

第4章 トピックス

4.1 毎時大気解析の高度化¹

4.1.1 はじめに

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

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

4.1.2 毎時大気解析の仕様

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

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

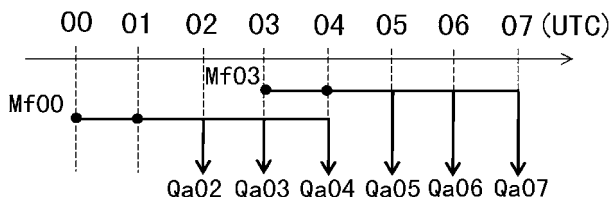


図4.1.1 毎時大気解析で通常用いられる第一推定値とMSM予報値の対応の模式図。例えば00UTC初期値のMSM(Mf00)による2時間予報値が、02UTCの毎時大気解析(Qa02)の第一推定値として用いられる。

¹ 藤田 匡

² ドップラーレーダーのビームに沿った方向の風速。

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

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

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

4.1.3 3次元変分法による毎時大気解析

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

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

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

4.1.4 毎時大気解析の精度

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

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

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

表4.1.1 2007年3月22日01UTCの変更前後の毎時大気解析の仕様

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

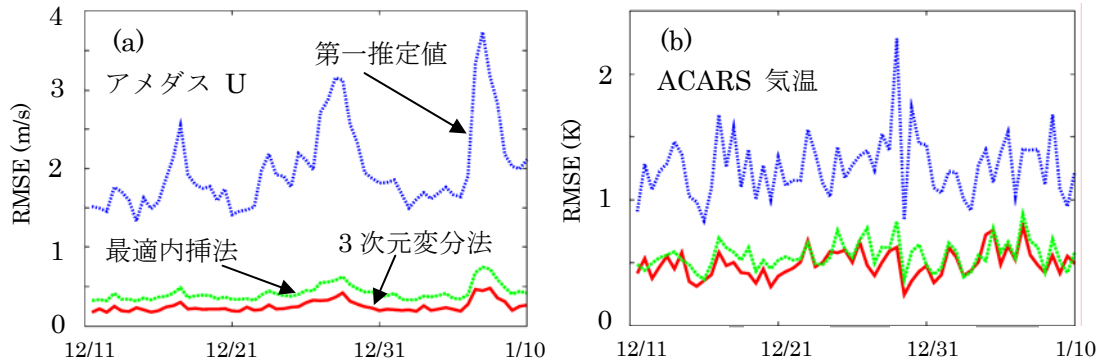


図4.1.2 毎時大気解析で同化された(a): アメダス風の東西成分、(b): 航空機自動観測(ACARS) 気温に対するRMSEの時系列。2006年12月11日12UTC～2007年1月10日00UTCの00、12 UTC。赤: 3次元変分法による解析値、緑: 最適内挿法による解析値、青: 第一推定値。

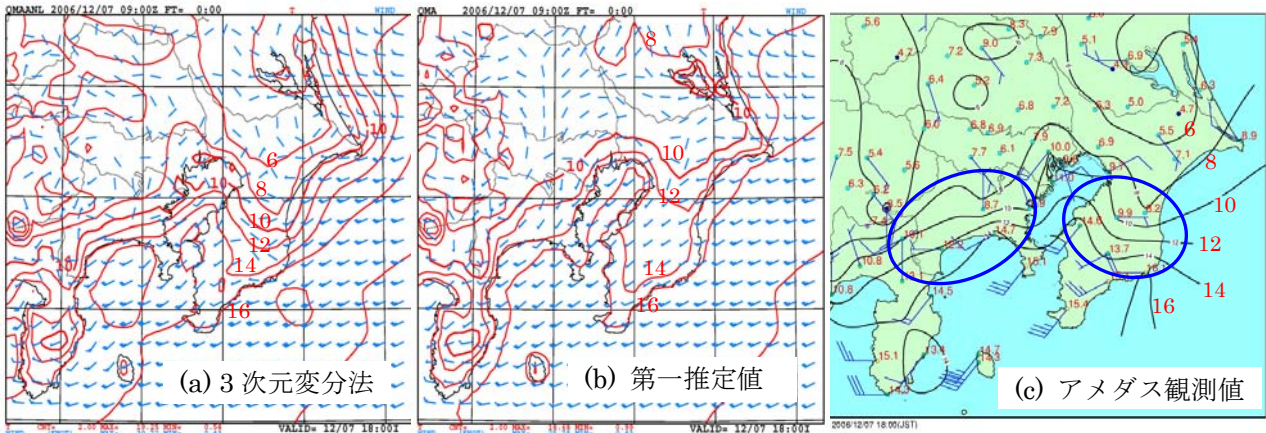


図4.1.3 2006年12月7日09UTCにおける関東地方南部の地上気温と風。(a): 3次元変分法による解析値、(b): 第一推定値、(c): アメダス地上観測値。等値線の間隔は2℃。矢羽の単位は、(a),(b): 長い羽10kt、短い羽5kt、(c): 長い羽2m/s、短い羽1m/s。相模湾沿岸、房総半島の収束帯(青実線の楕円領域)については本文参照。

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

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

4.1.5 地上気温、風解析の事例

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

この事例での第一推定値(図4.1.3b)は、MSMの12

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

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

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

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

4.1.6 ドップラー速度の同化の事例

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

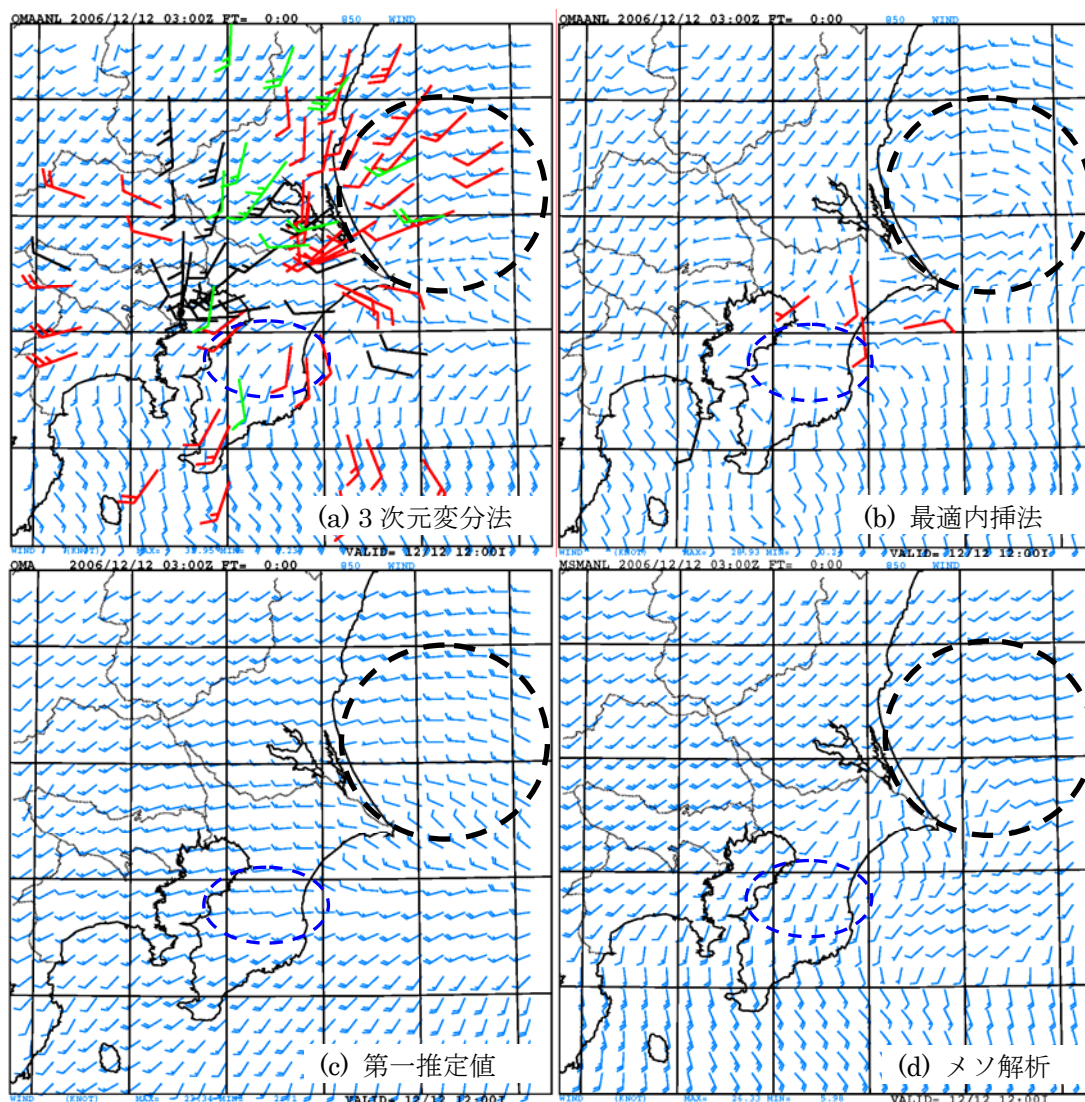


図4.1.4 2006年12月12日03UTCの関東地方における850hPa風。(a): 3次元変分法による毎時大気解析の解析値。(b): 最適内挿法による毎時大気解析の解析値。(c): 第一推定値 (MSMによる00UTC初期値の3時間予報値)、(d): メソ解析による解析値 (解析時刻03UTC)。(a)の矢羽はドップラーレーダーのドップラー速度 (矢羽の方向の速度成分)、(b)の矢羽はVVP風を示す (赤: 成田、黒: 羽田、緑: 東京、高度830-870hPaに分布するデータ)。黒破線の円は最適内挿法(b)で循環が解析されたおおよその位置を示す。青破線の楕円領域で3次元変分法、最適内挿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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

参考文献

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

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

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

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

4.2 ドップラーレーダーデータの利用¹

4.2.1 はじめに

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

気象庁は、空港と気象官署に気象ドップラーレーダーを設置している。空港気象ドップラーレーダーは、平成7年度から平成17年度の間全国8箇所(新千歳、成田、東京(羽田)、中部、大阪、関西、福岡、那覇)の空港に整備され、主に現地での監視業務に使用されている。また、気象官署の一般気象レーダーは、平成17年度からドップラー化が進められ、同年度に東京レーダーが、平成18年度に仙台、新潟、名古屋レーダーがドップラーレーダーに更新された。平成19年度には7ヶ所のレーダー(釧路、函館、松江、福岡、種子島、室戸岬及び沖縄レーダー)がドップラー化される予定である。これらのドップラーレーダーによるドップラー速度データは、平成17年3月から順次メソ解析で利用が開始され、メソ数値予報モデル(以下、MSMと略す)の予報精度、特に降水予報の改善を実現している。

4.2.2 メソ解析でのデータ利用

空港気象ドップラーレーダーのデータは、サイトから半径120kmの範囲内で得られるドップラー速度について、ビーム方向5km間隔・方位角5.625度間隔のボリューム内の平均した値と、平均をとるボリューム内のサンプル数、ドップラー速度の標準偏差、ドップラー速度の最大値と最小値の差といった統計情報を付加して、スーパーコンピュータシステム(以下、NAPSと略す)に送られている。メソ解析でのドップラー速度データの品質管理には、これらのすべての要素を利用している。

一方、気象官署の気象ドップラーレーダーは、サイトから半径150km(最下仰角のみ250km)の範囲内で、ビーム方向0.5km間隔・方位角0.703度間隔の高密度なドップラー速度データのみがNAPSに送られている。このデータも空港気象ドップラーレーダーと同様にメソ解析で使用するため、ドップラー速度の空間平均値、サンプル数、標準偏差、最大値と最小値の差をNAPS上で計算して、データの品質管理に利用している。

ドップラー速度データの品質管理の詳細については、平成16年度数値予報研修テキスト(小泉2004)を参照

してもらふこととし、これ以降に改良した点は、第一にレーダーサイトの近くでの観測データの密集による悪影響を防ぐため、従来までの1仰角のボリューム内データの水平間引きから、全仰角のボリューム内の3次元間引きに変更した点である。また、第二に新潟ドップラーレーダーのように負の仰角をもつ観測データが新たに加わり、シークラッターによる偽の弱風データの混入が問題となったため、その対策としてレーダーのビーム方向に地球の曲率を考慮することと、負仰角での10m/s以下(通常5m/s以下)のドップラー速度データを使用しないことで偽の弱風の除去を行った点である。

図4.2.1に新潟ドップラーレーダーの仰角-0.3度のビームの中心高度と、ビーム幅を1.03度とした上限と下限の高度を示す。図からビーム幅の下限高度がサイトから70~180kmの距離で高度0以下になることが示され、海面上のビームの反射によるシークラッターが偽の弱風としてデータに混入する危険性が高いことがわかる。

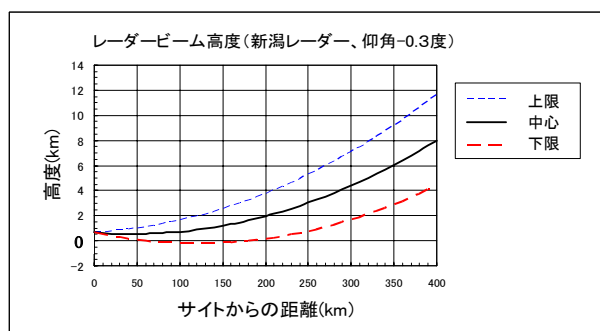


図 4.2.1 新潟レーダーの仰角-0.3度のビーム高度。実線はビームの中心、破線はビーム幅の上限と下限。

一般的にドップラー速度の不完全な風から解析で利用する風ベクトルを求めるためには、2台のドップラーレーダーが必要とされ、レーダーが近接した限られた場所でのしか観測データが得られない。しかし、メソ解析では4次元変分法が使用されているため、各サイトで観測された毎時間のドップラー速度データを同時に取り込むことができ、さらに数値モデルそのものを同化に用いることで、風だけでなく、気圧、温度も互いに整合するように解析することができる。

観測されるドップラー速度は、竜巻やダウンバーストなどの水平スケールが1km以下の現象を表す情報も含まれており、現在の4次元変分法に使用している数値モデルの水平解像度20kmと比べて細かすぎる。このため、データ利用の際には、観測データの平均や間引きを行い、観測データを数値モデルに取り込み易くしている。

4.2.3 新設レーダーの降水予報インパクト

平成18年度に更新された仙台、新潟、名古屋ドップラーレーダーについて、平成19年度にメソ解析で利用するために行った降水予報の調査事例を述べる。

本事例は、2007年7月12日に梅雨前線が九州南部から本州南岸に停滞し、その梅雨前線上のキンクに対

¹ 石川 宜広

応して、00UTC 頃に近畿中部で記録的な大雨が降ったものである。

図 4.2.2 は 2007 年 7 月 12 日 00UTC のメソ解析の地上風である。左は仙台、新潟、名古屋ドップラーレーダーを同化しない場合で、右は同化した場合である。中央は同時刻の名古屋ドップラーレーダーの仰角 0.9 度のドップラー速度である。名古屋ドップラーレーダーを使用した解析では、琵琶湖付近に明瞭なシアーラインが見られ、同様に観測されたドップラー速度にも暖色系(サイトから離れる方向)と寒色系(サイトに向う方向)の速度符号が異なる境目として、シアーラインが観測された。名古屋ドップラーレーダーを使用しない解析では、このシアーラインはあまり明瞭でない。

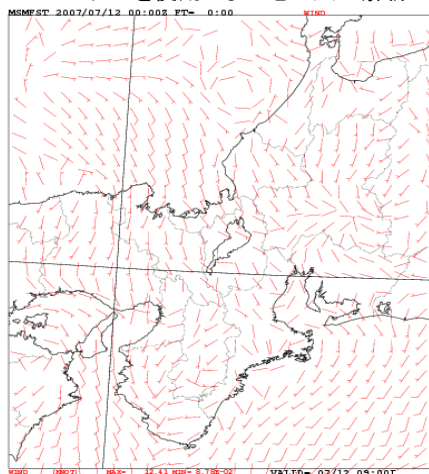
図 4.2.3 は、2007 年 7 月 12 日 00UTC を初期値とする MSM による 3 時間予報の 3 時間積算降水量である。左

はメソ解析で仙台、新潟、名古屋のドップラーレーダーを使用しなかった予報、右は使用した予報であり、中央は予報に対応する解析雨量の 3 時間積算降水量である。観測された琵琶湖を横切り東西に伸びる発達した線状降水帯が、名古屋ドップラーレーダーを使用したメソ解析による 3 時間予報では正確に表現され、琵琶湖付近のシアーラインとの対応も良い。しかし、名古屋ドップラーレーダーを使用しなかった予報では、琵琶湖付近に弱い降水があるものの、その降水量は実況と比べてかなり少ない。このことは、名古屋ドップラーレーダーによって、降水系の風の方が改善された結果と考える。

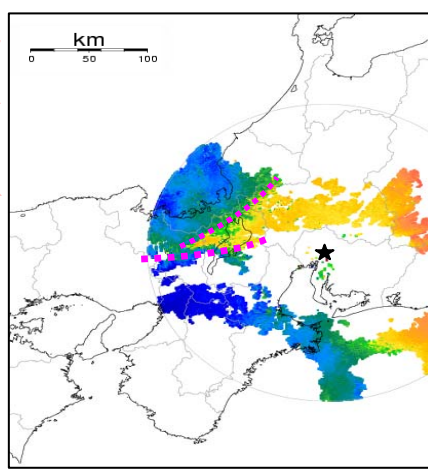
参考文献

小泉耕, 2004: 非静力学メソ数値予報モデルの現業化. 平成 16 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 71-74.

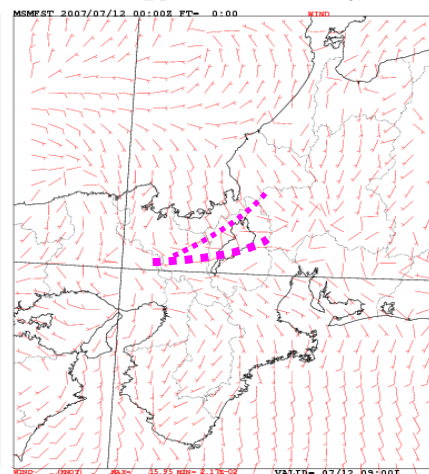
メソ解析で仙台、新潟、名古屋ドップラーレーダーを使用しない地上風の解析



名古屋ドップラーレーダーのドップラー速度(2007.07.12 00UTC、仰角 0.9 度)



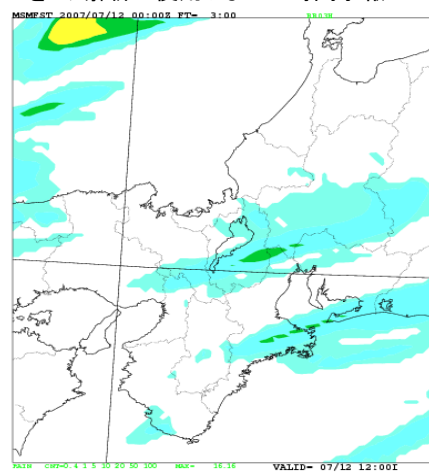
メソ解析で仙台、新潟、名古屋ドップラーレーダーを使用した地上風の解析



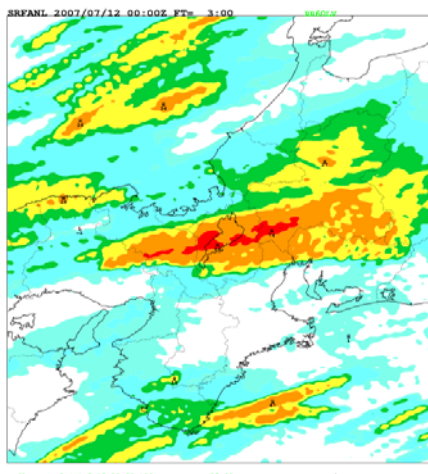
-50 -36 -28 -20 -12 -6 -3 -1 0 1 3 6 12 20 28 36 50 [m/s]

図 4.2.2 2007 年 7 月 12 日 00UTC のメソ解析の地上風。左は仙台、新潟、名古屋ドップラーレーダーを同化しない場合、右は同化した場合。中央は同時刻の名古屋ドップラーレーダーの仰角 0.9 度のドップラー速度。暖色系と寒色系はレーダーから遠ざかる風と近づく風を意味する。また、ピンクの点線はシアーラインを表す。

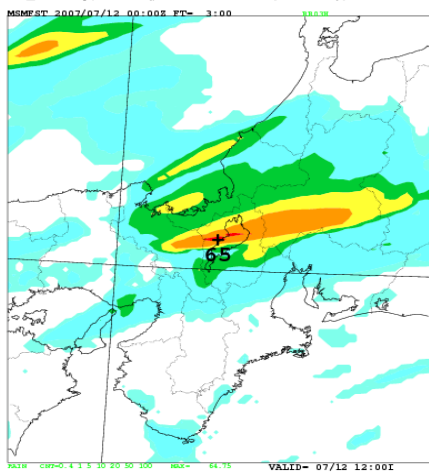
仙台、新潟、名古屋ドップラーレーダーをメソ解析に使用しない 3 時間予報



解析雨量(2007.07.12 00~03UTC)



仙台、新潟、名古屋ドップラーレーダーをメソ解析に使用した 3 時間予報



0.4 1 5 10 20 50 100 [mm/3hour]

図 4.2.3 2007 年 7 月 12 日 00UTC を初期値とする MSM による 3 時間予報の 3 時間積算降水量。左は仙台、新潟、名古屋ドップラーレーダーを同化しない予報、右は同化した予報、中央は解析雨量の 3 時間積算降水量。

4.3 衛星データ同化の最近の開発¹

4.3.1 はじめに

数値予報精度の維持・向上は、予報モデルのみならずデータ同化システムの性能に大きく依存する。中でも、近年増大・高性能化している人工衛星が観測するデータの品質や利用手法は、解析・予報精度に大きな影響を与える。

本節では、2006年4月～2007年8月の期間に行った衛星データ同化処理の変更について紹介する。この期間は、気象庁の衛星データ同化の開発の歴史の中で、処理の高度化・多様化、新規衛星の導入が最も頻繁に実行された期間である。これは、解析システムに変分法を導入し衛星データの多様かつ高度な利用法が可能となったこと、これに合わせて気象庁で衛星データ同化に関わる開発資源を拡充してきたことが大きな要因である。これらの変更によって予報成績は向上し、特に衛星データのインパクトが現れやすい南半球で顕著であった（第4.4節参照）。本節では変更の概要について簡単に記述するとともに、気象庁予報部(2007)に詳細が記されているので、興味のある読者はそちら

を参照していただきたい。参考のため、気象庁の全球・メソ解析で同化されている全衛星データを、表4.3.1に掲載した。

4.3.2 変更内容と解析・予報へのインパクト

(1) 静止衛星の大気追跡風 (AMV)

AMVは、15～60分間隔の連続した画像から、雲塊や水蒸気パターンを追跡することにより算出された大気の流れである。気象庁では、気象衛星センター(MSC)などが作成し配信しているAMVを同化している。AMVは大気の流れの情報をもつ重要なデータであるが、センサの特性や処理方法・追跡対象の違いにより、データの特性が領域・高度・衛星によって大きく異なる。そのためデータの取捨選択が不適切だと、逆に解析精度を落とす要因となる。そこで、過去データの統計調査により品質に問題があると判断された領域(例えば400～825hPaの中層風)のデータを排除するとともに、データに付属する品質指標(QI)に基づいてデータ選別を従来より厳格に行うようにした。さらに、データがなるべく均等に分布するように、解析時刻と観測時刻の時間差やQIを考慮しながらデータを間引き、約200km間隔でデータを配置するようにした。また新規デ

表 4.3.1 2007年9月時点における気象庁全球・メソデータ解析で同化されている全衛星データ。メソ解析欄の斜線はデータが(メソ解析領域内に)存在しないことを、×印は、データはあるがまだ同化されていないことを表す。網掛けは本節で説明した変更対象を表す。なおGPS掩蔽とCSRは、高解像度全球同化システムでの性能検証が十分でないため、2007年11月の高解像度全球モデル移行当初は利用を中断するが、性能確認を行った後に再導入する。

	衛星名	センサ名	同化要素		備考
			全球解析	メソ解析	
AMV	MTSAT-1R	JAMI	風	風	
	GOES11, 12	IMAGER			2006年6月21日にGOES10から11へ切替え
	METEOSAT7, 9	SEVIRI			経度0度上でMeteosat7⇒8(2006年6月14日)、8⇒9(2007年4月24日)、東経57度上でMeteosat5⇒7(2007年2月5日)へ切替え
	Aqua	MODIS	風		高緯度のみ算出
	Terra	MODIS			
サウンダ	NOAA15, 16, 17	AMSU-A, AMSU-B	輝度温度	気温	NOAA17のAMSU-Aは測器異常で機能停止
	NOAA18	AMSU-A, MHS		気温	メソ解析では2006年4月18日より利用開始 全球解析では2007年4月18日より利用開始
	Aqua	AMSU-A			気温などのリトリーブデータなし
マイクロ波放射計	DMSP-F13, 14	SSM/I	輝度温度	可降水量、降水量	DMSP-F15は22GHzチャンネル不良のため、2006年8月15日より使用停止
	Aqua	AMSU-E			
	TRMM	TMI			
マイクロ波散乱計	QuikSCAT	SeaWinds	海上風	海上風	
GPS 掩蔽	CHAMP	BlackJack	屈折率	×	2007年3月22日より利用開始
CSR	MTSAT-1R	JAMI	輝度温度	×	2007年6月7日より利用開始

¹ 岡本 幸三

ータとして、MTSAT-1Rから新たに作成されるようになった、毎時のAMV(従来は6時間間隔)の利用も開始した。これらの変更により、特に南半球で2日先までの850hPa気温、500hPa高度、250hPa風速などの予報を大きく改善することを同化実験を通して確認できた。そのため、このAMVデータ処理を2006年10月18日より全球解析に導入した。メソ解析でも、2007年中に同様の変更を行うことを計画している。

この他にも衛星運用変更に対応するため、データ精度の比較検証を行った後に、METEOSAT7から8(2006年6月14日)、GOES10から11(2006年6月21日)、METEOSAT5から7(2007年2月5日)、METEOSAT8から9(2007年4月24日)への切り替えを行った。

(2) サウンダ

サウンダは、大気吸収が強い周波数帯において複数の周波数で地球大気・地表面などからの放射強度(輝度温度)を観測することにより、鉛直気温・水蒸気プロファイルや地表面の状態などの情報を取り出すセンサである。全球解析では2003年5月28日より輝度温度の同化を開始し、その後も改良を重ねている。2006年8月21日には、前処理バイアス補正量の再計算や変分法バイアス補正(後述)の説明変数の見直し、観測誤差の調整、雲判定や降水判定処理の改良などを行った。これらの変更の効果を同化実験を行って調べたところ、熱帯・南半球の気温解析誤差の減少や、特に南半球の短期予報精度の顕著な改善、台風進路予報誤差の減少などを確認した。

また、新たにNOAA18号に搭載されたATOVS²サウンダデータの利用を、メソ解析では2006年4月18日から、全球解析では2007年4月18日から開始した。既に利用していたNOAA15、16、17号にNOAA18号を加えることにより、観測の空白域が減少する。これにより、メソ解析ではデータ入電が安定し、降水予報スコアを向上した。NOAA18号はAqua衛星と軌道が近いので、全球解析においては、品質に問題があるAqua/AMSU-Aよりも優先的に利用する。この結果、500hPa高度を始めとして代表的な予報要素で全球的に改善が確認された。なお、2006年10月19日に打ち上げられたMetop衛星のATOVS輝度温度データも、同化実験によって対流圏の気温場を中心に全球的に大きな予報精度の改善を確認したので、高解像度全球モデル移行時に合わせて導入する計画である。

さらに、AP-RARS³と呼ばれる、中国・オーストラリア・韓国・昭和基地の受信局で処理・配信されたATOVS輝度温度データの利用を、2007年2月22日より開始した。

² ATOVSは、マイクロ波サウンダ AMSU-AとAMSU-B(またはMHS)、赤外サウンダ HIRS を合わせた総称である。ただし現在の気象庁の全球輝度温度同化処理では、HIRSは同化していない。

³ Asia-Pacific Regional ATOVS Retransmission Service

AP-RARS ATOVSデータは観測から配信までの時間が短いので、西太平洋・昭和基地付近において速報解析⁴で利用できるデータが増加する。これにより、成層圏の高度場などで速報解析結果がサイクル解析結果に近づくことが確認されている。同様に、欧州・北米の受信局で処理・配信されるEARS⁵と呼ばれるATOVS輝度温度データの利用も、2007年8月2日より開始した。EARS ATOVSは、AP-RARS ATOVSよりもデータ数が約3倍と多いため、解析を改善する度合いが大きく、北半球高緯度を中心に500hPa高度場の短期予報も改善している。

(3) マイクロ波放射計

マイクロ波放射計は、鉛直積算水蒸気量(可降水量)や降水粒子、地表面の状態に感度がある周波数で輝度温度観測を行う。メソ解析では、輝度温度から推定(リトリブ)した可降水量と降水量を、2003年10月15日から同化している。全球解析では、輝度温度の同化を2006年5月15日より開始した。対象とするのは、雲や降水の影響を受けていない海上データである。可降水量、海面水温、海上風速などを説明変数として変分法バイアス補正を適用する。マイクロ波放射計の輝度温度を全球で同化することにより、特に海上・南半球における豊富な水蒸気情報が活用できるようになった。これにより、可降水量の解析精度が向上し、台風進路予報や予報降水分布も改善した。

(4) GPS掩蔽(えんぺい)

GPS掩蔽観測は、米国の全球測位システム(GPS)衛星が発信した電波を、GPSよりも低い高度を飛ぶ別の衛星(LEO衛星)で受信し、受信電波の遅延量から電波が伝播してきた大気の屈折率、あるいは気温・水蒸気情報を取り出すものである。LEO衛星で受信するGPS電波は、GPS衛星とLEO衛星をまっすぐに結んだ直線上を進むのではなく、大気や電離層による屈折を受けながら進む。この実際に進む曲線に沿った光学的距離と、直線距離との差が遅延量である。

GPS掩蔽観測データは、水平分解能は粗いものの高い鉛直分解能をもつため、サウンダと相補的な関係を持つ。同化対象である屈折率データは、バイアスが対流圏下層で大きくなるので5km以下のデータは使用せず、さらに緯度・屈折率・高度を説明変数とするバイアス補正を行う。バイアス補正係数はカルマンフィルタを用いて解析毎に更新しながら求める。LEO衛星CHAMPの屈折率デ

⁴ 予報プロダクトをなるべく早く配信する必要があるため、速報解析ではデータ入電待ち時間(カットオフタイム)が2時間25分しかない。一方サイクル解析は、カットオフタイムを十分長くとり(5時間35分または11時間35分。ただし高解像度全球モデル導入後はそれぞれ20分ずつ短縮される)、データ収集・配信に時間がかかる衛星データなどをたくさん使うことにより、より高い解析精度を実現している。

⁵ EUMETSAT Advanced Retransmission Service

ータを用いた同化実験では、対流圏中層から成層圏の気温・高度場の予報がわずかながら改善することが確認できたため、2007年3月22日より利用を開始した。現状では、1衛星のデータしか同化していないのでデータ数は少ない。しかし、今後利用可能なデータが増加していくため、解析予報精度の改善に与える影響が大きくなることが期待される。

(5) 静止衛星イメージャの晴天輝度温度(CSR)

CSRは、静止衛星に搭載された高分解能赤外イメージャが観測する晴天域の輝度温度を、複数のピクセルで平均したプロダクトである。MSCで作成・配信されているMTSAT-1Rの水蒸気チャンネルCSR(以下WV-CSR)は、16×16ピクセル(約60km四方)内の晴天ピクセルの平均をとっており、対流圏中上層の水蒸気情報を持つ。MTSAT-1R WV-CSRは、観測頻度が高く、データ入電が早くかつ安定していることも大きな特徴である。

気象庁予報部(2007)においては、MTSAT-1R WV-CSRを同化することにより、熱帯の上昇(下降)流域の大気が乾燥(湿潤化)した。この結果、水蒸気に感度のある他の衛星輝度温度観測値に第一推定値が近づくなど、対流圏中上層の水蒸気場を改善した。一方、予報に関しては、熱帯域で850hPa気温場や500hPa高度場が改善したものの、南北半球では安定した改善が得られなかった。

そこで、毎時刻データではなく一時間おきのデータを同化(つまり6時間の同化窓内で3回同化)するように変更した。さらに、バイアス補正に用いる説明変数として、計算輝度温度や300hPa東西風を用いるようにした。これらの変更により、上述した水蒸気解析場や熱帯域での予報特性を大きく変えることなく、北半球でも500hPa高度場や850hPa風速場などの予報を改善し、南半球でも概ね中立の結果をもたらした。これらの結果を受けて、2007年6月7日よりMTSAT-1R WV-CSRの利用を開始した。

(6) 変分法バイアス補正の導入

変分法バイアス補正は、線形回帰式で表すバイアス補正処理の回帰係数を、変分法の解析変数として求める手法である。これにより、全ての観測や第一推定値などとバランスのとれた回帰係数を得ることができる。さらに、回帰係数が解析毎に更新されるため、測器や同化システムの変更への対処が容易といった特徴もある。変分法バイアス補正は、全球解析でのマイクロ波放射計輝度温度同化開始と合わせて、2006年5月15日に全球解析に導入された。現時点で、サウンド、マイクロ波放射計、静止衛星イメージャに対する輝度温度データ全てに適用されている。

4.3.3 まとめ

2006年4月から2007年8月にかけて、静止衛星AMVやサウンド輝度温度同化処理の改良、マイクロ波放射計

輝度温度・GPS掩蔽観測屈折率データ・MTSAT-1R晴天輝度温度などの新規導入、変分法バイアス補正の導入、静止衛星の切り替え、NOAA18号・AP-RARS・EARSのATOVSデータの導入を行った。これらの変更・新規導入により、全球解析では特に南半球や熱帯の短期予報を改善し、メソ解析ではデータ入電の安定性を高め降水予報を改善した。

しかし気象庁予報部(2007)の各章で述べられているように、これらの処理にはまだ多く改善の余地があり、今後予定されている新規衛星データへの対応も必要となる。さらに衛星データの利用がここまで進んでくると、データ分布・観測物理量・観測精度が現在既に利用している観測情報の不備を十分に補うものでなければ、単純に新規データを追加しただけでは改善の効果を得ることが難しくなっている。そこで、現在同化しているデータの基本処理(設定)の見直しも検討すべき段階にきていると考えている。例えば、現在の観測誤差は必要以上に大きな値を設定している可能性があり、また間引きの設定や鉛直内挿手法も高解像度全球モデルに合わせて調整しなおす必要があるだろう。さらに、メソ解析では、ここで取り上げた輝度温度データやGPS掩蔽観測データがまだ同化されていない。全球解析と比べメソ解析では、衛星データからの影響が及びにくく、また速報性が重視されるため利用可能な衛星データ数や計算負荷の制約が大きい。処理時間に見合う改善の効果が得られるかを精査しながら、新規データの導入や処理の高度化を進めていきたい。

参考文献

気象庁予報部, 2007: 数値予報と衛星データ 一同化の現状と課題－. 数値予報課報告・別冊第53号, 気象庁予報部, 220pp.

4.4 最近の全球モデルの成績¹

4.4.1 はじめに

本節では、短期予報を対象とした全球モデルの最近（2005年1月～2007年6月）の成績について紹介する。全球モデルは数値予報の基幹モデルであり、メソ数値予報モデルの境界値としても使われるので、モデルの変更等に伴う予報精度の変化について日常的に監視する必要がある。

全球モデルの性能は、海面更正気圧、等圧面高度、気温、湿度、降水、雲、放射などに関する様々な指標を用いて測定される。なかでも、中・高緯度の代表的な大気の流れの予報精度を表す指標として、500hPa 高度の平方根平均二乗誤差(RMSE)がよく使われる。平成 18 年度に大臣目標²として掲げられた「2010 年の全球モデル 2 日予報の精度を 2005 年に比べ 20%改善する」で使われている指標も、500hPa 高度 RMSE の北半球(20°N～90°N)年平均値である。

本節では、北半球と南半球(20°S～90°S)の気象庁の全球モデルだけでなく、世界の主要数値予報センターの全球モデルの成績も合わせて示す。他数値予報センターとの比較により気象庁モデルの相対的な成績を確認できるとともに、各数値予報センターの成績とモデル改良事項とを照らし合わせて考察することで、モデルの改良の方向性についての示唆が得られる。なお、熱帯域(20°N～20°N)の精度も重要ではあるが、紙面の都合で省略する。

4.4.2 図の内容と見方

世界の数値予報センターは、世界気象機関(WMO)が定めた標準検証手法(WMO 1992)に従って自身の全球モデルによる予報を検証し、その結果を月毎に交換している。また、検証結果の値は GDPFS レポートとして一般に公開されている (WMO 2005 など)。本節で示す結果は、4 つの主要数値予報センター(欧州中期予報センター ECMWF、気象庁 JMA、米国環境予測センター NCEP、英国気象局 UKMO)について、それぞれのモデルの解析値を真値とした北半球と南半球の 500hPa 高度予報の RMSE である。対象とする予報時間は、48 時間 (2 日予報) と 120 時間 (5 日予報) である。2 日予報の成績から、観測データ利用や同化手法改良の効果を確認することができる。一方、5 日予報の成績に及ぼす初期値の影響は相対的に小さく、主にモデルの分解能や物理過程の改良などの効果を確認することができる。

なお、季節変化を取り除くため、同月を含む過去 12 か月にわたる移動平均を示す。従って、大きな改良を加えた場合、それによる効果が導入後 1 年かけて徐々に現れることに注意されたい。

4.4.3 結果

(1) 2 日予報北半球 (図 4.4.1)

JMA の精度は、2005 年 2 月に導入された 4 次元変分法(4D-Var) (門脇 2005) により精度が大幅に向上したが、2006 年に入ってしばらく約 18m で停滞した。その後、2006 年 10 月の静止衛星風の利用高度化(山下・今井 2007)や 2007 年 4 月の NOAA18 サウンダデータの利用開始によって再び緩やかな精度向上を続けている。

他のセンターについては、ECMWF が 2006 年後半から精度向上の割合を増している。これは、2006 年 9 月に実施した変分法バイアス補正(VarBC)や雲スキーム改良などの変更と関係していると推測される。同年 12 月には COSMIC, CHAMP, GRACE-A による GPS 掩蔽観測データの利用を開始したほか、2007 年 1 月から Metop-A の AMSU-A, MHS データの利用を開始している。

UKMO については 2006 年 10 月以降の精度向上が目される。これは、2006 年 9 月からデータ打ち切り時刻を遅らせ³、より多くのデータを使うようになったことと、GPS 掩蔽観測データ⁴およびマイクロ波放射計 SSMIS データの利用を開始したことによる。さらに同年 11 月には ATOVS を同化時間窓に合わせて利用し、使用データを増やしているほか、追加の GPS 掩蔽観測として COSMIC データの利用も開始している(Lorenc 2006)。

NCEP については、2005 年 5 月にモデルの解像度を約 35km に上げるなど大幅な改訂により約 2m の精度向上を達成した後、しばらく停滞していたが、2007 年 5 月に新しい同化システム GSI(Wu et al. 2002)を導入してから再び精度を上げてきている。

(2) 2 日予報南半球 (図 4.4.2)

JMA の南半球の精度は、北半球とは異なり 2006 年以降も順調に向上している。2005 年 8 月に衛星搭載サウンダデータの利用方法を改善して使用データ数が増えたこと、2006 年 8 月に同データの利用方法をさらに改良 (岡本 2007) したことが衛星データ利用の影響の大きい南半球での継続的な精度向上をもたらしたと考えられる。その結果、2007 年 3 月には NCEP を抜いて世界第 3 位に浮上した。

¹ 竹内 義明、岩村 公太

² 正式名は、「中央省庁等改革基本法第 16 条第 6 項第 2 号の規定に基づき、国土交通大臣から通知される気象庁が達成すべき目標」。

³ 解析対象時刻後 1 時間 50 分を同 2 時間 40 分に変更した。

⁴ 9 月時点では CHAMP および GRACE の GPS 掩蔽観測データの利用が開始された。

2007年6月までの北半球500hPa高度予報誤差(48時間予報)

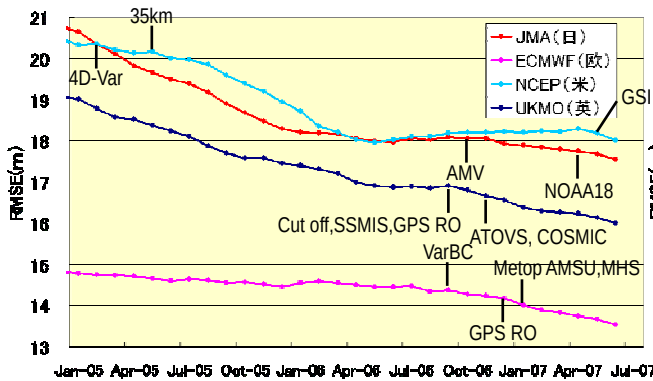


図 4.4.1 北半球域(20° N~90° N)500hPa 面高度の 48 時間予報の予報誤差(前 12 か月平均値)の推移。図中の変更項目については本文を参照のこと。

2007年6月までの南半球500hPa高度予報誤差(48時間予報)

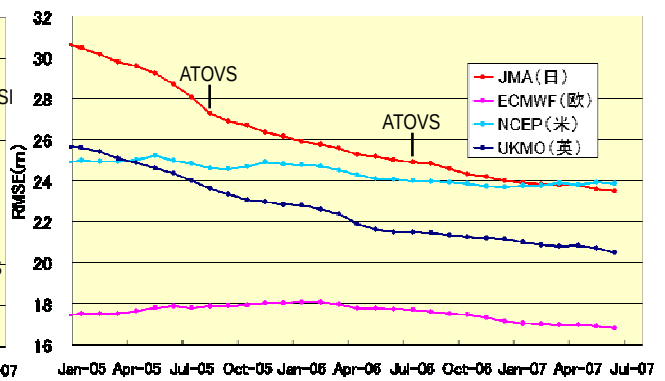


図 4.4.2 図 4.4.1 と同じ。ただし南半球域(20° S~90° S)。

2007年6月までの北半球500hPa高度予報誤差(120時間予報)

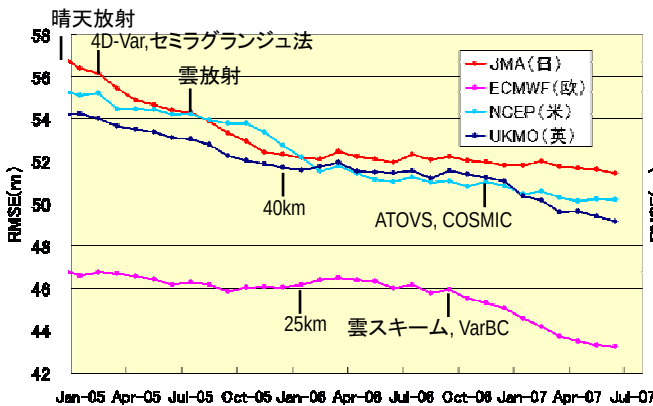


図 4.4.3 図 4.4.1 と同じ。ただし 120 時間予報の予報誤差(前 12 か月平均値)。

2007年6月までの南半球500hPa高度予報誤差(120時間予報)

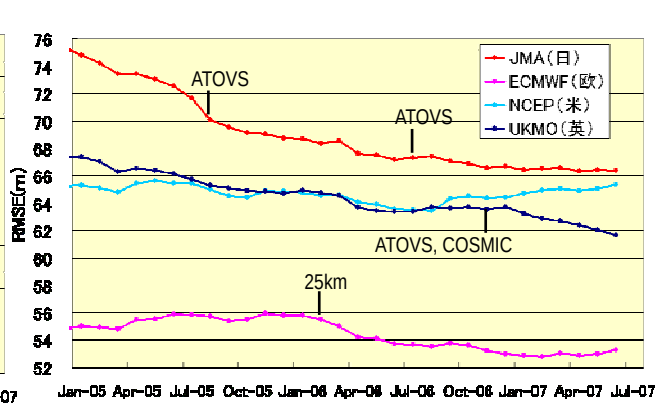


図 4.4.4 図 4.4.3 と同じ。ただし南半球域(20° S~90° S)。

ECMWF, UKMO は北半球と同様な傾向で順調に精度を上げている。

(3) 5 日予報北半球 (図 4.4.3)

JMA は 2004 年 12 月の晴天放射スキーム改良(藪ほか 2005) の効果が前 12 か月平均に表れなくなった 2005 年末以来、精度の伸び悩みが続いている。2005 年 2 月のセミラグランジュ法導入(松村ほか 2005) や、同年 7 月の雲放射等のモデル変更(北川ほか 2005) の影響は不明瞭である⁵。

UKMO は 2005 年 12 月に水平分解能約 40km 鉛直層数 50 層の新モデルを導入したがその効果は顕著ではない。2007 年 1 月からの急速な精度向上は 2 日予報精度が向上した時期とは異なっており、5 日予報に対しては使用する ATOVS データの増加や COSMIC データの利用などの効果がデータ打ち切

り時刻を遅らせる効果より大きいことを示唆している。

ECMWF の精度は、2 日予報北半球と同じく 2006 年後半から 2007 年前半にかけて大きく向上している。これには 2006 年 9 月に実施した雲スキームなど物理過程の改良と VarBC の導入が寄与していると考えられる。

(4) 5 日予報南半球 (図 4.4.4)

JMA は 2006 年を通して緩やかながら精度向上が見られた。これは 2 日予報で述べた衛星データの利用方法の改善によるものと推測される。UKMO は北半球同様、2006 年末以降大きな精度向上が見られる。ECMWF は 2006 年を通して大きな精度向上が見られ、2007 年に入ってから停滞している。これは 2006 年 2 月に水平分解能約 25km 鉛直層数 91 の新モデルを導入した効果だと考えられる。

⁵ セミラグランジュ法は計算時間の短縮が狙いであり、精度が劣化していないことが重要である。

表 4.4.1 主要数値予報センターのモデル、同化システム、使用観測データの主な違い

数値予報センター	JMA	ECMWF	NCEP	UKMO
予報モデル				
水平分解能	60km	25km	35km	40km
鉛直層数	40	91	64	50
同化システム				
データ打ち切り時間(速報解析)	2:20	4:10	2:45	2:40
データ打ち切り時間(サイクル解析)	11:30/5:30	14:00	6:00	6:00
解析手法	4D-Var	4D-Var	GSI	4D-Var
インナーモデル ^{*1} 分解能	約120km	130km/80km/ 50kmの3段階	35km	120km
同化ウィンドウ ^{*2} (速報解析)	6時間	6時間	6時間	6時間
同化ウィンドウ(サイクル解析)	6時間	12時間	6時間	6時間
観測データ(使用開始年月)				
COSMIC(GPS掩蔽観測)	-	2006.12	2007.5	2006.11
CHAMP(GPS掩蔽観測)	2007.3	2006.12	-	2006.9
AIRS(ハイパースペクトル赤外サウンダ)	-	2005.11	2005.5	2004.5
IASI(ハイパースペクトル赤外サウンダ)	-	2007.6	-	-

^{*1} 解析値を作成する際に第一推定値に対する修正量を求めるためのモデル

^{*2} 4次元変分法でモデルの時間積分を行う時間範囲

4.4.4 まとめ

JMA の全般的な傾向として、2 日予報の精度については順調に向上を続けている。一方、5 日予報の精度については 2005 年の大幅な向上の後、停滞気味である。5 日予報精度の改善については、UKMO と ECMWF が 2006 年後半に実施し、大きな効果を得たモデル変更（データ同化システムの変更、新規データ利用を含む）の内容を今後の開発の参考にできるかもしれない。

第 4.4.1 表に示した現在の各数値予報センターの比較からは、JMA の予報モデルおよび同化システムの分解能、データ打ち切り時間、観測データの利用に依然改善すべき点があることがわかる。観測データについては、GPS 掩蔽データや、ハイパースペクトル赤外サウンダ(AIRS, IASI)データの利用が他の数値予報センターに比べて進んでいない。

当面 2007 年 11 月に 20km 全球モデルが現業化されることによる精度向上が期待される（第 1.2 節を参照）。新モデルでは水平分解能や鉛直層数が増強されることから、他のセンターでも取り組んでいるように分解能に適した物理過程の改良や既存観測データの有効利用を進める必要がある。

参考ホームページ

英国気象局科学諮問委員会資料

<http://www.metoffice.gov.uk/research/nwp/publications/mosac/>

GDPFS レポート

<http://www.wmo.ch/pages/prog/www/DPFS/ProgressReports/2006/ECMWF.pdf>

<http://www.wmo.ch/pages/prog/www/DPFS/ProgressReports/2006/UnitedKingdom.pdf>

<http://www.wmo.ch/pages/prog/www/DPFS/ProgressReports/2005/UnitedStates.pdf>

参考文献

岡本幸三, 2007: ATOVS 直接同化. 数値予報課報告・別冊第 53 号, 気象庁予報部, 58-70.

門脇隆志, 2005: 全球 4 次元変分法. 数値予報課報告・別冊第 51 号, 気象庁予報部, 100-105.

北川裕人, 藪将吉, 村井臣哉, 2005: 雲-放射過程. 数値予報課報告・別冊第 51 号, 気象庁予報部, 65-66.

松村崇行, 片山桂一, 中川雅之, 2005: セミラグランジュ統一モデル. 数値予報課報告・別冊第 51 号, 気象庁予報部, 32-35.

藪将吉, 村井臣哉, 北川裕人, 2005: 晴天放射スキーム. 数値予報課報告・別冊第 51 号, 気象庁予報部, 53-64.

山下浩史, 今井崇人, 2007: 大気追跡風. 数値予報課報告・別冊第 53 号, 気象庁予報部, 36-56.

Lorenc, A., 2006: Global and Regional Data Assimilation Progress and Plans. MOSAC-11. [Available from <http://www.metoffice.gov.uk/research/nwp/publications/mosac/doc-2006-7.pdf>]

WMO, 1992: the Manual on the Global Data-Processing and Forecasting System, WMO No. 485, Part II, Attachment II-7, Table F.

WMO, 2005: WMO Technical Progress Report on the Global Data-Processing and Forecasting System (GDPFS) and Numerical Weather Prediction (NWP). WMO TPR-GDPFS-NWP.

Wu, W.S., R.J. Purser, and D.F. Parrish, 2002: Three-Dimensional Variational Analysis with Spatially Inhomogeneous Covariances. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 2905-2916.