降雨分布のスケール分離に基づいた短時間降雨 予測情報の予測誤差推定手法に関する研究

ERROR ESTIMATION OF SHORTTERM RAINFALL PREDICTION BASED ON SCALE ANALYSIS OF RAINFALL DISTRIBUTION

高田望¹ • 田中裕介² • 池淵周一³ • 中北英一⁴ Nozomu TAKADA, Yuusuke TANAKA, Shuichi IKEBUCHI and Eiichi NAKAKITA

¹正会員 理修 株式会社気象工学研究所 (〒550-0003 大阪市西区京町堀1-8-5)
 ²正会員 理修 海洋研究開発機構 地球情報基盤センター (〒236-0001 横浜市金沢区昭和町3173-25)
 ³フェロー 工博 京都大学名誉教授 株式会社気象工学研究所 (〒550-0003 大阪市西区京町堀1-8-5)
 ⁴正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

A method to estimate prediction errors of rainfall nowcasting model has been developed. Prediction errors due to translating vector estimation error and those due to growth and decay of rainfall system are considered respectively in the estimation. Furthermore, wavelet scale analysis of rainfall distribution is also applied. Errors of convective rainfall distribution and those of stratiform rainfall distribution are estimated respectively. The developed error estimation method is applied to 2 heavy rainfall events occurred in Kinki region. It turned out that the developed method provides users of rainfall prediction system with useful information.

Key Words : XRAIN, error estimation, rainfall nowcasting

1. はじめに

近年,集中豪雨や局地的な大雨に伴う水害が多発して いる.このような災害の多くは数十km程度より小さい 水平スケール (メソβスケール)をもつ,積乱雲に伴う 雨によって引きおこされている.より的確な避難情報に 資するために、メソβスケール以下の現象を詳細に捉え る観測網が整備されつつある. その一例が, 国土交通省 が運用中のXRAIN (X-band polarimetric RAdar Information Network)である. XRAINは、従来のレーダと比較して時 空間分解能が高い(時間分解能:1分,空間分解能: 250m)という特徴を有している、この特徴を活かして 降雨分布を対流性の降雨域と層状性の降雨域に分離して 降雨域ごとの移動特性を考慮した新たな降雨予測手法が 提案されている¹⁾. XRAINでは3分毎の3次元観測も行わ れており,このデータを用いることで上空の降水粒子の 推定が可能である.この点に着目して,短時間降雨予測 手法の高度化を目的として、降水セルの発達段階を推定

する試みも新たに行われている². これらの新たな手法 を用いることにより、より精度が高い降雨予測情報が提 供されることが期待される.

一方、水害をもたらすような集中豪雨や局地的な大雨 を完全に予測することは不可能であり、河川管理におい ては降雨予測情報の誤差を想定した判断が必要となる. 短時間降雨予測の誤差情報活用に関してはいくつかの既 往研究が行われている. 上林は3)レーダ情報を用いた短 時間降雨予測モデルによる流域平均予測雨量の予測誤差 の確率分布を正規分布と仮定して予測降雨を多数発生さ せ, 貯留関数法を介してダム流入量予測値の確率分布を 算出し,降雨予測誤差確率を考慮したダム流入量予測値 がダムの洪水調節等に有効な情報となることを示した. Takasao et al.⁴⁾は、レーダ情報を活用した代表的な短時間 降雨予測手法の一つである移流モデル⁵⁾の発達衰弱項を 確率モデルで表現し、解析的に導かれた流域平均雨量の 予測誤差分散と実際の予測誤差分散が良く一致すること を示した. 立川のらは、移流モデルよる予測降雨場の予 測相対誤差の頻度分布が降雨強度によらず対数正規確率

分布で表現できる可能性があること、予測相対誤差は空間的な相関関係があり、分布関数のパラメータは一降雨の間一定とみなせることを示した.

本研究では降雨予測情報が誤差を含むことを前提とし た上で、1分毎に更新するXRAINを活用した短時間降雨 予測システムを実時間で活用する際に確度の高い予測誤 差情報を推定することを目的として、予測誤差推定手法 について検討を行った.一般に、降雨予測の精度は降雨 原因や降雨特性により異なると考えられる.例えば、急 激に発達する単一積乱雲によってもたらされる降雨の予 測は非常に困難であるのに対して、広域に広がる層状性 の雨雲によりもたらされる降雨の予測は比較的容易であ る.本研究では、降雨分布を対流性と層状性の降雨域に 分離して予測する降雨予測手法を対象とすることで、降 雨予測の誤差を精度良く推定することが可能となると考 え、同手法を対象とした降雨予測誤差推定手法の検討を 行った.

本論文の構成は以下のとおりである.2章では適用し た降雨予測手法概要を述べる.3章では誤差要因を雨域 の移動ベクトル推定誤差と雨域の発達衰弱(または発生 消滅)に起因する誤差に分離した降雨予測誤差推定手法 について述べる.4章では降雨予測誤差推定手法を近畿 地方で水害をもたらした2降雨事例に適用し,予測誤差 推定手法の評価を行った.5章で本論文の結論と今後の 課題を述べる.

2. 降雨予測手法の概要

(1) レーダ雨量データ

短時間降雨予測の初期値に用いるレーダ雨量データは 国土交通省が平成22年7月以降試験運用しているXRAIN データとした.XRAINは,空間分解能250m,時間分解 能地上:1分,上空:5分の高解像データであり,マルチパ ラメータレーダであるため地上雨量計による補正を行わ なくても精度の高い降雨観測値が得られるという特徴を 有している.図-1に用いたXRAINデータの範囲を示す. 図中に四角で囲んだ領域は降雨予測値の評価対象とした 領域、図中の赤点は降雨予測値の評価対象地点としたア メダス観測点(56地点)の位置である.近畿地方はレー ダ観測網が密であり,レーダを用いた検討対象領域に適 している.

(2) 降雨分布のスケール分離に基づいた降雨予測手法

短時間降雨予測手法には、時空間分解能が高いXRAIN の利点を活かし、降雨分布をWavelet解析によりメソβス ケール以上の層状性の降雨域とメソβスケール未満の対 流性の降雨域に分離して予測を行う手法¹⁾を適用した.



・降雨予測評価対象地点(アメダス観測点:56地点)



図-2 降雨予測手法の計算フロー

この手法では、個々の積乱雲による降雨域と層状性の 降雨域をそれぞれの移動特性に適した手法で予測する. 図-2に降雨予測手法の計算フローを示す.同手法により、 250mメッシュで60分先までの1分毎の決定論的な降雨予 測値を得ることが可能となる.以下、この降雨予測手法 で計算される予測値を降雨予測の中心値と記述する.こ の降雨予測手法では積乱雲の発達段階を推定することで、 対流性の降雨域の発達衰弱を予測することも可能である が、本研究では降雨予測の中心値を予測する際には降雨 域の発達衰弱は考慮せず、予測誤差推定において発達衰弱の影響を考慮した.

3. 降雨予測誤差の推定手法

レーダ情報をベースとした運動学的予測の誤差の原因 には、雨域の移動推定誤差と雨域の発達衰弱(または発 生消滅)による誤差が考えられる.本研究では図-3に示 すように誤差原因毎に予測誤差を推定し、これらを合成 することで総合的な予測誤差を推定した.以下,誤差原 因毎の誤差推定方法を述べる.本論文では予測の誤差幅 を想定した上位側の予測値を上限値,下位側の予測値を 下限値と記述する.

今回検討に用いた降雨予測手法では、降雨域を対流性 の降雨域と層状性の降雨域に分離してそれぞれ予測し、 これらを合成することで予測雨量分布を得る.従って、 予測誤差についても、対流性降雨域と層状性降雨域それ ぞれについて推定し、これらを合成することで総合的な 予測誤差を推定することが可能となる.

(1)移動ベクトル推定誤差に伴う降雨予測誤差の推定

運動学的降雨予測ではレーダ雨量観測値が更新する毎 に降雨域の移動ベクトルを算出し、その移動ベクトルを 用いて降雨予測計算を行い、レーダ観測メッシュ毎の予 測雨量を得る.降雨域の移動ベクトルは時々刻々変化す ると考えられる.そのため、予測開始時点で推定した降 雨域の移動ベクトルと予測の時間帯における降雨域の実 際の移動方向は必ずしも一致しない.これが運動学的降 雨予測手法による降雨予測誤差の一因である.本研究で はt分前の予測計算に用いられた移動ベクトルV(-t)と 最新の予測に用いる移動ベクトルV(0)の差の絶対値 |V(-t)-V(0)|を、最新予測の移動ベクトル推定誤差を支 配する物理量とみなして移動ベクトル推定誤差に伴う降 雨予測誤差の推定を行った.メッシュ毎の予測雨量の上 限値 R_{max} [mm/hr]および下限値 R_{min} [mm/hr]の計算方法 は以下の式(1)-(3)に示すとおりである.

$$\boldsymbol{R}_{\max} = \boldsymbol{R} + \boldsymbol{\sigma}(\boldsymbol{R}_{\mathrm{r}}) \tag{1}$$

$$\boldsymbol{R}_{\min} = \boldsymbol{R} - \boldsymbol{\sigma}(\boldsymbol{R}_{\mathrm{r}}) \tag{2}$$

$$\mathbf{r} = |\mathbf{V}(-t) - \mathbf{V}(0)| \times \Delta xy \times \Delta t / 60$$
(3)



- R:降雨予測モデルによるメッシュ予測雨量[mm/hr]
- r: 誤差幅推定に用いるメッシュ距離

R_r: **R** と距離**r** 以内のメッシュの予測雨量[mm/hr]

- $\sigma(\mathbf{R}_r) : \mathbf{R}_r$ の標準偏差[mm/hr]
- Δt :予測時間[分]
- V(-t): t 分前の予測の移動ベクトル[km/hr]
- Axy: レーダ雨量および予測雨量の格子サイズ[km]

(2) 降雨域の発達衰弱に伴う降雨予測誤差の推定

運動学的降雨予測手法による降雨予測誤差の要因には、 移動ベクトル推定誤差以外に、降雨域の発達衰弱(発生 消滅)がある.本研究ではt分前に行ったt分先予測の 計算領域の降雨観測値の空間平均値A_pと同領域の最新 のレーダ観測値(A_o)の比(A_p/A_o)を、発達衰弱に 伴う降雨予測誤差係数として算出し、式(4)、式(5)によ りメッシュ予測雨量の上限値および下限値を修正する.

$$\boldsymbol{R'}_{\max} = \boldsymbol{R}_{\max} \times C \tag{4}$$

$$\boldsymbol{R'_{\min}} = \boldsymbol{R_{\min}} \times 1/C \tag{5}$$

- **R'**max:降雨発達衰弱を考慮したメッシュ予測雨量の 上限値
- **R'**min:降雨発達衰弱を考慮したメッシュ予測雨量の 下限値
- C:降雨発達衰弱に起因する降雨予測誤差係数

ただし、

$$A_p/A_o \ge 1$$
の場合, C=A_p/A_o
A_p/A_o ≤1 の場合, C=A_o/A_p

表→1 検討対象事例一覧										
事例番号	計算開始時刻	計算終了時刻	降雨原因							
1	2012年8月13日 18時00分	2012年8月14日 8時00分	前線+暖湿気流							
2	2013年9月15日 21時00分	2013年9月16日 6時00分	台風18号							



4. 手法の適用・評価

(1) 適用事例

表-1に示す2事例を対象として手法の適用・評価を行った.事例1は局地的な集中豪雨により宇治市周辺で浸水等による災害が発生した事例である.事例2は平成25年の台風18号による事例であり,近畿地方全域でまとまった降雨となり各地で水害が発生した.対流性の降雨が卓越する事例の代表明として事例1を,層状性の降雨が卓越する事例の代表例として事例2を選定した.各事例を対象として予測初期時刻1時間毎に60分先までの予測計算を行った.図-4に60分積算降雨量の分布の例を示す.降雨予測誤差推定手法の適用にあたっては,降雨分布のスケール分離を行った上で対流性の降雨域と層状性の降雨域の移動ベクトル誤差を値別に評価する「分離有」手法と層状性の降雨域の移動ベクトル誤差で全体の移動ベクトル誤差を統括して評価する「分離無」手法の比較検討を行った.

(2)評価方法

レーダ観測値および予測雨量値は1分毎に得られるが, 実運用における中小河川の管理での降雨予測情報の利用 を想定すると,1分毎の降雨予測精度よりも目先1時間先 までの総雨量や1時間先までの期間の最大降雨強度が重 要であると考えられる.そこで,250mメッシュ毎の60 分積算雨量および60分間の最大雨量強度を対象として, 上下限の幅をもった予測値の評価を行った.精度評価地 点は,図-1に赤点で示したアメダス観測点56地点の位置 とし,予測評価に用いる実績値には1分毎のXRAIN観測 値を用いた.評価指標は,①実績値が予測上限値と下限 値の間に入る適中率,②予測上下限値の幅と雨量誤差

(実績値と予測中心値の差)のRMSEの2指標とした. 常に十分大きな上下限幅を持った予測値とすると適中率は 高くなるが、このような情報は実運用上有効ではない.予 測の誤差を適切に推定できたかを評価するため、予測上下 限値の幅と実際の予測誤差のRMSEを評価指標に加えた.

	60分積算雨量値			60分間の最大降雨強度								
	適中率		予測幅と予測誤差の RMSE		適中率		予測幅と予測誤差の RMSE					
	分離有	分離無	分離有	分離無	分離有	分離無	分離有	分離無				
事例-1	0.57	0.62	5.12	8.57	0.55	0.61	16.88	28.36				
事例-2	0.89	0.88	14.94	19.00	0.76	0.86	18.15	37.30				
事例-1および事例-2	0.68	0.71	9.89	13. 41	0.62	0.70	17.35	31.96				

表-2 降雨予測精度推定値の評価結果(精度の良い方にハッチ)



図-5 60分間積算雨量の予測幅と実際の予測誤差の散布図(左:分離無 右:分離有)



図-6 60分間の最大降雨強度の予測幅と実際の予測誤差の散布図(左:分離無 右:分離有)



(3)評価結果

表-2に降雨予測推定値の評価結果一覧を示す.図-5に 事例1および事例2を対象とした60分間積算雨量の予測上 下限値の幅と実際の雨量誤差の散布図を、図-6に60分間 の最大降雨強度の予測幅と雨量誤差の散布図を示す.図 -7に実績および予測降雨強度の時系列比較例を示す. これらの図表から、以下のことがわかる.

- 表-2に示した適中率による評価では、対流性の降 雨域と層状性の降雨域の移動ベクトル誤差を個別 に評価する「分離有」よりも層状性の降雨域の移 動ベクトル誤差で全体の移動ベクトル誤差を統括 して評価する「分離無」が良好である.
- 表-2に示した予測の上下限値の幅と実際の予測誤
 差のRMSEによる評価では、「分離有」が「分離
 無」より良好な精度である.
- 「分離有」「分離無」共に、図-5および図-6において予測幅の値は小さいが、予測誤差が大きい値となっている場合がある.これは、予測値の信頼性が高いと推定されたにも関わらず実際の予測誤差が大きかったケースであり、実運用上のリスクがあるため、予測誤差推定手法の改良が望まれる.
- 図-7に示した時系列比較の例では「分離無」では 予測の幅が大きくなっているのに対して、「分離 有」では予測の幅が絞り込まれており、適中率が 高い「分離無」予測よりも予測幅と実際の予測誤差 のRMSEの小さい「分離有」予測の方が実運用上有 効な予測情報であるといえる。

今回は、250mメッシュ毎の60分積算雨量および60分間 の最大降雨強度を評価対象として、上下限値の幅を持っ た予測情報の評価を行った.評価には①実績値が予測上 限値と下限値の間に入る適中率、②予測上下限値の幅と 実際の予測誤差のRMSE の2指標を用いた.これらの 評価指標を用いた降雨予測情報の評価に際しては、見逃 し回避の必要性が高い場合には適中率による評価を重視 し、予測上下限値の幅の信頼性を重視する場合には予測 上下限値の幅と実際の予測誤差のRMSEを重視するなど 目的に応じて使い分ける必要がある.

5. 結論と今後の課題

本研究では1分毎に更新するXRAINを活用した実時間 短時間降雨予測システムにおいて確度の高い予測誤差情 報を推定することを目的に,短時間降雨予測モデルの予 測誤差推定手法について検討を行った.雨域の移動ベク トル推定誤差に起因する誤差と降雨システムの発達衰弱 に起因する誤差に分離し,両者を合成することで上下限 値の幅を持った予測情報を作成する手法を開発した.

また,降雨分布を対流性の降雨域と層状性の降雨域に スケール分離することにより,降雨スケール毎の誤差を 推定することが可能となるため,このスケール分離の効 果についても検討を行った. 検討の結果,降雨分布のスケール分離に基づいた予測 誤差推定手法を適用することにより,スケール分離を行 わない場合と比較して予測幅が小さく実運用上利用しや すい予測情報を得られることが分った.一方,予測幅が 小さいのにもかかわらず実際の予測誤差が大きくなる ケースがあり,予測誤差推定手法に改良が今後の課題と してあることが示唆された.具体的な改良方策としては, 移動ベクトル誤差の時間変動特性を分析しその結果を反 映した手法に改良すること等が考えられる.

今後は、今回検討した予測誤差推定手法を改良し、よ り多くの事例に適用し評価を行うことが課題となる.今 回は①実績値が予測上限値と下限値の間に入る適中率, ②予測上下限値の幅と実際の予測誤差のRMSEの2指標 により幅を持った予測情報の評価を行ったが、上下限値 の幅を持った降雨予測情報の適切な評価方法についても 今後検討する必要があると思われる.また、実時間予測 システムにおいて河川管理等の現場での実利用すること を想定し、予測推定誤差情報の提供方法について検討を 行っていくことも重要な課題である.

謝辞:本研究で用いたXRAINレーダの観測データは、「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」を通じて受信したものです.厚く御礼申し上げます.

参考文献

- 1)高田望,田中裕介,池淵周一,中北英一:局地的な大雨の予 測精度向上を目指した降水ナウキャスト手法の開発,土木学 会論文集,B1(水工学),第57巻,pp.349-354,2013.
- 2)増田有俊,中北英一: Xバンド偏波レーダを用いた降水セル のライフステージ判別手法の開発,土木学会論文集, B1(水 工学),第58巻,pp.493-498,2014.
- 3)上林好之:レーダ雨量情報を用いて洪水調節を確率的に行うための基礎的検討,土木学会論文集,No.411/II-12, pp.169-175,1989.
- 4)Takasao, T., Shiiba, M. and Nakakita, E. : A real-time estimation of the accuracy of short-term rainfall prediction using radar, Stochastic and Statistical Methods in Hydrology and Environmental Engineering (ed. K, W. Hipel),Kluwer Academic Publishers, vol. 2, pp.339-351, 1994.
- 5)椎葉充晴,高棹琢馬,中北英一:移流モデルによる短時間降 雨予測手法の検討,水工学講演会論文集,第28巻,pp.423-428,1984.
- 6)立川康人,小松良光,椎葉充晴,寶馨:移流モデルによる予 測降雨場の誤差構造のモデル化と降雨場の模擬発生,土木学 会論文集,No.754/II-66, pp.9-18,2004.

(2014.4.3受付)