

2次元セル追跡手法に基づいた高詳細レーダ 降雨情報による短時間降雨予測手法の開発

DEVELOPMENT OF SHORT-TERM RAINFALL PREDICTION METHOD
USING HIGH RESOLUTION RADAR RAINFALL INFORMATION
BASED ON TWO-DIMENSIONAL CELL TRACKING METHOD

山路昭彦¹・増田有俊²・中北英一³

Akihiko YAMAJI, Aritoshi MASUDA and Eiichi NAKAKITA

¹正会員 工修 一般財団法人日本気象協会 技術戦略室
(〒170-6055 東京都豊島区東池袋三丁目1-1)

²正会員 工博 一般財団法人日本気象協会 関西支社
(〒542-0081 大阪市中央区南船場二丁目3-2)

³正会員 工博 京都大学防災研究所教授 気象・水象災害研究部門
(〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

For flood control measures in urban areas caused by sudden localized torrential rain, highly accurate rainfall prediction is very useful even in 10 minutes ahead, but it has been difficult for a long time to predict localized and rapidly developing rainfall by conventional methods. However, the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism's XRAIN, which enables high-frequency and high-resolution observation, changed the situation drastically. This paper shows that local heavy rain can be predicted with high accuracy by newly developing a method to consider individually moving speed and direction, and development and weakness for individual cumulonimbus clouds. This method is expected to contribute to the reduction of heavy rain disasters in urban areas, such as the support of rainwater removal operations in sewerage systems, and to develop in cooperation with the early detection method of heavy rain eggs.

Key Words : cell tracking, rainfall prediction, polarimetric radar, localized torrential rainfall, urban flood, XRAIN

1. はじめに

2008年7月28日には、神戸市を流れる都賀川で突然の雨により水位が急上昇し、川の近くで遊んでいた子供を含む5名が死亡した。そのわずか8日後の2008年8月5日、今度は東京都豊島区雑司が谷の下水道工事現場で、作業をしていた男性5人が豪雨による急な増水で流されて死亡した。都市域では降雨が土壌に浸透しにくく、短時間で河川や下水道、あるいは道路上の低地に流れ込むため、雨が降り始めてから被害が起こるまでの時間が非常に短いことが特徴として挙げられる。このような被害を軽減するためには、少しでも早く正確な降雨情報を防災担当者あるいは個人に伝える必要がある。

この2008年の水難事故が契機となって、国土交通省水

管理・国土保全局では、局地的豪雨の実況監視強化のためにXバンドMPレーダの配備を進めることになり、現時点では全国に39基のレーダが展開されている。ここで、MP（マルチパラメータ）とは二重偏波機能を表しており、国土交通省のXバンドMPレーダはXRAIN（X-band Polarimetric RAdar Information Network）と呼ばれている。XRAINでは、高頻度（1分、従来は5分）、高分解能（250m、従来は1km）、偏波機能による高精度の観測が実現されており、都市域における局地的豪雨の実況監視能力が大きく向上している。

降雨観測に基づいた警戒情報を提供する場合、観測から警戒情報の作成及び伝達に要する時間を考慮すると、たとえ10分先であっても、高精度な予測情報を提供することができれば、人命を救うという観点において非常に役に立つことが指摘されている²⁾。

目先の2～3時間先までの降雨予測としては、過去の雨雲の動きに基づいて予測時点の降雨の平面分布を移動させて外挿予測する運動学的手法が従来から用いられてきた。従来手法では、雨域の発達・衰弱をうまく考慮できないこと及び予測時点の降雨分布がレーダ観測値であるため量的な精度が不十分で地上雨量による補正が必要であることが課題であった。

そのような状況の中、時間的にも空間的にも解像度の高いXRAINの登場により、個々の積乱雲（以降、降水セルと呼ぶ）を識別し追跡することが可能となった。また偏波機能により高精度なレーダ観測値を得ることが可能となった。

本研究では、都市域の豪雨を意識し、30分程度先までの降雨予測手法の高度化を目的としている。本研究の特徴は、「30分程度であれば積乱雲の寿命内であり、運動学的手法をベースとした手法が適用可能であること」、「XRAINの登場により、個々の降水セルの識別と追跡が可能となったこと」に着目し、従来手法では局地的かつ急激に発達する降雨を予測することは長い間困難であった課題の解決を試みた点にある。すなわち、個々の降水セルに対して個別に移動速度・方向、発達・衰弱を考慮する手法を新たに開発することで局地的豪雨を高精度に予測できることを示すことを目的としている。

2. 降水セルの抽出・追跡

(1) 降水セルの抽出

1分間隔のXバンドMPレーダ雨量を用いて、客観的に降水セルの抽出を行った。対流性の降水セルの定義としては、レーダ反射強度の閾値を30～40dBZ（降雨強度換算では4～20mm/h）程度とすることが多い。この閾値が小さいほど、早期に降水セルを検知することが可能であるが、複数のセルが組織化した場合などにセルの抽出・追跡が困難となる。本研究では、より早くセルを検出するために降雨強度3mm/h以上の領域をセルと定義した。1つのセルは、1つ以上の辺で接続している3mm/h以上の格子の塊とし、5km²以上の面積を有するものと定義した。降水セル抽出の概念を図-1に示す。セルの重心位置 $(\bar{x}, \bar{y})$ は、式(1)により算出した。

$$\bar{x} = \frac{\sum_{k=1}^n x_k R_k}{\sum_{k=1}^n R_k}, \quad \bar{y} = \frac{\sum_{k=1}^n y_k R_k}{\sum_{k=1}^n R_k} \quad (1)$$

ここで、 R_k はメッシュ k における降雨強度を、 x_k, y_k はメッシュ k の座標を、 n はセルを構成するメッシュの数を示す。発達した雨域では複数のセルを包括した大きな領域を1つのセルとして認識してしまうため、面積の大きなセルについては、そのセル内において20mm/h以上の差を持つピークが複数存在すれば別個のセルとして分割する手法³⁾を適用した。

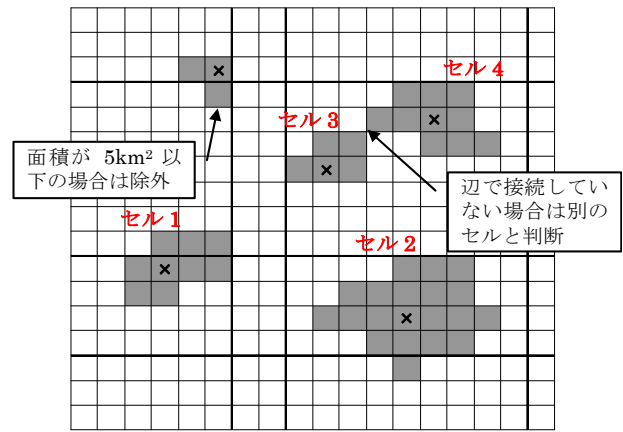


図-1 降水セル抽出の概念図

(2) 降水セルの追跡

従来から存在する国土交通省や気象庁のレーダ雨量は5分もしくは10分間隔でしか得られなかった。個々のセルの形状は5分間で大きく変化することがあるため、セルを正しく追跡することは困難であった。XバンドMPレーダは、1分間隔で雨量分布を得ることができるため、降水セルの追跡精度が格段に向上することが期待できる。本研究では、TITAN⁴⁾を参考に、時刻 t におけるセル i と時刻 $t+\delta t$ におけるセル j の類似度を判定する指標（セル類似指標と呼ぶ）を導入することでセルの追跡を行った。セル類似指標（ C ）の定義は式(2a)～式(2c)に示すとおりであり、 D はセル間の距離を、 A はセルの面積差（平方根をとることで距離の次元に合わせている）を表す。添字の i は現時刻のセル（例えば5つのセルが存在する場合は、 $i=1\sim 5$ ）を、 j は前時刻のセルを表す。 $\bar{x}$ 及び $\bar{y}$ はセルの重心位置を、 S はセルの面積を表す。 w_1 と w_2 は重み係数でどちらも0.5とした。セル類似指標は、現時刻と前時刻のセル重心位置の距離と面積差を計算しており、この値が最も小さいセル i とセル j を同一のセルと認識して追跡を行った。

$$C_{ij} = w_1 D_{ij} + w_2 A_{ij} \quad (2a)$$

$$D_{ij} = \sqrt{(\bar{x}_i - \bar{x}_j)^2 + (\bar{y}_i - \bar{y}_j)^2} \quad (2b)$$

$$A_{ij} = \sqrt{|S_i - S_j|} \quad (2c)$$

3. 降水セルの追跡による降雨予測手法

(1) セル追跡法のアルゴリズム

降水セルの追跡結果を活用した降雨予測手法を考案した。各セルの重心位置から算出した移動ベクトルを用いることにより、降雨域によって異なる移動を表現することを可能とした。また、各セルの面積や降雨強度の変化量が得られるため、それらを外挿することで従来手法では困難であった雨域の発達・衰弱を表現することを可能とした。雨域の発達や衰弱傾向の外挿は、「30分程度で

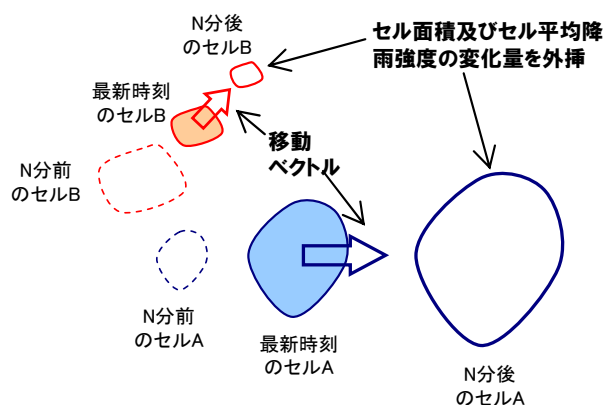


図-2 セル追跡法による降雨予測の概念図



図-3 降雨予測計算範囲（赤枠：精度検証範囲）

あれば積乱雲の寿命内であるため可能である」との仮定によるものである。

降雨予測手法の概念を図-2に示す。現在時刻と1分前の降水セルの重心位置の差から算出した移動ベクトルを用いて、当該セルの位置を外挿することで降雨域の移動を予測する。現在時刻と5分前のセルの面積差（単位時間あたりの面積変化量）を算出し、当該セルの面積を、面積変化量を外挿することで予測する。同様に、現在時刻と5分前のセル内の平均降雨強度の差（単位時間あたりの平均降雨強度の変化量）を算出し、当該セルの平均降雨強度を、平均降雨強度の差を外挿して予測する。

(2) セル追跡法の降雨事例への適用

近畿地方における2010年の降雨の中から局地的かつ急激に発達した降雨事例を3事例抽出し、セル追跡手法に基づいた降雨予測を適用した。降雨予測の計算範囲を図-3に示す。この範囲は、計算に用いているXRAIN近畿地域合成雨量データの範囲に相当する。

a) 事例1-1（2010年7月24日17時～19時）

17時5分頃発生した降水セルが、その後急激に発達し、10分後の17時15分には80mm/hを超えるまでに成長した。

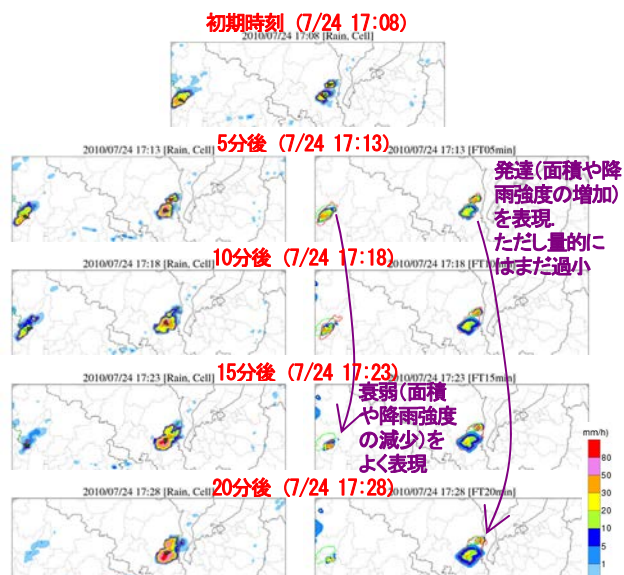


図-4 セル追跡法による降雨予測結果（事例1-1）

左列：観測，右列：17時8分を初期時刻とした20分先までの予測
右列の赤枠：実際のセルの位置，緑枠：予測初期時刻のセルの位置

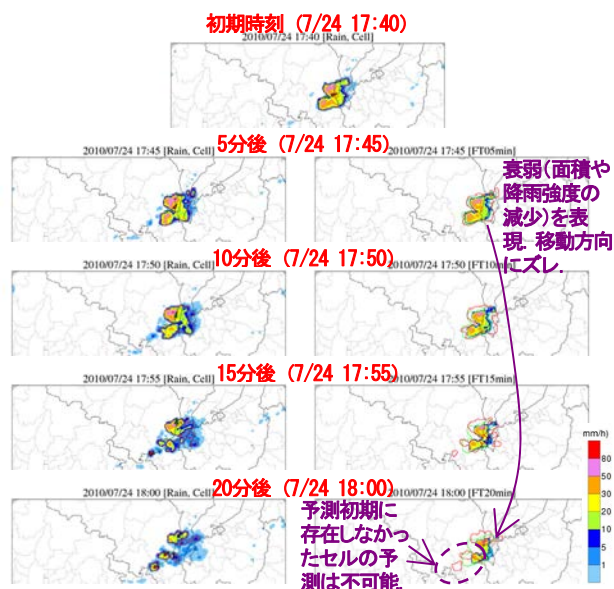


図-5 セル追跡法による降雨予測結果（事例1-2）

左列：観測，右列：17時40分を初期時刻とした20分先までの予測
右列の赤枠：実際のセルの位置，緑枠：予測初期時刻のセルの位置

発達期の17時8分の予測結果を図-4に示す。定性的には、降水セルの発達（面積及び降雨強度の増加）や衰弱（面積及び降雨強度の減少）をよく表現できている。セルの面積や平均降雨強度の変化量は、安定性を確保するために、現時刻と5分前の値から算出しているが、急発達したこの事例では5分前との差では増加量が過小となった。

b) 事例1-2（2010年7月24日17時～19時）

17時5分頃発生した降水セルが、その後急激に発達し、80mm/hを超えるまでに成長した後の衰弱期の17時40分の予測結果を図-5に示す。定性的には、降水セルの衰弱（面積及び降雨強度の減少）をよく表現できている。また予測初期時刻に存在しないセルを予測することは不可能であることがわかる。

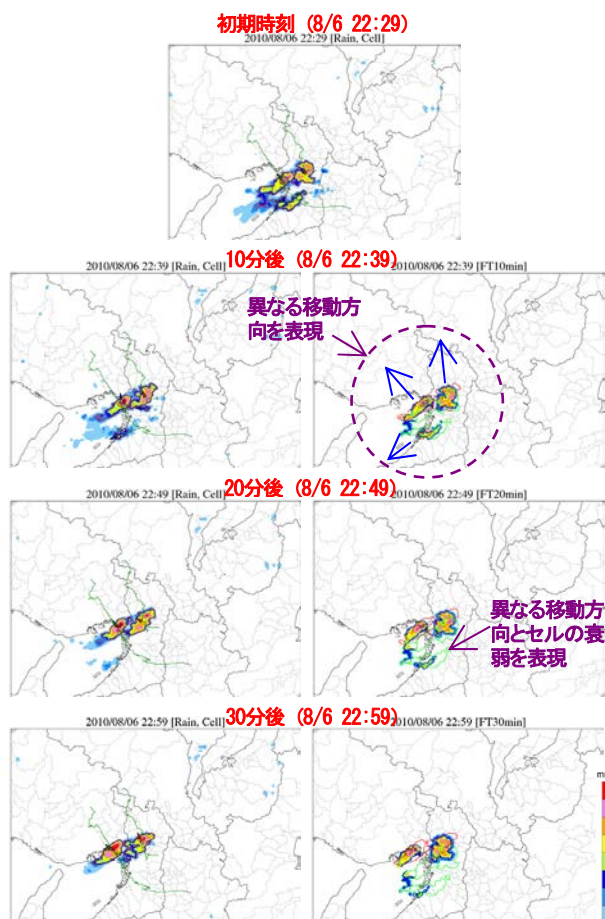


図-6 セル追跡法による降雨予測結果（事例2）

左列：観測，右列：22時29分を初期時刻とした30分先までの予測
右列の赤枠：実際のセルの位置，緑枠：予測初期時刻のセルの位置

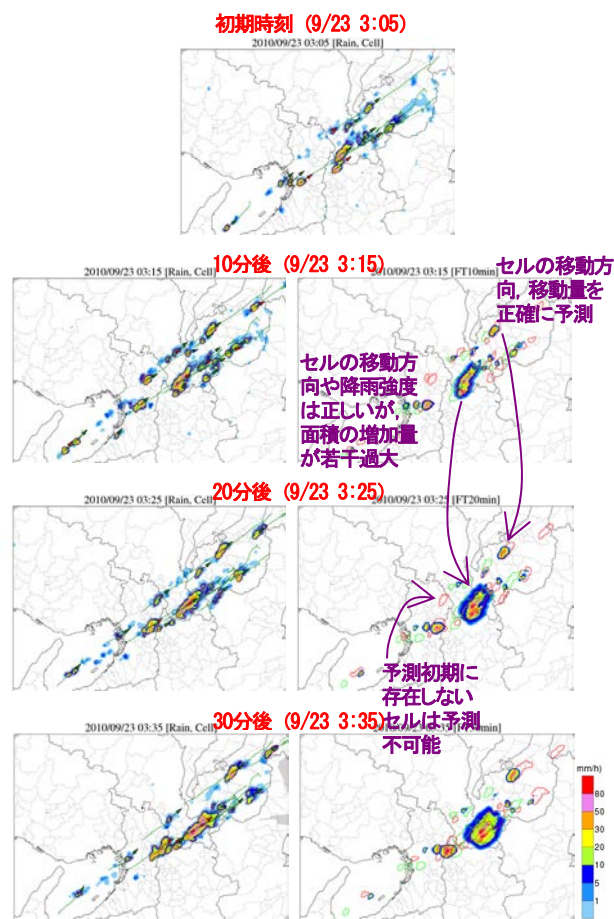


図-7 セル追跡法による降雨予測結果（事例3）

左列：観測，右列：3時5分を初期時刻とした30分先までの予測
右列の赤枠：実際のセルの位置，緑枠：予測初期時刻のセルの位置

c) 事例2（2010年8月6日20時～24時）

20時00分頃に発生した降水セルは、徐々に発達しながら西進し、22時30分頃を境に北西方向及び北北西方向に移動するセルと西南西方向に衰退しながら移動するセルに分離した。セルの成熟期における22時29分イニシャルの予測結果を図-6に示す。「3つのセルが異なる方向に移動し、そのうち1つのセルは衰弱する」といった従来手法では表現できなかった現象を予測することができた。また、セルの位置や形状も良く表現できた。イニシャルの異なる22時45分の予測では、セルの面積は減少するが降雨強度は増加して、輪郭となる弱雨域が消え強雨域だけの不自然な雨域となった。セルの面積変化量や平均降雨強度変化量をセル内の各メッシュにどのように配分するかは、改良が必要である。

d) 事例3（2010年9月23日2時～6時）

「大阪湾で発生した降水セルが北西方向に移動しながら発達する」といった現象が数時間続いた事例で、4時頃には淀川沿いに非常に発達した線上の降水域が形成されている。発生期における3時5分イニシャルの予測結果を図-7に示す。複数の降水セルが存在する事例においても、個々の降水セルの移動や発達・衰弱を表現することができた。個々の降水セルの異なる移動ベクトルを表現可能であり、結果として降雨域の変形を表現することが

表-1 精度検証対象の降雨事例

No	期間	降雨原因
1	2011/07/28 12:00～2011/07/28 18:00	大気不安定
2	2011/07/31 15:00～2011/08/01 01:00	大気不安定
3	2011/08/27 12:00～2011/08/27 18:00	大気不安定

できた。予測初期時刻に存在しないセルを予測することは不可能である。

本手法を降雨事例へ適用した結果、個々の降水セルに対して個別に移動、発達、衰弱が妥当に予測されていることが確かめられた。一方、降雨強度や降水セルの面積が過大となるケースが見られ、面積や降雨強度の変化量の配分方法に改善の余地があることがわかった。次に本手法の予測精度を定量的に評価する。

(3) セル追跡法の予測精度の検証

開発したセル追跡法により雨域の発達・衰弱効果を導入した効果を評価するために精度検証を行った。対象とする降雨事例は、(2)の適用事例とは別の2011年の3事例とした（表-1）。予測は5分に1回の頻度で30分先までを行い、計264イニシャルの予測結果に対して検証を行った。

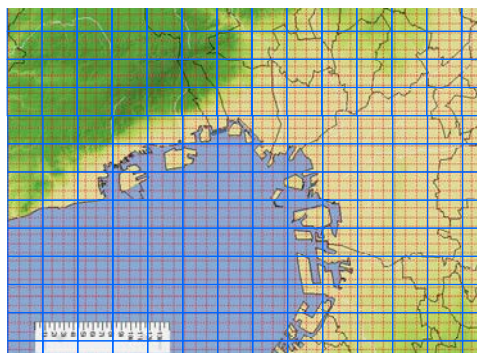


図-8 検証に用いた空間規模（10km²の例）

精度検証は、前出の図-3の赤枠で示した範囲について実施した。降雨強度は、都市域の中小河川スケールを意識した空間規模（10km²および20km²）に空間平均処理を施したものを検証に用いた。10km²のスケールを図-8に示す。

精度評価指標には、複数の降雨規模に分類して相対的な精度比較を行うために、式(3)で定義した相対誤差（RE）を用いて精度検証を行った。

$$RE(\%) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{|r_{fct}(m) - r_{obs}(m)|}{r_{obs}(m)} \times 100 \quad (3)$$

ここで m はサンプル数を、 r_{obs} は実況雨量（前10分平均降雨強度：mm/h）、 r_{fct} は予測雨量（前10分平均降雨強度：mm/h）を示している。

空間規模10km²の場合の降雨予測精度を図-9に示す。また、単純な雨域の移動予測のみで発達・衰弱効果を考慮しない場合と比較した結果を同じく空間規模10km²の場合について図-10に示す。10分先の相対誤差は20～30%程度、30分先の相対誤差は60～70%程度であった。降水セルの発達・衰弱効果を考慮しない場合（破線）に比べて、発達・衰弱効果を考慮することで（実線）、特に強雨時（降雨規模100mm/h）において予測精度が向上することが確認できた。図には示さなかったが、空間規模20km²の結果も同様であった。

4. セル追跡法の改良

(1) セル追跡法の改良

a) 予測期間の延長

セル追跡法は、個々の降水セルの発達・衰弱傾向を外挿している。予測期間を30分としていた理由は、積乱雲の一般的な寿命内（30分程度）であれば適用可能であるとの仮定にもとづいている。本予測手法による従来手法との置き換えを考えると60分先まで予測結果が存在することが望ましい。しかし、個々の降水セルの発達・衰弱傾向を30分先以降も外挿することは非現実的な予測結果をもたらすと考えられ、30分先以降は発達・衰弱傾向をゼロとし、単純な移動予測に切り替わるようプログラム

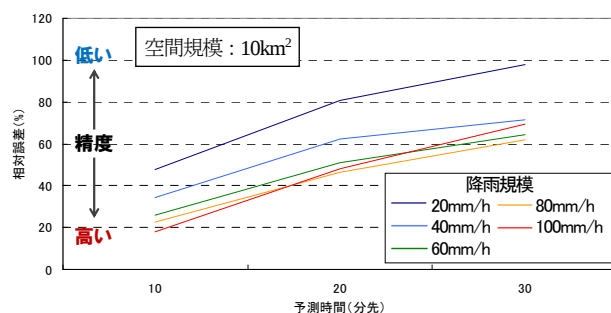


図-9 セル追跡法による降雨予測の精度

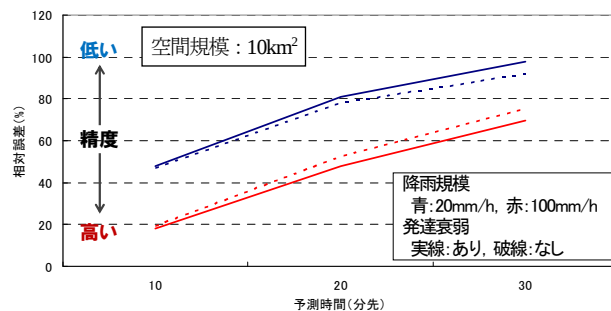


図-10 発達・衰弱効果を考慮しない場合との比較

の改良を行った。

b) 層状性降雨時の予測

実運用を見据えた場合、孤立した局地的豪雨事例だけでなく、層状性降雨も対象とする必要がある。ここまで、早期の降水セル検知を実現するためにセル抽出の閾値を3mm/hとしている。しかし、層状性の雨域が広がる場合、個々のセル面積が増大するため計算時間が増大するとともに、不自然なセル分割となってしまう。そこで、いくつかの閾値について、抽出される降水セルの形状と予測計算時間を測定し、最終的なセル抽出閾値として5mm/hを選定した。また、降水セルの重心移動から移動ベクトルを算出しているが、セルの結合・分離で重心位置が大きく変化する場合に異常な移動ベクトルが算出される事例がみられた。このため、安定性を考慮して「相互相関法」により算出することとし、移動ベクトルは各セルの周辺でそれぞれ算出し、その移動ベクトルを距離の重み付け内挿により、各メッシュに割り当てることにした。セルが抽出できない場合は、全領域で1つの移動ベクトルを算出して移動予測を行うアルゴリズムを導入した。この手法により、孤立する降水セルだけでなく層状性降雨への対応も可能とした。なお、相互相関法による移動ベクトルを用いた場合、重心移動から算定する移動ベクトルを用いた場合と同等の結果が得られることを確認している。

(2) セル追跡法の精度評価

改良したセル追跡法による降雨予測と単純な雨域の移動予測のみで発達・衰弱効果を考慮しない従来手法による降雨予測の精度について比較を行った。改良前のセル追跡法と比較しないのは、改良前の手法では層状性降雨

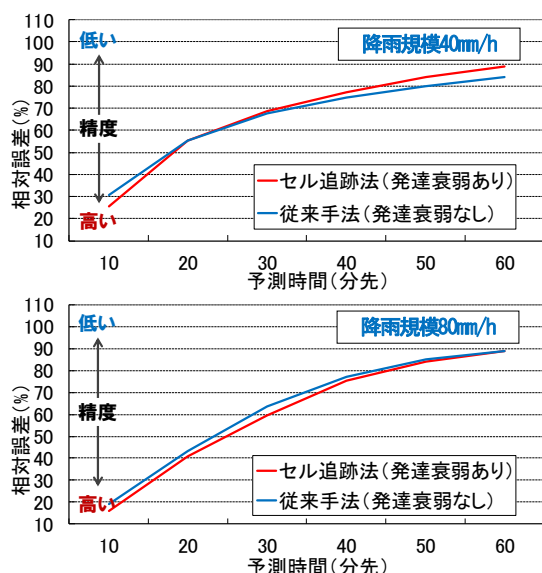


図-11 降雨規模別の相対誤差較 (空間規模：10km²)

の予測計算に対応していないためである。いずれの手法についても、5分に1回の頻度で60分先までの予測を行った。

a) 対象降雨事例と精度評価方法

実運用を見据えた場合、孤立した局地的豪雨事例だけでなく、層状性降雨も対象とする必要があるという観点から、2011年以降の降雨事例を多数抽出した。具体的には、2011年6月～10月を対象として、神戸市、箕面市および豊中市において大雨注意報・警報が発表されていること、降雨原因が「大気不安定」であることを条件に対象降雨事例を抽出し、これに2012年7月21日を加えた13事例とした。降雨予測計算範囲と精度評価範囲は、3章の精度検証と同様である。精度評価指標も3章と同様に相対誤差 (RE) とした。平均化処理を行う空間規模は10km²のみとした。

b) 評価結果

相対誤差を降雨規模別に整理して図-11に示す。比較のため発達・衰弱効果を考慮しない従来手法の精度も合わせて図示した。降雨規模が小さいほど、相対誤差は大きくなった。これは、式(3)の分母である観測雨量 (降雨規模) が小さいほど、相対誤差は大きくなりやすいためである。予測時間が長くなるほど、誤差は増大し、特に30分程度先までの誤差の増加率が大きくなった。降雨規模が小さい場合は、従来手法の精度が高く、セル追跡法の精度が低い。降雨規模が大きくなると、相対誤差はセル追跡法、従来手法の順で大きくなる。従来手法は雨域の発達を表現できないことが原因として考えられる。10分先の予測精度は、セル追跡法の方が高く、各降水セルの発達・衰弱や移動方向を考慮している効果であると考えられる。

5. 結論

本研究では、1分間隔の観測値であるXバンドMPレーダを用いることによって、これまで困難とされてきた個々の降水セルに対して個別に移動速度・方向、発達・衰弱を考慮する降雨予測手法を開発することができた。この結果、局地的豪雨を高精度に予測できることを示した。得られた結果をまとめると、以下のとおりである。

- ・1分間隔で入手可能なXバンドMPレーダを入力値とした、降水セルを抽出・追跡するアルゴリズムに基づき、個々の降水セルに対して個別に移動速度・方向、発達・衰弱を考慮するセル追跡法による降雨予測手法を新たに開発した。
- ・本手法では、個々のセルの移動ベクトルを活用することで、セル毎の異なる移動を表現することを可能にし、合わせて降水セルの追跡から得られるセルの面積変化量やセル内平均降雨強度の変化量を外挿することで、従来手法では表現できなかった雨域の発達・衰弱を表現することを可能にした。
- ・セル追跡法を局地的豪雨事例に適用して精度検証を行ったところ、10分先については発達・衰弱効果を考慮しない従来手法に比べセル追跡法の予測精度が高く、30分先でセル追跡法の予測精度が従来手法と同程度となることが明らかとなった。
- ・一方、セルの面積は減少するが降雨強度は増加するような予測の場合、輪郭となる弱雨域が消え強雨域だけの不自然な雨域になってしまうケースがみられ、セルの面積変化量や平均降雨強度変化量をセル内の各メッシュにどのように配分するかは改良の余地が残された。

本手法は下水道の雨水排除操作の支援等、都市域の豪雨災害軽減に資するとともに豪雨のタマゴ早期探知手法との連携による発展も見込めるものである。

謝辞：XバンドMPレーダの観測情報は、国土交通省水管理・国土保全局によるXバンドMPレーダに関する技術開発コンソーシアムの一環として提供していただきました。深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 山本聡，土屋修一：ゲリラ豪雨対策のためのXバンドMPレーダ，土木技術資料，第53巻 第1号，2011。
- 2) 中北英一，山邊洋之，山口弘誠：ゲリラ豪雨の早期探知に関する研究，土木学会水工学論文集，第54巻，pp.343-348，2010。
- 3) Hering, A. M., C. Morel, G. Galli, S. Senesi, P. Ambrosetti, and M. Boscacci: Nowcasting thunderstorms in the alpine region using a radar based adaptive thresholding scheme, *Proceedings Third ERAD Conference, Visby, Sweden*, 206-211, 2004.
- 4) Dixon, M., and G. Wiener: TITAN: Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting - A radar-based methodology, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 10, 785-797, 1993.

(2020. 4. 2受付)