

第1章 asuca が導入された局地数値予報システム

1.1 はじめに¹

局地数値予報システムは、空間・時間スケールの小さい現象を予測するための水平格子間隔 2 km の現業数値予報システムとして運用されている。同システムは 2010 年 11 月からの試験運用（永戸ほか 2010; 平原ほか 2011）を経て、計算機更新後の 2012 年 8 月に、東日本を予測対象領域とした 1 日 8 回（3 時間おき）の運用が開始され（永戸ほか 2012）、2013 年 5 月には予測対象領域が日本域に拡大されて、1 日 24 回（1 時間おき）と高頻度で運用されるようになった（永戸ほか 2013）。局地数値予報システムは高頻度で実行することで最新の観測データの情報をモデルの初期値に取り込み、最新の大気の状態を反映した初期値から予測を行うことで激しい現象の発生を捕捉しやすくしている。

局地数値予報システムは予報モデル（局地モデル：LFM）とデータ同化システム（局地解析：LA）から構成され、運用開始当初は、LFM として気象庁非静力学モデル（JMA-NHM）を、LA として JMA-NHM に基づいた変分法システム（JNoVA）を用いていた。

一方、時間積分法や移流スキームなどにより新しい手法や知見を取り入れ、また、開発が継続的に進めやすいモデルとして、次世代非静力学モデル asuca（気象庁予報部 2014）の開発が進められてきた。そして、2015 年 1 月 29 日より、これまでの JMA-NHM と JNoVA に代わり、asuca とそれに基づく変分法データ同化システム asuca-Var を局地数値予報システムに導入して運用を開始した²。その後、2015 年 8 月に局地解析に更なる改良を加えた。

asuca をデータ同化システムや予報モデルに用いた局地数値予報システム（以下、現 LFM）の予測特性については、JMA-NHM を予報モデルに用いた以前の同システム（以下、旧 LFM）と比べて予測特性の大きな変化はないものの、成層の不安定化に伴う積雲対流の発生や終息の遅れの改善などが見られている（河野・原 2014）。

本章では、まず、河野・原（2014）で詳細について述べなかった asuca-Var の特徴・特性と 2015 年 8 月に現業化された asuca-Var の改良とその予測へのインパクトについて紹介する（第 1.2 節）。次に、現 LFM の予測結果を利用する上で留意すべきことを、事例を交えながら紹介する（第 1.3 節）。ここで紹介する特性は永戸ほか（2013）や河野・原（2014）と重複する部分も多いが、LFM の特性を理解する上で重要な点として、別の事例も交えながら繰り返し取り上げることとする。

モデルの特性はそれを端的に示す事例によって示す

のが最も理解しやすいが、すべての特性について事例を示すのは不可能に近い。そこで、モデルの平均的な精度の全体像を把握するための資料として、旧 LFM と比較したときの現 LFM の統計検証の結果を付録 1.3.A に掲載した。なお、これらは 2015 年 1 月の現 LFM の現業化の際に行った実験の検証結果で、第 1.2 節で紹介するその後の LA の改良による効果は含まれていない。付録 1.3.A に示した特性に第 1.2 節で示す特性の変化を加えたものが、現 LFM の予測特性となることに注意していただきたい。

参考文献

- 永戸久喜, 石田純一, 藤田匡, 石水尊久, 平原洋一, 幾田泰醇, 福田純也, 石川宜広, 吉本浩一, 2010: 局地数値予報システムの概要. 平成 22 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1-3.
- 永戸久喜, 藤田匡, 原旅人, 2012: 局地数値予報システムの本運用. 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.
- 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.
- 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.
- 平原洋一, 田村一卓, 森安聡嗣, 石水尊久, 2011: 局地モデルの特性. 平成 23 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 37-49.

¹ 原 旅人

² JNoVA, asuca-Var とともに、LA に用いているのは 3 次元変分法による同化システムである。

1.2 局地解析の更新と改良¹

1.2.1 はじめに

局地解析は、局地モデル (LFM) の初期値を作成するデータ同化システムである。LFM の予報モデルは、2015 年 1 月に気象庁非静力学モデル (JMA-NHM) から新しい非静力学モデル asuca へと更新された。それと同時に局地解析のデータ同化システムも JMA-NHM を基にした変分法データ同化システム (JNoVA; 藤田・倉橋 2010) から asuca 変分法データ同化システム (asuca-Var; 幾田 2014) へと更新した。その後、asuca-Var の改良を進め、現業局地解析を 2015 年 8 月に再び更新した。本節では、これらの更新の概要とそれに伴う予測精度向上について報告する。以降、2014 年 12 月時点の JNoVA 版局地解析を LA1412 と呼び、2015 年 1 月時点の asuca-Var 版局地解析を LA1501、2015 年 8 月に更新された局地解析を LA1508 と呼ぶ。

なお、asuca 及び asuca-Var の詳細は、気象庁予報部 (2014) に解説されているため、適宜参照願いたい。

1.2.2 asuca 変分法データ同化システムへの更新

局地解析を JNoVA から asuca-Var へと更新する際に幾つかの仕様拡張を行った。その結果、局地解析の計算効率や LFM の予測精度が向上した。表 1.2.1 に、LA1412 と LA1501 の主な仕様を示す。この仕様に関する本項での記述は LA1501 と LA1508 で共通である。

(1) 解析変数

asuca-Var の解析変数は、ランベルト座標系の x 方向の風 u 、 y 方向の風 v 、温位 θ 、偽相対湿度 μ_p 、地上気圧 p_s 、地中温度 T_g と土壌体積含水率 w_g である²。JNoVA では地表面温位 θ_g を解析変数としていたが、asuca-Var では、これを廃止し、予報変数と同じ T_g と w_g を新たに解析変数に追加した。 T_g と w_g を解析変数に追加したことによる効果は、第 1.2.3 項で説明する。

(2) 局地解析の処理の流れ

予報モデルとデータ同化システムは異なるが、局地解析における解析値作成処理の基本的な流れは LA1412 と LA1501 で共通である。LA1501 は、asuca-Var による 3 次元変分法 (3D-Var) と asuca による 1 時間予報の組み合わせで構成される。まず、LFM の初期時刻 ($t = 0$) の 3 時間前 ($t = -3$) を始点とし、メソモデル (MSM) の予測値をその時刻 t における第一推定値 x_t^b とする。次に、その x_t^b に対象時刻 t の観測 y_t を 3D-Var で同化し、解析値 x_t^a を求める。そして、 x_t^a を初期値として asuca の 1 時間積分 $\mathcal{M}_{t,t+1}$ を行い、次の同化時刻 $t+1$ の第一推定値 x_{t+1}^b を求める。これを LFM の初期時刻 $t = 0$ の解析値 x_0^a が得られるまで繰

り返す。

LA1412 から LA1501 への更新で、上記の処理の流れは変えていないが、予報と解析の接続方法を変更した。LA1501 では、予報から解析に接続する際に、第一推定値は情報の損失のない方法 (リスタート) で引き継がれる。このリスタートでは、予報変数の他にも、対流パラメタリゼーションの Kain-Fritsch スキームで格子毎に計算される積雲のライフタイムや地表面過程で用いられる地表面粗度長等も引き継いでいる。LA1412 ではこれら変数の引き継ぎは行っておらず解析毎に初期化していたが、LA1501 は、このリスタートを用いた接続を行うことにより、予報と解析のより滑らかな接続を実現している。

(3) 極小値探索の安定性と計算効率

JNoVA では、観測演算子や要素変換等の前方演算に非線形演算子を用いているが、asuca-Var では、接線形演算子を用いている³。この接線形演算子を用いることで評価関数は 2 次形式となり極小値探索の安定性が向上する。また、局地解析は、計算領域を分割し、分割された領域の計算を並列実行している。JNoVA では、計算領域を 1 次元分割していたが、asuca-Var では計算領域を 2 次元分割し並列計算効率の向上を図っている。

(4) 鉛直座標と地形

鉛直座標は、LA1412 では z^* 座標であったが、LA1501 では MSM や LFM と同様の鉛直ハイブリッド座標に更新している。これによって、局地解析内の asuca の鉛直差分の誤差が軽減される以外にも、第一推定値と側面境界値である MSM からの内挿誤差を軽減する効果もある。また、JMA-NHM では計算の都合上便宜的に設けられていた第 1 層目と第 50 層目を層数に数え上げ鉛直層数を 50 層としていたが、LA1501 ではそれらを除いて時間発展する層のみを層数として数え上げ鉛直層数を 48 層としている。また、asuca で用いられる地形は有限体積法のセルの頂点で定義され、スカラー量の置かれているセル中心の地形は頂点の値の平均値から求める。JMA-NHM はスカラー量の置かれる格子点の地形を直接求めるため、LA1412 と LA1501 のモデル地形と鉛直層の高度は一致しない。

(5) 観測データ

LA1501 から新たに大気追跡風が同化されるようになった。また、LA1412 では使用されていなかった一部の航空機観測も追加された。これら新規観測の追加による予測精度の変化は僅かであり、統計的有意性はみられなかった。なお、前項で述べたように、モデル格子の定義が異なるため LA1412 と LA1501 の地形は

¹ 幾田 泰醇

² 偽相対湿度 μ_p は、水蒸気的全密度に対する比 q_v と、第一推定値の飽和水蒸気的全密度に対する比 q_{sat}^b を用いて $\mu_p = q_v / q_{sat}^b$ で定義される。

³ 観測演算子：モデルの予想値から観測相当量を求める演算子。接線形演算子：非線形演算子をモデルの予想値の周辺で線形化したもの。

表 1.2.1 局地解析用 JNoVA と asuca-Var の仕様。

	JNoVA	asuca-Var
解析変数	$u, v, \theta_g, p_s, \theta, \mu_p$	$u, v, T_g, p_s, \theta, w_g, \mu_p$
前方演算	非線形	接線形
MPI 分割	1 次元分割	2 次元分割
鉛直座標	z^* 座標 (48+2 層)	鉛直ハイブリッド座標 (48 層)
背景誤差	水平一様	海陸別 (大気は水平一様)
	NHM-5km	asuca-5km
雲物理過程	3-ice バルク法 (q_c, q_r, q_i, q_s, q_g)	同じ
海上物理量診断	粗度: 簡略版 Kondo (1975) バルク係数: Louis et al. (1982)	粗度: Beljaars (1994) バルク係数: Beljaars and Holtslag (1991)
土壌水分予測	Deardorff (1978)	Noilhan and Planton (1989)

異なる。例えば GNSS 可降水量の様に実地形とモデル地形の差を品質管理で参照している観測は、この地形の差が品質管理の結果に影響する。特に、現実で急峻な地形となっている場合に LA1412 と LA1501 の地形の差が大きくなることで採用・棄却される観測が変わり、LA1412 と LA1501 で同化される観測分布に僅かな差が生じている。

(6) 解析インクリメント

図 1.2.1 に、500 hPa の $t = -3$ における解析インクリメント (解析値 x_{-3}^a と第一推定値 x_{-3}^b の差分 $x_{-3}^a - x_{-3}^b$) の例を示す。LA1412 では、中国東北区、東シナ海や太平洋上に乱雑な解析インクリメントが多く見られる。これらは観測に由来しない解析インクリメントで、内挿誤差や変数変換の僅かな誤差が積み重なり生じたものである。LA1501 では、前述の鉛直座標系の更新や予報と解析の接続方法の変更等により誤差の発生が抑えられた結果、観測に由来しない解析インクリメントの広がりが軽減された。同様に、図 1.2.2 は、300 hPa の解析インクリメントの例である。LA1412 で見られる風の乱雑な解析インクリメントは、LA1501 では減少している。LA1501 では黄海や日本海で風の解析インクリメントが広がっているが、これは新たに追加された大気追跡風による影響が解析インクリメントに反映されているためである。

(7) 局地解析内の予報モデル

LA1501 から局地解析内の格子間隔 5 km の 1 時間予報を行うモデルは、JMA-NHM から asuca へと更新された。以下では、局地解析用の格子間隔 5 km の asuca を asuca-5km、LFM 用の格子間隔 2 km の asuca を asuca-2km と呼ぶ。同様に JMA-NHM も格子間隔に応じて NHM-5km や NHM-2km と呼ぶこととする。

NHM-2km と asuca-2km の仕様の差は、河野・原 (2014) で示されている。LA1501 で用いられる asuca-5km は、力学過程は asuca-2km の仕様に準拠し物理過程は 2015 年 1 月時点の MSM の仕様に準拠するように設定しているが、MSM や asuca-2km と一部異なる

仕様となっている。

NHM-5km と asuca-5km の雲物理過程は、雲水、雨、雲氷、雪、霰の混合比 (q_c, q_r, q_i, q_s, q_g) を予測する 3-ice バルク法を用いている。asuca への更新の際に、MSM で用いられている雲氷の数濃度 (n_i) を予報変数とするスキームの利用も検討したが、予測精度や計算安定性に問題が見られたため採用していない。海上の診断方法は、NHM-5km では海面粗度を簡略版 Kondo (1975)、バルク係数を Louis et al. (1982) に基づき計算していたが、asuca-2km と同様に海面粗度を Beljaars (1994)、バルク係数を Beljaars and Holtslag (1991) に基づくものに変更している。土壌水分予測は、NHM-5km では Deardorff (1978) の強制復元法により計算していたが、このスキームで用いられる係数は特定の土壌に適するよう求められたものであるため、時定数も現実より短い傾向がある。そこで、第 1.2.3 項で後述するが、Noilhan and Planton (1989) に基づき土壌特性に応じた係数を設定することとした (草開 私信)。これによって、土壌体積含水率を解析変数とした場合に、地上物理量予測精度の向上に特に有効に働くことを確認している。

1.2.3 asuca-Var の地中温度と土壌体積含水率

LA1501 の現業運用開始時に地中温度と土壌体積含水率の解析変数への追加と背景誤差の拡張を行った。これによって、地上物理量予測精度の向上が得られた。本項では、地中温度と土壌体積含水率の解析変数への追加の概要とその効果を述べる。

(1) 解析変数への追加

局地解析の JNoVA では地表面温位を解析変数とすることで、大気不安定による降水現象の改善が得られている (永戸ほか 2012)。asuca-Var では、地表面温位を解析変数とせず、新たに、地中温度 (地表面温度を含む) と土壌体積含水率を解析変数に追加した。これらを解析変数とすることで地中物理量に関する観測、例えば衛星土壌水分量プロダクトなどを同化することも可能となる。現業利用している観測の中に地中物理

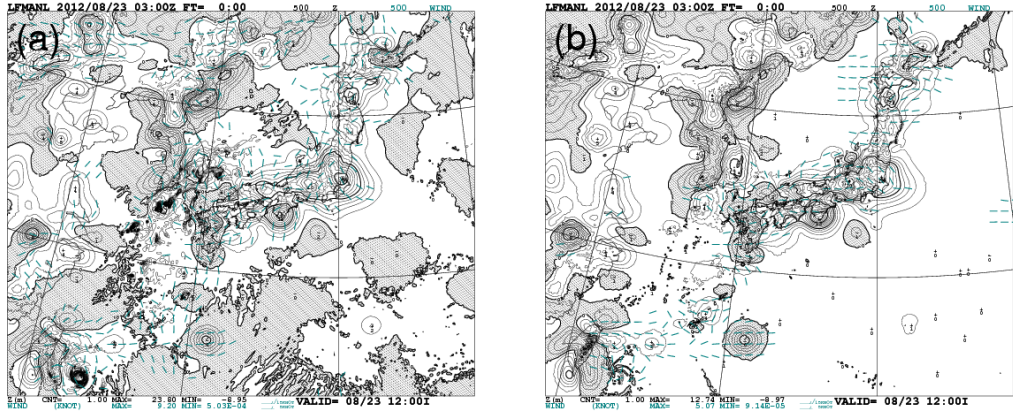


図 1.2.1 局地解析の $t = -3$ における、500 hPa の高度 (実線、網掛けは負値)、風 (矢羽) の解析インクリメント。(a) は LA1412、(b) は LA1501 の結果を表す。

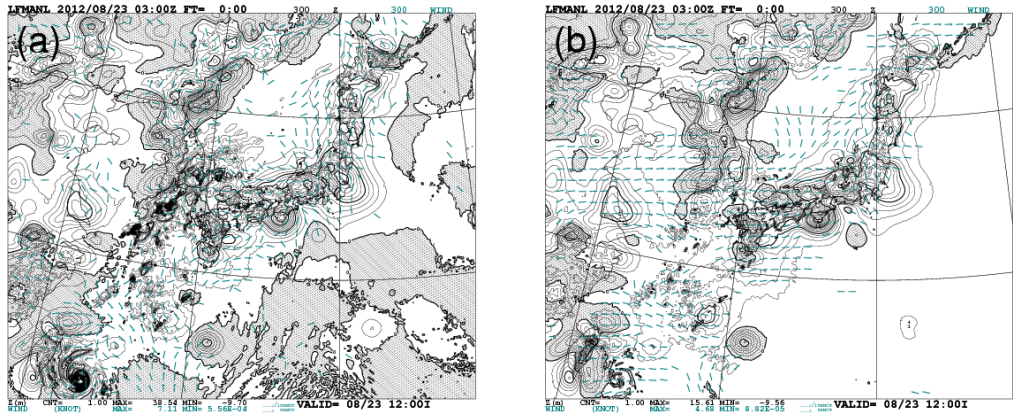


図 1.2.2 図 1.2.1 と同じ。ただし、300 hPa の解析インクリメント。

量を直接観測したものは無く、主に地上観測によって、地中温度と土壌体積含水率は修正される。

(2) 地中の背景誤差

地中温度の解析インクリメントは、地表面温度の解析インクリメントに基づいて、鉛直背景誤差共分散に応じて計算される。土壌体積含水率や地中温度の水平誤差相関は、土地利用状況や土壌の組成の空間分布に依存するため非常に多様となる。その多様性の考慮は今後の開発課題とし、現状は地表面温度の水平誤差相関距離を大気最下層の温位に等しくとり、深度に応じて指数関数的に減少するよう単純化している。同様に土壌体積含水率の水平相誤差相関距離についても偽相対湿度の最下層の値を基にしている。また、LFM では海面水温を予測していないため海格子の鉛直背景誤差共分散の値は 0 としている。

(3) 地上観測演算子と地表面スキーム

asuca-Var の地上観測演算子は、モデルの地上物理量診断と同じく Beljaars and Holtslag (1991) のフラックススキームに基づきバルク係数から地上 1.5 m の気温、比湿、地上 10 m の風等の地上物理量を求める演算を行う。具体的には、この地上観測演算子を利用して地上気温観測を同化すると、地表面気圧、地表面温度と大気最下層の気温が最適化される。同様に地上比

湿観測を同化すると、上記に加え土壌体積含水率と大気最下層の水蒸気が最適化される。

また、LFM で用いられている地表面スキームでは、地表面における上部境界条件として外部強制力 G_0 が次式で与えられる。

$$G_0 = (1 - a) S_{\downarrow} + L_{\downarrow} - L_{\uparrow} - H - \lambda E \quad (1.2.1)$$

ここで、 a はアルベド、 $S_{\downarrow}$ と $L_{\downarrow}$ は、それぞれ、地表面へ入射する短波放射フラックスと長波放射フラックス、 $L_{\uparrow}$ は地表面から射出する長波放射フラックスであり、Stefan-Boltzmann の法則により射出率 ϵ と Stefan-Boltzmann 定数 σ を用いて $L_{\uparrow} = \epsilon \sigma T_0^4$ で与えられる。添え字 0 は地表面を表し、添字 1 は大気最下層を表す。 H と λE は顕熱フラックスと潜熱フラックスであり、

$$H = -c_p C_h (\theta_{v1} - \theta_{v0}) \quad (1.2.2)$$

$$\lambda E = -\lambda \rho \beta C_q U_1 (q_{v1} - q_{sat0}) \quad (1.2.3)$$

で与えられる。ここで、 C_h 、 C_q は、それぞれ熱と水蒸気に関するバルク係数、 c_p は定圧比熱、 θ_v は仮温位、 β は蒸発効率で土壌体積含水率の関数、 λ は単位質量あたりの蒸発熱、 ρ は大気密度、 q_v は比湿、 q_{sat} は飽和水蒸気比湿、 U_1 は大気最下層の風速である。

もし地中温度や土壌体積含水率が解析によって修正されない場合、大気最下層の物理量 q_{v1} 、 θ_{v1} は更新され

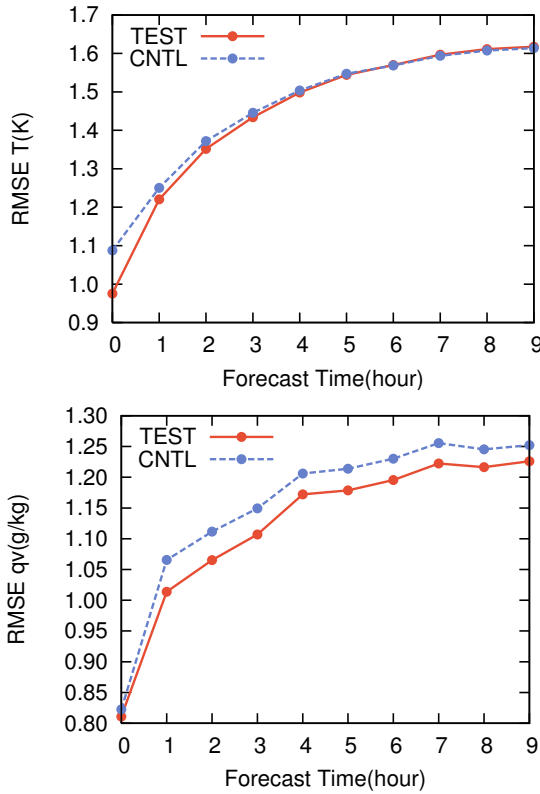


図 1.2.3 予報時間ごとの地上気温 (上図) と地上比湿 (下図) の RMSE。CNTL は、JNoVA で作成した初期値からの予測実験を表し、TEST は asuca-Var で作成した初期値からの予測実験を表す。

ても、予測開始後の地表面からのフラックス $L_{\uparrow}, H, \lambda E$ は、地表面の物理量 $q_{v0}, \theta_{v0}, T_0, \beta, q_{sat0}$ が解析前の状態であるため、修正が限定的となり、解析による効果は速やかに失われてしまう。それに対して、地中温度と土壌体積含水率を解析変数とすると、予測開始後の $L_{\uparrow}, H, \lambda E$ は、観測によって修正された大気最下層及び地表面の物理量から計算される。このため、地中温度と土壌体積含水率を解析変数としない場合とする場合では、地中温度と土壌体積含水率を解析変数としたほうが解析による修正の効果は持続する。

(4) 地上物理量予測へのインパクト

図 1.2.3 に、予報時間毎の地上物理量予測に対する地上観測の平方根平均二乗誤差 (RMSE) を示す。CNTL は LA1412 を用いた実験を指し、TEST は LA1501 を用いた実験を指す。解析時刻 (FT=0) における地上気温の RMSE は、CNTL に対して TEST が改善している。しかし、TEST は予測が進むにしたがって、徐々に CNTL に漸近している。これは、地上気温が地表面温度の予測の影響、つまり地表面での放射や大気最下層の気温の影響が大きいため、時間積分が進むと地上気温の誤差発展が大気の誤差発展に支配されやすいためである。

それに対して、地上比湿の RMSE は解析時刻 (FT=0) の改善が LFM の全予報時間である 9 時間全て

に亘って維持されている。地上比湿は、定式化上、水蒸気フラックスの飽和水蒸気量を通じて間接的に地表面温度の影響を受ける。降水の影響を除けば、地上比湿の予測は、大気最下層の水蒸気量と蒸発効率の影響が支配的である。そのため、地上比湿は地上気温と比べて上部境界条件からの影響が相対的に少なく初期の改善が維持されと考えられる。

この改善の維持は地中温度と土壌体積含水率を解析変数として初期値を適切に修正した上で、更に、土壌水分予測に Noilhan and Planton (1989) を採用することによって得られたものである。Noilhan and Planton (1989) を採用した理由は、Deardorff (1978) ではその時定数の短さが影響し、asuca-5km で予測を繰り返す間に同化の効果が失われてしまい土壌体積含水率を解析変数とする効果が十分に得られないためである。

1.2.4 偽相対湿度インクリメント調節

LA1508 から偽相対湿度インクリメント調節の導入により過飽和の扱いが変更となった。これにより予測開始直後の予測精度の向上が得られた。本項では、偽相対湿度インクリメント調節の概要及び効果について述べる。

(1) 概要

モデルの強拘束条件を持たない 3D-Var によって求められた解析インクリメントは、背景場の流れに無関係で解析時刻におけるモデルの力学過程や物理過程の結果にも依存しない。そのような解析インクリメントを無条件で第一推定値に反映させて解析値を作成すると、現実には発生する可能性が低い非常に不安定なプロファイルが形成されることがある。例えば、過剰な水蒸気の解析インクリメントが無条件に第一推定値に加算され、任意の格子で過飽和度が周辺より異常に大きくなる場合を想定する。そのような異常な過飽和度の格子が含まれる解析値を初期値として予測を開始すると、予測開始直後に雲物理過程の飽和調節は、過飽和となっている格子の過飽和分の水蒸気 δq_v を 1 タイムステップで水物質へ変換する。この相変化に伴い $\delta \theta = -L_v / (c_p \pi) \delta q_v$ だけの潜熱が解放される。ここで、 L_v は蒸発による潜熱、 π はエクスナー関数である。このため、仮にこの加熱によって大気の状態が不安定化し過大な鉛直速度が局所的に計算されると計算不安定に陥ってしまう。この危険を回避するため、LA1501 では解析値が過飽和となる場合その過飽和分の水蒸気を除外していた。しかし、この方法ではサイクルを行う上で解析と予報との接続に不連続が生じる。特に、過飽和となる雲域では不必要に水蒸気が除外されてしまう問題があった。

この問題を解決するため、解析インクリメントを第一推定値に反映させる前に、解析値を陰的に検査し解析インクリメントを事前に調節する手段として偽相対湿度インクリメント調節を開発した。その仕組みを以下で説明する。まず、解析値の相対湿度 μ^a を第一推

定値の周辺でテイラー展開する。

$$\mu^a = \mu^b (1 - \delta q_{\text{sat}}/q_{\text{sat}}^b) + \delta \mu_p \quad (1.2.4)$$

ここで、上付き添字の a は解析値、b は第一推定値を表す。 $\delta \mu_p$ は偽相対湿度の変分であり、 q_{sat} は飽和水蒸気量である。 δq_{sat} は、気温と気圧の関数であるため、更に展開できるが、実用上の便利のため非線形演算の差 ($\delta q_{\text{sat}} \equiv q_{\text{sat}}^a - q_{\text{sat}}^b$) で与えている。なお、 $\mu^a = q_v^a/q_{\text{sat}}^a$ 且つ $\delta \mu_p = \delta q_v/q_{\text{sat}}^b$ であるため $\mu^a \neq \mu^b + \delta \mu_p$ である。次に、解析インクリメントを加算した結果である解析値 μ^a がどのような値となるかを条件として、 μ^a の値を制限し、(1.2.4) 式を $\delta \mu_p$ に対して解く。図 1.2.4 は、 μ^a の制限を決定するための流れ図である。まず μ^a が過飽和であるかどうかで分岐する。過飽和でなければ、負の値になるかどうかを確かめて、負になる場合は $\mu^a = 0$ として (1.2.4) 式を解き、負にならない場合は処理を終了する。 μ^a が過飽和の場合、 μ^b が過飽和であるかどうか判断する。 μ^b が過飽和でない場合、解析値に過飽和を許さず $\mu^a = 1$ として $\delta \mu_p$ を求める。 μ^b が過飽和である場合、それは時間積分の結果、モデルが許容できる過飽和度であるとして $\mu^a = \mu^b$ を代入し $\delta \mu_p$ を求める。この様にして $\delta \mu_p$ を調節し、モデルの計算安定性に問題が起こらない範囲で過飽和を許容することで、計算不安定を回避しつつ解析から予報へ接続することが可能となる。

(2) 解析と予報へのインパクト

偽相対湿度インクリメント調節を行うと、過飽和が除去されていた上層の予測特性が変化する。以下では、その効果を確認するため、LA1501 相当の実験を CNTL、偽相対湿度インクリメント調節機構を有効にした LA1508 相当の実験を TEST として、両者を比較する。図 1.2.5 は、3D-Var とそれに付随する過飽和除去を繰り返した影響を図示したものであり、

$$\delta \mathbf{x} = \mathbf{x}_0^b - \mathcal{M}_{-3,0}(\mathbf{x}_{-3}^b) \quad (1.2.5)$$

の領域平均値を表している。ここで $\mathbf{x}_0^b$ は、MSM の第一推定値から 3D-Var と 1 時間予報を LFM 初期時刻まで繰り返し実行した結果であり、 $\mathcal{M}_{-3,0}(\mathbf{x}_{-3}^b)$ は、MSM の第一推定値から解析を行わず 3 時間予報のみを実行した結果を表す。なお、CNTL と TEST は、同じ $\mathbf{x}_{-3}^b$ を用いている。

図 1.2.5 は、(1.2.5) 式で得られた、全密度と水蒸気の密度の比、温位、長波・短波放射加熱率の増分の鉛直分布を図示したものである。同様に図 1.2.6 は、(1.2.5) 式で得られた、全密度と各水物質の密度比の増分の鉛直分布を表している。まず、CNTL は TEST に比べ上層で水蒸気が減少している。これは CNTL の過飽和除去によるものである。水蒸気の減少により、水蒸気から雲氷への変換が抑制され、雲氷の減少幅が大きくなる。この雲氷の差は、長波・短波放射加熱率の減少と

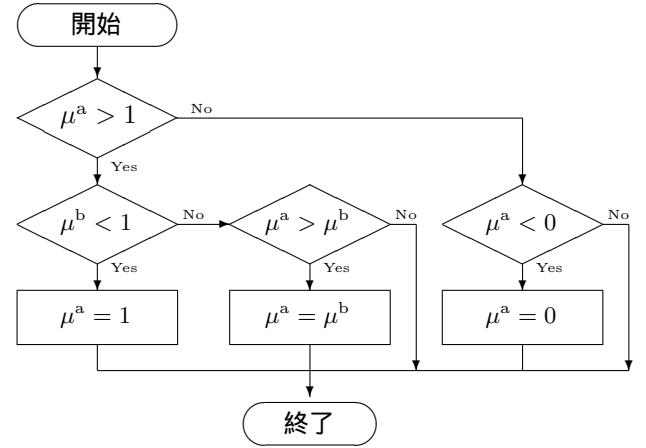


図 1.2.4 偽相対湿度インクリメント調節を行うための制限値を求めるフロー図。

して現れる。そして放射加熱率が減少することにより、CNTL の温位が低下する。つまり、CNTL は無条件に過飽和を除去することで、人工的に上層の昇温を抑制していたことになる。また、水物質の差に着目すると、上層から中層にかけて CNTL の雲氷と雪の減少幅が目立つが、下層では雨も減少している。TEST ではそれらの減少の多くが解消されていることが分かる。

つまり、偽相対湿度インクリメント調節を行うことで、上層で過飽和の除去が緩和され、飽和調節による水蒸気から雲氷への変換が進む。次に、雲氷が増えることで、放射加熱率の減少が抑えられる。その結果、上層の気温の低下が抑えられる事に加え、雲氷から雪への変換、雪から雨への融解が進み、降水が増加する。

(3) 予測精度検証

図 1.2.7 は、夏実験の各閾値の降水検証を示したものである。実験期間は、2014 年 7 月 25 日～7 月 26 日、2014 年 7 月 30 日～8 月 5 日、2014 年 8 月 14 日～8 月 24 日である。実験では、00,03,06,09,12,15,18,21UTC を初期時刻とする 1 日 8 回の予測のみ行った。ETS は、閾値 10 mm/h 以下で有意に改善していること、Bias Score は、全ての閾値で降水予測頻度が増えていることを示している。図 1.2.9 は、閾値 1 mm/h の予報時間毎のスコアである。予測開始直後の改善が大きく FT=7 まで改善が持続している。図 1.2.10 は、閾値 10 mm/h の予報時間毎のスコアであり、降水のスピンアップの改善が得られている。特に ETS は、FT=1 で有意に改善しているが、LFM が JNoVA と JMA-NHM であった当時からこの閾値 10 mm/h の FT=1 の ETS は FT=2 の ETS より低い傾向があった。asuca に更新された LA1501 でもその傾向が依然として残っていたが、偽相対湿度インクリメント調節を導入した LA1508 ではこの問題が解消された。図 1.2.8 は、冬実験の各閾値の降水検証を示したものである。実験期間は、2014 年 12 月 10 日～12 月 17 日、2014 年 12 月 28 日～2015 年 1 月 2 日、2015 年 1 月 26 日～1 月 31 日である。実験では、夏実験と同様に 1 日 8 回の予測のみ行った。ETS は、

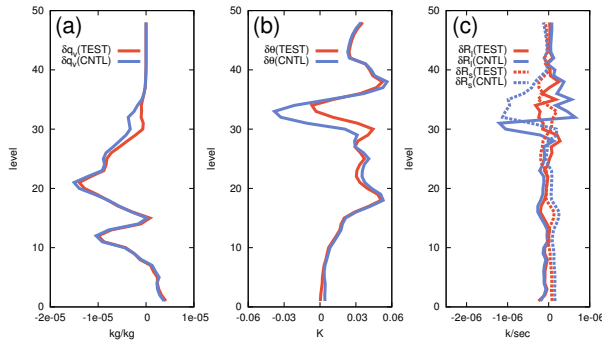


図 1.2.5 (a) 全密度と水蒸気の密度の比、(b) 温度、(c) 短波・長波放射加熱率の増分。

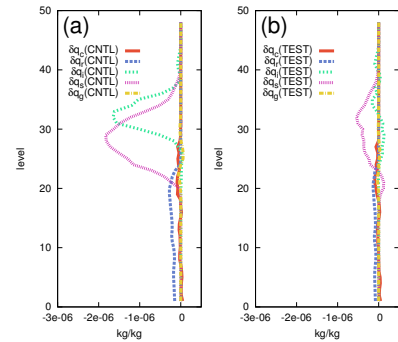


図 1.2.6 (a)CNTL と (b)TEST の全密度と各水物質の密度の比の増分。

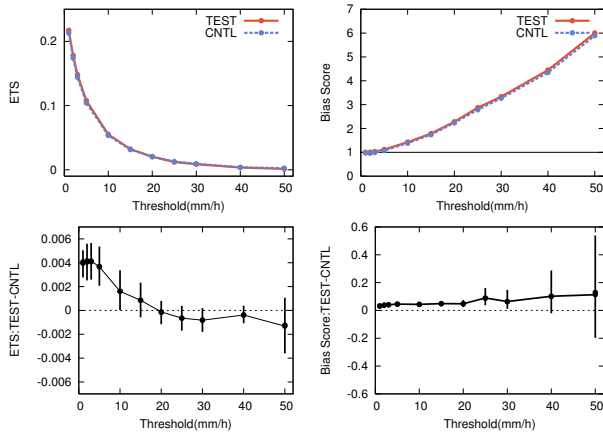


図 1.2.7 夏実験の閾値毎の ETS(左上) と Bias Score(右上)。ETS の TEST-CNTL(左下) と Bias Score の TEST-CNTL(右下)。エラーバーは 95%信頼区間。

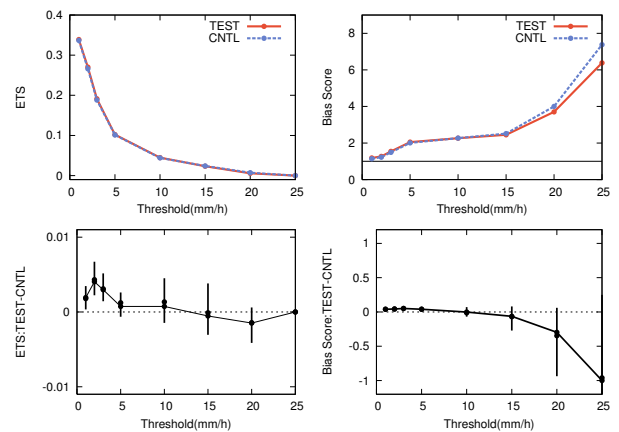


図 1.2.8 図 1.2.7 と同じ。ただし、冬実験。閾値 30 mm/h 以上の観測・予測は無し。

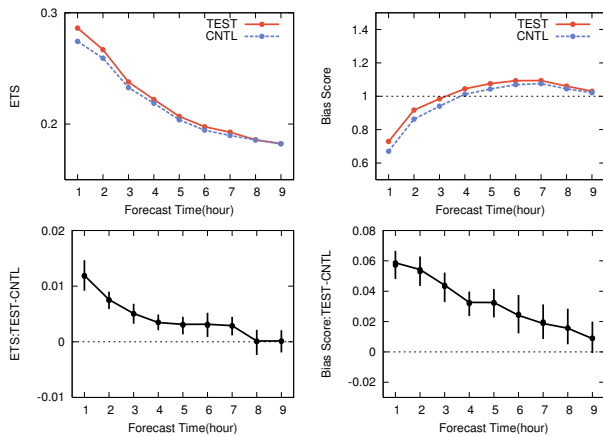


図 1.2.9 夏実験の閾値 1 mm/h の予報時間毎の ETS(左上) と Bias Score(右上)。ETS の TEST-CNTL(左下) と Bias Score の TEST-CNTL(右下)。エラーバーは 95%信頼区間。

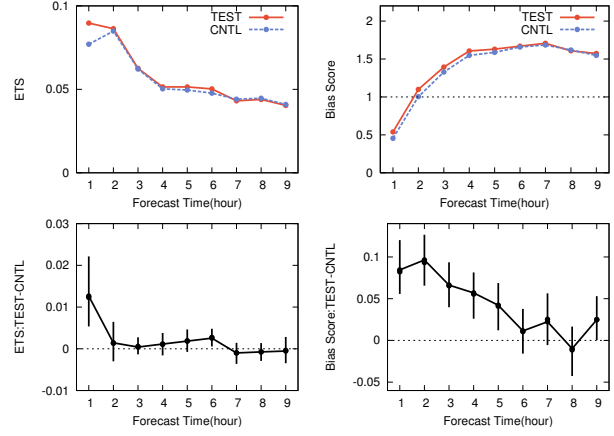


図 1.2.10 図 1.2.9 と同じ。ただし、閾値 10 mm/h。

閾値 3 mm/h 以下で有意に改善している、Bias Score は、閾値 5 mm/h 以下で降水予測頻度が増えていることを示している。いずれも夏実験と同様に、予測初期における降水のスピナップの改善に由来するものである(図略)。図 1.2.11 は、夏の FT=0 における比湿のゾンデ検証の結果である。同様に図 1.2.12 は、気温のゾンデ検証の結果である。初期時刻におけるゾンデ検証では、300 hPa で気温と比湿の正バイアスが拡大し

ている。前述のとおり、CNTL では過飽和除去による上層の昇温が抑制されていた。モデルが正バイアスを持つ高度でこの昇温の抑制が働いた結果、スコアとしては良い方向に振れていたことになる。しかし、CNTL の上層の昇温抑制は人工的なものであり、CNTL の誤差が TEST の誤差より小さいという結果は見かけ上のものである。上層の正バイアスは、特に雲氷の生成量や雲氷の有効半径等の誤差に依存すると考えられる。

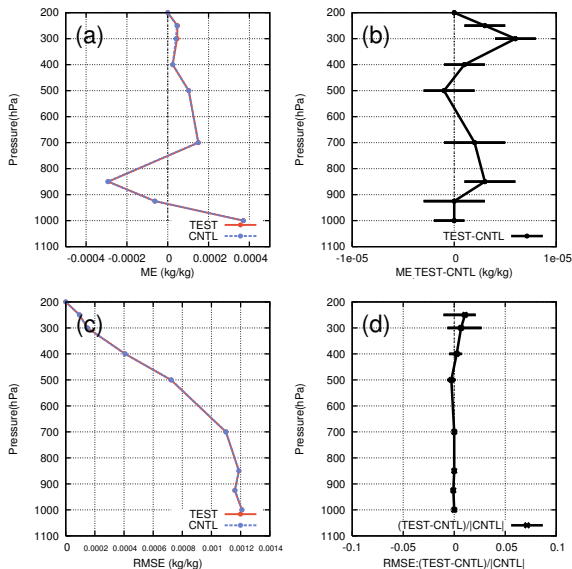


図 1.2.11 FT=0 の比湿の対ゾンデ検証。(a) は ME、(b) は TEST と CNTL の ME の差、(c) は RMSE であり、(d) は RMSE の改善率で負値が改善を表す。エラーバーは 95%信頼区間を表す。

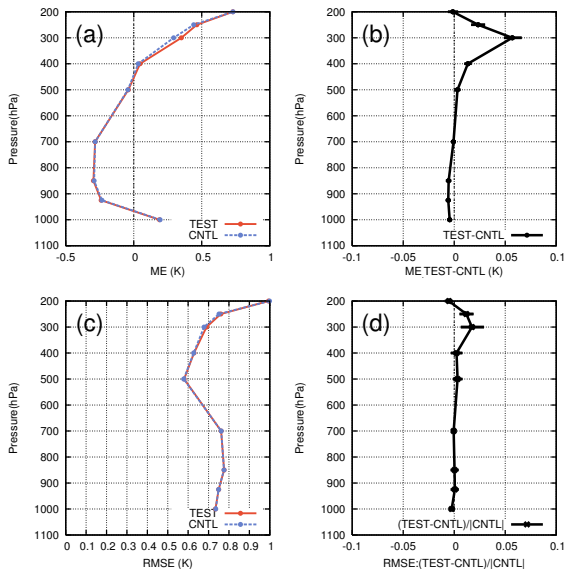


図 1.2.12 図 1.2.11 と同じ。ただし、気温の対ゾンデ検証。

このバイアスの本質的な改善のためには、雲物理過程や放射過程等、物理過程の包括的な精緻化を進めていく必要がある。

1.2.5 まとめ

本節では、2015 年 1 月に現業運用を開始した asuca-Var をデータ同化システムとする局地解析の概要を報告した。JNoVA から asuca-Var へと更新したことで、幾つかの改善が得られた。まず、地中温度と土壌体積含水率を解析変数化することで、地上物理量予測が改善した。この改善は解析手法の高度化のみでは得られず、土壌水分予測の改良が必要不可欠であった。asuca-Var は、その開発体制及び設計理念から、モデル開発と連携しやすいという特徴があり、それが有効に機能した例の一つと考えられる。次に、2015 年 8 月に現業化さ

れた偽相対湿度インクリメント調節によって、降水予測のスピナップが改善することを示した。予測開始直後の降水予測精度の向上は、LFM の重要な課題として、調査と改善に向けた開発が続けられてきている。その中でも閾値 10 mm/h 以上の ETS の予測開始直後の落ち込みの解消は、LFM の現業化時点から課題の一つであった。この予測開始直後の降水のスピナップ問題が、データ同化システムの改善に伴い一部解消されたことは、重要な進展である。しかしながら、依然として降水のスピナップは残っている。更なる初期値の精度向上により予測精度を向上すべく、データ同化手法の高度化を進めている。

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.
- 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.
- 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.
- 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, 151pp.
- 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.
- Beljaars, A.C.M., 1994: The parameterization of surface fluxes in large-scale models under free convection. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **121**, 255–270.
- Beljaars, A.C.M. and A.A.M. Holtslag, 1991: Flux parameterization over land surfaces for atmospheric models. *J. Appl. Meteor.*, **30**, 327–341.
- Deardorff, J.W., 1978: Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of layer vegetation. *J. Geophys. Res.*, **83**, 1889–1903.
- Kondo, J., 1975: Air-sea bulk transfer coefficients in diabatic conditions. *Bound.-Layer Meteorol.*, **9**, 91–112.
- Louis, J.F., M. Tiedtke, and J.F. Geleyn, 1982: A short history of the operational PBL parameterization at ECMWF. *Proc. Workshop on Planetary Boundary Layer Parameterization, Reading, United Kingdom, ECMWF*, 59–79.
- Noilhan, J. and S. Planton, 1989: A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 536–549.

1.3 asuca が導入された局地数値予報システムの特性¹

asuca が導入された局地数値予報システムの特性について、本節では以下のことを取り上げる。

1. 第一推定値・側面境界値として利用するメソモデル (MSM) の予測の影響
2. 対流の発生・終息
3. スピンアップ問題
4. 冬季の寒気移流に伴う降水の予測

1, 2, 3 は、これまでも旧 LFM の特性として永戸ほか (2013) などでも指摘している問題である。この中で、1 は第一推定値、観測データの利用などのシステムの制約に起因するもので、モデルや同化システムが新しくなっても即座に解決する問題ではない。一方、2, 3 については、同化システムや予報モデルの改良によって、完全ではないものの改善されている。4 はモデルが新しくなることで、従来より改善が見られたことである。

以下では、1, 2, 3 について、事例を交えながら解説する。4 については MSM の境界層の改良に関連して第 2.1 節で述べられているので、そちらを参照していただきたい。

1.3.1 第一推定値・側面境界値として利用するメソモデルの予測の影響

LFM では初期値を作成する際の第一推定値や解析・予報における側面境界値として、メソモデル (MSM) の予測値を用いている。MSM の予測値の利用方法は、旧 LFM と現 LFM で違いはなく²、その影響などは永戸ほか (2013) で紹介されている通りである。

ここでは、その利用手法とモデル予測への影響を概観し、新たな事例でその影響を具体的に確認する。

(1) 局地解析における第一推定値としての利用

LFM の初期値 (解析値) を求める LA では、第一推定値とする MSM の予測値を観測データを用いて修正して初期値を求める。図 1.3.1 に LA で同化している観測データの分布の例を示す。これを見ると、用いている観測データは日本の陸上に多く、特に上層の観測が海上や日本付近を通過する多くの擾乱の上流にあたる中国大陸上には少ない。このため、海上のシアや大陸上にあるトラフなどは、第一推定値である MSM の予測値が観測値によって十分には修正されず、MSM の予測値が実況と乖離していたとしてもそのまま初期値として用いられることが多い。その結果として、観測データが少ない領域では第一推定値に用いた MSM の

予測とよく似ている場合が多くなっている。

(2) 局地解析・予報における側面境界値としての利用

LFM のような領域モデルでは、領域の側面境界を通じて流入・流出する大気の流れ、温度、比湿、気圧などの情報を側面境界値によって与える必要がある。これは、側面境界を通じて流入・流出する質量を与えていることにもなる。したがって、大きなスケールの場合を与える気圧場 (高度場) の予測は、側面境界値の影響を大きく受ける。MSM では GSM の予測値を側面境界値として用いていて、MSM の気圧場 (高度場) の予測は、予測時間が長いほど GSM の予測との差が小さくなりやすい (越智・石井 2013)。同様に、LFM では MSM の予測値を側面境界値として与えており、LFM の気圧場 (高度場) の予測は、MSM の予測の影響を受ける。

MSM では、予測の後半 (予測時間約 12–15 時間以降) で側面境界値の影響が気圧場や降水のスコアに現れたが (越智・石井 2013)、LFM は予測時間が 9 時間と短いため、側面境界値を通じた影響は小さい。したがって、MSM の予測結果の影響は、側面境界値としてその影響が予報領域の内側に及ぶより、初期値作成の際に用いる第一推定値として影響する部分が多い。

(3) 第一推定値としてのメソモデルの予測値の影響を示す事例

ここでは、第一推定値として MSM の予測値が影響を与えた例として、2014 年 7 月 3 日の九州での大雨事例を取り上げる。2014 年 7 月 3 日 12JST の実況 (図 1.3.2) では、熊本県北部で 1 時間に 50 mm を超えるような強い降水が見られる。その時刻を予測対象時刻とする現 LFM の 9 つの異なる初期時刻の予測を図 1.3.3 に示す。強い降水の位置に着目すると、9, 8, 7 時間前を初期値とする予測 (図 1.3.3 の上段) は、いずれも山口県付近に強い降水を予測し、その降水分布はよく似ている。6, 5, 4 時間前を初期値とする予測 (図 1.3.3 の中段) では、3 つの予測とも降水域が西にシフトし、やはり、この 3 つの予測で降水域が似ている。さらに、3, 2, 1 時間前を初期値とする予測 (図 1.3.3 の下段) では、3 つの予測とも降水域が南にシフトして、やはり、お互いがよく似た分布になっている。

図 1.3.3 の上段、中段、下段のそれぞれで予測された降水分布が似ていることは、LA において MSM の予測値を第一推定値に用いていることと関係している。図 1.3.3 の上段の LFM の予測は 12 時間前を初期時刻とする MSM の予測、中段の LFM の予測は 9 時間前を初期時刻とする MSM の予測、下段の LFM の予測は 6 時間前を初期時刻とする MSM の予測を第一推定値として用いており、図 1.3.3 の各段の右端に示した第一推定値として用いた MSM の予測と降水域の位置がよく似ていることがわかる。

MSM の降水分布予測が初期値によって異なる原因

¹ 原 旅人、伊藤 享洋、松林 健吾

² ただし、現 LFM で用いる asuca では、旧 LFM で用いていた JMA-NHM に比べて、質量などの保存量の保存性の精度が高くなっているため、現 LFM のほうが境界値を通じてより忠実に親モデルの質量変化に追従する (河野・原 2014)。

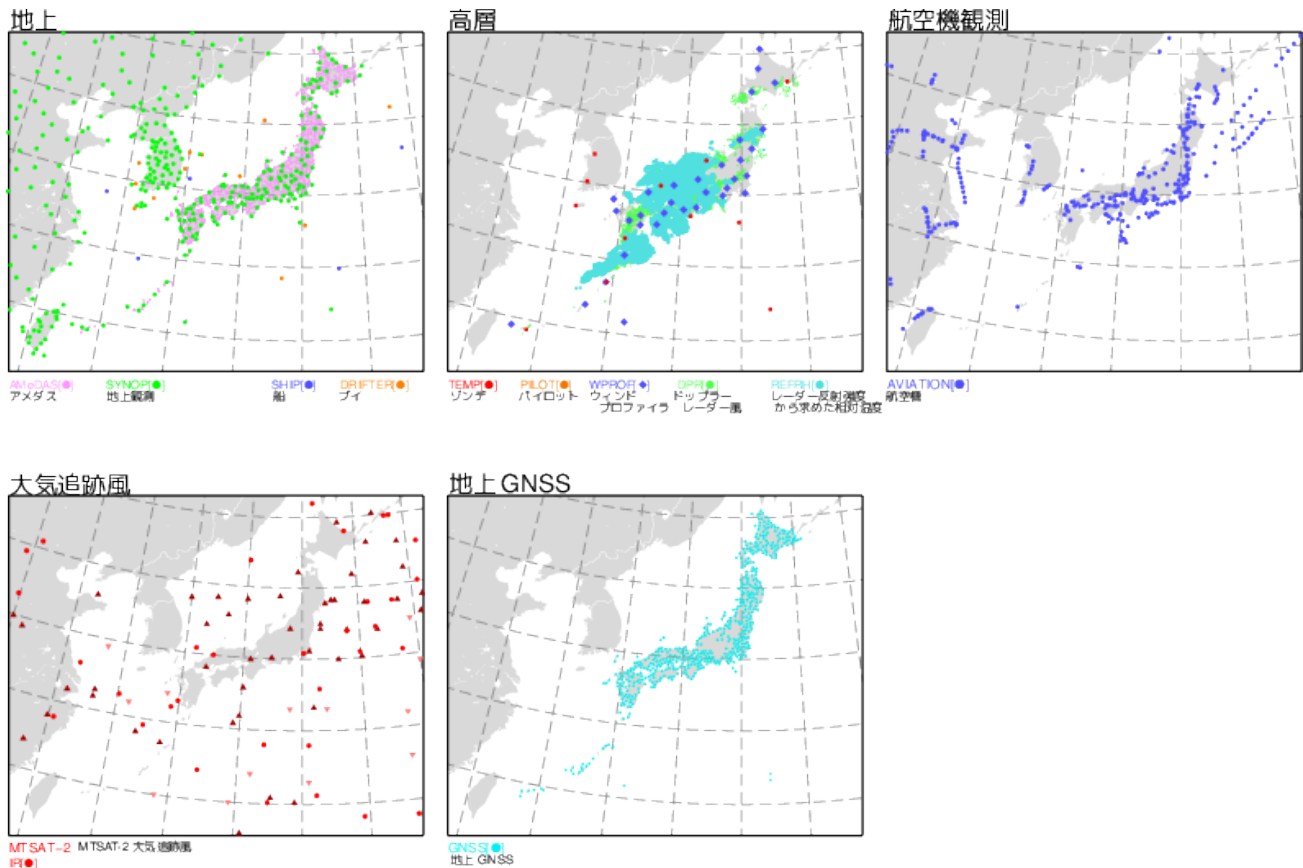


図 1.3.1 局地解析 LA で同化する観測データの分布例。2015 年 9 月 6 日 00UTC の解析で利用された、解析時刻と同じ時刻の観測データ。

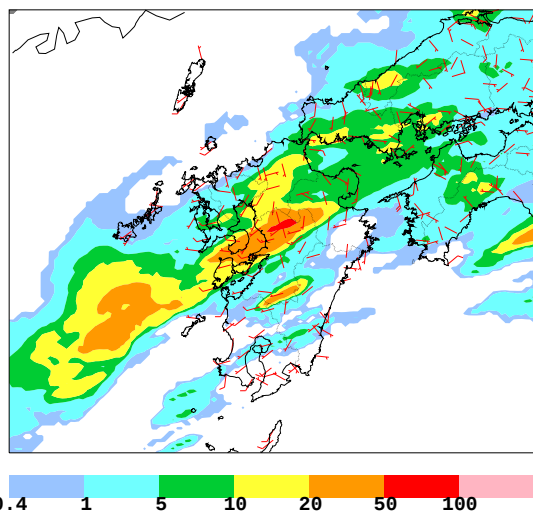


図 1.3.2 2014 年 7 月 3 日 12JST における解析雨量による前 1 時間雨量 (単位: mm/h) とアメダス観測による風 (赤矢羽根: 長い矢羽根 1 本が 10 kt に対応)。

を調べるために高度場の予測に着目する。図 1.3.4 には、500 hPa 面ジオポテンシャル高度 (以下、Z500) について、12 時間前、9 時間前それぞれを初期時刻とする MSM の予測、および 6 時間前を初期時刻とする MSM の予測 (MSM の予測の中で降水域を最も南に予測) を

基準としたときの差を示している。降水域を北寄りに予測した 12 時間前、9 時間前を初期値とする MSM 予測では、6 時間前を初期時刻とする MSM の予測よりもトラフが浅く、このトラフの予測の違いが降水域の予測位置に影響を与えた一因と考えられる。一方、LFM の Z500 の予測について、9、8、7 時間前を初期値とする予測それぞれについて、第一推定値として用いた 12 時間前を初期値とする MSM 予測との差を見てみると、非常に小さいことがわかる (図 1.3.5)。つまり、第一推定値である MSM 予測が LA で大きく修正されなかったと考えられる。

このように、海上や中国大陸上では、特に上層で第一推定値として用いる MSM の予測が利用できる観測データが少ないために修正されず、その結果、大きなスケールの気圧場やシアの位置などは、MSM の予測と大きな差がないことがある。

(4) 降水の統計スコアに見る第一推定値として用いるメソモデルの影響

第一推定値として用いる MSM の影響は、降水の統計スコアにも見ることができる。それが端的に表れている各初期時刻の 1 mm/h を閾値とする降水予測のスレットスコアの時系列 (2012 年夏期間) を図 1.3.6 に

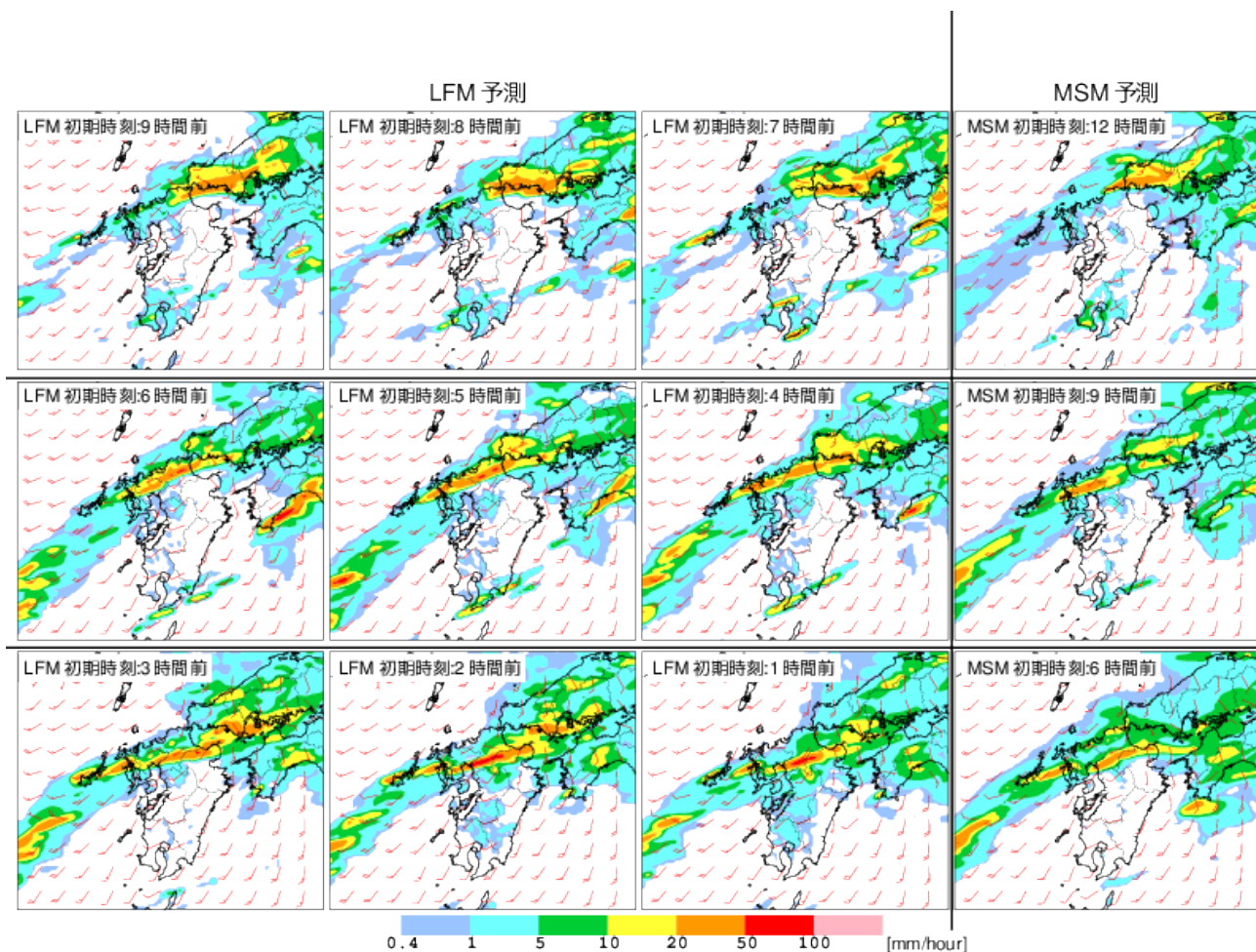


図 1.3.3 2014 年 7 月 3 日 12JST を予測対象時刻とする 9 つの初期時刻（初期時刻が 9 時間前のものから 1 時間前のものまで）の現 LFM の前 1 時間降水量（単位: mm/h）と風（長い矢羽根 1 本 10 kt）の予測。右端には、それぞれの段の LFM が解析の第一推定値として用いた MSM の前 1 時間降水量と風を掲載。

示す³。ここでは、同じ MSM を第一推定値としている LFM（図 1.3.6 で同じ色の線を表示）をグループと呼ぶ⁴。同じグループでは、予測時間経過に伴うスコアの変化傾向が似ている場合が多く、予測前半（3-5 時間程度まで）は新しい初期値のほうが精度が高いも

の、それ以降では同じようなスコアになっているグループが多いことが分かる。

(5) 利用上の留意点

一般に、強い対流雲による大雨など時間・空間スケールが小さな現象は、スケールが大きな現象に比べて数値予報モデルによる予測可能性が低くなる。その中で、局地数値予報システムは、毎時実行によって最新の観測データの情報をモデルの初期値に取り入れ、最新の大気の状態を反映した初期値から予測を行うことで、激しい現象の予測可能性を高めようとしている。その結果として、新しい初期値からの予測がその前の初期値からの予測から大きく変化することがあるが、これは最新の観測データの情報を取り入れたことによる帰結である⁵。その一つの例として、平原ほか（2011）ではアメダス観測による気温を LA で同化することで、MSM では過小評価されていた陸上の成層の不安定度を修正して、不安定性降水の予測を改善できた事例な

³ 1 mm/h を閾値とする降水予測のスコアは、強弱を問わずに降水がある領域の予測のスコアとほぼ等価である。強い降水に限定した予測に比べて、強い降水も弱い降水も含めた降水の予測は大きなスケールの場の影響が大きいため、第一推定値として用いる MSM の影響が最も現れやすいと考えられる。明瞭ではないものの、5 mm/h、10 mm/h を閾値としたスレツスコアでも同様の傾向が見られる（図略）。

⁴ 局地数値予報システムの各初期時刻で第一推定値、側面境界値として用いられる MSM の予測値の初期時刻は永戸ほか（2013）の図 2.2.1 の通りである。たとえば、00UTC 初期値の MSM の予測値は、03, 04, 05UTC 初期値の LA および LA の中で実行される予報モデルの側面境界値として、また、02, 03, 04UTC の LFM の側面境界値として用いられる。このように、02UTC 初期値では LA で第一推定値や側面境界値として用いられる MSM の初期時刻と、LFM で側面境界値として用いられる MSM の初期時刻が異なっている（局地数値予報システムの 05, 08, 11, 14, 17, 20, 23UTC 初期値も同様）。

⁵ このことは、データ同化システムと予報モデルとして JMA-NHM を用いるか、asuca を用いるかということに依存しない。

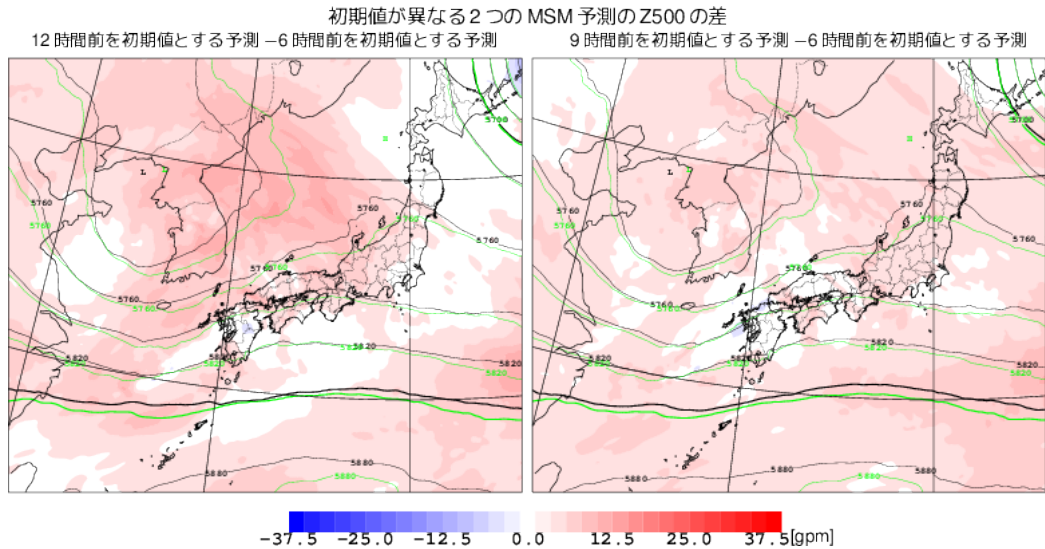


図 1.3.4 2014 年 7 月 3 日 12JST を予測対象時刻とする初期時刻が異なる 2 つの MSM 予測の 500 hPa ジオポテンシャル高度 (単位: gpm) の、6 時間前を初期時刻とする MSM 予測を基準としたときの差 (赤青塗り分け) とそれぞれの予測 (緑線: 基準とした予測、黒線: 他方)。12 時間前 (左) 9 時間前 (右)

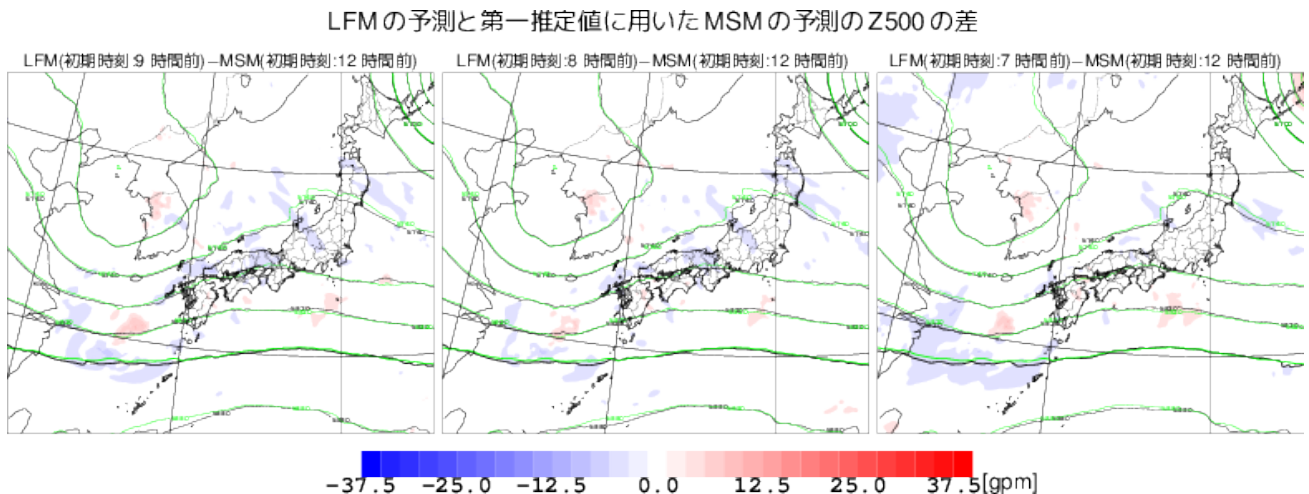


図 1.3.5 2014 年 7 月 3 日 12JST を予測対象時刻とする初期時刻が異なる 3 つの LFM 予測の 500 hPa ジオポテンシャル高度 (単位: gpm) の、12 時間前を初期時刻とする MSM 予測を基準としたときの差 (赤青塗り分け) とそれぞれの予測 (緑線: 基準とした予測、黒線: 他方)。9 時間前 (左) 8 時間前 (中) 7 時間前 (右)

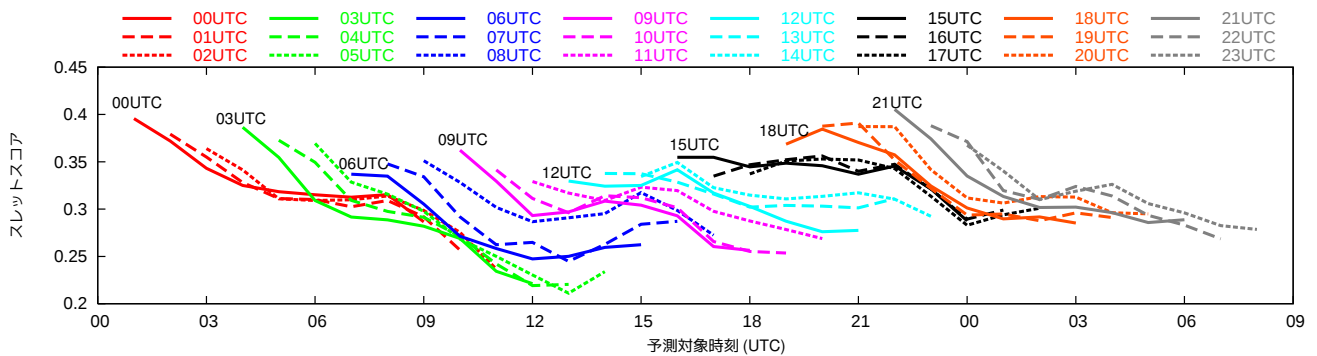


図 1.3.6 2012 年夏期間 (付録 1.3.A に示した検証期間と同じ) における各初期時刻の 1 mm/h を閾値とする降水予測のスレットスコアの時系列。横軸は予測対象時刻 (UTC) を示し、たとえば、00UTC 初期値のスレットスコアは、初期値から 1 時間後から 9 時間後の 01UTC から 09UTC までを表示している。同じ MSM を第一推定値としている LFM を同じ色の線で表示している。

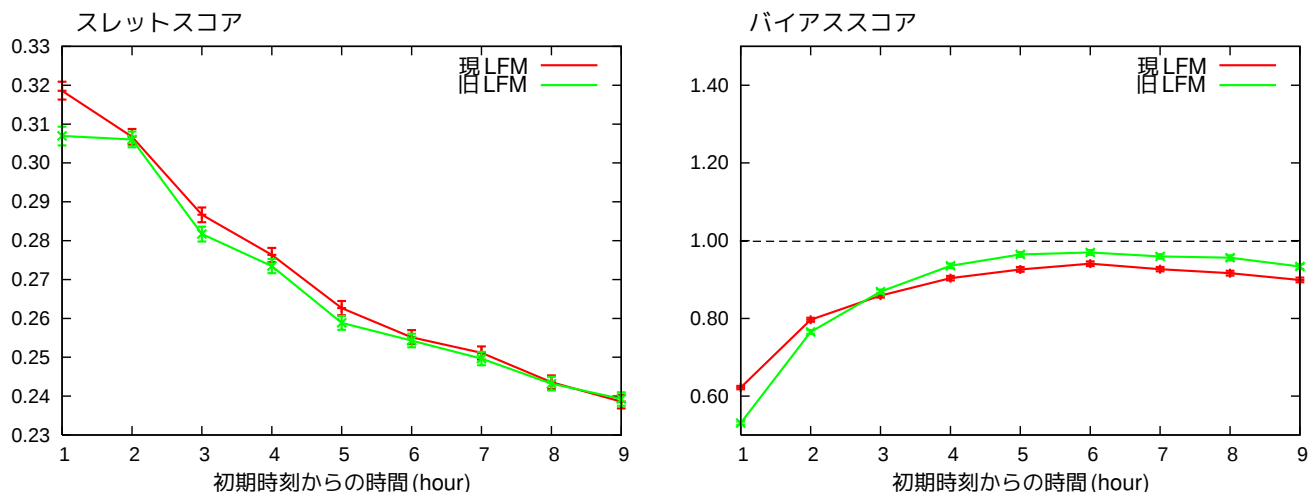


図 1.3.7 2012 年夏期間（付録 1.3.A に示した検証期間と同じ）における現旧 LFM それぞれの予測時間（初期時刻からの時間）ごとの降水（閾値 1 mm/h）のスレツスコア（左）とバイアスコア（右）。赤線：現 LFM、緑線：旧 LFM。誤差棒は信頼度 95%で推定した各スコアの信頼区間を示す。

どが紹介されている。

一方、これまで示してきたように、LFM の予想はその第一推定値を与える MSM の予想に大きく影響される。この特性は旧 LFM、現 LFM に共通に見られ、特に、観測データが疎な領域である海上や中国大陸を起源とする現象に対する MSM の予測が適切でない場合には、LFM もその適切ではない予測によく似ることが多いことに留意していただきたい。

このような特性の改善のために、第一推定値となる MSM の予測精度のさらなる向上を目指すとともに、衛星観測による輝度温度データなど、同化に用いる観測データのさらなる拡充が必要である。

1.3.2 積雲対流の発生・終息、スピナップ問題

(1) 概論

永戸ほか (2013) は、旧 LFM の予測特性として、積雲対流の発生や終息に遅れが見られること、予測時間 1–3 時間程度で降水の予測頻度が過小であること（スピナップ問題）を指摘した。河野・原 (2014) は、積雲対流の発生に対するパラメタリゼーション (Hara 2015) の導入によって、積雲対流の発生・終息の遅れがやや改善したことを紹介した。この積雲対流の発生・終息の遅れの改善は、LA における 3 次元変分法による解析とそのあとのモデルによる 1 時間予報の間の不連続の除去（第 1.2 節を参照）とともに、スピナップ問題の改善にもつながっている。

図 1.3.7 に現旧 LFM それぞれの予測時間別の降水のスコア（閾値 1 mm/h）を示す。バイアスコアを見ると、旧 LFM、現 LFM ともに、予測後半（初期時刻から 3 時間後以降）に比べて、予測前半（初期時刻から 2 時間後まで）でバイアスコアが低く予測頻度が過小であるが、現 LFM ではその過小な状態をやや改善している。

(2) 積雲対流の発生および終息に改善が見られる事例

以下では、旧 LFM に比べて、積雲対流の発生および終息の観点で改善が見られる事例をいくつか紹介する。

図 1.3.8 は積雲対流の発生の予測が改善した結果、対流発生に伴う弱い降水の分布にも改善が見られた事例である。九州東部に向かって海上から暖湿な空気が流れ込み、陸上で積雲対流が発生して降水をもたらしている。8 月 8 日 09JST の実況では海上から内陸部に広く降水が見られるのに対し、旧 LFM では内陸の山沿いのみに降水を予測している。一方、現 LFM では海岸沿いから内陸にかけて降水を予測しており、実況に近い。このような状況は 10JST、11JST の予測でも続いている。

図 1.3.9、図 1.3.10 は成層の不安定化によって生じた対流に伴う強い降水の発生、および終息のタイミングの予測が改善した例である。図 1.3.9 に示した積雲対流が発生した時間帯の予測を見ると、8 月 24 日 15JST の予測では、現 LFM は福島県と新潟県の県境付近や、長野県と新潟県の県境付近の対流に伴う弱い降水を予測しており、やや位置ずれはあるものの実況にも対応する降水がある。16JST の予測では、前の時間に弱い降水があった新潟県と福島県の県境付近の降水が組織化して強い降水を伴うようになっており、実況も同様である。しかし、旧 LFM の予測では対流の発生が遅れたために、16JST では十分に組織化していない。17JST になると実況では、同じ場所で降水の範囲が広がっている。やはり位置ずれは見られるものの、このように降水域が広がりを持つことを、現 LFM では旧 LFM の予測に比べて表現しているように見える。

一方、図 1.3.10 に示した積雲対流が終息した時間帯の予測を見ると、旧 LFM では対流の終息のタイミングが遅く、実況ではすでに対流が終息に向かっていたり、終息しているにもかかわらず、強い降水を予測

している。それに対して、現 LFM では旧 LFM にくらべて実況に見られる対流の終息への追従がよいことがわかる。このような対流の終息のタイミングが現 LFM で改善された例は、図 1.3.11 の事例などでも見られる。

このように、成層の不安定化に伴う対流の発生および終息のタイミングが改善された事例が見られた。しかし、これらの事例を見てもわかるように、対流に伴う降水の位置を精度良く予測することにはまだまだ課題がある。現在の LFM には対流による強い降水に位置ずれがある可能性を念頭に、少し大きなスケールで予測結果を見て成層の不安定化による対流の発生のポテンシャルを捉えようとする、LFM の予測結果を有効に利用できるであろう。

1.3.3 まとめ

本節では、2015 年 1 月 29 日より現業化された現 LFM について、その予測結果を利用する上で留意すべき特性を述べた。

LFM は、MSM よりも時間・空間規模の小さい現象の表現力を高めることで、それらをより精度よく予測し、最新の観測データを反映した初期値による予測結果を、MSM よりも高頻度・迅速に提供することを目的として運用されてきた。

現 LFM でもこの目的に沿うように、基本的な数値予報システム構成や格子間隔などは旧 LFM から変更しておらず、これまでの旧 LFM で蓄積されてきた高解像度モデルとしての予測特性やシステムに基づく留意点などの知見（たとえば、MSM の予測値を解析の第一推定値に用いていることによる予測の影響）は、現 LFM にも同様に当てはめることができる。

現 LFM では、旧 LFM と比べて、積雲対流の発生・終息の遅れやスピニアップの改善が見られるものの、全ての事例で改善されたわけではない。この点も含め、引き続き LFM の予測結果の検証を注意深く行いながら、データ同化システムや予報モデルのさらなる改良に努めていきたい。

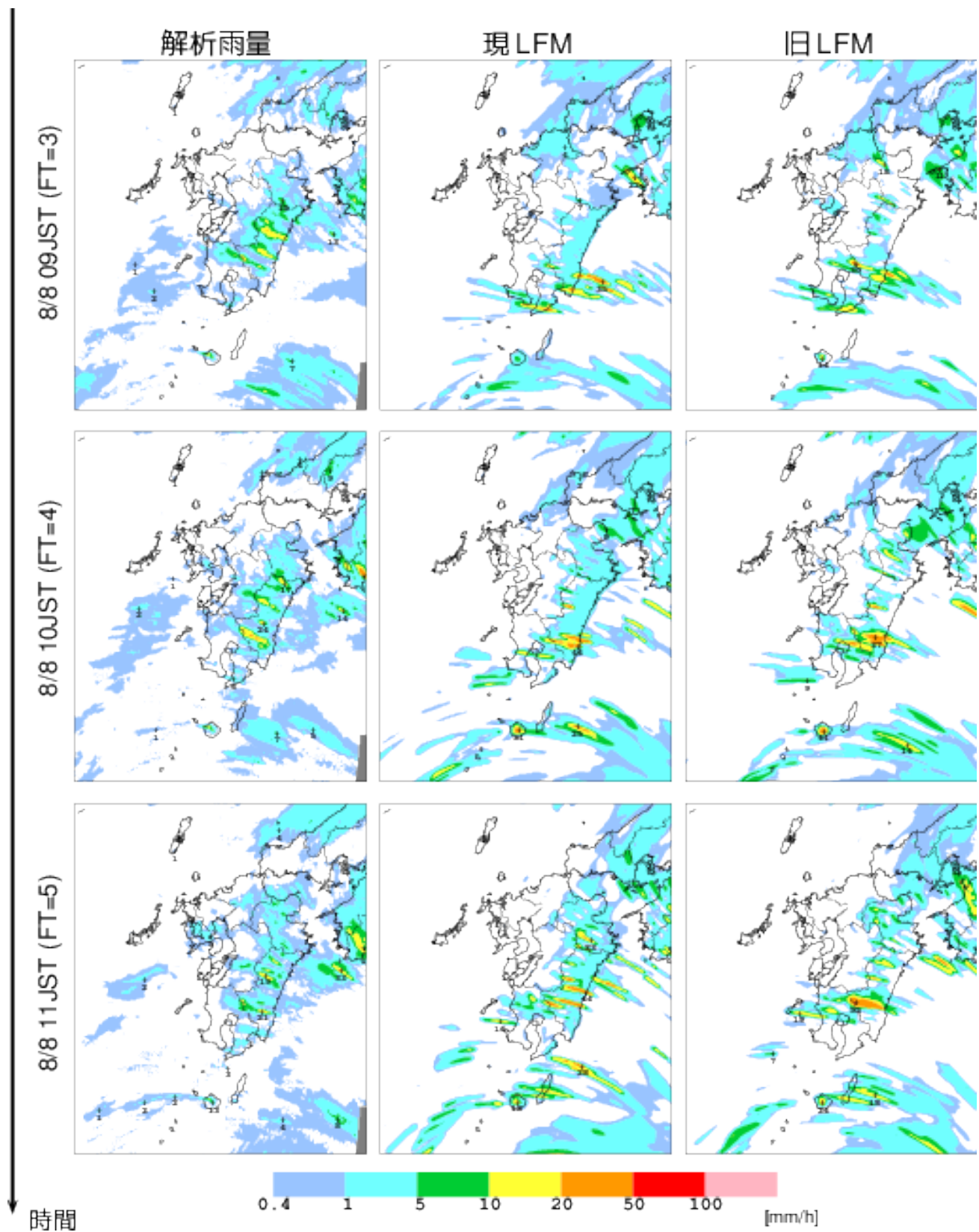


図 1.3.8 2014 年 8 月 8 日 09JST から 11JST の前 1 時間降水量 (単位: mm/h) の解析雨量による実況 (左列)、現 LFM および旧 LFM それぞれによる予測 (中列、右列)。現 LFM および旧 LFM の初期時刻は 8 月 8 日 06JST。

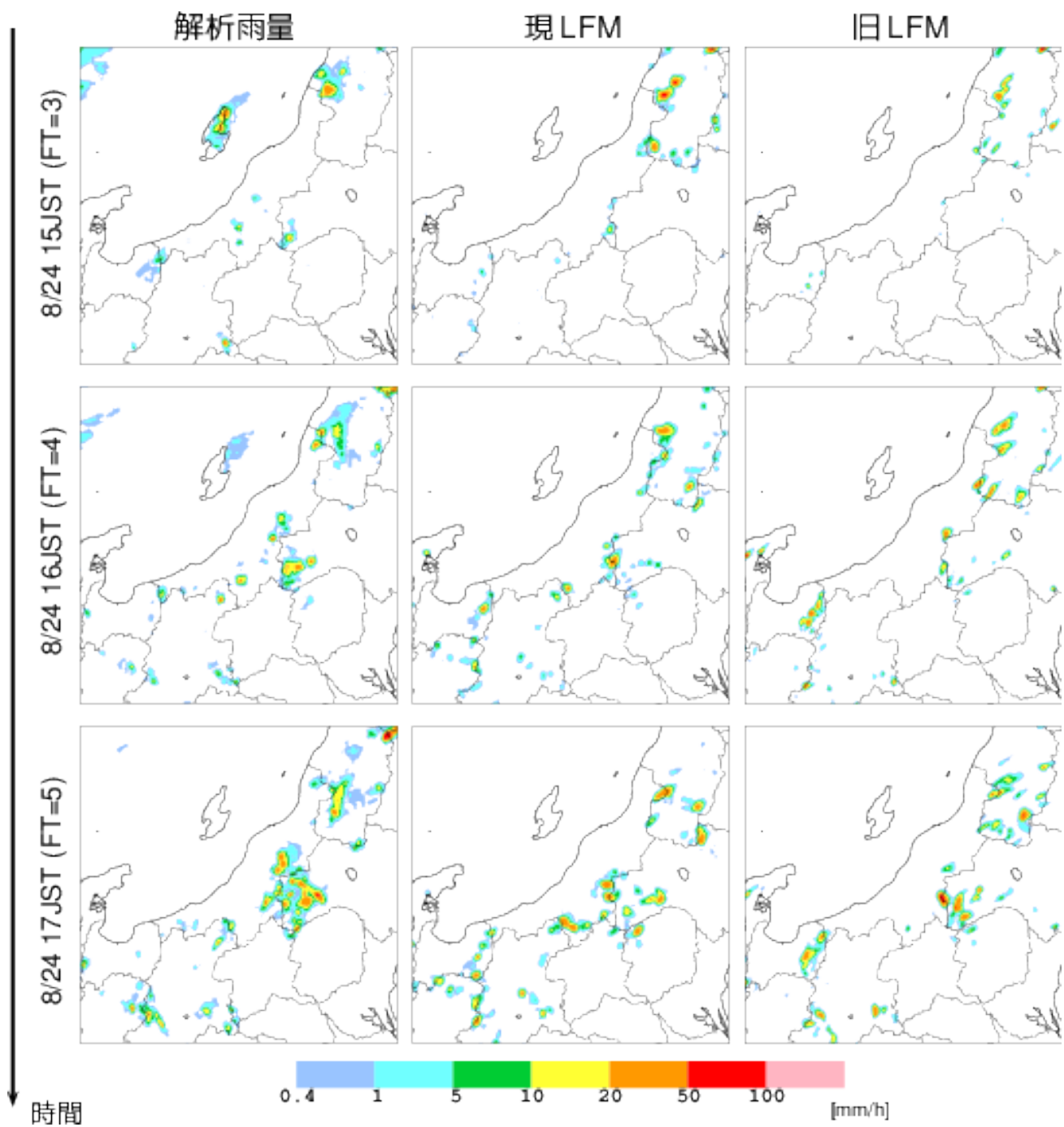


図 1.3.9 2012 年 8 月 24 日 15JST から 17JST の前 1 時間降水量 (単位: mm/h) の解析雨量による実況 (左列)、現 LFM および旧 LFM それぞれによる予測 (中列、右列)。現 LFM および旧 LFM の初期時刻は 8 月 24 日 12JST。

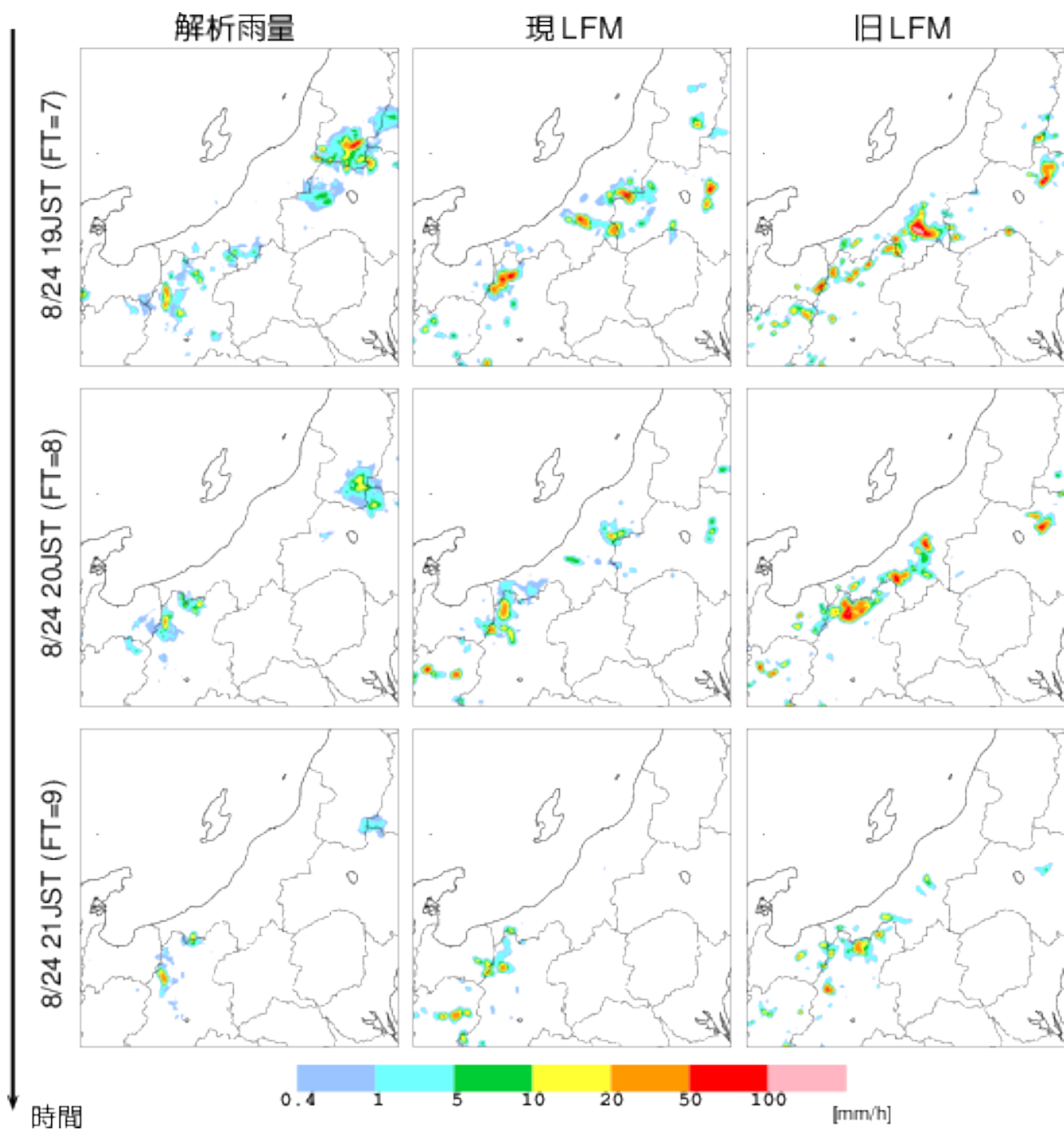


図 1.3.10 2012 年 8 月 24 日 19JST から 21JST の前 1 時間降水量 (単位: mm/h) の解析雨量による実況 (左列)、現 LFM および旧 LFM それぞれによる予測 (中列、右列)。現 LFM および旧 LFM の初期時刻は 8 月 24 日 12JST (図 1.3.9 の予測の続き)。

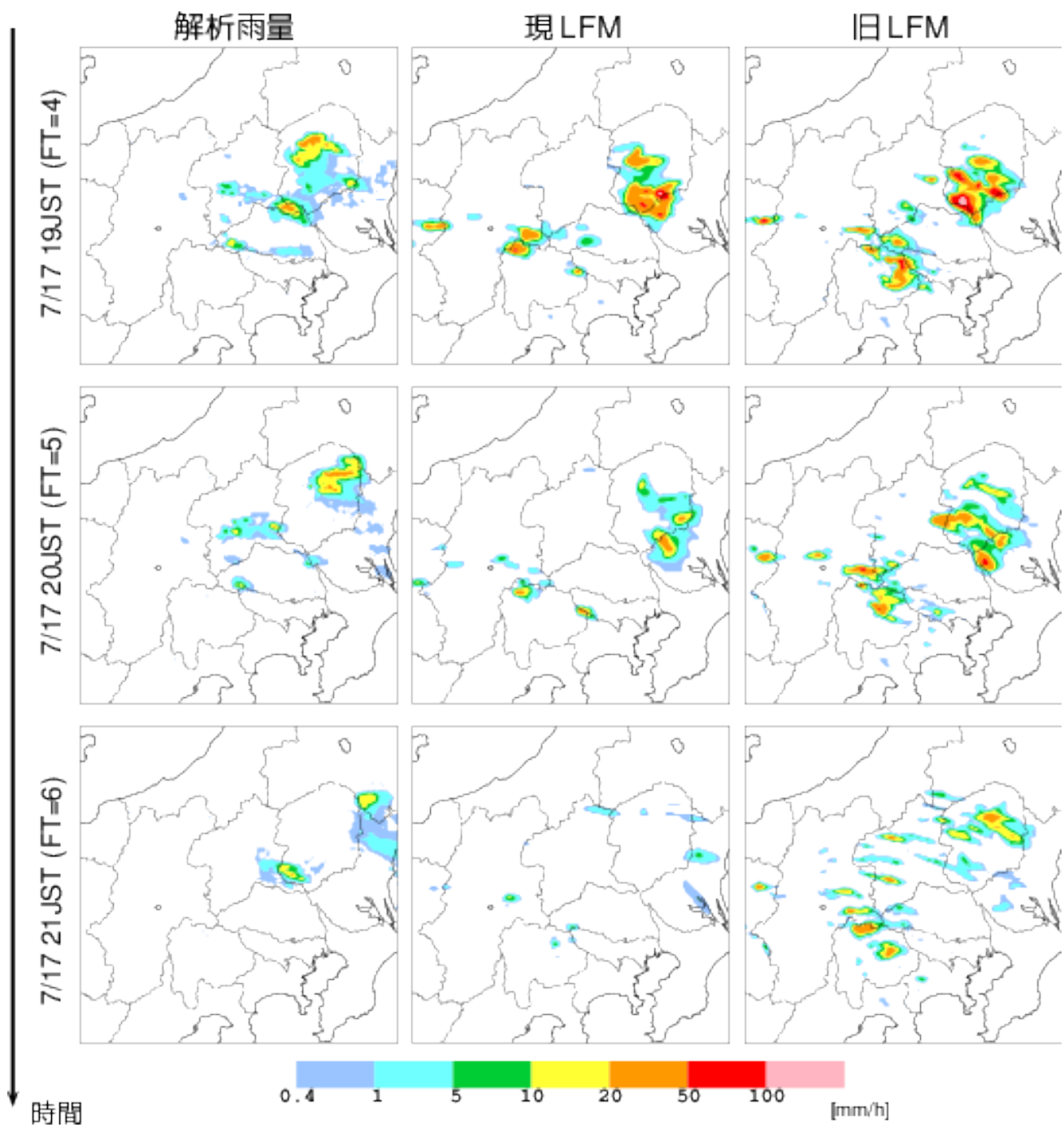


図 1.3.11 2012 年 7 月 17 日 19JST から 21JST の前 1 時間降水量 (単位: mm/h) の解析雨量による実況 (左列)、現 LFM および旧 LFM それぞれによる予測 (中列、右列)。現 LFM および旧 LFM の初期時刻は 7 月 17 日 15JST。

付録 1.3.A 現 LFM の統計検証

モデルの精度の統計的な全体像を把握するための資料として、旧 LFM と比較したときの現 LFM のよく利用される要素についての統計検証の結果を示す。

これらは 2015 年 1 月に現 LFM の現業化について判断するための実験の検証結果で、第 1.2 節で紹介したその後の LA の改良による効果は含まれていない。ここで示した特性に第 1.2 節で示す特性の変化を加えたものが、現 LFM の予測特性となることに注意していただきたい。

(1) 検証期間・仕様

現 LFM の統計検証の結果を、旧 LFM のものと比較しながら示す。実験期間は、

- 夏期間: 2012 年 7 月 3 日～22 日および 8 月 23 日～29 日
- 冬期間: 2012 年 12 月 14 日～2013 年 1 月 1 日

である。LFM の現在の運用では、1 時間おきに 1 日 24 回の実行をしているが、以下に示す統計検証は 3 時間ごとの 8 つの初期時刻 (00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21UTC) の予測を用いたものである。なお、これらの期間の一部期間で、1 日 24 回の実行による検証も行っており、1 日 8 回の実行による検証結果とほとんど同じであることを確認している。検証手法は 瀬川 (2005) と同じであるが、降水の検証は検証格子 10 km として、前 1 時間降水量を対象に検証を行った⁶。

(2) 検証結果

本文に述べたように、統計検証で見た現旧 LFM の精度の差はあまり大きくない。以下では、その中で、大きな違いが見られるもの、留意が必要なことについて述べる。

夏期間

夏期間の各種検証スコアを図 1.3.12 から図 1.3.14 に示す。

降水のスコアを見ると (図 1.3.12) 閾値 2–15 mm/h のスレツスコアは旧 LFM に比べて、現 LFM のほうがやや低い⁷。1 mm/h を閾値とするスレツスコアに上昇が見られることから、降水域そのものは、旧 LFM よりも現 LFM のほうが精度よく予測出来ているものの、実況で 2–15 mm/h の強さの降水では、降水強度に実況との差が見られる場合がある。

⁶ MSM に対する標準的な検証では、検証格子を 20 km、前 3 時間降水量について検証を行っている。

⁷ この原因は現時点では明らかではない。考えられる要因の一つとして、現旧 LFM の力学過程 (特に強い上昇流の抑制手法や、降水の落下計算の手法) の違いがある。現時点では、現 LFM のほうが旧 LFM に比べてスレツスコアがやや悪いものの、降水の頻度分布は現 LFM、旧 LFM とともに実況と乖離が大きく、いずれも 10 mm/h 以下の比較的弱い降水は頻度過少で、それより強い降水は頻度過大である (図略)。この頻度分布の実況からの大きな乖離は降水を生成する雲物理過程の問題であると考えており、現在、その改良に取り組んでいる。

地上比湿の平均誤差 (図 1.3.13) は、旧 LFM では日中の負バイアスが大きかったが、現 LFM では一日を通してほぼゼロとなっており、バイアスがほとんどなくなっている。これは、現 LA で地中温度、土壌水分量を新たに解析変数とし、地上比湿に大きく関係するこれらの初期値がより適切になったこと、および土壌水分量予測の手法を改良したことが一因であると考えられる。

冬期間

冬期間の各種検証スコアを図 1.3.15 から図 1.3.17 に示す。

降水の予測精度は現旧 LFM でほぼ同等である (図 1.3.15)。なお、冬期では 15 mm/h より大きい閾値では事例数が限られ、精度の良し悪しを判断するためのサンプル数が十分ではない。

風速の誤差の鉛直プロファイル (図 1.3.17) を見ると、ほぼ全層で負バイアスを改善し、平方根平均二乗誤差も小さくなっている。また、比湿についても、平均誤差が小さくなっている。同様の変化は、現 LFM の開発で得られた知見を用いた MSM における境界層過程の改良においても見られるので (第 2.1.2 項) 現旧 LFM の間の境界層過程の違いがこの精度向上に寄与していると考えられる。

地上比湿の改善は夏期間と同様である。地上気温についても、特に日中の正バイアスが小さくなり改善が見られる。旧 LFM では観測に比べて日中の短波放射量に正バイアスがあったが、現 LFM ではその正バイアスを縮小しており (図略) このことが地上気温の精度向上につながったものと考えられる。また、短波放射量の正バイアスの縮小は、雲の表現が改善されたことを示唆していると考えられる。

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.
- 越智健太, 石井憲介, 2013: 予報時間を 39 時間に延長した MSM の初期時刻別統計検証. 平成 25 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 14–17.
- 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.
- 瀬川知則, 2005: 統計検証. 平成 17 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 18–26.
- 平原洋一, 田村一卓, 森安聡嗣, 石水尊久, 2011: 局地モデルの特性. 平成 23 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 37–49.
- Hara, T., 2015: Necessity of parameterizations for convective initiation in high resolution cloud-permitting models. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, 4–06.

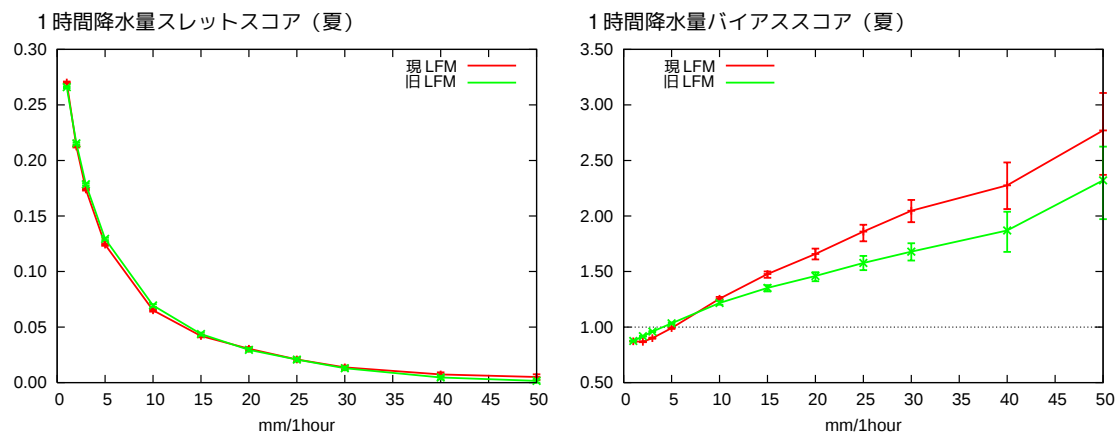


図 1.3.12 夏期間における現旧 LFM それぞれによる 1 時間降水量予測のスレットスコア (左) とバイアススコア (右)。横軸は閾値。赤線: 現 LFM、緑線: 旧 LFM。誤差棒は信頼度 95% で推定した各スコアの信頼区間を示す。

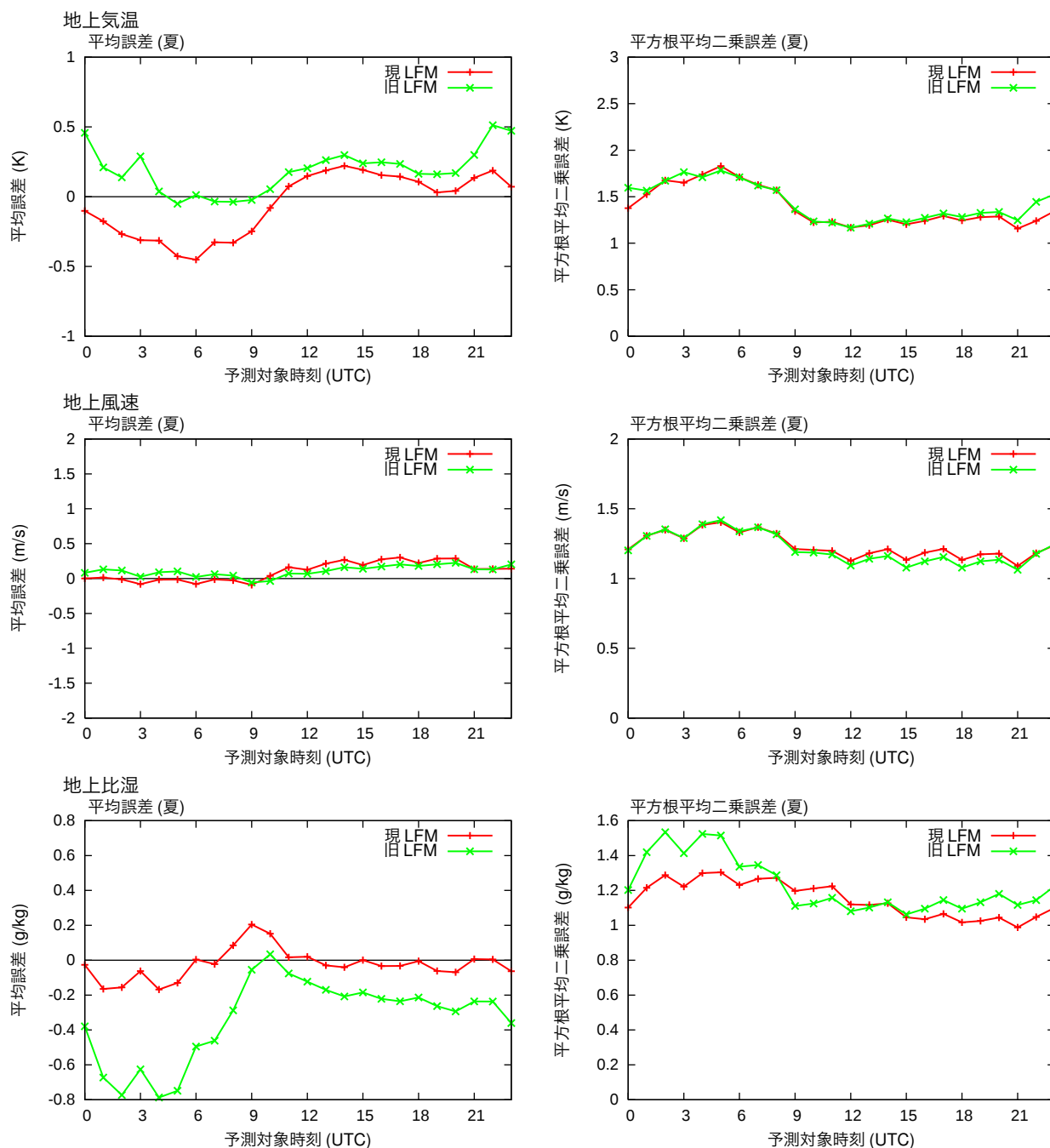


図 1.3.13 夏期間における現旧 LFM それぞれによる (上から) 地上気温、地上風速、地上比湿の予測の平均誤差 (左) と平方根平均二乗誤差 (右)。横軸は予測対象時刻 (UTC)。赤線: 現 LFM、緑線: 旧 LFM。比較している観測は、気温と風速がアメダス、比湿が SYNOP であり、観測点を囲むモデル格子 4 点すべてが陸格子である観測点に対して検証を行っている。

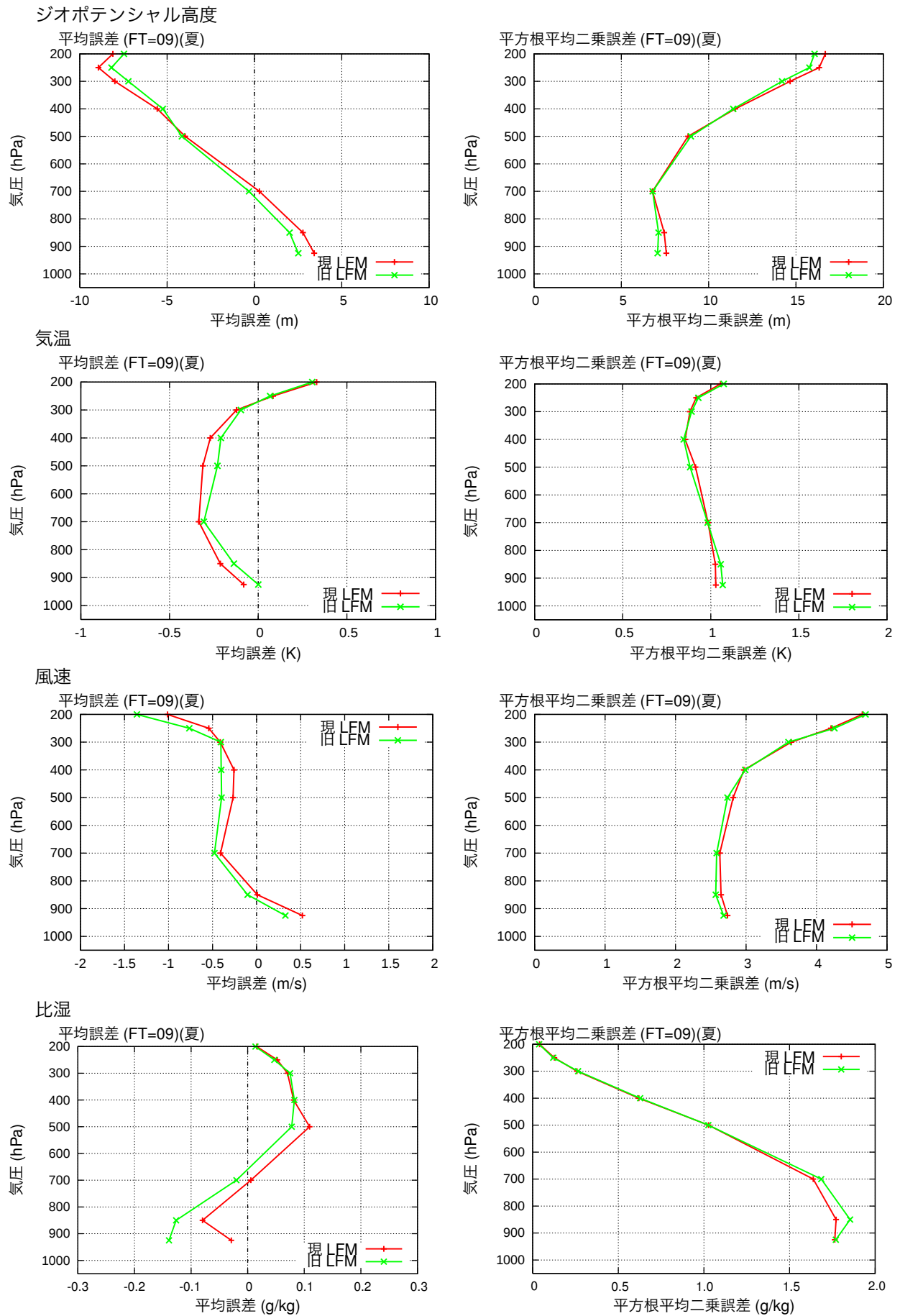


図 1.3.14 夏期間における現旧 LFM それぞれによる（上から）ジオポテンシャル高度、気温、風速、比湿の予測のゾンデ観測に対する平均誤差（左）と平方根平均二乗誤差（右）の鉛直プロファイル。初期時刻から 9 時間後の予測を検証対象とした。赤線：現 LFM、緑線：旧 LFM。

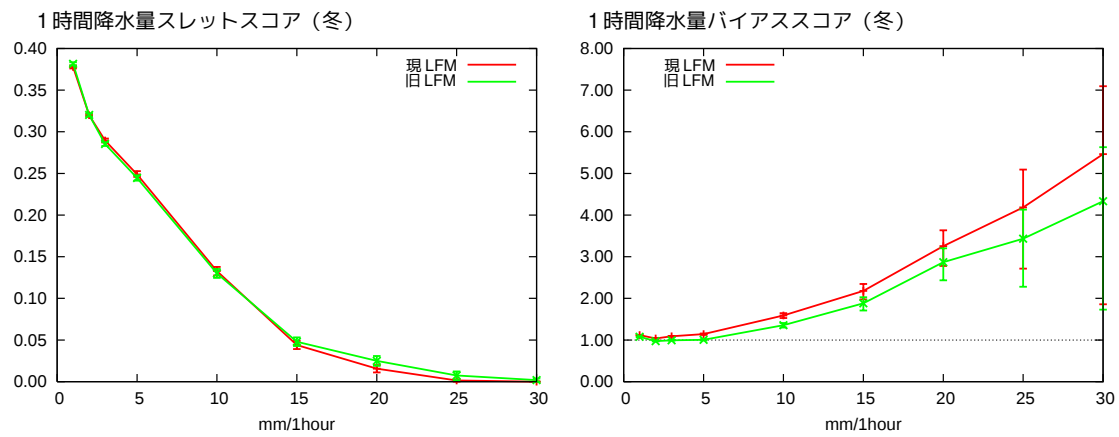


図 1.3.15 図 1.3.12 と同じ。ただし、冬期間。

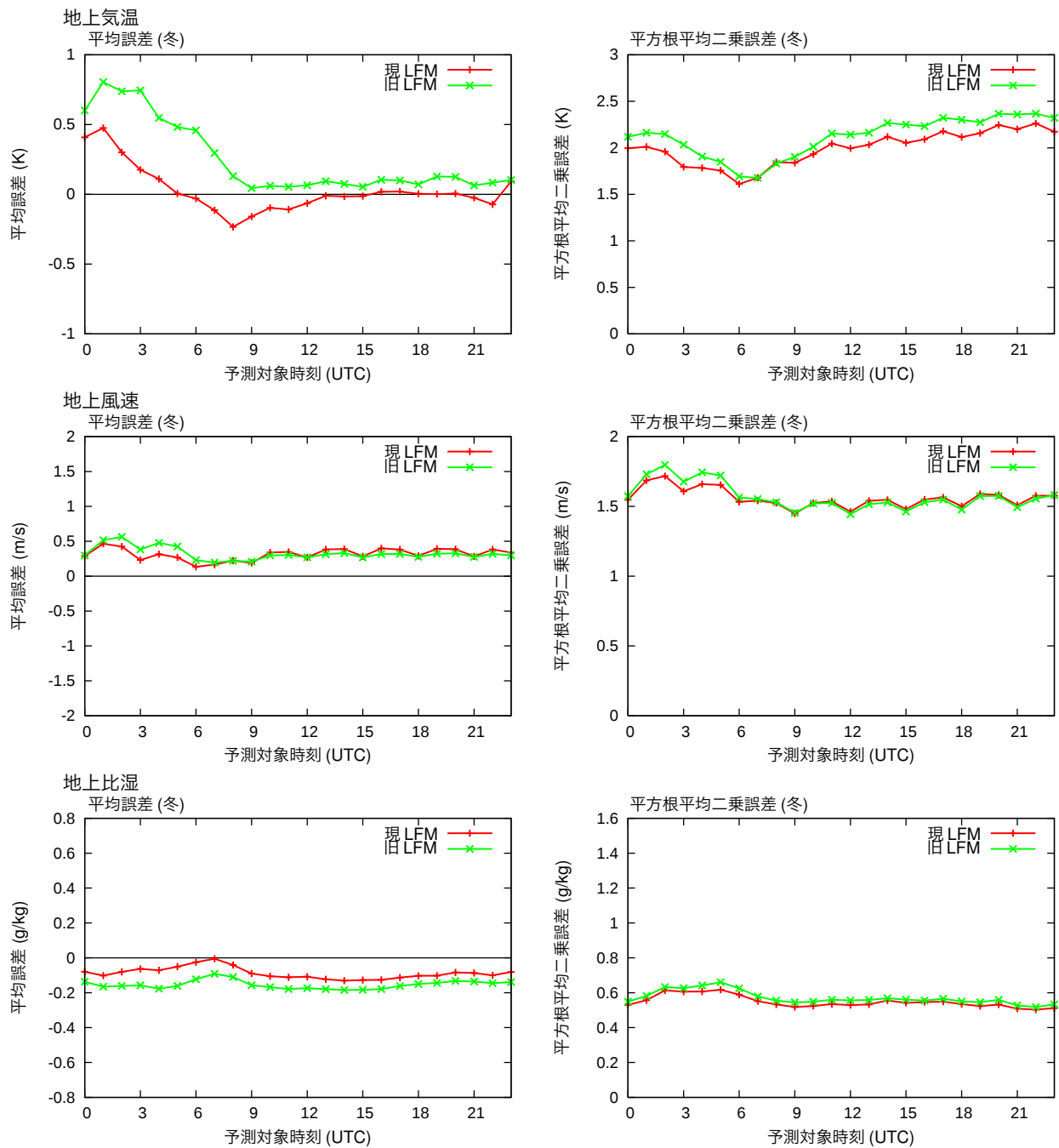


図 1.3.16 図 1.3.13 と同じ。ただし、冬期間。

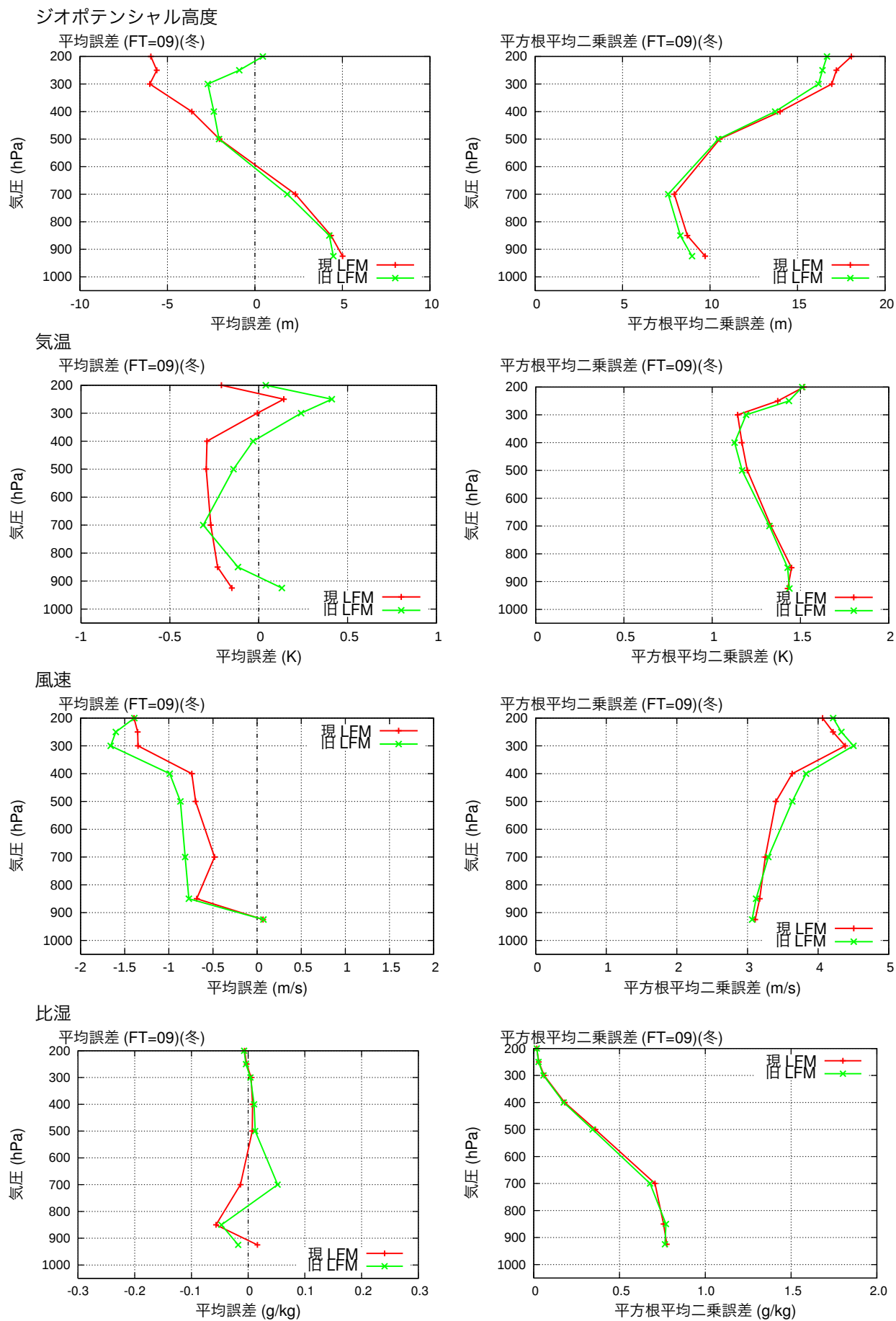


図 1.3.17 図 1.3.14 と同じ。ただし、冬期間。