# 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

VERIFICATION FOR 24-HOUR FORECAST OF PINPOINT PRECIPITATION USING THE MESOSCALE METEOROLOGICAL MODEL MM5

吉野 純<sup>1</sup>・野村 俊夫<sup>2</sup>・片山 純<sup>3</sup>・木下 佳則<sup>4</sup>・安田 孝志<sup>5</sup> Jun YOSHINO, Toshio NOMURA, Jun KATAYAMA, Yoshinori KINOSHITA and Takashi YASUDA

<sup>1</sup>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)
 <sup>2</sup>岐阜大学大学院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)
 <sup>3</sup>株式会社建設技術研究所大阪本社 (〒540-0008 大阪市中央区大手前1-2-15)
 <sup>4</sup>岐阜大学工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)
 <sup>5</sup>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, verification is performed for the accuracy of 24-hour forecast of pinpoint precipitation using the mesoscale meteorological model MM5 with a high-resolution grid spacing of 2 km through comparisons with the precipitation measured at 9 weather stations in Gifu Prefecture over one-year period from June 2005 to May 2006. It is shown that the values of correlation coefficient of 3-hourly accumulated rainfall between the predicted values and the measured ones become almost 0.4 or more over one year although they are about 0.7 during the period from January to May. In addition, a radar data assimilation system to initialize 3-dimensional cloud microphysical fields accurately is newly developed based on the template matching technique. The forecast accuracy is improved not only in the large-area distribution of precipitation fields but also in the time series of the pinpoint precipitation.

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

## 1. はじめに

ピンポイントで十分なリードタイムのある降水量予 測は、中小河川の洪水や内水氾濫対策としてだけでなく、 水工学の諸問題に広く関わって重要である.

気象庁は、2004年9月からの水平10km格子非静力学 モデルの導入、さらに2006年3月からの水平5km格子 による高解像度化によって、予測精度の向上を図って来 た<sup>1)</sup>.しかし、この高解像度化によって、高水管理への 適用に対して精度的に期待できないとされたそれまで の予測精度<sup>2)</sup>が、どの程度改善されたかは不明である.

一方,気象業務法の改正や雲解像型気象モデルの開発、 計算機能力の向上等によって,水工学分野でも気象モデ ルが用いられるようになり,豪雨に及ぼす地形の影響評 価に関する研究<sup>3)</sup>なども行なわれるようになって来た.

現在のメソ気象モデルは雲解像型に進化してきており、積乱雲を組織化するメソ対流系から雲微物理までの 過程を正しく計算し、豪雨を予測できるレベルに達している.<sup>4)</sup>しかし、初期条件は雲の情報を含んでおらず、 その点で静力学モデルの時代と何ら変わっていない.こ のため、雲が存在しない状態で計算が始まり、初期条件 として与えられた水蒸気混合比と陸面等の影響の下で 基礎方程式に基づいて雲が生成されるが、様々な不確定 性の下で降雨が始まることが予測精度の低下に繋がっ ている.

それゆえ、豪雨を含めた降水量の予測精度の向上は、 標高・陸面過程および積雲対流の記述に必要な高解像度 化と確度の高い雲の情報を取り込んだ初期条件の設定 によって、年間を通じた気象全体の予測精度の向上を図 り、その結果として実現すべきものである.

このような観点から,著者らの研究室では,これまで 7年近く高解像度化の問題に取り組み,その効果を実証 して来た<sup>5,6</sup>.その上で,日本の大学初となる気象予報 業務許可を得て,2005年6月より岐阜および愛知県全域 に対して2km格子36時間気象予報を開始した.併せて 初期条件の高精度化にも取り組んできた.

ここでは、気象庁に先駆けて行っている2km格子モ デルによる気象予測によって、ピンポイント降水量予測 の高精度化がどこまで図られているかを1年間の予測値 と観測値の比較に基いて明らかにするとともに、レーダ ーデータ同化手法による雲微物理量の初期値への取り 込みとその効果についての検討結果を紹介したい.

## 2. 気象予測の方法

#### (1) 計算方法

用いたモデルは、雲微物理過程や大気放射過程など非 静力学・完全圧縮性のメソ気象モデル PSU/NCAR MM5 である.予測に必要な気象場の初期値・境界値として, 気象業務支援センター配信の気象庁 RSM-GPV 予測値を、 海面温度データとして, NCEP が公開する1°×1°格子 の RTG-SST をそれぞれ用いている.

計算領域として、2-way nesting により、本州を広く囲 む18km格子の第1領域から2つのネスティング領域(中 部地方6km格子の第2領域および岐阜・愛知両県を2km 格子網で覆う第3領域)を設定した。毎日、前日の21 時を初期値とする気象庁 RSM 予測値の配信を午前3時 に受け、前日21時を初期値として48時間先までの予測 計算を行い、午前9時以降の24時間を予測情報として 活用した。

## (2) 計算条件

これまでの MM5 を用いた局地気象場の再現計算に関 する研究成果<sup>5) ~7)</sup> に基づき,予測計算の時間と精度の両 面から気象予測のための計算条件の最適化を図った. 表-1はこうして採用された計算条件を示す.

-	領域1	領域2	領域3		
水平解像度	18(km)	6(km)	2(km)		
鉛直層数	20 (100hPa)				
タイムステップ	54s	18s	6s		
予報時間	36時間				
初期值·境界值	気象庁RSM(3時間間隔, 20km格子)				
海面温度データ	NCEP daily SST(1° ×1°格子)				
雲物理スキーム	Reisner graupel (Reisner et al.,1998)				
積雲パラメタ化	Kain-Fritsch	なし	なし		
境界層スキーム	Eta (Janjic,1993)				
放射スキーム	Cloud (Stephens,1984)				
地表面スキーム	Five-Layer Soil (Dudhia,1996)				

#### 表-1 計算条件と物理オプション.

### 3. 予測精度の検証

#### (1) 方法

濃尾平野から飛騨の山岳地帯に拡がる岐阜県の地理 的特性に着目すれば、県内9ヶ所(平野部:岐阜、大垣、 中間部:美濃加茂、多治見、恵那、山間部:中津川、高 山、神岡、白川)の測候所および AMeDAS 観測点の1 年間のデータと比較することによって、一般性を持つ精 度検証が可能になる.

検証は、1年分の予測値を用い、これらの各観測点での気温(毎正時瞬間値)、風速(毎正時 10分間平均値)、 降水量(1時間積算値)および相対湿度(岐阜および高 山測候所での毎正時瞬間値)の観測値と観測点に最も近 い2km格子点での予測値(降水量のみが1時間積算値で、 その他はすべて毎正時値)をそのまま比較することにより行った.予測精度の統計的評価指標として、予測値と 観測値の平均値の差異を示す Bias 誤差、二乗平均平方根 誤差 RMSE および相関係数 Cor を用いる.



図-1 2006 年 5 月の気温, 相対湿度および降水重の 予測値と観測値の時系列比較(岐阜):予測値は, 毎朝9時から翌朝8時までの計算結果を連結さ せて1ヶ月分としている.

#### (2) 結果

#### (a) 予測値と観測値の時系列比較

図-1 は、1 例として 2006 年 5 月の岐阜での気温、相 対湿度および降水量の時系列比較を示す.降水に影響を 及ぼす気温や相対湿度については、気象モデルによって これらの時間単位の変化がほぼ正確に予測されており、 相関係数 Cor の値もそれぞれ 0.85 および 0.77 と高い. これらに比較し、降水量の予測精度は低く、相関係数の

#### 値も0.49に留まっている.

#### (b)予測時間と精度の関係

毎日午前9時から1,3,6,12および24時間先(計算開 始からそれぞれ+12 時間後)の予測降水量(mm/h)と 雨量計による観測値との相関係数および RMSE を計算 し、1 年間にわたる予測時間と精度の関係について調べ た. 図-2 は、8 観測点におけるそれらの結果である. RMSE は各時刻における予測値の観測値に対する絶対誤 差を表し、6時間先(計算開始から18時間後)の15時 の予測において主に降水量が多い8月の雷雨の位置ズレ 誤差のために極大(大垣で特に顕著)となっているが、 その先は単調に減少して 24 時間先には1時間先より逆 に値が小さくなっている. このような予測時間と精度の 関係は、相関係数で見ても同様であることから、予測時 間が 24 時間内であれば、降水量の予測精度は通年平均 では時間とともに一様に低下する訳ではなく、一定の範 囲内に収まっていると見ることができる. したがって, 降水量の24時間予測については、1日1回の更新で特に 問題はないと言える.

#### (c) 予測精度の統計的検証

図-3 は、毎正時気温および時間降水量について 24 時間予測値と観測値の一致度を月毎の相関係数 Cor で評価し、その結果を9 観測点での月変化として示したものである。気温については、観測点や月に依らず、前述の図-1(a)と同程度の精度で予測できていることがわかる。これに対し、時間降水量については、前述の不確定性のために Cor の値の観測点および月による変動は大きいが、0.8 を超えることはなく、平均でも 0.35 程度に留まり、2km 格子による高解像度化の効果は見出せない。

図-4は、降水量の予測精度に及ぼす時間の影響を除く ため、予測値の月平均 Bias の変化を9 観測点について示 したものである、図中の Bias の値に 24 時間×30 日を掛 ければ、月当たりの予測降水量と観測降水量との差が得 られる.このときの月平均時間降水量の Bias の9 観測点 平均は0.017 mm/h であるから、予測年降水量は観測年降 水量を約 146 mm 上回っていることになる.これは9 観 測点の平均年降水量 2138 mm の 6.8 % であり、ここで用 いたモデルは総降水量に関して若干の過大予測に留ま る精度は有している.

### (d) 積算時間と精度の関係

降水量の積算時間は、予測精度と情報品質の両方の観 点から決定する必要がある. 図-5 は、平野部として岐阜、 中間部として多治見、山間部として高山をそれぞれ選び、 積算時間を1時間から24時間まで増大させた時のこれ ら3観測点での1年間の降水量予測値と観測値の相関係 数の変化を示したものである. 積算時間の増大とともに 精度の向上が認められ、24時間積算において相関係数の 値は0.7 近くになる. したがって、積算時間は予測精度 からすれば積算時間は長い方が良いが、災害対策などへ の活用の観点からは最長でも3時間が限界であろう.



図-3 2005 年 6 月~2006 年 5 月の 1 年間の各観測点における 予測値と観測値の相関係数 Cor の月変化.



図-4 2005 年 6 月~2006 年 5 月の 1 年間の各観測点における 月降水量予測値と観測値の Bias の月変化.

#### (e) 3 時間積算降水量

積算時間を3時間にして、岐阜での予測降水量と観測 降水量の1年間の時系列比較を示したものが図-6である. 3時間積算では、予測値と観測値の降水時間はほぼ一致 しており、3時間単位の降水の有無の24時間予測であれ ば、年間を通した相関係数 Cor も 0.46 となる.

図-7は、9観測点での3時間降水量の相関係数の月変 化を示したものである.1月から5月までは予測精度は 良好であり、相関係数の値もほとんどの観測点で0.6以 上となっている.これに対し、6月から12月は逆に0.6 以下に減少し、特に夏季の6~8月にはいずれの観測点 においても0.4以下となり、2km格子の高解像度化だけ では解消できない課題があることがわかる.

#### (f) 20 mm/h 超降雨の予測精度

ここでは、2005 年 6 月~2006 年 5 月の1 年間に 9 観 測点で 20 mm/h 超降雨が記録された全事象 29 例に着目 し、これらに対する予測精度について検討する. そのた めの精度指標として、観測 20 mm/h 超降雨の極大値(ピ ーク時刻降雨量)  $q_{0max}$ に対するピーク時刻前後 3 時間 での予測降雨量の最大値  $q_{pmax}$  の比  $C = q_{pmax}/q_{0max}$ を定義する. これは、20 mm/h 超降雨時間については前 後 3 時間までのズレを許容しその間の時間降雨量の極大 値の一致度を評価するものである. この 3 時間のズレの 許容は、「降水短時間予報」による予測雨量の精度につ いて検討した和田ら(2005)の結果などを根拠としてお り、3 時間以内の予測時間のズレは「降水短時間予報」 によって補正できるとの仮定に基づいている.

表-2 は各 20 mm/h 超降雨事象の発生月日,観測点  $q_{0max}$ ,  $q_{pmax}$ および精度指標 C の値を示している. こ れから, 20 mm/h 超降雨のような強雨に対する予測は過 小評価傾向にあり, C が 1 を超えているのは 8 月 16 日 の美濃加茂(図-8 (a))だけである. ただし, 7 月 1 日 の中津川での事象ではCは見逃しに近い0.08に過ぎない が,図-8 (b)からわかるように時間のズレを 4 時間ま で許容すれば 1.46 となる. また,図-8 (c)に示す 6 月 28 日の多治見での事象のように時間も含めて予測値が 観測値と良く一致しているケースもあるが,例外的であ り,殆どが過小評価となっている. これは気象モデル上 で強い雨につながる積乱雲の発達が不十分なことを示し,強雨予測に対しては高解像度化だけでは不十分であり,初期値への雲情報の取り込みが不可欠と考えられる.

## 4. 雲微物理量の初期値化に関する検討

現在の気象モデルの初期条件は、雲微物理量に関する 情報を一切含んでおらず、我々の場合も雲を一律ゼロと する設定の下で予測計算を実施している(cold start mode). これに初期条件として与える水蒸気混合比の 3 次元分布の不確定性が加わり、予測初期における誤差成 長は非常に大きなものになると推測され、これの抑制が 降水量予測の精度向上に必須となる.



図-5 降水量の積算時間による予測値と観測値の相関係数の Cor の変化.



図-7 9 観測点における 3 時間積算降水量の予測値と観測値の 相関係数 Cor の月変化.



月日	地点	観測降水量	予測降水量	精度指標
	-0 /iii	Y pmax	Y <sub>0max</sub>	C
6月18日	白川	31mm/h	0mm/h	0.00
28日	多治見	21	17.2	0.82
7月1日	恵那	33	5.6	0.17
1日	中津川	24	1.9	0.08
1日	白川	21	4.2	0.20
1日	岐阜	24	9.9	0.31
3日	大垣	32	3.8	0.12
4日	白川	29	6.7	0.23
5日	高山	30	0	0.00
31日	美濃加茂	25	0	0.00
8月5日	恵那	40	8.0	0.20
5日	多治見	26	7.8	0.30
6日	恵那	26	6.0	0.63
10日	白川	23	0	0.00
12日	白川	21	0	0.00
16日	美濃加茂	26	29.9	1.15
16日	大垣	37	0.7	0.02
17日	恵那	22	0.4	0.02
18日	大垣	21	0	0.00
20日	恵那	21	6.6	0.33
9月3日	恵那	21	0	0.00
5日	多治見	25	3.5	0.14
5日	大垣	23	16.6	0.72
5日	美濃加茂	20	1.4	0.07
5日	岐阜	29.5	7.4	0.25
11月6日	美濃加茂	29	16.8	0.58
5日	岐阜	29.5	13.0	0.44
2006年5月19日	白川	20	0	0.00
19日	宣山	24	0	0.05

## 表-2 2005 年 6 月~2006 年 5 月の 9 地点における 20 mm/h 超 降水量の予測精度.



(a) 2005 年 8 月 16 日~17 日:美濃加茂

40 ----- 予測値 35 降水量(mm) 30 観測値 25 20 15 10 5 0 9 11 13 15 17 19 時間(h)





(c) 2005 年 6 月 28 日:多治見
 図-8 20 mm/h 超降水時の予測降水量と観測降水量の時系列比較.

こうした気象モデルの初期値の不確定性問題を克服 するため、リアルタイムで入手できる気象庁レーダー画 像を取り込むことによる雲微物理量のデータ同化手法 推定値に対して気象庁レーダー画像を取り込むことで 修正を施し、次の予測のための初期条件とする. 場の修 正の際には、テンプレートマッチング法<sup>8</sup>を適用し、レ ーダー画像と降水強度分布との間の位置誤差ベクトル を開発した.この手法では,雲微物理量(雨水,雲水, 雪水、氷水、霰水混合比)と水蒸気量の第一推定値とし て、前日の予報結果(24時間後)を使用する.この第一 を評価する(ある格子点を中心とした 20×20 格子のテ ンプレート画像を降水強度分布から取り出し、レーダー 画像と比べ最も画像一致度の高い場所(閾値 0.6)を探 し出すことでその格子点における移動ベクトルとする). 得られた誤差ベクトルに基づき、数値振動や数値拡散を 抑えることが可能な移流スキームの一種である CIP

(Cubic Interpolated Pseudoparticle)法<sup>9</sup>により第一推定値 (全ての雲微物理量+水蒸気量)に対して全層で一様な 移動補正を加える.これにより、レーダー画像と最も相 関性の高い雲微物理量の空間分布を得ることができる.

図-9 は本システムによる解析の一例を示す. 観測され たレーダー画像(図-9(a))と前日に行われたその予測 結果(図-9(b))を比較すると,予測結果は実際よりも 南方に強雨域が集中しており,また,日本海側の降雨域 を全く再現できていないといった誤差を有しているこ とが分かる. 求められた位置誤差ベクトル(図-9(b)) により最適化された降水強度分布(図-9(c))は,より 現実に近い分布パターンを呈しており,特に,四国や日 本海側での強雨域を高精度に表現できていることが分 かる. このような高精度な雲に関する情報を初期値とし て気象モデルに入力することで,降水量予測の精度が格 段に向上するものと期待できる.

図-10 は、実際に本手法によって作成された雲微物理 量を初期条件として用いて予測計算を行った1時間後の 午前10時の結果 CASE2(図-10(c))とその時のレーダ 一画像(図-10(a))、さらに比較のために気象庁 RSM-GPVを初期値とした同時刻の予測結果 CASE1(図 -10(b))をそれぞれ示している.これらの比較により 明らかなように、初期値に適切に雲微物理量を取り込ん だ CASE2 では、cold start mode の CASE1 では現れなか った日本海側や四国の強雨域をより高精度に予測でき ていることが見て取れる.潮岬における降雨強度の時系 列(図-11)からも、位置誤差の修正によって、CASE1 に見られた過小評価傾向が改善し、時系列的にも高い精 度を有していることが確認できる.

## 5. おわりに

非静力学的雲解像型メソ気象モデル(PSU/NCAR MM5) は局地豪雨を含めた降水の予測に必要な数理的条件を



図-9 2006 年 4 月 11 日 09 時 JST の降水強度分布. (a) 気象 テレーダー, (b) 前日の 24 時間後予測結果と位置誤差ベクトル(初 期値: 10 日 09 時 JST), (c) 本レーダーデータ同化手法を用いた解析結果.



図-10 2006年4月11日10時JSTの降水強度分布.(a)気象庁レーダー,(b)気象庁RSM-GPVを初期値とした時の予測結果,
 (c)本レーダーデータ同化システムにより作成された初期値を用いた時の予測結果(共に初期値は11日09時JST).



図−11 潮岬における降水強度の時糸列変化.

備えており,高精度予測実現の鍵は,積雲対流の記述に 必須となる高解像度化と初期条件への雲微物理量の取 り込みにあるとの観点から,水平2km格子モデルの導 入とレーダーデータ同化手法による初期値設定を行い, その効果について検討した.その結果,明らかになった 主要な点を以下に列記する.

- ・ 予報初期から24時間以内では、2 km 格子での降水 量予測精度は先行時間に依らない.
- ・3時間積算降水量予測であれば、梅雨期・夏季を除き、予測値と実測値の相関係数の値がほぼ 0.4 以上、特に 1~5 月の間では 0.7 程度となる.
- ・ 雲微物理量に関する高精度な初期場を作成するため、テンプレートマッチング法によるレーダーデータ同化技術を開発した.これを用いることによって、広域の降水量分布だけでなく、降水量の時系列変化に対しても予測精度が向上することが確認できた.

年度研究開発助成による成果であり、ここに付記し謝意 を表す.

#### 参考文献

- 済藤和夫・牧原康隆:降水現象の予報高度化の技術,天気, 第54巻7号,36-45,2007
- 2)和田一範・川崎将生・冨澤洋介:河川の高水管理における予 測降雨情報の適用性に関する考察,水文・水資源学会誌、 第18巻6号,703-709,2005
- 3)鈴木善晴・富田昇平・中北英一・池淵周一:メソ気象モデル による数値シミュレーションに基づいた降雨一地形関係 の解析,水工学論文集,第47巻,73-78,2003
- 4)藤田司ほか:予測技術の現状と展望,気象庁技術報告,第 129号,169-191,2006
- 5) 大澤輝夫・深尾一仁・安田孝志:伊勢湾地域における高解像 度気象場の再現計算とその精度検証,海岸工学論文集, 第49巻,181-185,2002
- 6) 橋本篤・大澤輝夫・安田孝志:複雑地形上でのメソ気象モ デル MM5 の風況計算精度と高解像度化の限界に関する検 討,風工学論文集,第30巻3号,65-74,2005
- Fukao, K. et.al. : Database of local meteorological fields simulated with mesoscale model MM5 and its validation, J. Global Environ. Eng., Vol.10, 129–136, 2004
- 8) 酒井幸市:ディジタル画像処理の基礎と応用, CQ 出版社, 2004
- 9) 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,第7巻,70-81,1999

謝辞:本研究は、(財)国土技術研究センターの平成18

(2007.9.30受付)