XRAINを用いた冬期降水量の推定精度向上に向けて MPレーダによる粒子判別に関する取り組み

谷口 和哉*1,境 和宏*1,増田 有俊*2,板戸 昌子*2, 上田 博*3,中井 専人*4

1. はじめに

降雨をより正確に細かなメッシュで把握することは,近 年の「ゲリラ豪雨」と言われる極端な局所的集中豪雨を捉 えるために,非常に重要視されている.北陸地方整備局に おいてもそれらの事案に対応する目的で,平成21年度より

「XバンドMP (マルチパラメータ)レーダ雨量計」(以下, 「X-MP」という.)を管内に4基(能美局,水橋局,中ノ ロ局,京ヶ瀬局)設置している.さらに,既存Cバンドレ ーダ雨量計である聖高原局をMP化,概ね管内全域をカバー するXRAIN (eXtended RAder Infomation Network)観測網 を構築,観測している.

このX-MP及びCバンドMPレーダ雨量計(以下,「C-MP」 という.)の特徴は、雨滴は大きくなるほど横長に偏平な 形状となる特性を利用し、垂直と水平の二重偏波観測(マ ルチパラメータ観測)により雨滴の形状を捉えることで, 正確な降水量を把握できることである.

一方,雪やあられ,みぞれ等の固体降水粒子は,雨のように大きさと形状の関係がはっきりとしていない.このため,現在,冬期の降雨強度はレーダ反射因子Zから降雨強度Rを推定する従来の雨量算定式(Z-R関係式:Z=B・R^{β})を採用している.さらに,北陸管内では雪片やあられ,みぞれといった多様な降水粒子が観測されるが,現状のシステムでは様々な固体降水粒子であっても1つの雨量算定定数(B, β)を適用している点に大きな課題があり,正確な降水量すなわち,雨と雪との正確な判定ができない状況となっている.

北陸地方整備局管内は日本でも有数の豪雪地帯である. そのため、雪解け時には融雪による出水が頻繁に発生する. しかしながら、流域の降雨を観測する雨量計は豪雪かつ急 峻な山岳地帯に設置してあるものが多く、電源や通信の確 保、さらに冬期点検ができないといったことから、雨量計 そのものを降雪前に撤去しているのが実態であり、詳しい 降雪量の把握ができていない状況となっている.一方、詳 しい降雪量が把握できれば、気温や降雨によってどのくら いの流出量、流出継続時間となるのか、水位予測計算の予 測精度が向上、さらに雪解けによる地すべりの発生や、春 先などに多い、固まった積雪の上に新雪が大量に積もった 時に発生する表層雪崩などの予測計算、道路除雪の適切な タイミング予測等,多様な利活用が可能と考えられる.

このため、北陸地方整備局では平成25年度よりX-MPによ る降雪観測精度の向上、つまり粒子判別(雨雪判定)精度 の向上に向けた取組を開始.さらに平成28年度からはC-MP (聖高原局)での粒子判別に着手するとともに、システム 化に向けたX-MPとC-MPの合成方法について検討を実施して いる.

粒子判定精度向上に向けた検討は、①特殊な専用機器 を用いた精度の高い地上降雪観測、②降水粒子判別に使用 する偏波パラメータの設定、③粒子判別手法の精度検証、 ④粒子別雨量算定定数の同定といった粒子判別手法の検証 と、⑤システム化に向けたX-MPとC-MPによるそれぞれの粒 子判別結果の合成方法について実施している.

2. 地上降雪観測

X-MP, C-MPの観測範囲内において,地上における降水粒 子種別の検証や,粒子別雨量算定定数同定のための地上降 雪観測を実施した.

2.1 観測場所と観測内容

北陸地方整備局管内のX-MP, C-MPの配置と観測範囲及び 地上観測点の位置を図1に示す.



21 北陸地整管内の MP レータ雨量計の観測範囲と地 上降雪観測地点の位置

*1 国土交通省北陸地方整備局河川部水災害予報センター *2一般財団法人日本気象協会 *3国立大学法人名古屋大学 *4独立行政法人防災科学技術研究所雪氷防災研究センター 管内には、X-MPが4基(新潟地域:京ヶ瀬局,中ノロ局, 富山・石川地域:能美局,水橋局)が、C-MPが1基(聖高 原局)が配備され,観測が行われている.

降雪観測精度向上に向けた検討を開始した平成25年度 から平成27年度は、新潟地域のX-MP2基の観測範囲内2ヶ 所において地上降雪観測を実施.平成28年度からはC-MP についても降雪観測の高度化を検討するため、聖高原局 の観測範囲内である長野県飯山市(道の駅花の駅千曲 川)において地上降雪観測を実施した.

また、レーダ雨量計の観測範囲内に存在する防災科学 技術研究所雪氷防災研究センターの観測データ(上越, 柏崎)や、地方気象台の目視観測データも併せて精度検 証に利用した.

地上降雪観測地点では,幅4m,高さ3mの風除けネット 内に以下の測器を設置し観測している(図2).



図2 地上降雪観測で用いた観測測器

- 2次元ビデオ式ディスドロメータ (2DVD)
- ② 風向風速計
- ③ 気温·相対湿度計
- ④ 田村式降水強度計

2.2 2DVD観測データを用いた地上の降水粒子判別

二次元ビデオ式ディスドロメータ(以下,「2DVD」という.)は,個々の降水粒子の形状や落下速度を計測する機器である.本検討では,2DVDにより観測された降水 粒子の粒径と落下速度の関係から,質量フラックス中心

(CMF)を求めて卓越降水粒子を判別する手法¹⁾を採用し, 5分毎に降水粒子の種別を判別した.降水粒子は雨,あら れ,雪,みぞれの4種類に判別した.判別した例を図3に 示す.

みぞれについては、CMFのみで表現できないことから、 粒径によらず落下速度がほぼ一定であることや、2DVDと 併せて観測した気温および相対湿度の関係から、総合的 に判断した.

2.3 田村式降水強度計を用いた降水量観測

2015年11月から2016年2月は北陸技術事務所と信濃川河 川事務所において、2016年11月から2017年2月は北陸技術 事務所と道の駅花の駅千曲川において、0.005mm単位で詳 細な降水量を把握できる田村式降水強度計を設置して降 水量観測を実施した.

雪などの落下速度の遅い固体降水は風による捕捉損失 が非常に大きいため, B, βの同定に用いる地上降水量は 補正が必要である.既往論文²⁾における捕捉損失 CR の 補正式を式(1)に示す.





図3 2DVD 観測データを用いた粒子判別の例

風速 U の係数 m の値は降水量計の種類によって異な るが,一般的に使用されている転倒ます型雨量計以外の 補正係数は存在しない.そこで,防災科学技術研究所雪 氷防災研究センターが上越(農研北陸研究センター)で 観測した田村式降水強度計の降水量データ,二重防風柵 内の重量式雨量計の降水量データ(真の降水量として利 用)および風速データを用いることで,田村式降水強度 計の補正係数を算出した.利用した観測データは,2014 年1月から3月,2014年12月から2015年3月の2冬期分であ る.算出した結果を図4に示す.

降水粒子別の雨量算定定数(B, β)を同定する際には (詳細は5. 粒子別雨量算定定数の同定に記載),田村 式降水強度計の観測雨量に対して,ここで算出したmの 値を適用して捕捉損失補正を施した.

3. 偏波パラメータを用いた粒子判別

複数基・複数仰角のレーダ観測値を用いて,高度250m 毎に定高度偏波パラメータデータを作成し,観測可能な 最低高度において降水粒子を判別した.ただし,グラン ドクラッタの影響を考慮し,高度1000m未満では判別しな いものとした.



図4 田村式降水強度計の捕捉率

3.1 X-MPのメンバーシップ関数と評価式

X-MPの観測データを用いて粒子を判定する際には, Kouketsu, et al., 2015³⁾のメンバーシップ関数及び評価 式を適用して降水粒子を判別した.メンバーシップ関数 を図5に,評価式RS を式(2)に示す.

$$RS_{j} = \prod_{i} \mu_{i,j} \tag{2}$$

ここで, i は偏波パラメータ, j は粒子種別, μ はメ ンバーシップ関数のスコア値(0~1の値)を表している.

用いた粒子判別手法は、ファジー理論を基礎としたもので、レーダの偏波パラメータ(Z_H, Z_{DR}, K_{DP}, ρ_{HV})と気温のメンバーシップ関数が存在し、霧雨、雨、湿雪、乾雪、氷晶、乾霰、湿霰、雨+雹の8種類の粒子種別から評価式によって得られた値が最大の粒子を卓越降水粒子と判別するものである.

3.2 C-MPのメンバーシップ関数と評価式

C-MPの観測データを用いて粒子判別を行う際には, Dolan et al., 2013⁴⁾のメンバーシップ関数及び評価式を 基とした.メンバーシップ関数を図6に,評価式 μ を 式 (3) に示す.

$$\mu_{i} = \left[\frac{\left(W_{Z_{DB}}\beta_{Z_{DB},i} + W_{K_{DP}}\beta_{K_{DP},i} + W_{\rho_{DW}}\beta_{\rho_{DW},i}\right)}{W_{Z_{DB}} + W_{K_{DP}} + W_{\rho_{DW}}}\right]\beta_{T,i}\beta_{Z_{H},i} \quad (3)$$

ここで, i は粒子種別, β はメンバーシップ関数のス コア値, W は重みを表している.レーダの偏波パラメー タ (Z_H, Z_{DR}, K_{DP}, ρ_{HV}) と気温のメンバーシップ関数が存 在し,霧雨,雨,湿雪,乾雪,氷晶,乾霰,湿霰の7種類 の粒子に判別するものである.ただし,日本で観測され る降水粒子を考慮し,メンバーシップ関数の上の閾値や 下の閾値を調整して適用した.さらに, Z_{DR}, K_{DP}, ρ_{HV} は 評価式に重み W が設定されているが,地上観測値との比 較検討結果を基に, ρ_W の重み W を0.1から1.0に変更し た.



3.3 降雪時における粒子判別手法高度化の検討

地上で観測された降水粒子(2DVD観測データや気象台の目視観測結果)とレーダにより判定された降水粒子種別を比較するにあたり、検討を開始した平成25年度は、地上降雪観測点の直上メッシュの粒子判別結果と比較した(図7上).

雪は、雨滴に比べてレーダで観測されてから地上に落 下するまでの間に風で流される影響(以下「移流」とい う)が大きく、また、降水粒子がレーダ観測高度から地 上に落下する間、気象条件により、雪からみぞれ、みぞ れから雨といった融解(以下「相変化」という)を伴う 場合がある.このため、平成26年度の検討では、降水粒 子の種類別に落下速度を設定し、気象庁の数値予報解析 値の上層の風向風速データ(高度1000mから地上付近まで の平均風)から、水平方向の移動距離と地上に落下する までの所要時間を算定した(図7中).また、気象庁の 数値予報解析値の地上付近の気温・相対湿度データを利 用し相変化の効果を考慮した.相変化について、雪、み ぞれ、雨に関しては既往研究5)を参考にし、あられにつ いては気温のメンバーシップ関数を参考にして相変化の ロジックを設定した(図8).

C-MPを用いた粒子判別を検討するにあたり、検討対象 である聖高原局はアンテナ設置高度が1,448.4mと高く, 高度1,000mでは降水粒子を判別することができないこと が課題となった.このため、平成28年度は、さらに降水 粒子判別の高度化を図り、鉛直方向250m毎に移流と相変 化を考慮して、落下途中の粒子種別の変化(落下速度の 変化)や、山地にぶつかる効果を反映した(図7下).



4. 粒子判別手法の精度検証

4.1 X-MPレーダを用いた粒子判別結果の検証

X-MPを用いて判別した降水粒子の水平分布の例を図-9 に示す.また,地上降雪観測結果や気象庁の目視観測結 果と,X-MPから推定した降水粒子を「雨」「みぞれ」

「あられ」「雪」の4種類で評価した的中率を表1に示す. 250m毎に降水粒子の移流や相変化を考慮した平成28年度 の手法を用いることで,およそ70%の的中率が得られた. このうち,的中率が最も低いあられは,空間スケールが 小さな現象であるため,直上メッシュの捕捉率は低い状 況である.そこで,図10に示すように,空間的な誤差 を許容して,周囲2km以内であられが捕捉された割合を算 出したところ,80%ほどの捕捉率が得られた.

なお、同様にみぞれの捕捉率についても確認したところ、直上メッシュにおける捕捉率はあられより高いが、 空間的な誤差を許容してもあられほど捕捉率は向上しないことが確認できた.

4.2 C-MPを用いた粒子判別結果の検証

C-MPを用いて判別した降水粒子の水平分布図の例を図 11に示す.また,地上降雪観測結果や気象庁の目視 観測結果と,X-MPから推定した降水粒子を「雨」「みぞ れ」「あられ」「雪」の4種類で評価した的中率を表2に 示す.C-MPを用いて降水粒子を判別した場合もX-MPを用 いた場合と同様に,70%以上の的中率が得られた.



表1 X-MPを用いた粒子判別結果と地上降雪観測とを 比較した場合の的中率

XMP (新潟)		レーダによる粒子判別結果							
		雨	みぞれ	あられ	雪	計	的中率 [%]		
	雨	64	6	3	5	78	82.1		
厕	みぞれ	2	17	4	3	26	65.4		
L観	あられ	11	9	25	13	58	43.1		
휲	雪	0	0	10	61	71	85.9		
	計	77	32	42	82	233	71.7		



図10 X-MPを用いて判別したあられとみぞれの捕捉率



表2 C-MP を用いた粒子判別結果と地上降雪観測とを

比較した場合の的中率

(СМР	レーダによる粒子判別結果									
	((長野)	雨	みぞれ	あられ	UB	計	的中率 [%]				
地,上観測		雨	120	51	3	3	177	67.8				
	殿	みぞれ	0	89	0	13	102	87.3				
	上観	あられ	0	6	4	9	19	21.1				
	휲	雪	0	6	1	127	134	94.8				
		計	120	152	8	152	432	78.7				



より分類された雨,みぞれ,あられ,雪,氷晶別の雨量 算定定数を同定した.粒子別雨量算定定数を同定するた めに,田村式降水強度計による地上雨量(10分間平均降 水強度)と,地上観測地点に落下すると推測される上空 のレーダ反射強度(10分平均値)を整理した.この際, レーダ観測値による粒子判別結果を用いて,粒子種別毎 に地上雨量とレーダ反射強度を整理した.また,「移流 を考慮したことによる粒子の混在」と,「2時刻分のZを 用いる」ことを考慮して検討した.

5.1 X-MPの粒子別雨量算定定数の同定

X-MPを用いて降水粒子を判別し、田村式降水強度計で 観測した地上雨量を用いて粒子別雨量算定定数を同定し た.同定には2015年11月から2016年2月に北陸技術事務所 と信濃川河川事務所にて観測したデータと、2016年11月 から2017年2月に北陸技術事務所にて観測したデータを用 いた. 同定した粒子別雨量算定定数をひとつのグラフに示した結果を図12に示す.なお、図中の実線は、実際の観 測値が得られた範囲のみ示している.いずれの粒子について定数を同定でき、粒子別に異なるZ-R関係がみられた.

5.2 C-MPの粒子別雨量算定定数の同定

C-MPについても、X-MPと同様に粒子別雨量算定定数を 同定した.同定には2016年11月から2017年2月に道の駅花 の駅千曲川にて観測したデータを用いた.

同定した粒子別雨量算定定数をひとつのグラフに示し た結果を図13に示す.みぞれとあられはサンプル数が 少ないため定数を同定できていないが,サンプル数が確 保できた雨,雪,氷晶については,X-MPと類似した定数 が得られた.

6. X-MPとC-MPによる粒子判別結果の合成方法

新潟地域(京ヶ瀬局,中ノロ局)および富山・石川地 域(水橋局,能美局)のX-MPと,C-MP(聖高原局)の観 測範囲について,それぞれ粒子判別手法を適用し,移流 と相変化を考慮して地上における粒子判別結果を算出し た.その後,両者の粒子判別結果を合成する手法を検討 した.合成する際に,同一メッシュにおいて複数の粒子 が混在する場合(X-MPではあられと判定され,C-MPでは 雪と判定される等)がある.

一般的に、上層よりも地上に近い高度に存在する降水

粒子の方が粒径は大きく数濃度も高いため、大きなZuが 観測される.このため、同一メッシュにおいて複数の粒 子が混在する場合には、観測されたZHが大きな粒子を優 先するという方針で、各地域の粒子判別結果を合成した. C+X合成の粒子判別結果の例を図14に示す.柏崎市付近 は、X-MPの中ノロ局とC-MPの聖高原局の両者で観測可能 な領域である.この領域は中ノロ局の方が観測高度が低 いため、Zuが大きい方の粒子種別を採用すると、結果とし てほとんどのメッシュで中ノロ局の粒子判別結果が採用 されていることが確認された.また、図14の下図は北 陸地方整備局管内全域の粒子判別結果である.この図に より、北陸地方整備局管内を違和感なく合成できている ことがわかる.

7. 結論

X-MPを用いた降水粒子判別は,平成28年度に検討した 精度向上手法(高度250m毎に移流と相変化を考慮)によ り,70%程度以上の精度が確保できることがわかった.ま た,平成26年度から平成28年度に実施した地上降雪観測 結果より,X-MPに関しては,粒子別の雨量算定定数を同 定することができた.



C-MPを用いた降水粒子判別に関しては、平成28年度の 検討において、既往論文、有識者ヒアリングおよび地上 降雪観測を用いた精度検証により、X-MPと同等の精度で 利用可能な粒子判別手法を開発することができた.また、 C-MPについても、粒子別の雨量算定定数の同定を実施し た.サンプル数が確保できた雨、雪、氷晶については、 X-MPと同様の定数が得られたが、あられやみぞれについ てはサンプル数が確保できなかったため、今後も観測を 継続し、粒子別の雨量算定定数の同定を実施する予定で ある.さらに、X-MPによる粒子判別結果とC-MPによる粒 子判別結果との合成方法について検討し、北陸地方整備 局管内を違和感なく合成できることを確認できた.

現在、試験運用システムを構築中であり、開発した粒 子判別手法や冬期の降水量算定手法についても精度検証 を実施していく計画である.

参考文献

- M. Ishizaka, H. Motoyoshi, S. Nakai, 2013: A New Method for Identifying the Main Type of Solid Hydrometeors Contributing to Snowfall from Measured SizeFall Speed Relationship. Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol. 91, No. 6, 747-762.
- 2)横山宏太郎,大野宏之,小南靖弘,井上聡,川方俊和, 2003:冬期における降水量系の捕捉特性. 雪氷, 65(3), 303-316.
- 3) T. Kouketsu, H. Uyeda, T. Ohigashi, M. Oue, H. Takeuchi, T. Shinoda, K. Tsuboki, M. Kubo, and K. Muramoto, 2015: A Hydrometeor Classification Method for X-band Polarimetric Radar: Construction and Validation Focusing on Solid Hydrometeors under Moist Environments. J. Atmos. Oceanic Technol. (JTECH), 32(11), 2052-2074.
- 4) B. Dolan, and S. A. Rutledge, S. Lim, V. Chandrasekar, and M. Thurai, 2013: A Robust C-Band Hydrometeor Identification Algorithm and Application to a Long-Term Polarimetric Radar Dataset. J. Appl. Meteor. Climatol., Vol. 52, 2162-2186.
- 5) T. Matsuo, Y. Sasyo, Y. Sato, 1981:Relationship between Types of Precipitation on the Ground and Surface Meteorological Elements. Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol. 59, No. 4, 462-476.