

第3章 プロダクトの概要と利用上の留意点

3.1 メソ数値予報と応用プロダクト¹

今回の非静力学MSMの導入における変更点は基本的にはモデル本体のみであり、プロダクトはこれまで通りである。表3.1.1に、メソ数値予報とメソ数値予報を用いた応用プロダクトの配信資料概要を示す。本章ではメソ数値予報とその応用プロダクトの仕様、及び利用する際に注意すべき点を述べるが、はじめにメソ数値予報資料を用いる上で一般的に留意すべき点を、モデルの変更に關わるこれまでとの違いも含めて述べることにする。

この節での基本的な考え方は永田・萬納寺(1994)及び永田(1994)に沿っており、適宜これらも参照願いたい。また現在の数値予報システム全体に關わることなどは富樫(2000)を参考に読んでほしい。なお、表3.1.1のうち、高潮ガイダンスと高潮モデルは今回のモデル変更の影響はほとんど受けないので特に記述しなかった。これらについての詳細は上野(2004)を参照いただきたい。

3.1.1 全般的注意事項

予報作業においては、総観スケールの予報場をより広い領域を扱う領域モデルを元に把握し、その環境下でどのようなメソ現象が発生し、また発達するかを、メソ数値予報から考えることが基本である。その際、予測可能性(第3.1.2項)、初期値・境界値の特徴(第3.1.3項)、またモデルの予報特性(第3.1.4項)に注意しなければならない。メソ数値予報からは詳細な情報を抽出することができるが、これらの注意事項を踏まえ、適用限界も十分考慮して利用することが大切である。

3.1.2 予測可能性

永田(1994)が指摘するように、ある現象が予測可能であるためには、表現可能な解像度がモデルに備わっていること、方程式系(力学過程)が適切であること、現象に本質的な物理過程が備わっていること、初期値が擾乱の「種」を捕らえていることが条件となる。以上の四点を順に考えていこう。

メソ数値予報モデルの水平解像度は10kmであるので、数10-100km以上の大きさの現象ならば表現可能であると考えられる。今回のモデル変更では水平解像度が変わらないので、表現可能な大きさはこれまでと同じである。図3.1.1に、メソ数値予報に即した表現の性能の概念図を示す。ここでは水平規模が2-2000kmをメソスケールとし、表現可能かどうかの境目の目安として50-80kmのスケールを遷移スケールとした。また、いくつかの現象を、スケールを合わせて示した。メソ数値予報で

は高低気圧、前線系などはよく表現できるが、個々の積乱雲は表現できないし、スーパーセルストームなどの巨大雷雨を表現することも難しいことが分かる。一方、解像度の重要性は鉛直方向についても同様である。例えば、ラジオゾンデの観測では鉛直に細かな構造がしばしば見られるが、これらは数値予報モデルの鉛直解像度が十分でないために表現できないことがある。表3.1.2に代表的な高度における鉛直解像度(層の厚さ)を示す。対流圏では薄く、数10mから数100mであるが、成層圏では1000m程度である。

力学過程については、静力学近似を廃したことにより、方程式系の近似はなくなった。ただし、水平解像度が10kmの場合、静力学近似は必ずしも悪い近似ではないと考えられる。したがって、この近似を除去したことにより予測可能性が大きく向上するとは言えない。むしろ、次期NAPS以降に計画されているより高い解像度で非静力学モデル本来の性能が発揮されると期待されている。

非静力学MSMには雲微物理過程が組み込まれており、静力学MSMに比べ降水現象の取り扱いは大きく改善された。現NAPS期間は水平解像度が10kmに留まり、次期NAPSにおいても5kmであるので、いずれにしても個々の積雲を表現できるわけではない。しかし、大規模凝結などによる静力学MSMよりも水物質の3次元分布や潜熱加熱、冷却を現実的に扱うことによる精度向上があるだろう。また、積雲対流パラメタリゼーションとして、静力学MSMの荒川-シューバートスキームと湿潤対流調節に対し、中緯度のメソ現象を扱うことを想定したKF法(第1章)を用いていることも、降水予測の改善に寄与しているだろう。第2.3節の事例に見られるように、降水の予測可能性はある程度向上したと考えられる。一方、その他のいくつかの物理過程には共通するが、または同様の手法が適用されており、静力学MSM

表3.1.2 非静力学MSMと静力学MSMの代表的な高度における鉛直解像度。気圧と高度(差)の変換には国際標準大気を仮定した。

レベル	非静力学MSM	静力学MSM
成層圏 (150hPa/14000m)	約900m	約1100m (25hPa)
対流圏上部 (300hPa/9000m)	約750m	約750m (25hPa)
上層 (500hPa/5500m)	約600m	約500m (35hPa)
中層 (700hPa/3000m)	約450m	約400m (35hPa)
下層 (850hPa/1500m)	約300m	約250m (25hPa)
モデル大気最下層	40m	約40m (5hPa)

¹ 藤田 司

表3.1.1 MSMの出力を用いたアプリケーションプロダクトの配信資料

種類	要素	予報時間	時間間隔	更新間隔	格子/地点	鉛直層	備考(作成手法など)
メソ数值予報 地上GPV	psea, u, v, t, ttd, r, cld	18時間	1時間	6時間	7.5' x 6' (等緯経度約10km)	-	ランペルト座標系から等緯経度座標に内挿、海陸制御あり。
メソ数值予報 上層GPV	z, u, v, t, ttd,	18時間	3時間	6時間	15' x 12' (等緯経度約20km)	975, 950, 925, 850, 700, 500hPa	ランペルト座標系から等緯経度座標に内挿、海陸制御なし。
防災ガイダンス	域内最大1,3時間降水量 前3時間内の最大風速とその風向	18時間	3時間	6時間	2次細分区域ごと アメダス地点	-	KLMおよびNRN KLM
降水短時間予報	1時間降水量	6時間	1時間	30分	3.75' x 3' (等緯経度約5km)	-	マジ手法 (主に3時間目以降の予報に利用)
航空ガイダンス (TAF-S用)	前1時間内の最大風速とその風向 下から3層の雲底高度と雲量 前1時間内の最小視程 現在天気	15時間	1時間	6時間	国内75空港	-	KLM KLM KLM (診断方式からの手法変更) 「お天気マップ」のアルゴリズム(注)
国内航空用悪天 GPV	psea, u, v, t, rh, r3, Csig u, v, t, rh turb z	18時間	3時間	6時間	ポータルステレオ 約80km	地上 FL050-FL450/40 FL050-FL450/20 trp	
毎時風解析	u, v	-	-	1時間	15' x 12' (等緯経度約20km) ポータルステレオ 約80km	地上, 975, 950, 925, 850, 700, FL050-FL450/20	最適内挿法による。 一般官署向け(慣熟的利用を実施中)。 最適内挿法による。 航空官署向け(慣熟的利用を実施中)。
高潮ガイダンス	潮位、潮位偏差、 最大潮位出現時刻、最大潮位	33時間	1時間	6時間	278地点	-	高潮モデルによる。18時間まではMSMを、 以後33時間まではRSMを外力として用い る。

* KLMとNRNはそれぞれカルマンフィルタ方式およびニューラルネットワーク方式によることを表す。

* z: 高度(m), u, v: 風ベクトル(m/sec), t: 気温(), ttd: 湿度(), : 鉛直気圧速度(hPa/hr), psea: 海面更正気圧(hPa), r: 1時間降水量(mm), cld: 雲量

rh: 相対湿度, r3: 3時間積算降水量(mm), Csig: 積乱雲量, turb: 乱気流に関する指標

国内航空用悪天GPVでは、対流圏界面高度を、要素z、鉛直層: trp(対流圏界面)として配信を行っている。

* FL050-FL450/40は5000フィートから45000フィートまで4000フィートごとのデータであることを示す。FL050-FL450/20も同様。

(注) 現在天気の決定アルゴリズムは、尾納寺(1994)を参照。

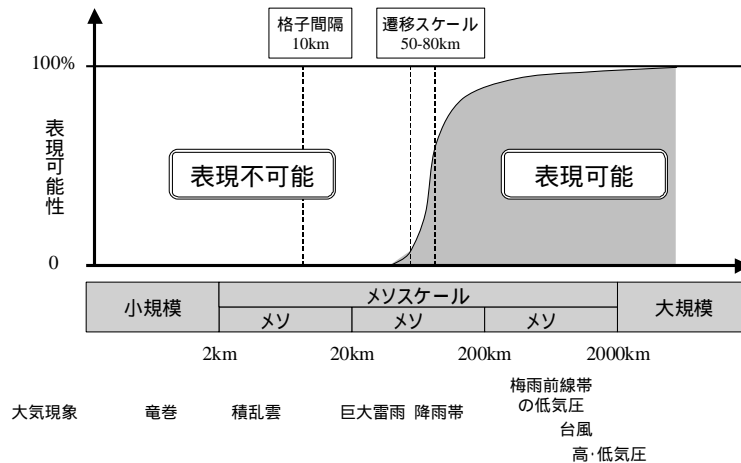


図3.1.1 メソ数値予報モデルの解像度(格子間隔)と表現の性能の関係を表す概念図。永田・萬納寺(1994)の図7.1を、メソ数値予報にあわせて書き換えた。

の問題が非静力学MSMでも問題となることがありうる。例えば、静力学MSMとRSMで積雪の有無が予報期間中に変わらない点が、予報期間内に雪が積もり始める場合の気温予報に影響することが指摘されている(新美2001)が、これは非静力学MSMにも当てはまる。また、予報への影響は明らかでないが、同じく地表面状態については、湿度(蒸発散効率)も季節的気候値に固定しており、特に降水の後や長期間に渡って降水がない場合には妥当ではないと考えられている。

初期場に擾乱の「種(萌芽)」が捕らえられているかどうかは、特に「自由モード」の現象の予測で重要である。自由モードの現象とは、外部強制がない状態で、積乱雲やスコールラインのような、環境場の位置エネルギーや運動エネルギーを擾乱のエネルギーに変換して発達する現象である。これに対し、地形による力学的強制や山岳や海陸分布による表面温度の差のような熱的強制などの外部強制により発達する現象が「強制モード」である。自由モードの現象はその種を初期場に捕えていない限り、精度のよい(スキルのある)予測は困難である。初期場の精度はメソ4次元変分法(4D-VAR)の導入(石川・小泉 2002)と、これによるレーダー・アメダス解析雨量(R/A)や衛星データ、ウィンドプロファイラ(WINDAS)データの同化により大きく改善されてきた。しかし、メソ4D-VARでも、水平及び鉛直解像度、同化に用いるモデルによる限界がある。またスケールの小さな現象は発生から消滅までの期間(寿命)が短くて、種を捕えらたときには、かなり状況が進展していることになるので、早期に予測することが難しいことには変わりはない。一方、強制モードの現象は、強制力と環境場が適切に表現されれば予測できる可能性が高い。海陸風や沿岸前線、これらがトリガーとなる現象など、海陸分布や地形が発生機構に深く関わる現象は、現象の種を捉えていない段階でも予測できる可能性がある。今回のMSMの非静力学化に際しては、初期値作成手法や同化するデータは変わらないので、擾乱の種を捉えているかどうかとい

う面から見た予測可能性には違いがない。

以上、予測可能性の観点から考えると、静力学近似の排除による精密化や雲微物理の導入などにより、静力学MSMから非静力学MSMに代わって改善された部分がある。しかし、解像度、初期場・境界値の作成手法(精度)の面では変わっておらず、モデルにもあまり変わっていない部分がある。従って、これまで同様、メソ数値予報の利用に当たっては、着目する現象の予測可能性をあらかじめ確かめて、気象衛星やレーダーによる観測と随時比較し、実況と適合するかどうかを点検して、予報の信頼性を考慮しなければならない。

3.1.3 初期値・境界値と解析予報サイクル

メソ解析では、ゾンデなどの従来の観測に加え、WINDASや航空機自動観測、マイクロ波放射計データ(佐藤 2003, Sato et al. 2004)、QuikSCAT衛星の海上風データ(第4章)など、新しい観測データの利用が進んでおり、初期場は確実に改善されている。しかし、観測値の時間空間分布の偏りは避けられない。例えば、

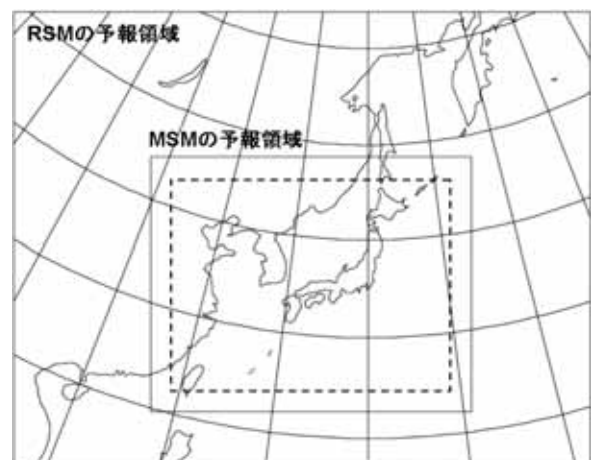


図3.1.2 RSMとMSMの予報領域。MSMの予報領域の内、側面境界付近でRSMとの緩和領域の境界を破線で示した。

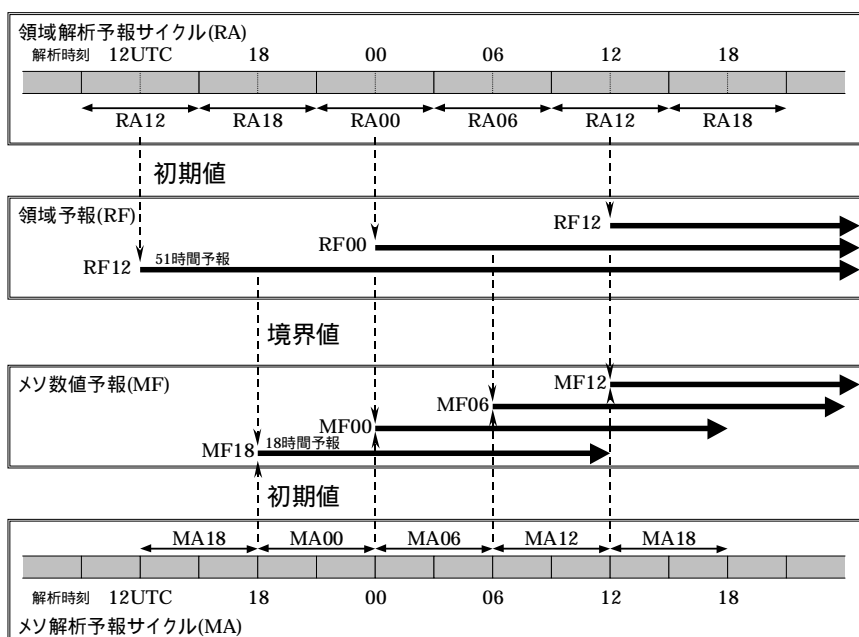


図3.1.3 メソ数値予報と領域予報及びそれぞれの解析予報サイクルの関係。MA18, MF18などは、それぞれ18UTCのメソ解析とそれを初期値とするメソ数値予報を表し、RA,RFは領域解析と領域予報を表す。MAは解析時刻前の6時間を2個の3時間同化枠で、RAは解析時刻をはさむ6時間同化枠(双方向矢印で表す)で解析を行う。使われるデータは各同化枠内のデータである。領域予報とメソ数値予報とでは、初期時刻が同じでも使われる観測データのカバーする時間帯が異なる。またメソ数値予報の境界値はその時点での最新の領域予報値であるが、同時刻初期値の予報ではない。

WINDASは陸地での中下層(最高5000m程度まで)の観測である。航空機観測は航空路に限られ、特に下層(低高度)での観測は空港周辺に限られる。QuikSCATのような軌道衛星は日本付近を観測する頻度が限られる。メソ4D-VARにより、様々な観測時刻のデータを利用できるようになったこと、観測点の上流側にもデータ同化による改善が及ぶことなど、改善点も多いが、特に海上の状態には不確実な部分が多いと考えられる。

降水予測は水蒸気場の初期値に大きく左右される。そこで、メソ解析では水蒸気場の改善のために、R/Aやマイクロ波放射計データの同化を行っている。これらの観測がある場合は相応の精度の初期場が与えられるだろう。しかし、高度場などとは違って、水蒸気場は現実大気で空間的な変動が大きく、精度と空間分布とも十分な観測が得られているとは言えない。また、メソ解析では総観スケールとメソスケールの両方のバランスを考慮して最適な解析場を導くので、特定の地域における観測を必ず反映させるとは限らない。従って、現象によっては観測されている擾乱(降水)が解析場に現れないことも起こりうる。これらから、水蒸気場の初期値の精度には、なお不確実性が大きく、降水予測の精度に影響を及ぼしていると考えらるべきである。

一方、メソ解析は静力学MSMを使う解析手法であることから、その結果は静力学MSMに最適であって、非静力学MSMに適しているとは一概に言えないという問題がある。しかし、これまでの結果から、非静力学MSMへの変更による循環場(気圧・高度・風・温度などの状

態)や降水の予測精度向上が確認されており(第2.2節)、このことが及ぼす影響については実用上あまり心配なくして良いだろう。

側面境界がRSMで与えられる点は、側面境界に近い領域での予報結果を考える際に重要である。図3.1.2にRSMと非静力学MSMの予報領域を示す。非静力学MSMは、境界からおよそ250km程度の範囲はRSMとの予報をつないでおり、図中、破線の外側(緩和領域)でRSMの情報を取り込んでいる。この領域では、より内側の領域との整合性が悪くて、降水予測の不連続や降水系が組織的に表現されないなどの不自然な表現が現れることがある。また、すぐ内側の領域でもRSMの影響を強く受ける場合があり、予報期間中に領域外から領域内に移動の早い擾乱が進んでくる場合は、影響を受ける領域は広がるだろう。このような場合はRSMの結果を参照して、考慮している擾乱の規模や強度など全体像を把握し、MSMとの違いを評価してから予報を検討する必要がある。

解析予報システムに関しては、これまで同様、RSMが1日2度実行され、メソ数値予報には、6時間前または12時間前の初期時刻のRSM予測値から境界値が与えられることに注意が必要である(図3.1.3)。また、データ収集の締め切り時刻(カットオフタイム)もこれまでと同じで、RSMでは3時間待つところ、MSMでは50分である。境界値が古いこともデータ収集締め切りが早いことも、MSMの予報精度に影響を及ぼすが、最新の予報は前回の予報より降水予測精度が高いことが統計的に示さ

れており(第2.2節)、最新のMSM予報値を用いることが原則となる。データ収集締め切り時刻の違いから、領域解析にはメソ解析よりも多くのデータが用いられる。このため、初期時刻が同じ(00UTCまたは12UTC)ならば、風速や降水の予測でRSMのほうがよい面がある(郷田 2001; 田中 2002)。しかし、地形の詳しさと現象の表現の改善を考えると、RSMを用いるよりはMSMを用いるほうがよい場合が多いだろう。また、00UTCのRSMよりは06UTCのMSM、12UTCのRSMよりは18UTCのMSMのほうが、精度がよい(郷田 2001)ことにも注意が必要である。

以上をまとめると、メソ現象の予報には初期時刻の新しいMSMを用いることを第一に考えるべきである。初期値については、海上で、特に降水予測に重要な水蒸気場に不確実性が大きいので、衛星観測やレーダーなどから初期場及び予報初期の場の妥当性を確かめる必要がある。また、同じ初期時刻ではRSMがMSMよりもよい面があるので、擾乱の強さや位置などをMSMと比べて、場合により予報を見直すことができるだろう。側面境界に近い領域ではRSMの影響を強く受けるので、RSMとMSMを比較して予報を検討するとよい。新しい予報が実況の降水を反映していないなど、予報初期に既に現実と合わない場合も少なからずある。このような場合、例外的な対応として、前回の予報を参考に降水規模などを検討してもよいだろう。ただし、目先の小スケールの予報が妥当でない場合でも、より大きなスケールでは適切である場合があり、判断は慎重にすべきである。

3.1.4 予報モデルの特性

水平解像度が10kmである非静力学MSMは、これまでの静力学MSMとは力学過程、物理過程とも異なっているものの、既に述べたとおり、例えば降水予測や地表風予測などは静力学MSMと類似する結果を与えており、統計精度でも大きな違いはない。従って、非静力学MSMの結果も静力学MSMの結果と同様に利用できると思われる。しかしその一方で、地形性降水と、寒候期の降水の統計特性に、系統的違いがあることが分かっている。

静力学MSMでは寒候期に降水頻度が過剰である(第2.2節)。また、一般に降水分布は山岳風上側に多く予想される傾向がある。弟子丸(1999)は、RSMの降水量予測の分布特性として、山岳部の風上側急斜面領域で過剰であることを示した。静力学MSMもこの特性を保持している。一方、非静力学MSMでは大気中の雨水や雪を扱い、風に流される効果を考慮するために、この性質を抑制できて、より現実的な予報になる例が見られる。この特性を反映した事例は降雪について第2.3.5項に、降雨については第2.3.6項に示したとおりである。これらの事例では、解析雨量を使った検証から、非静力

学MSMが予想を改善していると考えてよいが、今後風下側の降水と降雪の広がりや量が妥当かどうか、改めて検証が必要と考えている。

統計的に見ると、R/Aを用いた検証では寒候期の降水に対し、非静力学MSMのバイアスコアが静力学MSMとの比較で大きく改善する(第2.2節)。特に、閾値が大きい場合で違いが顕著になる。これには上に述べた雲微物理過程における雨水や雪の取り扱いも関係していると考えられる。しかし、3時間で5mm以上の強さの降水の予報頻度はR/Aの2-3倍あることから、非静力学MSMも頻度過多であると考えられる²。ただし、寒候期については統計期間が短いことから、改めて検証結果を確認する必要があると考えている。

参考文献

- 石川宜広, 小泉耕, 2002: メソ4次元変分法. 数値予報課報告・別冊第48号, 気象庁予報部, 37-59.
- 上野大輔, 2004: 高潮ガイドンス. 平成15年度量的予報研修テキスト, 気象庁予報部, 13-24.
- 郷田治稔, 2001: メソ数値予報モデル(MSM)の統計的検証. 平成13年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 4-8.
- 佐藤芳昭, 2003: メソ解析へのマイクロ波放射計データ同化. 平成15年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 7-12.
- 田中小緒里, 2002: メソ数値予報モデルの統計的検証. 平成14年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1-3.
- 弟子丸卓也, 1999: 領域モデルの予想降水量の特性について. 平成11年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1-4.
- 富樫正明, 2000: 運用スケジュールとプロダクト. 平成12年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 46-52.
- 永田雅, 萬納寺信崇, 1994: 利用上の留意点. 平成6年度数値予報研修テキスト 数値予報課報告・別冊第41号 合併号, 気象庁予報部, 97-111.
- 永田雅, 1994: メソスケール現象と数値予報. 平成6年度数値予報研修テキスト 数値予報課報告・別冊第41号 合併号, 気象庁予報部, 112-145.
- 新美和造, 2001: 関東地方の大雪の事例. 平成13年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 16-19.
- Sato Y., Y. Takeuchi, and T. Tauchi, 2004: Use of TMI and SSM/I data in the JMA operational meso analysis. Proc. of 16th

² 雪は風で飛ばされるために雨量計での観測が難しく、レーダー観測でもビームの反射特性が雨水とは異なるために正確な観測が難しい。寒候期のバイアスコアの計算にはこれらの問題がある。

3.2 メソ数値予報狭域GPV³

表3.1.1に示したとおり、メソ数値予報の格子点値(GPV)は、ランベルト座標から等緯度経度座標に変換したデータを、地上GPVは約10km間隔で、500hPaまでの上層GPVは約20km間隔で配信される。時間間隔は、地上GPVは1時間、上層GPVは3時間で、必要により要素変換を施している。座標変換に際し、水平内挿には距離の重みをつけ、モデルの鉛直座標系から等圧面への鉛直内挿には気圧(質量)の重みをつけて行なう。

地上GPVのうち、風、気温、湿数(気温-露点温度)は、モデル大気の数値から境界層スキームにより導かれる値である。ただし、モデル地形や海陸分布、地表面の状態が現実とは異なる。従って、気温や風など、地上予報値の利用にあたって、標高補正や地形の違いに伴う特性の補正を考慮すべきであり、場合によっては位置が近い格子点でなく、離れていても特性の類似する格子点における値を使うことも考慮するとよい。ここでモデル地形と海陸分布は静力学MSMから非静力学MSMへの変更によっても一部変わっていることにも注意されたい。地上GPVにおける非静力学MSMの降水量は、積雲対流パラメタリゼーションによる地上降水と、雲微物理過程による地上降水の和であり、雨、雪、あられの全てを含む値である。雲量は本来、雲微物理の雲水や雲氷の量と関係が深いが、非静力学MSMでは、静力学MSMと同様に相対湿度からの診断により求めている。この診断は放射過程での雲量の見積もりと同じ手法による(図3.2.1)。ここで、各層はおおよそ下層(940-850hPa)、中層(850-500hPa)、上層(500-100hPa)とし、各層に含まれるモデル面データの最大雲量をその層における雲量としている。

地上GPVでは、海上と陸上とで特性が異なることを重視して、海陸の別を考慮した内挿(「海陸制御」という)を行っている。すなわち、内挿対象の格子(等緯度経度座標)が陸(海)の場合は、内挿に用いるデータは陸(海)の格子(ランベルト座標)における値のみを用いている。この処理により、例えば沿岸地域での風の強さや気温の日変化は、陸格子には陸上の特性が、海格子には海上の特性が反映される。しかし厳密に言うと、この内挿によって、要素間の不整合が生じるし、海陸制御を行わない上層データとの間でも不整合が生じる。また、モデル地形とも合わないことになる。一方、今後更に高解像度化することによって地形や海陸分布が現実に近づけば海陸制御の必要性が低くなる。これらから、水平解像度5kmに強化する時点(2006年3月の次期NAPS導入時)で海陸制御を廃止する予定である。

³ 藤田 司

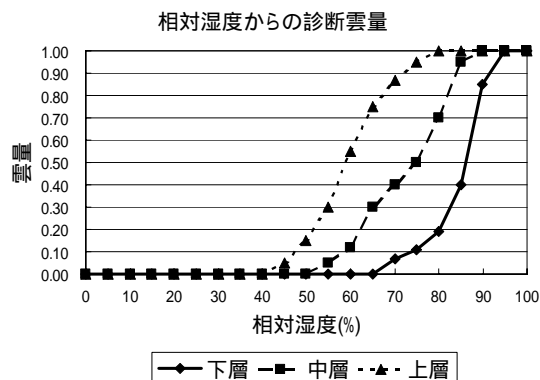


図3.2.1 相対湿度から雲量を診断する統計関係。

上層GPVはモデル大気の数値の内挿による。鉛直気圧速度は、静力学MSMの出力データとの互換を保つために算出している⁴。また、標高が高い地域や気圧が下がっている地域では、気圧面が地面の下になってしまうところでは有効なデータが存在しないが、可視化の便宜を考えて適当な外挿を施している。具体的には、気温は0.5度/100mの減率を仮定した外挿値を与え、湿数はモデル大気最下層の値を与える。また、水平風速には0を、鉛直流にはモデル大気最下層の値を与える。

格子点値の利用に際しては、いくつかの注意すべき点がある。まず、一般にモデルにはバイアス(予想の偏り、平均誤差)があることに注意が必要である。バイアスを含む値を、例えば安定指数の計算に直接用いると、結果は当然、それだけの誤差を含むものになる。統計的な手法による補正を試みるとよいだろう。また、バイアスを除去できたとしても、数値予報で時間空間に誤差が生じることは避けられないので、格子点値の抽出に当たって時間空間の幅をみて利用すべきである。一方、格子点値は格子平均の状態を表すことにも注意が必要である。例えば地上降水量のように、格子内での分布が一樣とは考えられない要素については、局所的により激しい現象が生じないかを考慮すべきである。以上のように、格子点値にはモデルのバイアスや空間代表性に伴う現実との差が常に含まれているので、格子点値を活用した予報資料を用いる場合は、地上高層観測や客観解析を用いて検証して、その統計的精度を確認しておくことが必要である。

⁴ 鉛直気圧速度は、鉛直速度から $\omega = -\rho g w$ により診断している。定義では $\omega = \partial p / \partial t + \mathbf{v} \cdot \nabla p$ であるが、この場合は気圧の時間変化項(右辺第一項)が音波による変動を反映するために、鉛直流の診断としては雑音が多く、適切ではない。

3.3 降水短時間予報¹

3.3.1 はじめに

メソ数値予報を利用したプロダクトの一つに、降水短時間予報がある。これは、実況補外予測による降水量とメソ数値予報モデルの降水量を重み付き平均する手法²(以後「結合手法」と呼ぶ)により、5kmメッシュで6時間先までの1時間降水量を予測するものである(荒木 2001)。レーダー観測による雨量を地上雨量計の観測値で補正し、2.5kmメッシュでの降水量解析を行う、所謂「解析雨量」とともに、2001年3月末より「降水量解析 - 降水短時間予報」システムとして運用されている。第3.3.2項では、2001年4月以降に行われた降水短時間予報作成手法の変更点について概要をまとめる。第3.3.3項では、結合するメソ数値予報モデルの非静力学化が降水短時間予報の予報精度にはほとんど影響しないことを示す。第3.3.4項に、降水短時間予報の一般的な特性と利用上の参考事項を示す。

3.3.2 降水短時間予報作成手法の2001年4月以降の変更点

2002年5月30日より、実況補外予測における初期値の作成方法を、2.5kmメッシュ4格子の最大値から4格子の平均値に変更した。これにより、実況補外予測のバイアス特性が大きく変化し、大幅な過大からやや過小になった。

2003年6月2日より、降水量解析と降水短時間予報を毎正時だけでなく毎正時30分にも行うようになった。このとき、世界測地系への対応と緯度経度座標系への変換における不具合の解消を行った。実況補外予測においては、2.5kmメッシュで予測を行った後、5kmメッシュに変換することとした。結合処理においては、予報2-5時間目³においてメソモデルの重みの最大値が大きくなるように、結合重みの時間変化係数を変更した。これは、2002年3月に導入されたメソ4次元変分法解析により、メソ数値予報の降水予測精度が向上したことに基づく変更である。

2003年10月7日より、実況補外予測において2.5kmメッシュ値から5kmメッシュ値に変換する際のアプローチを変更し、2.5kmメッシュでの最大値が予測に反映されるようにした。5km格子の周囲を含む領域平均値との差が5mm/h以上の最大値(第2位まで)を活かすようにした。また、同日より、

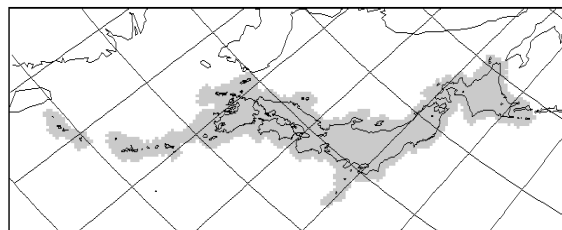


図 3.3.1 検証対象領域
陰影部が本資料で用いた検証対象領域。

降水量解析に利用する部外雨量計⁴を大幅に拡充し、平均で正時には約3400地点、正時30分には約900地点の雨量計データをアメダス(約1300地点)に加えて利用できるようになった。

2004年3月23日より、実況補外予測とメソ数値予報との結合を、2.5kmメッシュ10分間隔で行うことに変更した。これは、2004年6月1日より開始された降水ナウキャストと同形式の10分間降水量予報値を、洪水予報システム向けに提供するための変更である。一般予報向けには、これを60分間毎に積算し、5kmメッシュ化したものを提供する。メソ数値予報モデルの水平分解能は10km、時間分解能は1時間⁵であるため、時空間内挿を行って結合用のモデル降水量を作成する。このとき、単純な線形補間を行うと、強い降水の頻度が少なくなるため、モデル格子内の平均降水量を保存しつつ、モデル分解能に見合った降水の極大を表現できるような時空間内挿法を導入した。また、実況補外予測においては、移動予測のタイムステップを10分から3時間先までに限り5分に短縮すると共に、移動ベクトルおよび地形性降水算出方法の精緻化を行い、精度の向上を図った。

2004年9月1日からのメソ数値予報モデルの非静力学化に際しては、作成手法の変更はない。ただし、モデル降水量予報値の出力間隔が1時間から30分に変更された。1時間降水量を用いたものに比べて、30分間降水量を用いた方が、10分間降水量への内挿誤差が小さくなると考えられ、正時30分後の予報においても正確なモデル降水量予報値を利用できるようになった。

3.3.3 非静力学メソモデルを用いた降水短時間予報の精度

ここでは、降水短時間予報で用いる座標系(斜軸ランベルト座標系)において、4x4格子(約20km格子)内の平均降水量について検証した結果を示す。検証の対象とした領域は、図3.3.1に示す陰影をつけ

¹ 山田 眞吾、國次 雅司(予報課)

² それぞれの直近の予報の精度に基づいて6時間目の結合重みを決め、その値と重み時間変化関数(固定)との積を取ることで、各予報時間の結合重みを決めている。

³ 予報6時間目のメソモデル降水量の重みは、以前から最大値1であり、変更はない。

⁴ 河川局・道路局・都道府県等が設置した雨量計

⁵ 2004年8月までの値。2004年9月以降は30分となっている。

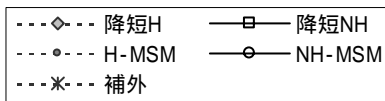
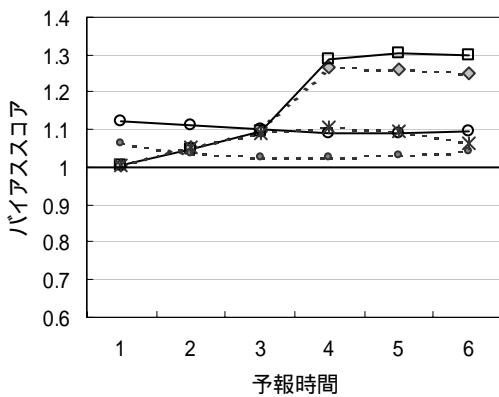
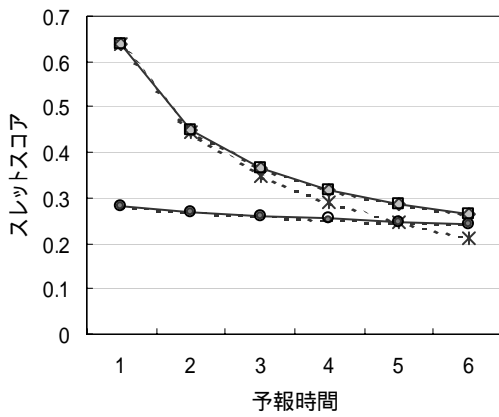


図 3.3.2 2004 年 5 - 7 月に対する 20km 格子平均 1mm/hr 閾値の検証スコア
上：スレットスコア、下：バイアスコア

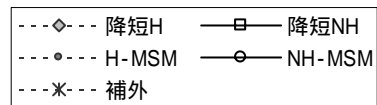
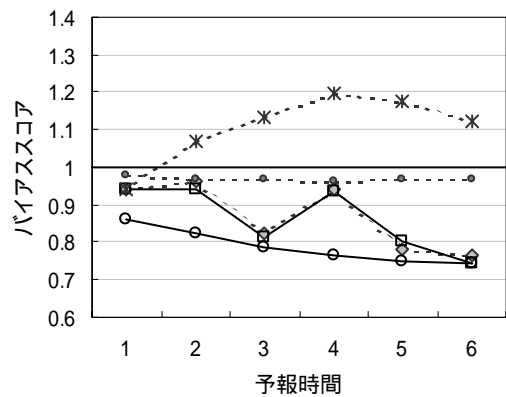
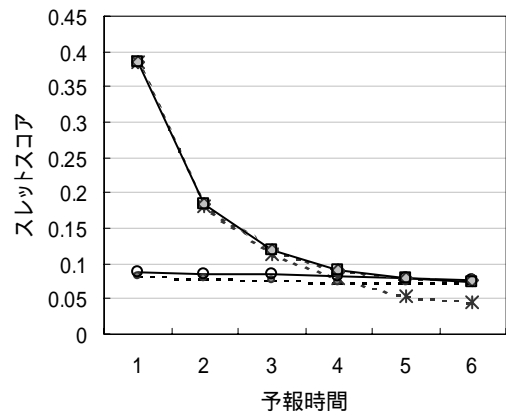


図 3.3.3 図 3.3.2 と同じ。
但し、20km 格子平均 10mm/hr 閾値の検証スコア

た領域で、ほぼ天気分布予報の対象領域に対応している。ここでは、毎正時を初期時刻とする全ての予報を通算したスコアを示す。

図3.3.2は、2004年5 - 7月に対する1mm/hrを閾値としたスレットスコアとバイアスコアの予報時間に対する変化を示したものである。ここで、静力学MSMをH-MSM、非静力学MSMをNH-MSM、前者を用いた降水短時間予報を「降短H」、後者を用いた降水短時間予報を「降短NH」と表記している。スレットスコアには、静力学MSMと非静力学MSMの間にはほとんど差が見られず、それらを用いた降水短時間予報の精度もほぼ同等であった。バイアスコアは、静力学MSMよりも非静力学MSMが若干1より大きく、降水短時間予報においても、予報4時間目以降で、非静力学MSMを用いた場合のバイアスコアが少し大きかった。

図3.3.3は、図3.3.2と同じで10mm/hrを閾値とした場合である。スレットスコアでは、非静力学MSMが静力学MSMを少し上回っている。しかし、それらを用いた降水短時間予報の精度には、ほとんど差

はない。バイアスコアは、1mm/hr閾値とは逆に静力学MSMの方が非静力学MSMよりも大きい⁶。しかし、それらを用いた降水短時間予報のバイアスコアには、ほとんど差はない。

現在の結合処理アルゴリズムでは、6時間目の予報において、常にメソ数値予報の予測降水量と一致させているわけではないため、メソ数値予報モデルの非静力学化の効果は限定的であり、降水短時間予報の予報特性はほとんど変わらないと言える。

個々の事例についての検証結果を比較しても、メソ数値予報モデルを非静力学化したことによるモデル降水量予報の改善事例と降水短時間予報の改善事

⁶ 本節で示したモデル降水量の検証は、第 2.2 節で示されている降水量の検証とは、検証対象(1時間降水量と3時間降水量)、検証座標系(斜軸ランベルトとランベルト)、検証対象領域、検証期間が異なっている。また、図の横軸は、降水短時間予報の初期時刻からの予報時間であり、メソ数値予報については、モデルの初期時刻からの予報時間が異なるもの(例えば、降水短時間予報の1時間予報では、メソモデルの3-8時間目の予報)が平均されているという違いもある。

例は、必ずしも一致していなかった。このことは、メソ数値予報モデルにおける降水量予測の改善を降水短時間予報に反映させるためには、結合手法の見直しが必要であることを示唆している。例えば、予報6時間目のモデル降水量の重みを常に1（南西諸島はモデルの精度を考慮して0.5）に固定することにより、2004年4,5月の予報5 - 6時間目の予報精度は改善された（図は略）。一方で、2004年6月30日に静岡県で発生した局地的豪雨のように、メソ数値予報モデルではほとんど表現されないが、現象発生後には実況補外予測である程度は予測できる事例もある（図は略）。このことは、常にモデル予測を信頼することの危険性を示している。メソ数値予報モデルと実況補外予測の相対的な精度の変動を適切に反映した結合重みの決定アルゴリズムが不可欠であり、その開発に鋭意取り組んでいる。

3.3.4 降水短時間予報の利用上の参考事項

本項では、降水短時間予報を防災情報の作成作業に利用する場合に参考となる点をまとめておく。

(1) 結合処理に起因する予報特性の時間的变化

予報時間によって、実況補外予測とメソ数値予報モデルの結合比率が変化するため、予報精度はもちろんバイアス等の予報特性も大きく変わる。

予報1時間目については100%、2時間目については80%以上が実況補外予測に基づく予報となっており、(3)に述べる実況補外予測の予報特性を把握して利用する必要がある。

予報3時間目以降、実況補外予測とメソ数値予報モデルの結合重みは、予報6時間目で事例毎・領域毎に決定した結合重み⁷になるように徐々に変化する（領域毎・予報時間毎の結合重みは、配信電文中に記述されている）。事例によっては、メソ数値予報モデルの予測結果が全く反映されない領域も存在しうる。メソ数値予報モデルの降水量予測を最大限に利用する場合、予報3 - 4時間目で両者の中間的な予測となる。(4)に、この遷移期間における予報特性を述べる。

メソ数値予報モデルの降水量予測が最大限に利用された場合、予報5 - 6時間目には、ほぼメソ数値予報モデルの降水量予測となる。この場合、メソ数値予報モデルの降水量予測特性（第2.2節を参照）を考慮して利用すべきである。元々10km格子平均の予測を5kmに内挿して利用しているので、それ以下のスケールの降水量の空間変動を表現することはできず降水の極大値は必然的に小さくなることに留意

⁷ 現在時刻の3時間前を初期時刻とする実況補外予測の3時間予報の精度と現在時刻の前1時間降水量に対するメソ数値予報モデルの降水量予測の精度の比から予報6時間目の結合重みを決定する。

する必要がある。

(2) 平滑化処理に起因する予報特性の変化

予報時間による予報特性の変化に寄与するもう一つの要因は「平滑化処理」である。平滑化処理は、5kmメッシュ格子毎に、その格子を右上端とする2x2格子(約10km格子)内の平均値と最大値を算出し、それらの平均値を元の格子の予報値とする方法である。2001年3月末の導入当初から、予報4時間目以降にのみ実施されている。これにより、平均降水量はやや多めに、最大降水量はやや小さめに補正される。この影響で、予報3時間目と4時間目の間で格子平均降水量のバイアスコアが不連続に上昇する（図3.3.2、図3.3.3にも明瞭に現れている）。

予報時間が延びると降水域の予報位置の誤差が拡大するため、若干広めに予報を行うことにより適中が増え、スレットスコアが向上する。予報4時間目以降、最大降水量に対してはバイアスが小さくなり、平均降水量に対してはバイアスが大きくなっていることに留意する必要がある。

(3) 実況補外予測の予報特性

実況解析で解析されたスケールの小さな降水系は予測に反映されるが、その位置の精度は予報時間と共に低下する。一般に、急激に発達・衰弱する降水系に対する予報精度は低く、持続性の高い（時間変化の少ない）降水系ほど予報精度は高い。前者のような降水系については、30分毎に更新される降水短時間予報や新たに始まった降水ナウキャストを用いて、随時予測を更新する必要がある。

(4) 遷移期間の予報特性

実況補外予測やメソ数値予報モデルの降水予測で比較的強い降水が予測されている場合においても、その予測位置にズレがある場合には、極大値は削られ、比較的弱い降水の領域が拡大することになる。この特性は、重み付き平均という結合手法を用いる限り避けられないものである。利用の際には、実況の最大降水量の持続を考慮しながら、最大値をかき上げする等の考慮が必要である。

(5) 降水システムのスケールと予報精度の関係

ここでは、大規模な降水系（傾圧不安定に起因するような低気圧・前線系や熱帯低気圧に伴う数百km以上の水平スケールを持つ降水系）と対流性の小規模な降水系に分けて考察する。

大規模な降水系は、小規模な降水系と比較して、時間的な変化は緩やかであり、構造が維持されたまま移動することが多いので、実況補外予測の精度は高い。このことを考慮して、現状では、大規模な降水系に対しては、実況補外手法の重みが大きくなるような結合重みの決定アルゴリズムが採用されている。しかし、地形等の影響を受けて降水域が変形したり、台風の周辺域のように曲線的な移動が顕著な

場合には、現在の線形的な実況補外手法では、不十分である⁸。一方、メソ数値予報モデルでは、そのような降水域の変形や非直線的な移動も精度良く予報される場合が多い。第3.3.3項の最後に述べたアルゴリズムの見直しは、そのようなケースでメソ数値予報の重みが高くなることを狙ったものである。現状では、メソ数値予報モデルの降水量と実況とを比較し、量的・時間的・空間的なズレが生じていないことを確認した上で、メソ数値予報に基づいた修正を行う（降水短時間予報による置換を行わない）ことが有効と思われる。

次に、熱的な不安定に代表される対流性の小規模な降水系について考える。小規模な降水系は、時間的な変化が大きいため、基本的に現状の持続に基づく実況補外予報では正しく予報できない場合が多い。しかし、警報に結びつくような顕著現象の場合には、持続性・停滞性が見られる場合が多いので、ある程度強い現象が発生した後にはあるが、実況補外予報でも予報可能な場合もある。30分毎に更新される降水短時間予報、あるいは10分毎に更新される降水ナウキャストを監視し、顕著現象の兆候を見逃さないことが肝要である。一方、メソ数値予報モデルにおいても、モデルの分解能による制約や初期場を決める観測が不足しているため、位置や強度を正しく予報することは困難である。しかし、大気的不安定性が正しく捕らえられている場合には、対流性降水の発生を予報できる能力はある。但し、ある程度の時間的・空間的な誤差や量的な過不足が生じるのは避けられないと考えた方がよい。

以上のことを考慮すると、対流性の小規模な降水系に対しては、現象発生前は、数値予報モデルを用い、量的・時間的・空間的な誤差を考慮したポテンシャル予報を主体とし、現象発生後は、最新の予報（および降水ナウキャスト）に基づいて随時に予報を修正することが主体となると考えられる。特に降水短時間予報の後半部分については、大きな誤差が生じうることを念頭に置いておく必要がある。

(6) 降水短時間予報を用いた置き換え用の二次細分域最大降水量

2004年3月に新しい予報作業支援システムが導入されたことにより、注警報発表作業は、二次細分区域毎、3時間毎（以後、3時間の区切りによる時間単位を「コマ」と呼ぶ）の最大降水量や最大風速を量的に予報することが基本の作業となった。導入以前は、降水短時間を利用する際には、予報官が値を読み取って手入力していたので、位置ズレやピーク値

⁸ 現在、実況補外予報の移動予報部分で、移動ベクトルを予報時間とともに変化させる手法の開発を行っている。これが導入されれば、台風周辺などでの降水域の非直線運動に伴う誤差は緩和される見通しである。

の過大・過小を修正しつつ利用されていた。新しい予報作業支援システムでは、降水短時間予報の格子点予報値から作成した各細分毎の各コマの置き換え用最大降水量⁹が提供されており、降水短時間予報を最大降水量時系列に反映させるためには、置き換え操作を行うだけでよい¹⁰。

置き換え用の最大降水量は、原則的には、細分に含まれる5kmメッシュ格子における1,3,24時間最大降水量¹¹である。しかし、お互いに近い重みで結合を行うと、必然的に最大値が小さくなること（(4)項を参照）およびメソ数値予報モデルでは小さなスケールの降水の極大は本質的に表現できないこと（(1)項を参照）のために降水短時間予報の後半部分では、細分域内最大降水量に明瞭な負バイアスが生じてしまうことが避けられない。

この負バイアスを是正する手法の一つとして、「降短最大降水量ガイダンス」を開発した。降水短時間予報から作成した（ある程度の広さを持つ）領域内の平均降水量は、最大降水量に比べるとバイアスが小さい。降水短時間予報から作成した領域内平均降水量に、最大降水量ガイダンス（第3.4節を参照）と同様の領域内最大降水量と平均降水量の比率¹²を掛けることにより、細分域内での降水の最大値を予測する。事前検証の結果、降水短時間予報の後半を含む3時間降水量に対しては、バイアスコアを1に近づけ、スレットスコアを改善する効果があることが分かった。現在、2004年の暖候期に対する検証作業を行っている。その結果は、別の機会に報告する予定である。

参考文献

荒木公仁, 2001: 降水6時間予報. 平成12年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 36-41.

⁹ システム側の事情から、この置き換え用の最大降水量時系列は、メソ最大降水量ガイダンスに降水短時間予報を上書きする形で作成される。

¹⁰ 数値的な厳密さが確保され、値を読み取る必要が無くなった反面、予報官による位置ズレや強度ズレの調整には、別の操作が必要になった。

¹¹ 厳密には、積算期間の終端時刻が対象とするコマに含まれる任意のn時間積算値(n=1,3,24: 現在時刻より前の時間帯については、解析雨量を用いて積算する)の中の最大値を用いる。

¹² この比率を求めるニューラルネットワークへの入力値は、領域内平均降水量を除いて、メソ最大降水量ガイダンスで用いた値(メソ数値予報モデルGPVから作成される)と同一とする。従って、もし降水短時間予報で予報された領域内平均降水量の精度が、メソ降水量ガイダンスから求めた領域内平均降水量の精度よりも高ければ、「降短最大降水量ガイダンス」は、メソ最大降水量ガイダンスよりも精度が高いと考えられる。

3.4 最大降水量ガイダンス¹

3.4.1 はじめに

非静力学MSMを利用した最大降水量ガイダンスは、注警報発表時の最小区分である二次細分²を対象として、3時間毎の最大3時間降水量および最大1時間降水量を予測対象要素としている。

3.4.2 作成手法

非静力学MSMを用いた最大降水量ガイダンスは、領域モデル(RSM)を元にした最大降水量ガイダンス(海老原 2002)とほぼ同じ手法で作成される。

非静力学MSM最大降水量ガイダンスは、次の手順で計算される。

- 1) ガイダンス格子(20km)における平均降水量の導出
- 2) 1)で求めた平均降水量の各二次細分への割当
- 3) ニューラルネットワーク(NRN)による各二次細分における最大降水量/平均降水量比の計算
- 4) 2)の平均降水量 × 3)の比

1)の平均降水量の導出は、後で述べる点を除き基本的にはRSMによる降水ガイダンス(海老原 1999)と同じ方法とした。この方法では、カルマンフィルター方式による係数の最適化が必要なため、非静力学MSMの予報値が得られた、性能評価試験期間の2003年6,7月、2004年1月と、試験運用期間の一部である2004年3月~5月のデータを用いて、繰り返し最適化を行った(なお、2004年6月以降についても、日々の最適化を行っている)。

RSMを用いたガイダンスと少しだけ異なる点は、説明変数として用いているモデル降水量の取得方法である。RSMではモデル降水量として、ガイダンス格子を取り囲むモデル格子点(4点)による、ガイダンス格子点への線形内挿値を用いていたが、非静力学MSMにおいては、この4点の中の最大値を用いることにした。

3)の各二次細分における最大降水量/平均降水量比の計算に必要なNRNの係数には、RSMにおける値をそのまま用いることとした。これは、最大降水量/平均降水量比の推定には、長期間(少なくとも数年程度)のモデル出力値と観測値が得られることが望ましいのに対し、非静力学MSMに関してはそれが困難であったこと、RSM最大降水量ガイダンスの開発に際しては、将来のモデル変更を見越して、モデルによって大きく異なる場合が考えられる鉛直速度などを説明変数として使用しないようにしていたこと(海老原 2002)による。また、この係数はRSM最大降水量ガイダンスの場合と同様に

¹ 木村 陽一

² 2004年3月からは全国を362の細分に分けている。

日々の更新は行わず、二次細分の変更(新規細分の設定や市町村合併等に伴う細分の変更など)に際して一括して学習を行い、新たな係数を作成している。

3.4.3 予測特性と精度

独立な予測資料として計算ができた2004年6月の30日分のモデル出力値を用いて、非静力学MSM最大降水量ガイダンスを計算し、検証を行った。この間、ルーチン出力している静力学MSMによる最大降水量ガイダンス(プロダクトの仕様は非静力学MSM最大降水量ガイダンスと同じ)と比較を行った。検証には、解析雨量の各二次細分内の最大値を用いた。図3.4.1に非静力学MSM、静力学MSMによる最大降水量ガイダンスのバイアスコア、スレツスコアを閾値別に示す。バイアスコアを比較すると、閾値30~100mm/3hでは静力学MSM最大降水量ガイダンスの方が1に近い。しかしながら、スレツスコアで見ると、両者は同等か、閾値によっては非静力学MSM最大降水量ガイダンスの方が上回っている。特に、注警報に大きくかわると考えられる閾値50mm/3h以上では、非静力学MSM最大降水量ガイダンスのスレツスコアが高くなっている。

3.4.4 平成16年台風第6号の事例検証

2004年6月21日9時半(JST)頃に室戸市付近に上陸した台風第6号について事例検証を行った。6月20

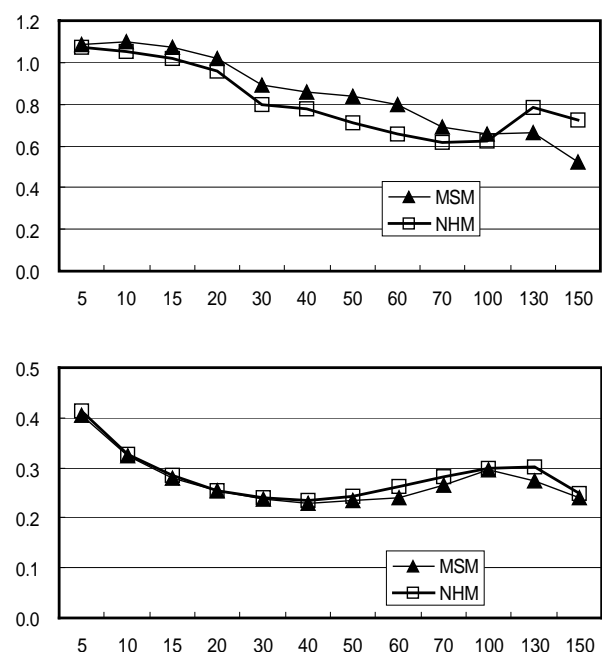


図 3.4.1 閾値別のバイアスコア(上)とスレツスコア(下)。横軸は閾値で単位は mm/3h。MSM は静力学 MSM を元にしたガイダンス、NHM は非静力学 MSM を元にしたガイダンスを示す。6月1日~30日の120イニシャル分、予報時間は03~18時間。

日06UTC初期値による18時間後までの各二次細分における3時間最大降水量の、非静力学MSM 最大降水量ガイダンスによる予想値と解析雨量による実況値を図3.4.2に示す。四国から紀伊半島にかけて100mm/3hを超える大雨が予想されていた。高知県東部室戸では、212mm/3hの予想に対して258mm/3hの実況が観測され、警報基準（室戸では150mm/3h）を超える大雨でも、場合によっては適切に予測できることがわかる。しかし、徳島県南部海部では363mm/3hの予想に対して168mm/3hの実況となっており、予想値が過大となっている細分もあった。

同じ時刻の予想に対して、静力学MSMによるガイダンスでは、静岡県や長野県、兵庫県や岡山県の一

部の細分で、非静力学MSMによるガイダンスよりも多い値が予想されていたが、実況は非静力学MSMによるガイダンスよりも少なく、非静力学MSMによるガイダンスがより良い予想となっていた。

3.4.5 利用上の留意点

非静力学MSM最大降水量ガイダンスは、RSMによるガイダンス同様、平均降水量を元に最大降水量を予測している。このため、平均降水量の予測精度が低い場合には、最大降水量ガイダンスの精度も低い。常にモデルの出力にも注意を払い、モデルの表現している内容とも対比させて検討する必要がある。特にモデルではなかなか表現できない小規模な熱雷に関しては、最大降水量ガイダンスにおいても過少

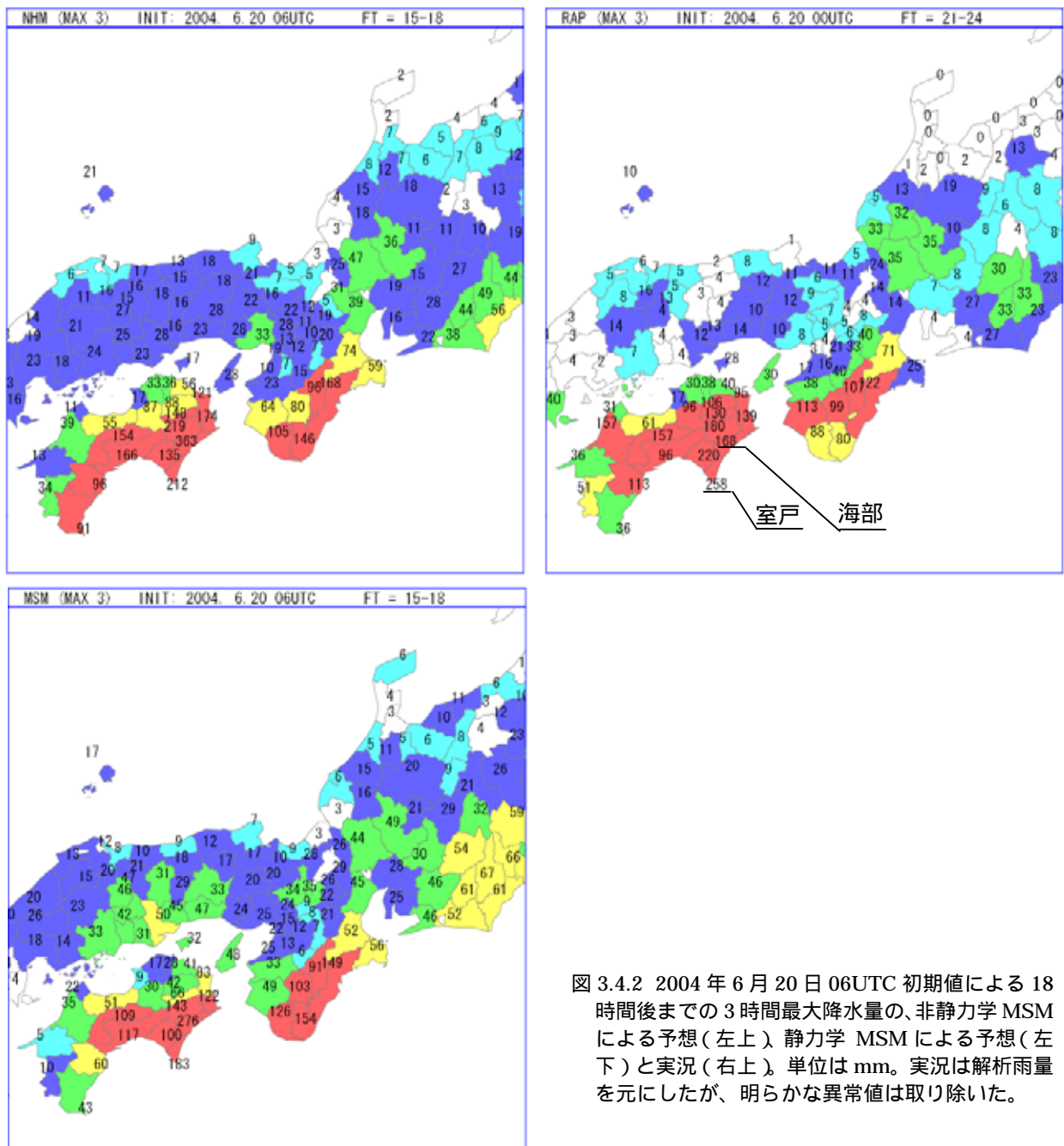


図 3.4.2 2004 年 6 月 20 日 06UTC 初期値による 18 時間後までの 3 時間最大降水量の、非静力学 MSM による予想（左上）静力学 MSM による予想（左下）と実況（右上）。単位は mm。実況は解析雨量を元にしたが、明らかな異常値は取り除いた。

となる場合がある。

最大降水量ガイダンスは各二次細分ごと、つまり、陸上のみを対象に作成しており、モデルで表現されている海上の情報は基本的には用いていない。このため、モデルで海上に降水域が予想されていても、その情報が最大降水量ガイダンスには全く反映されないことがある。通常はそれで問題がないのだが、この降水域の位置が実はずれていて実際には陸上にかかってきたような場合には、最大降水量ガイダンスだけに注目していると、見逃すこととなるので注意していただきたい。

3.4.6 まとめ

メソ数値予報を利用した最大降水量ガイダンスに非静力学MSMを利用するように変更した。検証の結果は、静力学MSMを利用したガイダンスの予測精度とほぼ同等であることが確認された。

参考文献

海老原智, 1999: 降水ガイダンスの改良と検証. 平成11年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 23-33.

海老原智, 2002: 最大降水量ガイダンス. 平成14年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 35-39.

3.5 最大風速ガイダンス¹

3.5.1 はじめに

非静力学MSMを利用した風ガイダンスには、アメダス地点を対象とした最大風速ガイダンスと空港を対象とした短距離飛行用飛行場予報（TAF-S）用の最大風速ガイダンスがある。両者の作成手法は同一である。但し、前者は前3時間内の最大風速とその風向を予測し、後者は前1時間内の最大風速とその風向を予測している。

3.5.2 作成手法

最大風速ガイダンスの作成手法は、松本（2003）に示されている静力学MSMガイダンスと同様で大きな変更点はない。静力学MSMではモデルの予測値は毎正時の値しか得られなかったが、非静力学MSMでは30分毎の値が得られるようになった。そのため、30分毎の地上風のうち風速が最大の風を説明変数として利用するように変更した。係数更新の際に目的変数として用いる観測値は、静力学MSMガイダンスと同様に、対象時間内に通報されたうちで風速が最大の風である。

各予測地点の最大風の東西成分（ U ）、南北成分（ V ）を、その点に最も近い格子点の非静力学MSM地上風（予測期間内の風速が最大の風）の東西成分（ U_m ）、南北成分（ V_m ）から以下の式によって計算している。

$$U - U_m = X_1 + X_2 \times U_m + X_3 \times V_m$$

$$V - V_m = X_4 + X_5 \times U_m + X_6 \times V_m$$

ここで X_1 から X_6 は係数であり、これらの値をカルマンフィルター方式によって逐次更新している。このようにして求めた U 、 V について、風速のバイアスコアが1に近づくように補正（頻度バイアス補正）を加えた値が最終的に配信されるガイダンス値である。最大風速ガイダンスの作成手法の詳細については、木村（1998）や国次（1997）を参照していただきたい。

3.5.3 予測特性と精度

図3.5.1に、2004年4月から6月のアメダスの前3時間内最大風速に対する非静力学MSM、静力学MSMモデル値及びそれぞれのガイダンス値の平方根平均二乗誤差（RMSE）及び平均誤差を示す。

モデル値同士を比較すると、非静力学MSMでは静力学MSMに比べて夜間に風が強い傾向が見られ、RMSEが大きくなっている。一方、ガイダンスではこの差を吸収して両者でRMSE、平均誤差共にほぼ同じ値になっている。最大風速ガイダンスでは各時

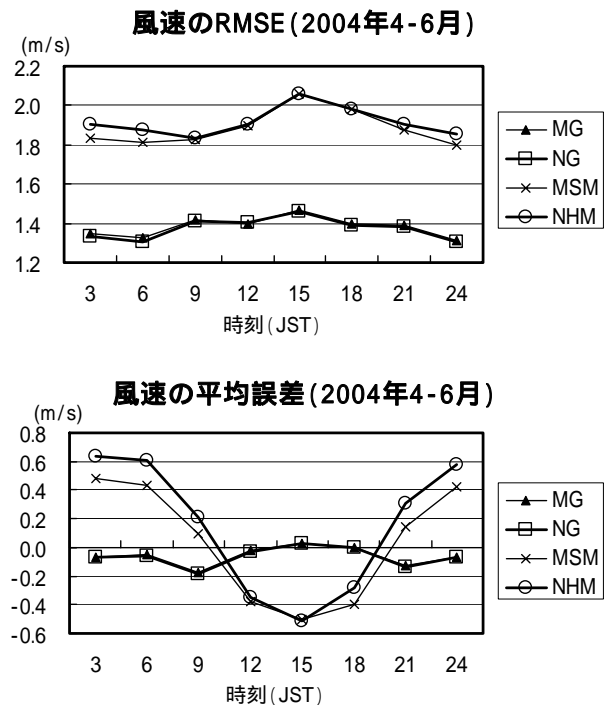


図 3.5.1 アメダス地点に対する時刻別最大風速の RMSE（上）と平均誤差（下）。図の凡例で MG は静力学 MSM ガイダンス、NG は非静力学 MSM ガイダンス、MSM は静力学 MSM、NHM は非静力学 MSM を示す。

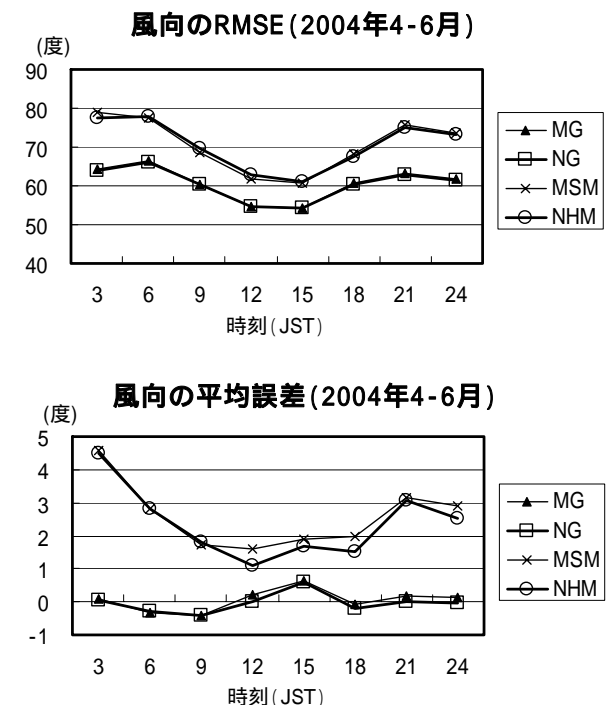


図 3.5.2 アメダス地点に対する時刻別最大風の風向の RMSE（上）と平均誤差（下）。図の凡例は図 3.5.1 と同じ。

¹ 新美 和造

スレットスコア (2004年4-6月)

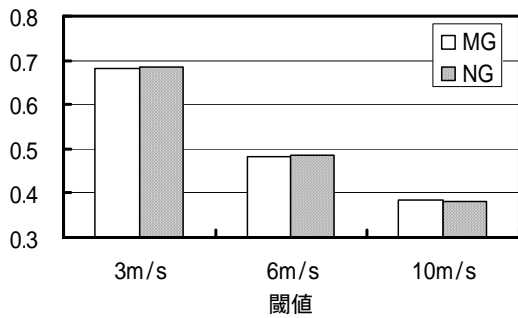


図 3.5.3 アメダス地点を対象とした 3 時間最大風速ガイダンスの閾値別のスレットスコア。図の凡例で MG は静力学 MSM ガイダンス、NG は非静力学 MSM ガイダンスを示す。

スレットスコア (2004年4-6月)

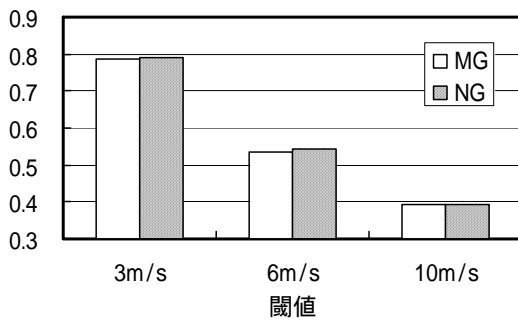


図 3.5.4 空港を対象とした 1 時間最大風速ガイダンスの閾値別スレットスコア。図の凡例は図 3.5.3 と同じ。

バイアスコア (2004年4-6月)

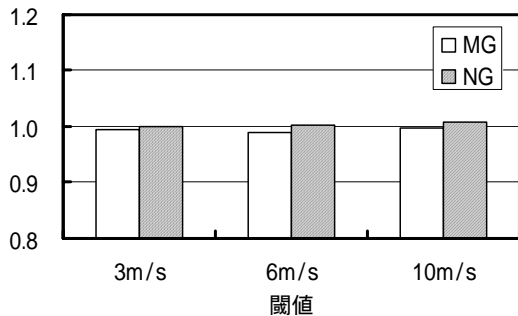


図 3.5.5 アメダス地点を対象とした 3 時間最大風速ガイダンスの閾値別のバイアスコア。図の凡例は図 3.5.3 と同じ。

刻毎に係数を作成しており (松本 2003) この効果が現れた結果である。

風向のRMSE及び平均誤差についても非静力学MSMガイダンスと静力学MSMガイダンスでほぼ同じ精度となった (図3.5.2)。

図3.5.3はアメダス地点を対象とした3時間最大風速ガイダンスのスレットスコア、図3.5.4は空港を対象とした1時間最大風速ガイダンスのスレットスコアである。検証期間は2004年4月から6月で、全予報時刻を対象として、閾値3m/s、6m/s、10m/sについて検証した。アメダス地点を対象とした3時間最大風速ガイダンス、空港を対象とした1時間最大風速ガイダンス共に非静力学MSMガイダンスと静力学MSMガイダンスはほぼ同じ精度となっている。頻度バイアス補正の効果により、静力学MSMガイダンス、非静力学MSMガイダンス共にバイアスコアはほぼ1となった (図3.5.5)。

3.5.4 利用上の留意点

風の日変化に起因する数値予報モデルのバイアスのような、系統的な誤差についてはガイダンスが補正してくれる場合が多い。しかし、モデルのランダムな誤差についてはガイダンスでは補正できない。各予測地点の風の特性を把握した上で、実況とモデルの予想を比較して、最大風速ガイダンスの修正の要否を検討していただきたい。

3.5.5 まとめ

メソ数値予報を利用した最大風速ガイダンスを非静力学MSMから作成するよう変更した。予測精度、予測特性については、静力学MSMを利用したガイダンスとほぼ同じであることが確かめられた。

参考文献

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

3.6 TAF-S視程ガイダンス¹

短距離飛行用飛行場予報(TAF-S)の支援のため、2002年8月からTAF-S視程ガイダンスの配信が開始された。今回非静力学MSMの本運用にあたり、このガイダンスの作成方法の変更を行ったので、その作成方法と予測精度、利用上の留意点を解説する。

3.6.1 背景

旧TAF-S視程ガイダンスは、カルマンフィルターを利用したTAF-L(長距離飛行用飛行場予報)視程ガイダンスと異なり、診断方式により作成されていた(岩倉ら 2002)。この手法では、診断式の係数は静力学MSMと観測の比較から作成されており、固定となっている。このため、

- ・非静力学MSMに静力学MSMで作成された係数を使うと精度が落ちる。
- ・新空港の係数の作成には最低1年間の観測および予測データが必要である。

といった問題点がある。また、TAF-L視程ガイダンスと手法が異なるため、TAF-SとTAF-Lガイダンスの予測特性が異なるという利用上の問題点もある。よって、非静力学MSMの運用に合わせてTAF-S視程ガイダンスをTAF-L視程ガイダンスと同じカルマンフィルターの手法に変更することとした。

3.6.2 作成手法

1日4回(00,06,12,18UTC初期値)の非静力学MSMのGPVを使用し、2,3,...,15時間後の前1時間最小視程を予測する。2004年9月現在、国内75空港を対象としている。作成手法は、前述したようにTAF-L視程ガイダンス(大林・榊原 2000)と同じカルマンフィルターで、説明変数も同じとした(表3.6.1)。ただし、予測対象時間間隔がTAF-Lでは3時間に対し、TAF-Sでは1時間となるため、カルマンフィルタ

表3.6.1 視程ガイダンスの説明変数

定義	視程との関係
$(r1)^{1/2}$ [r1: 1時間降水量]	降水粒子
$(1-RH)^{1/2}$ [RH: 地上相対湿度]	吸湿性エアロゾルの粒径の湿度依存
$VV^{1/2}$ [VV: 地上風速]	エアロゾルの拡散
$1-t$ (RH>0.9) $(1-t) \times ((RH-0.8)/0.1)$ (0.9≥RH>0.8) 0 (RH≤0.8)	高湿度時の気温低下(霧の効果がある程度表現)
[t: 前1時間の地上気温変化(単位)、+1 超は1とする]	

¹ 高田 伸一

の係数を1時間ごとに(24個/日)用意する。これに伴い、説明変数も3時間間隔で求めていたものを1時間間隔で求める。また、TAF-Lガイダンスと同様にバイアスを1に近づけるように頻度バイアス補正を行う。悪視程の予測頻度を実際の頻度に近づけるためである。なお、係数はTAF-Lガイダンスのものを引き継ぎ、2004年3月10日から最適化を開始した。

3.6.3 予測特性と精度

新・旧ガイダンスの2004年4-7月におけるスレットスコア、バイアスコアは図3.6.1のとおりである。新ガイダンスは旧ガイダンスに比べて大きくスレットスコアが向上している。一方、バイアスコアは、旧ガイダンスではかなり小さい値であることがわかる。これは旧ガイダンスがほとんど悪視程を予測しなかったことを意味する。新ガイダンスは前述したようにバイアスを1に近づけるように補正を行っているため、悪視程も予測するようになる。これがスレットスコアが向上した大きな要因である。

図3.6.2は成田空港の予測と実況の散布図を示した図である。新ガイダンスは旧ガイダンスに比べて悪視程の予測が多くなっている。図の左下に×印非

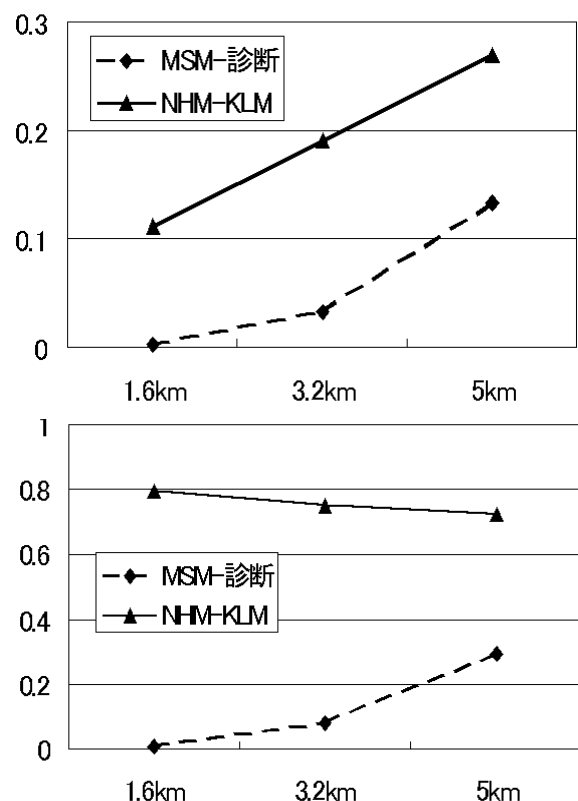


図3.6.1 視程ガイダンスのスレットスコア(上)とバイアスコア(下)。MSM-診断が旧ガイダンス、NHM-KLMは新しいカルマンフィルターによるガイダンス。検証期間は2004年4-7月で、検証地点は三宅島空港を除く国内74空港。1.6,3.2,5kmを閾値とした精度。

静力学MSM、図中ではNHM)が増加していることが示しているように、悪視程を予測できる例が増えている。ただし、左上の×も多くなって空振りも増加していることがわかる。2004年4-7月における3.2kmを閾値とした国内74空港の検証でも、捕捉率(悪視程予測適中数/悪視程観測数)は3%から28%と増加して悪視程を予測できるようになった一方で、一致率(悪視程予測適中数/悪視程予測数)が42%から37%とやや低下している。

図3.6.3は新ガイダンスと持続予報の精度の時間推移を示した図である。00(06,12,18)UTC初期値のガイダンス予測を03(09,15,21)UTC発表のTAF-Sに利用する場合を考える。持続予報は03(09,15,21)UTCの実況をその後の予測とした。この図からわかるように、予報時間が4時間未満では持続予報の精度がガイダンスより高いが、急速にその精度は落ち、4時間以降はガイダンスの精度が高くなる。

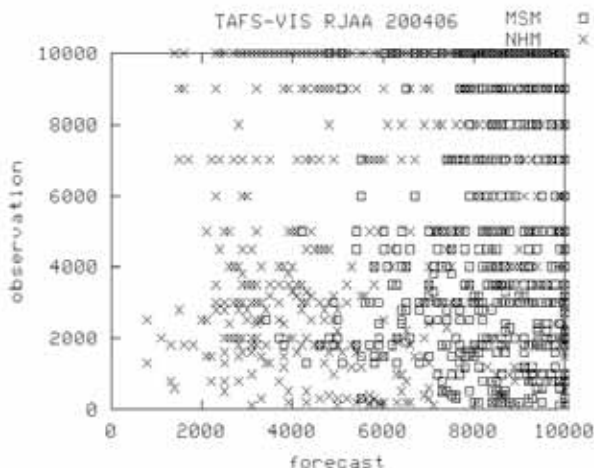


図3.6.2 成田空港での視程ガイダンス予測値と観測値との散布図(2004年6月)。横軸が予測、縦軸が観測(単位はm)。MSM(□)が現ガイダンス、NHM(×)が新ガイダンス。

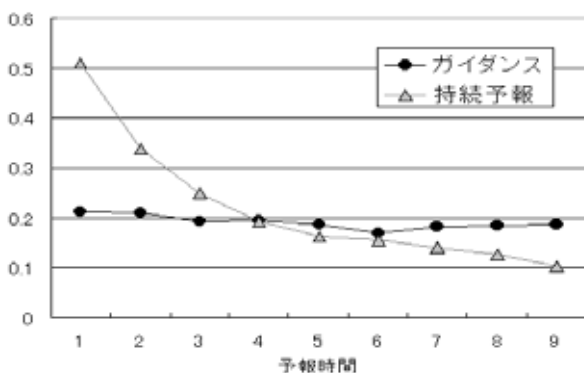


図3.6.3 視程ガイダンスと持続予報の予報時間によるスロットスコアの変化。閾値を3.2kmとした場合。期間は2004年4-6月で、検証地点は国内74空港。

3.6.4 利用上の留意点

新ガイダンスの利用上の留意点を挙げる。

新ガイダンスは降水量、湿度の説明変数の寄与率が高いため、数値予報モデルの降水量、湿度予測に大きく依存する。降水量が予測される時は湿度も高いため、悪視程を予測するのは降水予測時が多い。よって、非静力学MSMの降水量予測のあり/なし、および強度が外れるときには視程予測も外れる。

霧予測のための説明変数(地上湿度、高湿度時の気温低下)も用意してあるが、霧(視程1km以下)までの悪視程を予測できない場合が多い。霧の多い空港では、霧の多発時間帯に霧を予測しようとして、カルマンフィルターの係数の最適化と頻度バイアス補正が行われる。新ガイダンスでは霧(無降水時)と降水時の悪視程に対して同じ予測式を使っているため、この時間帯に降水が予測された場合には、霧により調整された頻度バイアス補正、カルマンフィルターの係数を使って実況以上の悪視程を予測することがある。

降水については、TAF-Lガイダンスと同様に雨雪判別は行ってない。気温が低く冬季には降水がほぼ雪となる北日本では、係数の最適化によって降雪による悪視程を予測するが、降雪頻度の低い所では降雪による悪視程を十分に予測できない。

TAF-S、TAF-Lガイダンスとも同じ説明変数を使っているが、TAF-SガイダンスはMSM、TAF-LガイダンスはRSMから作成される。よって、降水による悪視程の場合には、RSMとMSMの降水予測を実況と照らし合わせながら、どちらの方が当たっているかを判断して利用して頂きたい。

TAF-S発表において、目先は持続予報を重視する方が良いが(当然気象現象の寿命を考える必要があるが)、約4時間後からはガイダンスの精度の方が平均的に高くなる。

夜間に視程観測が行われない官署が多い。この場合、観測が行われない時刻の係数は観測のある最も近い時刻の係数を使用している。このため、この時間帯の予測精度はやや落ちると考えられる。もともと空港運用時間外の予測値であるが、予測の変化傾向を見るときや、予測の時間的ずれを補正する際に利用できる。

3.6.5 今後の課題

非静力学MSMは降雪を直接予測しているため、これを説明変数に使うことによって、降雪による悪視程の予測精度を向上できる可能性がある。現時点で

は非静力学MSMの冬季の予測結果が少ないため降雪を説明変数として導入することを見送ったが、今年度の冬の事例を基に開発を行う。また、無降水時における霧を予測するため、下層の湿度や雲物理量の情報を有効に利用する方法を開発する予定である。

参考文献

岩倉晋・松本逸平・大林正典, 2002: 航空ガイダンス. 平成14年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 46-51.

大林正典・榊原茂記, 2000: 航空気象予報. 平成12年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 42-45.

3.7 TAF-S 雲ガイダンス¹

3.7.1 はじめに

短距離飛行用飛行場予報 (TAF-S) の作成を支援するため、予報時間2~15時間の毎時、前1時間で雲量5/8以上の雲層 (無い場合は最低雲層) が最も低い時の下から最大3雲層の雲量と雲底高度の予測値を雲ガイダンスとして1日4回配信している。ガイダンスの算出にはMSMのモデル面格子点値を用いている。今回の予報モデルの変更によって鉛直格子点配置が変わったことを除けば、雲ガイダンスの作成方法はこれまでの方法 (大林 2002) と変わらない。以下ではその方法について簡単に説明するとともに、非静力学MSMによるガイダンスの精度検証の結果について述べる。

3.7.2 ガイダンスの算出方法

ガイダンスの算出は大きく分けて2つのステップからなる。まずMSMの格子点値を元に、カルマンフィルターによって2~15時間先の空港上空の雲量鉛直分布を予測する。次にその雲量鉛直分布から、報ずべき最大3雲層の雲底高度を予報時間毎に抽出し、その高度の雲量とともにガイダンスとして用いる。雲層の抽出方法については大林 (2002) を参照していただくこととし、ここでは雲量鉛直分布の予測方法の概要を説明する。

まずカルマンフィルターの説明変数として、モデル面での雲量を求める。それには、空港上空のMSMモデル面温度、気圧、比湿から相対湿度を求め、さらにそれを細見 (1999) と同じ診断的方法によってモデル面での雲量 C_M に換算する。次に、 C_M を説明変数とし、観測で得られた特定高度 h の雲量 $C(h)$ を目的変数とする回帰式、

$$C(h) = X_0 + \sum_{i=1}^3 X_i C_M(z_i) \quad (3.7.1)$$

が成立することを仮定し、最適な係数 X_i ($i=0,1,2,3$) をカルマンフィルターによって求める。係数は空港 (全国75空港) 高度 (地上から30000フィートまで全38高度) 時刻 (毎時) 別に算出し、モデル面の高度 z_i は h に近い3層を用いる。ここで目的変数としては航空気象観測で報じられる雲量を用いるが、観測は最大で3高度であるため、これだけでは38高度すべてについて係数を決定することは困難である。従って観測値が得られない高度については前回の予測値を観測値とみなして用いている (大林 2000)。

こうして得られた時刻ごとの係数とモデル面の予想雲量とを (3.7.1) 式の右辺に代入することによって、雲量鉛直分布の予測値を作成する。なおガイダンスは1日4回算出するが、その都度新たに入電した

¹ 山田 雄二

観測値を元に係数を最適化していく。

3.7.3 検証結果

静力学MSMから非静力学MSMへの変更に伴うガイダンス精度の変化を調べるため、同一期間についての両モデルによるガイダンスの検証を行った。非静力学MSMのガイダンスは試験運用開始後の4月24日から算出を開始したが、その際に初期値として静力学MSMの係数を用いた。その後、逐次カルマンフィルターによる最適化を行い、2004年6月1日～30日の期間を検証期間とした。

雲の予報は主として低シーリングの有無の判断に用いられることから、ガイダンスの精度検証もシーリング¹に換算して行った。検証では両モデルの雲ガイダンスによるシーリングと、航空気象観測報(METAR, SPECI, SCAN)から求めたシーリングとを比較した。24時間観測値が得られる12空港²について、シーリングが200, 400, 600, 1000, 2000, 3000, 5000フィートのそれぞれを閾値として、スレットスコア、バイアスコアを算出した結果を図3.7.1に示す。これによると非静力学MSMは静力学MSMに比べて、各閾値でスレットスコアは中立ないしは最大0.04大きくなり、バイアスコアは0.06～0.25大きくなって1により近づいた。同様の調査を全空港(能登、三宅島を除く73空港)についても行ったが(図3.7.2)12空港の場合の結果と大きな違いはなく、スレットスコアは閾値5000フィートの場合を除き、中立又は改善となった。

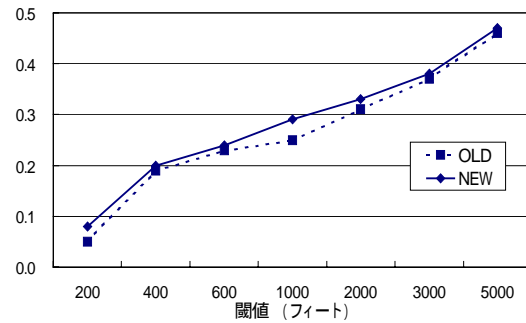
次に冬季の精度確認を行うため、2004年1月12日～27日の非静力学MSM性能評価試験期間のモデル面データを用いた検証を行った。使用できる期間が短いため、初期(11日18時UTC)の係数として上で述べた4月末から6月までの最適化の結果得られた係数を用いて期間中のガイダンスを算出し、17日～27日の結果を検証に用いた。同期間の静力学MSMガイダンスとの比較を図3.7.3に示す。得られたスレットスコアによれば、概ねどの閾値でも中立又は改善という結果が得られた。バイアスコアについても、観測事例数の少ない閾値200, 400フィートを除き傾向は変わっていない。検証期間が短いためこれだけで冬季の性能を結論付けることは難しいものの、少なくとも静力学MSMのガイダンスに比べて大きな特性の変化が無いことは確認できたと言えよう。

以上のことから今回の予報モデルの移行によって雲ガイダンスの精度は中立、又は若干の改善となったと判断される。

¹ 雲量 5/8 以上の最低雲底高度

² 成田国際、東京国際、関西国際、大阪国際、新千歳、福岡、名古屋、那覇、小松、美保、徳島、三沢の各空港

スレットスコア (12地点)



バイアスコア (12地点)

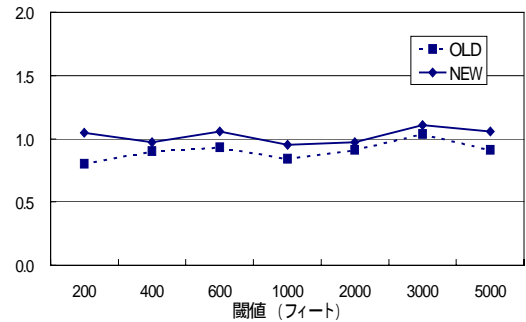
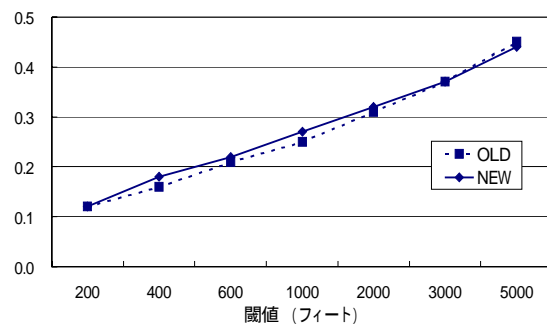


図3.7.1 24時間観測の12空港についてTAF-S雲ガイダンスから求めたシーリングのスレットスコア(上)とバイアスコア(下)。実線(NEW)は非静力学MSM、破線(OLD)は静力学MSMの結果。検証期間は2004年6月1日～30日。

スレットスコア (73地点)



バイアスコア (73地点)

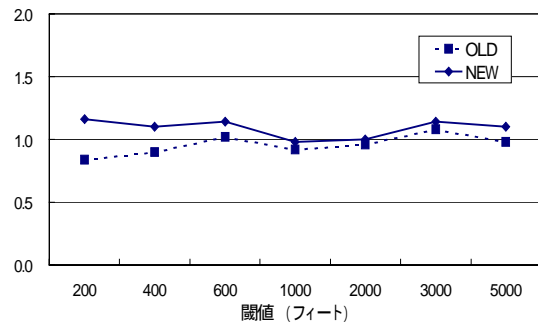


図3.7.2 図3.7.1と同様。ただし全国73空港についてスコアを求めた。

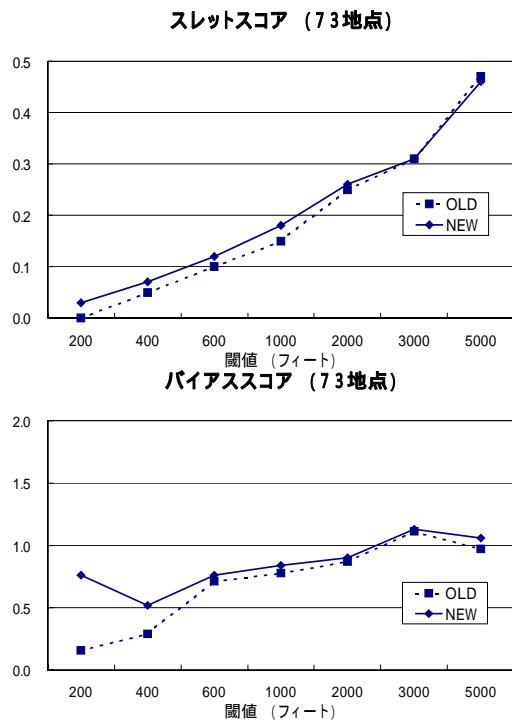


図3.7.3 図3.7.2と同様。ただし検証期間は2004年1月17日～27日。

3.7.4 利用上の留意点

今回の予報モデルの変更に対して、雲ガイダンスの算出方法は従来のものを踏襲した。このガイダンスを利用するにあたっての留意点を2点指摘しておきたい。まず第1点として、低シーリングの発生頻度が極端に少ない空港については、係数の最適化が進まないことが予想されるという点である。低シーリングがごく稀にしか起きない地点の場合、低い雲については適切な雲量が算出されていない可能性が高いので、注意深く利用していただきたい。第2点として、予測式の説明変数がモデルの相対湿度（を雲量に換算したもの）だけであることである。移流霧のように、その場所の相対湿度以外の気象要素に大きく依存する現象に対しては、現在の方法は必ずしも有効ではない。実況監視等、他の情報によりガイダンスを適切に修正しつつ利用していただきたい。

3.7.5 今後の課題

相対湿度と雲量の関係は、地点、高度、季節等に依存すると思われるが、現在の方法ではモデル面の相対湿度から雲量への換算には上層、中層、下層のそれぞれにおいて固定的な関係を用いている。モデルの相対湿度と雲量の対応関係を地点・季節別に最

適化することで、精度の向上が期待できると考えられる。また、非静力学MSMで導入された雲微物理過程で得られる水物質予報値の活用についても、並行して取り組む計画である。

参考文献

- 大林正典, 2000: 航空ガイダンス. 平成12年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 44-45.
- 大林正典, 2002: 雲に関するガイダンス. 平成14年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 50-51.
- 細見卓也, 1999: 雲水の予報変数化. 平成11年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 52-57.

3.8 国内航空悪天GPV¹

3.8.1 はじめに

国内航空悪天GPVは、国内の空域悪天情報作成を支援するための資料である。GPVはMSMモデル面予報値から作成しており、モデルの持つ鉛直分解能を最大限に活用している。国内航空悪天GPVは航空官署に配信されるだけでなく、FAX図（国内悪天12時間予想図・国内航空路6/12時間予想断面図）作成の元データとしても使用している。

非静力学MSMの現業化に先立ち、非静力学および静力学MSMから作成した国内航空悪天GPVの比較検証を行った結果、非静力学MSM国内航空悪天GPVは、静力学MSM国内航空悪天GPVと同等又はそれ以上の予測精度を持つことが確かめられた。また、非静力学モデルの導入に伴いMSMの湿度の予報特性が変化したことにより（第2.2節）国内航空悪天GPVや国内航空路6/12時間予想断面図の湿度や湿域（露点差が3以下の領域）の予報特性も変わることが分かった。

本節ではまず、国内航空悪天GPVで独自に作成している航空悪天要素である、乱気流指数と積乱雲量について概要を述べる。次にこれらの要素の検証結果を示し、非静力学MSM国内航空悪天GPVを利用する上での留意点を述べる。また、湿度の予報特性の違いについても述べる。風・気温・相対湿度・降水量など、MSM本体の検証結果については第2.2節を参照してもらいたい。乱気流指数の過去の検証結果等については、大林・榊原（2000）や大林（2001）を参照してもらいたい。積乱雲量の作成手法は高田（1997）でも述べられているが、現在のものとはやや異なる。

以下では表記を簡単にするため、国内航空悪天GPVを悪天GPV、非静力学MSMから作成する国内航空悪天GPVをNHM悪天GPV、静力学MSMから作成する国内航空悪天GPVをMSM悪天GPVと書く。

3.8.2 航空悪天要素の利用の仕方と作成手法

悪天GPVでは、乱気流指数（Turb）と積乱雲量²（SigCB）を、MSMの要素から作成している。ここでは、これらの要素の利用の仕方と作成手法について概要を述べる。悪天GPVの仕様については、第3.1節を参照してもらいたい。

¹ 工藤 淳

² 積乱雲量（SigCB）の他に、中層雲量（SigCM）と下層雲量（SigCL）もMSMから作成している要素ではあるが、中・下層雲量は、0～10の整数値で表される数値予報雲量（NwpCL, NwpCM）を0～8の整数値に換算しただけのものであり、それ以外の変更を加えていないため、ここでは特には触れない。

(1) 乱気流指数

乱気流指数は、晴天乱気流を予測するための指数である。現在の乱気流指数は、MSMモデル面予報値から作成した、風の鉛直シアを用いている。晴天乱気流には主に、ケルビン ヘルムホルツ波から生成されるものと、山岳波から生成されるものの2種類がある。風の鉛直シアは、この内、ケルビン ヘルムホルツ波による乱気流を予測する指標の1つである。一般に、鉛直シアが大きいほど乱気流の発生頻度は高くなる。晴天乱気流は対流雲中の乱気流と違い、機上での実況把握が困難であるため、予測精度の向上が望まれている。

乱気流指数は、鉛直方向に2000ft間隔のフライトレベル面で作成している。各フライトレベル面における乱気流指数は、各モデル面間の鉛直シアを算出後、その値をスプライン内挿することで求めている。MSMモデル面は上層ほど鉛直分解能が低いいため、モデル面上の風を正確に予測できたとしても、上層ほど実際の鉛直シアよりも小さな値が求まる傾向にある。

国内悪天12時間予想図（図3.8.1）は、悪天GPVから作成している。国内悪天12時間予想図では、風の鉛直シアが16kt/1000ft以上を並（MOD）、26kt/1000ft以上を強い（SEV）乱気流発生の目安として、フライトレベルと共に表示している。非静力学MSM導入後もこれらの閾値に変更は加えない。第3.8.3項の留意点を参照した上で、晴天乱気流予測の指標として利用してもらいたい。

(2) 積乱雲量

積乱雲は、落雷、ダウンバースト、ひょう、乱気流、着氷など、航空機の離着陸や飛行に支障をきたす現象を伴う。積乱雲量は、これらの悪天をもたらす積乱雲を予測する指標である。

L-ADESS多画面平面図上では、積乱雲量（SigCB）

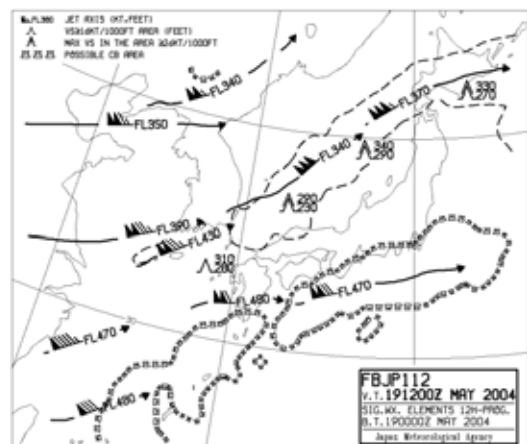


図3.8.1 国内悪天12時間予想図（FBJP112）。12時間後のジェット軸、乱気流、積乱雲域の予想を自動作成し描画している。

は0～8の整数値で表されるが、GPVとして出力している値には0, 2, 5, 7だけを使用している。各値に対応させている積乱雲の状態を表3.8.1にまとめた。国内悪天12時間予想図(図3.8.1)では、GPVを平滑化した後、積乱雲量が0.8以上である領域を積乱雲域として表示している。

積乱雲量の決定には、ショワルターの安定指数(SSI)とMSMで予想された1時間降水量(R1)を用いている。SSIについては月別に、R1については月別・GPVの座標別に、各積乱雲量に対応する閾値を設定し、SSIとR1が共に閾値を上回る場合に積乱雲ありと予測している。例えば、東京付近でのSSI, R1の閾値は表3.8.2のように設定してある。

R1については、モデルの予測値を実況に近づけるため、適当な比率を掛けた上で閾値と比較する。比率は過去の予想値と解析雨量値を比較した結果から求め、その値は毎回更新している。

$$ratio_{new} = ratio_{old} + \left(\frac{RA}{R1} - ratio_{old} \right) \times w \quad (3.8.1)$$

$ratio_{new}$ は更新後の比率、 $ratio_{old}$ は更新前の比率、 RA は悪天GPVの格子内に含まれる2.5km解析雨量の最大値、 w は重みで0.1に固定してある。これを2初期値前の6時間予報と3初期値前の12時間予報のR1に対して行い、新しい比率を決定している³。

3.8.3 検証結果と利用上の留意点

乱気流指数と積乱雲量について、NHM・MSM悪天GPVの精度比較を行った。ここでは検証結果を示し、NHM悪天GPVを利用する上での留意点について述べる。また、NHM悪天GPVとMSM悪天GPVでの、湿度の違いについても述べる。

表3.8.1 積乱雲量に対応させている積乱雲の状態

積乱雲量	説明
0	積乱雲なし
2	ISOL (孤立している)
5	OCNL (明らかに分離している)
7	FRQ(ほとんど、または全く分離していない)

表3.8.2 積乱雲量を決定する閾値の例

東京付近での、各積乱雲量に対する1月と7月の閾値

積乱雲量	2	5	7
SSI(1月)	11 以下	4 以下	-1 以下
SSI(7月)	7 以下	0 以下	-5 以下
R1(1月)	約7mm以上	約18mm以上	約36mm以上
R1(7月)	約12mm以上	約30mm以上	約60mm以上

³ 比率の更新は RA と $R1$ が共に 0.1mm/h 以上である場合に行う。 $RA/R1 > 30.0$ となる場合には $RA/R1 = 30.0$ とし、 $ratio_{new} < 1.0$ となった場合には、 $ratio_{new} = 1.0$ としている。

(1) 乱気流指数

乱気流指数と比較する実況には、パイロットによる揺れの通報(カンパニーパイレップ)を用いる。航空機は、乱気流が予測された場合や、先行している航空機が乱気流に遭遇した場合、その空域を避けて飛ぶ傾向にある。このため、検証で一般的に用いられるスレットスコアやバイアスコアではなく、以下で定義する捕捉率と体積率を用いて検証を行う。

$$\text{捕捉率} = \frac{T_{in}}{T_{in} + T_{out}} \quad (3.8.2)$$

$$\text{体積率} = \frac{T_{in} + N_{in}}{T_{in} + N_{in} + T_{out} + N_{out}} \quad (3.8.3)$$

$T_{in}, T_{out}, N_{in}, N_{out}$ は表3.8.3で定義するカンパニーパイレップの通報数である。例えば T_{in} は、乱気流指数がある閾値以上の領域から報じられた、揺れありの通報数である。捕捉率は、全ての揺れありの通報に対する、閾値以上の領域から報じられた揺れあり通報の割合で、体積率は、全ての通報に対する、閾値以上の領域から報じられた通報の割合である。捕捉率が大きく体積率が小さいほど、多くの乱気流を限定した領域で予想したことになり、良い予報と言える。

乱気流指数は、晴天乱気流を対象とした指数である。このため検証では、対流雲中の乱気流を除く必要がある。カンパニーパイレップ通報には、飛行状態と雲の関係について報じる欄(SK)があるものの、これを報じてくる通報は少ない。そこで解析雨量を用いて、対流雲中の乱気流か否かを判別した。悪天GPVの格子に含まれる2.5km解析雨量のうち、多い方から5番目の値が3mm以上であった場合、検証対象から除外した。

図3.8.2, 図3.8.3に、NHM・MSM悪天GPVを用いた乱気流捕捉検証の結果を示す。検証期間は2004年4月～6月の3ヶ月間である。MOD(並)以上の通報を揺れありとし、予報時刻の前後30分間に通報されたカンパニーパイレップをその時刻の実況とした。ここでは全ての予報時間(03,06,09,12,15,18時間)について足し合わせた結果⁴のみ示すが、予報時間別に見てもほぼ同様の傾向が見られた。

図3.8.2は各乱気流指数の閾値毎に、捕捉率を体積率に対してプロットした図である。捕捉率が大きく

表3.8.3 乱気流捕捉検証に用いる通報数の定義

	揺れあり	揺れなし
閾値以上	T_{in}	N_{in}
閾値未満	T_{out}	N_{out}

⁴ 揺れありの通報は全通報の1%程度に過ぎない。予報時間別に検証するとサンプル数が少ないため、ここでは全ての予報時間について足し合わせた結果を示す。

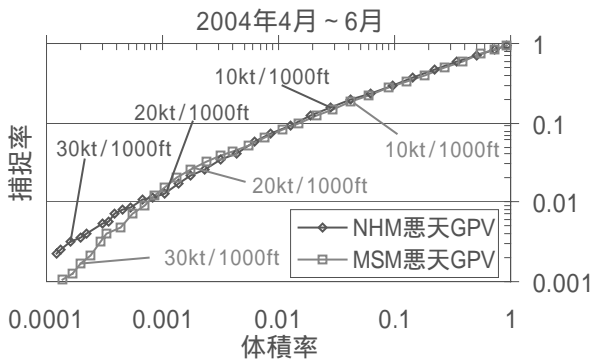


図3.8.2 2004年4月～6月の乱気流検証結果。右上の点が乱気流指数1kt/1000ftにおける値。左上へ行くに従って、1kt/1000ftずつ乱気流指数が増えて行く。捕捉率が大きく体積率が小さいほど予報の精度は良い。

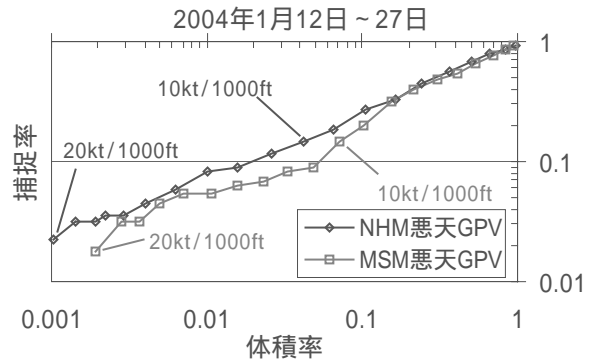


図3.8.4 2004年1月の乱気流検証結果。図の見方は図3.8.2と同じ。統計期間が短いことに注意されたい。

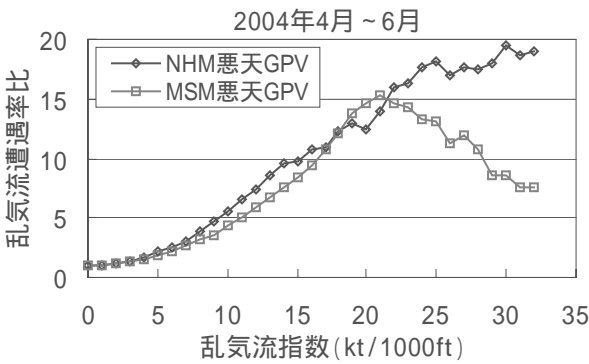


図3.8.3 2004年4月～6月の乱気流遭遇率比。平均状態と比べて、各閾値以上の領域で何倍乱気流に遭遇したかを示す。

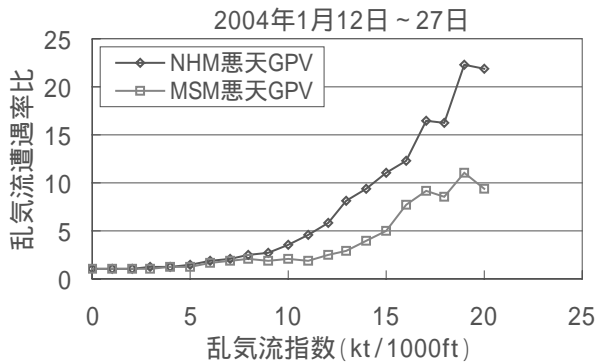


図3.8.5 2004年1月の乱気流遭遇率比。図の見方は図3.8.3と同じ。統計期間が短いことに注意されたい。

体積率が小さいほど良いので、図で左上にあるほど良い予報をしていることになる。同じ閾値で比べた場合、閾値が26kt/1000ft以上では、捕捉率、体積率ともにNHM悪天GPVがMSM悪天GPVを上回っている。その他の閾値では、NHM・MSM悪天GPVの乱気流捕捉精度は同程度と言える。

図3.8.3に、各閾値での乱気流遭遇率比を示す。乱気流遭遇率比は、

$$\begin{aligned} \text{乱気流遭遇率比} &= \frac{T_{in}}{T_{in} + N_{in}} \div \frac{T_{in} + T_{out}}{T_{in} + N_{in} + T_{out} + N_{out}} \\ &= \frac{\text{閾値内の領域で揺れに遭遇する確率}}{\text{全領域で揺れに遭遇する確率}} \end{aligned} \quad (3.8.4)$$

と定義される値で、平均的な状態と比べて閾値以上の領域で何倍揺れに遭遇したかを示す。この期間の全領域での揺れの遭遇確率は約1.3%であった。閾値16kt/1000ftでの乱気流遭遇率比は、NHM悪天GPVは約11倍、MSM悪天GPVは約9倍であり、この領域内で晴天乱気流に遭遇する確率は、NHM悪天GPV

では約14%、MSM悪天GPVでは約12%となる。閾値19～21kt/1000ftを除いて、NHM悪天GPVはMSM悪天GPVと同等以上の結果となった。第2.2節で述べられているように、非静力学MSMでは上層の風の予測精度が向上したため、乱気流捕捉精度も向上したと考えられる。

冬季（2004年1月12日～27日）における同様の検証結果を図3.8.4、図3.8.5に示す。この期間の検証では、ほぼ全ての閾値でNHM悪天GPVがMSM悪天GPVを上回っている。ただし、検証期間が短く乱気流の事例数が少ないため、結果は参考資料としていただきたい。

NHM悪天GPVの乱気流指数を利用する上で、注意すべき点がある。それはある閾値で囲まれる領域の体積が、NHM悪天GPVとMSM悪天GPVとで異なることである。このため、例えば国内悪天12時間予想図（図3.8.1）で囲まれる乱気流領域の面積が変わってくる。

図3.8.6はMSM悪天GPVに対するNHM悪天GPVのある乱気流指数で囲まれる領域の体積比である。図から、乱気流指数が2～18kt/1000ftでは、MSM悪

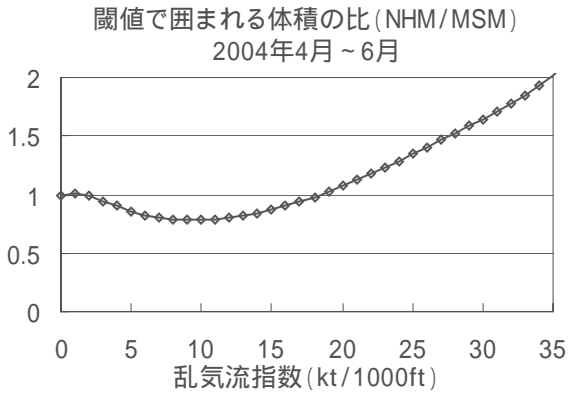


図3.8.6 MSM悪天GPVに対する、NHM悪天GPVのある乱気流指数で囲まれる領域の体積比。2～18kt/1000ftではMSM悪天GPVが囲む体積が大きく、それ以外ではNHM悪天GPVの体積が大きい。

天GPVの体積が大きく、それ以外の閾値ではNHM悪天GPVの体積が大きくなるのが分かる。国内悪天12時間予想図で並 (MOD) の乱気流発生予測の目安としている16kt/1000ftでの体積比は約0.91、強い (SEV) 乱気流発生予測の目安としている26kt/1000ftでは約1.4であった。このことから、非静力学MSM導入後は、国内悪天12時間予想図で並の乱気流予想領域として示される領域の面積はやや狭くなり、逆に強い乱気流が予想される回数は増加する、と考えられる。

(2) 積乱雲域

積乱雲域を検証する実況には、雷監視システム (LIDEN) の発雷実況⁵ (対地放電のみ⁶) を用いる。過去の発雷実況を基にLIDENの探知範囲を設定し、その領域内に含まれる格子点を対象として検証を行った。発雷のあった地点に最も近い格子点を発雷ありとし、発雷数は考慮していない。予報時刻の前後30分間に観測された発雷をその時刻の実況とした。2004年5月のデータを用いて1時間降水量に掛ける比率を学習させ、2004年6月～7月の2ヶ月間のデータで検証を行った。

以下で定義する積乱雲遭遇率比を用いて、積乱雲域の検証を行う。

⁵ 発雷のあった地点には積乱雲があると言えるが、積乱雲があったとしても発雷があるとは言えない。一般に、発雷域は積乱雲域に含まれるが一致はしない。発雷域は積乱雲域を評価するには不十分であるが、現状で入手できる実況資料の中では、最も積乱雲域との対応がよいと考え、発雷実況を用いて検証を行った。なお、雲解析情報図の対流雲域は現在作成されていないため、積乱雲域の実況に用いることはできない。

⁶ 対地放電は雲放電と比べて探知範囲が広く観測精度も高い。また、後で述べる発雷の一様性を観測の側から保つためにも、ここでは対地放電のみを用いる。

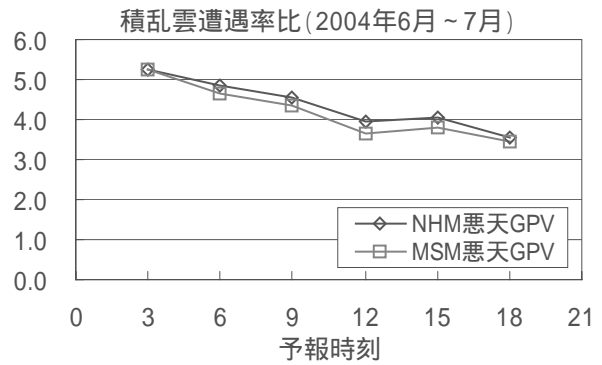


図3.8.7 2004年6月～7月の積乱雲遭遇率比。平均状態と比べて、積乱雲域では何倍積乱雲に遭遇しやすいかを示す。発雷実況から求めた値であるが、積乱雲中に一様に発雷が分布していると仮定することで、積乱雲実況から求められるであろう積乱雲遭遇率比と一致する。

$$\text{積乱雲遭遇率比} = \frac{FO}{FO + FX} \div \frac{FO + XO}{FO + FX + XO + XX} \quad (3.8.5)$$

FO, XO, FX, XX は表3.8.4の分割表で定義する。積乱雲遭遇率比とは、積乱雲が予測された領域で、平均状態と比べて何倍積乱雲に遭遇しやすいかを示した値である。積乱雲域と発雷域は異なるため、発雷実況から与えられる分割表の値 (これを $FO_{TH}, XO_{TH}, FX_{TH}, XX_{TH}$ と定義する) と、積乱雲実況から与えられるべき分割表の値 (これを $FO_{CB}, XO_{CB}, FX_{CB}, XX_{CB}$ と定義する) も違ってくる。ただし、積乱雲域の中で、確率 p で一様に発雷が起きていると仮定すれば、

$$FO_{TH} = pFO_{CB} \quad (3.8.6)$$

$$XO_{TH} = pXO_{CB} \quad (3.8.7)$$

$$FO_{TH} + FX_{TH} = FO_{CB} + FX_{CB} \quad (3.8.8)$$

$$XO_{TH} + XX_{TH} = XO_{CB} + XX_{CB} \quad (3.8.9)$$

という関係が成り立ち、これらを用いると、 $TH \rightarrow CB$ という変換に対して積乱雲遭遇率比は不変であることが分かる。すなわち、発雷実況から求めた積乱雲遭遇率比と、積乱雲実況から求めた積乱雲遭遇率比は、確率 p に依らず等しくなる。

図3.8.7に積乱雲遭遇率比を示す。図から、全ての予報時刻に対して、NHM悪天GPVはMSM悪天GPVを上回っていることが分かる。全予報時刻で積乱

表3.8.4 積乱雲域検証に用いる予報と実況の分割表

		実況	
		あり	なし
予報	あり	FO	FX
	なし	XO	XX

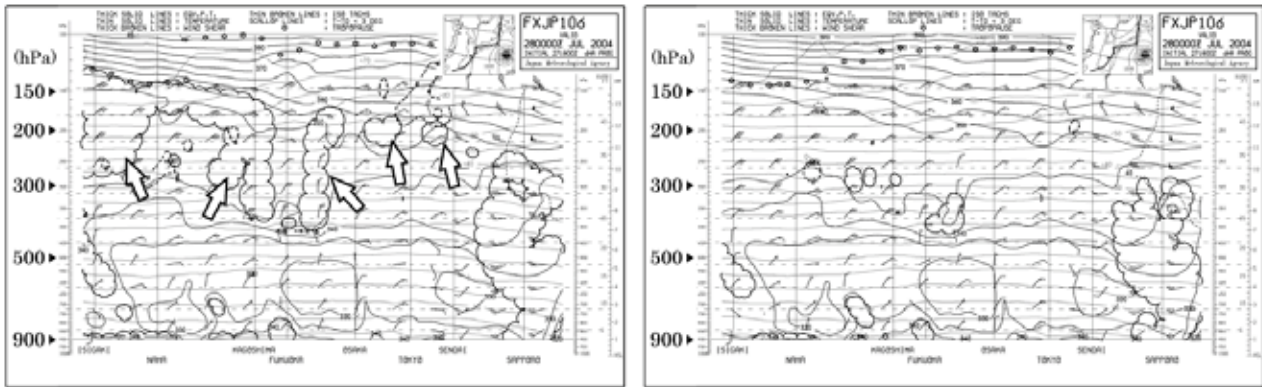


図3.8.8 2004年7月27日18UTC初期値の国内航空路6時間予想断面図 (FXJP106)。(左) MSM悪天GPVから作成した予想断面図。(右) NHM悪天GPVから作成した予想断面図。左図の矢印で示した露点差3以下の領域が、右図では見られなくなっている。300hPaより上層での差が顕著であり、それより下層では大きな差は見られない。

雲遭遇率比を平均すると、NHM悪天GPVは4.4、MSM悪天GPVは4.2であった。

図には示さないが、NHM悪天GPVが予想する積乱雲域の面積は、MSM悪天GPVと比べて、平均で約3%小さくなった。これは第2.3節で述べられているように、非静力学MSMでは強い降水が集中しやすくなったためと考えられる。

NHM悪天GPVの積乱雲量を使用する上での留意点は特にない。非静力学MSM導入後も今までと同等以上の精度が得られると期待される。

(3) 上層の湿域

第2.2節の図2.2.8b、図2.2.9で示されているように、非静力学MSMでは、静力学MSMと比べて上層の相対湿度のバイアスが小さくなり、1に近づいている。また非静力学MSMの相対湿度の平方根平均二乗誤差 (RMSE) は、静力学MSMよりも小さくなっている。これらの結果から、静力学MSMで過大に表現されていた上層の湿りが、非静力学MSMでは少なくなり、改善されたと言える。ただし第2.2.3項でも述べられているように、この差は初期値の作成手法に起因している可能性が高い。

バイアスが小さくなったことにより、悪天GPVや国内航空路6/12時間予想断面図 (FXJP106,112) で示される、上層の湿域 (露点差が3以下の領域) の予報特性も変わる。図3.8.8に2004年7月27日18UTC初期値の悪天GPVから作成したFXJP106を示す。主に300hPaより上層で、MSM悪天GPVで表現されている湿域 (図中の矢印部分) が、NHM悪天GPVでは表現されなくなっている。このような違いは、本事例に限らずほぼ全ての初期値・予報時刻についても同様に見られた。NHM悪天GPVや予想断面図の湿域を利用する場合には、特性が大きく変わったことに注意してもらいたい。

3.8.4 まとめ

本節では主に、乱気流指数と積乱雲量についての概要と検証結果を述べた。NHM悪天GPVとMSM悪天GPVを比較検証した結果、乱気流指数、積乱雲量の精度は同等又はそれ以上であることが確かめられた。乱気流指数に関しては、ある閾値で囲まれる領域の体積が、NHM悪天GPVとMSM悪天GPVとで違うことも分かった。また、悪天GPVや予想断面図で上層の湿域の表現が変わることも述べた。これらの特性を把握した上で、今後の空域予報に役立ててもらいたい。

参考文献

- 大林正典, 榊原茂記, 2000: 航空気象予報. 数値予報課報告・別冊第47号, 42-43.
- 大林正典, 2001: 航空気象予報支援資料. 平成13年度数値予報研修テキスト, 47-49.
- 高田伸一, 1997: 国内悪天予想資料のCB予測について. 平成8年度航空気象予報技術検討会及び航空気象予報研修, 123-126.

3.9 毎時風解析¹

3.9.1 はじめに

毎時風解析は風の3次元的な状態を表す実況監視資料である。メソスケール擾乱の監視や、数値予報と実況とのずれを検出して予想の修正に役立てることを目的とする。現在はそのデータ特性を把握するための慣熟的な利用が行われている。利用開始当初は「毎時下層風解析」と呼ばれていたが、2003年11月に航空ユーザー向けに上層風も解析するようになったことを契機に「毎時風解析」という名称に変更された(表3.9.1)。

本節では毎時風解析の概要及び、メソ数値予報モデル(MSM)が非静力学MSMに変わったことによる影響について述べる。

3.9.2 毎時風解析の仕様

毎時風解析では10km格子における風の東西・南北成分を1時間ごとに解析している(表3.9.2)。解析結果はMSMと同じ領域・高度面のGPV²として、毎正時30分頃に予報担当官署及び航空官署のL/A端末へ配信される(表3.1.1)。また解析で使用した観測値の種類及びそれぞれのデータ数を運用情報電文として配信している。

これとは別に航空ユーザー(航空官署、航空会社等)に対して、より上空までの資料を気象情報提供環境WEBページで提供している(工藤 2004)。水平風、鉛直ウィンドシア、等風速線を、5000ft ~ 45000ft (約850hPa ~ 150hPa)の2000ft間隔の平面図及び主要航空路や経度線に沿った断面図として見る事ができる。

3.9.3 解析の手法

毎時風解析は、MSMの風の予想値を第一推定値とし、これをウィンドプロファイラ等の観測値で補正して作成する。補正量は第一推定値と観測値とのずれに重みをかけて求める。この重みは観測点の上で最も大きく、距離が離れるにつれて小さくなる。ウィンドプロファイラ等の高層の観測値は観測地点から200km程度、アメダスは50km程度離れた地点で、重みが観測点付近の概ね半分になるように調整している。また観測の誤差が考慮されるため、観測点上でも解析値と観測値とは必ずしも一致しない。解析手法の詳細については酒井(2001)を参照願いたい。

観測値としては、高層風(975hPa等)の解析にウィンドプロファイラ、ドップラーレーダー、航空機自動観測

表3.9.1 毎時風解析の履歴

2002/01/16 「毎時下層風解析」という名称で慣熟的な利用を開始	WINDAS:ウィンドプロファイラ DPR:ドップラーレーダー ACARS:航空機自動観測
04/17 成田・東京(羽田)のDPR利用開始	
2003/06/12 新千歳・大阪(伊丹)・関西のDPR利用開始	
11/27 ACARS利用開始、WINDASの鉛直間引き間隔を縮小	
解析範囲を上層に拡張し、名称を「毎時風解析」に変更	
12/11 配信データに地上風を追加	
2004/02/23 運用情報電文の発信開始	
03/18 那覇のDPR利用開始	
06/01 航空ユーザー向け毎時風解析の提供開始	
06/21 台風中心から100km以内のレーダーサイトのDPRの未使用化	
09/01 第一推定値を非静力学MSMに変更	

表3.9.2 毎時風解析の仕様

解析方法	地上:2次元最適内挿法	上層:3次元最適内挿法(モデル面解析(注))
観測値	地上:アメダス	上層:WINDAS、DPR、ACARS
	ACARSは解析時刻の前後15分間、その他は正時のデータのみを使用。 DPRはレーダーサイトから50km以内にある観測値を使用。台風から100km以内にあるレーダーサイトの観測値は使用しない。	
第一推定値	解析時点における最新のMSM予報値(通常は02~07時間予報)	
解析要素	風(U, V成分)	
解析範囲	水平:日本周辺の領域・10km格子	鉛直:約150hPaまで
解析時刻	毎正時(計算開始は毎正時後20分)	

注:解析は静力学MSMのモデル面(z座標系)で行う。第一推定値は非静力学MSMのモデル面(z*座標系)を座標系に変換したものを使用する。

¹ 西嶋 信

² 地上風の配信格子間隔が20kmである点がMSMと異なる。

(ACARS)を、地上風の解析にアメダスを使用している。地上風の解析と高層風の解析とは独立に行っており、ウィンドプロファイラ等の観測値は地上風解析に反映されないし、逆にアメダスは高層風の解析に影響を与えない。

(1) ウィンドプロファイラ

全国31か所にある観測点のデータを使用している。ウィンドプロファイラは水蒸気が多い方が高い高度まで観測できるので、平均的には夏季で約6～7km、冬季で約4km前後の高さまでの観測値が得られる(観測部観測課高層気象観測室 2003)。鉛直解像度は300m、最低高度は地上400mである。毎時風解析の開始当初はこれを600～900m程度の間隔に間引いて使用していた。その理由は、解析方法である最適内挿法の性質上、観測値が密集しすぎていると正常に計算できないためである。しかし下層寒気の移流など下層風の細かい鉛直シア構造をウィンドプロファイラが捉えていても、鉛直方向に観測値を間引くと毎時風解析には現れない場合がある。そこで2003年11月27日以降は鉛直間引き間隔を縮小し、概ね700hPaより下層ではすべてのウィンドプロファイラ観測値を使用している³。

(2) ドップラーレーダー

新千歳、成田、東京(羽田)、関西、大阪(伊丹)、那覇の各空港にあるレーダーサイトの観測値を使用している。ドップラーレーダーで観測できるのはビームに沿った方向の風速であるため、まず簡略化VVP法(多田 1994)により東西・南北方向の風速に変換する。レーダーサイトからの距離が大きくなると変換誤差が大きくなるので、レーダーサイトから50km以内の観測値のみを解析に使用する。また台風中心付近のように風向風速が急変する領域では簡略化VVP法の誤差が大きいため、台風・熱帯低気圧の中心から100km以内にあるレーダーサイトの観測値は使用していない(2004年6月21日以降)。

(3) 航空機自動観測 (ACARS)

ACARSデータは航空機による気温と風の自動観測データである(楠・弟子丸 1994)。毎時風解析では風のみを使用している。航空機の巡航高度である300hPa付近の観測値が多く、空港付近では500hPa以下の観測値も得られる。深夜から早朝にかけては飛行する航空機が少ないためほとんど入電しない。高度が高いところではウィンドプロファイラの観測値が少ないため、ACARSデータは上層の解析に大きな効果を与えている。

(4) アメダス

アメダスは地上風の解析にのみ使用する。測風塔の

高さによる補正や、MSMモデル地形の標高と実際の標高との違いによる補正は行っていない。

3.9.4 解析の事例 (地上風)

非静力学MSMを第一推定値とした地上風の解析事例を示す。2004年6月30日、上空に寒気を伴ったトラフ(図3.9.1)による対流不安定な状態の中で、静岡県駿河湾沿岸では内陸の冷氣域と海上からの暖かい南西風により局地前線が形成され、その付近で強雨が継続した。静岡の30日の日降水量は368mmで、9時21分までの1時間に87.5mmの降水を観測した。降水の最盛期にあたる6月30日9時のレーダー・アメダス解析雨量を図3.9.2に示す。なお、この事例について非静力学MSMは3時間降水量10mm程度の降水しか予想していなかった(図略)⁴。

同時刻の地上風解析を図3.9.3に示す。降水が集中している静岡から御前崎にかけての領域(図中の楕円)では、MSM予想値では海上と陸上の風速差による収束は見られるものの、風向は一様に南西である。一方、解析値では東北東の風となっていて、太平洋からの南西風との収束が明瞭に表現されている。このように、モデルの予想値を最新の観測値で補正することで、より実況に近い風の分布を得ることができる。

3.9.5 非静力学MSMへの変更による影響

第2.2節でまとめられているとおり、非静力学MSMと静力学MSMで予想される風の差は小さい。毎時風解析ではさらに観測値で補正されるので、非静力学MSMへの変更による解析値の特性の変化は小さい。

3.9.6 利用上の注意

- ・毎時風解析が対象とするのはMSMで表現できるスケールの現象である。例えばダウンバーストなど時間・空間スケールが小さい現象は表現できない。
- ・海上など観測点から離れた領域では補正量が小さく、解析値はMSM予想値とほぼ同じものとなる。深夜から早朝にかけての上層もACARSデータが入電しないため同様である。衛星画像など他の実況監視資料と組み合わせて使う必要がある。
- ・アメダスの風観測値は地形の影響を大きく受けるため、地上風の解析値も地形の影響が大きい。例えば地形の影響で周囲よりも風が弱い(強い)アメダス観測点が存在すれば、その周辺の解析値は実際より小さい(大きい)値となる。

3.9.7 まとめと今後の計画

毎時風解析は3次元的な風の実況監視に有効な資料である一方で、MSM予想値を観測値で補正して作成し

³ 数か月間のテストで計算異常が発生しないことを確認した後に変更した。

⁴ 静力学MSMの予想降水量はさらに少なかった。

ていることによる限界もある。現在行われている慣熟的な利用を通して資料の特性を把握し、実況監視に役立てていただきたい。

今後はさらに、運輸多目的衛星で作成予定の毎時衛星風データの利用、解析要素への気温の追加、解析格子間隔の5km化、解析方法の3次元変分法への変更など、より有効な資料にするための改善を行っていく予定である。

参考文献

- 観測部観測課高層気象観測室, 2003: 局地的気象監視システム(WINDAS)による高層風観測業務の開始. 測候時報, **70**, 63-118.
- 楠昌司, 弟子丸卓也, 1994: 航空機データの新たな発展: ACARSデータ. 天気, **41**, 303-312.
- 工藤淳, 2004: 毎時風解析について. 航空気象ノート第63号, 気象庁航空気象管理官, 33-36.
- 酒井喜敏, 2001: 毎時下層風解析. 平成13年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 59-61.
- 多田英夫, 1994: 1台のドップラー気象レーダーから得られる風データの数値予報での利用. レーダー観測技術資料第43号, 気象庁観測部, 21-37.

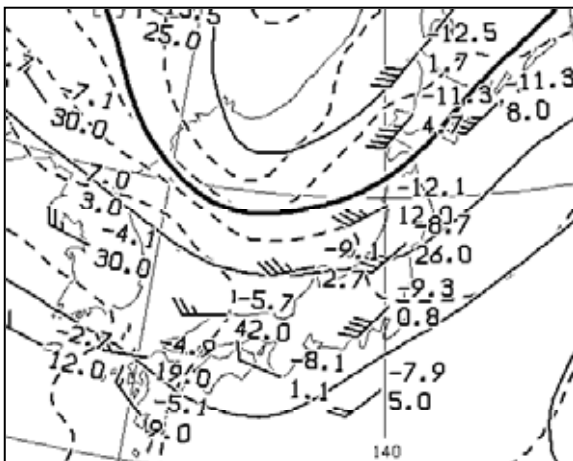


図3.9.1 2004年6月30日00UTC 500hPa高層天気図

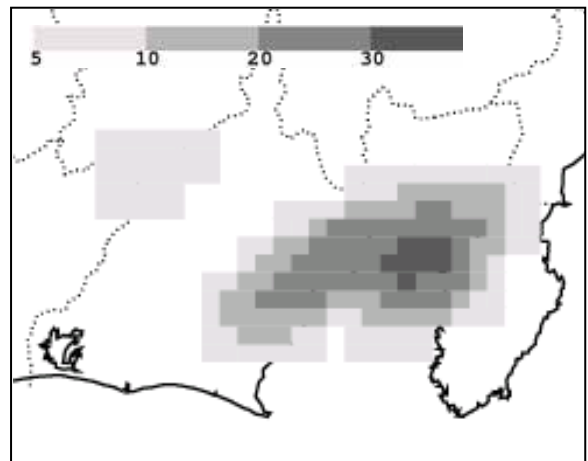


図3.9.2 2004年6月30日00UTC レーダー・アメダス解析雨量
前1時間降水量 (5mm/h以上の領域のみを描画)

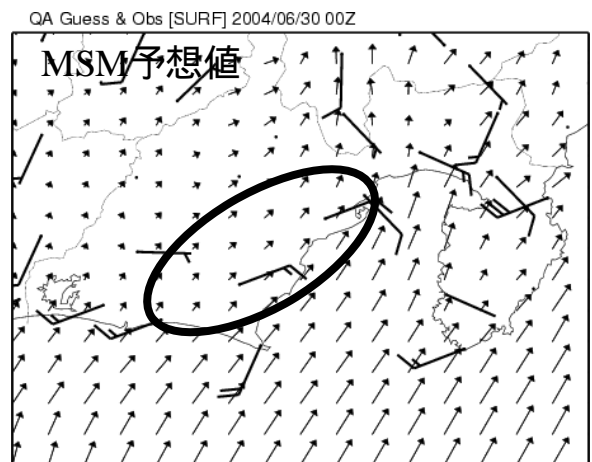
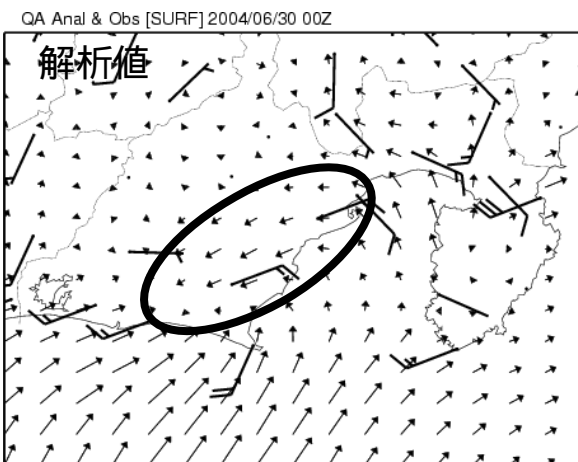


図3.9.3 2004年6月30日00UTC 地上風
左: 解析値とアメダス観測値 右: 非静力学MSM地上風予想値とアメダス観測値
→ 10m/s
矢羽は長い棒が2m/s