1.1 メソ・局地数値予報システムの改良¹

1.1.1 はじめに

数値予報課報告・別冊第54号では、本田 (2008a) が 2007年までの気象庁メソ数値予報システム2の歴史に ついてまとめている。ここでは最初に、2007年までの メソ数値予報システムのおもな仕様の変遷を振り返っ ておく。気象庁では、2001年3月にメソ数値予報シス テムの現業運用を始めた (萬納寺 2000)。メソ数値予報 システムの予報モデルであるメソモデル (MSM) では、 現業運用を始めた当初は水平格子間隔が10kmの静力 学モデルを、2004年9月からは水平格子間隔が10km の気象庁非静力学モデル (JMA-NHM; 気象庁予報部 2003) を用いており、2006 年3月には水平格子間隔を 5 km に高解像度化した。MSM に初期値を与えるメソ 解析として、2002年3月から当時の静力学モデルに基 づくメソ4次元変分法(石川・小泉 2002)を用いていた。 メソ数値予報システムのおもな目的は防災気象情報や 航空気象情報の作成の支援と降水短時間予報への入力 であり、目先の顕著現象の予測を重視して、現業運用 を開始した当初は予報時間を18時間としていた。その 後、2007年5月には初期時刻 03, 09, 15, 21 UTC から の予報時間を33時間に、初期時刻00,06,12,18 UTC からの予報時間を15時間とした。メソ数値予報システ ムの予測精度の向上とともに、目先の天気予報におい て低気圧の位置や中心気圧、降水量や風速の量的な見 積もりのために MSM の結果が重視されるようになっ た(例えば、若杉 2019)。

一方、時空間規模が小さく、MSM の分解能では適 切に表現することができない顕著現象の予測精度を向 上させるため、水平格子間隔が2kmのJMA-NHMを 局地モデル (LFM)とする局地数値予報システムの開 発を進めた。2007年6月からの関東周辺の領域を対象 とする局地数値予報システムの予備的な実験運用(氏 家 2009)、2009年8月からの西日本、2011年5月から の東日本を中心とした領域を対象とする実験運用と試 験運用(永戸ほか 2010)を経て、2012年8月に本運用 を開始した(永戸ほか 2012)。

さらに、MSM による予測の不確実性に関する情報を 付加することを目的に、メソアンサンブル予報システ ム (MEPS)の開発を進めた。2015年3月からの MEPS の部内試験運用 (小野 2016)を経て、2019年6月に水 平格子間隔を MSM と同じ5 km でメンバー数を21 と して本運用を開始した。MEPS の仕様と特性について は、第3章や河野ほか (2019)にまとまっている。 本節では、本田 (2008a) に続く 2008 年から本稿執 筆時点(2019 年 12 月)までの間にメソ数値予報シス テムと局地数値予報システムに導入し現業化したおも な改良項目について、概要を報告する。第1.1.2 項では メソ数値予報システム、第1.1.3 項では局地数値予報 システムそれぞれの予報領域の拡張と予報時間の延長 についてまとめ、解析とモデルの改良項目について述 べる。メソ数値予報システムについては、第1.1.2 項 (4)で本運用を開始した 2001 年 3 月から 2019 年 8 月 までの降水予測の検証結果を示す。それぞれのシステ ムにおける観測データの利用については気象庁予報部 (2015)に、メソ解析における観測データの利用につい ては第1.3 節、第4章にまとまっている。また、現在 の MSM の各過程については第2章の各節で述べられ ている。

1.1.2 メソ数値予報システム

(1) 予報領域の拡張と予報時間の延長

予報領域の拡張

MSM のような領域モデルには、予報領域の外側に おける大気の状態を与える側面境界値が必要である。 一般に、側面境界値を与える数値予報モデルと内側の 数値予報モデルでは鉛直層間隔や水平格子間隔、時間 積分の間隔が異なっており、人為的に設けた側面境界 の扱いに工夫が必要になる。MSM では、側面境界付 近に緩和領域を設けるレイリーダンピングと呼ばれる 手法を用いている (河野・荒波 2014)。

2013年3月に、日本付近への緩和領域の影響を軽減 することを目的としてメソ数値予報システムの予報領 域を拡張した(越智・石井 2013)。拡張前の格子数は東 西 721 格子、南北 577 格子で、拡張後の格子数は東西 817 格子、南北 661 格子である。拡張前後の予報領域を 図 1.1.1 に示す。事例検証によると、領域の拡張前は側 面境界の緩和領域であったため観測データが適切に同 化されなかった領域において、拡張後は観測データが 適切に同化されるようになった。このため、観測デー タの情報が反映されて初期場の精度が高くなり、降水 予測の精度が向上した。統計検証によると、領域の拡 張前後で MSM の気温や相対湿度、風速の予測精度に 明確な差は見られなかったものの、拡張後は利用でき る観測データが増加したことによって、とくに夏季の 降水予測の精度が向上した。

予報時間の延長

2013 年 5 月には、MSM の 3 時間ごとの初期時刻の予 報時間をすべて 39 時間に延長した (越智・石井 2013)。 予報時間の延長の目的は、短期予報と航空予報への利 用の要望に対応することであった。

さらに、2019年3月には初期時刻00 UTCと12 UTC の予報時間を51時間に延長した(荒巻・氏家 2018)。

¹ 成田 正巳

²本稿では、メソ解析とメソモデル(メソ予報)を合わせて メソ数値予報システムと呼ぶ。 同様に、局地解析と局地モ デル(局地予報)を合わせて局地数値予報システムと呼ぶ。



図 1.1.1 領域拡張前と現在の MSM の予報領域(越智・石 井 (2013)から引用)

予報時間の延長により、従来からのおもな目的であっ た防災気象情報や航空気象情報の作成の支援と降水短 時間予報への入力に加えて、MSMの予測結果を明日 までの短期予報の作成に利用できるようになった。

(2) メソ解析の改良

非静力学メソ4次元変分法の導入

2009年4月には、メソ解析に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) を導入した(本田・澤田2009)。前述のとおり、それよ り前のメソ解析では静力学モデルに基づくメソ4次元 変分法(石川・小泉2002)を利用しており、メソ解析に おける時間推進演算子としての予報モデルとメソ予報 における予報モデルが異なっていた。JNoVAの導入に より両者が同様の予報モデルを用いることになり、一貫 性のあるシステムとなった。統計検証の結果、JNoVA を導入したことにより MSM による地上、高層の各気 象要素の予測精度が導入する前と同等以上になり、と くに夏冬ともに降水量の予測精度に明らかな改善が見 られた。

レーダー反射強度の同化

2011年6月には、メソ解析において地上レーダー反 射強度の3次元データの同化を開始した(幾田 2011)。 この手法では、まず MSM の予測値である第一推定値 からレーダー反射強度を算出するレーダーシミュレー タを用いる。続いて、シミュレートされた反射強度と観 測された反射強度に基づいて相対湿度の疑似観測デー タを作成し、品質管理を経て、データ同化で利用する。 解析予報サイクル実験の結果、反射強度の同化により 水蒸気の分布や降水量の予測精度を改善できることを 確認した。 さらに、2013 年 6 月にはメソ解析において反射強度 から相対湿度の疑似観測データを推定するための手法 を改良した (幾田 2014b)。この改良により、降水量の 予測精度を改善することができた。とくに、前線や台 風による強い降水の予測精度を改善したことで、防災 情報の作成の支援における MSM の有用性を向上させ ることができた。

積雪域解析の改良

2014年11月には、冬季の夜間における地上気温の 予測精度の改善を目的として、積雪域の初期値を作成 する手法を高度化した(草開 2015)。変更前のメソ解析 では、全球積雪深解析から得られた積雪域の分布を第 一推定値として、観測値により補正することで積雪域 を解析していた。ここで用いる全球積雪深解析はMSM の水平格子間隔より粗い1度格子ごとの分布であり、 積雪域を広げすぎる傾向があった。

この問題を解決するため、MSM による気温や湿度、 降水量などの予測値とアメダスによる日照時間の観測 値および解析雨量を入力値とする水平格子間隔 5 km のオフライン陸面モデルを導入し、高分解能かつ現実 的な積雪域の第一推定値を作成するようにした。冬季 を対象とする解析予報サイクル実験の結果、積雪域の 初期値を作成する手法の改良により多雪地帯における 積雪域の縁辺付近、南岸低気圧などにより一時的に積 雪が起こる地域、観測点が少ない地域において、とく に夜間における MSM による地上気温の予測精度に改 善が見られた。

背景誤差の改良

2015年12月には、メソ解析に用いる背景誤差を改良 した(藤田ほか 2016)。それより前は、当時のJNoVA とは異なる 2005年時点のメソ数値予報システム、つ まり静力学モデルに基づくメソ4次元変分法(石川・ 小泉 2002)による初期値を用いた水平格子間隔10 km のMSMの予測値から作成した背景誤差を使っていた。 その後、JNoVAによる初期値を用いた水平格子間隔 5 kmのMSMの運用期間が十分に長くなり、統計サ ンプルを更新するために必要なデータが揃ったことか ら背景誤差を見直した。これと合わせて、背景誤差の 共分散の定式化において水平相関の指定を鉛直共分散 の固有モードごとから鉛直層ごとに変えることにより、 共分散の空間構造の歪みを大幅に軽減した。

これらの改良によって、メソ解析では第一推定値の 確度が従来より高いものとして扱われるようになった。 この結果、予報初期における高度や気温、気圧の急激 な変動を緩和できた。また、解析予報サイクル実験の 結果から、第一推定値と観測値との乖離が全般的に小 さくなったこと、MSM による降水量の予測精度が高 くなったことを確認した。

(3) メソモデルの改良

雲氷の数濃度の予報変数化

2008 年 12 月に、冬季の日本海沿岸付近における降 雪の予測精度の改善をおもな目的として、MSM の雲 物理過程において雲氷の数濃度を予報変数に追加した (成田 2009)。それ以前の MSM の雲物理過程では、計 算時間を短縮するため雲水、雲氷、雨、雪、あられの 混合比だけを予報することにして、凝結物の数濃度の 時間変化を計算する素過程を省略していた。また、雲 氷から雪への変換や雲氷が過冷却の雲水を捕捉するラ イミングによるあられへの変換の素過程の一部を省略 していたため、雪とあられの生成に現実よりも時間が かかっていた (成田 2008b)。このため、冬型の気圧配 置となったときの季節風の風下にあたる日本海や東北 地方から中国地方にかけての日本海沿岸付近において、 MSM が予測した降雪量が実況と比べて過少となる事 例が見られた。

そこで、雪とあられの生成の効率を高くするため雲 氷の数濃度を予報変数とした結果、MSM が予測する 降雪の分布と実況の分布との対応が良くなった。また、 この変更により暖候期において予報時間とともに対流 圏上層に雲氷が過剰に蓄積していく問題 (林ほか 2008) が解消された。これ以前の放射過程は雲氷の数濃度を 予報しない場合の過剰な雲氷に適合するように雲氷の 有効半径を診断していたため、雲氷の数濃度の予報変 数化に合わせて雲氷の有効半径を診断する方法を変更 した (長澤 2009)。この結果、それ以前の MSM の予測 に見られた 200 hPa 付近の気温の負バイアスを軽減す ることができた。合わせて、雲の長波放射の計算にお ける鉛直解像度への依存性を緩和するなどの改良を加 えた。

対流スキームの修正

2004 年 9 月に MSM で Kain-Fritsch 対流スキーム (Kain and Fritsch 1990; Kain 2004) を用いるように なった頃から、とくに梅雨期の九州や四国の南西岸に おいて地形に沿った不自然な降水を予測してしまう問 題があった (成田 2008a)。これは、本田 (2008b) で解 決が急務であると指摘されていた問題のひとつである。 この問題を解決するため、2010年11月に、MSMで用 いている対流スキームにおいてサブグリッドスケール の対流雲が周囲の大気と混合する割合を、雲底高度に 応じて大きくする修正を加えた (成田・森安 2010)。こ の修正の結果、地形に沿った不自然な降水を軽減する ことができた。一方、混合の割合を大きくしたことに より対流スキームが大気の成層状態を安定化する効率 が低くなったため、弱い降水を生成する割合が低くな り、雲物理過程により強い降水を生成する割合が高く なることがわかっていた。統計検証の結果から、夏季 における5mm/3h以下の弱い降水の頻度が実況より低 くなった。夏季と冬季における 5 mm/3h~30 mm/3h の降水の頻度が高くなり実況に近づいたが、台風など に伴う 30 mm/3h 以上の強い降水の頻度が実況より高 くなることがわかった。このように課題は残ったもの の、当時は MSM による地形に沿った不自然な降水の 予測の軽減を優先して現業化することになった。

境界層過程の改良

第 2.6 節で述べられるように、2015 年 5 月には境界 層過程において asuca の開発により得られた知見を活 かした改良が加えられた (原ほか 2015b)。MSM では、 境界層過程として Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino レ ベル 3 モデル (MYNN3; Nakanishi and Niino 2009) にさまざまな変更を加えて用いていた (原 2008)。変更 のひとつに、逆勾配項(第 2.6.3 項 (2))を求める際の 計算安定性のため、拡散係数が負にならないように制 限を加える処置がある。

その後、鉛直1次元モデルによる評価から鉛直輸送 量が過大となる場合があることがわかり、拡散係数に 対する制限が不要となるように改良が加えられた (原 2012)。一方で、この手法を当時のメソ数値予報シス テムの予報モデルであった JMA-NHM に実装すると 計算量の増加によって計算時間が長くなり、現業数値 予報モデルとしての利用には耐えられないと予想さ れた (原ほか 2015b)。そこで、逆勾配項を考慮しな い Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino レベル 2.5 モデル (MYNN25)を試したところ、MYNN3で問題となった 過大な鉛直輸送は見られなくなり、冬季の日本海にお ける寒気移流に伴う雲や低気圧の表現に改善が見られ た。さらに、MYNN25を導入した解析予報サイクル実 験の結果から冬季を中心に予測精度の改善を確認でき たため、2015 年 5 月に MSM の境界層過程を MYNN3 から MYNN25 に変更することにした。

非静力学モデル asuca の導入

2017年2月に、メソ数値予報システムの予報モデル をJMA-NHMから新しい気象庁非静力学モデルasuca (気象庁予報部2014)に置き換えた(原2017)。本田 (2008b)で解決が急務であると指摘されていた計算不安 定の回避は、asucaの力学コアの開発理念(石田・藤田 2014)のひとつである。現業化にあたっては、原(2017) にあるとおり多くの物理過程を改良した。とくに、境界 層過程においてJMA-NHMを予報モデルとするMSM への導入を見送った拡散係数に対する制限が不要とな るように改良を加えた MYNN3を採用した。asucaの 導入による MSM の予測特性の変化については、原・ 倉橋(2017)にまとまっている。また、各過程の改良や その後の開発の成果については、第2章の各節で述べ られている。

(4) 統計検証の結果

図 1.1.2 に MSM による降水予測の検証の結果を示 す。期間は MSM の本運用を開始した 2001 年 3 月から



図 1.1.2 解析雨量に対する MSM による降水予測の 2001 年 3 月から 2019 年 8 月までの検証結果。 検証格子の大きさは 20 km で、予報時間 FT=3 から FT=15 までの 3 時間ごとの平均を求めた。 (左上) 閾値 1 mm/3h のエクイタブルスレットスコ ア (ETS)、(右上) 閾値 10 mm/3h の ETS、(左下) 閾値 1 mm/3h のバイアススコア (BI)、(右下) 閾値 10 mm/3h の BI で、赤線は月平均値、黒線は前 12ヶ月移動平均値、青点は解析雨量の 20 km 検証格子数。

2019 年 8 月までで、検証格子の大きさを 20 km とす るエクイタブルスレットスコア (ETS) とバイアススコ ア (BI) をそれぞれ予報時間 FT=3 から FT=15 まで 3 時間ごとに平均している。それぞれの前 12ヶ月移動平 均したスコアから、つぎの経年変化が見られる。

- 閾値 1 mm/3h の ETS に示される予測精度は、
 2011 年頃まで緩やかに改善し、その後は 2015 年
 頃まで大きな変化が見られず、2015 年以降は改善が見られる。
- 閾値 10 mm/3h の予測精度には短期間の変動が見 られるものの、緩やかな改善が続いている。
- ・ 閾値1mm/3hのBIに示される予測頻度は、2008 年頃までは予測過多だったが、2009年頃から予測 頻度が観測頻度に近づき、2017年頃からわずかに 予測過多となっている。
- ・ 閾値 10 mm/3hの予測頻度は、2007 年頃まで予 測過多でとくに月平均では冬季に顕著だったが、 その後は 2015 年頃まで予測過少となり、さらに 2017 年頃から予測過多となっている。

なお、近年の MSM と LFM による降水量と気温の 予測の検証結果については、安斎 (2018) にまとまって いる。

1.1.3 局地数値予報システム

(1) 予報領域の拡張と予報時間の延長

2012 年 8 月に、東日本を中心とした領域を対象とし て局地数値予報システムの本運用を始めた (永戸ほか 2012)。当時の LFM には水平格子間隔 2 km の JMA-NHM を用いており、9 時間予報を 3 時間ごとの頻度で 実行していた。

2013 年 5 月には、局地数値予報システムの予報領 域を日本全域に拡大するとともに、直近の観測データ を利用して目先の予測精度を改善するため 1 時間ごと の頻度で 9 時間予報を実行するようにした (永戸ほか 2013)。

さらに、2019 年 3 月には予報頻度は 1 時間ごとのま まで LFM の予報時間を 10 時間に延長した (荒巻・氏 家 2018)。

(2) 局地解析の改良

asuca に基づく3次元変分法の導入

本運用を始めたときの局地数値予報システムの解析 システムには、JMA-NHMに基づく3次元変分法(藤 田 2008;藤田・倉橋 2010)を用いていた。その後、2015 年1月にLFMの予報モデルをJMA-NHMから asuca に置き換えるとともに、局地解析を asuca に基づく3 次元変分法 asuca-Var (幾田 2014a) に置き換えた (幾 田 2015)。

メソ解析では4次元変分法を用いているが、局地解 析では計算時間を短くするため3次元変分法を用いて いる。このため、メソ解析では初期値を作成する対象 である解析時刻の3時間前からの観測値を同化するこ とにより大気の時間発展をとらえることができるのに 対して、局地解析では原理的に解析時刻における観測 値しか同化できない。局地数値予報システムの運用で は、3次元変分法による解析と1時間予報を解析時刻 の3時間前から繰り返すことにより観測値を同化して いる。

地中温度と土壌体積含水率の解析変数への追加

2015年1月の局地解析への asuca-Var の導入と合わ せて、地中温度と土壌体積含水率を解析変数に追加し た(幾田 2015)。変更前の局地解析では、地表面温位を 解析変数とすることにより降水量の予測精度の改善が 見られていた(永戸ほか 2012)。変更後は、衛星観測に よる土壌水分量プロダクトなどの利用を可能にするた め、地表面温位に替えて地表面温度を含む地中温度を 解析変数とし、土壌体積含水率を解析変数に追加した。 この変更により解析時刻と予報時間の初期において局 地数値予報システムによる地上気温の精度の改善が見 られ、解析時刻と予報時間を通して地上比湿の精度の 改善が見られた。

過飽和除去処理の改良

4次元変分法により得られた解析値は、数値予報モ デルによる拘束条件に従っている。一方、3次元変分法 により得られた解析値は、力学過程や物理過程に従っ ていない。局地解析では3次元変分法を採用しており、 得られた解析値は力学的にバランスがとれていなかっ たり、現実的ではない分布になったりすることがある。 ここでは、幾田 (2015)が挙げた問題を考える。例え ば、過剰な水蒸気量の解析インクリメントが第一推定 値に加算されると、その格子では周辺と比べて過飽和 度が異常に大きくなることがある。この状態を初期値 として予報モデルを実行すると、過飽和となった水蒸 気が1回の時間積分で凝結する。この相変化に伴って 過剰な潜熱が放出されると局所的に大気の成層状態が 不安定になり、過大な上昇流が発生することにより計 算不安定の原因となる。

本運用を始めたときの局地解析では、解析値が過飽 和となったときはその分の水蒸気を除去することによ り対処していた。この対処では、過飽和となった雲域 で不必要に水蒸気が除去されてしまうなど、解析と予 報のサイクルにおいて不連続が生じてしまう。そこで、 この問題に対処するため、幾田 (2015) は 2015 年 8 月 に局地解析に偽相対湿度インクリメント調整を導入し た。この方法では、第一推定値に反映する前に解析イ ンクリメントを調整し、過飽和の扱いを変更した。偽 相対湿度インクリメント調整の導入により、夏はLFM による閾値10 mm/h以下の降水の予測精度が有意に 改善すること、すべての閾値で降水の予測頻度が高く なることがわかった。また、冬は閾値3 mm/h以下の 降水の予測精度が有意に改善すること、閾値5 mm/h 以下の降水の予測頻度が高くなることがわかった。い ずれも、予報開始の直後におけるスピンアップの悪影 響を軽減できたことに起因する。

晴天域の衛星輝度温度と衛星土壌水分の同化

2017年1月に、局地解析で晴天域の衛星輝度温度と 衛星土壌水分の同化を開始した(幾田 2017)。これらの 観測値を同化するにあたって適切にバイアスを補正す るため、変分法バイアス補正(佐藤 2007)を導入した。 データ同化に用いる観測の設定や測器の劣化、数値予 報モデルの変更などに起因するバイアスを補正するた めに、変分法バイアス補正は有効な手法である。

晴天域の衛星輝度温度の同化によりLFMの予測に おける湿潤バイアスを軽減し、相対湿度の鉛直分布の 予測精度が改善した。降水の予測精度の改善は、夏は 有意ではなかったものの、冬は有意であった。

前述のとおり、局地解析では地中温度と土壌体積含 水率を解析変数として持っている。したがってこれら の要素を変換することなく直接同化することができる が、地中の直接観測は広くは行われていない。一方、 衛星観測では土壌水分に関するプロダクトがあり、広 範囲のデータを定常的に利用できる。衛星土壌水分を 同化して観測インパクト実験を行ったところ、LFM が 予測する地上気温に見られた日中の負バイアスを軽減 し、予測精度を高めることができた。

(3) 局地モデルの改良

前述のとおり、本運用を始めた当初の LFM には水 平格子間隔 2 km の JMA-NHM を用いていた。LFM の運用とともに局地モデルとして asuca の開発を進め (河野ほか 2014; 河野・原 2014)、2015 年 1 月には 局地解析への asuca-Var の導入と同時に予報モデルを JMA-NHM から asuca に置き換えた (原 2015)。これ より前の LFM に見られた積雲対流の発生や終息の遅 れと予報時間の初期における過少な降水の問題 (永戸 ほか 2013) が、asuca を導入した LFM では改善され た (原ほか 2015a)。

1.1.4 おわりに

本田 (2008b) に述べられている 2007 年末時点におけ るメソ数値予報の将来計画に挙げられた LFM と MEPS の導入はいずれも達成された。とくに、本田 (2008b) では MEPS の仕様として、MSM より低分解能な水平 格子間隔が 10 km の数値予報モデルを用いてメンバー 数を5以上とする計画が示されていた。実際には、前述 のとおり MEPS の水平格子間隔は MSM と同じ5 km で、メンバー数は 21 となったことにより、MEPS の 各メンバーの予測から算出した統計量により決定論的 な MSM の予測の不確実性を把握する手段を得ること ができるようになった。

本田 (2018) が挙げている 2018 年時点における改良 計画のうち、初期時刻 00 UTC と 12 UTC の MSM の 予報時間の 51 時間への延長と LFM の予報時間の 10 時間への延長を 2019 年 3 月に実現し、MEPS の本運 用を 2019 年 6 月に実現した。本稿執筆時点(2019 年 12 月)では、asuca に基づく 4 次元変分法 asuca-Var (幾田 2014a) をメソ数値予報システムに導入する準備 を進めている。

参考文献

- 安斎太朗, 2018: メソモデル、局地モデルの検証. 平成 30 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 43-47.
- 荒巻健智,氏家将志,2018:メソ・局地モデルの予報時 間延長.平成 30 年度数値予報研修テキスト,気象庁 予報部,7-8.
- 永戸久喜,藤田匡,原旅人,2012:局地モデルの本運用. 平成24年度数値予報研修テキスト,気象庁予報部, 72-86.
- 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.
- 永戸久喜,石田純一,藤田匡,石水尊久,平原洋一,幾田 泰酵,福田純也,石川宜広,吉本浩一,佐藤芳昭,2010: 局地モデルの試験運用.平成22年度数値予報研修テ キスト,気象庁予報部,1-27.
- 藤田匡, 2008: 高分解能局地モデル用局地解析. 数値予 報課報告・別冊第54号, 気象庁予報部, 214-222.
- 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.
- 藤田匡, 倉橋永, 2010: 局地解析. 数値予報課報告・別 冊第56号, 気象庁予報部, 68-72.
- 原旅人, 2008: 改良 Mellor-Yamada モデル. 数値予報 課報告・別冊第54号, 気象庁予報部, 128–132.
- 原旅人, 2012: 鉛直1次元モデルによる評価 (1)—雲の ない陸上の境界層の日変化 (GABLS2). 数値予報課 報告・別冊第58号, 気象庁予報部, 138–149.
- 原旅人, 2015: はじめに. 平成 27 年度数値予報研修テ キスト, 気象庁予報部, 1.
- 原旅人, 伊藤享洋, 松林健吾, 2015a: asuca が導入され た局地数値予報システムの特性. 平成 27 年度数値予 報研修テキスト, 気象庁予報部, 9–18.
- 原旅人,飯塚義浩,白山洋平,工藤淳,2015b:境界層過 程・地上物理量診断の改良.平成27年度数値予報研 修テキスト,気象庁予報部,24-43.
- 原旅人,2017:メソ数値予報システムの改良の概要.平成 29年度数値予報研修テキスト,気象庁予報部,42-47.

- 原旅人, 倉橋永, 2017: メソ数値予報システムの特性の 変化. 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予 報部, 48–55.
- 林修吾, 荒波恒平, 山田芳則, 2008: 雲氷落下の導入と 改良. 数値予報課報告・別冊第54号, 気象庁予報部, 98-99.
- 本田有機,2008a: メソ数値予報モデルと気象庁非静力 学モデルの歴史.数値予報課報告・別冊第54号,気 象庁予報部,1-6.
- 本田有機, 2008b: メソ数値予報の将来計画. 数値予報 課報告・別冊第54号, 気象庁予報部, 12–17.
- 本田有機,澤田謙,2009: 非静力学メソ4次元変分法の 現業化.平成21年度数値予報研修テキスト,気象庁 予報部,65-71.
- 本田有機, 2018: NAPS10 における改良計画. 平成 30 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 2-5.
- 幾田泰酵,2011: メソ解析におけるレーダー反射強度 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,9-12.
- 幾田泰醇, 2014a: 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.
- 幾田泰酵, 2014b: レーダー反射強度の同化手法の改良. 平成 26 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 100–101.
- 幾田泰酵, 2015: 局地解析の更新と改良. 平成 27 年度 数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 2-8.
- 幾田泰酵,2017:局地数値予報システムにおける新規観 測データの利用開始及び同化手法の高度化.平成29 年度数値予報研修テキスト,気象庁予報部,82-85.
- 石田純一,藤田匡, 2014: asuca の開発理念. 数値予報 課報告・別冊第 60 号, 気象庁予報部, 19–28.
- 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.
- Kain, J. S., 2004: The Kain-Fritsch Convective Parameterization: An Update. J. Appl. Meteor., 43, 170–181.
- Kain, J. S. and J. M. Fritsch, 1990: A One-Dimensional Entraining/Detraining Plume Model and Its Application in Convective Parameterization. J. Atmos. Sci., 47, 2784–2802.
- 河野耕平, 荒波恒平, 2014: 側面・上部境界条件. 数値 予報課報告・別冊第 60 号, 気象庁予報部, 57-61.
- 河野耕平, 原旅人, 2014: LFM としての asuca の特性. 平成 26 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 108–117.
- 河野耕平,松林健吾,倉橋永,2014: 局地モデルとして の現状.数値予報課報告・別冊第60号,気象庁予報 部,113-120.
- 河野耕平,氏家将志,國井勝,西本秀祐,2019:メソアン

サンブル予報システム. 令和元年度数値予報研修テ キスト,気象庁予報部, 1–15.

- 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, 2015: 観測データ利用の現状と課題. 数 値予報課報告・別冊第61号, 気象庁予報部, 98 pp.
- 草開浩, 2015: 積雪域解析の高度化. 平成 27 年度数値 予報研修テキスト, 気象庁予報部, 44-49.
- 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.
- 長澤亮二,2009: メソ数値予報モデルの放射過程の改 良. 平成 21 年度数値予報研修テキスト,気象庁予報 部,77-78.
- 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.
- 成田正巳, 2008a: Kain-Fritsch スキームの改良とパラ メータの調整. 数値予報課報告・別冊第54号, 気象 庁予報部, 103–111.
- 成田正巳,2008b: 降水予報特性の問題点と改善,気象庁 予報部. 平成 20 年度数値予報研修テキスト,43-47.
- 成田正巳,2009: メソ数値予報モデルの湿潤過程の改 良. 平成 21 年度数値予報研修テキスト,気象庁予報 部,72-76.
- 成田正巳, 森安聡嗣, 2010: メソモデルの対流スキーム の変更. 平成 22 年度数値予報研修テキスト, 気象庁 予報部, 53-61.
- 越智健太,石井憲介,2013:領域拡張・予報時間 39時 間化されたメソモデルの特性.平成 25 年度数値予報 研修テキスト,気象庁予報部,1-17.
- 小野耕介, 2016: メソアンサンブル予報システムの開発 状況. 数値予報課報告・別冊第 62 号, 気象庁予報部, 100–113.
- 佐藤芳昭, 2007: 変分法バイアス補正. 数値予報課報告・ 別冊第 53 号, 気象庁予報部, 171–175.
- 氏家将志,2009: 高分解能局地モデルの開発と実験運用. 平成 21 年度数値予報研修テキスト,気象庁予報部,90-96.
- 若杉栄一, 2019: 天気予報発表作業. 平成 30 年度予報 技術研修テキスト, 気象庁予報部, 4-16.

1.2 豪雨防災に貢献するための高解像度領域モデ ルの課題¹

1.2.1 はじめに

本節では、線状降水帯²等の豪雨予測における、水平 格子間隔5kmのメソモデル (MSM)、2kmの局地モ デル (LFM)といった高解像度領域モデルの現在の課 題や今後必要な技術の展望について、現業モデルの結 果や国内外の研究開発動向を踏まえつつ述べる。豪雨 防災への貢献は気象庁の数値予報技術開発において重 点的に取り組むべき事項のひとつであり、交通政策審 議会気象分科会における提言、及び提言を受けて気象 庁が策定した「2030年に向けた数値予報技術開発重点 計画」において重点目標として示されている。

近年の豪雨等の自然災害の激甚化に見られるような 自然環境の変化、少子高齢化等の社会環境の変化を踏 まえ取りまとめられた、平成30年8月の交通政策審議 会気象分科会提言「2030年の科学技術を見据えた気象 業務のあり方(提言)」(以下、分科会提言)では、観 測・予測精度向上に向けた技術開発の目標のひとつと して、半日前からの早め早めの防災対応に直結する予 測精度の向上が挙げられた。また、分科会提言の中で は、線状降水帯の発生・停滞等に伴う集中豪雨に対し て夜間の大雨にも明るいうちから対応できるよう、半 日程度先までに特別警報級の大雨となる確率メッシュ 情報の提供、それを実現するための数値予報技術の向 上が言及された。

分科会提言を受け、気象庁は「2030 年に向けた数値 予報技術開発重点計画」(以下、重点計画)を策定し、 数値予報技術開発における4つの重点目標を示した。 その中のひとつである「豪雨防災」では、明るいうち からの避難を可能にするための線状降水帯等による集 中豪雨の予測精度向上が必要であるとした。重点計画 では、開発の方向性として局地モデルの高解像度化、 局地アンサンブル予報システムの開発、観測データ利 活用の高度化、データ同化手法の高度化などを定めて いる。今後、重点計画の中で定めた方向性に沿って技 術開発やその計画をより具体化し、推進していく必要 がある。

1.2.2 MSM, LFM による線状降水帯予測の課題

気象庁は、防災気象情報作成を支援するため、 MSM, LFMを運用している。また、MSMの予測の不 確実性を捉えるためのメソアンサンブル予報システム (MEPS)の運用を2019年6月に開始した。MSM, LFM の予測精度は年々着実に向上しているが、線状降水帯 の空間スケールはこれらのモデルが陽に表現すること ができる最小の現象の空間スケールに近く、その予測 は難しい。線状降水帯の予測には、環境場や対流の表 現、初期値、位置や持続時間の不確実性等、多くの要素 が関わっており、それぞれについて多くの課題がある。

線状降水帯に関わる対流や降水システムの表現につ いて、MSM, LFM はそれぞれに性質の異なる課題が ある。図 1.2.1 に示す、平成 29 年 7 月九州北部豪雨で の予測例はその課題を端的に示したものとなっている。 実況(図1.2.1(a))では、2017年7月5日の午後には 九州北部脊振山地東部で発生した積乱雲が上空の風に よって東に流される状況が継続し、同じ場所に強い降 水をもたらしていた。MSM (図 1.2.1(b)) は九州北部 に降水を予測しているものの、その形状は線状になっ ておらず、対流セルの風下への移動が表現されていな い。また、量的にも実況に比べて過少である。その他、 MSM は長崎半島で実況にはない降水を予測している 一方で、五島列島の南の弱い降水を予測していない。 MSM の予測の不確実性を表現する MEPS(当時は部 内試験運用)の予測についても、MSM の降水予測同様 東西に伸びる降水を表現できず、また降水予測の位置 ずれも大きく、現象の捕捉が難しい事例であった(図 略)。また、MSM の降水予測は積雲対流パラメタリ ゼーション(第2.2節)の設定にも敏感である。その最 も極端な例として、図 1.2.1(c) に MSM で積雲対流パ ラメタリゼーションを用いない場合の降水予測を示す。 東西に伸びる線状の降水域が予測されるようになるも のの、線状の降水のサイズは太く、50 mm/3h 以上の 降水の領域も過大である。LFM の予測(図 1.2.1(d)) では線状の降水域がある程度表現されるものの、降水 量が観測に対して過大な複数の線状の降水域を予測し ている他、発生位置にずれが生じている。また、降水 域が同じ位置に持続せず下流に流れてしまう(図略)。 これらの傾向は平成29年7月九州北部豪雨に限らず、 平成30年7月豪雨期間中に各地で発生した線状降水帯 の予測においても同様であった(図略)。

このように、空間スケールが数 10 km 程度の線状降 水帯の予測は難しく、MSM, LFM においてその予測 精度は十分とは言えない。また、線状降水帯をもたら す環境場についても、不安定な成層や地上気温傾度帯 といった、平成 29 年 7 月九州北部豪雨の発生要因と言 われている要素の表現が数値予報では不十分であった (欠畑・白山 2018)。

1.2.3 必要な技術開発

対流の表現の向上

線状降水帯の予測精度向上に必要な技術のひとつと して、線状降水帯をもたらす直接的な現象である、対流 やメソ対流系の表現の向上が挙げられる。対流について

¹ 氏家 将志

²線状降水帯の定義については、本稿執筆時点(2019年12月)では学術的に厳密な定義はない(津口 2016)が、本節で は厳密な定義にはこだわらずに、日本の集中豪雨の多く(津 ロ・加藤 2014)を占める、「積乱雲、積乱雲群、線状の降水 域の階層的な構造を持つ」、「降水の走向が高度 2-3 km の 水平風向に平行なタイプ(いわゆるバックビルディング型)」 といった特徴を持つメソβスケールの停滞する線状の降水域 のことを線状降水帯と呼ぶこととする。

は、高解像度化により表現の向上が期待される (Vosper 2015)。日本におけるメソβスケールの集中豪雨を予 測するには少なくとも1 km 以下の水平格子間隔が必 要であることがいくつかの先行研究から示されている (加藤ほか 2016; 津口ほか 2016; Oizumi et al. 2018 な ど)。LFM ではまだ解像度が不足していると考えられ、 重点計画で定めた方向性のひとつとしても、LFM の高 解像度化が含まれている。一方、平成 29 年 7 月九州北 部豪雨の事例では、LFM の水平格子間隔を2km から 1 km にするのみでは、降水予測に大きな変化は見ら れなかった(図1.2.1(e))。さらなる高解像度化による 効果について計算機資源の制限から詳細には調査でき てはいないものの、水平格子間隔を1km にした LFM の結果は、線状降水帯の予測精度向上には単純な高解 像度化に加え、対流に関わる過程のモデリングの高度 化が必要となることを示唆している。特にモデルで解 像できない対流のパラメタリゼーション (または対流 の中のプロセスのパラメタリゼーション)の精度向上、 モデルが解像する対流の表現向上の2種類の方向の開 発を同時に進めていくことが必要となると考えられる。

前者について、詳細は第2.2.5項で議論するので、 ここでは概要を述べるのみにとどめる。対流は空間的 なスケールが小さいことを考えると、水平格子間隔が 数 km 程度のモデルでは十分には解像できない。その ため、対流のパラメタリゼーションを用いる必要があ り、MSM, LFM では Kain and Fritsch (1990) に基づ く積雲対流パラメタリゼーションを採用している。水 平格子間隔数 km 以下のモデルでは、既存の積雲対流 パラメタリゼーションでおいている仮定のいくつか³が 成り立たなくなっている他、パラメタリゼーションが 対象とする対流が、モデルが解像する対流と重複して いる。モデルが解像する対流を維持しつつ、モデルが 解像できないプロセスを表現するような、これまでと 異なる考え方の積雲対流パラメタリゼーションが必要 である。また、LFM より低解像度の MSM では、今後 も積雲対流パラメタリゼーションの必要性が高いと考 えられる。現在の MSM は、積雲対流パラメタリゼー ションによって不安定な成層が必要以上に安定化され ている可能性がある他、対流セルの移動をパラメタリ ゼーションで表現できないという問題点がある。豪雨 防災の観点から、MSM における積雲対流パラメタリ ゼーションのあり方についても再度見直しをする必要 がある。

モデルが解像する対流の表現については、対流は、 不安定な成層状態のもとで、(1)下層の収束や地形等 の強制によって持ち上がった気塊が、(2)持ち上げ凝 結高度で凝結し、(3)自由対流高度まで到達すれば浮 力を得て強制がなくても上昇するようになり、(4)水 の相変化(凝結・凍結等)に伴う潜熱により気塊の気 温が周囲のそれよりも高くなることで浮力を取得する ことと、周囲の大気の取り込みにより浮力が減少する ことの兼ね合いによって、(5)気塊が上昇するととも に次第に浮力を失い、やがて停止する、といったプロ セスを有する。また、気塊が持ち上がる過程で、雲や 降水が生成され、対流の衰退期には降水による大気の 引きずり下ろしや降水の蒸発等により下降流が卓越す る。したがって、対流を数値予報モデルで表現するに は、水の相変化に伴う非断熱過程、特に雲に関わる物 理過程の考慮と、浮力による上昇流の変化の考慮が必 要になる。

雲に関連する過程について、モデルで表現されるメ ソ対流系の振る舞いは雲微物理過程のパラメタリゼー ションに敏感であることが知られている(Bryan and Morrison 2012; Weverberg et al. 2013 など)。雲微物 理過程のパラメタリゼーションでは、相変化に直接関 わる過程に加え、水物質の落下過程や粒径分布、数濃 度なども雲水や雲氷の分布の変化を通して相変化に関 わる過程に影響し、間接的に浮力の生成に影響する。 このため、豪雨予測の観点からの雲微物理過程の高度 化が必要となる。特に、雲微物理過程については、衛 星シミュレータ等を用いた観測データとの比較検証の 高度化(Eito and Aonashi 2009; 幾田 2019 など)と あわせて開発を進めていくことも重要である。

浮力による上昇流の変化を直接表現するには、鉛直 流を予報変数に持つ非静力学モデルが最低限必要であ る。MSM, LFM においては、予報モデルとして非静 力学モデル asuca を用いることでこの点はすでに担保 されている。今後、対流に伴う格子スケールの熱・水・ 運動量輸送をさらに精緻に表現するには、移流スキー ムの高度化等といった継続的な改良を進める必要があ る他、物理過程と力学過程との相互作用(第 2.1.7 項) の高度化による対流の表現の向上にも取り組む必要が ある。

環境場の系統誤差の減少

対流は成層不安定な環境場のもとで、下層の収束等 をトリガーに発生する。また、メソ対流系の形状は環 境場の風速ベクトルやその鉛直シアーにも関係する (瀬 古 2010)。このため、成層や循環等の環境場の予測も、 線状降水帯の予測において重要である。日本に線状降 水帯をもたらす環境場については、下層水蒸気の流入 (Unuma and Takemi 2016b; 気象研究所 2017 など) や風の鉛直シアー(Yoshizaki et al. 2000; 瀬古 2010; Unuma and Takemi 2016a など)、上空の寒気(気象研 究所 2017)等、多くの先行研究でその特徴が示されてい る。また、線状降水帯に限った話ではないが、対流の発 達高度には対流圏の中層の湿りが大きく影響している と言われている(Derbyshire et al. 2004; Kikuchi and Takayabu 2004; Unuma and Takemi 2016b など)。こ れらのことから、線状降水帯をもたらす環境場として

³ 格子内の対流域は定常かつ、面積が格子全体の面積に対し て十分小さいことなど。詳細は第 2.2 節。

の成層状態(気温、水蒸気の鉛直分布)の表現が特に 重要となる。また、MSM は LFM に側面境界を提供す ることから、LFM の予測精度向上にとっても MSM の 環境場の精度向上が重要となる。

環境場の予測精度向上のためには、モデルの持つ系 統誤差の問題を解決しなければならない。MSM の予測 には、下層の水蒸気(例えば潜熱フラックスの正バイ アス、図 1.2.2(a)) や循環場(7月の太平洋高気圧の西 への張り出しが強い、図 1.2.2(b))に系統誤差があり、 これらの誤差の縮小には物理過程の総合的な改良が必 要である。特に、予測誤差はモデルの諸過程が複雑に 絡み合った結果生じているという認識に基づき、各過 程間の相互作用や整合性を考慮して、モデルの系統誤 差を減少させることが重要である。例えば、雲の生成 や雲量は、大気中の気温や放射フラックスを通じて成 層状態を変化させるため、豪雨をもたらす環境場の表 現にとって重要であるが、モデルにおける雲過程と放 射過程の間で雲の生成や雲量の扱いの整合性がないと 想定外の系統誤差をもたらすことがある。この例につ いては第2.4節でも議論する。また、現在の気象庁の 現業データ同化システムで採用されている手法は、モ デルに系統誤差が無いことを前提とした理論に基づい ている。そのため、モデルの系統誤差減少はデータ同 化の手法高度化や観測データ利用拡充の観点でも重要 である (Geer et al. 2018)。

さらに、モデルの系統誤差の減少のためには、評価・ 検証の高度化も必要である。物理過程の変更による環 境場の系統誤差へのインパクトを適切に把握すること、 さらに意図しないインパクトを見落とさないことを目 的とした標準的な検証ツールの整備が重要となる。特 に、線状降水帯をもたらす環境場の系統誤差減少の観 点では、海上を含む予報場の面的な検証、3次元的な 検証や、衛星リモートセンシング等を含む各種観測と の比較に基づく評価・検証を充実させていくことが重 要である。

観測データ利用高度化

線状降水帯等による豪雨の予測のための初期値の精 度向上に資するような観測データとしては、降水その ものを捉えるレーダーデータ(反射強度、ドップラー 速度)、水蒸気量を捉える地上 GNSS データ、地上比 湿データ、水蒸気・雲・降水の情報を持つマイクロ波 放射計(輝度温度)、静止気象衛星ひまわり8号による 高密度・高頻度データ(大気追跡風、輝度温度)があ る。特に、ひまわり8号データの高度利用が豪雨予測 の精度向上に資することが平成27年9月関東・東北豪 雨を対象とした先行研究で示されている。Kunii et al. (2016)はひまわり8号高頻度大気追跡風(2.5分毎の 観測から算出)の同化によって、初期値が改善し豪雨 の予測精度が向上することを示した。また、Kazumori (2018)は、ひまわり8号の水蒸気バンドの晴天輝度温 度の同化による水蒸気場の改善を通じて降水予測が改 善することを示した⁴。Honda et al. (2018) は、ひまわ り8号の赤外バンドの全天候・高頻度同化(10分間隔) により、降水予測を改善させる他、高頻度で解析・予 測を行うことで洪水リスクをより長いリードタイムで 捉えられることを報告した。これらの先行研究は、高 密度・高頻度観測データの利用が豪雨予測にとって重 要な鍵となることを示している。

データ同化システムの高度化

高密度・高頻度観測データを有効利用するためには、 データ同化システム側の対応も必要となる。例えば、現 在の気象庁のメソ解析及び局地解析では計算の効率化 のため、観測誤差相関が無視できるものと仮定し、観 測誤差共分散行列の非対角成分を考慮していない。そ のため、この仮定が適切なものになるよう、利用する 観測データを空間的に間引いている。さらに、同化に よる過度な修正を緩和するため、観測誤差の大きさを 膨張させた上で同化を行っている。今後、高密度観測 データを有効利用するためにはこれらの仮定や調整を 廃して、観測データの持つ情報を可能な限り活用でき るシステムの検討が必要である。また、変動の激しい 対流周辺では、背景誤差やその相関構造も大きく変動 する。ハイブリッド同化等の流れに依存する背景誤差 を考慮したデータ同化システムも、気象場の状況に即 した観測データ利用の高度化に必要である。これらに ついては、第4.7節で気象研究所での取り組みを報告 する。

雲微物理関連の変数を解析の対象とすることも重要 な開発課題である。現在のメソ解析は4次元変分法、 局地解析は3次元変分法を用いているが、雲水等の雲 微物理関連の変数は解析変数に含まれていない。しか し、豪雨予測のための初期値の精度向上のためには、 これらの解析変数化が必要となる。また、雲微物理関 連の変数を適切に解析するために、雲微物理過程の接 線形・随伴モデルや、アンサンブルによる雲微物理関 連の変数を含む背景誤差の導入をあわせて検討する必 要がある。特に、レーダー反射強度の同化の高度化を 通じた豪雨予測の精度向上のためには、データ同化に おける雲微物理関連の変数の扱いが重要な技術となる (Ikuta 2016; Kawabata et al. 2018 など)。

アンサンブル摂動のあり方

MEPS では主に総観規模、メソ α スケール、メソ β スケールの現象の予測における MSM の不確実性を捕 捉するため、初期摂動作成手法として全球 SV (水平 格子間隔約 270 km) と 2 種類のメソ SV (水平格子間 隔 80 km, 40 km)を用いている (小野 2016; 河野ほか 2019; 第 3.3.1 項)。一方、空間スケールが数十 km 程 度である線状降水帯自体の予測の不確実性は、現在の MEPS の摂動の空間スケールでは十分に捉えられない。

⁴ この改良は平成 31 年 3 月 22 日にメソ解析に導入された。



図 1.2.1 2017 年 7 月 5 日 15 JST を対象とした前 3 時間雨量 [mm/3h]。(a) 解析雨量、(b) MSM、(c) MSM、ただし積雲対 流パラメタリゼーションなし、(d) LFM、(e) LFM の水平格子間隔を 1 km に変更。



図 1.2.2 2018 年 7 月平均における (a) MSM による潜熱フラックス [W m⁻²] の全予報時間の OAFlux プロダクト (Yu et al. 2008) に対する誤差。(b) 海面更正気圧 [hPa] (黒) FT=48 の MSM、(緑) メソ解析、(カラー) FT=48 の MSM のメソ解 析に対する誤差。

メソβスケールの中でも空間スケールの小さい現象の 不確実性を捉えるアンサンブル摂動の検討が必要とな る。メソスケール現象の不確実性を捉えるアンサンブ ル予報システム (EPS: Ensemble Prediction System) の摂動については、アメリカの事例等における先行研 究が報告されている (Nielsen and Schumacher 2016; Weyn and Durran 2018 など)。これらの研究では、前 線や地形等の強制力が弱い場におけるメソスケール現 象の誤差成長や、メソ対流系の組織化における小スケー ルの初期摂動 (及び大規模スケール現象との相互作用) の重要性が示されている。また、雲解像モデルによる EPS の初期摂動としてのアンサンブルデータ同化や、 低解像度 EPS からのダウンスケーリング、あるいは両 者の併用の有用性を示す研究成果が出始めている。よ り詳しいレビューは第 3.5.3 項を参照されたい。 一方で、線状降水帯等の日本で発生するメソβスケー ルの現象にターゲットを絞ったアンサンブル予報シス テムに関する研究は少ない。このため、(1)線状降水 帯をもたらすシステムの発生位置の不確実性を捉える にはどのような空間スケールの摂動が必要か、(2)そ の摂動は、初期摂動・境界摂動・モデル摂動のいずれ に由来するべきか等、未解明の部分が多い。今後基礎 研究を含む知見の蓄積が必要な分野でもある。

1.2.4 まとめ

高解像度領域数値予報モデルによる線状降水帯等の 豪雨の予測精度向上に関しては、対流の表現、環境場 の系統誤差、観測データ利用、データ同化システム、 アンサンブル摂動いずれの分野においても課題があり、 その一方で、予測精度向上に有望な技術が近年の先行 研究から示されつつある。しかしながら、「この手法を 導入すれば線状降水帯の予測精度が劇的に向上する」 ということが確約されているわけではない。先行研究 で示された手法の有用性は実験と検証によって実証す る必要がある。そのために知見の取り込み・開発・評 価のサイクルを効率的に行える仕組みや計算機資源を 含む開発環境を構築することが必要である。また、高 解像度モデルにおける対流の扱いや、線状降水帯の予 測の不確実性を捉えるアンサンブル摂動のあり方等の 必要とされる技術は研究開発の分野としても最先端の ものであり、国内の大学等研究機関と連携して研究開 発を推進することが重要となる。一方、環境場の系統 誤差軽減等、必要とされる技術は決して線状降水帯の 予測に特化したものだけでなく、数値予報システムの 総合的な性能向上に関わるものも多い。

最新の研究開発の成果を迅速に試すことができる開 発環境を整え、総合性能を上げるための地道な開発を 続けつつ、豪雨防災に貢献する高解像度領域数値予報 システムの開発を推進していくことが今後さらに重要 となる。

参考文献

- Bryan, G. H. and H. Morrison, 2012: Sensitivity of a Simulated Squall Line to Horizontal Resolution and Parameterization of Microphysics. *Mon. Wea. Rev.*, 140, 202–225.
- Derbyshire, S. H., I. Beau, P. Bechtold, J.-Y. Grandpeix, J.-M. Piriou, J.-L. Redelsperger, and P. M. M. Soares, 2004: Sensitivity of moist convection to environmental humidity. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 130, 3055–3079.
- Eito, H. and K. Aonashi, 2009: Verification of Hydrometeor Properties Simulated by a Cloud-Resolving Model Using a Passive Microwave Satellite and Ground-Based Radar Observations for a Rainfall System Associated with the Baiu Front. J. Meteor. Soc. Japan, 87A, 425–446.
- Geer, A. J., K. Lonitz, P. Weston, M. Kazumori, K. Okamoto, Y. Zhu, E. H. Liu, A. Collard, W. Bell, S. Migliorini, P. Chambon, N. Fourrié, Min-Jeong Kim, C. Köpken-Watts, and C. Schraff, 2018: All-sky satellite data assimilation at operational weather forecasting centres. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 144, 1191–1217.
- Honda, T., S. Kotsuki, G.-Y. Lien, Y. Maejima, K. Okamoto, and T. Miyoshi, 2018: Assimilation of Himawari-8 All-Sky Radiances Every 10 Minutes: Impact on Precipitation and Flood Risk Prediction. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 123, 965–976.
- 幾田泰酵, 2019: 雲物理過程の改良と GPM 衛星観測の

再現. ワークショップ降雪に関するレーダーと数値モ デルによる研究(第 18 回) 講演要旨集.

- Ikuta, Y., 2016: Data Assimilation with Adjoint Model including Three-Ice Bulk Cloud Microphysics. Abstracts of the 5th Annual International Symposium on Data Assimilation.
- Kain, J. S. and J. M. Fritsch, 1990: A onedimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. J. Atmos. Sci., 47, 2784–2802.
- 欠畑賢之,白山洋平,2018:事例調査:平成29年7月九 州北部豪雨.平成30年度数値予報研修テキスト,気 象庁予報部,48-53.
- 加藤亮平, 下瀬健一, 清水慎吾, 2016: 雲解像数値モデ ルによる 2014 年広島豪雨の予測可能性-水平解像 度と数値粘性に対する感度-. 防災科学技術研究所 研究報告, 82, 1-16.
- Kawabata, T., T. Schwitalla, A. Adachi, H.-S. Bauer, V. Wulfmeyer, N. Nagumo, and H. Yamauchi, 2018: Observational operators for dual polarimetric radars in variational data assimilation systems (PolRad VAR v1.0). *Geosci. Model Dev.*, **11**, 2493– 2501.
- 河野耕平,氏家将志,國井勝,西本秀祐,2019:メソアン サンブル予報システム.令和元年度数値予報研修テ キスト,気象庁予報部,1-15.
- Kazumori, M., 2018: Assimilation of Himawari-8 Clear Sky Radiance Data in JMA's Global and Mesoscale NWP Systems. Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, 96B, 173–192.
- Kikuchi, K. and Y. N. Takayabu, 2004: The development of organized convection associated with the MJO during TOGA COARE IOP: Trimodal characteristics. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L10 101.
- 気象研究所, 2017: 平成 29 年 7 月 5-6 日の福岡県・大 分県での大雨の発生要因について. 平成 29 年 7 月 14 日 報道発表, 1-8.
- Kunii, M., M. Otsuka, K. Shimoji, and H. Seko, 2016: Ensemble Data Assimilation and Forecast Experiments for the September 2015 Heavy Rainfall Event in Kanto and Tohoku Regions with Atmospheric Motion Vectors from Himawari-8. SOLA, 12, 209– 214.
- Nielsen, E. R. and R. S. Schumacher, 2016: Using Convection-Allowing Ensembles to Understand the Predictability of an Extreme Rainfall Event. *Mon. Wea. Rev.*, 144, 3651–3676.
- Oizumi, T., K. Saito, J. Ito, T. Kuroda, and Le Duc,2018: Ultra-High-Resolution Numerical WeatherPrediction with a Large Domain Using the K Com-

puter: A Case Study of the Izu Oshima Heavy Rainfall Event on October 15-16, 2013. J. Meteor. Soc. Japan, **96**, 25–54.

- 小野耕介, 2016: メソアンサンブル予報システムの開発 状況. 数値予報課報告・別冊第 62 号, 気象庁予報部, 100–113.
- 瀬古弘, 2010: 中緯度のメソβスケール線状降水系の 形態と維持機構に関する研究. 気象庁研究時報, **62**, 1–74.
- 津口裕茂,加藤輝之,2014:集中豪雨事例の客観的な 抽出とその特性・特徴に関する統計解析.天気,**61**, 455–469.
- 津口裕茂, 2016: 線状降水带. 天気, 63, 727-729.
- 津口裕茂, 下瀬健一, 加藤亮平, 栃本英伍, 横田祥, 中野 満寿男, 林修吾, 大泉伝, 伊藤純至, 大元和秀, 山浦剛, 吉田龍二, 鵜沼昂, 2016: 「2014 年広島豪雨に関する 予測検討会」の報告. 天気, **63**, 95–103.
- Unuma, T. and T. Takemi, 2016a: Characteristics and environmental conditions of quasi-stationary convective clusters during the warm season in Japan. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 142, 1232– 1249.
- Unuma, T. and T. Takemi, 2016b: A Role of Environmental Shear on the Organization Mode of Quasi-Stationary Convective Clusters during the Warm Season in Japan. SOLA, 12, 111–115.
- Vosper, S., 2015: UK models, resolution and physical parametrizations. MOSAC paper 20.18, 1–9.
- Weverberg, K. Van, A. M. Vogelmann, W. Lin, E. P. Luke, A. Cialella, P. Minnis, M. Khaiyer, E. R. Boer, and M. P. Jensen, 2013: The Role of Cloud Microphysics Parameterization in the Simulation of Mesoscale Convective System Clouds and Precipitation in the Tropical Western Pacific. J. Atmos. Sci., 70, 1104–1128.
- Weyn, J. A. and D. R. Durran, 2018: The scale dependence of initial-condition sensitivities in simulations of convective systems over the southeastern United States. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 145, 57–74.
- Yoshizaki, M., T. Kato, Y. Tanaka, H. Takayama, Y. Shoji, H. Seko, K. Arao, K. Manabe, and Members of X-BAIU-98 Observation, 2000: Analytical and Numerical Study of the 26 June 1998 Orographic Rainband Observed in Western Kyushu, Japan. Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, 78, 835–856.
- Yu, L., X. Jin, and R. A. Weller, 2008: Multidecade Global Flux Datasets from the Objectively Analyzed Air-sea Fluxes (OAFlux) Project: Latent and

Sensible Heat Fluxes, Ocean Evaporation, and Related Surface Meteorological Variables. *Technical Report OA-2008-01, Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, MA.*

メソ解析における観測データ利用の現状と展望¹

1.3.1 はじめに

気象庁では全球予報、全球アンサンブル予報、メソ 予報、局地予報に対し、それぞれ観測データを利用し て初期値を作成している。数値予報の予測精度の向上 には数値予報モデルの改良と共に精度の高い初期値を 作成することが非常に重要である。そのためには現実 の大気を測定した観測データを多く活用して初期値を 作成する必要があるが、数値予報モデルの格子点値に 対して観測データだけで精度のよい初期値を作成す ることは困難である。そこで全ての格子点に対して必 要な情報を持っている数値予報モデルの短時間予測値 をたたき台(第一推定値)にして、その第一推定値を 観測データによって修正する「データ同化」の手法を 用いている。データ同化によって観測の情報が取り込 まれた最適な初期値を作成することができる。

本節では気象庁メソ数値予報システムの初期値作成 (メソ解析)に利用している観測データの変遷と現状、 メソ解析に重要な観測データの特徴と今後の展望と課 題について全体像を述べる。第4章では近年現業化し た改良や気象研究所での研究内容を観測種別毎に記し ているので参照頂きたい。

1.3.2 観測データの利用の変遷と現状

メソ解析では2002年3月に現業領域数値予報システ ムでは世界で初めて4次元変分法の導入に成功した(石 川・小泉 2002)。4次元変分法では衛星輝度温度データ のように解析する物理量へ直接変換できない観測デー タや観測時間の異なるデータをモデルの物理法則に基 づいて時間発展を考慮して同化できることから、以前 の同化手法である3次元最適内挿法(多田 1997)と比 較して多くの観測データが利用できるようになった。 2002 年 3 月以降の観測データの主な導入・改良履歴 を表 1.3.1 に、観測種別毎の利用データ数の時間推移 を図 1.3.1 に示す。4 次元変分法の導入と同時にアメ ダス雨量と気象レーダーから算出した解析雨量が同化 され、予測初期における降水予測精度の向上に貢献し ている。2010年12月には放射伝達モデル RTTOVを 用いた衛星輝度温度データの直接同化を導入し (計盛 2011)、それ以降、衛星データ利用拡大に対応できるよ うになった。

表 1.3.2 に 2019 年 12 月現在メソ解析で利用されて いる観測データを示す。ただし、地表面解析のみで利 用し、数値予報の初期値に反映しない観測データは記 載していない。メソ解析における観測データ利用に関 した特筆事項の一つとして、解析雨量の同化 (Koizumi et al. 2005) やマイクロ波イメージャから算出した降水 強度の同化(佐藤 2003)が挙げられる。降水現象は様々 な過程を経て起こり、時間変化も大きい。4次元変分 法では数値予報モデルの降水過程によって計算された 降水量と実際の観測した降水量を繰り返し比較するこ とで、物理法則に整合した初期値を得ることができる。 現在の解析システムではメソ解析以外で降水量を同化 していない。なぜなら、全球解析では、水平格子間隔 が約 20 km であるため、観測データから得られる降水 現象のスケールよりも粗く、降水量の情報を反映させ ることは難しいからである。局地解析では、水平格子 間隔が 5 km であるが、データ同化手法が 3次元変分 法であるため降水量を同化できないからである。

気象レーダーから得られるデータを積極的に利用し ていることもメソ解析の特徴である。気象レーダーは 実況監視用として国内に広く展開されており、測定か ら入手まで時間が短く、かつ定常的にデータが得られ ることから、日本付近を予測範囲とするメソ解析にとっ て活用しやすいデータである²。中でもドップラーレー ダーから得られるドップラー速度は 2005 年から利用し ており (小泉 2005)、高密度・高頻度データ利用の先駆 けとなっている。

他にも GPS ゾンデによって得られた高密度データ を、その移動の効果も考慮して利用する手法の導入 (酒 匂 2016) や 12.5 km 間隔の ASCAT 海上風データの導 入(第 4.3 節)など、高密度データの利用が進められ ている。

1.3.3 メソ解析に重要な観測データ

数値予報での観測データの有効利用には、観測デー タの特性だけでなく、

- 数値予報の目的や運用形態
- 数値予報モデルやデータ同化の特性

を考慮する必要がある。このため、観測データの選択 や同化手法などを使い分け、数値予報の目的等に適し た観測データを利用して、予測精度を向上させること が重要である。本項ではメソ数値予報システムの目的 等から特に重要な観測データの特徴について述べる。

メソ予報の目的は防災気象情報、航空気象情報など への利用であり、豪雨の予測に重点を置いている。豪 雨の予測精度を向上するには、その発生要因を初期値 に反映することが不可欠であり、特に下層の水蒸気を 測定できる観測データの利用が重要である。メソ予報 の運用面では、3時間おきに1日8回分の初期値を作成 する必要があることから、静止気象衛星に代表される ような定常的に入手できる観測データの利用が重要で ある。また、メソ予報は速報性が求められるため、観 測データの入手は初期時刻から 50 分で打ち切ってい る。そのため最新の観測データをより早く入手して利 用する必要がある。

² 局地解析においても、メソ解析と同様の理由で気象レー ダーから得られる観測データを活用している。

¹ 太田 行哉

導入年月	内容		
2002年3月	静力学4次元変分法 解析雨量 (石川・小泉 2002)		
2002年8月	JAL ACARS		
2003年9月	ANA ACARS		
2003年10月	マイクロ波イメージャによる可降水量、降水量 (佐藤 2003)		
2005年3月	空港気象レーダードップラー速度 (小泉 2005)		
2006年12月	気象レーダードップラー速度 (石川 2007)		
2009年4月	非静力学 4 次元変分法 (本田・澤田 2010)		
2009 年 10 月	地上 GNSS 可降水量 (石川 2010)		
2010年12月	衛星輝度温度直接同化 (計盛 2011)		
	(AMSU-A, MHS, TMI, AMSR-E, SSMIS, MTSAT-2/CSR)		
2011年6月	レーダー反射強度推定湿度 (幾田 2011)		
2013 年 9 月	GCOM-W/AMSR2 (江河 2014)		
2013 年 11 月	Metop-B (守谷ほか 2014)		
2014年5月	台風ボーガス改良 (髙坂 2015)		
2015 年 12 月	ASCAT 海上風 (守谷 2016)		
2016年3月	ひまわり 8 号/AMV, CSR (山下 2016; 計盛 2016b)		
	GPM-Core/GMI, DPR (計盛 2016a; 幾田 2016)		
	GNSS 掩蔽 (平原 2016)		
	国内高密度ラジオゾンデ移動効果 (酒匂 2016)		
2019年3月	ひまわり 8 号/CSR バンド 9, 10 (第 4.5 節)		
	航空機気温データバイアス補正 (第 4.2 節)		
	地上 GNSS 降水域 (第 4.1 節)		
	高解像度 ASCAT 海上風 (第 4.3 節)		

表 1.3.1 メソ解析における観測データの主な導入・改良履歴



図 1.3.1 メソ解析における観測種別毎の利用データ数の時間推移。1日当たりの平均利用数を月別に集計した。保存データの 関係上、解析雨量やマイクロ波イメージャから算出した降水強度データは集計していない。図中の縦線は表 1.3.1 に記した観 測データの主な導入・改良履歴の時期を示し、黒線が同化システムの改良、赤線が新規観測データの導入、青線が観測データ 利用法改良を示す。

	種別またはセンサー	利用要素
	地上観測	気圧
古控組測	海上観測	気圧
旦]女甙积	航空機観測	気温、風
	高層観測	気圧、気温、風、湿度
	ウインドプロファイラ	風
地上リエートセンバハグ	ドップラーレーダー	ドップラー速度、湿度
地上リモードビンシング	解析雨量	降水量
	地上 GNSS	可降水量
疑似観測	台風ボーガス	気圧、風
垫止伤 目	大気追跡風	風
肘止伸生	晴天放射輝度温度	輝度温度
	マイクロ波サウンダ	輝度温度
	マイクロ波イメージャ	輝度温度、降水量
低軌道衛星	マイクロ波散乱計	風
	GNSS 掩蔽観測	屈折率
	衛星搭載レーダー	湿度

表 1.3.2 メソ解析で利用されている観測(2019年12月現在)

メソ解析で使用しているモデルは水平格子間隔5 km、 鉛直 48 層でモデルトップは約 22 km であるが、モデ ルの格子間隔よりも高密度な観測データを直接初期値 に反映することはモデルにとってノイズとなり適切で はない。4 次元変分法の計算時間の制約上、第一推定値 に与える修正量(インクリメント)の水平格子間隔は 15 km であるため、そのスケールに合わせて観測デー タを間引く、もしくは複数のデータを集計して代表す る値を求めるなどの工夫が必要となる。

メソ予報の予測時間は最長51時間であるが、後半ほ どメソモデル領域外からの影響を受ける。メソ予報の 予測精度を向上するには、側面境界値となる全球予報 の改善も必要になる。従ってメソ領域内の観測データ の利用開発だけでなく、全球解析での観測データ利用 高度化も必要である。特に日本の上流領域での全球解 析による観測データの利用が重要である。

1.3.4 観測データの展望と利用上の課題

前項では、豪雨の発生要因を初期値に反映するため には、下層の水蒸気を測定できる観測データが重要で あることを述べた。本節では下層水蒸気が測定できる 観測データをいくつか取り上げ、今後の展望とメソ解 析へ利用する上での課題を述べる。

(1) 地上 GNSS 等の電波の遅延による観測

GNSS は地殻変動の把握、車や航空機などの交通ナビ ゲーションのために位置を測定することが本来の目的で あるが、気象分野では、その誤差要因となる水蒸気量を 逆にシグナルとして活用している (Bevis et al. 1992)。 現在、国土地理院の電子基準点からの地上 GNSS デー タを1時間毎に利用しているが、測量自体は秒単位に 連続観測していることから高頻度に利用できる可能性 がある。GNSSの受信機は陸上に設置されたものが多 いが、海上での観測データは乏しい。周囲を海に囲ま れた日本では、海上から進入する水蒸気の把握が重要 である。船舶やブイにGNSS受信機を搭載することで 観測密度の低い海上での水蒸気量データの利用が期待 できる。

放送、通信などの地上から発信されている様々な電 波も GNSS と同様の原理で水蒸気の情報が得られる可 能性があり、利用検討が進められている。気象研究所 ではレーダー電波の位相時間変化から得られる水蒸気 の時間変動 (気象庁 2015)を研究しており、また情報 通信研究機構電磁波研究所では地上デジタル放送の電 波の遅延量から水蒸気量を推定する手法が開発されて いる。このような研究成果を活用することにより多く の水蒸気データをデータ同化に利用することも可能に なってくる。

(2) レーダー観測

気象レーダーや空港レーダーといったレーダー観測 を取り上げる。レーダーは降水粒子から反射された電 波を分析することで、降水粒子の位置や密度、ドップ ラーシフトによる風を高密度に観測することができる。 現在、数値予報ではレーダーから得られる一部の観測 データしか利用しておらず十分ではない。レーダー反 射強度から推定した相対湿度の利用では、固相の降水 粒子からの反射強度は利用していない。レーダー反射 強度は現状のモデルでの降水物質の予測精度や、線形性 を仮定したデータ同化手法では取り扱いが難しく、レー

ダー反射強度を有効に利用できるモデルの改良やデー タ同化手法の開発が必要となる。固相の降水粒子から の反射強度が利用可能になれば、主に冬季の水蒸気の 情報が増加し降雪予測の精度向上が期待できる。レー ダー自体も改良が続けられている。2018年3月に、関 西国際空港と東京国際空港に二重偏波ドップラーレー ダーが導入された。二重偏波ドップラーレーダーでは、 降水粒子から返ってきた水平・垂直の2種類の受信波 を組み合わせて解析することで、より精度良く降水強 度を推定できるようになる。気象レーダーにおいても 2020年3月から随時、二重偏波ドップラーレーダーへ の更新が予定 (気象庁 2018) されており、全国で降水 域の観測精度向上が期待できる。また 2015 年に気象研 究所に導入されたフェーズドアレイレーダーから高速 スキャンによって短時間に変化する現象を立体的に観 測することが可能となる。

(3) 衛星観測

衛星による観測データは、地上施設では観測が困難 な海上域でも観測情報が得られるため重要である。近年 では輝度温度データの雲・降水域の利用(全天同化)に 向けた開発を重点的に行っており、全球解析では 2019 年12月11日に低軌道衛星に搭載されている水蒸気に 感度のあるマイクロ波イメージャやマイクロ波水蒸気 サウンダの輝度温度データの全天同化を導入した(令 和元年12月10日報道発表資料「台風進路予測や降水 予測の精度が改善します」3)。メソ解析では静止気象 衛星ひまわりから得られる赤外域輝度温度データの全 天同化を気象研究所で開発中である (Okamoto et al. 2019)。低軌道衛星では日本付近を観測できる時間帯が 限られており、同一領域を高頻度で観測できる静止衛 星の方がメソ解析には有効である。また 2029 年に打ち 上げ予定のひまわり後継静止気象衛星にはハイパース ペクトル赤外サウンダを搭載することが検討されてい る。静止気象衛星搭載のハイパースペクトル赤外サウ ンダからは同一領域での大気の鉛直構造の情報を高頻 度に得ることができるため、豪雨の発生要因である水 蒸気の変化をいち早く捉えることが可能である。

地上 GNSS、レーダー、静止衛星から得られる観測 データのように高頻度・高密度の観測データが増えて きており、今後も増加する見込みである。しかし単に 現状の手法を踏襲するだけでは高頻度・高密度な観測 データからの情報を十分に活用することは難しい。観 測誤差の空間・時間相関を考慮することや、現状の1時 間間隔より短い時間間隔で背景場と比較することなど、 適切な設定や改良をすることにより観測データの情報 を十分に引き出すことが可能となる。まだまだ利用可 能な観測データは多数あり、現在利用しているデータ にも利用手法の改善の余地は残っている。メソ解析へ の利用にはデータの持つ誤差等の特性調査、品質管理 手法、及び、データ同化手法の開発、モデル特性に応 じた観測データの利用方法の検討など観測データそれ ぞれに対して利用に向けた開発課題が多数ある。メソ 予報の主目的である豪雨予測の精度向上のためにモデ ルやデータ同化手法の改良と共に観測データの利用開 発を進めていく。

参考文献

- Bevis, M., S. Businger, T. A. Herring, C. Rocken, R. A. Anthes, and R. H. Ware, 1992: GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System. J. Geophys. Res., 97, 15787–15801.
- 江河拓夢, 2014: GCOM-W 衛星搭載のマイクロ波イ メージャAMSR2の利用開始. 平成 26 年度数値予報 研修テキスト, 気象庁予報部, 101–104.
- 平原洋一, 2016: GNSS 掩蔽観測データのメソ解析での 利用開始. 平成 28 年度数値予報研修テキスト, 気象 庁予報部, 53–55.
- 本田有機,澤田謙,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,7-37.
- 幾田泰酵,2011: メソ解析におけるレーダー反射強度 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,9-12.
- 幾田泰醇, 2016: GPM/DPR データのメソ解析での利 用開始. 平成 28 年度数値予報研修テキスト, 気象庁 予報部, 51–53.
- 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.
- 石川宜広, 2007: ドップラーレーダーデータの利用. 平 成19年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 102– 103.
- 石川宜広, 2010: 地上 GPS データのメソ解析での利用. 数値予報課報告・別冊第 56 号, 気象庁予報部, 54-60.
- 計盛正博,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.
- 計盛正博, 2016a: GPM マイクロ波イメージャ輝度温 度の利用開始. 平成 28 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 50-51.
- 計盛正博, 2016b: ひまわり 8 号晴天放射輝度温度の利 用開始. 平成 28 年度数値予報研修テキスト, 気象庁 予報部, 46-49.
- 気象庁, 2015: 気象ドップラーレーダーの電波の位相情 報を利用した水蒸気量の把握手法の開発. 気象業務 はいま 2015, 126.
- 気象庁, 2018: 気象レーダーの観測機能強化~二重偏波 レーダーの導入~. 気象業務はいま 2018, 30.

³ https://www.jma.go.jp/jma/press/1912/10c/ 20191210_initial_value.html

Koizumi, K., Y. Ishikawa, and T. Tsuyuki, 2005:

Assimilation of precipitation data to the JMA mesoscale model with a four-dimensional variational method and its impact on precipitation forecasts. *SOLA*, **1**, 45–48.

- 小泉耕, 2005: データ同化システム. 平成 17 年度数値 予報研修テキスト, 気象庁予報部, 33-37.
- 高坂裕貴, 2015: 台風ボーガス作成手法の改良. 平成 27 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 50-53.
- 守谷昌己,大和田浩美,山下浩史,江河拓夢,2014:
 Metop-B データの利用開始.平成26年度数値予報
 研修テキスト,気象庁予報部,104–107.
- 守谷昌己,2016:マイクロ波散乱計の全球解析での利用 方法の変更及びメソ解析での利用開始.平成28年度 数値予報研修テキスト,気象庁予報部,55-57.
- Okamoto, K., Y. Sawada, and M. Kunii, 2019: Comparison of assimilating all-sky and clear-sky infrared radiances from Himawari-8 in a mesoscale system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **145**, 745–766.
- 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.
- 酒匂啓司, 2016: 国内ラジオゾンデ高解像度観測データ のメソ解析での利用開始. 平成 28 年度数値予報研修 テキスト, 気象庁予報部, 59-62.
- 多田英夫, 1997: 大気客観解析. 数値予報課報告・別冊 第43号, 気象庁予報部, 62-86.
- 山下浩史,2016: ひまわり8号大気追跡風データの利 用開始. 平成28年度数値予報研修テキスト,気象庁 予報部,43-46.