【研究成果報告時/報告書（概要版）】様式-１-ウ

積雪寒冷地における二重偏波ドップラーレーダデータの利活用に関する研究

（国研）土木研究所寒地土木研究所　研究員　大宮哲

Ｘバンド二重偏波ドップラーレーダ（以下、X-MP）は、元来、雨を観測する目的で開発・整備されたものであるため、雪の観測には適さない。そのため、冬期の積雪寒冷地において、X-MP データは有効利用されていないのが現状である。

本研究では、冬期X-MPデータを有効利用すべく、X-MPデータから地上における吹雪の発生状況を把握する方法について検討した。まず、X-MP観測で得られるドップラー風速を用い、VVP法によって上空の風向風速を求めた。次に、VVP法で求めた風向風速と、一般配信されているレーダ雨量から、上空における飛雪流量（吹雪の強さを示す指標の一つ。単位時間に単位面積を通過する雪の質量のこと）の面分布を推定した。最後に、風速の鉛直分布に基づき、地上における飛雪流量の面分布を推定した。地上における推定飛雪流量と実測飛雪流量を比較したところ、定性的な一致が確認された。以上より、X-MP データから地上における吹雪の発生状況を把握できる、と結論付けた。

Key Words：二重偏波ドップラーレーダ、VVP法、飛雪流量、スノーパーティクルカウンター

１．はじめに

国土交通省は、集中豪雨や局所的大雨の監視体制強化を目的に、Xバンド二重偏波ドップラーレーダ（以下、X-MP）の全国配備を2008年より進めてきた。北海道内には2013年に北広島市、2014年に石狩市に設置され、現在はこの2基体制でそれぞれ半径約60kmの範囲の降水状況を常時監視している。X-MPの特長は二重偏波（水平・垂直）を用いて観測を行っている点である。雨滴が落下する際、空気抵抗によってその形状は横方向に扁平するが、雨滴が大きいほど扁平量が大きくなる。二重偏波によって雨滴形状を正確に捉えることができるため、高精度な降雨観測が可能となる[1)]。一方、降雪粒子は、あられや雪片、みぞれなど様々な形状・密度を有する。したがって、X-MPによる降雪の観測精度は、降雨観測に比べると劣る[2),3)]。そのため、冬期の積雪寒冷地では、X-MPによる観測データが有効利用されていないのが現状である。

本研究では、冬期積雪寒冷地のX-MPデータを有効利用すべく、X-MPが高時空間分解能を有する点に着眼し（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）、X-MPデータから地上における吹雪の発生状況を把握する方法について検討した。

吹雪は空間的・時間的変動が大きい現象であり、時として甚大な被害をもたらす。例えば、突発的に発生したホワイトアウトは一瞬にしてドライバーの視界を奪い、多重衝突事故を誘発する。また、道路上に局所的に形成された吹き溜まりは車両がスタックする一因となり、長時間にわたる立ち往生につながる。このような道路交通障害の発生を未然に防ぐためには、吹雪の発生状況を面的かつリアルタイムに把握する必要がある。

応募者は、これまでにも、X-MPデータから地上における吹雪の発生状況を把握するための方法について検討を進めてきた（本助成金も一部使用）[4)]。大宮ら[4)]は、Dualドップラー解析に基づく地上吹雪の推定を行い、X-MP観測によって得られるデータのみから地上における吹雪の発生状況を把握できる可能性があることを示した。しかし、この検討では以下の課題が残されていた。

- Dualドップラー解析は、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実測データとの比較を行ったが、地上1地点のデータしかなかった。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、本助成研究では、1台のX-MPデータから風向風速の推定が可能なVVP法（Volume Velocity Processing法）[5),6)]を用いた検討を行った。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。本報告書では、その概要について述べる。

2．研究方法

本研究では、2018-19冬期に発生した冬型気圧配置時の吹雪84事例を解析対象とした。ここでは、正時前5分間のデータセットを「吹雪1事例」として扱った。

地上における吹雪の発生状況を、X-MPによる観測データから把握する方法について検討した。X-MP石狩局の観測データ（ドップラー速度、レーダ雨量）から地上における飛雪流量(g/m^2/s) を面的に推定し、地上における実測飛雪流量と比較した。レーダ観測と地上観測の概念図を図1に、X-MP石狩局と、比較を行った地上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（江別除雪ST、厚田除雪ST、月形除雪ST、美唄除雪ST）である。なお、参考までに、図2中にはX-MP北広島局と寒地土木研究所の位置についても記してある。本研究で使用したX-MPデータは、地球環境情報統融合プログラム（DIAS）のWebページ[7]より入手した。

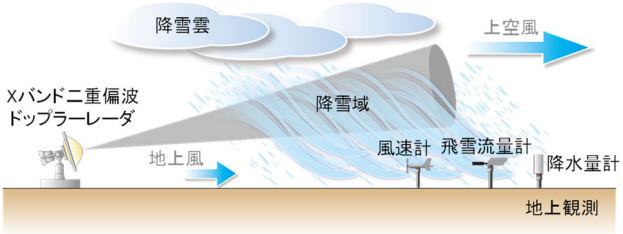

図１　レーダ観測と地上観測の概念図

図２　X-MP 観測局と地上観測点の位置関係
（Google Map 使用）

本研究の手順を以下に示す。

① 降雪時のX-MPデータ（レーダ雨量）と地上降雪強度の関係把握
② 上空における風向風速の推定
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 実測飛雪流量との比較

吹雪は、「雪が風によって舞う現象」である。したがって、吹雪の発生状況をより正確に把握するためには、降雪の強さと風向風速を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、地上で実測した飛雪流量との比較を行う（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[8]、その単位はレーダ雨量と同じmm/hである。

3．X-MPレーダ雨量と地上降雪強度の関係

X-MPは雨滴が扁平する性質を利用することで高精度な降水量観測をしていること、一方で、降雪粒子は様々な形状や密度を有するため、降雪時の観測精度は降雨時の観測精度よりも低いこと[2)、3)]は、前述のとおりである。そこで、降雪時のX-MPデータと地上における降雪観測結果を比較し、X-MPレーダ雨量から降雪強度を把握するための補正方法について検討した。

(1)　方法

X-MPデータと石狩吹雪実験場で行った降雪観測結果を比較する。降雪強度の観測には、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 Refference, 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。

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なくすため、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であった。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。

(2)　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X-MP観測値と地上観測値との間の近似直線を示す。この結果から、降雪時のX-MP観測値は実際の地上降雪量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量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。

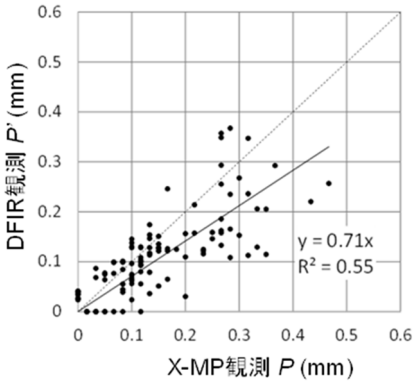

図３　10 分間降水量の比較（X-MP vs DFIR）

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

４．上空における風向風速の推定

(1)　VVP法について

1基のX-MPから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[4)]は、2基のX-MP（北広島局・石狩局）から得られるドップラー速度をDualドップラー解析することで上空の風向風速を求めた。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ている。そこで、本解析では、1基のX-MPから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。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小領域を規定し、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、小領域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[5),6)]を参照されたい。ここで、VVP法による解析エリアは、X-MP石狩局を中心とした半径80kmの円内とした。解析の結果、風向風速が示されないエリアも生じるが、これは当該時刻において降雪粒子が存在しなかったためにドップラー風速が得られなかったことを意味する。また、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、遠方ほど低高度の風向風速を計算することができないことにも留意されたい。

(2)　解析結果

本解析では、VVP法によって最大6高度（300m、500m、750m、1000m、1250m、1500m）の風向風速を5kmメッシュで求めた（以下、VVP風）。一例として、2018年12月24日0:00の高度1000mの結果を図4に示す。比較のため、気象庁毎時大気解析GPV（以下、HANAL）により得られた900hPa高度面（高度約1000m）の風向風速を図5に示す。両図より、VVP法によって求めた風向風速とHANALは、概ね整合的であることが確認できる。

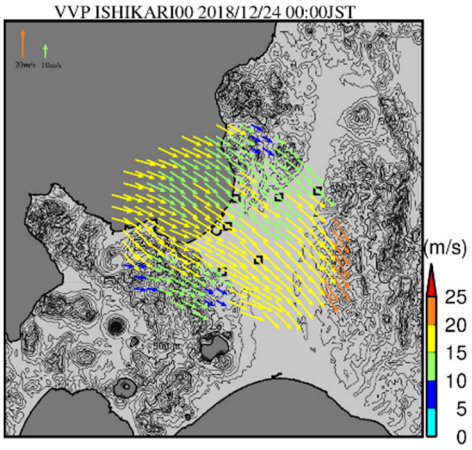

図４　VVP 法で求められた高度 1000mの風向風速

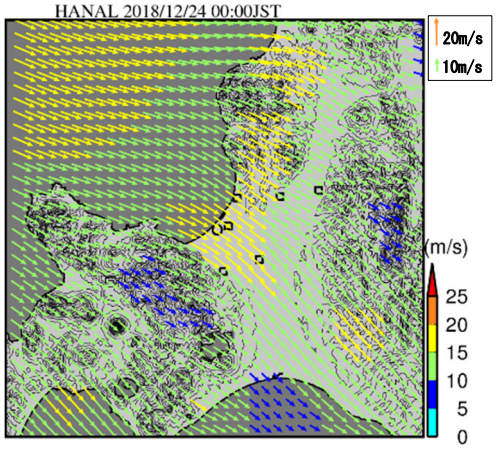

図５　HANAL による高度 1000mの風向風速

(3) 風速の鉛直分布について

次に、VVP風の鉛直分布について述べる。一例として、石狩吹雪実験場および江別除雪STの直上メッシュにおけるVVP風（全84事例）を図6に示す。図中の高度20mの風速は、風向風速計による地上での計測値を示している（高度は海抜）。江別除雪STの高度300mのVVP風が示されていないが、これは、X-MP石狩局の最低観測仰角のビーム高度が江別除雪STの上空では高度300mよりも高いために、VVP法による風速計算ができなかったことに因る。同様の理由で、X-MPからの距離が離れるほど低高度のVVP風を計算することができなくなる。また、逆の理由で、X-MPからの距離が近すぎる場合には高高度のVVP風を計算することができない。図6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、下層では風速の減速が大きいことが見てとれる。この傾向は、5地点全てにおいて確認された。図6中の青線は、高度500m以上における風速変化について、最小二乗法により求めた回帰式を表している。全地点を平均すると、風速変化量は1000mで0.5m/sであった。

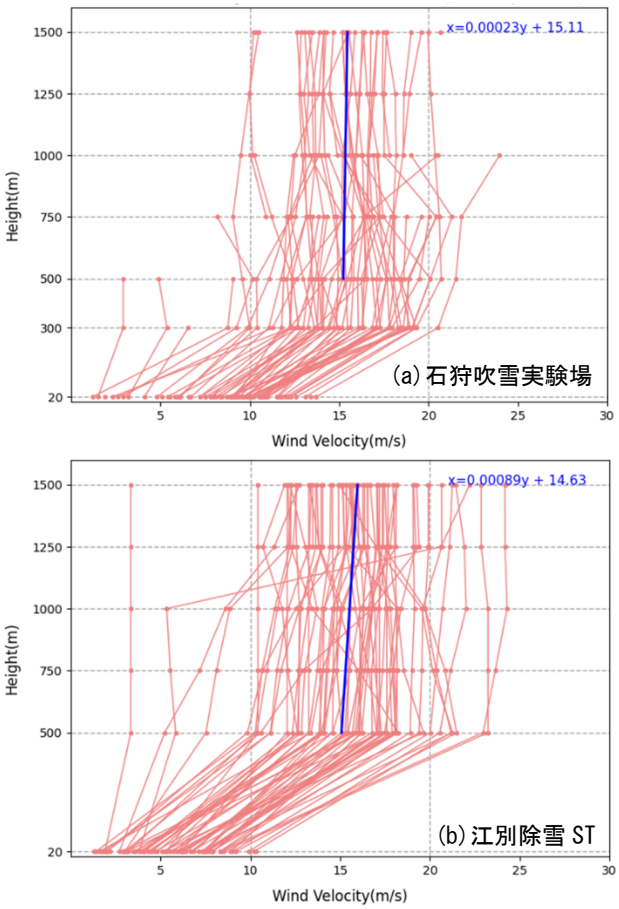

図６　VVP 法で求めた風速の鉛直分布
((a)：石狩吹雪実験場、(b)：江別除雪 ST)

高度500m以下の風速については、大気が中立状態にあると仮定し、風の対数則にならうと仮定した（カルマン定数 κ =0.4）。ここでは、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、地面粗度を0.05m（地表粗度区分Ⅱ）とした。以上より、風による移流効果を考慮する際（2章で述べた手順④、6章にて詳述）には、地面～高度500mは対数変化、高度500mより上空は線形変化（1000mあたり0.5m/s増加）すると仮定した風速の鉛直分布を使用した。

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。ここで、飛雪流量M_f(g/m^2/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））。

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

nは1立方メートルあたりの空間に存在する雪粒子の質量であり、降雪フラックスM_v(g/m^2/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。

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

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。よって、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から、上空における飛雪空間密度nを算出できる。

$$M_v = 0.2P \qquad (4)$$

$$n = 0.2P/w \qquad (5)$$

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1.2m/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7に示す。

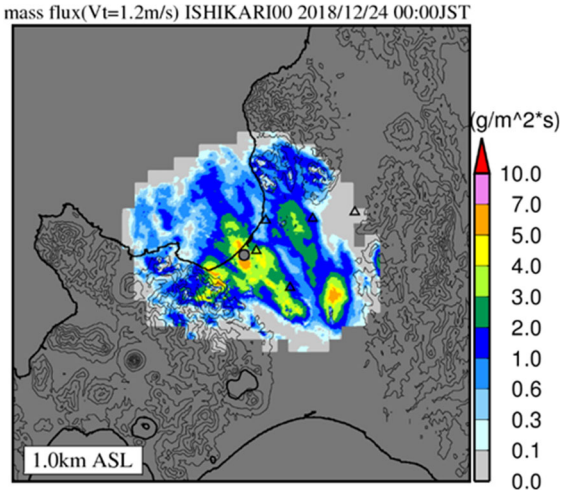

図７　高度 1000mにおける推定飛雪流量の面分布

６．地上における飛雪流量の推定

次に、上空1000mにおける飛雪流量の面分布から、地上における飛雪流量の面分布を推定する。大宮ら[4)]は、上空の面分布から地上の面分布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、風による移流の影響を考慮に入れた推定を行う。上空から地上の面分布を推定するにあたっては、5章で述べた風速の鉛直分布を適用した。なお、風向については高度によって変化しないと仮定した。各メッシュに対し、上空1000mにおける風向風速の分布から、高度10m間隔で移流量を計算し、地上における降雪粒子の落下位置を推定した（地表面の高度は一律に10mと仮定）。この推定イメージを図8に示す。

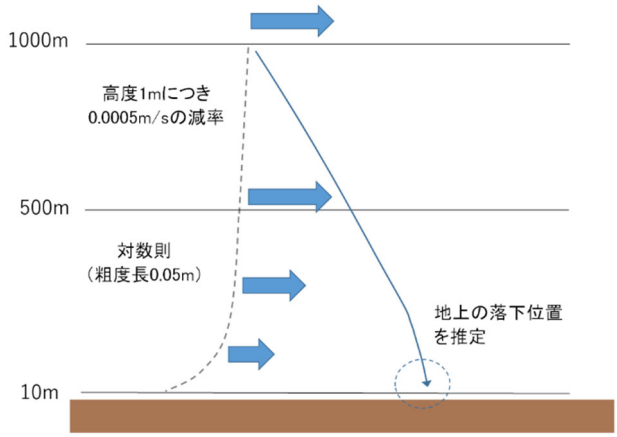

図８　降雪粒子の落下位置の推定イメージ

上記の方法で、上空1000mの飛雪流量（図7）から地上における飛雪流量を推定した結果を図9に示す。この吹雪時（2018年12月24日0:00）の風向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弱いため、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）であるため、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である。

ここで、地上の推定飛雪流量分布（図9）では、上空の推定飛雪流量分布（図7）では見られなかった細い切れ目状の空白域や、線状に飛雪流量が多い領域が確認できるが、これは、メッシュそれぞれについて移流計算をさせたことによって生じた不連続である（図10）。そこで、このような不自然な幾何学的濃淡を解消するため、クレスマン内挿に基づき、平滑化処理を行った（図11）。

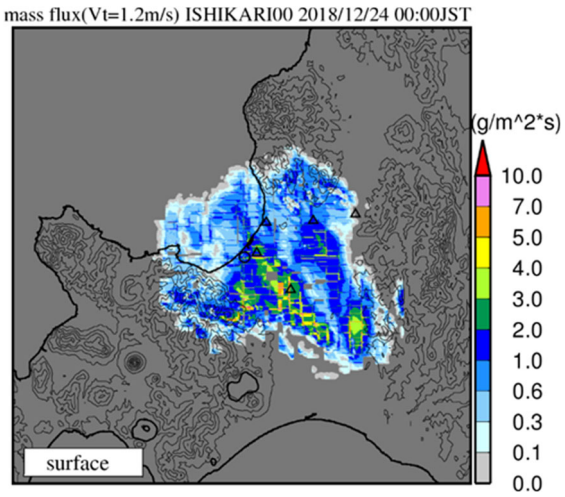

図９　地上における推定飛雪流量の面分布

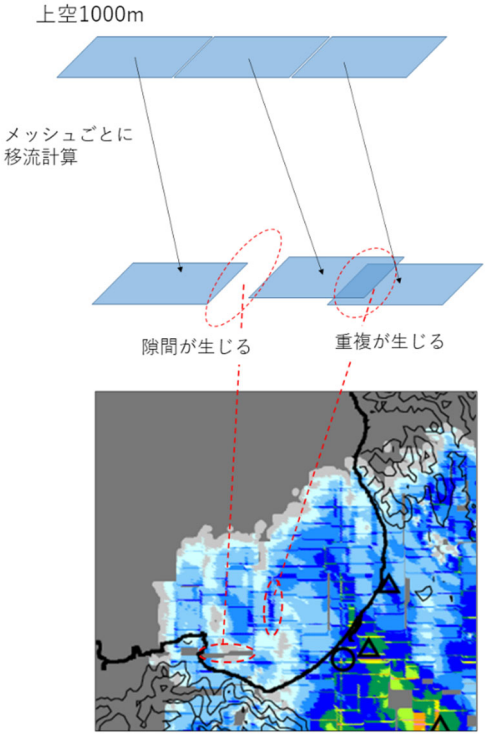

図１０　移流計算によって生じる空白域と重複域

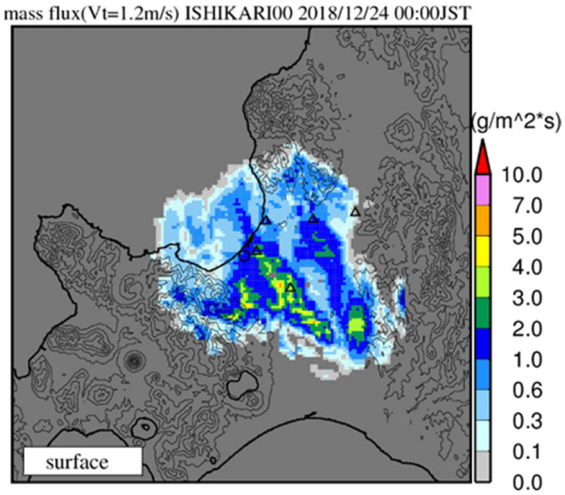

図１１　地上における推定飛雪流量の面分布
（平滑化処理後）

７．実測飛雪流量との比較

(1)飛雪流量の実測

地上の飛雪流量観測は、石狩吹雪実験場および周辺の除雪ステーション、計5地点において、スノーパーティクルカウンター(以下、SPC)を用いて行った。SPCは非接触で光学的に吹雪粒子を計測する機器である[15]。図12にSPCの外観を、図13にセンサー部の詳細図を示す。図13に示す投光部から近赤外光が受光部に向けて照射されており、その範囲内（2 mm×25 mm×0.5 mm）が計測領域である。この領域を吹雪粒子が通過すると、それに応じて受光部に到達する光量が減衰する。吹雪粒子が全て球体であるとの仮定のもと、光量の減衰量および減衰回数から、計測領域を通過した雪粒子の粒径および個数がカウントされ、1分おきに1秒毎の飛雪流量が出力される。SPCには風向舵が取り付けられており（図12)、センサー部分が常時風向に直交する。本観測では、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）の誤カウントを極力防ぐため、SPCの設置高度は7mとした。

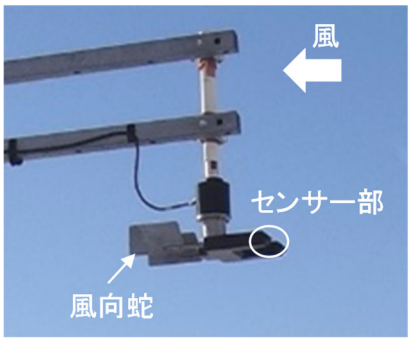

図１２　スノーパーティクルカウンター(SPC)の外観

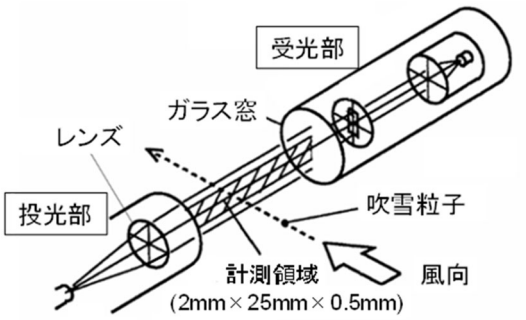

図１３　センサー部の詳細

(2)比較結果

平滑化処理後の推定飛雪流量（図11）とSPCによる実測飛雪流量の比較を、地点ごとに図14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。全地点において、推定値と実測値の間には正の相関があることが見てとれる。相関係数Rが最も高かったのは石狩吹雪実験場における0.72、次いで厚田除雪STの0.65であった。全体として、推定結果は実測結果を過大評価する傾向があるが、定性的には概ね整合していると言える。以上より、X-MPデータから地上における吹雪の発生状況を把握することが可能であると考える。

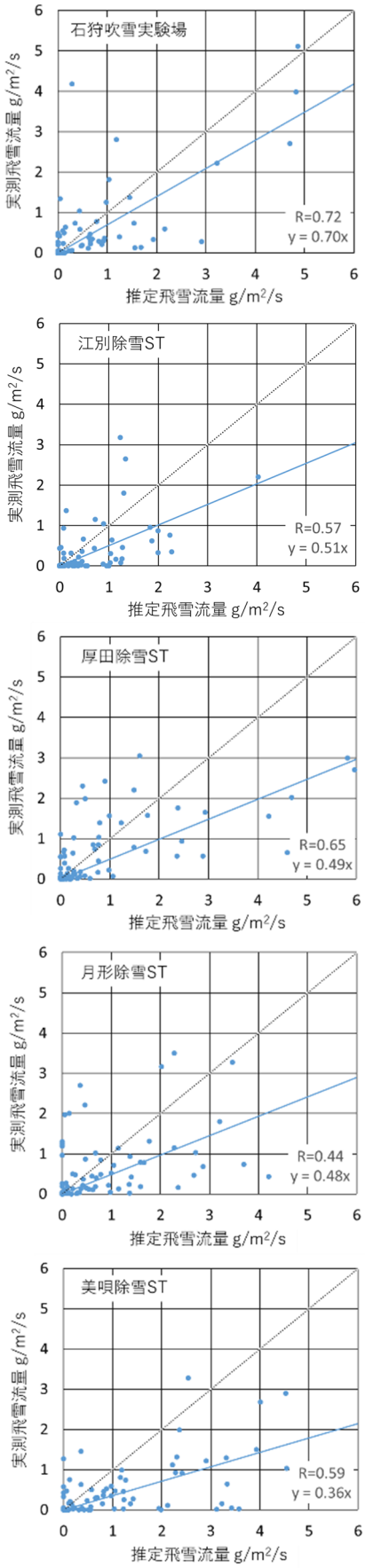

図１４　推定飛雪流量と実測飛雪流量の比較

まとめ

本研究では、冬期積雪寒冷地のX-MPデータを有効利用すべく、X-MPデータから地上における吹雪の発生状況を把握する方法について検討した。ここでは、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。降雪時のX-MPデータとDFIRによる地上での降雪観測の結果から、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濃度および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、両者には正の相関があり、定性的に一致することが確認された。以上より、X-MPデータから地上における吹雪の発生状況を把握できる、と結論付けた。

謝辞:本研究で利用したXバンド二重偏波レーダのデータセットは、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たものです。ここに記し、謝意を示します。

参考文献

１）Maki,M., Park,S. and Bringi,V.N.: Effect of Natural Variations in Rain Drop Size Distributions on Rain Rate Estimators of 3 cm Wavelength Polarimetric Radar, J. Meteor. Soc. Japan, 83, 871-893, 2005.
２）林義晃,手計太一,山﨑惟義: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, 2014.
３）増田有俊,板戸昌子,谷口和哉,境和宏,上田博,山下克也,中井専人: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_90,2018.
４）大宮哲,國分徹哉,松下拓樹,高橋丞二,松澤勝: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, 2020.
５）Waldteufel,P and H.Corbin:On the analysis of single-Doppler radar data, J. Appl. Meteor., 18, 532-542, 1979.
６）立平良三,鈴木修: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, 1994.
７）地球環境情報統融合プログラム(DIAS) HP. http://www.diasjp.net/ (2021年7月28日閲覧)
８）日本雪氷学会:新版雪氷辞典, 東京, 古今書院, 307pp, 2014.
９）WMO:International Organizing Committee for the WMO Solid Precipitation Measurement Intecom parison、 Final Report of the First Session。 Naskoping, Sweden. WMO, Geneva, 31pp, 1985.
10)大宮哲：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, 2015.
11)気象庁:気象観測の手引き, 東京, 気象庁, 1998. https://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/kansoku_guide/tebiki.pdf (2021年7月28日閲覧)
12)梶川正弘,谷口泉子,伊藤誠子:雪片の落下速度と降雪結晶形との関係, 雪氷, 58, 455-462,1996.
13)Ishizaka,M., Motoyoshi,H., Nakai,S., Shiina,T., Kumakura,T. and Muramoto,K.: 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, 2013.
14)日本道路協会編: 道路橋耐風設計便覧（平成19年改訂版）, 東京, 日本道路協会, 296pp,2007.
15)Schmidt,R.A.: A system that measures blowing snow. USDA Forest Service Research Paper, RM-194, 80pp, 1977.