

XバンドMPレーダによる 吹雪のリアルタイム面的推定手法の提案

国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 雪氷チーム ○ 大宮 哲
同上 松下 拓樹
同上 大久保 幸治

本研究の目標は、XバンドMPレーダを用いて、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るための手法を構築することである。既報¹⁾では2基のレーダデータを必要とする解析手法を用いた議論を行ったが、解析可能エリアに限られる等の課題があった。そこで、本報では1基のレーダデータから風向風速の算出が可能なVVP法に基づき、地上における吹雪の強さ(飛雪流量)を推定した。実測飛雪流量との比較によって、両者の間には正の相関があることが確認されたことから、本推定手法の適用可能性を示すことができた。

キーワード：気象レーダ、吹雪、災害情報

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ことから、被害を効果的に軽減するためには、そ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、吹雪の発生を監視するために観測機器を多点配置することは非現実的である。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²⁾によって吹雪の発生状況を判断している。

寒地土木研究所では、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)のデータを用いて、地上における吹雪の発生を面的かつリアルタイムに把握するための手法を検討している。既報¹⁾では、X-MP 石狩局および北広島局の2基のレーダデータを用いて、Dualドップラー法に基づく解析が行われ、X-MP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が示された。しかし、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、解析可能なエリアに限られている。また、どちらかのX-MPでデータ欠測が生ずると解析不可能となる。
- 解析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地点のみのデータであった。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。

これらの課題を踏まえ、本研究では1基のX-MPデータから風向風速の算出が可能なVVP法(Volume Velocity Processing法)³⁾に基づく解析を行った。また、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。本報ではその解析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(既報¹⁾と同様)。

2. 研究方法

本研究では、X-MP石狩局の観測データを用いて、地上における飛雪流量を面的に推定した。また、スノーパ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石狩局および地上観測を行った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ST、江別ST、月形ST、美唄ST)である。

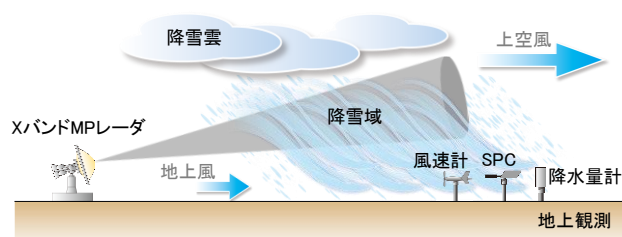


図-1 レーダ観測と地上観測の概念図

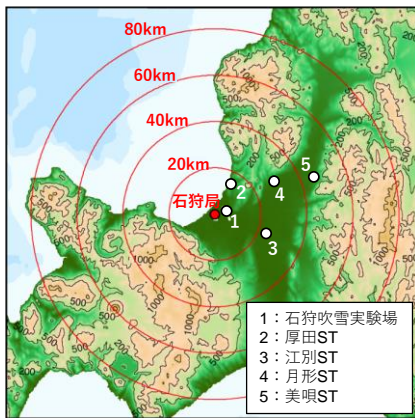


図-2 X-MP 石狩局と地上観測点の位置関係

なお、飛雪流量は単位時間に単位面積を通過する雪の質量（単位は $g/m^2/s$ ）のことを指し、吹雪の強さを示す指標の一つである。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⁹⁾より入手した。

本研究の手順を以下に記す。

- ① X-MPレーダ雨量から降雪強度を算出
- ② X-MPレーダのドップラー速度から上空の風向風速を推定
- ③ 上空の飛雪流量を推定
- ④ 地上の飛雪流量を推定
- ⑤ 地上での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、降雪と風の強さに関する情報が必要となる。そこで、まず、降雪時のX-MPレーダ雨量から降雪強度を求める（手順①）。次に、X-MPレーダのドップラー速度から上空の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速から、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に風によって移流する影響を考慮し、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、地上飛雪流量の推定結果を検証するため、地上での実測飛雪流量と比較する（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⁵⁾、その単位はレーダ雨量（ mm/h ）に等しい。

3. X-MP レーダ雨量と地上降雪強度の関係

元来、X-MP は雨を計測する目的で開発されたものであるため、降雪時の観測精度は降雨時よりも劣る⁶⁾。したがって、一般配信されているレーダ雨量をそのまま降雪強度として解析に使用することは誤差要因となりうる。そこで、まず、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。

(1)降雪強度の観測方法

石狩吹雪実験場内において降雪強度観測を行った。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⁷⁾を参照されたい。

(2)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 $0^{\circ}C$ 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密度が小さく、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るため、気象庁発行の「気象観測の手引き」⁸⁾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 $0.7\sim 1.2m/s$ 、あられについてはおおむね $1\sim 3m/s$ であることが多い^{9),10)}。この落下速度を元に高度340mから地上に達するまでにかかる時間を計算すると2～8分程度であった。ここでは、降雪粒子の大きさや降雪種の違いによる落下速度の違いは無視し、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（落下速度は約 $1.2m/s$ に相当）と定め、比較時にはその時間差を考慮に入れた。

(3)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

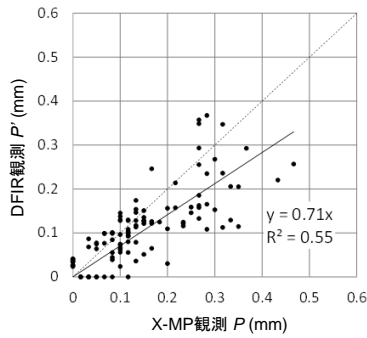


図-3 10分間降水量の比較 (X-MP vs DFIR)

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 R^2 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、本報では、X-MP によって観測されたレーダ雨量 P と地上の降雪強度 P' の関係は次式が成り立つものとして扱う。

$$P' = 0.71P$$

4. WP 法による上空の風向風速の推定

(1) WP 解析

1基のX-MPから得られる風速情報 (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。既報¹⁾においては、X-MP石狩局および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。この解析には2基のX-MPデータを要するため、解析可能なエリアが限られる。また、片方が欠測すると推定不可能となる。そこで、本研究では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VWP法による推定を行った (以降、VWP法により推定した風をVWP風と呼ぶ)。VWP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回帰計算を行い、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⁾を参照されたい。

本研究では、2018年度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。VWP解析の対象高度は最大6高度 (300m、500m、750m、1000m、1250m、1500m) とした。なお、レーダビームはレーダから離れるほど高い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、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VWP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、VWP風を算出することができないことに留意されたい。

(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VWP風を図-4に示す。このVWP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。図-5に、石狩吹雪実験場の直上メッシュにおけるVWP風とHANAL風の関係を示す。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、VWP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 (=45) がVWP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) に降雪粒子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VWP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VWP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VWP計算では誤差要因となり得る。以上より、山岳域におけるVWP解析結果の精度は平地に比べ劣る可能性が高いと考えられる。

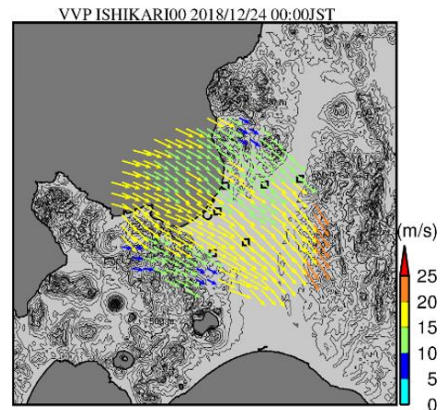


図-4 WP 法で求めた高度 1000mの風向風速 (5km メッシュ)

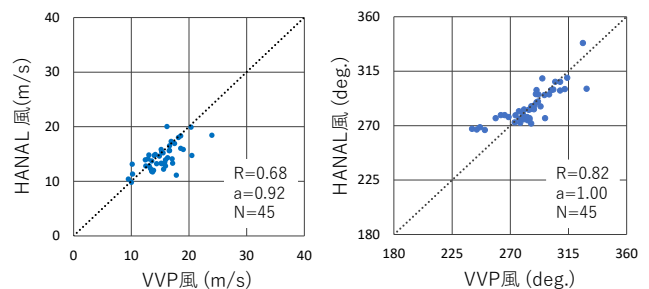


図-5 高度 1000mにおける WP 風と HANAL 風の比較
(左: 風速、右: 風向)

(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WVP風の鉛直分布を図-6に示す（地上の値は風向風速計による実測結果）。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、対数則にならうとみなした（カルマン定数 $\kappa=0.4$ ）。地表面粗度については、周辺の地表面状況を考慮し、道路橋耐風設計便覧¹¹⁾に基づき全て0.05m（粗度区分Ⅱ）とした。また、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、WVP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（5章に記述）には、この鉛直分布を使用することとした。

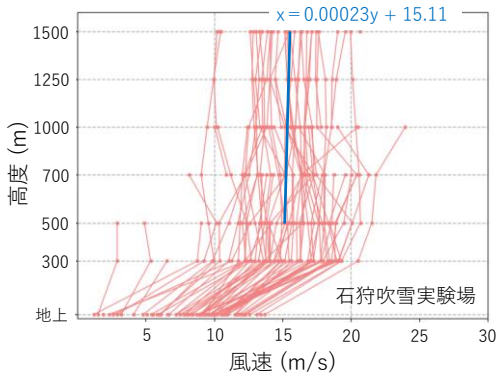


図-6 WP法で求めた風速の鉛直分布（石狩吹雪実験場）

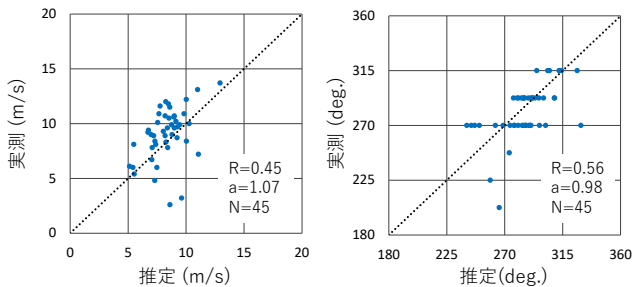


図-7 地上における推定風と実測風の比較
(左：風速、右：風向)

5. 飛雪流量の推定

3章で算出した降雪強度と4章で求めた高度1000mにおける風速を元に、高度1000mにおける飛雪流量を面的に算出した（250mメッシュ）。推定結果の一例（図-4と同日同時刻）を図-8に示す。

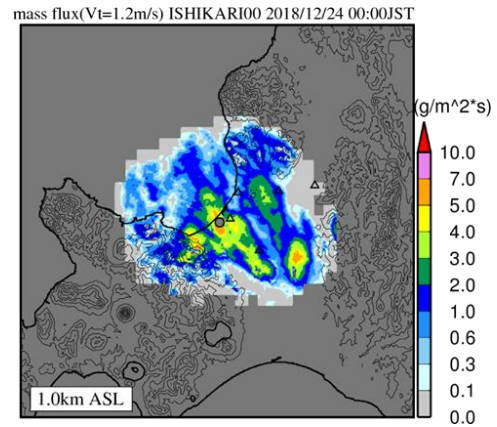


図-8 高度1000mにおける推定飛雪流量の面分布

次に、地上における飛雪流量の面分布を推定する。既報¹⁾において、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ことが示された。そこで、本研究においても、風による降雪粒子の移流効果を考慮に入れた地上降雪強度分布を推定した。4章で述べた風速の鉛直分布に基づき、高度1000mにおけるWVP風から地上風を求めたほか、風による降雪粒子の移流量を計算し、地上における降雪粒子の落下位置を推定した。この推定イメージを図-9に示す。このプロセスで求めた地上風および地上降雪強度分布より、地上における飛雪流量分布を求めた（図-10）。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確認できる。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1.2m/sと仮定）である。よって、図-10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。

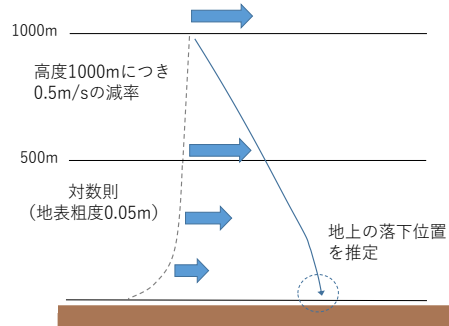


図-9 降雪粒子の落下位置の推定イメージ

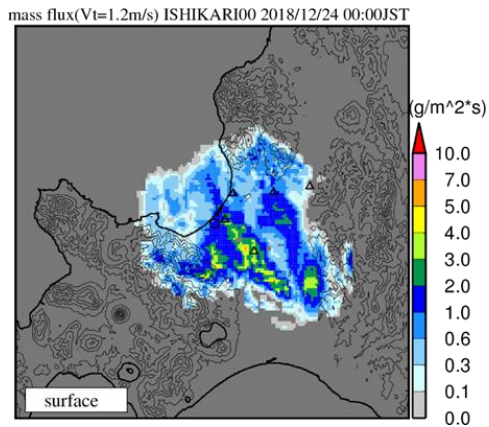


図-10 地上における推定飛雪流量の面分布

6. 推定飛雪流量と実測飛雪流量の比較

(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)で行った。SPCは非接触で光学的に吹雪粒子を計測する機器であり、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。Naaïm et al.¹²⁾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。これは高度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、高度7mに達する地吹雪粒子は十分に少ないと考えられる。

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体であると仮定して飛雪流量を算出しているが、実際は大半が非球体である。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¹³⁾。一方で、粒径が0.5mmを超えるものについては全て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は粒径が過小評価される。よって、これらの場合には飛雪流量が過小評価される¹⁴⁾。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、本報ではSPCによる出力値をそのまま使用した。

(2) 比較結果

推定飛雪流量と実測飛雪流量の地点ごとの比較結果を図-11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、推定値は実測値よりも大きい傾向があった。二乗平均平方根誤差RMSEは0.64~1.16であり、

決して精度が高いとは言えないものの、相関係数Rは0.44~0.72であったことから、両者の間には正の相関があると言える。なお、任意の風速値以上のデータを除くことで、相関性の向上および誤差の低減が確認されたが、その考察は次節で述べる。

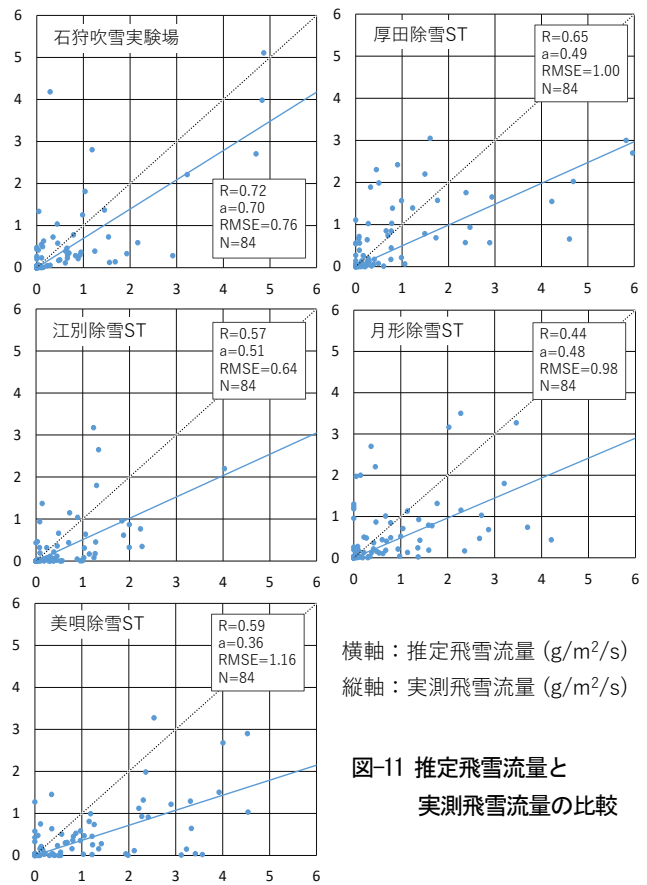


図-11 推定飛雪流量と実測飛雪流量の比較

(3) 考察

推定値が実測値より大きくなった一因として、0.5mm以上の吹雪粒子の存在による実測値の過小評価が考えられる。一例として、月形除雪STにおけるSPC観測によって得られた粒径分布および体積寄与率を図-12に記す。この結果から、粒径0.5mm以上の吹雪粒子が相当数あり、実測飛雪流量の過小評価に寄与していたことが確認できる。

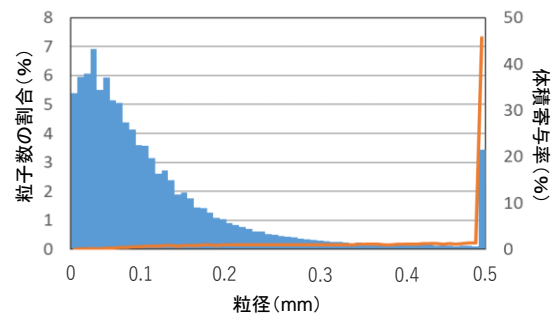


図-12 SPC 観測で得られた粒径分布および体積寄与率

全体としては推定値が実測値より大きい傾向があった一方で、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に達したことに

よる実測飛雪流量の過大評価の可能性が挙げられる。一例として、図-11に示した厚田除雪STおよび月形除雪STの結果を、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-13に再掲する。なお、図中には風速7.5m/s未満のデータのみを対象に作成した近似直線（切片ゼロ）を付記してある。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確認された。Naa'im et al.¹²⁾による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したが、設置環境には制約があった。よって、周辺の建造物等の影響によって乱流が発生し、雪面から雪粒子が巻き上げられた可能性もあると考えられる。風速7.5m/s未満のデータのみを対象に相関係数を求めたところ、厚田で0.82、月形で0.54となり、相関性が向上することが確認された。また、近似直線に対する標準偏差は厚田で0.94、月形で0.86であり、図-11に示すRMSEよりも値が小さくなった。同様の結果は他の3地点でも確認された（ただし、地点ごとに風速条件は異なる）。これはすなわち、推定過程において適切な条件設定や補正を考慮することで、より精度の高い推定結果が得られることを意味する。

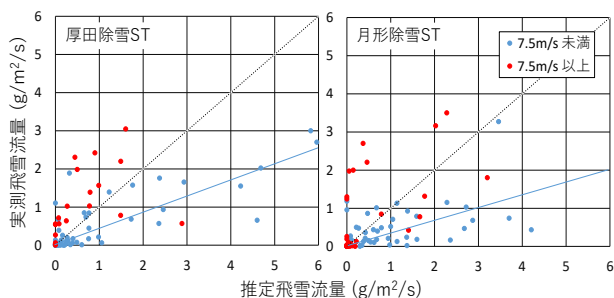


図-13 厚田除雪STおよび月形除雪STにおける飛雪流量の比較
(図-11の再掲)

7. まとめと今後

本報では、1基のX-MPデータから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、データ解析を行った。まず、地上DFIRによる降雪強度観測の結果から、一般配信されている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。次に、X-MP石狩局の観測データを用い、WVP法によって上空の風向風速を求めた。求めた降雪強度と風向風速から、上空および地上の飛雪流量を面的に推定した。SPCによる地上の実測飛雪流量と比較した結果、両者は正の相関があることが確認された。以上より、1基のX-MPデータを用いた地上飛雪流量の推定手法について、その適用可能性を示すことができた。ただし、推定精度向上に向けた検討余地は残されている。適切な条件設定や補正方法を確立することによって、より高精度な推定結果を得ることができる

だろう。今後は、推定精度を向上させるべく、解析事例数を増やすほか、気象条件毎に分類した解析を行う。また、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についても行う。加えて、X-MPデータに基づく吹雪時の視程に関する議論を行う。

謝辞：レーダデータの解析において、一般財団法人日本気象協会の各位にご協力いただいた。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いた。本研究では、国土交通省が提供するX-MPデータを使用した。このデータセットは、文部科学省の補助事業により開発・運用されているデータ統合・解析システム(DIAS)の下で収集・提供されたものである。本研究は、一般財団法人河川情報センター令和元年度研究助成を受けて実施した。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) データ統合・解析システム(DIAS) HP.
<http://www.dias.jp.net/> (2022年1月14日閲覧)
- 5) 日本雪氷学会(2014)：新版雪氷辞典，古今書院，307pp.
- 6) 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.
- 7) WMO(1985)：International Organizing Committee for the WMO Solid Precipitation Measurement Intecom parison, Final Report of the First Session. WMO, Geneva, 31pp.
- 8) 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 (2022年1月14日閲覧)
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) Naa'im et al. (2012)：How to detect snow fall occurrence during blowing snow event?, Proc. 2012 International Snow Science Workshop, Anchorage, 976-982.
- 13) 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.
- 14) 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，防災科学技術研究所研究報告，47，19-23.