

MP レーダを用いた台風事例の降水短時間予測 — 相関法と風向風速法の結合した移動ベクトル推定手法 —

加藤 敦*・清水慎吾*・真木雅之*・岩波 越*・前坂 剛*

Precipitation Nowcasting Based on Polarimetric Radar for Typhoon Events — Combination method using cross correlation and wind advection —

Atsushi KATO, Shingo SHIMIZU, Masayuki MAKI, Koyuru IWANAMI, and Takeshi MAESAKA

*Storm, Flood and Landslide Research Department,
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan
a-kato@bosai.go.jp*

Abstract

Precipitation nowcasting can be an effective technique for mitigation of urban flood damage. However, at present, its accuracy is not sufficiently high. Therefore, a hybrid moving vector estimation technique is proposed that combines a cross correlation method with wind forecasts based on a numerical weather model. The proposed technique has been built into a multi-parameter radar nowcasting system developed and operated by NIED. Based on a comparison with precipitation measurements by ground rain gauges during three separate typhoon events, the proposed method has been shown to be capable of forecasting with an acceptable degree of accuracy.

Key words: Precipitation Nowcasting, Moving vector, MP radar, Polarimetric radar, Urban flood

1. はじめに

近年、都市化の進展に伴う都市型水害が多発し社会問題となっている（例えば、防災科学技術研究所, 2002, 2010）。都市型水害は短時間雨量と関係があることが知られており（例えば、Fukuoka *et al.*, 2005）、短時間雨量の予測精度の向上が重要である。

降雨予測は大きく二種類にわけられる（例えば、Wilson *et al.*, 1998）。数値気象モデルを用いた予測（Numerical Weather Prediction；以下 NWP と呼ぶ）と、ノウキャストである。NWP とは流体力学および熱力学に基づいた数値予測手法であり、対象とする時間・空間スケールの違いによりモデルが異なる。数時間スケールに適したモデルとしてはメソスケールモデルや雲解像度モデルなどがある。NWP は降雨場の時間発展を物理的に予測することが可能である一方で、都市型水害の予測に用いるには計算時間や精度に課題がある。後者のノウキャストとは時々刻々と得られるレーダ画像等を用いて時間外挿する手法のことである。1 時間以内の時間スケールでは NWP の精

度を上回ることが知られている。（例えば、Wilson *et al.*, 1998）。

しかし、都市型水害予測への応用の観点からみると、従来のレーダ情報を用いたノウキャストの精度は定量的に十分なものとはいえなかった。ノウキャストには 3 つの誤差がある。入力情報の誤差、移動ベクトルの誤差、降雨場の時間発展である（例えば、Seed, 2003）。まず入力情報の誤差（すなわち、レーダ雨量の誤差）であるが、様々な誤差要因のうち最も大きなものとして、降雨強度の推定に反射因子を用いていることによる誤差（Z-R 関係、降雨減衰など）がある。この誤差の影響は非常に大きくノウキャストの定量的な利用を妨げる最も大きな要因であった。しかし、マルチパラメータレーダ（二重偏波レーダともいう）の登場でレーダ雨量の精度は飛躍的に向上した（例えば、Bringi and Chandrasekar 2001, およびその参考文献）。さらに、マルチパラメータレーダー情報がノウキャストの精度を向上させることも示されている（加藤ほか, 2009）。

*独立行政法人 防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部

次に移動ベクトルの誤差であるが、この誤差はさらに二つに分けることができる。定常一様性の仮定による誤差とベクトル推定法がもつ誤差である。定常一様性の仮定による誤差を軽減するための手法としては移動ベクトルの空間分布を求め、二次元の移流モデルで移流させる方法がある。ただし、シドニーオリンピック時に各国のナウキャストモデルを用いた大規模な比較実験の結果では一様移流を用いたモデルと大きな違いはみられなかった（例えば、Pierce *et al.*, 2004）。このことはこの実験のように数 10 km ~ 100 km 程度の水平スケールを対象領域とした場合、一般にこの誤差は小さいことを示唆している。一方、移動ベクトル推定法が持つ誤差は実用的には大きな誤差になる。移動ベクトル推定法は、大きく相関法と風向風速法の二つに分けられる。両手法はこれまで多くの検討がなされているが各手法には長所と短所があり、一つの手法ですべての事例をカバーすることには無理がある。各手法の特性を理解した上で、適切に組み合わせることが必要である。本研究では両手法をその特性に応じて適切に組み合わせる手法を提案するとともに、地上雨量計を用いた検証を行った。

また、三つ目の誤差である降雨場の時間発展については、これまで多くの概念モデル等の提案がなされてきているが明確な違いが生じていないのが現状である。しかし、都合が良いことに、防災上重要な組織化された降水システムは数時間にわたってシステムが持続する。そのため複雑な概念モデルを用いなくても一般に精度が確保されることが多いといわれている（例えば、Pierce *et al.*, 2004）。

本論文の構成は次の通りである。第 2 章では本手法について述べ、第 3 章で結果、第 4 章で考察を述べるとともに、第 5 章でまとめを行う。

2. 手法

前述のように、移動ベクトル推定法は大きく二つに分けられる。相関法と風向風速法である。相関法は時間的に連続したレーダ画像等の空間データから移動ベクトルを求める手法である。この手法はこれまで多くの適用例がありその信頼性が確かめられている。例えば、Pierce *et al.* (2004) では、シドニーオリンピック時に大規模な比較実験をおこなっており、特に対流性の事例において、後述の風向風速法より、精度がよいことが示されている。ただ、あらゆる気象現象で安定して得ることは難しい。その一例として台風事例がある。台風事例は移動速度が早く、雨域の変化も激しいため、大きな誤差が生じることがある。

なお、相関の指標としては、さまざまなものを用いられるが、最も一般的なものとしては相関係数を用いる相関係数法がある。相関係数は相関を示す最も一般的な指標であるとともに、数学的に扱いやすい。例えば、FFT を用いて高速に演算が可能であり、データ数が増える高分解能情報に対してもリアルタイムに扱え、便利である（加藤ほか、2009）。

一方、風向風速法は、移動ベクトルがある高度の風向風速と相関があることを利用した方法である。先行研究では 750 hPa 高度や高度 2 km ~ 4 km の平均と相関があることが示されている。ただ、実際の精度としては、特に対流性の事例では精度が良くないことが知られている（例えば、Pierce *et al.*, 2004）。これは、実際の降水システムの動きが、降水セル等の風による移流と、降水セルなどの時間発展の成分の和として生じることが原因であると考えられる。

なお、上空の風向風速を得る方法として、ドップラーレーダやウィンドプロファイラなどの観測値を用いる方法と数値モデルの予測値を用いる方法があるが、前者は相関法と同様、観測条件によって得られないことがあり、後者の数値モデルの予測値が便利である。日本ではメソスケールの数値気象モデル (MSM) の結果がリアルタイムに提供されており、気象条件によらず常に得ることができる。

このように、各手法には、長所と短所があり、一つの手法で安定かつ高精度に全ての事例をカバーすることは難しい。各手法の特性を定量的に把握し、適切に組み合わせることが有効である。

今回の手法のフローを図 1 に示す。まず、ある高度 h の平均風 V を用いて円形の最大探索範囲の半径 $r = aV / dt$ を動的に決定する。ここで dt は連続するレーダ画像の時間間隔である。これは領域内の類似エコーの存在、計算領域境界でのエコーの出入りによる誤推定を軽減するために行う。ただし、上空の風がある程度以下の場合には最大探索範囲を固定とする。つまり最大探索範囲に下限値を設定する。これは、特に環境の風が弱いとき、実際の降水システムの動きと上空の風が一致しないことが多いことを想定している。今回の適用では、 h は 600 hPa 高度、 $a = 1.2$ とした。 h を 600 hPa とした理由は次章で述べる。ただし、2004 年の事例では 600 hPa の MSM のデータがないため、500 hPa とした。

次に品質管理を行う。品質管理には 3 つの基準を用いた。相関係数が閾値 R_{\min} 以上であること、過去の値の平均値との偏差が少ないこと。およびバイアス補正した MSM の予測値との偏差が小さいことを用いた。ここで、 $R_{\min} = 0.8$ とし、過去との偏差の計算に使う時間を 1 時間、偏差は一定値 10 m/s とした。バイアス補正した MSM の予測値については後で述べる。品質管理はこれまでの手法（加藤ほか、2009）より厳しい基準としている。

一方、風向風速法から求まる移動ベクトルについては、気象庁から提供されるメソ気象モデル (MSM) の予測値を用いた。ただし、ある時刻に利用可能なデータは約 1.5 時間後の予測値である。ある高度 h の平均風 V の算出にはレーダサイト位置（海老名）を中心とするある半径 R の円内の平均を用いた（図 2）。ここで R は 40 km とし、 h は 600 hPa とした。

次にある高度 h の平均風 V (MSM_WV_1) のバイアスを補正する。補正には MSM モデルの計算開始時間の 500 hPa 高度の平均風と相関法から求め品質管理された

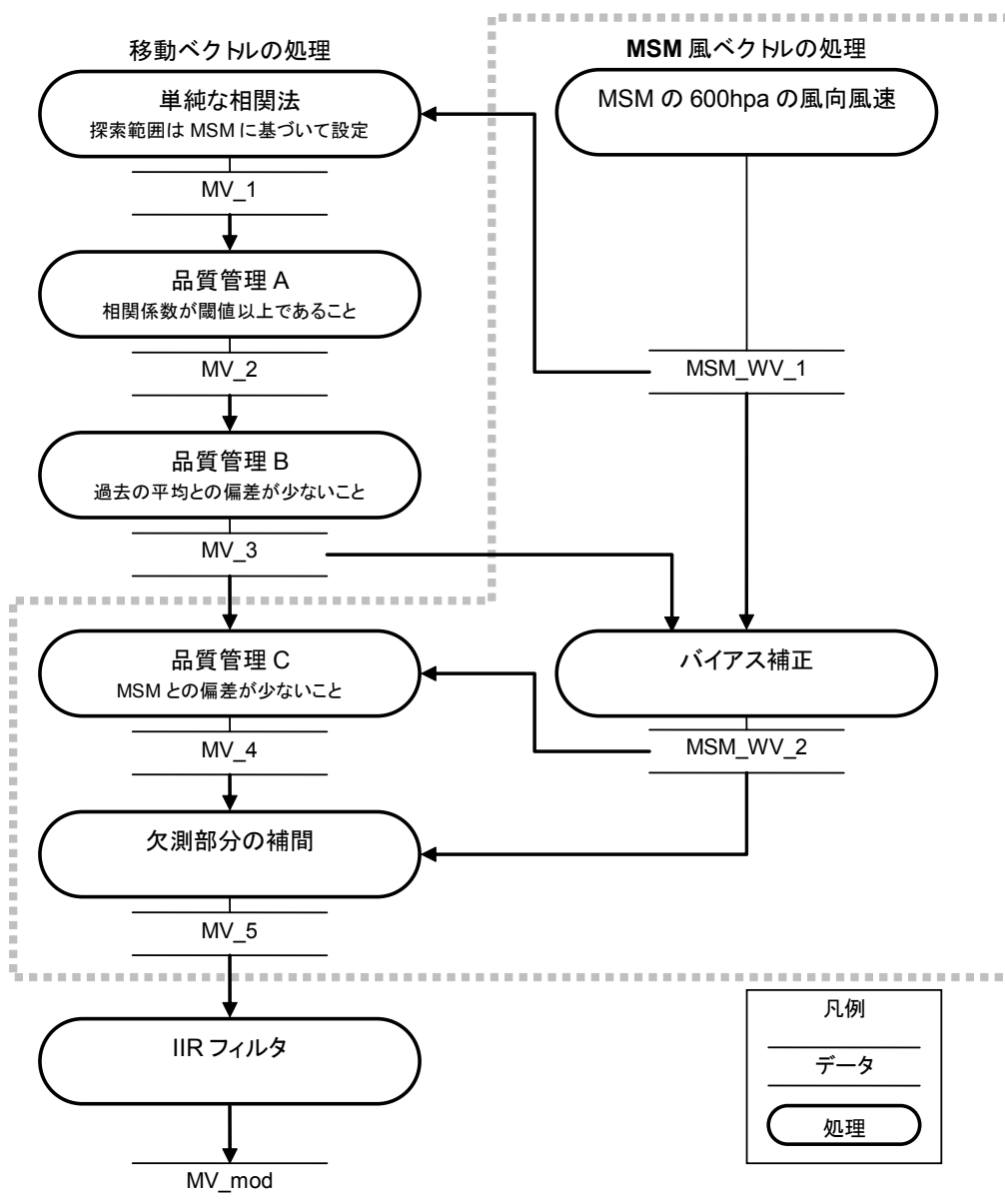


図 1 移動ベクトルの推定アルゴリズム
 Fig. 1 Moving vector estimation algorithm.

MV₃ を用いてバイアスを求め補正する。次に MV₄ と MSM_WV₂ の組み合わせを行う。具体的には MV₄ の値を優先し、その欠測部分を MSM_WV₂ で補完した。

最後に、IIR フィルタを適用し、1 時間以内の変動を除去し、最終的な移動ベクトル MV_{mod} が求まる。

3. 結果

検証に用いた事例を表 1 に示す。いずれも台風に関連しており、雨域の移動速度が早かった事例である。事例 1 と 3 は大規模な浸水被害が生じた事例であり、事例 1 では埼玉県南部を中心に、事例 3 では神奈川県の大船や藤沢を中心に浸水被害が生じた。

今回用いたレーダサイトの位置と一定高度風の平均化

表 1 事例リスト
 Table 1 Analysis cases.

事例	日付	Notes
1	2009 年 10 月 7 日	埼玉県東南部 (鳩ヶ谷・川口市等) で浸水被害
2	2010 年 9 月 8 日	神奈川県西部で豪雨。東京都などでも浸水被害
3	2004 年 10 月 8 日	神奈川県中南部 (大船・藤沢等) で浸水被害

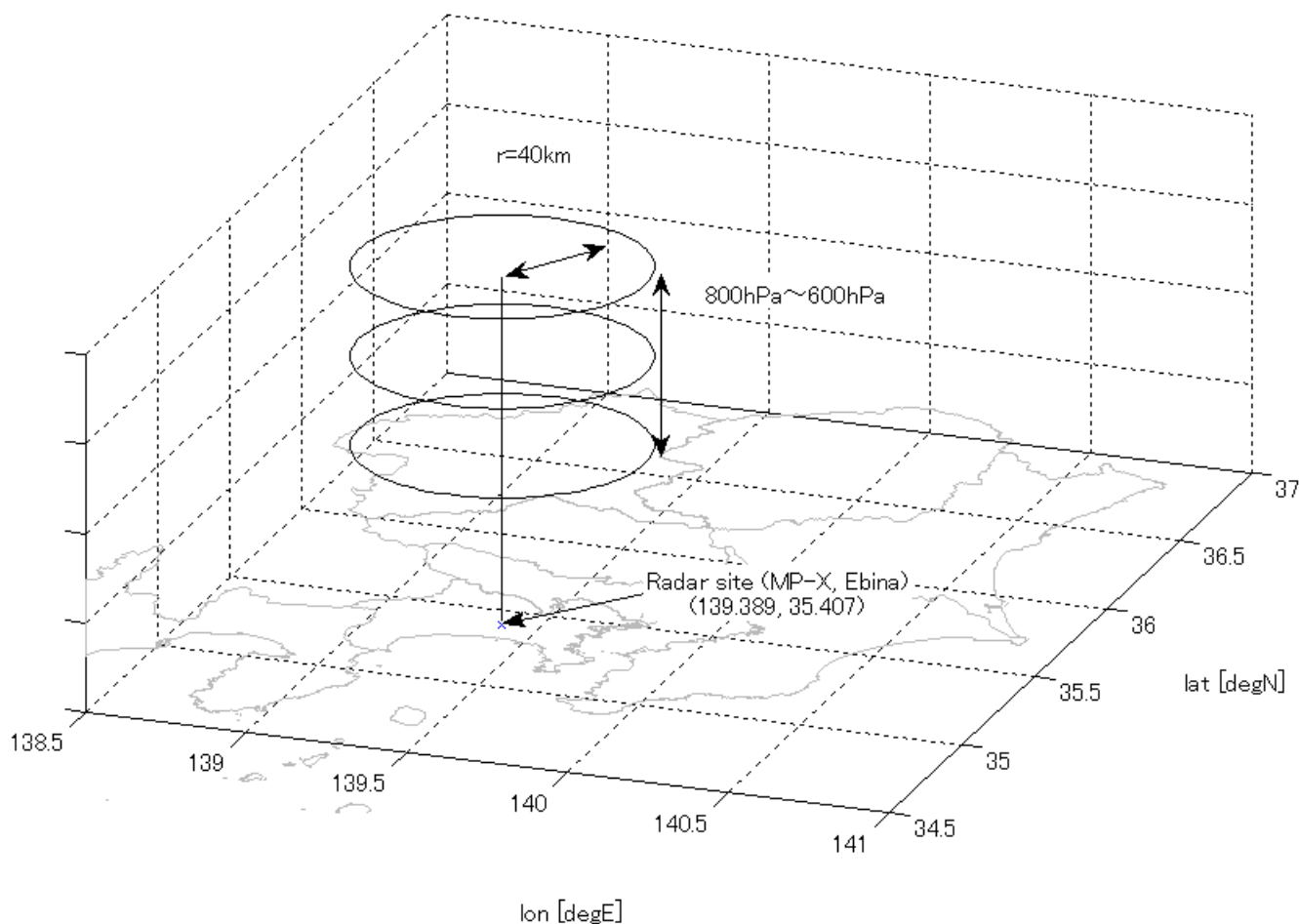


図 2 海老名レーダサイトの位置と一定高度風の平均化範囲
 Fig. 2 Position of Ebina radar site and range of average of constant altitude wind.

範囲を図 2 に示す。レーダは神奈川県海老名市に設置してあり、観測範囲は半径 80 km の円内である。一定高度風の平均化範囲は半径 40 km の円内とした。

図 3 に事例 1 における相関法による移動ベクトル推定値と MSM の計算開始時間(解析値)との比較を示す。図によれば、移動ベクトルの大きさは 700 hPa 高度との相関がよく、移動ベクトルの角度は 600 hPa との相関がよいことがわかる。大きさが 700 hPa との相関が強いことは先行研究と一致するが、ばらつきも大きい。さらに角度のばらつきも大きくなってしまふ。一方、角度の相関がよい 600 hPa は大きさのバイアスはあるもののそのばらつきが小さい。今回の手法では相関法によるバイアスの補正を行うため、角度のばらつきの小さな 600 hPa の平均風を用いた。

次に移動ベクトル推定結果について示す。図 4 は、事例 1 における各段階の推定結果である。図 3 (a) は Mv1 の結果であるが、異常に大きなものが含まれていないこと、探索範囲が Mv1 の変動とよく対応していることなど、探索領域の指定がうまくいっていることを示している。ただ、ばらつきが多い時間帯 (A) があることや時系列でみて不自然な外れ値 (B1, B2, B3) がみられるなどがあり、この

処理だけでは不十分であることもわかる。図 4 (b) は品質管理とバイアス補正された MSM 風 MSM_WV_2 による補完処理がなされた移動ベクトル Mv4 を示す。図 3 (a) の外れ値 B1, B2, B3 がうまく除去できている、保管データが上手くつながっている、などの特徴がみられる。最後に図 4 (c) に最終的な Mv の値を示した。A1 や A2 の変動がおさまっている。このばらつきは短時間変動と推定誤差の両者が含まれた変動と考えられる。また、図 5 に角度も含めた結果を示す。両者とも連続的な推定ができて

いる。
 図 6 に事例 2 の結果を示す。事例 2 では Mv1 の段階で連続した推定ができており、探索領域の限定だけでかなりの効果があった。また、12 時を過ぎた時点で角度の連続性が悪くなっている。この原因に関しては考察で議論する。

図 7 に事例 3 の結果を示す。事例 3 では 10 月 9 日 6 時以前は Mv1 の段階で最終的な Mv に近い推定ができていたものの、6 時以降の Mv1 はかなり大きな変動をしており、とくに角度の変動が著しい。最終的な Mv ではこれら変動はなくなっており、安定した時系列が得られている。

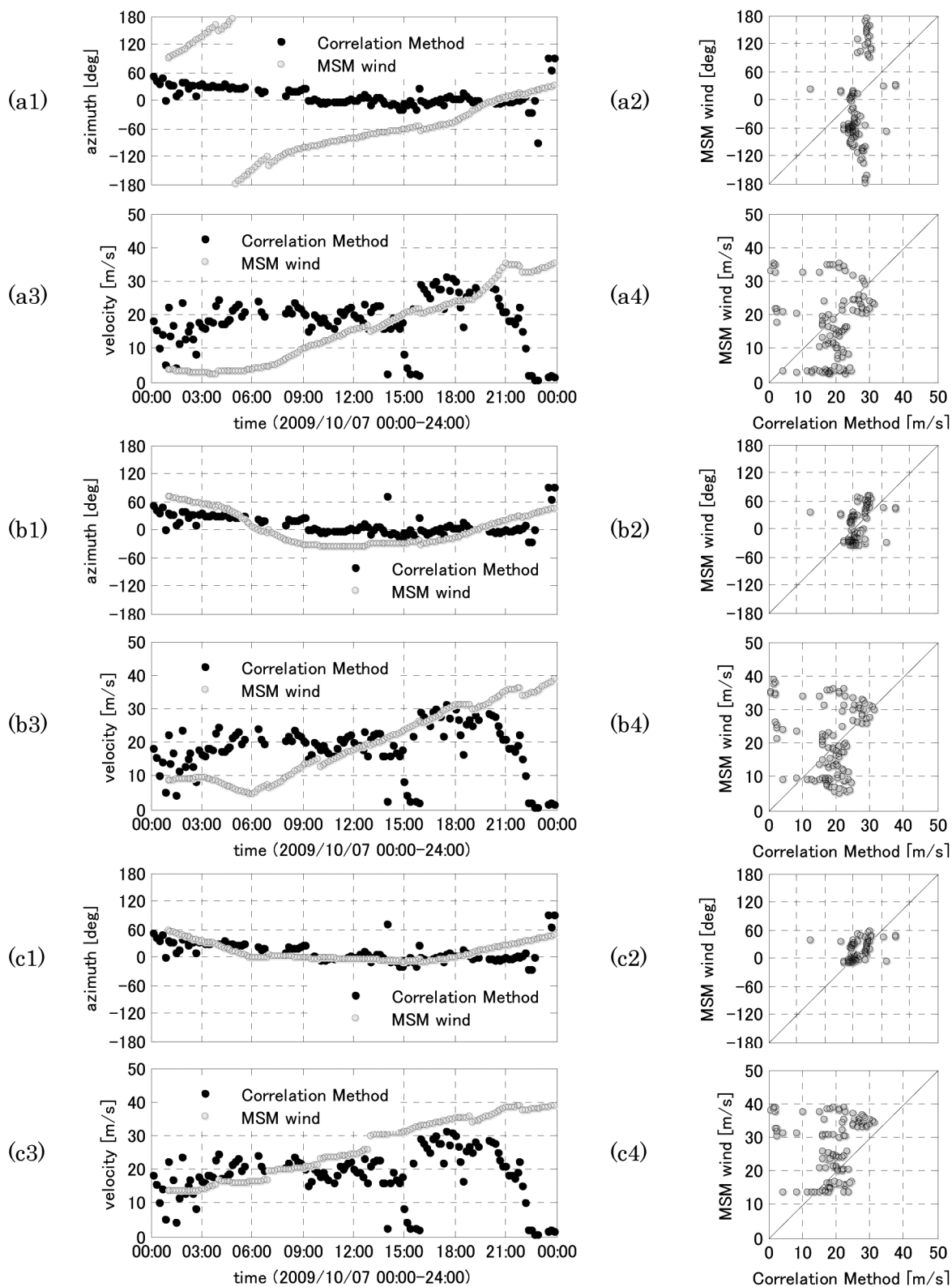


図3 相関法により推定された移動ベクトルとMSM平均風。(a1)～(a4)は800 hPa高度であり、(a1)は相関ベクトルとMSM平均風の角度時系列、(a2)はその相関、(a3)は大きさの時系列、(a4)はその相関である。また、(b1)～(b4)は700 hPa高度、(c1)～(c4)は600 hPa高度である。

Fig. 3 Moving vector estimated by correlation method and MSM wind on constant altitude. MSM is a mesoscale model developed and operated by Japan Meteorological Agency.

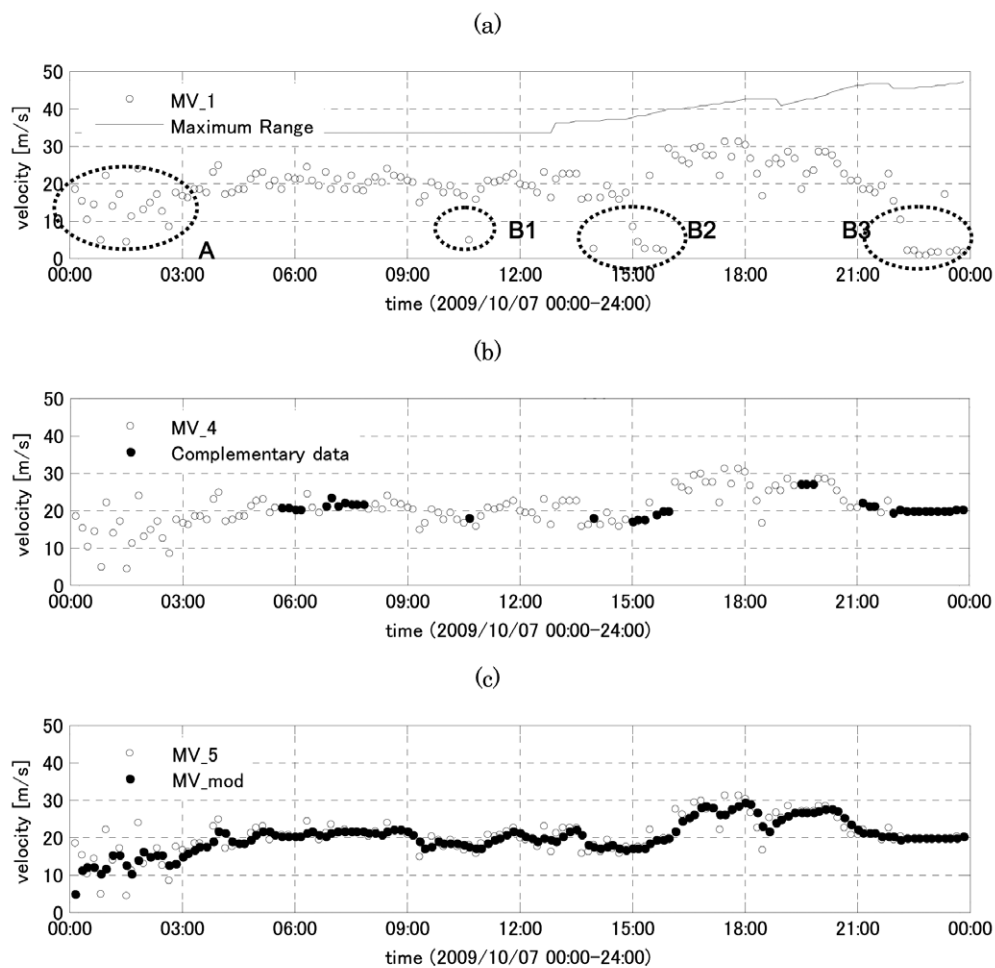


図 4 事例 1 の移動ベクトル
Fig. 4 Moving vector for case 1.

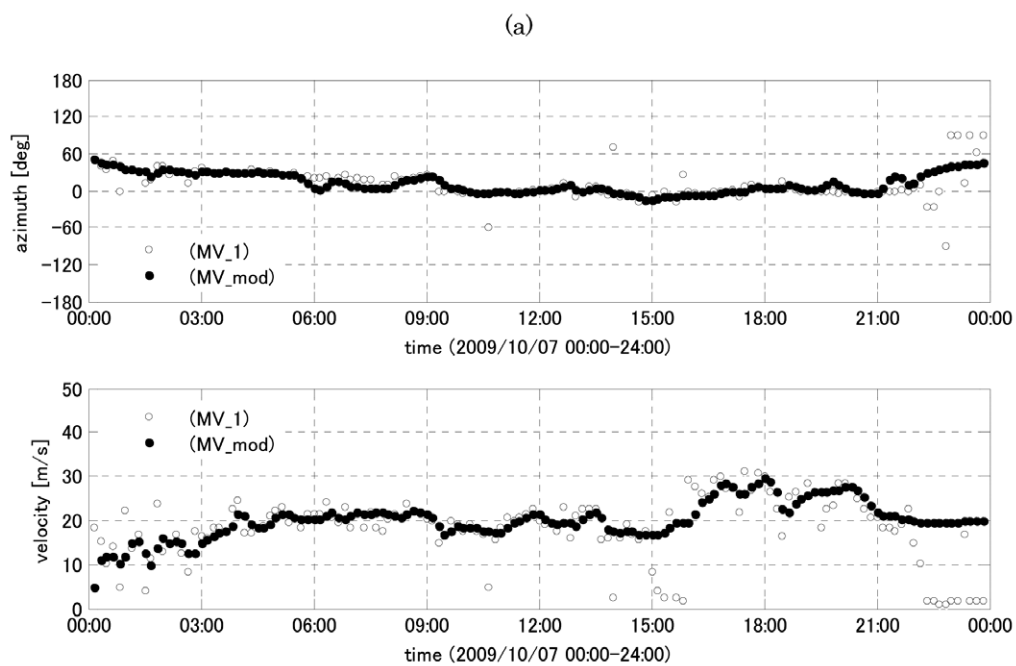


図 5 単純な相関法と本手法の比較(事例 1)
Fig. 5 Comparison of a simple correlation method and the proposed method.

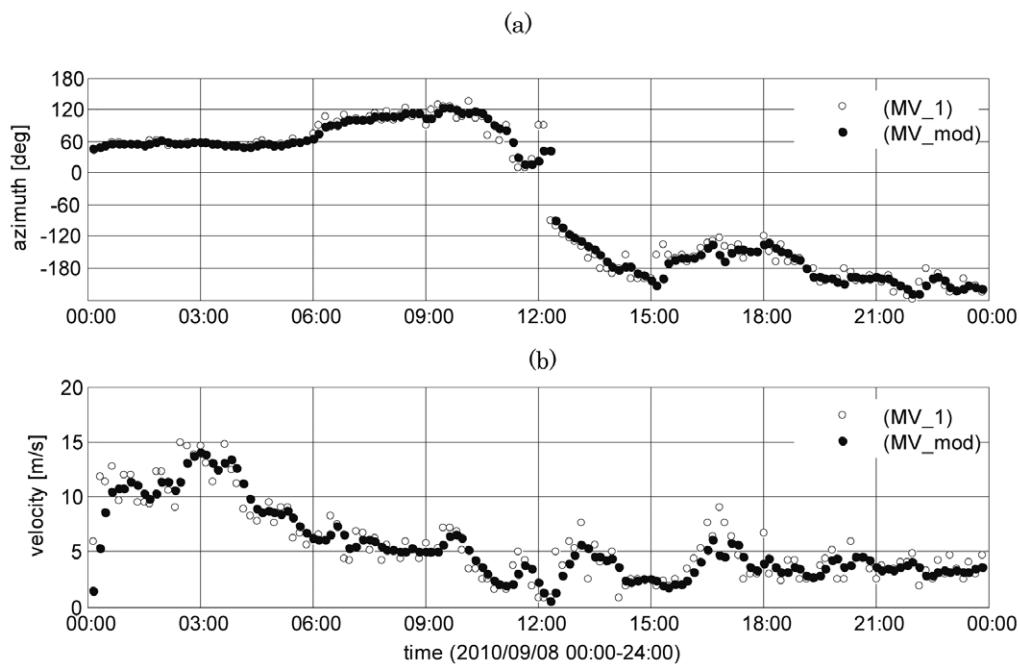


図6 図5に同じ。ただし事例2
Fig. 6 Same as Fig.5 but for case 2.

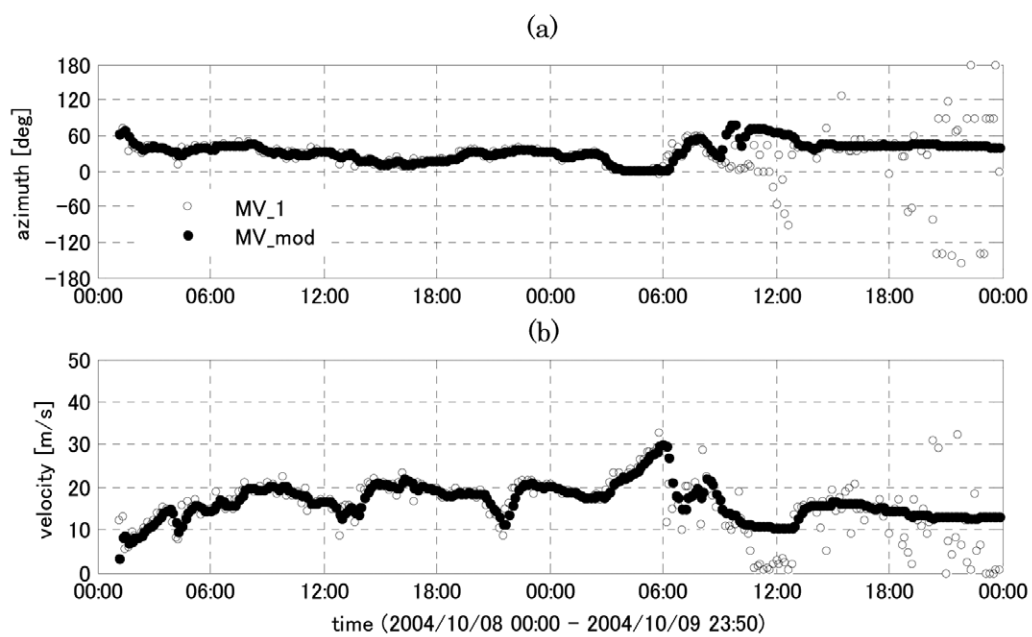


図7 図5に同じ。ただし事例3
Fig. 7 Same as Fig.5 but for case 3.

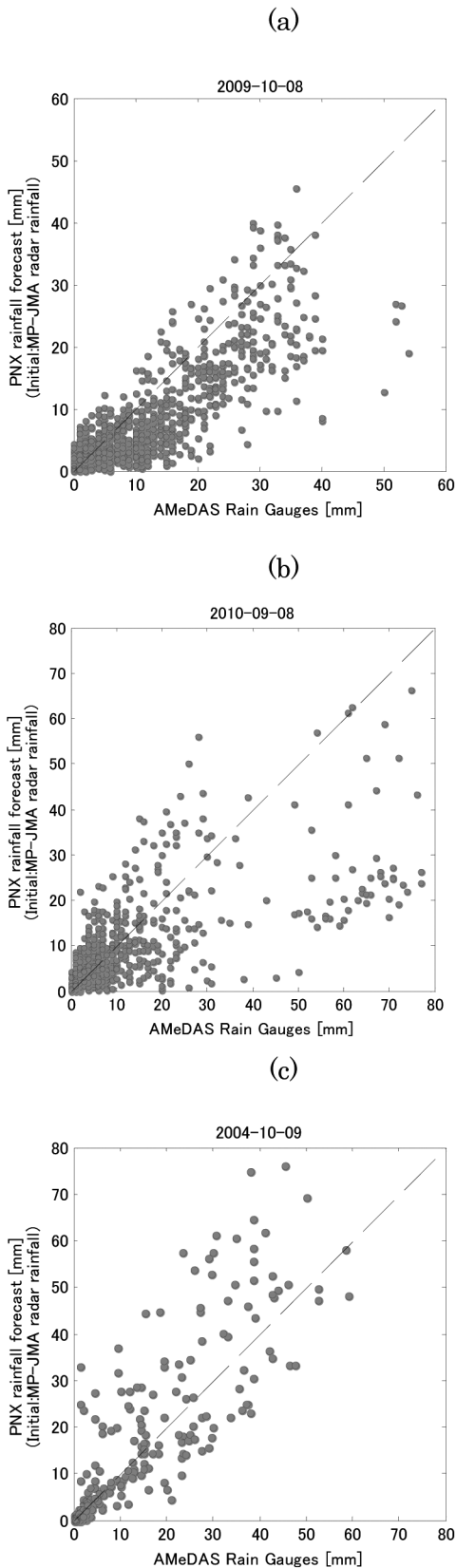


図 8 地上雨量計を用いた検証結果
 Fig. 8 Comparison of forecasts with surface rain gauge measurements.

図 8 に予測結果の地上雨量計による検証結果を示す。図 8 (a) によれば、事例 1 ではやや過小評価であるがよく一致している。事例 2 では全体としてはよい結果が得られているが、予測精度がよくないときがある。事例 3 ではよい一致がみられた。

4. 考察

図 6 (a) によれば、2010 年 9 月 8 日の 12:00 前後で移動ベクトルの変化が不連続になっていた。ここではその原因について考察してみる。同時刻の移動速度は 1 ~ 3 m/s 程度であり、全事例のなかで最も速度の遅い時間帯であった。相関法は移動速度が遅い場合、レーダ情報の分解能の影響、つまり量子化誤差の影響が大きくなる。すなわち、相関法は移動速度がゼロに近い場合、誤差が生じやすいといえる。一方、風向風速法の誤差は、一般風が弱い場合、風による移流よりも世代交代等の時間発展による移動が大きくなる場合が多いと考えられる。つまり風向風速法も移動速度がゼロに近い場合、誤差が生じやすい。このように両者を結合しても、移動速度が遅い時間帯は精度が悪くなる可能性がある。また、移動速度が遅い場合、積算雨量が大きくなり、防災上重要な時間帯になることがある(例えば, Kato and Maki, 2009)。そのため、このような両手法の精度が悪い場合の予測については今後検討する必要がある。

事例 1 と事例 3 の検証結果がよいことは、今回の手法により良好な移動ベクトルが得られたことを裏付けていると考えていいだろう。ここでは、手法の各段階がどのように全体の精度を向上させているのかについて誤差要因を分けながら議論してみる。推定法が持つ誤差を統計的特徴から分類してみると、ランダムな誤差、外れ値、バイアスにわけられる。ランダム誤差の原因としては、降水システムの短時間変動、観測誤差やノイズ、レーダ分解能による誤差などが考えられるが、この誤差については時系列処理によってある程度除去できていると考えられる。次に外れ値についてであるが、その原因として、類似エコーの存在や特徴的なエコーがない、ということが考えられる。まず、類似エコーが計算領域に存在してしまうこと、つまり同一のエコーではないのに有意な相関が得られる誤推定が生じてしまうことについては、探索領域の限定とともに、相関係数の閾値以外の品質管理(時系列処理、バイアス補正された MSM との偏差)により除去できていると考えられる。一方、特徴的なエコーが少ないことによる誤差は、相関係数の閾値による品質管理で除去できている。最後にバイアスによる誤差であるが、相関法では常に移動ベクトルを最新の情報を用いているため、変化に対する時間遅れを除いて、その影響は小さいと考えられる。また、風向風速法のバイアスについては相関法によるリアルタイム補正により補正されていると考えられる。このように、複数の効果の組み合わせとして、精度が改善されていると考えられる。これら効果の定量的な寄与については、今後詳細な議論が必要であろう。

5. まとめ

降水ナウキャストの精度向上を目的として、相関法と数値気象モデル予測風を組み合わせ移動ベクトルを推定する手法を提案した。提案した手法を当研究所で開発されたMPレーダナウキャストシステムへ組み込み、移動ベクトル誤差が生じやすい台風事例へ適用した。その結果、移動ベクトルが安定して推定できることが示されるとともに、予測結果を地上雨量計で検証した結果、いずれの事例においてもよい精度で予測できることがわかった。

都市型水害の軽減には、このような定量的に精度が高い予測情報が必要であり、今後、都市部における洪水モデルおよび氾濫モデルへの適用が期待される。

謝辞

報告書とりまとめにあたって、水・土砂防災研究部の真木雅之部長をはじめ、多くの方々にご助言・ご助力をいただいた、感謝いたします。

また、解析作業に際して、三菱スペースソフトウェア小堀氏、山本氏にご協力をいただいた。さらに、閲読者の方には貴重なご意見をいただき感謝いたします。編集担当の樋山さんには文章校正等お世話になりました。

参考文献

- 1) Bringi, V. N. and Chandrasekar, V. (2001) : Polarimetric Doppler Weather Radar. Cambridge University Press, 636.
- 2) 防災科学技術研究所(2002) : 2000年9月東海豪雨災

害調査報告.

- 3) 防災科学技術研究所(2010) : 平成21年7月中国・九州北部豪雨災害調査報告.
- 4) Fukuoka, S. and Tanioka, Y. (2005) : Rainfall loads in flood-control project for urban areas, Proceedings of the 3rd International Symposium on Flood Defence (Nijmegen, Netherlands), 153-160.
- 5) 加藤 敦, 真木 雅之, 岩波 越, 三隅 良平, 前坂 剛(2009) : Xバンドマルチパラメータレーダ情報と気象庁レーダ情報を用いた降水ナウキャスト. 水文・水資源学会誌, **22-5**, 372-385.
- 6) Kato, A. and Maki, M. (2009) : Localized Heavy Rainfall Near Zoshigaya, Tokyo, Japan on 5 August 2008 Observed by X-band Polarimetric Radar – Preliminary Analysis –, SOLA., **5**, 89-92.
- 7) Pierce, C. E., Ebert, E. E., Seed, A., Fox, N., Sleigh, M., Collier, C. G., Donaldson, N., Wilson, J., Roberts, R., and Mueller, C. (2004) : The Nowcasting of Precipitation during Sydney 2000, An Appraisal of the QPF Algorithms. Wea. Forecasting., **19**, 7-21.
- 8) Seed, A. (2003) : A Dynamic and Spatial Scaling Approach to Advection Forecasting. J. Appl. Meteor., **42**, 381-388.
- 9) Wilson, J.W., Crook, N. A., Mueller, C. K., Sun, J., and Dixon, M. (1998) : Nowcasting Thunderstorms: A Status Report. Bull. Amer. Meteor. Soc., **79**, 2079-2099.

(原稿受理 : 2011年1月18日)

要 旨

都市型水害の軽減のために降水ナウキャスト手法は有効である。しかしその精度は実用的に十分ではない。そのため、降水ナウキャストの精度向上を目的として、相関法と数値気象モデル予測風を組み合わせ移動ベクトルを推定する手法を提案した。提案した手法を当研究所で開発・運用されている MP レーダナウキャストシステムへ組み込み、3つの台風事例に適用した。地上雨量計で検証した結果、いずれの事例においてもよい精度で予測できることがわかった。

キーワード：降水ナウキャスト，移動ベクトル，MPレーダ，偏波レーダ，都市型洪水