

XバンドMPレーダを用いたVVP法による吹雪推定

大宮哲*1 松下拓樹*1 大久保幸治*1 菅原邦泰*1 西村敦史*1

1. はじめに

吹雪は多重衝突事故や長時間にわたる車両滞留の誘因となり、人的被害や経済的損失をもたらす。吹雪は空間的・時間的変動が大きい現象であるため、被害を効果的に軽減するためには、吹雪の発生状況を面的かつリアルタイムに把握することが望ましい。しかし、吹雪の発生を面的に監視するために広域かつ多点に観測機器を配置することは非現実的であるため、現状では道路管理用CCTVカメラ映像や現地パトロール等による目視確認、もしくは気象条件に基づく推測¹⁾によって判断している。

寒地土木研究所では、吹雪の発生を面的かつリアルタイムに把握すべく、高時空間分解能を有するXバンドMPレーダ（以下、X-MP。空間分解能：250mメッシュ、観測間隔：1分間、情報配信までに要する時間：観測終了から約1分間）による観測データを用いた吹雪把握手法について検討している。これまで、大宮ら²⁾は、X-MP石狩局およびX-MP北広島局のデータを用い、Dualドップラー法に基づく解析結果から、X-MPによる上空の観測データから地上における吹雪の発生状況を定量的に把握できる可能性があることを示したが、以下の課題が残されていた。

- Dualドップラー法は2基のレーダデータを必要とする風向風速推定手法であるため、推定可能なエリアが限られている。また、どちらかのX-MPでデータ欠測が生ずると推定不可能となる。
- 推定結果を検証するために地上での実測値と比較を行ったが、1地点のデータのみであった。吹雪の発生状況を面的に把握するためには複数地点における検証が必須である。

以上を踏まえ、本研究では1基のX-MPデータから風向風速の推定が可能なVVP法 (Volume Velocity Processing法)^{3), 4)}を用いた解析を行った。また、吹雪の推定結果の検証には地上5地点における実測値を使用した。本報ではその結果について述べる。なお、本研究の対象は降雪に起因する吹雪であり、一度地面に降り積もった雪が強風によって舞い上げられた吹雪（地吹雪）については取り扱わない。

2. 研究方法

本研究では、X-MP石狩局の観測データを用い、VVP法

によって求めた上空の風向風速に基づき、地上における飛雪流量を面的に推定した。また、スノーパーティクルカウンター（新潟電機株式会社製、以下SPC）で実測した地上飛雪流量との比較を行った。レーダ観測と地上観測の概念図を図1に、X-MP石狩局と、地上観測を行った5地点の位置関係を図2にそれぞれ示す。この5地点は、寒地土木研究所が所有する石狩吹雪実験場のほか、国土交通省北海道開発局が管理する除雪ステーション（厚田除雪ST、江別除雪ST、月形除雪ST、美唄除雪ST）である。なお、飛雪流量とは吹雪の強さを示す指標の一つであり、単位時間に単位面積を通過する雪の質量のことを指す（単位はg/m²/s）。使用したX-MPデータは、データ統合解析システム（DIAS）のWebページ⁵⁾より入手した。本研究の手順を以下に記す。

- ① X-MPレーダ雨量と地上降雪強度の関係把握
- ② VVP法による上空の風向風速の推定
- ③ 上空における飛雪流量の推定
- ④ 地上における飛雪流量の推定
- ⑤ 実測飛雪流量と推定飛雪流量の比較

吹雪は、「雪粒子が風によって大気中を舞う現象」である。したがって、吹雪の強さを推定する際には、降雪の強さと風速をより正確に推定することが重要である。そこで、まずは、降雪時のX-MPレーダ雨量と地上における降雪強度の関係について調べる（手順①）。次に、X-MPデータから上空における風向風速を推定する（手順②）。手順①と②で求めた降雪強度と風向風速より、上空における飛雪流量の面分布を推定する（手順③）。次に、風速の鉛直分布に基づき、落下中の降雪粒子が地面に到達するまでの風による移流効果を考慮し、地上における飛雪流量の面分布を推定する（手順④）。最後に、地上における推定飛雪流量と実測飛雪流量の比較を行う（手順⑤）。なお、降雪強度は「単位時間に単位面積に降った雪の重さに等しい水の深さ」のことを指し⁶⁾、その単位はレーダ雨量と同じmm/hである。

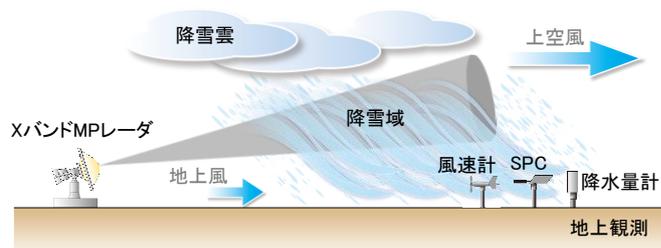


図1 レーダ観測と地上観測の概念図

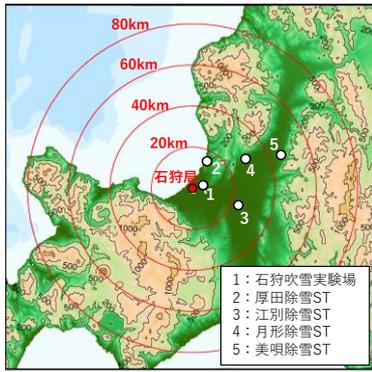


図2 X-MP石狩局と地上観測点の位置関係

3. X-MPレーダ雨量と地上降雪強度の関係

X-MPはもともと雨を計測する目的で開発されたレーダであるため、降雪時の観測精度は降雨時に比べて低い^{7), 8)}。そこで、降雪時のX-MPレーダ雨量と地上における降雪強度の観測結果を比較し、両者の関係を調べた。

3.1 降雪強度の観測方法

地上における降雪強度観測は、石狩吹雪実験場にて実施した。観測には二重の防風柵で重量式降水量計を囲った降水観測システム (Double Fence Intercomparison Reference, 以下DFIR) を使用した。DFIRは、現在最も高精度な降水観測ができる観測システムとして世界気象機関 (WMO) によって推奨されている方法である。DFIRの諸元や観測原理、実測値に対する補正処理方法についてはWMOのレポート他^{9), 10)}を参照されたい。

3.2 使用データと比較方法

X-MPレーダ雨量と地上降雪強度の比較には、3冬期分のデータ (2014~2016年度、12月1日~3月31日) を使用した。1分おきに配信されるDFIR直上メッシュにおけるX-MPレーダ雨量から10分間降水量を求め、地上DFIRで観測した10分間降水量と比較した。なお、本比較の対象は降雪であることから、地上気温が0℃以下の時のデータのみを使用した。X-MPは上空のデータである一方、DFIRは地上のデータである。降雪粒子は雨滴に比べて風の影響を受けやすい。すなわち、両者の比較にあたっては、降雪粒子が落下中に風によって移流される影響や、降雪粒子が地上に達するまでの時間差について考慮に入れる必要がある。そこで、本解析では風による移流の影響を極力無くすため、気象庁発行の「気象観測の手引き」¹¹⁾に基づき、高度10mにおける10分間平均風速が0.3m/s未満の事例のみを抽出し、比較に用いた。この手引きによると、0.3m/s未満の風速は「煙がまっすぐ昇る状態」と記述されているため、降雪粒子は風の影響を受けにくく、ほぼ真下に落下するとみなすことができる。降雪粒子が地上に達するまでの時間差を見積もるためには、レーダによる降雪粒子の観測高度と降雪粒子の落下速度に関する情報が必要である。冬期における

X-MP石狩局の最低運用仰角 (=1.1°) と、X-MP石狩局から石狩吹雪実験場までの距離から求めた石狩吹雪実験場上空におけるレーダビーム高度、すなわちレーダによって降雪観測が可能な最低高度は約340mである。降雪粒子の落下速度は、降雪粒子の大きさや降雪種 (雪片、あられ、みぞれなど) によって大きく異なるが、雪片についてはおおむね0.7~1.2 m/s、あられについてはおおむね1~3 m/sであることが多い^{12), 13)}。この落下速度を元に、高度340mから地上に達するまでに要する時間を計算すると、2~8分程度であった。そこで、ここでは降雪粒子がレーダによって観測されてから地上に到達するまでの時間を一律5分間と定め、比較時にはその時間差を考慮に入れた。

3.3 比較結果

X-MPレーダ雨量から求めた10分間降水量と地上DFIRから求めた10分間降水量の関係を図3に示す。図中の破線は1対1の等値線を、実線は近似直線を示す。この結果から、降雪時のX-MP観測値は実際の地上降雪強度を過大評価する傾向があることが示された。近似直線の傾きは0.71であった。決定係数R²は0.55 (データ数は109) であることから、この近似式は地上降雪強度を良く説明できるといえる。以降、本報告書では、X-MPによって観測されたレーダ雨量Pと地上における降雪強度P'の関係は、式 (1) が成り立つものとして扱う。

$$P' = 0.71P \quad (1)$$

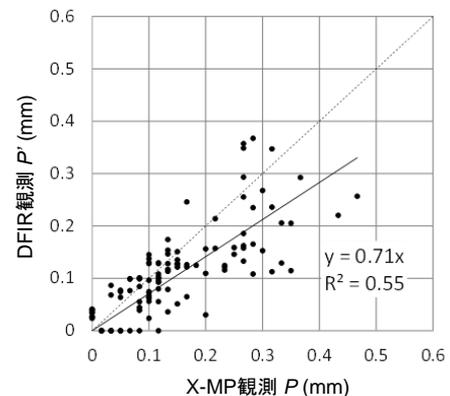


図3 10分間降水量の比較 (X-MP vs DFIR)

4. VVP法による上空の風向風速の推定

4.1 VVP解析

1基のX-MPで得られるドップラー速度は、レーダビームに沿った方向のみの風速成分であるため、その風がレーダ基地局に向かうものか、遠ざかるものか、についての情報しか得られない。大宮ら²⁾は、X-MP石狩局およびX-MP北広島局で得られたドップラー速度をDualドップラー解析することで風向風速を求めた。しかし、Dualドップラー解析は2基のX-MPデータを必要とするため、解析可能なエリアが限られる。そこで、本解析では1基

のX-MPで得られるドップラー速度から風向風速の算出が可能なVVP法による推定を行った（以降、VVP法により推定した風をVVP風と呼ぶ）。VVP法とは、1基のドップラーレーダで観測される有限な三次元領域を定め、この領域内の複数の極座標のドップラー風速から帰算を行い、その領域内における平均の風ベクトルを算出する方法のことである。詳細については先行研究^{3), 4)}を参照されたい。

本研究では、2018-19年冬期に発生した冬型気圧配置時の吹雪84事例を対象に解析を行った。VVP解析の対象高度は最大6高度（300m、500m、750m、1000m、1250m、1500m）とした。なお、レーダから離れるほどレーダビームは高高度を通過するため、遠方では低高度の風向風速を計算することができなくなる。そこで、ここでは高度500mについてはX-MP石狩局を中心とした半径35kmまでを、高度1000mについては半径60kmまでを、高度1500mについては半径80kmまでをVVP解析の対象領域とした。なお、解析対象領域内であっても大気空間中に降雪粒子が存在しない場所ではドップラー風速が得られないため、VVP風についても算出することができないことに留意されたい。

4. 2 解析結果

解析結果の一例として、2018年12月24日0:00の高度1000mにおけるVVP風を図4に示す。求めたVVP風の妥当性を確認するため、気象庁毎時大気解析により得られた900hPa高度面（高度約1000m）の風向風速（以下、HANAL風）と比較した。その一例として、石狩吹雪実験場の直上メッシュにおけるVVP風とHANAL風の間関係を図5に示す。図中には、相関係数R、回帰係数a、データ数Nを付記してある。この結果より、VVP風は風速・風向ともに概ねHANAL風と整合的であると言える。なお、図中のデータ数(N=45)がVVP解析を行った吹雪事例数(=84)よりも少ないが、これは吹雪39事例において石狩吹雪実験場の直上メッシュ（高度約1000m）に降雪が存在しなかったためである。なお、図4中では標高1000mを超える山岳域においても風ベクトルが示されているが、これは便宜的に地形を無視してVVP計算を行ったことに起因する。等高度面データを作成する際には、その高度よりも上空を通過するレーダビームから求めたVVP計算結果も内挿処理に用いるため、実際にはレーダビームが通過していない地点においても等高度面データが作成されるためである。また、山岳域では地形的影響によって局地的に風が急変することもあるため、一様風の仮定に基づくVVP計算では誤差要因となり得る。以上より、山岳域におけるVVP解析結果の精度は平地に比べて劣る可能性が高いと考えられる。

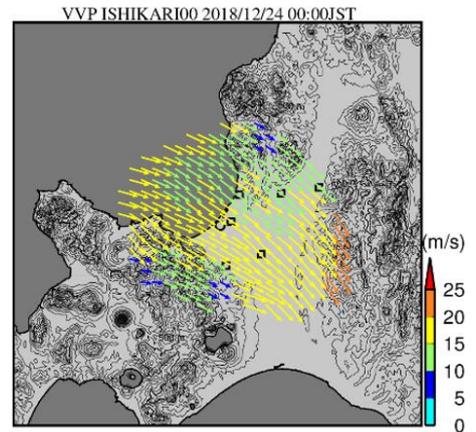


図4 VVP法で求めた高度1000mの風向風速（5kmメッシュ）

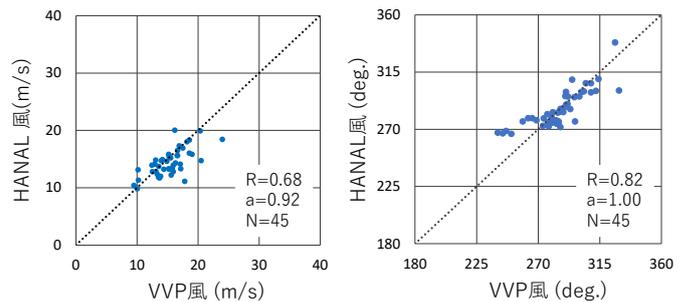


図5 高度1000mにおけるVVP風とHANAL風の比較

（左：風速、右：風向）

4. 3 風速の鉛直分布について

次に、風速の鉛直分布について述べる。一例として、石狩吹雪実験場の直上メッシュにおけるVVP風の鉛直分布を図6に示す。この結果より、上層で風速が大きいときは下層でも風速が大きいこと、また、上層では鉛直方向の風速変化が小さく、下層では風速の減りが大きいことが確認できる。同様の傾向は、他の4地点全てにおいても確認された。高度500m以上における風速変化について、最小二乗法により回帰式を求めた（図6中の青線）。この傾きを全地点について平均したところ、風速変化量は1000mで0.5m/sであった。高度500m以下の風速変化については、大気が中立状態にあると仮定して対数則にならうとみなした（カルマン定数 $\kappa=0.4$ ）。地表粗度については、周辺の地表面状況を考慮し、道路橋耐風設計便覧¹⁴⁾に基づき全て0.05m（地表粗度区分Ⅱ）とした。この鉛直分布（地面～高度500mは対数変化、高度500mより上空は線形変化）で求めた地上における推定風と風向風速計による実測風の比較結果を図7に示す。なお、推定風の風向は、VVP解析で求めた上空風の風向から変化しないと仮定している。図7より、上空1000mにおける風向風速の比較結果（図5）と同様、地上風についても両者は概ね整合的であることが確認できる。以上より、風による降雪粒子の移流効果を考慮する際（6章にて記述）には、この鉛直分布を使用することとした。

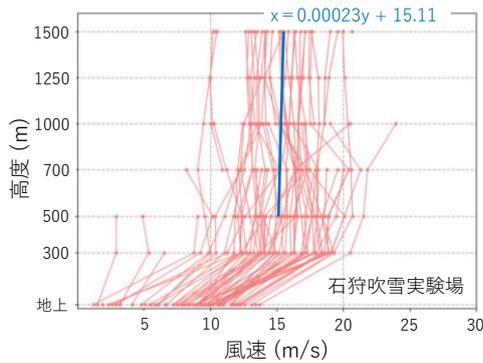


図6 VVP法で求めた風速の鉛直分布(石狩吹雪実験場)

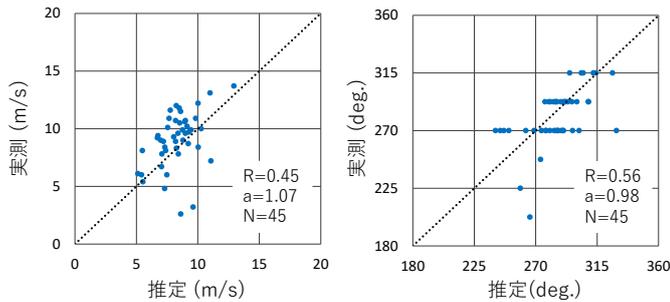


図7 地上における推定風と実測風の比較

(左：風速、右：風向)

5. 上空における飛雪流量の推定

本章では上空における飛雪流量の推定を行う。飛雪流量 M_f ($\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$) は、飛雪空間密度 n (g/m^3) と風速 V (m/s) の積で与えられる (式 (2))。

$$M_f = nV \quad (2)$$

n は大気空間1立方メートルあたりに存在する雪粒子の質量であり、降雪フラックス M_v ($\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$) を降雪粒子の落下速度 w (m/s) で除することで求められる (式 (3))。なお、 M_v は単位時間に単位面積を通過した (落下した) 降雪粒子の質量のことを指す。

$$n = M_v/w \quad (3)$$

M_v は降雪強度 P' (mm/h) の単位換算によって求めることができ、両者の関係は $M_v = 0.28 P'$ として表すことができる。したがって、レーダ雨量 P と M_v の関係は式 (1) を用いて式 (4) で表され、さらに n は P と w を用いて式 (5) によって算出される。これにより、降雪粒子の落下速度 w と X-MP 観測によって得られるレーダ雨量 P から、上空における飛雪空間密度 n を算出できる。

$$M_v = 0.28P \quad (4)$$

$$n = 0.28P/w \quad (5)$$

この n と前章で求めた高度1000mにおける風速 V から、式 (2) より、高度1000mにおける飛雪流量 M_f を面的に求めた (250mメッシュ)。ここでは、降雪粒子の落下速度 w を $1.2\text{m}/\text{s}$ として計算した。飛雪流量の推定結果の一例 (図4と同日同時刻) を図8に示す。

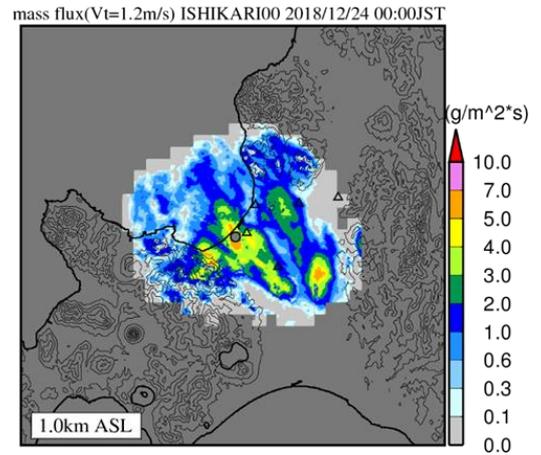


図8 高度1000mにおける推定飛雪流量の面分布

6. 地上における飛雪流量の推定

次に、地上における飛雪流量の面分布を推定する。大宮ら²⁾は、レーダデータから地上の飛雪流量を推定するにあたり、降雪粒子が風によって移流される効果を考慮に入れる必要があると述べている。そこで、本研究においても風による降雪粒子の移流の影響を考慮に入れた推定を行う。4章で述べた風速の鉛直分布に基づき、高度1000mにおけるVVP風から地上風を求めた。降雪粒子の移流については、高度1000mにある降雪粒子が地上に到達するまでの間、高度10m間隔で水平移流する量を計算し、地上における降雪粒子の落下位置を推定した。このプロセスで求めた地上風速および降雪の面分布より、飛雪流量を求めた。推定した地上飛雪流量の分布を図9に示す。この吹雪時 (2018年12月24日0:00) は北西風であったため (図4)、上空の飛雪流量分布が地上では全体的に南東に移動していることが見てとれる。また、地上では上空よりも風速が小さいため、地上の飛雪流量は全般に小さくなっている。なお、高度1000mから落下した雪粒子が地上に到達するまでに要する時間は約14分間 (降雪粒子の落下速度は $1.2\text{m}/\text{s}$ と仮定) である。したがって、図9は0:00時点で推定される0:14の地上飛雪流量の面分布を指す。

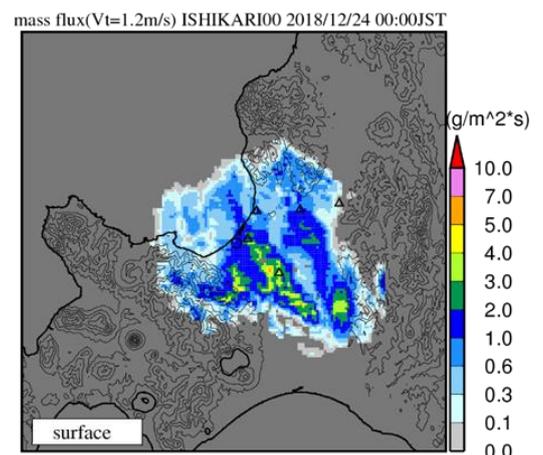


図9 地上における推定飛雪流量の面分布

7. 推定飛雪流量と実測飛雪流量の比較

7. 1 SPCを用いた飛雪流量の実測

SPCを用いた飛雪流量の実測を地上5地点（図2）にて行った。SPCは非接触で光学的に吹雪粒子を計測する機器であり¹⁵⁾、測定可能な粒径範囲は0.05mm～0.5mmである。吹雪粒子がセンサーの計測領域を通過した際に生じる影をもとに粒径と通過個数をカウントし、飛雪流量を算出している。

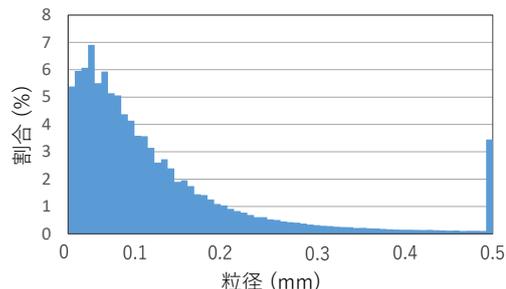
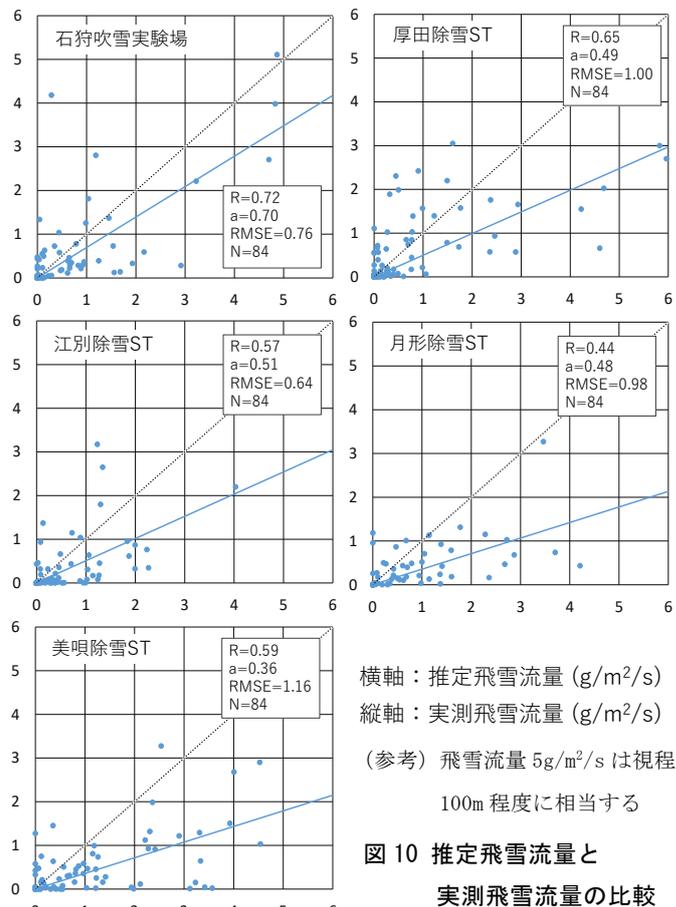
本研究の解析対象は降雪起因の吹雪粒子であることから、地吹雪粒子（一度地面に降り積もった雪が風によって舞い上げられた粒子）が計測に混入することを極力防ぐため、SPCの設置高度を7mとした。Naaim et al.¹⁶⁾による降雪を伴う吹雪時の観測結果によると、高度3.4mにおける飛雪流量は風速に影響を受けにくいことが示されている。この結果は高度3.4mでは吹雪中に含まれる地吹雪成分が少ないことを示すものであることから、これを踏まえ、高度7mにまで達している地吹雪粒子は十分に少ないものと見なした。

次に、SPCによる実測値の取扱いに関する留意点を以下に記す。SPCは吹雪粒子が全て球対であると仮定して飛雪流量を算出しているが、その大半は非球体である。非球体の場合は実際の粒子体積と等価球の体積が一致しないため、飛雪流量は過大評価される¹⁷⁾。一方で、粒径0.5mmを超える粒子については全て0.5mmの粒子として計算処理される。また、粒子がセンサーの計測領域の端をかすめて通過した場合にも粒径は過小評価されるため、これらの場合には飛雪流量が過小評価される¹⁸⁾。他にも、計測領域に同時に複数粒子が入った場合にも計測誤差の要因となり得る。このように、SPCによる実測値には様々な計測誤差が含まれているが、本研究ではSPCによって出力されたそのままの値を使用した。

7. 2 比較結果と考察

実測飛雪流量と推定飛雪流量の地点ごとの比較結果を図10に示す（データ数N=84）。図中の破線は1対1の等値線を、実線は回帰直線を示す。全地点において回帰係数aは1より小さく、推定値は実測値を過大評価する傾向があることが確認された。相関係数Rは0.44～0.72であったことから両者は定性的に概ね整合しているとは言えるものの、バラツキは大きく、精度は決して高くはない（RMSE=0.64～1.16）。

推定値が実測値を過大評価した主要因は、0.5mm以上の吹雪粒子が相当数存在していたためと考えられる。上述したように、SPCは粒径0.5mmを超える粒子は全て0.5mmとして計算処理するため、実際の粒径を過小評価することになる。その一例として、石狩吹雪実験場でのSPC観測によって得られた粒径分布を図11に記す。この



結果からも、粒径0.5mmのところにピークがあったことが確認できる。全体としては推定値が実測値を過大評価する傾向があった一方、中には実測値の方が大きかった結果もあった。この一因としては、地吹雪粒子が高度7mにまで達していたことによる過大評価の可能性が高い。その一例として、5地点の中で実測値が推定値を上回る事例数が最も多かった厚田除雪ステーションにおける飛雪流量の比較結果（図10）を、仮に地上風速7.5m/sを閾値として作図し直した結果を図12に再掲する。この結果より、風速が大きい時に実測値が推定値を上回ることが多いことが示された。Naaim et al.¹⁶⁾の吹雪観測は広い雪原で実施された一方で、本観測は除雪ステーション構内での実施である。SPCは可能な限り卓越風向側に開けた場所に設置するように心がけたが、設置環境に制約があったこともあり、観測結果が周辺の建造物等の影響を受けていた可能性もあるだろう。

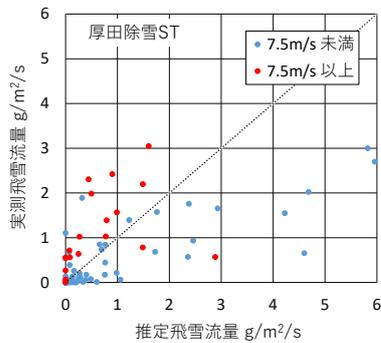


図 12 厚田除雪 ST における飛雪流量の比較 (図 10 の再掲)

まとめと今後

本研究では、高時空間分解能を有するX-MPを用いて地上における吹雪の発生状況を面的かつリアルタイムに把握すべく、X-MPデータから地上の飛雪流量を推定した。X-MP石狩局の観測データを用い、VVP法によって上空の風向風速を求めた。レーダ雨量と地上DFIRによる降雪強度観測の比較から、レーダ雨量から降雪強度を算出するための補正係数を提示した。降雪強度から求められる飛雪空間密度およびVVP法によって求めた風向風速を用い、上空および地上における飛雪流量を面的に推定した。地上における推定飛雪流量をSPCによる実測飛雪流量と比較したところ、両者のバラツキは大きかったものの、正の相関があることが確認され、定性的に概ね整合することが示された。この結果は、X-MPを用いて地上における吹雪の発生状況を面的かつリアルタイムに把握できる見込みがあることを示すものである。

本研究では降雪に起因する吹雪のみを研究対象としたが、今後は降雪時における地吹雪起因の吹雪を対象とした飛雪流量推定を行う予定である。また、推定精度を向上させるべく、解析事例数を増やすほか、X-MP北広島局のデータを用いたVVP解析による推定を行う。

謝辞

本研究において、一般財団法人日本気象協会の丹治和博氏をはじめとする各位には、レーダデータの解析においてご協力いただきました。吹雪観測においては、国土交通省北海道開発局が管轄する除雪ステーションの構内に観測機器を設置させていただきました。本研究で利用したX-MPのデータセットは、文部科学省の委託事業により開発・運用されているデータ統合解析システム(DIAS)の下で収集・提供されたものです。本研究は、一般財団法人河川情報センターの令和元年度研究助成を受けて実施しました。

参考文献

- 1) 大宮ら(2015): 判別分析を用いた地吹雪発生条件に関する検討, 寒地技術論文・報告集, 33, pp.34-39.
- 2) 大宮ら(2020): XバンドMPレーダによる地上吹雪の定量的把握の可能性, 雪氷, 82(3), 145-156.
- 3) Waldteufel and Corbin (1979): On the analysis of single-Doppler radar data, J. Appl. Meteor., 18, 532-542.
- 4) 立平・鈴木(1994): 単一ドップラーレーダーによる上層風推定の精度, 天気, 41, 762-764.
- 5) データ統合解析システム(DIAS) HP.
<http://www.diasjp.net/> (2021年10月19日閲覧)
- 6) 日本雪氷学会(2014): 新版雪氷辞典, 古今書院, 307pp.
- 7) 林ら(2014): 北陸地方における地上雨量観測所を用いたXバンドMPレーダの降水量(降雪量)推定精度の評価, 水文・水資源学会誌, 27(2), 67-76.
- 8) 増田ら(2018): XRAINを用いた冬期降水量推定精度の向上, 土木学会論文集B1(水工学), 74(4), I_85-I_90.
- 9) WMO(1985): International Organizing Committee for the WMO Solid Precipitation Measurement Intecom parison, Final Report of the First Session. Naskoping, Sweden. WMO, Geneva, 31pp.
- 10) 大宮(2015): 強風時における降雪計測の課題と二重柵基準降水量計を用いた降雪強度の測定, 寒地土木研究所月報第744号, 31-34.
- 11) 気象庁 HP: 気象観測の手引き(平成10年9月気象庁).
https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kansoku_guide/tebiki.pdf (2021年10月19日閲覧)
- 12) 梶川ら(1996): 雪片の落下速度と降雪結晶形との関係, 雪氷, 58, 455-462.
- 13) Ishizaka et al. (2013): A new method for identifying the main type of solid hydrometeors contributing to snowfall from measured size-fall speed relationship. J. Meteor. Soc. Japan, 91, 747-762.
- 14) 日本道路協会(2007): 道路橋耐風設計便覧(平成19年改訂版), 日本道路協会編, 296pp.
- 15) Schmidt (1977): A system that measures blowing snow. USDA Forest Service Research Paper, RM-194, 80pp.
- 16) Naaim et al.(2012): How to detect snow fall occurrence during blowing snow event?, Proc. 2012 International Snow Science Workshop, Anchorage, 976-982.
- 17) 佐藤ら(2005): スノー・パーティクル・カウンター(SPC)による飛雪流量測定に及ぼす飛雪粒子の形状の影響. 雪氷, 67, 493-503.
- 18) 佐藤(1991): 吹雪計(SPC)における飛雪粒子の粒径効果に関する考察(第2報), 防災科学技術研究所研究報告, 47, 19-23.