

降水量予測の精度向上のための位置誤差修正法 に基づくレーダーデータ同化システムの開発

DEVELOPMENT OF A RADAR DATA ASSIMILATION SYSTEM BASED ON THE PHASE-CORRECTING METHOD FOR BETTER RAINFALL FORECASTS

吉野 純¹・野村 俊夫²・安田 孝志³
Jun YOSHINO, Toshio NOMURA and Takashi YASUDA

¹正会員 理博 岐阜大学助教 工学研究科環境エネルギーシステム専攻 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

²正会員 工修 滋賀県南部振興局甲賀県事務所 環境農政部環境課 (〒528-8511 甲賀市水口町水口6200)

³フェロー 工博 岐阜大学教授 工学研究科環境エネルギーシステム専攻 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

In this study, a radar data assimilation system for the mesoscale meteorological model PSU/NCAR MM5 is developed in order to improve the accuracy of intense rainfall forecasts. The assimilation system using the template matching technique and the CIP advection scheme has much advantage in terms of its accuracy, simplicity and computational cost, and enables us to nudge the model moisture and microphysics fields toward the radar data distributions by the intermittent advective corrections so that the similarity index between simulated and observed rainfalls becomes maximum. The investigation based on the numerous MM5 simulations indicates that the accuracy of rainfall forecast with advective corrections is quite higher than that without advective corrections, and this technique is quite useful for the improvement of intense rainfall forecasts.

Key Words : precipitation forecast, mesoscale meteorological model, radar data assimilation system

1. はじめに

2008年の夏季は、短時間かつ局地的に発生するいわゆる「ゲリラ豪雨」による被害が、日本列島各地で頻発し、社会問題化した。IPCC第4次報告書にも記載された地球温暖化を考慮した100年後の将来気候シミュレーションによると¹⁾、今後、年平均降水量には大きな変化は生じないものの、このような「ゲリラ豪雨」による災害の頻度は平均的に増加するものと予測されている。

今後も頻発するであろうゲリラ豪雨に対して、もし、任意の地点に対して、ピンポイントに1時間単位で短期予報(およそ24時間先まで)が可能となれば、降雨から災害発生までの時間が短い中小河川の洪水氾濫、低平地の内水氾濫、がけ崩れなどに対して、予測降水量の情報を基にした現実的なハザードマップ(リアルタイムリスクマップ)の作成が可能になる。これまでの気象レーダーに基づく運動学的手法による短時間降水予測(およそ6時間先まで)では²⁾、十分なリードタイムを確保することができず、効果的な対策を講ずるには絶対的な時間不足であった。この気象レーダーに基づく予測情報に加

えて、力学的予測手法の一種である「メソ気象モデル」による予測降水量の情報を併用することによって、単なる避難対策(ソフト対策)に留まらず、防災・減災のための事前の様々な応急的対策(ハード対策)を、十分に長いリードタイムを確保した上で実現可能になると期待される。よって、「メソ気象モデル」の精度向上に関する多角的視点による検討は、水工学分野の諸問題解決のためにも不可欠となる。

そのような背景の中、筆者らは、気象庁RSM-GPV(20kmメッシュ)を初期値・境界値としてメソ気象モデルPSU/NCAR MM5(2kmメッシュ)に基づく36時間予報を2005年6月よりリアルタイムで実施している。これまでに蓄積された予測結果に対する詳細な精度検証³⁾によると、風向・風速、気温、相対湿度については、時間単位の変化をほぼ正確に予測できているのに対して、降水量については相対的に精度が低く、特に夏季の局地豪雨の精度は実用面で不十分であり、入力値として使用している気象庁RSM-GPVに大きな誤差が含まれている可能性が指摘された。また、2005年6月～2006年5月の1年間に岐阜県の9観測点で20mm/h超の降雨が記録された事象全29例に着目し、降水量の予測精度について検討し

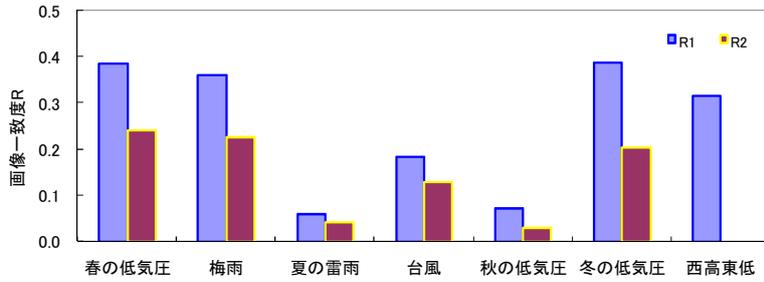


図-1 岐阜大学局地気象予報システムによる予測降水量(24時間先)の分類毎の平均画像一致度 R_1 と R_2 .

た結果、殆どが過小評価であり、降水量のピークに時間的なずれが生じていることが明らかとなった。現在一般に使われているメソ気象モデルによる予測計算においては、観測情報の不備のためにcold start mode (初期における雲微物理量をゼロ設定とする手法) に困っているが、これによる誤差拡大を解消するためには、単にモデルの高解像度化のみならず、雲微物理量(水蒸気、雲水、雲氷、雨水、雪の各混合比)の初期値に対し、より高精度なデータ同化を施すことが不可欠であると考えられる。これまでにより高度な物理的データ同化手法^{4), 5)}が幾つか提案されているが、特に、雲微物理量の同化に関する問題や、その莫大な計算コストに関する問題など、依然として検討の余地が残されている。

そこで本研究では、リアルタイムに入手可能な気象庁全国合成レーダー画像を用いて雲微物理量の初期値化を施し、更に、予測計算のリードタイム期間中にも入手可能なレーダー画像を取り込むことでその位置誤差を逐次解消できる簡便なレーダーデータ同化システムを開発し、その有用性を検証する。

2. 位置誤差評価手法

本研究のレーダーデータ同化システムは、従来のより高度なデータ同化手法^{4), 5)}と比べて非物理的要素が強い手法であるが、その簡便さにゆえに安価で経済的であり、現業予報への適用を意識した手法となっている。このシステムでは、メソ気象モデルにより予測された降水量分布中に存在する位置誤差を最小化することを基礎としており、その位置誤差を評価する際には、画像一致度を指標として導入している。ここでは、その画像一致度について解説し、過去のメソ気象モデルによる降水予測事例から位置誤差の特性についての考察を行う。

(1) 画像一致度について

2つの画像信号の類似性を客観的に評価する指標として、画像一致度 R がある⁶⁾。ここで、メソ気象モデルによる降水量を $sim[i, j]$ (画像平均の降水量を sim) とし、レーダー観測による降水量を $obs[i, j]$ (画像平均の降水量を obs) とし、画像サイズをどちらも N 、

M とした時、画像一致度 R は、

$$R = \frac{\sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} (sim[i, j] - \overline{sim})(obs[i, j] - \overline{obs})}{\sqrt{\sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} (sim[i, j] - \overline{sim})^2} \sqrt{\sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} (obs[i, j] - \overline{obs})^2}} \quad (1)$$

となる。ここで、 $[i, j]$ は画像中の座標を意味する。画像一致度 R は-1から1の間の値をとり、一般的に1に近いほど2つの画像が一致していることを意味する。2つの画像中の濃淡に位置的・形状的なずれが生じている時には画像一致度 R を低下させることになる。つまり、メソ気象モデルにより予測された降水量に対して、降水域の位置や形状の再現性を客観的に評価するのに適した指標であると言える。

(2) 過去の予測事例の位置誤差特性

ここでは、岐阜大学局地気象予報システム³⁾による降水量予測画像(18kmメッシュ)と同時刻の気象庁全国合成レーダーによる降水量観測画像(1kmメッシュ)を用いて画像一致度を評価する。観測画像は、予測画像の空間解像度に合わせて内挿処理が施されている(計79×79格子)。岐阜市にて比較的強い降水を観測した2005年11月から2006年10月までの1年間の計25例の降水事象について、季節と気圧配置に応じて計7種類に分類化(春の低気圧、梅雨、夏の雷雨、台風、秋の低気圧、冬の低気圧、西高東低)し、それぞれの平均的な画像一致度 R を算出した。ここでは、前述の画像一致度 R について、降水量の観測画像と降水画像の数値をそのまま比較した場合(R_1 :相関係数)と、予測画像と観測画像の両者に対して、降水量5mm/h未満の場合は0とし、5mm/h以上の場合には1とすることで、それぞれ2値化して比較した場合(R_2 :関連係数)の2種類の画像一致度について考察を行った。後者については、比較的強い降水域の再現性(位置誤差)を検討するのに適している。尚、全て初期時刻から24時間先の予測画像に対して検証を行っている。

図-1は、降水分類毎における画像一致度を示す。 R_1 の値は、0.06~0.39(平均0.27)の間をとる。冬から梅雨にかけては0.3を超えるが、夏の雷雨と秋の低気圧では R_1 が0.1を下回り、降水域の位置誤差が極めて大きいことが分かる。 R_2 の値は、0~0.24(平均0.15)となり、

R_1 に比較していずれもより低い値をとる。ただし、西高東低の場合では、5mm/h以上の降水域が著しく少ないため、 R_2 は0となっている。 R_2 についても R_1 と同様の傾向を示すことから、比較的強い降水に関しても、冬から梅雨にかけて予測精度が高く、夏から秋にかけて予測精度が低いと言える。また、夏の雷雨については、 R_1 と R_2 の差が小さく、弱い降水と強い降水ともに位置誤差が大きい。また、冬や春の降水については、 R_1 と R_2 の差が比較的大きく、相対的に弱い降水の再現性は高いと言える。

以上の結果より、現状のメソ気象モデルにおける降水量予測には無視できない位置誤差が生じており、特に夏季における強い降水の位置誤差が大きく、これを解消することが精度向上の鍵となると考えられる。

3. レーダーデータ同化システム

本研究では、前章のようなメソ気象モデル中にみられる降水域の位置誤差を最小化することを目的として、新しいレーダーデータ同化システムを構築した。このシステムでは、図-2のような計算フローにより、気象庁全国合成レーダー画像が取り込まれ、メソ気象モデル中の雲微物理量に対して位置誤差の評価・修正が行われる。初期値に対してだけでなく、初期値時刻から計算時刻の間に時々刻々と入電されるレーダー画像により適宜修正を施すことも可能であり、いわゆる「ナッジング法」に近い4次元データ同化手法であると言える。ナッジング法とは、予測値と観測値の間の誤差を逐次評価し（位置誤差の評価）、人工的な外力項により予測値を観測値へと

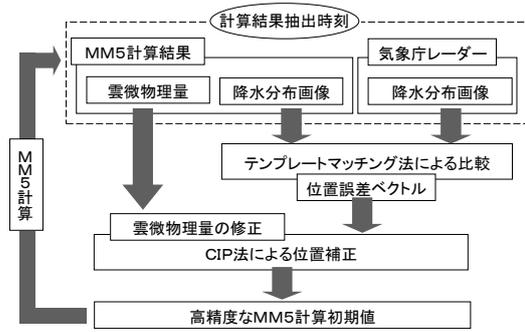


図-2 レーダーデータ同化システムの計算フロー。

近づける連続的データ同化手法（位置誤差の修正）の一種である。ただし、本手法では、方程式系に直接、人工的な外力項を加えているわけではなく（図-2）、間欠的なデータ同化を行っているため、厳密にはナッジング法とは異なる。本手法は、気象庁の4次元変分法⁹⁾などのように複雑な基礎方程式系を束縛条件とするいわゆる物理的データ同化ではなく、非物理的な同化手法であるため、その他の物理量との物理的整合性（バランス関係）は満たされないという欠点がある。しかし、その簡便さゆえ、安価で経済的に降水量予測の精度に直結する雲微物理量に対してデータ同化が施せる利点がある。本手法と似た手法については、Brewster (2003) の報告⁷⁾によっても提案されているが、位置誤差の評価・修正の方法に大きな相違点があり、本研究の方が優れている。本研究では、位置誤差ベクトルの評価には「テンプレートマッチング法」⁹⁾を、位置誤差の修正には「CIP移流スキーム」⁸⁾を使用している。以下に、それぞれの特徴を解説する。

(1) テンプレートマッチング法

ある画像の中に存在するパターンと同じものが、他の

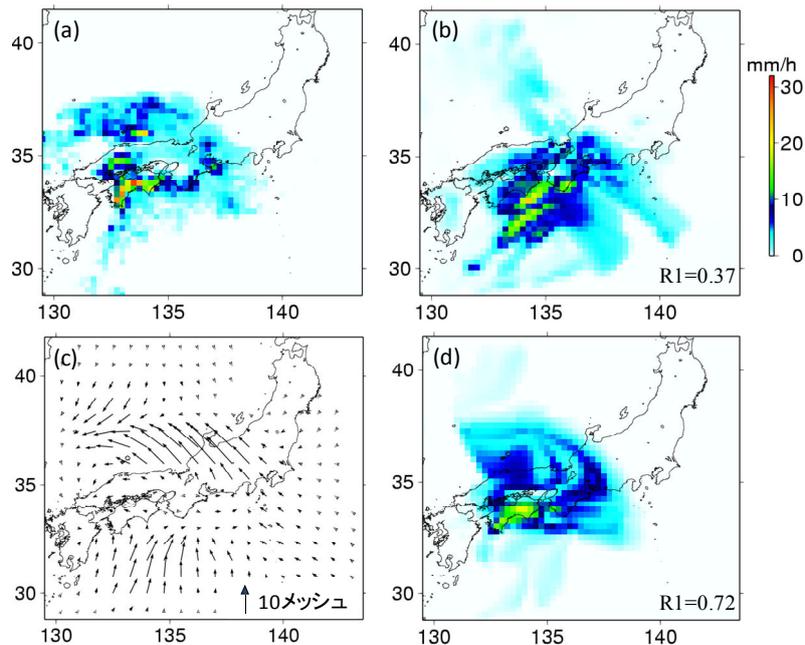


図-3 レーダーデータ同化システムによるデータ同化過程。(a) 2006年4月11日9時JSTの気象庁レーダーによる降水量の観測画像。(b) 同時刻のメソ気象モデルによる降水量の予測画像（数値は画像一致度）。(c) テンプレートマッチング法により

画像中のどの部分に存在するかを対応づける処理のことをパターンマッチングという。パターンマッチング手法のうち、特定のパターンをあらかじめ登録しておき、入力画像中にそれと同じパターンが存在するかどうかを調べ、その位置を特定する操作はテンプレートマッチングと呼ばれ、画像処理におけるマッチング問題の基本操作としてよく用いられる⁶⁾。

本研究で位置誤差ベクトルを各格子点で算出する際には、予測画像中の各格子点に対して、ある広がりを持つテンプレート領域を設定する必要がある。ここでは、対象格子点を中心とする360km四方のテンプレート領域を設定した。そのテンプレート領域と比較して、観測画像中で最も画像一致度 R が最大となる領域を探索し、閾値 ($R = 0.3$) を超えて最大となる格子点が存在した場合には、そこが本来の降水の存在するべき格子点であったとして、2点間を結ぶベクトルを位置誤差ベクトルとす

る。いずれの格子点においても閾値に達しなかった場合 ($R < 0.3$) には、近傍に類似する降水域が見つからなかったものとし、位置誤差ベクトルの成分は0とする。

(2) CIP移流スキーム

前述のテンプレートマッチング法により評価された位置誤差ベクトルに基づき、雲微物理量（水蒸気、雲水、雲氷、雨水、雪の各混合比）に対して誤差の移動修正を行う。評価された位置誤差ベクトルは2次元的な分布のみからなるため、鉛直一様な移動修正を行う。移動修正の際には、より高精度なCIP（Cubic-Interpolated Pseudoparticle）移流スキームを用いる。これは、近年、流体計算などでよく用いられる保存性を保証する移流スキームの一種で、格子点間の物理量（ここでは雲微物理量）の空間勾配を保存するよう移流計算を行うことで、数値粘性を抑えることができる利点を持つ⁸⁾。

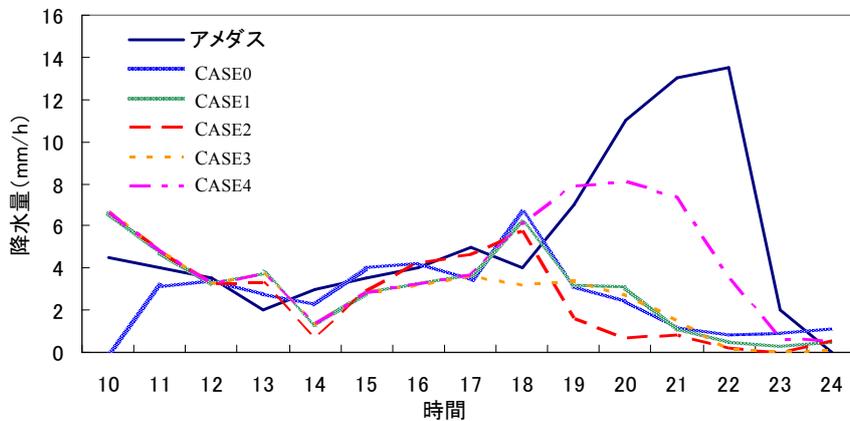


図-4 各CASEにより予測された岐阜市での降水量の時系列（2006年4月11日9時JST～12日9時JST）。

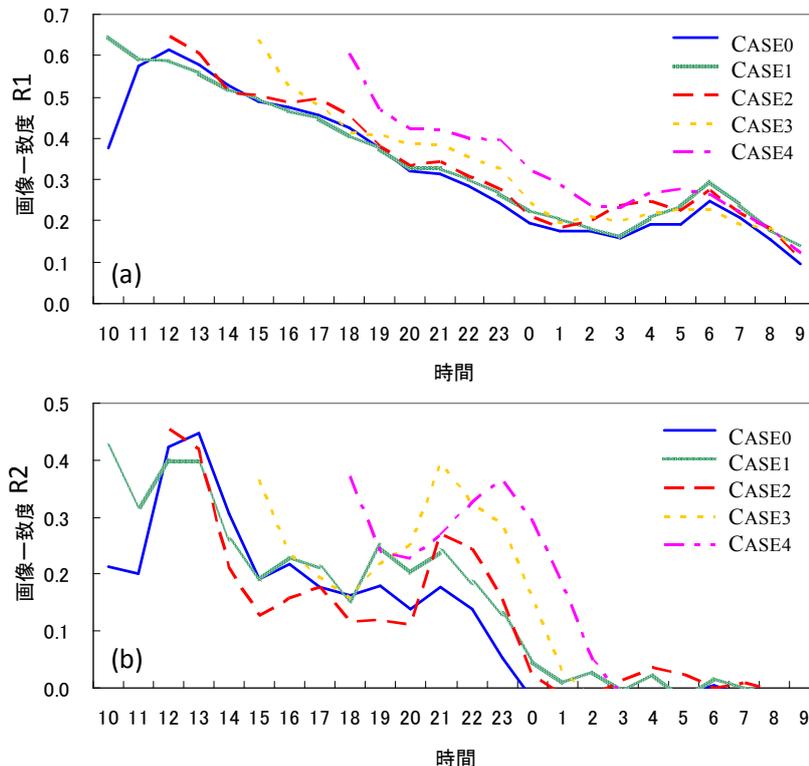


図-5 各CASEにより予測された降水分布の画像一致度の時系列（2006年4月11日9時JST～12日9時JST）。(a) R_1 . (b) R_2 .

図-3は、本手法による一連のデータ同化過程を示している。まず、観測画像(図-3a)と予測画像(図-3b)から前述のテンプレートマッチング法により位置誤差ベクトル(図-3c)を算出する。その後、その移動ベクトルに基づきCIP移流スキームにより移動修正を施す(図-3d)。移動修正後の降水分布の示す画像一致度($R_1=0.72$)は、修正前のそれ($R_1=0.37$)と比較して、大幅に上昇していることが分かる。この移動修正を、レーダー画像が入電される度に適宜行うことで、上空の雲微物理量の位置誤差拡大を抑制することが可能となる。

4. 計算設定

ここで、本研究により構築された新しいレーダーデータ同化手法の有用性を検証するために、メソ気象モデルによる複数の予測実験を実施し、比較検討を行った。事例として、2006年4月11日の温帯低気圧による太平洋沿岸地域での降水事例を選択した。

予測に使用したメソ気象モデルは、複雑な物理過程を考慮した完全圧縮・非膨張系の非静力学平衡メソ気象モデルPSU/NCAR MM5である。初期値・境界値として、気象庁RSM-GPV(20kmメッシュ)を使用し、岐阜県を中心とした18km, 6km, 2kmメッシュの計3領域からなる2-wayネスティング計算を行った。その他についても、吉野ら(2008)と同様の計算設定³⁾とした。

ただし、雲微物理量に対しては、次の計算条件の下で、

CASE0: 従来の計算 (cold start mode)

CASE1: 初期値(0時間後)にのみデータ同化

CASE2: 初期値に加え3時間後にもデータ同化

CASE3: 初期値に加え6時間後にもデータ同化

CASE4: 初期値に加え9時間後にもデータ同化

の計5種類の予測計算を行い、本手法が降水量の予測精度に与える影響について考察した。データ同化は、18kmメッシュ領域に対してのみに適用し、計算期間は、2006年4月11日9時JST~12日9時JSTの計24時間とした。尚、岐阜市で強い降水が観測されたのは、初期値から13時間が経過した11日22時JST(約14mm/h)である。

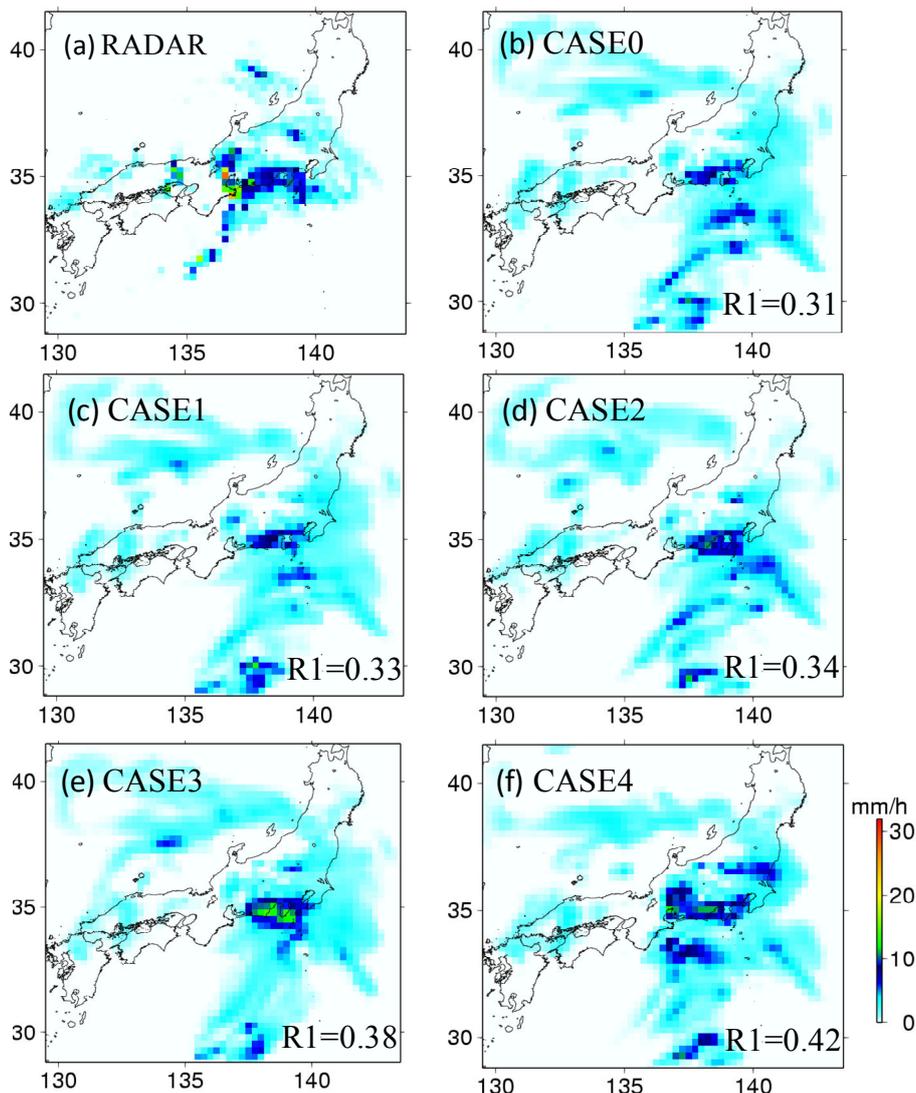


図-6 2006年4月11日22時JSTにおける降水量分布(数値は画像一致度)。(a)気象庁全国合成レーダー画像。(b)CASE0。(c)CASE1。(d)CASE2。(e)CASE3。(f)CASE4。

とが明らかとなった。

5. 結果と考察

まず、各CASEにより予測された岐阜市での降水量の時系列について考察する(図-4)。CASE0では、cold start modeであるため、計算初期(11日10時JST)における降水が約0mm/hとなっているが、CASE1では雲微物理量の適切な初期値化によって計算初期から現実的な降水量を予測できている(約7mm/h)。しかしながら、CASE0~CASE3は、初期から13時間後に発生した岐阜市での降水のピークを捉えることができず、メソ気象モデルの時間発展により誤差拡大が生じたことが示唆される。しかし、初期値から9時間後に同化されたCASE4では、過小評価ながらも降水のピークを表現できており(約8mm/h)、9時間後の同化により拡大した誤差をある程度解消できていると推測される。

次に、各CASEの気象庁全国合成レーダー画像との画像一致度 R_1 と R_2 の時間変化について考察する(図-5)。CASE0では、cold start modeに起因して初期における R_1 と R_2 は著しく低い、その他のCASEではデータ同化の効果により R_1 と R_2 が大きく回復していることが見て取れる。全体的に見て、計算初期には精度が高く、予測計算の進行により徐々に誤差が拡大していることが分かる。最終的に、CASE1とCASE2に関しては、CASE0の誤差と殆ど差がなくなっていることが分かる。この結果は、誤差の小さな初期段階におけるデータ同化の効果は軽微で長続きしないことを意味している。CASE3とCASE4については、その他のCASEに比べてデータ同化による精度改善の効果が比較的長期間維持されており、ある程度の誤差拡大した後にデータ同化を施すことで大きな精度改善の効果を得ることができると考えられる。尚、画像一致度 R_2 の推移について見ると(図-5b)、いずれのCASEもデータ同化の直後に急激に R_2 が低下し、その後、再び上昇するという誤差推移を示している。これは、本手法により雲微物理量のみを修正を施すことで、その他の物理量との間の力学的バランスの不整合が生じたことが原因であると推測され、今後の検討課題である。

最後に、岐阜市での豪雨発生時(11日22時JST)における各CASEの降水量分布について考察する(図-6)。CASE0~CASE3については、強い降水域は静岡県のみ位置し、岐阜市においては殆ど降水が生じていない。しかしながら、CASE4においては、データ同化の効果が維持されることによって、岐阜市での強い降水も予測できている。画像一致度 R_1 に関しても、CASE4は、その他のCASEと比較して高いことが分かる。予測計算中に時々刻々と入電される気象庁全国合成レーダー画像を効果的に取り込むことで、計算初期から徐々に拡大した誤差を最小化することが可能となり、本来は予測できなかった豪雨事例が本手法の活用により予測可能となるこ

6. 結語

本研究では、気象庁全国合成レーダー画像を用いてメソ気象モデル中の雲微物理量の位置誤差を評価し、移動修正を施すことによって、降水量予測の高精度化が可能となる簡便なレーダーデータ同化システムを構築した。

この同化システムは、位置誤差ベクトルの評価にはテンプレートマッチング法を、位置誤差の修正にはCIP移流スキームをそれぞれ採用することで、物理量間の整合性は満たされないものの、安価で経済的に雲微物理量のデータ同化が行えるという利点がある。本手法により、初期値時刻から計算時刻の間に随時入電されるレーダー画像を間欠的に同化することで、従来予測できなかった豪雨事例が予測可能であることが明らかとなった。

今後は、多くの豪雨事例に対して本手法を適用することで統計的な分析を実施し、本手法の適用限界の解明と更なる高精度化(特に、物理的初期値化との併用)について検討する必要がある。

謝辞：本研究は、国土交通省の平成20年度建設技術開発助成による成果であることを、ここに付記する。

参考文献

- 1) Kimoto, M., Yasutomi, N., Yokoyama, C. and Emori, S.: Projected Changes in Precipitation Characteristics around Japan under the Global Warming, *SOLA*, Vol.1, pp.85-88, 2005.
- 2) 椎葉充晴, 高埴琢馬, 中北英一: 移流モデルによる短時間降雨予測の検討, *水工学論文集*, Vol. 28, pp.423-428, 1984.
- 3) 吉野純, 野村俊夫, 片山純, 木下佳則, 安田孝志: メソ気象モデルMM5によるピンポイント24時間降水量予測の精度について, *水工学学会論文集*, Vol.52, pp.325-330, 2008.
- 4) 露木義, 川畑拓矢: 気象学におけるデータ同化, *気象研究ノート* (第217号), 日本気象学会, 2008.
- 5) Nakakita, E., Sato, Y. and Takenouchi, K.: 4DDA of radar echo and Doppler velocity by an atmospheric model with a conceptual precipitation Model, *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.51, pp. 103-108, 2007.
- 6) 酒井幸市: デジタル画像処理の基礎と応用, CQ出版社, 2004.
- 7) Brewster, K. A.: Phase-correcting data assimilation and application to storm-scale numerical weather prediction. Part I: Method description and simulation testing, *Monthly Weather Review*, Vol.131, pp.480-492, 2003.
- 8) 矢部孝, 肖鋒: 固体, 液体, 気体の統一解法とCIP法 (1), *数値流体力学*, Vol.7, pp.70-81, 1999.

(2008. 9. 30受付)