

## 4.4 メソ数値予報システムの鉛直層増強、予報時間延長、物理過程の改良

### 4.4.1 はじめに

メソ数値予報システム<sup>1</sup>は日本域を予報領域とした水平解像度 5 km の予報システムとなっており、防災気象情報や航空気象情報の作成支援、降水短時間予報への入力を主な目的として、1日8回、予報期間 51 時間 (00, 12UTC 初期値) または 39 時間 (03, 06, 09, 15, 18, 21UTC 初期値) で運用している。2001 年 3 月にメソ数値予報システムの現業運用が開始 (萬納寺 2000) されて以降、非静力学モデルの導入や 4 次元変分法の導入などシステム面の高度化がなされるとともに、予報時間の延長や計算領域の拡張が段階的に行われた。近年では、2017 年 2 月に予報モデルを JMA-NHM (気象庁予報部 2003) から新しい気象庁非静力学モデル asuca (気象庁予報部 2014; JMA 2019) に置き換えた。それに続き、2020 年 3 月にメソ解析を JMA-NHM に基づく非静力学メソ 4 次元変分法 (JNoVA; 気象庁予報部 2010) から asuca に基づくメソ 4 次元変分法 (asuca-Var; Ikuta et al. 2021) に置き換え、現在に至っている。

2022 年に更新を予定しているメソ数値予報システムでは、衛星観測データの利用拡充を主な目的としてメソモデルの鉛直層を 76 層から 96 層、メソ解析のインナーモデルを 38 層から 48 層にそれぞれ増強し、モデル上端高度を 21.8 km から 37.5 km に引き上げる。また、台風が日本に接近する可能性がある場合等に 3 日先までの総雨量予報情報を提供するとして「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」に示された目標に資するため、00, 12UTC 初期値の予報期間を 51 時間から 78 時間に延長する。あわせて、予報精度改善のために海洋混合層モデルの導入等物理過程の改良を行う計画である。本節では、2022 年に更新予定のメソ解析・メソモデルの改良の概略を報告するとともに、これまでの検証実験で得られた予報特性の変化について述べる。

### 4.4.2 メソ解析の改良

はじめに述べた通り、本変更では、衛星観測データの利用拡充を主な目的として、モデル上端高度を引き上げる。以下では、モデル上端高度を引き上げた新しい解析システム (MA22XX) の背景誤差と MA22XX における衛星観測データの利用拡充について述べる。

#### (1) 背景誤差の作成

MA22XX では、メソ解析のインナーモデルの鉛直層を 38 層から 48 層に増強し、モデル上端高度を 21.8 km から 37.5 km まで引き上げ、仕様を向上させ

る<sup>2</sup>。21.8 km から 37.5 km までを含む背景誤差が必要となるため、現ルーチンと同様に NMC 法 (Parrish and Derber 1992) により新たに作成することとした。現ルーチンと MA22XX の背景誤差の比較を表 4.4.1 にまとめる。

MA22XX の鉛直誤差共分散は現ルーチンと同じく 3 時間毎の対象時刻別および海陸別に作成した。NMC 法に用いる予報差サンプル (対象時刻が等しく初期時刻が異なる予報値の差を予報誤差の情報を含むサンプルとみなす) の統計期間はこれまで同様に 1 年分 (各月 10 日分) を用いた。NMC 法では、背景誤差共分散の構造の推定を行うが、第一推定値の誤差に対応する規格化は別途定める必要がある。背景誤差と観測誤差とのバランスを変えないことを意図して、500 hPa の温位の誤差分散が現ルーチンと同程度になるように規格化した。新たに作成した MA22XX の鉛直誤差共分散は現ルーチンと比較して大幅に性質が変わるものではなかった。図 4.4.1 には  $x$  方向の風について、全時刻かつ海陸合わせて平均した鉛直誤差共分散を示す。対象時刻別、海陸別に見ても、Ikuta et al. (2021) が言及した陸上の境界層内の誤差分散構造の日変化特性が表現されていた (図略)。

水平誤差相関は現ルーチンと同じく水平 2 次元のガウス関数を仮定し、その分散は  $x$  方向、 $y$  方向の 2 方向で与え水平一様とする。また、全時刻で同じであるとする。統計期間はこれまで同様に 1 年分 (各月 10 日分) である。現ルーチンにおいて、鉛直誤差共分散と水平誤差相関とで統計期間および「予報差サンプルの時間差」が異なる理由は、2020 年 3 月のメソ解析への asuca-Var 導入時 (気象庁 2021a) に、水平誤差相関については当時のルーチン (JNoVA に基づく) の設定 (藤田ほか 2016) を変更しなかったからである。藤田ほか (2016) では、水平誤差共分散の年平均の分布をガウス関数にフィッティングする際に標準偏差のみを推定していたが、今回は標準偏差と振幅を推定する Caruana et al. (1986) の方法に変更した。変更した理由は、藤田ほか (2016) における JNoVA の予報差サンプルと今回の asuca の予報差サンプルには空間スケールに大きな違い<sup>3</sup>があり、これまでと同じフィッティング手法を用いることが適当ではなかったためである。新たに作成した MA22XX の水平誤差相関距離は現ルーチンと同程度であった (図 4.4.2)。

<sup>1</sup> メソ解析およびメソモデル (予報モデル) あわせてメソ数値予報システムと表記する。

<sup>2</sup> そのほかの仕様変更として、成層圏の水平風速の大きさに対応して、インナーモデルの積分時間間隔を 120 s から 100 s へ変更する。

<sup>3</sup> JNoVA の予報差サンプルには、衛星観測輝度温度のデータ分布と対応が見られる、空間スケールの大きな予報差が含まれていた。当時の衛星観測輝度温度のバイアス補正は気象庁全球解析における変分法バイアス補正係数を利用していたことにより、補正が十分でなかったことが指摘されおり (気象庁 2021a)、これが影響している可能性が考えられる。

表 4.4.1 背景誤差の変更前後の比較。

		現ルーチン	MA22XX
モデル上端高度 (層数)		21.8 km (38 層)	37.5 km (48 層)
鉛直誤差共分散	対象時刻	対象時刻別	同左
	空間分布	海陸別	同左
	統計期間	2018 年 3 月-2019 年 2 月 (各月 10 日-19 日)	2018 年 7 月-2019 年 6 月 (各月 11 日-20 日)
	予報差サンプルの時間差	3 時間 (FT=6 と 3 の差)	同左
水平誤差相関	対象時刻	全時刻で同じ	同左
	空間分布	水平一様	同左
	統計期間	2014 年 8 月-2015 年 7 月 (各月 1 日-10 日) *	2018 年 7 月-2019 年 6 月 (各月 11 日-20 日)
	予報差サンプルの時間差	6 時間 (FT=12 と 6 の差)	3 時間 (FT=6 と 3 の差)
	算出に用いるフィッティング手法	標準偏差のみを推定	標準偏差と振幅を推定

\* この統計期間の JNoVA に基づくサンプルである (藤田ほか 2016)。

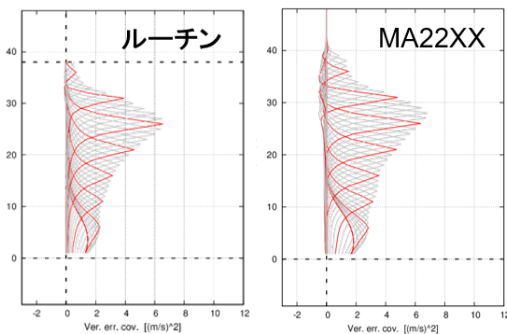


図 4.4.1  $x$  方向の風の鉛直誤差共分散 (全時刻かつ海陸合わせて平均したもの)。 (左) 現ルーチン、(右) MA22XX。縦軸は鉛直層、横軸は鉛直誤差共分散  $[m^2s^{-2}]$  を示す。灰、赤の各線はピークを持つ鉛直層と各鉛直層との間の誤差共分散を示す (ピーク層 5 層ごとに赤線とした)。各線のピークの値は当該鉛直層における誤差分散を示す。

## (2) 観測データ利用の改良

メソ解析ではマイクロ波サウンダをはじめとした衛星による輝度温度観測を同化しており (計盛 2011)、輝度温度の観測演算子には適切な気温や水蒸気のプロファイルが不可欠である。モデル上端高度より上では、あらかじめ用意しておいた標準的なプロファイルを外挿して用いるが、この処理によって輝度温度の計算精度の悪化が顕著となるチャンネルは同化に使用しないようにしている。そのため現メソ解析では、全球解析で同化利用しているマイクロ波気温サウンダ AMSU-A<sup>4</sup> のチャンネルのうち、対流圏上層から成層圏に感度のある ch9~14 は同化に利用していない。今回、モデル上端

<sup>4</sup> マイクロ波サウンダ AMSU-A の詳細は岡本 (2007) を参照されたい。

高度を引き上げることによって、より上層の気温や水蒸気のプロファイルが利用できるようになる。そこで、荷重関数のほとんどが 37.5 km までに収まる ch9~11 の利用を新たに開始する。また、既に利用していたチャンネルについても、荷重関数が 21.8 km より上層まで続いているものがあるため、利用の改善が期待できる。

はじめに、モデル上端高度を引き上げたとき (ここでは ch9~11 は同化に使用しない) の衛星輝度温度観測の利用への効果を確認する。図 4.4.3 には Aqua/AMSU-A の ch9 の観測値と第一推定値の差 (O-B) を示しており、モデル上端高度引き上げ (右) により、O-B が小さくなっていることが分かる。モデル上端高度の引き上げによって、外挿していたプロファイルの影響が少なくなり、計算輝度温度の値は観測値に近づく。また、既に利用しているチャンネルについても、特に荷重関数が 21.8 km より上層まで続いているチャンネル (ch7,8) を中心に O-B のバイアスや標準偏差が減少することを確認した (図略)。

つぎに、新たに ch9~11 を同化に使用した場合の影響を確認する。モデル上端高度を引き上げた実験を CNTL、CNTL に対して ch9~11 を同化に使用した実験を TEST とする<sup>5</sup>。図 4.4.4 に、AMSU-A および MHS、ラジオゾンデの気温の O-B の標準偏差の変化率を示す。AMSU-A の ch7,8 および 100 hPa のラジオゾンデ気温で O-B の減少、MHS では冬期間に増大が見られ、その他は概ね中立である。予報実験結果では、ラジオゾンデ観測による検証で中下層においては概ね中立であり、上層の気温は中立から改善傾向であった (図略)。後者について AMSU-A の ch9~11 の同化の効果と考えら

<sup>5</sup> 夏実験: 2019 年 8 月 1 日~31 日、冬実験: 2020 年 1 月 20 日~2 月 25 日

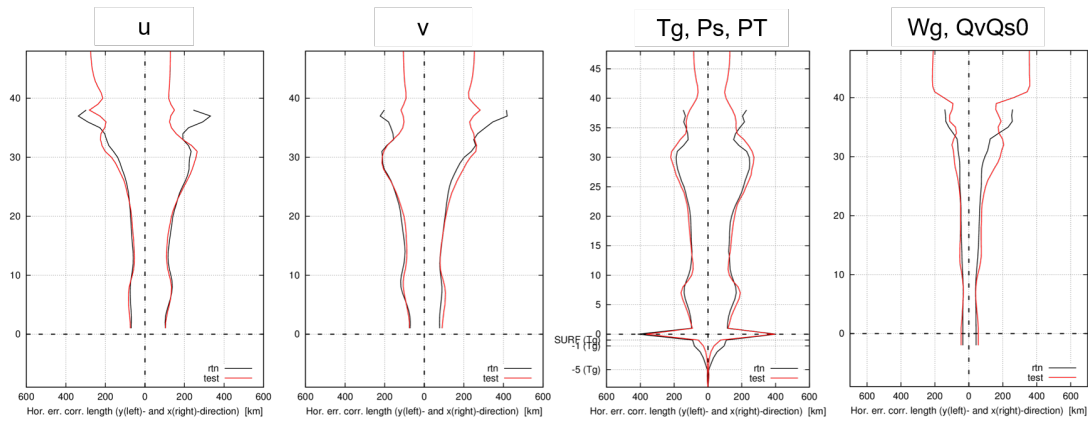


図 4.4.2 現ルーチン（黒線）と MA22XX（赤線）の水平誤差相関距離。左から  $x$  方向の風、 $y$  方向の風、地中温度・地上気圧・温位、土壌水分・偽相対湿度。縦軸は鉛直層を示す。横軸は水平誤差相関距離 [km] で、左半分は  $y$  方向について、右半分は  $x$  方向について示す。

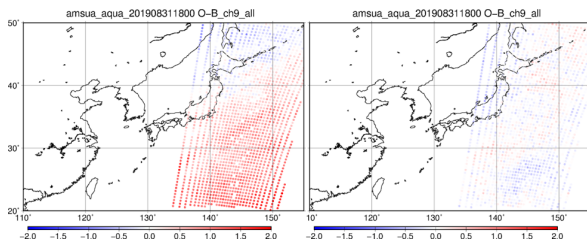


図 4.4.3 2019 年 8 月 31 日 18UTC の Aqua/AMSU-A の ch9 についての輝度温度観測と第一推定値の差 (O-B)。単位は [K]。(左) 現ルーチン、(右) モデル上端高度を引き上げたテスト。

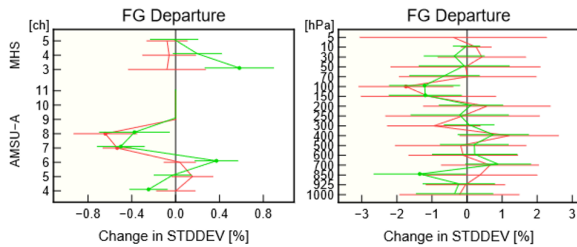


図 4.4.4 観測値と第一推定値の差 (O-B) の標準偏差の変化率 [%]。赤線は夏実験、緑線は冬実験について。(左) AMSU-A, MHS。縦軸はチャンネルの別。(右) ラジオゾンデの気温。縦軸は気圧 [hPa]。

れる。

GNSS 掩蔽観測データについても、モデル上端高度引き上げにより利用されるデータ数が増加する。この利用データ数の増加による予測精度への影響は概ね中立であった (図略)。また、これらのモデル上端高度引き上げに伴うデータ利用の改善に加えて、解析本体における輝度温度観測の観測演算子での地表面射出率の取り扱いを、品質管理における取り扱いと整合させる変更を行った。

#### 4.4.3 メソモデルの改良

先に述べた通り、2022 年に更新予定のメソモデルでは鉛直層数を 76 層から 96 層に増強する。本変更では地上から 76 層の層配置はほぼ現ルーチンと同様とし、モデルトップを 21.8 km から 37.5 km に引き上げる。また予測精度改善を目的として、以下に挙げる物理過程の改良を予定している。これらの改良には 2021 年 3 月の局地モデルで適用された項目 (気象庁 2021b) のうち、メソモデルでも改良の効果が確認できた項目も含んでいる。

- 放射過程の短波水蒸気吸収係数の更新
- 雲物理の雲量診断で用いる臨界相対湿度の下限値を変更
- 境界層スキームで用いる長さスケール診断方法を改良
- 地表面フラックス診断で用いる安定時の接地層普遍関数を変更
- 陸面の蒸発散フラックス定式を改良
- 土壌水分初期値 (気候値) およびパラメータを更新 (地表面アルベド、熱粗度、LAI の導入、植生・都市被覆率の導入)
- 鉛直 1 次元海洋混合層モデルの導入
- 潜熱フラックスに海塩による蒸発抑制効果を考慮

以下ではメソモデルに新規導入予定の改良項目のうち、主要な開発項目について概略を述べる。

##### (1) 海洋混合層モデルの導入

2020 年 3 月現業化時のメソモデル (以下 MSM2003 と表記) では、予測時間が進むにつれ台風が過発達する傾向があることがこれまでの調査から分かっている。第 4.4.1 項で述べた通り、3 日先の台風に伴う雨量の予測を提供することが 2022 年のメソモデル更新の主目的の一つであるため、台風の過発達バイアスは優先して改善すべき課題である。過発達バイアスをもたらす要因の一つに、MSM2003 では海面水温 (SST) を初期値

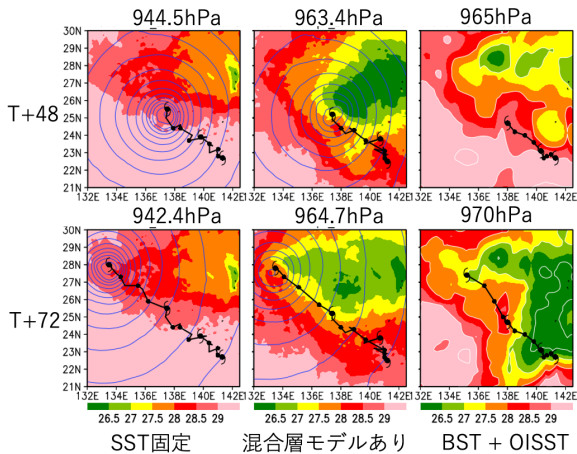


図 4.4.5 海洋混合層モデル導入の効果を 2019 年台風第 10 号を対象として比較した実験の例 (2019 年 8 月 10 日 00UTC を初期値)。図においてカラーは海面水温 (SST)、黒線は海面気圧 (5 hPa 間隔)、マーカーあり太黒線は台風中心の経路であり、図の上に台風中心気圧を示した。左図は SST を固定した実験、中央図は海洋混合層を導入した実験の結果であり、右図は同対象時刻の OISST (カラー) とベストトラック (黒線) である。

から固定しているために、海洋が鉛直混合されて SST が低下する効果をモデルが表現できないことが考えられる。そこで、鉛直 1 次元の海洋混合層モデルを導入することにより、地上風に応じて SST が低下する効果を取り入れることを試みた。

用いた海洋混合層モデルは Price-Weller-Pinkel (PWP) モデル (Price et al. 1986, 1994) と呼ばれているもので、海洋の鉛直 1 次元混合を考慮したモデルとなっている。このモデルでは海洋の水温、塩分濃度、水平流速を予報変数としており、それぞれが長波・短波放射、淡水フラックス (海面での降水・蒸発)、風応力によって強制される。また、海中の水平流速は慣性振動のみが考慮され、水平移流の効果は考慮されない。海洋の鉛直混合は、密度不安定やシア不安定によって各層の混合が起こることに加え、混合層全体とその下層との混合を別途考慮することによって表現する。

PWP モデルをメソモデルに導入するにあたり、SST の気候値からの偏差を海中の気候値に加えることで海水温の初期値を与えた。また、予測時間が進むにつれ非現実的な海水温にドリフトすることを防ぐために、初期値にナッジングする処理を加えた。ナッジングの時定数は、海岸 (陸格子) からの距離と水深の関数として与え、陸に近いところおよび浅い海で時定数が小さくなるようにした。

海洋混合層モデルを導入した効果を見るために、2019 年台風第 10 号を対象とした比較実験の例を図 4.4.5 に示す。海洋混合層モデルを導入しない場合 (左図) は SST は初期値に固定される一方、NOAA によって作

成された SST 解析値である OISST<sup>6</sup>では台風の東側を中心に SST が低下しており、予測時間の経過とともに SST が解析値と乖離することが分かる。また、FT=72 での台風中心気圧もベストトラックでは 970 hPa であるのに対し、モデルの予測は 942.2 hPa となっており、明らかに過発達となっている。海洋混合層モデルを導入した場合 (中央図) には、OISST とは定量的な違いがあるものの台風の経路に沿って SST が低下している。台風中心気圧もベストトラックに近い値となっており、本改良により MSM2003 の台風の過発達傾向を改善しうると言える。

## (2) 蒸発散プロセスの改良

メソモデル・局地モデルに共通する課題として、地上気温の日変化が不明瞭 (日中の低温バイアス、夜間の高湿バイアス) であることや地上比湿が予測期間を通して負バイアスとなることが挙げられる。現ルーチン仕様 (MSM2003) では、日中低温バイアスを軽減する目的で、土壤水分を少なくして地表面からの顕熱フラックスを大きくさせる対処がとられている。しかし、土壤水分を減らす対処は同時に潜熱フラックスを減らす結果となり、地上比湿の負バイアスの要因にもなっている。さらに、用いている土壤水分はほとんどの地点でしおれ点 (植物が生育可能な最小の土壤水分) を下回り、明らかに現実的ではないことが分かっている。したがって、MSM2003 に見られる地上気温・比湿のバイアスは単に土壤水分を調節するだけでは解決できず、蒸発散プロセスそのものを見直すことが必要と考えられる。このような問題意識から、まず土壤水分気候値をより現実的なものに変更したうえで、蒸発散プロセスの定式の改良を行うことで、地上気温・比湿のバイアスを低減させることにした。

これまで、土壤水分気候値は暖候期・寒候期それぞれについて、土地利用種別ごとに主観的に定めた蒸発効率から診断していた。本改良ではメソ積雪解析で用いているオフライン陸面モデル (Kusabiraki 2015) を長期積分した結果を月別に平均することでモデル気候値を作成する方法に変更した。今回は、1998 年 1 月から 2010 年 12 月 (最初の 3 年はスピニングアップ期間) を対象に大気解析値を強制力として土壌 7 層、深さ約 3 m までの温度・水分を予測し、月別の気候値データセットを作成した。そして、このデータセットに基づき、メソモデルの陸面過程で用いる平均体積含水率を算出しモデルの入力とした。得られた土壤水分はほとんどの地点で従来の土壤水分よりも多くなり、植生のある地域でしおれ点を下回ることがなくなるなど、より現実的な値となることが確認できた。

蒸発散フラックスの定式化については、陸地での格子平均の蒸発散を遮断降水 (樹木等に捕捉され地面に到達しない降水) の蒸発・結露、植生域の蒸発散、裸地面

<sup>6</sup> Optimum Interpolation Sea Surface Temperature

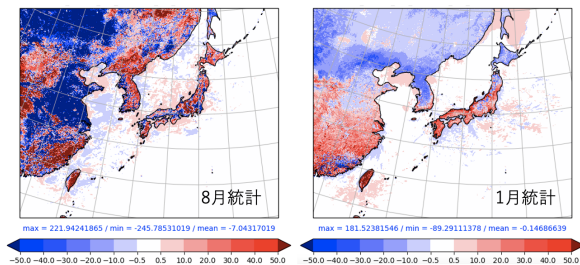


図 4.4.6 2019年8月(左)、2020年1月(右)を対象とした24時間最大潜熱フラックス ( $W/m^2$ ) の蒸発散プロセス改良後と改良前の差。00, 12UTC 初期値の1か月統計を示す。

の蒸発の3つのソースからの寄与としてそれぞれ考慮できるようにし、各プロセスについても見直しを図った。3つのソースからの寄与は都市・植生・裸地の格子内被覆率と保水率に応じて決定される。遮断降水や結露はこれまで考慮されてこなかった過程であり、これを新たに考慮することは降雨時やその直後の潜熱フラックスの再現性の向上につながると期待できる。植生域の蒸発散プロセスについては、気孔抵抗(気孔からの蒸散において生じる拡散抵抗)が日射量のみ依存して決定されるこれまでの定式から、Noilhan and Planton (1989)に基づき、日射量に加え気温、水蒸気、深層土壌水分、LAI<sup>7</sup>にも依存する定式に修正した。また、植生下地面からの蒸発についても植生の疎密に応じて考慮するよう修正した。裸地面の蒸発効率は地表付近の土壌体積含水率によって決定されるが、体積含水率に線形に依存する従来の定式から Lee and Pielke (1992) による定式に改めた。この修正により、土壌が乾燥すると蒸発効率が急激に低下し、裸地面からの蒸発が抑制されるようになる。

今回の蒸発散プロセス改良によるインパクトを見るために、図 4.4.6 に 2019年8月、2020年1月を対象とした24時間最大潜熱フラックスの1か月統計値の差を示す。夏は植生が多い地域で潜熱が増加する一方、乾燥域や都市域では減少する。また、冬については寒冷地を除いて潜熱は増加傾向にあることが確認できる。地上気象要素への影響については、他の改良項目も含めた検証結果として第 4.4.4 項で示す。

### (3) 境界層スキームの改良

境界層スキームは Nakanishi and Niino (2009) によって提案された MYNN レベル 3 モデル(以下 MYNN3)を採用している。MYNN3 の定式化では、渦粘性に用いる混合長や乱流運動エネルギー(TKE)の散逸率を特徴づける長さスケールなどは一つの代表的長さ(以下では元論文に倣って master length と表記する)によって表現される。master length は乱流渦の大きさを特徴づける長さ  $L_T$ 、安定成層によって鉛直混合が抑

<sup>7</sup> Leaf Area Index (葉面積指数)

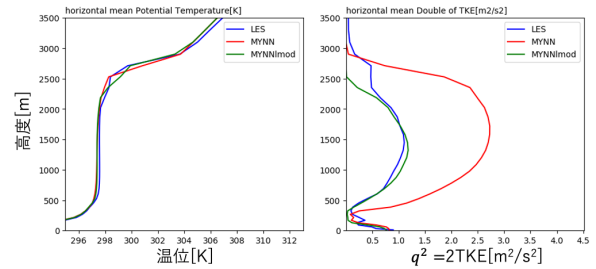


図 4.4.7 GABLS3 テストケース (FT=18) での水平平均した温位(左)と乱流速度の2乗(乱流運動エネルギーの2倍)(右)の鉛直プロファイル。青線、赤線、緑線はそれぞれ高解像度 LES、master length 修正前の MYNN3、修正後の MYNN3 の結果をそれぞれ示す。

制される効果を表す長さ  $L_B$ 、接地境界層での長さ  $L_S$  の3つによって決定される。今回の改良では、master length を構成するそれぞれの長さについて見直した。

MYNN3 は境界層内の乱流混合をパラメタライズすることを目的としたモデルであり、自由大気で乱流が生成され混合が起こることを想定しない設計となっている。一方で現行のメソモデルや局地モデルでは、MYNN3 を境界層内に限定せず自由大気でも適用しており、このことに起因して対流圏上層で TKE が生成される場合に  $L_T$  が過大に診断され、乱流フラックスが過剰になる問題が起こっていた。そこで、 $L_T$  を境界層と自由大気で独立に求めて鉛直分布を持たせることで、診断が過大にならないように改良した。この改良で新たに必要となる境界層高度<sup>8</sup>は、Olson et al. (2019) による方法に基づいて診断した。また、地表面熱フラックスが正の場合に  $L_B$  を大きくする項は境界層内のみで物理的意味を持つが、これまで全層にわたって適用されていた。境界層高度を診断することによってこの項を境界層内だけに適用することが可能になったことから、あわせて  $L_B$  の修正も行った。 $L_S$  については Nakanishi and Niino (2009) の定式化では不安定時に過大見積もりとなっている可能性があるため、Olson et al. (2019) に基づいて修正した。

境界層スキーム改良の効果を見るために、境界層の日変化を対象とした理想実験の一つである GABLS3 テストケース (Bosveld et al. 2014) の比較実験結果を図 4.4.7 に示す。この実験では鉛直1次元モデルの MYNN3 に加え、Large-Eddy Simulation (LES) による水平解像度 50 m の高解像度実験もあわせて実施した。図 4.4.7 に示した時刻では高度 500 m 以下の領域に安定境界層を形成している一方で、高度 1500 m 付近に鉛直シアがあり乱流が生成される状況となっている。修正前の MYNN3 では上層に TKE があることで  $L_T$  が過大に評価され、境界層より上層で LES から見

<sup>8</sup> MYNN3 は境界層高度を陽に定義しないスキームであるため、MYNN3 の定式化とは独立に境界層高度を診断する必要が生じる。

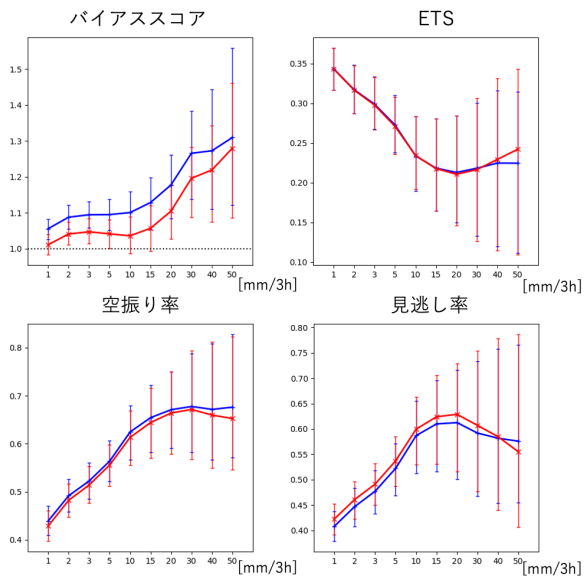


図 4.4.8 夏期間における3時間積算降水量(検証格子 20 km)の閾値別検証結果。左上: バイアスコア、右上: エクイタブルスレツスコア(ETS)、左下: 空振り率、右下: 見逃し率をそれぞれ表す。青線がCNTL、赤線がTESTの結果を示す。

積もられたTKEよりもはるかに大きくなっている。一方で修正後のMYNN3ではTKEの分布はLESと整合し、より適切に乱流輸送を評価できることが分かる。

#### 4.4.4 本改良による予測特性の変化

本項では、改良したメソ数値予報システムの予測特性の変化について述べる。以下では、現ルーチン(MSM2003)相当の設定の実験をコントロール(CNTL)とし、改良を適用した設定の実験をテスト(TEST)と記す。境界値はいずれも2021年3月現業化時のGSMを用いる。実験期間は、夏期間・冬期間それぞれ2019年8月1日-10月20日、2019年12月23日-2020年2月29日とした。

図4.4.8は夏期間における3時間積算降水量(検証格子20km)の閾値別検証結果である。CNTLのバイアスコアは全ての閾値で1を上回っており、降水予測の頻度が過剰傾向にあることが分かる。それに対し、TESTのバイアスコアは全ての閾値で1を上回っているもののCNTLよりも減少しており、降水予測の過剰バイアスが軽減した。TESTの降水頻度が減少した結果、空振りは減ったものの見逃しが増えたことで、エクイタブルスレツスコア(ETS)で見ると予測精度としては中立であった。冬期間についても同様の傾向があった(図略)。過剰な降水が減った事例として、図4.4.9に2019年9月20日21UTC(2019年台風第17号事例)の前3時間積算降水量・海面更正気圧の予測結果を示す。CNTLでは解析雨量と比較して山陰地方(図中赤丸で囲まれた領域)で雨量がやや過剰なのに対し、TESTでは雨量が抑えられていることが確認でき

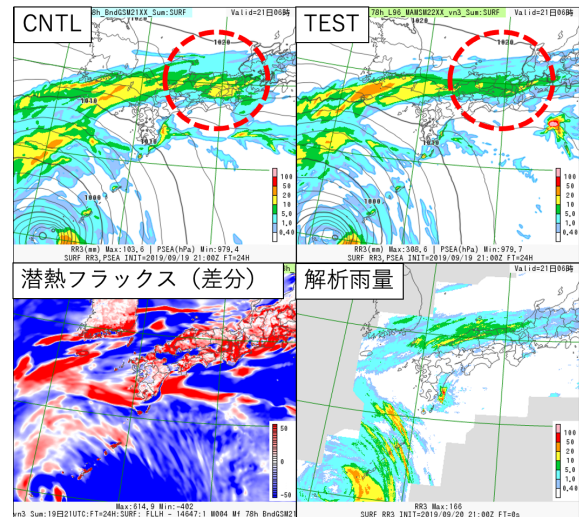


図 4.4.9 対象時刻2019年9月20日21UTC(FT=24)の前3時間積算降水量・海面更正気圧の予測結果(上図)および解析雨量(mm/3h)(右下)。左下図は同時刻における潜熱フラックス( $W/m^2$ )のTESTのCNTLからの差。

る。また、海上でTESTの方がCNTLよりも潜熱フラックスが小さくなっていることが分かる。海洋混合層モデルの導入によるSST低下や海塩による蒸発抑制効果が海面からの潜熱フラックスを減少させたことに加え、境界層モデルの更新や雲量診断で用いる臨界相対湿度の下限値変更が降水頻度の減少に寄与したと推測される。

図4.4.10は台風を対象とした、中心気圧・最大平均風速・中心位置の平均誤差の予測時間別検証結果である。第4.4.3項でも述べた通り、台風中心気圧は予測時間とともに過発達になる傾向があることがこの図からも確認できる。TESTでは過発達の傾向はあるもののCNTLよりも抑えられており、特に予報後半で中心気圧の負バイアスが軽減した。最大風速についてもCNTLに見られる正バイアスがTESTでは軽減し、強度予測の観点からは改善したといえる。海洋混合層モデルの導入、海塩による蒸発抑制効果により海面からの潜熱フラックスが減ったことが台風強度予測の改善に寄与したと考えられる。一方で、台風進路誤差についてはCNTLとTESTとで大きな違いは見られなかった。

図4.4.11は夏期間における水蒸気混合比と気温の対ラジオゾンデ平均誤差の鉛直プロファイルである。CNTLでは対流圏下層で水蒸気混合比の正バイアス、気温の負バイアスがあることがこの図から分かる。TESTではいずれのバイアスも軽減されており、特に925 hPa面で改善幅が大きい。また、夏期間ほど顕著ではないが冬期間でも同様の傾向が見られる(図略)。蒸発散プロセスの改良により陸上の顕熱・潜熱フラックスが改善したこと、境界層スキームの改良により境界層内で過剰な鉛直輸送が抑制されるようになったことがバイアス軽減の主要因と思われる。また、短波水蒸気吸収

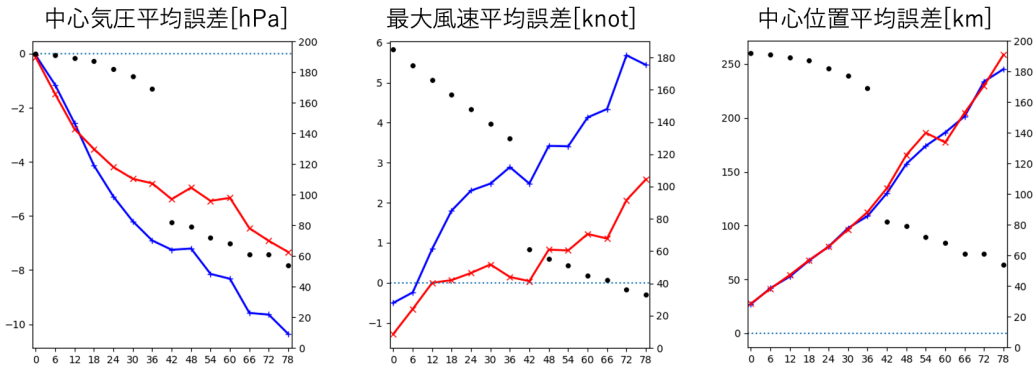


図 4.4.10 台風の中心気圧平均誤差（左）、最大風速平均誤差（中央）、中心位置平均誤差（右）の予測時間別検証結果。黒点は検証事例数（右側の軸に対応）を示す。横軸は予測時間 (h) であり、線種は図 4.4.8 と同様。

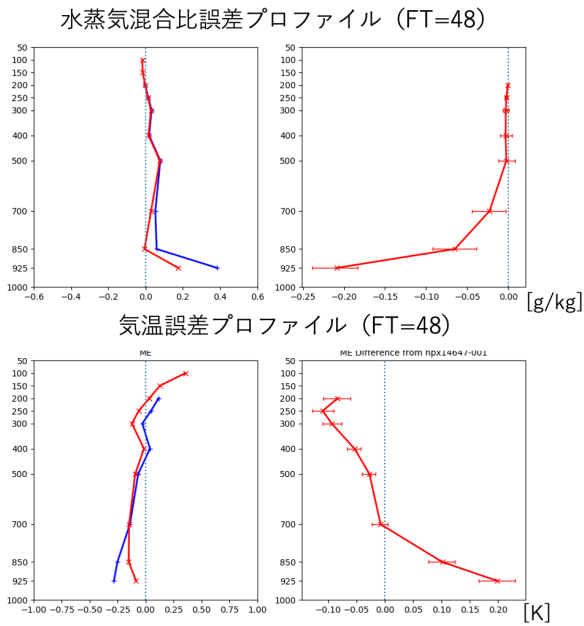


図 4.4.11 夏期間の水蒸気混合比（上段）、気温（下段）の FT=48 での対ラジオゾンデ平均誤差（左）および TEST の CNTL からの差（右）。縦軸は気圧 (hPa) を表す。線種は図 4.4.8 と同様。

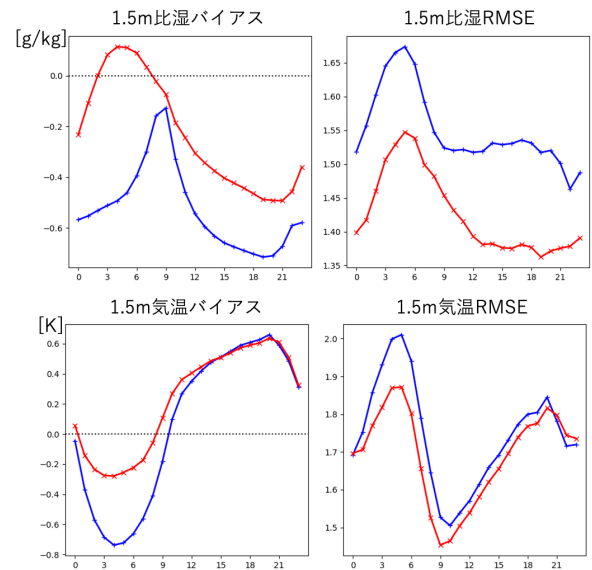


図 4.4.12 夏期間における対象時刻別の 1.5 m 比湿（上段）、1.5 m 気温（下段）の平均誤差（左）RMSE（右）。横軸は対象時刻 (UTC) であり、線種は図 4.4.8 と同様。

係数の更新は下層の非断熱加熱を増加させるインパクトがあることが分かっており、下層気温の上昇はこのことも影響したと考えられる。

夏期間における対象時刻別の 1.5 m 比湿、1.5 m 気温の統計検証結果を図 4.4.12 に示す。第 4.4.3 項でも述べた通り、地上気温には日中の低温バイアス、夜間の高温バイアスがあることや地上比湿に負バイアスがあることがこの図からも明らかである。TEST では日中の低温バイアスが縮小するとともに地上乾燥バイアスが大幅に縮小した。二乗平均平方根誤差 (RMSE) で見ても、気温は日中を中心に改善、比湿は全ての対象時刻で改善しており、土壌水分量気候値の更新や蒸発散プロセスの改良において当初の開発で意図した通りのインパクトが得られた。日中の地上比湿について観測地点別に見ても (図 4.4.13)、ほとんどの地点で CNTL

にあった比湿の負バイアスが TEST では比湿が増えることにより RMSE が改善することが確認できる。

#### 4.4.5 まとめ

2022 年にメソモデルの鉛直層を 76 層から 96 層に増強し、モデル上端高度を 21.8 km から 37.5 km に引き上げる計画である。これに合わせ、台風による豪雨を想定し、3 日先までの総雨量予測情報を提供するために 00, 12UTC 初期値の予測期間を 51 時間から 78 時間に延長する。本更新に向けて、現システムで見られるバイアスを軽減させるとともに、予測精度を向上させるため各物理過程の見直しや改良に取り組んだ。この改良により、台風の過発達傾向や地上気象要素のバイアスが軽減し、頻度過剰だった降水や下層の気温や水蒸気量のプロファイルが改善されることを確認した。一方で、降水予測精度の観点からは中立であり、精度改善のためには継続的な開発が求められる。線状降水

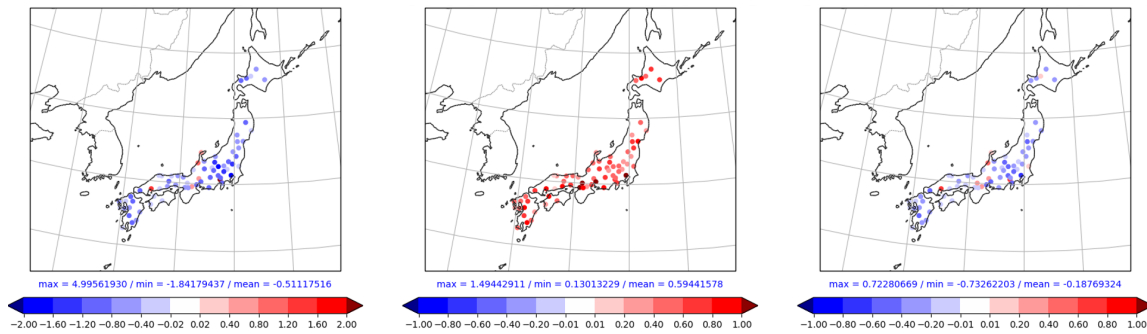


図 4.4.13 夏期間、対象時刻 12 時 (JST) における 1.5 m 比湿の観測地点別検証結果。左図は CNTL の平均誤差、中央は TEST の CNTL からの差、右図は RMSE の TEST の CNTL からの差をそれぞれ示す。カラーバーの単位は g/kg。

帯など顕著現象の予測を改善することや、そのような顕著現象をもたらす環境場の再現性を向上させることも引き続き重要な課題である。

#### 参考文献

- Bosveld, F. C., P. Baas, van E. Meijgaard, de E. I. F. Bruijn, G-J. Steeneveld, and A. A. M. Holtslag, 2014: The Third GABLS Intercomparison Case for Evaluation Studies of Boundary-Layer Models. Part A: Case Selection and Set-Up. *Bound.-Layer Meteor.*, **152**, 133–156.
- Caruana, R., R. Searle, T. Heller, and S. Shupack, 1986: Fast algorithm for the resolution of spectra. *Anal. Chem.*, **58**, 1162–1167.
- 藤田匡, 福田純也, 塚本暢, 2016: メソ数値予報システムの背景誤差の改良. 平成 28 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 63–67.
- Ikuta, Y., T. Fujita, Y. Ota, and Y. Honda, 2021: Variational Data Assimilation System for Operational Regional Models at Japan Meteorological Agency. *J. Meteor. Soc. Japan*, **99**, 1563–1592.
- 計盛正博, 2011: メソ解析における衛星観測輝度温度データの同化. 平成 23 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 3–8.
- 気象庁予報部, 2003: 気象庁非静力学モデル. 数値予報課報告・別冊第 49 号, 気象庁予報部, 194 pp.
- 気象庁予報部, 2010: 非静力学メソ 4 次元変分法. 数値予報課報告・別冊第 56 号, 気象庁予報部, 106 pp.
- 気象庁予報部, 2014: 次世代非静力学モデル asuca. 数値予報課報告・別冊第 60 号, 気象庁予報部, 151 pp.
- 気象庁予報部, 2019: メソスケール気象予測の現状と展望. 数値予報課報告・別冊第 66 号, 気象庁予報部, 165 pp.
- 気象庁, 2021a: メソ解析とメソ予報の改良. 数値予報開発センター年報 (令和 2 年), 気象庁 数値予報開発センター, 48–55.
- 気象庁, 2021b: 局地モデルの鉛直層増強と物理過程改良. 数値予報開発センター年報 (令和 2 年), 気象庁

数値予報開発センター, 97–102.

- Kusabiraki, H., 2015: Improvement of snow analysis using an offline land-surface model. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, **45**, 01.13–01.14.
- Lee, T. J. and R. A. Pielke, 1992: Estimating the Soil Surface Specific Humidity. *J. Appl. Meteor. Climat.*, **31**, 480–484.
- 萬納寺信崇, 2000: 領域モデル (RSM, MSM, TYM). 平成 12 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 23–27.
- Nakanishi, M. and H. Niino, 2009: Development of an Improved Turbulence Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer. *J. Meteor. Soc. Japan*, **87**, 895–912.
- Noilhan, J. and S. Planton, 1989: A Simple Parameterization of Land Surface Processes for Meteorological Models. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 536–549.
- 岡本幸三, 2007: ATOVS とは. 数値予報課報告・別冊第 53 号, 気象庁予報部, 57–58.
- Olson, J. B., J. S. Kenyon, W. M. Angevine, J. M. Brown, M. Pagowski, and K. Sušelj, 2019: A Description of the MYNN-EDMF Scheme and the Coupling to Other Components in WRFARW. *NOAA Technical Memorandum OAR GSD*, **61**, 37 pp.
- Parrish, D. F. and J. C. Derber, 1992: The National Meteorological Center's spectral statistical-interpolation system. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 1747–1763.
- Price, J. F., T. B. Sanford, and G. Z. Forristall, 1994: Forced Stage Response to a Moving Hurricane. *J. Phys. Ocean.*, **24**, 233–260.
- Price, J. F., R. A. Weller, and R. Pinkel, 1986: Diurnal cycling: Observations and models of the upper ocean response to diurnal heating, cooling. *J. Geophys. Res.*, **91**, 8411–8427.



## 4.5 メソアンサンブル予報システムの鉛直層増強と物理過程改良

### 4.5.1 はじめに

メソアンサンブル予報システム (MEPS) は、メソモデル (MSM) 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運用されており、MSM と合わせて防災気象情報、航空気象情報、天気予報等の作成を支援する資料として利用されている。

MEPS の仕様は国井・小野 (2020) に解説がある。実行頻度は1日4回 (予報初期時刻: 00,06,12,18UTC)、予報時間は全予報初期時刻において39時間であり、摂動を与えないコントロールランを含め全21メンバーでアンサンブルを構成する。各メンバーの予報の計算領域や水平格子間隔 (5 km)、鉛直層配置、物理過程を含む各種設定をMSMに揃えている。2022年に計画されているメソ数値予報システムの更新 (第4.4節) では、MSMの鉛直層を76層から96層に増強し、モデル上端高度を21.8 kmから37.5 kmに引き上げ、あわせて物理過程の改良が行われる。このMSMの更新計画に追随し、MEPSの設定も更新する計画である<sup>1</sup>。

本節では、2022年のMSM更新に追随して行う予定のMEPSの鉛直層増強と物理過程改良について、これまでの検証実験で得られた予測特性の変化について報告する。

### 4.5.2 変更の概要

はじめに述べたとおり、本変更の内容は、2022年のMSM更新 (以下MSM22XXと表記) で計画されている鉛直層増強と物理過程改良をMEPSにも以下のとおり導入することである。

- 鉛直層増強: 鉛直層を76層から96層に増強する。地上から76層の層配置はほぼ現ルーチンと同様とし、モデル上端高度を21.8 kmから37.5 kmに引き上げる。
- 物理過程改良: (第4.4.3項) で説明するMSM22XXの物理過程改良を全てMEPSの予報モデルに取り込む。

それ以外のMEPSの仕様は、気象庁 (2021) による初期・側面境界摂動の作成手法の改良以降の変更はない。

### 4.5.3 本変更による予測特性の変化

変更したMEPSの予測特性の変化について述べる。現ルーチン設定の実験をコントロール (CNTL) とし、変更した設定の実験をテスト (TEST) とする。境界値はいずれも2021年3月現業化時のGSMを用いる。実験期間は夏実験:2019年8月1日-8月31日、冬実験:2020

<sup>1</sup> 2022年のMSM更新では予報時間延長 (00,12UTC初期値について51時間から78時間へ) も計画されているが、計算機資源およびその活用による数値予報システム全体の改良計画 (石田ほか 2017) に基づきMEPSの予報時間は変更しない。

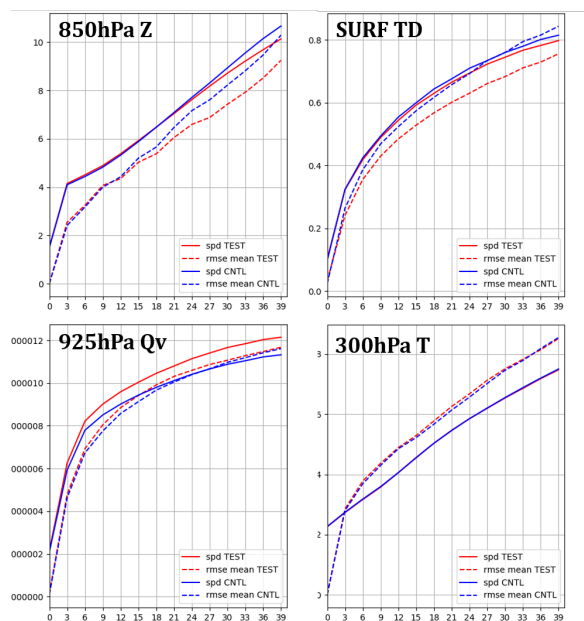


図 4.5.1 夏実験期間におけるアンサンブルスプレッド (実線) およびアンサンブル平均のRMSE (点線) の予報時間別の検証結果。青線がCNTL、赤線がTEST。(左上) 850 hPaの高度場 [m]、(右上) 地上の露点温度 [K]、(左下) 925 hPaの比湿 [g/kg]、(右下) 300 hPaの気温 [K]。検証領域は125°-145°E, 25°-45°Nの領域。

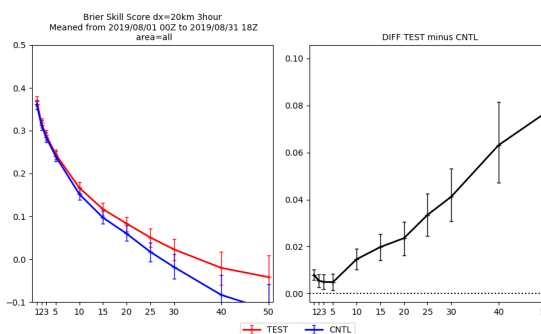


図 4.5.2 夏実験期間の3時間降水量の (左) ブライアスキルスコア、(右) TESTとCNTLの差。青線がCNTL、赤線がTEST。横軸は閾値 [mm/3h]。

年1月20日-2月25日とした。

図4.5.1に夏実験期間についてアンサンブルスプレッドとメソ解析を参照値としたアンサンブル平均の二乗平均平方根誤差 (RMSE) の領域平均の時系列を示す。上段に示すように対流圏下層の高度場および地上露点温度のアンサンブル平均のRMSEが減少した。ほかの地上気象要素についても同様の傾向であった。MSM22XXの物理過程改良において対流圏の下層環境場および地上気象要素の改善が見られており、このことと整合する結果である。地上気象要素については冬実験期間も同様の傾向であった (図略)。下段左に示すように925 hPaの水蒸気場ではスプレッドが増加した。境界層スキームの改良により各メンバーの予報においてMSM22XX

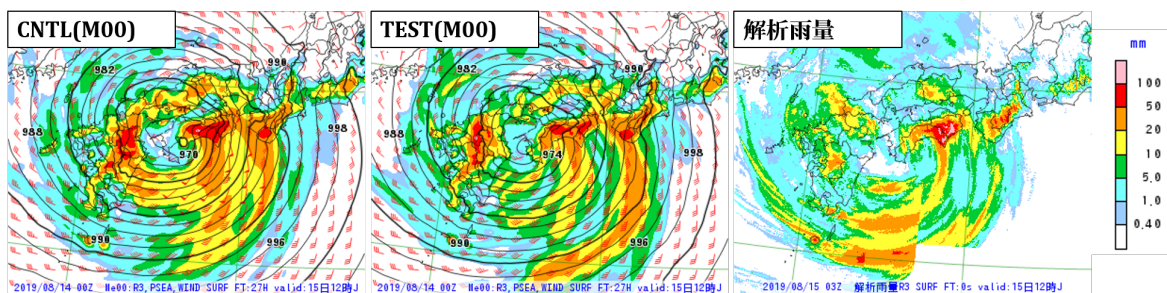


図 4.5.3 2019 年 8 月 15 日 21UTC の 3 時間降水量・海面更正気圧について CNTL (左) と TEST (中) のコントロールランの予測結果 (2019 年 8 月 14 日 00UTC 初期値の FT=27) および解析雨量 (右)。

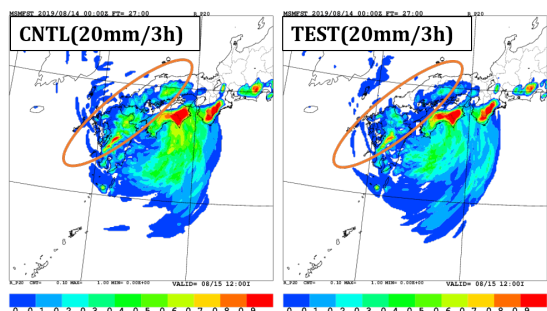


図 4.5.4 2019 年 8 月 15 日 21UTC の 3 時間降水量について 20 mm/3h の超過確率。(左) CNTL、(右) TEST。2019 年 8 月 14 日 00UTC 初期値の FT=27。

と同様に雲域で個々の細かいセルが表現されるようになっており、対応した細かい構造が水蒸気場に見られるようになったことを反映した結果と考えられる。下段右には 300 hPa の気温について示す。300 hPa では CNTL と TEST でほとんど変化はなく、モデル上端高度が引き上げられた影響は見られなかった。冬実験期間でも同様であった。MSM22XX ではこの高度の予測特性に大きな変化はないこと、初期・境界摂動に用いる特異ベクトル (SV) 法の鉛直ターゲット域は変えていない (メソ SV は、水蒸気量は高度約 2900 m、水蒸気量以外は高度約 5300 m まで、全球 SV は高度約 9000 m まで) ことから、上層における各メンバーのばらつき方にほとんど変化がなかったと考えられる。

降水確率予測の変化を確認するため夏実験期間の 3 時間降水量のブライアスキルスコア (BSS) を図 4.5.2 に示す。いずれの閾値においても CNTL に対して TEST が改善する。降水確率予測の改善につながったと考えられる代表的な事例として、2019 年 8 月 15 日の台風に伴う降水事例を挙げる。図 4.5.3 に 2019 年 8 月 15 日 21UTC の 3 時間降水量のコントロールランの予測結果を示す。CNTL では解析雨量と比較して過大であった中国地方、九州地方の降水域の予測が、TEST では縮小していることが分かる。MSM22XX では降水過剰バイアスが減少し空振りが減ったことが述べられており、この事例でもその傾向が見られる。同時刻を対象とした 3 時間降水量の 20 mm/3h の超過確率を図 4.5.4

に示す。中国地方、九州地方において、CNTL に比べ TEST の 30% 以上を示す領域が縮小し、解析雨量との対応が良くなっていた。MSM の物理過程改良の効果が MEPS の各メンバーの予測にも反映された結果と考えられる。このような事例の結果を反映して夏実験期間の BSS が改善していた。冬実験期間の BSS の変化は中立であった (図略)。

#### 4.5.4 まとめ

2022 年に MEPS の鉛直層を 76 層から 96 層に増強し、モデル上端高度を 21.8 km から 37.5 km に引き上げ、物理過程を改良する計画である。これらは MSM の更新計画に追随し、MEPS の予報モデルの設定を MSM に揃える変更である。この変更により降水確率予測の改善や地上気象要素のアンサンブル平均の改善を確認した。

今後メソスケールのアンサンブル予報の高度化に取り組んでいく。MEPS の初期摂動への asuca に基づく SV 法の導入、数値予報モデルの不確実性を考慮する手法の導入が開発課題として挙げられる。豪雨防災に資する領域アンサンブル予報の観点では、線状降水帯に代表されるような集中豪雨の予測が持つ不確実性を適切に捕捉可能なアンサンブル予報システムの開発が課題となっている (第 2.6 節)。MEPS よりも時空間スケールの小さい現象が対象となり未解明の部分は多いが、初期値、境界値、数値予報モデルの不確実性を適切に表現できるシステムを検討していく必要がある。

#### 参考文献

- 石田純一, 高田伸一, 栗原茂久, 2017: 第 10 世代数値解析予報システム. 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 113-123.
- 気象庁, 2021: メソアンサンブル予報システムの改良. 数値予報開発センター年報 (令和 2 年), 気象庁 数値予報開発センター, 66-73.
- 國井勝, 小野耕介, 2020: メソアンサンブル予報システム. 数値予報課報告・別冊第 66 号, 気象庁予報部, 85-115.

## 4.6 局地解析へのハイブリッド同化手法の導入

### 4.6.1 はじめに

局地数値予報システム<sup>1</sup>は、時空間スケールの細かな現象の予測を目的に水平格子間隔 2 km の予報システムとして運用されており、防災気象情報・航空気象情報の作成を支援する重要な数値予報システムと位置付けられている。2021 年 3 月の局地モデルの鉛直層増強と物理過程改良（第 3.4 節）に続き、2022 年には局地解析の背景誤差共分散のハイブリッド化と気候学的背景誤差の更新、メソ数値予報システムの更新（第 4.4 節）に伴う予報モデルの物理過程の改良を計画している。本節では、横田ほか (2021) に基づき局地解析へのハイブリッド同化手法の導入に向けた開発について説明し、これまでの検証実験で得られた結果について報告する。

### 4.6.2 ハイブリッド同化の概要

局地解析は、メソモデルの予報値（解析時刻 3 時間前）を出発点に、3 次元変分法 (3DVar) による解析と 1 時間予報（水平格子間隔 5 km）で初期時刻を更新しながら 3 回繰り返した後、解析時刻で 3DVar を行い、その解析値は局地モデル LFM の初期値として用いられる。しかし、ここで用いられる 3DVar は、第一推定値の誤差を表現する背景誤差として、NMC 法 (Parrish and Derber 1992) で作成された気候学的な背景誤差共分散行列  $\mathbf{B}_c$  が使われており、これが水平方向に一樣であるため、予測の不確実性の空間分布を解析インクリメントに適切に反映できないという問題がある。この問題を軽減するため、場の流れに依存した背景誤差として、メソアンサンブル予報システム MEPS（水平格子間隔 5 km、摂動メンバー数 20）の予報値のアンサンブル平均からの差（以下、MEPS 摂動）を用いて作成した誤差共分散行列  $\mathbf{B}_e$  と  $\mathbf{B}_c$  を混ぜて用いるハイブリッド同化 (Lorenz 2003) を局地解析に導入する。

今回導入するハイブリッド化した 3DVar (Hybrid-3DVar) は、下記の評価関数を最小化することによって解析インクリメント  $\delta \mathbf{x}$  を得る。

$$J(\mathbf{v}) = \frac{1}{2} \mathbf{v}^T \mathbf{v} + \frac{1}{2} (\mathbf{H} \delta \mathbf{x} - \mathbf{d})^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{H} \delta \mathbf{x} - \mathbf{d}) + J_{bc}$$

$$\delta \mathbf{x} \equiv \mathbf{B}^{1/2} \mathbf{v} \equiv \begin{pmatrix} \beta_c \mathbf{B}_c^{1/2} & \beta_e \mathbf{B}_e^{1/2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{v}_c \\ \mathbf{v}_e \end{pmatrix} \quad (4.6.1)$$

ここで  $\mathbf{d} = \mathbf{y}^o - \mathbf{H}(\mathbf{x}^b)$  は観測値  $\mathbf{y}^o$  の第一推定値  $\mathbf{x}^b$  からの差 (イノベーション)、 $\mathbf{H}$  と  $\mathbf{H}$  は観測演算子とその接線形、 $\mathbf{R}$  は観測誤差共分散行列、 $\mathbf{B}_c$  は気候学的な

<sup>1</sup> 局地解析と局地モデル (予報モデル) を合わせて局地数値予報システムと表記する。

背景誤差共分散行列、 $\mathbf{B}_e$  は MEPS 摂動から作成された誤差共分散行列、 $\mathbf{v}_c$  と  $\mathbf{v}_e$  は制御変数、 $J_{bc}$  はバイアス補正項である。 $\beta_c$  と  $\beta_e$  はハイブリッドの重みであり、 $(\beta_c^2, \beta_e^2) = (1, 0)$  であれば  $\mathbf{B} = \mathbf{B}_c$ 、 $(\beta_c^2, \beta_e^2) = (0, 1)$  であれば  $\mathbf{B} = \mathbf{B}_e$  で解析が行われることになる。

この  $\mathbf{B}_e$  の作成に用いられる MEPS の実行は 6 時間毎であるが、局地解析は 1 時間毎に実行するため、利用する MEPS 摂動は解析時刻によって予報時間が異なる。MEPS 摂動の大きさは予報時間が進むほど大きくなるため、この摂動をそのまま  $\mathbf{B}_e$  作成に用いるのは適切でない。そこで、MEPS 摂動に対して解析時刻ごとに異なる係数 (高度 5.5 km の温位の気候学的な誤差分散を MEPS 摂動の分散の水平平均で割ったもの) を  $\mathbf{B}_e$  に乗じてから解析に用いるという誤差共分散膨張を導入した。これにより、 $\mathbf{B}_e$  が  $\mathbf{B}_c$  と同等の大きさになり、予報時間による  $\mathbf{B}_e$  の大きさの変化が軽減される。

また、 $\mathbf{B}_e$  は限られたメンバー数の MEPS 摂動から作成されるため、特に空間的に離れた点同士の誤差相関は相対的にサンプリング誤差が大きく、これをそのまま用いて解析を行うことは適切でない。そこで、 $\mathbf{B}_e$  には水平方向と鉛直方向の距離によってガウス型に減衰する関数を乗じ (空間局所化)、離れた点同士の誤差相関を小さくした上で用いた。

限られたメンバー数の MEPS 摂動から  $\mathbf{B}_e$  を作成するという課題に対しては、異なる初期時刻の MEPS を用いることで摂動作成に利用するメンバーを増やす、LAF (Lagged Averaged Forecast) 法によるアプローチも有効と考えられる。以下、第 4.6.3 項と第 4.6.4 項では、LAF 法の有効性を含めて、Hybrid-3DVar の解析インクリメントや予測精度へのインパクトを確認する。

### 4.6.3 Hybrid-3DVar の導入による解析インクリメントの変化

Hybrid-3DVar の導入による解析インクリメントの変化を把握するため、 $x$  方向の風 (イノベーション: 5 m/s、観測誤差標準偏差: 1 m/s) を 2019 年 8 月 5 日 21UTC の台風の南 (図 4.6.1(a) の \* の位置) の高度 900 hPa に同化するという 1 点観測同化実験を行った。 $\mathbf{B}_e$  は 18UTC を初期値とする 20 メンバーの MEPS 摂動から作成したものと、06, 12, 18UTC を初期値とする計 60 メンバーの MEPS 摂動から LAF 法により作成したものの 2 パターン用意し、空間局所化のスケール (局所化関数が  $e^{-0.5}$  になる距離) は水平 100 km、鉛直 0.5 km とした。なお、60 メンバーの実験では、予報時間が異なるため摂動の大きさが異なるアンサンブル予報を混ぜることによる悪影響を抑えるため、予報時間の長さに応じて異なる誤差共分散膨張係数を乗じて  $\mathbf{B}_e$  を作成した。

実験の結果、 $\mathbf{B} = \mathbf{B}_c$  の場合は  $x$  方向の風の解析インクリメントが楕円形の分布になる (図 4.6.1(b)) のに對

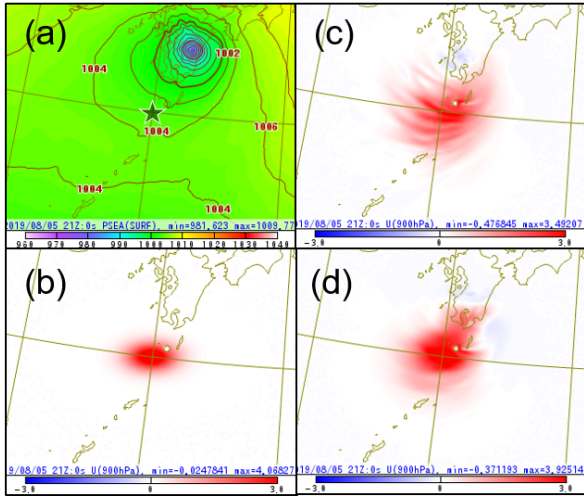


図 4.6.1 1点観測同化実験における (a) 地上気圧の第一推定値 [hPa] と (b-d) 900 hPa の  $x$  方向の風の解析インクリメント [ $\text{m s}^{-1}$ ]。 (b-d) の  $\mathbf{B}$  の設定はそれぞれ (b):  $\mathbf{B} = \mathbf{B}_c$ 、(c):  $\mathbf{B} = \mathbf{B}_e$  (20 メンバー)、(d):  $\mathbf{B} = \mathbf{B}_e$  (60 メンバー)。

し、 $\mathbf{B} = \mathbf{B}_e$  の場合は台風の流りに沿った分布になり、メンバー数が増えるとより水平方向に滑らかな分布になった (図 4.6.1(c),(d))。なお、 $\mathbf{B} = \mathbf{B}_e$  の場合は風以外の要素もアンサンブル相関に基づく解析インクリメント (台風中心付近での気圧の低下など) が見られた (図略)。また、ハイブリッドの重みを  $(\beta_c^2, \beta_e^2) = (0.5, 0.5)$  とした場合の解析インクリメントは、 $\mathbf{B} = \mathbf{B}_c$  の場合と  $\mathbf{B} = \mathbf{B}_e$  の場合を平均したような分布になった (図略)。

#### 4.6.4 性能評価

Hybrid-3DVar の導入による予報への影響を確認するため、夏は 2020 年 7 月 2 日-7 月 15 日、冬は 2020 年 1 月 11 日-1 月 21 日の期間 (3 時間毎) について実験を行った。

実験では、先に述べたハイブリッド化に加え、現ルーチン相当のシステムから次の二つの変更を加える。一つは、局地解析とメソ解析の解析モジュールの統一化<sup>2</sup>を図るもので、予測精度をほぼ変えない仕様変更が含まれる。例えば、観測演算子において観測相当量へ変換してから空間内挿していたところを、空間内挿してから観測相当量に変換するように変更する、 $x, y$  方向の風の制御変数の配置をスカラーポイントからそれぞれ  $x, y$  方向に半格子ずれた  $u, v$  ポイントに変更する、といった点である<sup>3</sup>。もう一つは気候学的背景誤差の修正である。これは、 $x$  方向の風と  $y$  方向の風の誤差分散の大きさがメソ解析と大きく異なる<sup>4</sup>ことから、その修正

を試みたものである。今回は大気中の制御変数 (風、温位、地上気圧、偽相対湿度) の誤差分散をメソ解析の気候学的背景誤差の誤差分散 (第 4.4.2 項) に置き換えることとした<sup>5</sup>。また、 $\mathbf{B}_c^{1/2}$  の定義を  $\mathbf{B}_c^{1/2} = \mathbf{B}_v^{1/2} \mathbf{B}_h^{1/2}$  からメソ解析の設定に合わせて  $\mathbf{B}_c^{1/2} = \mathbf{B}_h^{1/2} \mathbf{B}_v^{1/2}$  に変更する ( $\mathbf{B}_h$  と  $\mathbf{B}_v$  はそれぞれ水平、鉛直方向の気候学的な背景誤差共分散行列)。

前項では、60 メンバーに増やした場合に解析インクリメントがより滑らかになるを見たが、ここでも LAF 法によりメンバー数を増加した場合の予報への影響を見るためにいくつかの設定を比較する。

実験の名称は以下のとおりとする。

- CNTL: 2021 年 5 月時点のルーチン相当
- M000: 非ハイブリッド ( $(\beta_c^2, \beta_e^2) = (1, 0)$ )
- M020: 20 メンバー (LAF を行わない)
- M060: 60 メンバー (3 初期値の LAF)
- M100: 100 メンバー (5 初期値の LAF)

2021 年 5 月時点の現業局地数値予報システム相当の設定の実験をコントロール (CNTL) とする。CNTL に対して、解析モジュールの統一化および気候学的背景誤差の修正を加えた実験を M000 とする (非ハイブリッドである)。M000 に対して前項のハイブリッド同化を導入した実験を M020 とする (ただし、LAF 法を行わない)。M020 に対して LAF 法によりメンバー数を 60, 100 に増加した実験をそれぞれ M060, M100 とする。M020, M060, M100 が Hybrid-3DVar の実験であり、予備調査の結果を踏まえていずれも  $(\beta_c^2, \beta_e^2) = (0.5, 0.5)$  とし、局所化スケールは水平 100 km、鉛直 0.5 km とした。

図 4.6.2 は夏期間における地上比湿と地上風速の予報時間別の統計検証結果である。比湿は、M020 では乾燥バイアスが拡大し二乗平均平方根誤差 (RMSE) が悪化するが、メンバー数を増やすと乾燥バイアスが CNTL と同程度になるとともに RMSE が改善した。このことは、観測数の多い地表面付近では特にサンプリング誤差による悪影響が大きく、これがメンバー数の増加によって軽減することを示していると考えられる。風速はハイブリッド同化導入により平均誤差 (ME), RMSE が改善傾向であった。気温もハイブリッド同化導入により RMSE が改善し、メンバー数が大きいほど改善する傾向であった (図略)。冬期間についても同様の傾向を確認している。

図 4.6.3 には夏期間における 1 時間降水量の閾値別検証結果を示す。強雨を中心に空振りが見逃しが減少し、エクイタブルスレットスコア (ETS) が改善した。1-3 mm/h 程度の弱雨については見逃しが増加するが空振りは減少し、ETS は改善した。冬期間についても降水検証において全般的に改善が見られた (図略)。

<sup>2</sup> asuca-Var (Ikuta et al. 2021) のメソ解析への導入時に、局地解析に導入している asuca-Var モジュールは更新しなかったため、今回更新する。

<sup>3</sup> いずれもメソ解析と同じ仕様にするもので、幾田 (2014) から Ikuta et al. (2021) への更新にあたる。

<sup>4</sup> メソ解析の誤差分散と比べて、 $x$  方向の風については過大、 $y$  方向の風については過小である。

<sup>5</sup> この変更で局地解析の性質 (高解像度の解析インクリメントが入る) が大きく変わらないように、水平誤差相関と鉛直誤差相関は変えない。

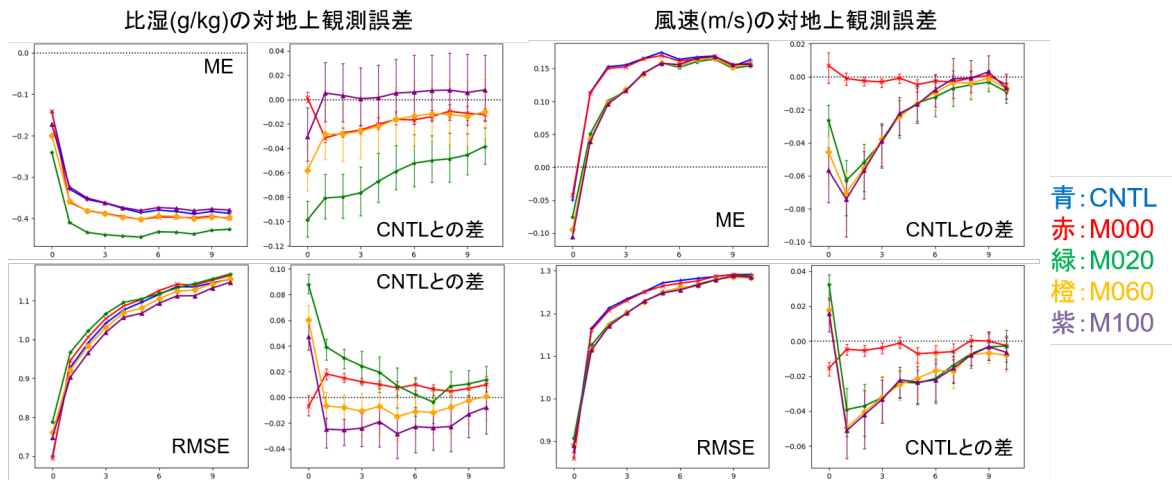


図 4.6.2 夏期間における（左）地上比湿、（右）風速の対地上観測検証結果。それぞれ上段に ME とその CNTL との差、下段に RMSE とその CNTL との差を示す。横軸は予報時間 [h]。青線は CNTL、赤線は M000、緑線は M020、橙線は M060、紫線は M100 の結果を示す。

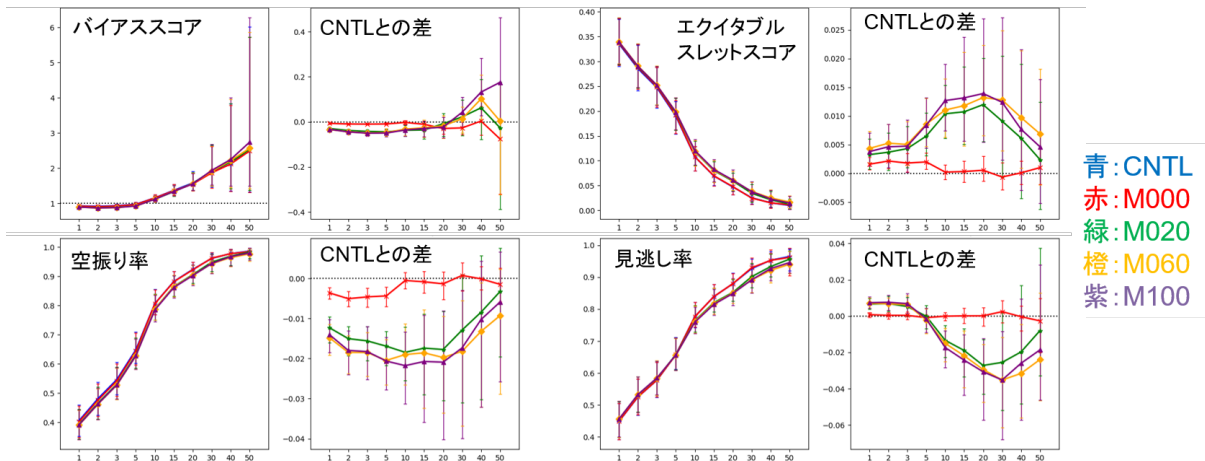


図 4.6.3 夏期間における 1 時間降水量 [mm/h] (検証格子 10 km) の閾値別の対解析雨量検証結果。(左上) バイアスコアとその CNTL との差、(右上) エクイタブルスレットスコア (ETS) とその CNTL との差、(左下) 空振り率とその CNTL との差、(右下) 見逃し率とその CNTL との差。線種は図 4.6.2 と同様。

図 4.6.4 に示す、2020 年 7 月 3 日 12UTC 初期値の FT=6-9 の 3 時間降水量の予測では、ハイブリッド同化の導入によって、熊本県を中心とする線状降水帯をより実況に近い位置に表現することができており、M100 の予測結果が最も良かった。図 4.6.5 に示すように、この初期値を作成するための解析では、ハイブリッド同化の導入によって、CNTL に比べて流れに依存した解析インクリメントが入るようになっていた。同図の黒丸で囲った領域では、第一推定値において線状降水帯付近へ暖気が流入しており（図略）、メンバー数が多いほど線状降水帯付近への暖気の流入を強めていた。メンバー数が多いほど暖気流入が強かったのは、LAF により前線近傍のスプレッドが大きくなったこと（図略）に対応して、解析インクリメントが入りやすくなったためと考えられる。

#### 4.6.5 まとめ

局地数値予報システムについて、局地解析の背景誤差共分散のハイブリッド化と気候学的背景誤差の更新、メソ数値予報システムの更新（第 4.4 節）に伴う予報モデルの物理過程の改良を計画している。本更新に向けて、MEPS 摂動を用いて作成した誤差共分散行列と気候学的な誤差共分散行列を混ぜて用いるハイブリッド同化を局地解析に導入し（Hybrid-3DVar）、これによって強い雨や地上気象要素を中心に予測精度が向上することを確認した。また、LAF 法により MEPS 摂動作成に利用するメンバー数を増やすことの有効性を確認した。今後は、メソ数値予報システムの更新（第 4.4 節）とそれに伴う局地モデルの物理過程改良、MEPS の更新（第 4.5 節）を反映する等、2022 年の局地予報システムの更新に向けた準備を進めていく。

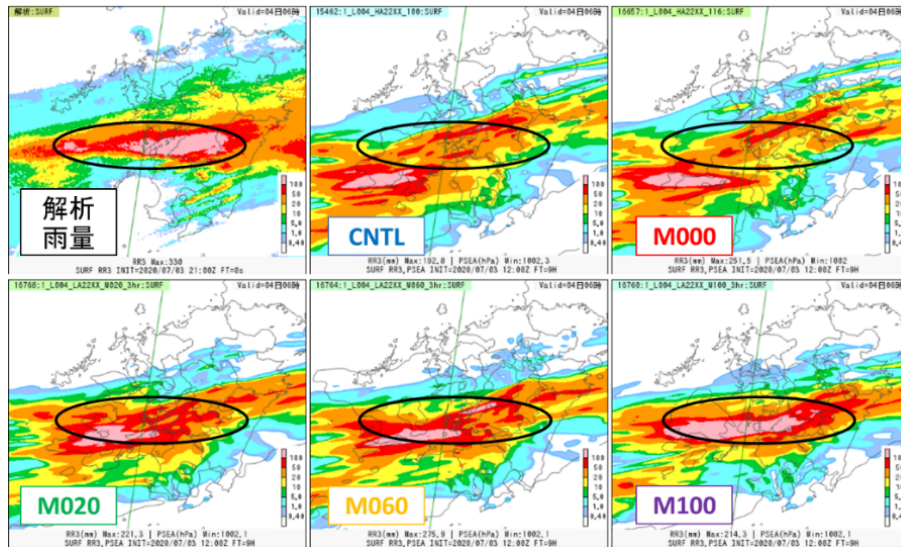


図 4.6.4 2020 年 7 月 3 日 21UTC の 3 時間降水量 [mm/3h] について、解析雨量（左上）と各実験における予測結果（2020 年 7 月 3 日 12UTC の FT=6-9）。

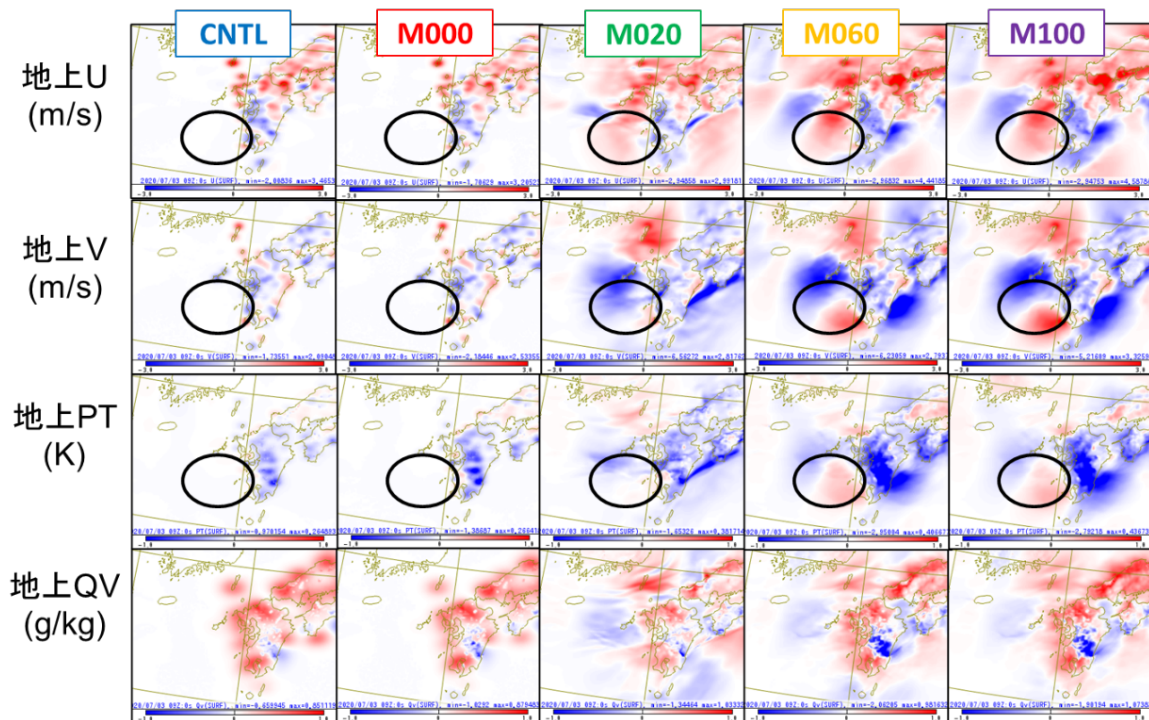


図 4.6.5 2020 年 7 月 3 日 12UTC の初期値作成までの 4 回の解析のうちの最初の解析（09UTC）における解析インクリメント。上から地上の  $x$  方向の風 [m/s]、 $y$  方向の風 [m/s]、温位 [K]、比湿 [g/kg] について、左から CNTL, M000, M020, M060, M100 の各実験について示す。

#### 参考文献

- 幾田泰醇, 2014: asuca 変分法データ同化システム. 数値予報課報告・別冊第 60 号, 気象庁予報部, 91–97.
- Ikuta, Y., T. Fujita, Y. Ota, and Y. Honda, 2021: Variational Data Assimilation System for Operational Regional Models at Japan Meteorological Agency. *J. Meteor. Soc. Japan*, **99**, 1563–1592.
- Lorenz, A. C., 2003: The potential of the ensemble Kalman filter for NWP—a comparison with 4D-Var.

*Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **129**, 3183–3203.

- Parrish, D. F. and J. C. Derber, 1992: The National Meteorological Center’s spectral statistical-interpolation system. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 1747–1763.
- 横田祥, 秋元銀河, 河野耕平, 幾田泰醇, 2021: 気象庁局地解析へのハイブリッド同化手法の導入に向けた開発. 第 23 回非静力学モデルに関するワークショップ予稿集.

## 4.7 高頻度大気解析

### 4.7.1 はじめに

高頻度大気解析は、現行の毎時大気解析を高解像度化、高頻度化することで、日本周辺における大気の実況監視をよりきめ細やかに行うことを目的として作成する、風と気温の客観解析値である。令和4年度中の運用開始に向けて開発が進められている。

大気の実況監視を支援するため、気象庁は様々な観測データを利用して短時間のうちに客観解析を行い、速報的な3次元GPVとして提供する、「毎時大気解析」を運用してきている(室井ほか 2008)。その歴史は、2002年1月より慣熟的にデータ配信が開始された「毎時下層風解析」(酒井 2001)に始まる。メソ予報(MSM)の下層風予報値をウィンドプロファイラデータで補正(解析手法として最適内挿法を採用)するものであった。2003年11月にはアメダスを利用した地上風の解析を追加して「毎時風解析」(西嶋 2004)と名称を変更した。2006年3月には第8世代のスーパーコンピュータシステムの導入により解析格子を高解像度化し(水平格子間隔10 kmから5 kmへ)、解析要素に気温を追加して「毎時大気解析」と名称を改めた(西嶋 2005)。その後、3次元変分法の導入とドップラー速度の利用開始(藤田 2007)、大気下層の解析の変更(藤田 2008)、asuca-Varによる3次元変分法への更新(原・工藤 2017)が行われてきた。

2018年に導入された第10世代のスーパーコンピュータにおいて、その計算機資源を活かした現業数値予報システムの改良計画が立てられ、毎時大気解析については水平格子間隔を5 kmから2 kmへ、鉛直層数を48層から76層へ、実行頻度を1日24回から48回へと増強することが計画されている(石田ほか 2017)。本節では、この計画に基づく毎時大気解析の高解像度化、高頻度化の開発について報告する。解析の頻度が「毎時」ではなくなる等から「高頻度大気解析」と名称を新たにすることとした。

### 4.7.2 高頻度大気解析システム

表4.7.1に毎時大気解析と比較した高頻度大気解析の仕様を示す。

#### 高解像度化、高頻度化

毎時大気解析は、水平格子間隔5 kmのMSMを第一推定値として利用し、解析を水平格子間隔5 km、鉛直48層で行っている。これに対して、高頻度大気解析は、水平格子間隔2 kmの局地予報(LFM)を第一推定値として利用し、解析を水平格子間隔2 km、鉛直76層で行う(高解像度化)。さらに、高頻度大気解析は毎正時に加え、毎正時30分にも解析を行う(高頻度化)。この二点が毎時大気解析と高頻度大気解析の大きな仕様の違いになる。第一推定値にLFMを用いる点は、解析の特性を決定づける上で最も重要な変更で

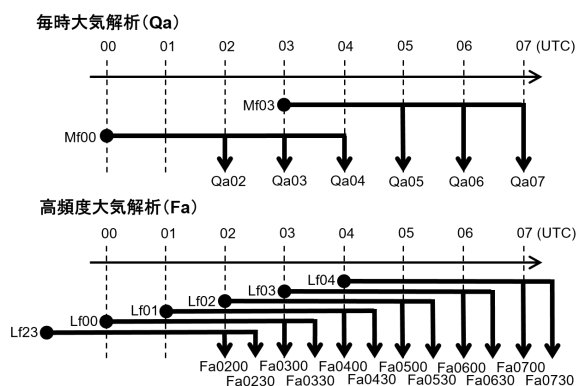


図 4.7.1 毎時大気解析および高頻度大気解析で通常用いられる第一推定値と解析時刻の対応の模式図。(上段) 毎時大気解析と MSM 予報値の対応。例えば 00UTC 初期値の MSM(Mf00) による 2 時間予報値が、02UTC の毎時大気解析(Qa02) の第一推定値として用いられる。(下段) 高頻度大気解析と LFM 予報値の対応。例えば 00UTC 初期値の LFM(Lf00) による 3 時間予報値が 03UTC の高頻度大気解析(Fa0300) の第一推定値として用いられる。

ある。図 4.7.1 に、毎時大気解析と高頻度大気解析で通常用いられる第一推定値との対応を示す。高頻度大気解析では、LFM の 3 時間予報または 3 時間 30 分予報を第一推定値として用いる<sup>1</sup>。図 4.7.2 には解析領域を示す。高頻度大気解析の解析領域は、第一推定値である LFM の予報領域と同じとするため、毎時大気解析に比べて、やや狭い領域となる。鉛直層はモデルトップの高さ(21.8 km)を変えずに高解像度化し、LFM(76 層)と同様の層配置とする。高頻度大気解析は、第一推定値として用いる LFM と全く同じ格子系であり、地形、海陸比も一致する。

#### 解析手法、観測データ、プロダクト

表 4.7.1 の中段以降に示すように、高頻度大気解析は、「高解像度化、高頻度化」以外は毎時大気解析の手法を踏襲する。解析手法は、毎時大気解析と同様に asuca-Var による 3 次元変分法を用いる。その制御変数は原・工藤(2017)で解説されたとおり、これまでの毎時大気解析の設計を踏襲した制御変数である。また、原・工藤(2017)が毎時大気解析に asuca-Var を導入した際には、背景誤差や解析インクリメントの補正(藤田 2008)について、それ以前の非静力学メソ 4 次元変分法(JNoVA)による毎時大気解析システム(藤田 2007)のものを踏襲し、プロダクトの性質を大きく変えないよ

<sup>1</sup> LFM の初期値は水平格子間隔 5 km の局地解析から提供された解析値を、予報モデルの水平格子間隔 2 km に内挿することにより作成しているため、LFM の時間積分が始まった直後は、実質的に 5 km 解像度程度の情報しかなく、時間積分が進むにつれて、小さなスケールの情報が増えていく(永戸ほか 2013)。高解像度の情報を持った第一推定値を使いたいため、予報開始直後ではなく 3 時間予報または 3 時間 30 分予報を用いる。

表 4.7.1 毎時大気解析システムと高頻度大気解析システムの仕様

	毎時大気解析 (Qa5km)	高頻度大気解析 (Fa2km)
領域 (格子数)	H25.3.27 以前のメソモデル (721x577)	局地モデル (1581x1301)
第一推定値	メソモデル	局地モデル
水平格子間隔	5 km	2 km
鉛直層数	48 層 (最上層 21.8 km)	76 層 (最上層 21.8 km)
解析時刻	毎時 00 分	毎時 00 分および 30 分
同化手法	3次元変分法	同左
制御変数	流線関数、非バランス速度ポテンシャル、温位	同左
観測の待ち受け時間	18 分	同左
観測	ウィンドプロファイラ (風)、航空機 (気温、風)、アメダス (気温、風)、空港気象ドップラーレーダー (ドップラー速度)、気象レーダー (ドップラー速度)、衛星可視赤外イメージャ (大気追跡風)	同左
出力要素	風、気温	同左

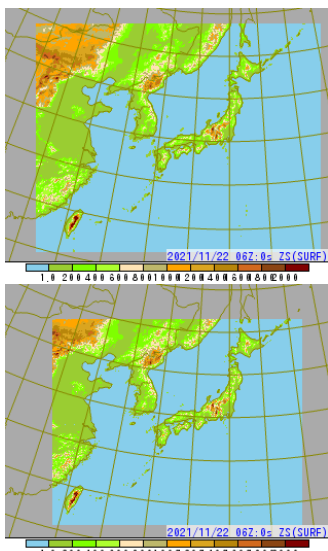


図 4.7.2 (上段) 毎時大気解析および (下段) 高頻度大気解析の解析領域。

うにした<sup>2</sup>。今回も同様の方針とする。毎時大気解析の背景誤差は、水平格子間隔 5 km のメソ予報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されたものである (藤田 2007)。この毎時大気解析の背景誤差を、高頻度大気解析の格子系に内挿<sup>3</sup>して用いる。毎時大気解析では 3次元変分法の後に二つの解析インクリメントの補正を行っており、これらは毎時大気解析特有の処理である。一つは、

<sup>2</sup> 毎時大気解析における asuca-Var 導入は、高い計算効率、維持管理の利点を活かすためであり、特に前者は今回の高解像度化に大きく寄与している。

<sup>3</sup> 水平一様を仮定しているため、鉛直 48 層から 76 層への内挿

海上での気温、風の解析インクリメントを海岸線から離れるにつれて減衰させる処理 (地上フィルターと呼ばれる) である。もう一つは、アメダス観測値による地上場の修正の影響が第一推定値の境界層の上端付近まで及ぶように、大気解析インクリメントを補正する処理である。これらの処理も、高頻度大気解析と同様に行う。地上フィルターにおいては、海岸線からの基準距離等は毎時大気解析と同じ値に設定する。

利用する観測データも毎時大気解析と同じ (表 4.7.1 を参照)、観測データの待ち受け時間も毎時大気解析と同じく 18 分である。

解析要素は、毎時大気解析と同じく、風と気温である。プロダクトの配信時刻は、毎時大気解析と同様の初期時刻プラス 30 分以内とする計画である。

### 4.7.3 特性

#### (1) 高解像度化

前項で述べたシステム仕様により、高頻度大気解析 (以下、Fa2km) は毎時大気解析 (以下、Qa5km) と比較して次のような特徴がある。

- Fa2km の地形、海陸比は LFM と同じ解像度となり、その分布に応じた解析が得られる。
- Fa2km と Qa5km の解析インクリメントは基本的に変わらない。
- Fa2km には第一推定値である LFM で予測された空間スケールの小さい気象現象の表現が反映される。

図 4.7.3 は Qa5km と Fa2km の地形を示す。図 4.7.4 (右) に同じ領域の Qa5km と Fa2km の地上気温の解析結果を示しているが、地形分布の表現の細かさに応じた地上気温分布が見られる。海岸付近の地上気温分布のシャープさの違いも、海陸比 (図略) の違いを反



映したものである。

図 4.7.4 (左) には第一推定値である MSM および LFM、(中) にはそれぞれの解析インクリメントを示す。地上気温の解析インクリメントはアメダス気温観測によって得られる。Qa5km と Fa2km では観測への寄せ方は基本的に同じになるような仕様としているので、インクリメントは概ね両者で同様であることが分かる。その中で、青点線で囲った栃木県北部から茨城県北部の領域では、インクリメントのパターンに違いがある。この領域は第一推定値の地上気温に違いがある(図 4.7.4 (左))。これは第一推定値において、この領域における降水表現が異なっており(図略、LFM では強い降水を予測)、この違いに起因したものと見られる。この例のように、Fa2km と Qa5km の解析インクリメントが異なる場合の多くは、両者の第一推定値の違いに起因する。

図 4.7.5 には、冬季の風下山岳波の事例を示す。図 4.7.5 (左) の 300 hPa の平面図の白線は、佐渡島付近から奥羽山脈を越えて太平洋まで引いており、図 4.7.5 (中) は、この白線に沿った第一推定値の鉛直断面である。Fa2km の第一推定値として用いる LFM は、この事例の風下山岳波を表現できている(衛星画像で、LFM 予測と同程度の波長の波を確認した(図略))。これは、Qa5km の第一推定値として用いる MSM では、表現することができないスケールの現象である。図 4.7.5 (右) に示す解析値において、Fa2km には LFM で予測された山岳波の構造が反映されていることが分かる。上層の解析インクリメントは山岳波のようなスケールの現象を修正するものではないので、それぞれの第一推定値の表現の細かさが、そのまま解析値に反映される。

## (2) 高頻度化

正時の高頻度大気解析 (Fa00) と正時 30 分の高頻度大気解析 (Fa30) を比較し、以下のことを確認した。

- 利用する観測データについては、Fa00 と Fa30 とで大気追跡風 (AMV) 以外は同等の観測数である。AMV は、Fa00 と Fa30 とで利用できる最新データの観測分布の密度が異なる (Fa30 は Fa00 に比べて AMV の観測データ数が最大で約 30% 少ない)。
- Fa00 では LFM の 3 時間予報、Fa30 は LFM の 3 時間 30 分予報を第一推定値とすることから、Fa30 は Fa00 に比べて、第一推定値と観測値の差は大きくなる傾向があるが、解析値と観測値の差は同程度であった。

厳密には上記の違いはあるが、実況監視において Fa00 と Fa30 の違いを考慮して使う必要はない。

### 4.7.4 まとめ

高頻度大気解析は毎時大気解析を高解像度化、高頻度化したシステムである。第一推定値に LFM を用いて、LFM と同じ領域、水平格子間隔、鉛直層設定で、正時と正時 30 分に解析を行う。高頻度大気解析の解

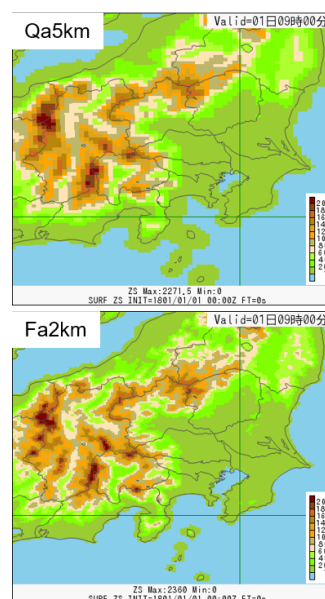


図 4.7.3 (上段) 毎時大気解析および(下段) 高頻度大気解析の地形。色は標高 [m] を表す。

析手法と観測データの利用方法は現行の毎時大気解析を踏襲しており、その解析インクリメントは毎時大気解析と基本的に変わらないようにしている。高頻度大気解析は、第一推定値に LFM を用いることによって、LFM で予測された小さなスケールの現象が反映された解析値となる点が毎時大気解析との違いである。毎時大気解析が「MSM 予測値を観測値に極力近づけた風と気温の格子点情報」であったのに対し、高頻度大気解析は「LFM 予測値を観測値に極力近づけた風と気温の格子点情報」であり、より局地的な気象も対象とした実況監視に有効な資料となると考えている。令和 4 年度中の運用開始に向けて準備を進めている。

### 参考文献

- 永戸久喜, 原旅人, 倉橋永, 2013: 日本域拡張・高頻度化された局地モデルの特性. 平成 25 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 18-41.
- 藤田匡, 2007: 毎時大気解析の高度化. 平成 19 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 98-101.
- 藤田匡, 2008: 毎時大気解析の改良. 平成 20 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 58-61.
- 原旅人, 工藤淳, 2017: 毎時大気解析の変更. 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 61-65.
- 石田純一, 高田伸一, 栗原茂久, 2017: 第 10 世代数値解析予報システム. 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 113-123.
- 室井ちあし, 藤田匡, 石川宜広, 2008: 気象庁毎時大気解析. 天気, **55**, 401-408.
- 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

第一推定値

解析値 - 第一推定値

解析値

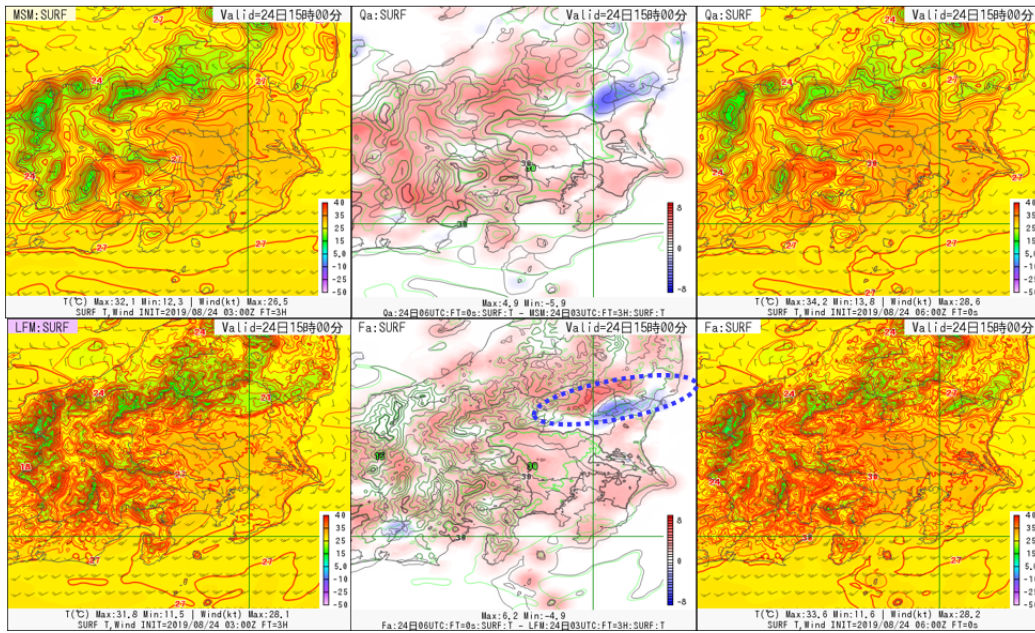


図 4.7.4 (上段) 毎時大気解析および(下段) 高頻度大気解析の2019年8月24日06UTCの地上気温 [°C] 解析。(左) 第一推定値、(中) 解析インクリメント、(右) 解析値。

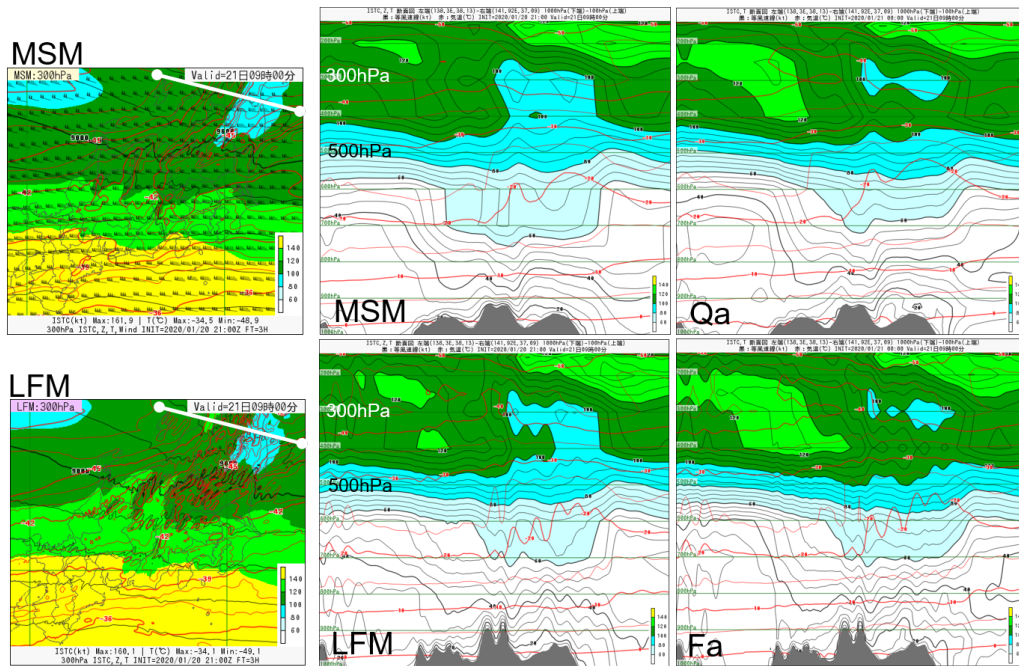


図 4.7.5 (上段) 毎時大気解析および(下段) 高頻度大気解析の冬季の風下山岳波の事例(2020年1月20日00UTC)。(左) 第一推定値の300 hPaの平面図、左図の白線に沿った(中) 第一推定値の鉛直断面、(右) 解析値の鉛直断面。塗りつぶしのコンターは風速 [kt]、赤線は気温 [°C]。

修テキスト, 気象庁予報部, 63-65.

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, 59-63.