

降雨スケールに着目した 運動学的予測手法の開発

田中 裕介・高田 望

株式会社気象工学研究所 技術グループ (〒550-0003大阪府大阪市西区京町堀1-8-5)

XバンドMPレーダ観測は高頻度・高解像度が特長である。これを活用した運動学的降雨予測手法の開発を行なった。降雨強度分布を、ウェーブレット変換を用いて、水平方向の広がりがある16 kmより小さい成分（小スケール）と大きい成分（大スケール）に分離し、個別に運動学的な移動予測を行なった後に合成して、予測降雨分布を求めた。この手法では、従来の手法と比較して、小スケールの移動予測が改善し、降雨予測精度が向上することがわかった。

さらに、より予測精度を高めるために、小スケールの降雨の発達・衰弱を取り込む手法について検討を行ない、発達・衰弱に関する概念モデルを作成した。

キーワード XバンドMPレーダ, ゲリラ豪雨, 降雨予測

1. はじめに

都市域での突発的な豪雨の監視を目的として、国土交通省が試験運用中のXバンドMPレーダ (X-MPレーダ) は、従来 (Cバンドレーダ) よりも高精度かつ高解像度な雨量観測が可能である。この観測データによって、突発的な豪雨を発生直前 (5分~10分前) に予測することができるようになってきている。防災・減災のためには、豪雨の発生前、発生した豪雨の到達前に対策を講じることが重要である。このことより、高精度な短時間 (30分~1時間) の降雨予測も重要となる。

本稿では、X-MPレーダの観測データの特長を活用した、従来よりも精度の高い運動学的降雨予測手法の検

討・開発について報告する。また、より予測精度を高めるために、降雨強度の時間変化を取り込む手法についての基礎検討についても述べる。

なお、本開発は、国土交通省XバンドMPレーダに関する技術開発コンソーシアムのメンバーとして行なっているものである。開発に用いたX-MPレーダの観測データは、コンソーシアムを通じて配信されたものである。

2. 降雨スケールと降雨現象の特徴

低気圧や前線が通過すると、数十~数百 km の広い範囲で、数時間~十数時間、しとしとと雨が降り続く。一

表-1 大スケールと小スケールの降雨現象の特徴

	小スケールの降雨現象	大スケールの降雨現象
降雨スケール	数 km ~ 数十 km	100 km 程度以上
時間スケール	数十分 ~ 数時間	10 時間程度以上
現象例	集中豪雨, 局地的大雨	前線, 低気圧に伴う雨
降雨の原因	積乱雲	前線, 低気圧などに伴う雨雲
降雨強度	100mm/hr を超すこともある	多くの領域では 20mm/hr 以下
雨域の移動	大気中層と下層 (高度 1500 m 以下) の風・温度分布などの影響を受ける	大気中層 (高度 1500 m ~ 5000 m) の風向・風速におよそ従う
降雨の発達衰弱	数 km ~ 数十 km の風や気温などの分布と大気の安定性など様々な影響を受ける	低気圧や前線の発達に伴う

方で、夏の夕立ちは、数 km 程度の狭い範囲で、数十分程度の短い時間、バケツをひっくり返したような非常に強い雨が降り、極端な場合はいわゆる「ゲリラ豪雨」となって災害をもたらす。このように、降雨現象はその降雨域の水平方向の広がり（降雨スケール）によって、雨の降り方や持続時間などの特徴が大きく異なる。

降雨現象を、降雨スケールが数十 km よりも大きいもの（大スケール）と小さいもの（小スケール）に分類し、特徴をまとめると表-1のようになる。本開発では、まず、両者の移動特性の違いに着目した。気象庁の降水ナウキャストを含む従来の短時間降雨予測では、移動特性の違いは考慮されていない。強い雨をもたらす小スケールの移動の予測精度が上がれば、降雨予測の精度向上に大きく寄与する。

次に、両者の時間スケールの違いに着目した。大スケールは時間スケールが長いので、1時間程度であれば、降雨強度の変化は重要でない。一方で、小スケールの時間スケールは数十分程度なので、降雨強度の時間変化を考慮することでさらなる精度向上が図れる。

これらより、観測された降雨強度分布を、大スケールと小スケールに分離することができれば、それぞれに移動予測、発達・衰弱予測を行なって、降雨予測の精度を向上させられる。

3. 降雨スケールに着目した運動学的予測手法の検討

2章で述べたことから、観測された降雨強度分布を、大スケールと小スケールに分離して予測を行なう手法を検討・開発した。開発した予測手法の流れを図-1に示す。

(1) 用いたデータ

予測には、X-MPレーダの合成雨量強度分布を用いた。六甲、田口、葛城、鷲峰山の4レーダのデータが用いられており、精度のよい降雨強度分布が得られていることから、近畿地方を対象とした。水平の解像度は250m、データ間隔は1分である。データは、XバンドMPレーダに関する技術開発コンソーシアムを通じて配信されたものである。

(2) 降雨強度分布の分離手法の検討

降雨強度分布の分離にはウェーブレット変換を用いた。ウェーブレット変換とは、フーリエ変換と同様の周波数解析の一手法であり、任意の地点の周辺における降雨強度分布を、水平の広がりが1kmの成分、2kmの成分、4kmの成分、…、と分解することができる。

降雨強度分布をウェーブレット変換し、ある閾値スケール（分離スケール）よりも小さいスケールの成分のみを足し合わせて、分離スケールよりも小さい成分のみの

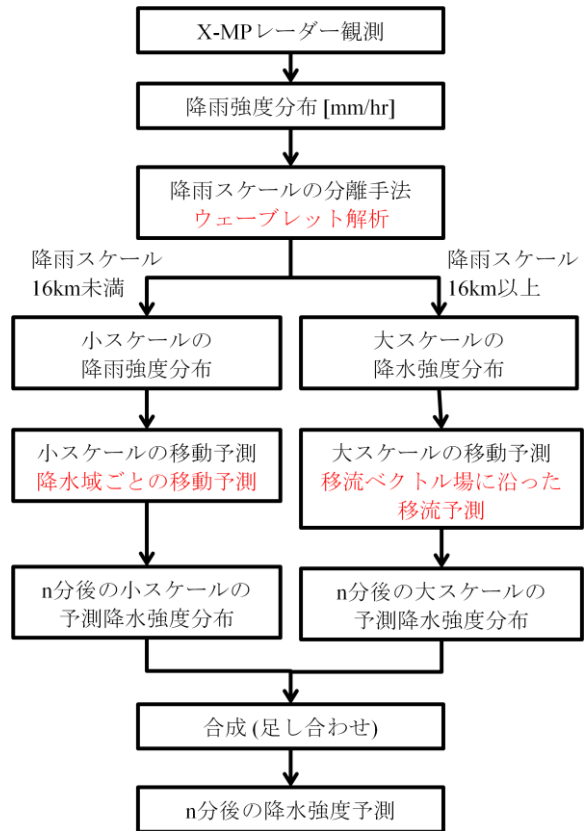


図-1 開発した予測手法の流れ

降雨強度分布を抜き出したものを、小スケールの降雨強度分布とする。観測から小スケールを除くことで、大スケールの降雨強度分布を求めた。

分離スケールは、16kmで固定とした。この値は、表-1の大スケールと小スケールの境界が、気象学的にはおよそ20kmであるとされていることとも整合している。

(3) 降雨スケールに適した運動学的予測手法の検討

分離したそれぞれの降雨強度分布に対して運動学的手法によって予測を行なうことで、降雨スケールによる雨域の移動の違いを考慮する。それぞれのスケールでは、雨域の広がりや移動の特性が異なるので、それぞれに適した移動予測手法を検討した。

a) 小スケールの予測手法

小スケールの降雨は積乱雲によってもたらされ、降雨域の移動は積乱雲の移動とほぼ同じである。まず、一つの積乱雲のかたまりに相当する降雨強度0 mm/hrの線で囲まれた降雨域をひとつのかたまりとして、小スケールの分布を分割した。各かたまりについて、過去の分布と比較して移動ベクトルを算出した。比較には2分前と4分前の分布を用いた。算出にはパターンマッチング手法であるTRED法¹⁾を用いた。

各かたまりが、求めた移動ベクトルで予測期間中移動するものとして、時間的に外挿することで、小スケールの予測降雨分布を求めた。

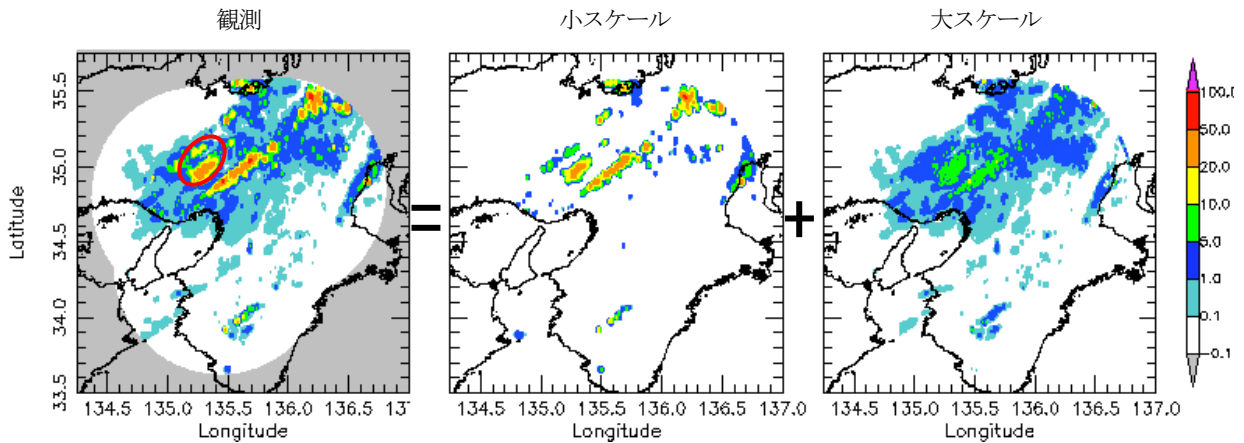


図-2 降雨強度分布 (左) , その小スケールの成分 (中) と大スケールの成分 (右) (2010年9月8日午前6時45分)

b) 大スケールの予測手法

大スケールの降雨は、およそ大気中層の風によって流されるので、まず降雨域が流される場(移流場)を推定した。推定は、予測領域を東西方向2×南北方向2の4領域に分割し、それぞれの領域で降雨域の移動ベクトルを求め、その移動ベクトルが各領域の中心点での移流ベクトルとして、空間的に内挿する手法を用いた。ベクトルの推定には、5分前と10分前の分布を用いた。

求めた移流場が予測期間中持続するものとして、現在の大スケールの降雨分布を移流場に沿って移動させて、大スケールの予測降雨分布を求めた。

(4) 予測降雨分布の合成

小スケールと大スケールの予測降雨強度分布の合成方法は、単純な足し合わせとした。

4. 適用例と予測精度の検証

開発した降雨予測手法を実際の降雨に適用し、その適用性を確認した。また開発した手法による予測(分離

あり予測)を、降雨スケールに分離しない従来の降雨予測(分離なし予測)と比較して、予測精度を検証した。

(1) 2010年9月8日を対象とした検証

台風9号が日本海を進み、午前11時に福井県に上陸した際に、近畿地方で降雨があった例について予測を行ない、精度を検証した。

図-2は午前6時45分の観測と、それをウェーブレット変換を使って分離した小スケールと大スケールの降雨強度分布である。局地的な強い雨を小スケールの成分として抽出し、100 km程度の降雨スケールを持った降雨域と分けることができた。

図-3に午前7時15分の観測と、午前6時45分初期時刻の30分先予測(分離ありと分離なし)を示す。図-2(左)に丸で囲んだ強雨域の移動に注目すると、観測では東に移動、移動方向前方にあった別の強雨域と合体し、図3(左)に示す分布となった。分離あり予測では、観測と同様の移動と合体が予測された。一方、分離なし予測では強雨域が北東方向へ移動すると予測されており、前方の強雨域との合体も予測されていない。

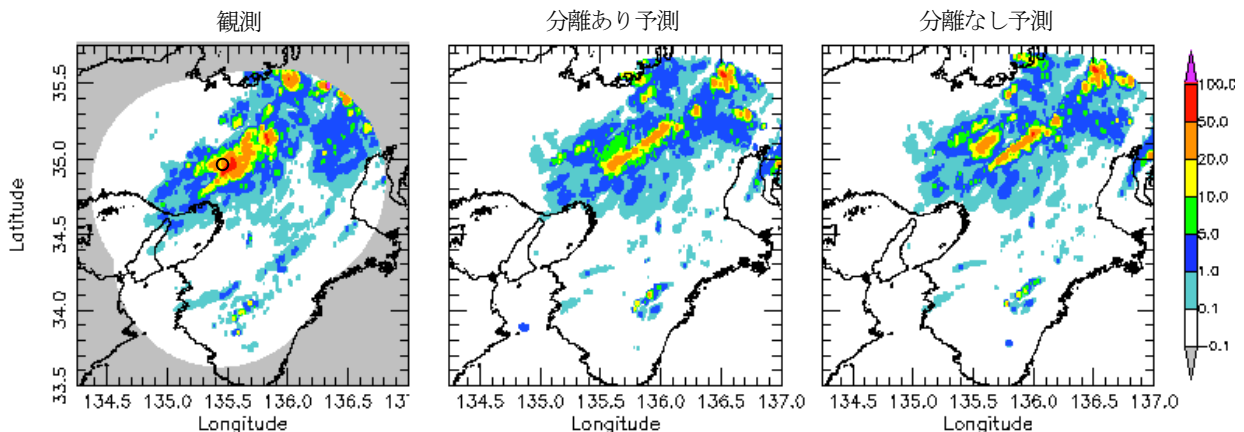


図-3 観測 (2010年9月8日午前7時15分) (左) , 分離あり予測 (中) と分離なし予測 (右) (初期時刻午前6時45分の30分先予測)

図-4は、注目した強雨域の移動経路上にある能勢のアメダス観測点(図-3(左)に丸印で示す)での雨量計観測と、観測点直上メッシュでのX-MPレーダ観測、午前6時45分を初期時刻とした分離ありと分離なしの予測結果の時系列である。分離なし予測では、10分先以降過小予測だが、分離あり予測では、25分程度先までは観測と良好一致を示した。

神戸、大阪、京都を含む領域(東西約150km×南北約150km)でのRMS誤差を比較したのが図-5である。小スケールの移動予測が改善することで、特に30分程度先までは誤差が小さくなっており、領域全体で予測精度の向上が確認された。

(2) 複数事例での予測精度の検証

表-2に示す6事例38予測について図-5と同様の検証を行ない、平均した結果が図-6である。分離あり予測は分離なし予測と比較して誤差が小さいものの、図-5ほど顕著ではない。この理由は、小スケールの移動予測が改善されたことによる予測精度の改善が、小スケールの降雨強度が存在する周辺の局所的な領域に限られることと、大スケールと小スケールの移動方向が一致する場合は効果が小さいことであると考えられる。

5. 降雨強度の発達・衰弱予測について

短時間降雨予測のさらなる精度向上のためには、移動方向の違いに加えて、小スケールの降雨の発達・衰弱を考慮することが重要である。ここでは、降雨の発達・衰弱を降雨予測に取り込む手法の基礎的な検討について述べる。

(1) 小スケールの降雨の発達・衰弱過程の調査

まず、小スケールの降雨の時間変化の特徴について調べた。調査の対象は、2012年5月29日の正午頃に大阪府を通過した局地的な雨である。12時過ぎに奈良県で発達した降雨について、降雨の時系列を図-7に示す。

この降雨強度の時間変化の特徴を、降雨域の大きさと降雨強度の変化から調べたものを、図-7(c)に示す。降雨域の大きさは、小スケールの降雨分布を分割した時の各かたまりの面積であり、降雨強度はそのかたまり内で平均した降雨強度である。実線は各かたまりの時間経過を、点線はかたまりが合体した時間経過を示す。発生した降雨は、面積が徐々に大きくなりながら降雨強度も強くなる。その後時間が進むにつれて次々と合体し、合体毎に降雨強度が強くなっている。

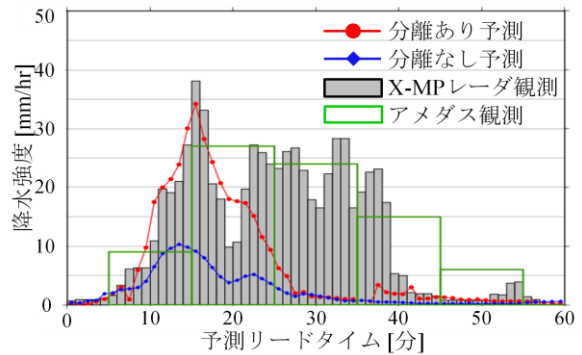


図-4 能勢のアメダス観測点における観測雨量と予測雨量の比較(午前6時45分から1時間の時系列)

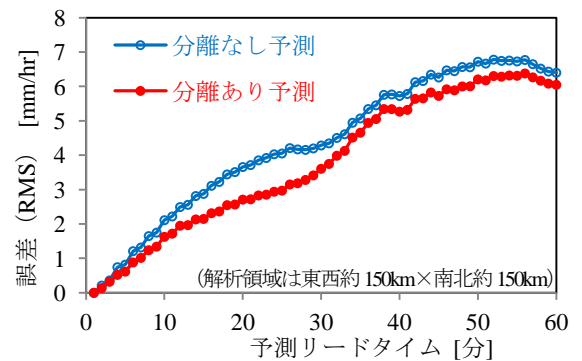


図-5 2010年9月8日午前6時45分初期時刻予測誤差(北緯34.2~35.5°, 東経134.7~136.2°で囲まれた領域でのRMS誤差)

表-2 予測精度の検証を行なった事例の一覧

No.	日時	時刻	予測数	降雨原因
1	2010.08.12	04:15-04:45	3	台風
2	2010.09.08	05:00-08:00	13	台風
3	2010.10.03	16:00-16:30	3	寒冷前線
4	2011.06.10	19:00-20:00	5	梅雨前線
5	2011.06.18	15:45-16:15	3	梅雨前線
6	2011.06.19	01:00-03:00	11	梅雨前線

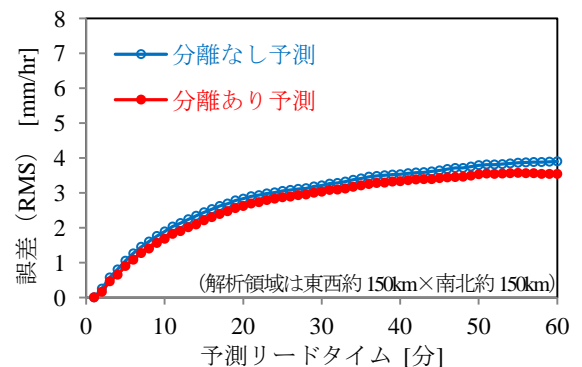


図-6 表-2の事例での平均予測誤差(領域は図-5と同じ)

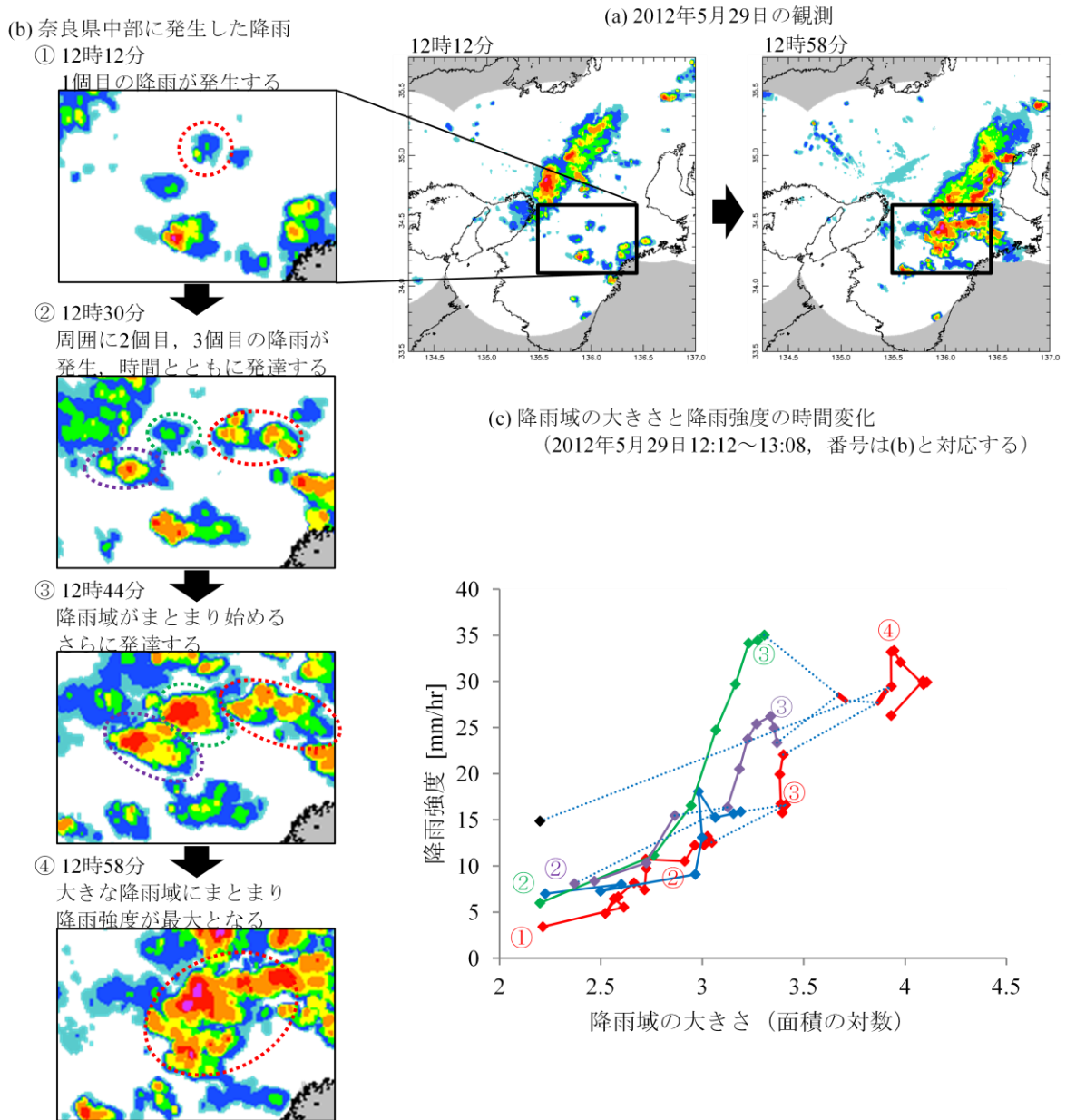


図-7 降雨の発達・衰弱過程を調査した事例 (2012年5月29日正午ごろ)

図-7に示した降雨域は組織化し強い降雨強度を示すようになったが、他の降雨を調べると、発生してある程度発達し組織化せずに衰弱する降雨も多くみられた。これらより、小スケールの降雨の発達・衰弱について、降雨域の大きさと降雨強度の関係を概念図で示すと図-8のようになる。小スケールの降雨は、発生後に「単一の降雨」で示したように、面積を徐々に大きくしながらまず短い時間で発達、ピークに達したのちにゆっくりと衰弱する、という灰色線の経路をたどる。図-7のように、周辺に同時に複数の降雨が発生するなどの条件が整えば、それらが合体することによって、「組織化した降雨」で示したように、降雨域の大きさが急激に大きくなり、また降雨強度がさらに発達する、という黒線の経路をたどる。

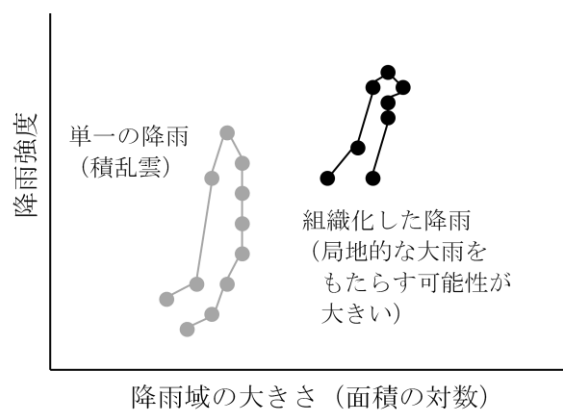


図-8 小スケールの降雨の発達・衰弱の概念図

表-3 積乱雲の発達に関連する物理量

物理量	必要なデータ	積乱雲の発達への影響
大気湿度 (水蒸気量) 分布	領域モデル (MSM) の予測値	湿度が高ければ ・降水量が多くなる (時間スケールが長くなる) ・降雨が発達しやすい
風の収束	AMeDASなどの観測値 領域モデル (MSM) の予測値	風が収束していれば ・降雨が発達しやすい ・降雨が組織化しやすい
大気安定度 (温度の高度分布)	領域モデル (MSM) の予測値	大気が不安定であれば ・降雨が発達しやすい ・降雨が組織化しやすい
風の高度分布	領域モデル (MSM) の予測値	風向・風速が高度とともに変化していれば ・降雨が発達しやすい

このような、小スケールの降雨の発達・衰弱モデルを構築し定量化することで、降雨強度の時間変化を短時間予測に組み込むことができる。

(2) 発達・衰弱の予測手法の検討

前節で構築した降雨の発達・衰弱モデルでは、単一の降雨の大きさや最大降雨強度、降雨の時間スケール、組織化する条件などのパラメータを決める必要がある。小スケールの降雨は主に積乱雲によってもたらされるため、積乱雲の発達のしやすさを評価することによって、これらのパラメータを決めることができると考えられる。表-3に、積乱雲の発達に関連する物理量と、それを予測に取り込むために必要なデータの例を示した。

これらのパラメータと降雨強度の関係性を検証することで、より精度の高い短時間降雨予測を行なうことができると考えられる。

6. おわりに

本稿では、X-MP レーダで得られる高頻度かつ高解像度な観測データの特長を生かすことができる短時間降雨

予測手法の開発について述べた。ウェーブレット変換を使って、降雨強度分布を小さい降雨スケールと大きい降雨スケールをもった成分に分離し、それぞれを運動学的手法によって移動予測することで、降雨スケールによる降雨域の移動の違いを考慮でき、予測精度が向上することが分かった。

予測精度をさらに上げるために、時間スケールの短い小スケールの降雨の発達・衰弱を、短時間降雨予測手法に取り入れるための基礎的な検討結果についても述べた。今後は、引き続き検討を進め、降雨予測システムへの実装を進めていく。

謝辞: 本開発を行なうに当たって使用した Xバンド MP レーダの観測データは、Xバンド MP レーダに関する技術開発コンソーシアムを通じて提供していただきました。

参考文献

- 1) Laroche, S., and I. Zawadzki, 1995: Retrievals of Horizontal Winds from Single-Doppler Clear-Air Data by Methods of Cross Correlation and Variational Analysis. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **12**, 721-738.