 $\overline{x_n}$ は

$$\overline{x_n} \equiv \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M} x_{mn} \tag{D.2.7}$$

で定義されるアンサンブル平均である。

D.2.3 アノマリー相関係数

アノマリー相関係数 (ACC: Anomaly Correlation Coefficient) とは、予測値の基準値からの偏差(アノマリー)と実況値の基準値からの偏差との相関係数であり、次式で定義される。

$$ACC \equiv \frac{\sum_{i=1}^{N} (X_i - \overline{X}) (A_i - \overline{A})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} (X_i - \overline{X})^2 \sum_{i=1}^{N} (A_i - \overline{A})^2}}$$
$$(-1 \le ACC \le 1) \quad (D.2.8)$$

ただし、

$$X_i = x_i - c_i, \quad \overline{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} X_i$$
 (D.2.9)

$$A_i = a_i - c_i, \qquad \overline{A} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} A_i$$
 (D.2.10)

である。ここで、N は標本数、 x_i は予測値、 a_i は実況値、 c_i は基準値である。基準値としては気候値を用いる場合が多い。アノマリー相関係数は予測と実況の基準値からの偏差の相関を示し、基準値からの偏差の増減のパターンが完全に一致している場合には最大値の1 をとり、相関が全くない場合には0 をとり、逆に完全にパターンが反転している場合には最小値の-1 をとる。なお、アノマリー相関係数や ME, RMSE の解説は、梅津ほか (2013) に詳しい。

D.3 カテゴリー検証で用いる指標

カテゴリー検証では、まず、対象となる現象の有無を予測と実況それぞれについて判定し、その結果により標本を分類する。そして、それぞれのカテゴリーに分類された事例数を基に、予測の特性を検証するという手順を踏む。

D.3.1 分割表

分割表は、カテゴリー検証においてそれぞれのカテゴリーに分類された事例数を示す表(表 D.3.1)である。付録 D.3.2 から D.3.12 に示す各スコアは、表 D.3.1 に示される各区分の事例数を用いて定義される。また、以下では全事例数を $N={\rm FO}+{\rm FX}+{\rm XO}+{\rm XX}$ 、実況「現象あり」の事例数を $M={\rm FO}+{\rm XO}$ 、実況「現象なし」の事例数を $X={\rm FX}+{\rm XX}$ と表す。

表 D.3.1 カテゴリー検証で用いる分割表。FO, FX, XO, XX はそれぞれの事例数を示す。

		実況		計			
		あり	なし	н			
予測	あり	適中 (FO)	空振り (FX)	FO+FX			
	なし	見逃し (XO)	適中 (XX)	XO+XX			
計		M	X	N			

D.3.2 適中率

適中率は、予測が適中した割合であり、次式で定義される。

適中率
$$\equiv \frac{\text{FO} + \text{XX}}{N} \quad (0 \leq$$
 適中率 $\leq 1) \quad (\text{D.3.1})$

最大値の1に近いほど予測の精度が高いことを示す。

D.3.3 空振り率

空振り率は、予測「現象あり」の事例数に対する空振り(予測「現象あり」かつ実況「現象なし」)の割合であり、次式で定義される。

空振り率
$$\equiv \frac{FX}{FO + FX}$$
 $(0 \le 空振り率 \le 1)$ (D.3.2)

最小値の0に近いほど空振り率が小さいことを示す。 本テキストでは分母をFO+FXとしているが、代わり にNとして定義する場合もある。

D.3.4 見逃し率

見逃し率は、実況「現象あり」の事例数に対する見逃し(実況「現象あり」かつ予測「現象なし」)の割合であり、次式で定義される。

見逃し率
$$\equiv \frac{\mathrm{XO}}{M} \quad (0 \le 見逃し率 \le 1) \qquad (\mathrm{D.3.3})$$

最小値の0に近いほど見逃し率が小さいことを示す。 本テキストでは分母をMとしているが、代わりにNとして定義する場合もある。

D.3.5 捕捉率

捕捉率 (H_r : Hit Rate、POD(Probability Of Detection) とも呼ばれる) は、実況「現象あり」のときに予測が適中した割合であり、次式で定義される。

$$H_r \equiv \frac{\text{FO}}{M} \quad (0 \le H_r \le 1) \tag{D.3.4}$$

最大値の1に近いほど見逃し率が小さいことを示す。 捕捉率は、ROC曲線(付録 D.4.5)のプロットに用い られる。

D.3.6 体積率

体積率 (V_r : Volume Ratio) は、全事例のうち予測の「現象あり」の事例の割合を示す。

$$V_r \equiv \frac{\text{FO} + \text{FX}}{N} \tag{D.3.5}$$

複数の予測の捕捉率が等しい場合、体積率が小さい予 測ほど空振り率が小さい良い予測と言える。

D.3.7 誤検出率

誤検出率 (F_r : False Alarm Rate) は、実況「現象なし」のときに予測が外れた割合である。空振り率 (D.3.2) 式とは分母が異なり、次式で定義される。

$$F_r \equiv \frac{\text{FX}}{X} \quad (0 \le F_r \le 1) \tag{D.3.6}$$

最小値の0に近いほど、空振り率が小さく予測の精度が高いことを示す。誤検出率は捕捉率(付録 D.3.5)とともにROC曲線(付録 D.4.5)のプロットに用いられる。

D.3.8 バイアススコア

バイアススコア (BI: Bias Score) は、実況「現象あり」の事例数に対する予測「現象あり」の事例数の比であり、次式で定義される。

$$BI \equiv \frac{FO + FX}{M} \quad (0 \le BI) \tag{D.3.7}$$

予測と実況で「現象あり」の事例数が一致する場合に1となる。1より大きいほど予測の「現象あり」の頻度が過大、1より小さいほど予測の「現象あり」の頻度が過小であることを示す。

D.3.9 気候学的出現率

現象の気候学的出現率 P_c は、標本から見積もられる「現象あり」の平均的な出現確率であり、次式で定義される。

$$P_c \equiv \frac{M}{N} \quad (0 \le P_c \le 1) \tag{D.3.8}$$

この量は実況のみから決まり、予測の精度にはよらない。予測の精度を評価する際の基準値の設定にしば しば用いられる。

D.3.10 スレットスコア

スレットスコア (TS: Threat Score) は、予測または 実況で「現象あり」の場合の予測適中事例数に着目し て予測精度を評価する指標であり、次式で定義される。

$$TS \equiv \frac{FO}{FO + FX + XO} \quad (0 \le TS \le 1) \qquad (D.3.9)$$

出現頻度の低い現象 $(N\gg M$ 、したがって、 $XX\gg FO$, FX, XO となって、予測「現象なし」による寄与だけで適中率が1に近い現象)について XX の影響を除いて検証するのに有効である。本スコアは最大値の1に近いほど予測の精度が高いことを示す。なお、スレットスコアは現象の気候学的出現率の影響を受けやすく、異なる標本や出現率の異なる現象に対する予測の精度を比較するのには適さない。この問題を緩和するため、次項のエクイタブルスレットスコアなどが考案されている。

D.3.11 エクイタブルスレットスコア

エクイタブルスレットスコア (ETS: Equitable Threat Score) は、前項のスレットスコアが現象の気候学的出現率の影響を受けやすいため、気候学的な確率で「現象あり」が適中した頻度を除いて求めたスレットスコアであり、次式で定義される (Schaefer 1990)。

$$ETS \equiv \frac{FO - S_f}{FO + FX + XO - S_f} \quad \left(-\frac{1}{3} \le ETS \le 1\right)$$
(D.3.10)

ただし、

$$S_f = P_c(\text{FO} + \text{FX}) \tag{D.3.11}$$

である。ここで、 S_f は「現象あり」をランダムに FO+FX 回予測した場合(ランダム予測)の「現象あり」の適中事例数である。本スコアは、最大値の 1 に近いほど予測の精度が高いことを示す。また、ランダム予測で 0 となり、FO=XX=0,FX=XO=N/2 の場合に最小値 -1/3 をとる。

D.3.12 スキルスコア

スキルスコア (Skill Score) は気候学的確率などによる予測の難易を取り除いて、予測の技術力を評価する指数であり、一般に次式のように定義される。

スキルスコア
$$\equiv \frac{S_{\text{fcst}} - S_{\text{ref}}}{S_{\text{pfct}} - S_{\text{ref}}}$$
 (D.3.12)

ここで、 S_{fest} , S_{pfet} , S_{ref} は、評価対象の予測・完全予測・比較の基準となる予測(気候学的確率など)の各スコア(適中率)である。本スコアは、最大値の1 に近いほど予測の精度が高いことを示し、比較の基準となる予測よりも精度が劣る場合、負の値となる。

代表的なスキルスコアは Heidke のスキルスコア (HSS: Heidke Skill Score) で、気候学的な確率で「現象あり」および「現象なし」が適中した頻度を除いて求める適中率であり、次式で定義される。

$${\rm HSS} \equiv \frac{{\rm FO} + {\rm XX} - S}{N-S} \quad (-1 \leq {\rm HSS} \leq 1) \ ({\rm D.3.13})$$

ただし、

$$S = P_c(\text{FO} + \text{FX}) + P_x(\text{XO} + \text{XX}),$$

$$P_x = \frac{X}{N}$$
(D.3.14)

である。ここで、 P_x は「現象なし」の気候学的出現率、S は「現象あり」を FO+FX 回(すなわち、「現象なし」を残りの XO+XX 回)ランダムに予測した場合(ランダム予測)の適中事例数である。 HSS は、最大値の 1 に近づくほど精度が高く、ランダム予測で 0 となり、FO=XX=0,FX=XO=N/2 の場合に最小値 -1 をとる。前項のエクイタブルスレットスコアもスキルスコアの一つで、Gilbert Skill Score とも呼ばれている。

D.3.13 Roebber ダイアグラム

Roebber (2009) はカテゴリ検証による複数のスコア (捕捉率、空振り率、バイアススコア、スレットスコア)を一つのグラフに表す方法を考案した。検証結果を縦軸に捕捉率 (POD: Probability Of Detection)、横軸に1-空振り率 (SR: Success Ratio)をとってプロットすると、捕捉率と空振り率から BIとTSが計算できるため、等値線を目安にバイアススコアとスレットスコアも確認できるグラフとなる(図 D.3.1)。本テキストでは、これを Roebber ダイアグラムと呼ぶ。各スコアが1に近づくほど (グラフの右上へ近づくほど)、良い予測となる。このグラフでは4つのスコアを一目で確認でき、予測特性の変化を把握しやすい。特に、バイアススコアとスレットスコアの変化を捕捉率と空振り率の変化で説明することが容易となる。

例えば、図 D.3.1 の①のようにスコアが変化する場合、捕捉率、空振り率、バイアススコア、スレットスコアのいずれも改善となる。これに対し②の場合には、一見①と同様にバイアススコア、スレットスコアとも改善しているが、空振り率が増加している。空振り率が大きいにもかかわらず、バイアススコア・スレットスコアが改善している理由は、捕捉率の増加の割合が空振り率の増加に比べて大きいためである。このように①と②ではいずれもバイアススコアとスレットスコアがともに改善しているが、本グラフを用いることで予測の変化傾向の違い(捕捉率と空振り率の変化の違い)が一目で確認できる。

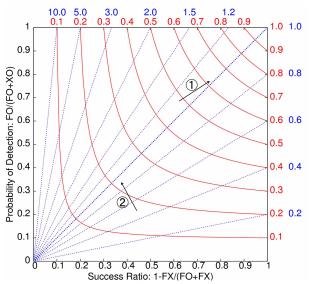


図 D.3.1 Roebber ダイアグラムの模式図。 横軸は 1-空振り 率、縦軸は捕捉率、青の破線はバイアススコアの、赤の実線はスレットスコアの各等値線。

D.3.14 FSS

FSS (Fractions Skill Score) は、現象の表現に空間的な曖昧さを与えて評価する検証スコアである (Roberts and Lean 2008 参照、幾田 2010 に詳しい)。

平面上のある変量の観測の分布を O_r 、予報の分布を F_r とする。変量は任意の閾値 q で 2 値化でき、2 値化した観測を I_O 、予報を I_F とすると、次式のように表せる。

$$I_O = \begin{cases} 1 & O_r \ge q \\ 0 & O_r < q \end{cases}$$
 (D.3.15)

$$I_F = \begin{cases} 1 & F_r \ge q \\ 0 & F_r < q \end{cases}$$
 (D.3.16)

この2値化した変量を用いた検証は空間的な位置ずれ を許容せず、検証格子のスケールでの適合を厳密に検 証することを意味する。

次に、この I_O と I_F に空間スケールを考慮し、分布の適合の判定に曖昧さを追加するため、分数化を行う。 具体的には、検証対象格子を中心とする 1 辺 n 格子の正方形領域を考え、この正方形領域に含まれる 2 値化した格子情報を次式に従って領域平均する。

$$O(n)_{i,j} = \frac{1}{n^2} \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n I_O[i+k-1-\frac{n-1}{2}],$$

$$j+l-1-\frac{n-1}{2}] \cdot K(n)_{k,l}$$

$$F(n)_{i,j} = \frac{1}{n^2} \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n I_F[i+k-1-\frac{n-1}{2}],$$

$$j+l-1-\frac{n-1}{2}] \cdot K(n)_{k,l}$$
(D.3.17)

ここでO(n) と F(n) は分数化した観測と予報、添字のi,j は格子番号である。また、K(n) はカーネル関数で一般的にはガウシアンカーネルなどが考えられるが、ここでは格子内平均を取り扱うためカーネル関数は一様とする。

分数化した変量 O(n) と F(n) によって二乗平均誤差 (MSE) が次式によって計算される。

$$MSE_{(n)} = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{i=1}^{N_y} [O(n)_{i,j} - F(n)_{i,j}]^2$$
(D.3.18)

ここで、 N_x と N_y は検証領域の x 方向の格子数と y 方向の格子数である。ここでは、簡単のため検証領域は矩形領域であると仮定している。

FSS は分数化された観測 O(n) と予報 F(n) によって記述される MSE のスキルスコアであるため、予報スキルを評価するための相対的な基準となる参照値が必要である。FSS の参照値は、O(n) と F(n) を用いて次

式のように定義される。

$$MSE_{(n)ref} = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} [O^2(n)_{i,j} + F^2(n)_{i,j}]$$
(D.3.19)

この参照値 $MSE_{(n)ref}$ は、任意の MSE の取りうる最大の値であり、予報と観測の総数が検証領域の格子数を超えない場合において、予報と観測の適合が無い場合の MSE に相当する。

FSS は、分数化した観測と予報によって記述される $\mathrm{MSE}_{(n)}$ 、その参照値である $\mathrm{MSE}_{(n)\mathrm{ref}}$ 、そして完全予報の $\mathrm{MSE}_{(n)\mathrm{perfect}}(=0)$ を用いて次式で定義される。

$$FSS_{(n)} = \frac{MSE_{(n)} - MSE_{(n)ref}}{MSE_{(n)perfect} - MSE_{(n)ref}} = 1 - \frac{MSE_{(n)}}{MSE_{(n)ref}}$$
(D.3.20)

この式から分かるように FSS は 0 から 1 の値をとり、 1 で完全予報、0 で観測と予報の適合がまったく無い場合となる。

D.4 確率予測に関する指標など

D.4.1 ブライアスコア

ブライアスコア (BS: Brier Score) は、確率予測の統計検証の基本的指標である。ある現象の出現確率を対象とする予測について、次式で定義される。

BS
$$\equiv \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (p_i - a_i)^2 \quad (0 \le BS \le 1) \quad (D.4.1)$$

ここで、 p_i は確率予測値(0 から 1)、 a_i は実況値(現象ありで 1、なしで 0)、N は標本数である。BS は完全に適中する決定論的な(p_i =0 または 1 の)予測(完全予測と呼ばれる)で最小値の 0 をとり、0 に近いほど予測の精度が高いことを示す。また、現象の気候学的出現率 $P_c(D.3.8)$ 式を常に確率予測値とする予測(気候値予測と呼ばれる)のブライアスコア BS_c は

$$BS_c \equiv P_c(1 - P_c) \tag{D.4.2}$$

となる。ブライアスコアは、現象の気候学的出現率の影響を受けるため、異なる標本や出現率の異なる現象に対する予測の精度を比較するのには適さない。例えば上の BS_c は P_c 依存性を持ち、同じ予測手法(ここでは気候値予測)に対しても P_c の値に応じて異なる値をとる (Stanski et al. 1989)。この問題を緩和するため、次項のブライアスキルスコアが考案されている。

D.4.2 ブライアスキルスコア

ブライアスキルスコア (BSS: Brier Skill Score) は、ブライアスコアに基づくスキルスコアであり、通常気候値予測を基準とした予測の改善の度合いを示す。本スコアは、ブライアスコア BS、気候値予測によるブライアスコア BS。を用いて

$$BSS \equiv \frac{BS_c - BS}{BS_c} \quad (BSS \le 1)$$
 (D.4.3)

で定義され、完全予測で1、気候値予測で0、気候値予 測より誤差が大きいと負となる。

D.4.3 Murphy の分解

Murphy (1973) は、ブライアスコアと予測の特性との関連を理解しやすくするため、ブライアスコアを信頼度 (Reliability)、分離度 (Resolution)、不確実性 (Uncertainty) の3つの項に分解した。これを Murphy の分解と呼ぶ(高野 2002 などに詳しい)。

確率予測において、確率予測値を L 個の区間に分け、標本を確率予測値の属する区間に応じて分類することを考える。確率予測値が l 番目の区間に属する標本数を N_l ($N=\sum_{l=1}^L N_l$)、このうち実況が「現象あり」であった事例数を M_l ($M=\sum_{l=1}^L M_l$)、確率予測値の l 番目の区間の区間代表値を p_l とすると、Murphy の分解によりブライアスコアは以下のように表される。

$$BS = fequence = fequ$$

信頼度 =
$$\sum_{l=1}^{L} \left(p_l - \frac{M_l}{N_l} \right)^2 \frac{N_l}{N}$$
 (D.4.5)

分離度 =
$$\sum_{l=1}^{L} \left(\frac{M}{N} - \frac{M_l}{N_l} \right)^2 \frac{N_l}{N}$$
 (D.4.6)

不確実性 =
$$\frac{M}{N} \left(1 - \frac{M}{N} \right)$$
 (D.4.7)

信頼度は、確率予測値 (p_l) と実況での現象の出現相対頻度 (M_l/N_l) が一致すれば最小値の 0 となる。分離度は、確率予測値に対応する実況での現象の出現相対頻度 (M_l/N_l) が気候学的出現率 $(P_c=M/N)$ から離れているほど大きい値をとる。不確実性は、現象の気候学的出現率のみによって決まり、予測の手法にはよらない。例えば、 $P_c=0.5$ の場合に不確実性は最大値の 0.25 をとる。また、不確実性= BS_c が成り立つ。これらを用いて、ブライアスキルスコアを次のように書くことができる。

$$BSS = \frac{ \text{$ \beta$ in E} - \text{E} \text{f} \text{f} \text{f}}{\text{$$7$} \text{$f$} \text{$f$} \text{$f$} \text{$f$}}$$
 (D.4.8)

D.4.4 確率値別出現率図

確率値別出現率図(Reliability Diagram, Attributes Diagram とも呼ばれる)は、予測された現象出現確率 $P_{\rm fcst}$ を横軸に、実況で現象が出現した相対頻度 $P_{\rm obs}$ を縦軸にとり、確率予測の特性を示した図である(図 D.4.1 参照、Wilks 2011 などに詳しい)。一般に、確率 予測の特性は確率値別出現率図上で曲線として表される。この曲線を信頼度曲線(Reliability curve)と呼ぶ。

信頼度曲線の特性は、Murphyの分解(付録 D.4.3)の信頼度、分離度と関連付けることができる。横軸 $P_{\rm fcst}$ の各値について、信頼度(あるいは分離度)への寄与は、信頼度曲線上の点から対角線 $P_{\rm obs}=P_{\rm fcst}$ (理想直線)上の点(あるいは直線 $P_{\rm fcst}=P_c$ 上の点)までの距離の二乗として表現される。 $P_{\rm fcst}$ の各値でのこれらの寄与を、標本数に比例する重みで平均して信頼度(あるいは分離度)が得られる。例えば、no-skill line(直線 $P_{\rm obs}=(P_{\rm fcst}+P_c)/2$)上の点では、信頼度と分離度への寄与は等しい大きさを持ち、ブライアスキルスコアへの寄与が 0 となる。また no-skill line と直線 $P_{\rm fcst}=P_c$ との間の領域(分離度への寄与 > 信頼度への寄与、図 D.4.1 灰色の領域)内に位置する点は、ブライアスキルスコアに正の寄与を持つ。

特別な場合として、気候値予測(付録 D.4.1)では 1 点 $(P_{\text{fcst}}, P_{\text{obs}}) = (P_c, P_c)$ が信頼度曲線に対応する。 また、次の 2 つの特性を示す確率予測は精度が高い。

- 信頼度曲線が対角線に(信頼度への寄与が最小値の0に)近い。
- 信頼度曲線上の大きい標本数に対応する点が点

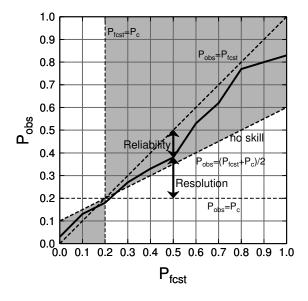


図 D.4.1 確率値別出現率図の模式図。横軸は予測現象出現確率、縦軸は実況現象出現相対頻度、実線が信頼度曲線である。対角線、直線 $P_{\rm obs}=P_c$ との差の二乗がそれぞれ信頼度 (Reliability)、分離度 (Resolution) への寄与に対応している。灰色の領域内の点はブライアスキルスコアに正の寄与を持つ。

 $(P_{\text{fcst}}, P_{\text{obs}}) = (P_c, P_c)$ (気候値予測) から離れた位置 (確率値別出現率図の左下または右上寄り) に分布する (分離度が大きい)。

D.4.5 ROC 曲線、ROC 面積、ROC 面積スキルス コア

現象の予測出現確率にある閾値を設定し、これを予 測の「現象あり」「現象なし」を判定する基準とするこ とが可能である。様々な閾値それぞれについて作成し た分割表を基に、閾値が変化したときの F_r - H_r 平面上 の軌跡をプロットしたものが ROC 曲線 (ROC curve: Relative Operating Characteristic curve、相対作用特 性曲線) である(図 D.4.2 参照、高野 2002 などに詳し い)。平面内の左上方の領域では $H_r > F_r$ であり、平面 の左上側に膨らんだ ROC 曲線特性を持つ確率予測ほど 精度が高いものと見なせる。したがって、ROC曲線から 下の領域 (図 D.4.2 灰色の領域) の面積 (ROCA: ROC Area、ROC 面積)は、情報価値の高い確率予測ほど 大きくなる。ROC 面積スキルスコア (ROCASS: ROC Area Skill Score) は、情報価値のない予測 $(H_r = F_r)$ を基準として ROC 面積を評価するものであり、次式 で定義される。

$$ROCASS \equiv 2(ROCA - 0.5) \quad (-1 \le ROCASS \le 1)$$
(D.4.9)

本スコアは、完全予測で最大値の1をとる。また、情報価値のない予測(例えば、区間[0,1]から一様ランダムに抽出した値を確率予測値とする予測など)では0となる。

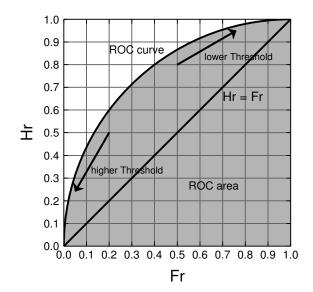


図 D.4.2 ROC 曲線の模式図。横軸は F_r 、縦軸は H_r である。灰色の領域の面積が ROC 面積である。

D.4.6 CRPS

CRPS (Continuous Ranked Probability Score) は、確率予測の統計検証の指標の1つである。連続物理量xに対する CRPS は次式で定義される。

$$CRPS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \int_{-\infty}^{\infty} \left[P_i(x) - A_i(x) \right]^2 dx$$

$$(0 \le CRPS) \qquad (D.4.10)$$

ここで、N は標本数、 P_i と A_i はそれぞれ予測と実況の累積分布関数であり、次式で定義される。

$$P_i(x) = \int_{-\infty}^x \rho_i(x') dx'$$
 (D.4.11)

$$A_i(x) = H\left(x - a_i\right) \tag{D.4.12}$$

ここで、 ρ_i は予測された確率密度関数、 a_i は実況値、H(x) は階段関数である。

$$H(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ 1 & x \ge 0 \end{cases}$$
 (D.4.13)

CRPS は完全に適中する決定論的な予測で最小値 0 をとり、0 に近いほど予測の精度が高いことを示す。単位は物理量 x と同じである。

また、物理量xが閾値t以下となる現象の確率予測に対するブライアスコアをBS(t)とおくと、

$$CRPS = \int_{-\infty}^{\infty} BS(t)dt$$
 (D.4.14)

の関係がある。

参考文献

幾田泰酵, 2010: 高分解能モデルの降水予報精度評価 に適した検証手法. 平成 22 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 11–17.

梅津浩典, 室井ちあし, 原旅人, 2013: 検証指標. 数値予報課報告・別冊第 59 号, 気象庁予報部, 6-15.

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.

高野清治, 2002: アンサンブル予報の利用技術. 気象研究ノート, **201**, 73–103.

Murphy, A. H., 1973: A new vector partition of the probability score. *J. Appl. Meteor.*, **12**, 595–600.

Roberts, N. M. and H. W. Lean, 2008: Scale-Selective Verification of Rainfall Accumulations from High-Resolution Forecasts of Convective Events. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 78–97.

Roebber, P. J., 2009: Visualizing Multiple Measures of Forecast Quality. Wea. Forecasting, 24, 601–608.

Schaefer, J. T., 1990: The critical success index as an indicator of warning skill. Wea. Forecasting, 5, 570–575.

Stanski, H. R., L. J. Wilson, and W. R. Burrows, 1989: Survey of common verification methods in meteorology. Research Rep., 89-5, Forecast Research Division, Atmospheric Environment Service, Environment Canada, 114 pp.

Wilks, D. S., 2011: Statistical Methods in the Atmospheric Sciences, International Geophysics, Vol. 100. Academic Press, 334-340 pp.

令和元年度数値予報研修テキスト 令和元年 12 月 10 日発行

編 集 気象庁予報部 数値予報課

〒 100-8122 東京都千代田区大手町 1-3-4

発 行 気象庁予報部

Copyright ⓒ 気象庁予報部 2019 Printed in Japan 著作権法で定める範囲を超えて、無断で転載または複写 することを禁止します。