

XバンドMPレーダを用いた吹雪観測の可能性について

大宮 哲¹・國分 徹哉¹・松下 拓樹¹・高橋 丞二¹・松澤 勝¹

¹国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 寒地道路研究グループ 雪氷チーム

(〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号) .

本報では、XバンドMPレーダを用いた吹雪観測の可能性について議論した。レーダデータおよび地上観測結果を解析し、レーダ雨量データから地上降雪量をより正確に算出するための補正係数を提示したほか、レーダデータから上空における飛雪流量を面的に求め、地上における実測飛雪流量との比較を行った。その結果、XバンドMPレーダ観測から得られる上空のデータのみを用いて、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示唆された。

キーワード XバンドMPレーダ, 吹雪災害, 飛雪流量, DFIR, 災害情報

1. はじめに

吹雪の発生は局地的かつ突発的である。そのため、吹雪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、吹雪を計測する観測機器を面的に配置することは非現実的であるため、現状は気象条件から吹雪の発生状況を推測している。

一方、国土交通省は、集中豪雨や局所的豪雨の監視体制強化を目的に、XバンドMP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基体制で札幌圏を中心とする半径約60kmの範囲を常時監視している。X-MPは、降雨を高精度に観測する手段として定着している。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⁾²⁾。X-MP観測の空間分解能は250mメッシュである。また、観測間隔は1分間、情報配信までに要する時間は観測終了から約1分間である。そのため、X-MPによって、面的な降雨情報をほぼリアルタイムに把握することが可能である。

北海道では大雨災害もさることながら、大雪や吹雪に伴う雪氷災害が毎年発生しており、X-MPの冬期利用に関する社会的要請が高い。本報では、X-MP観測で得られる上空の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できるか、その可能性について議論する。

なお、本研究の対象は降雪を伴う吹雪であり、降雪を伴わない地吹雪については対象外としている。

X-MP観測で得られる上空のデータについて、その一部を簡単な説明とともに以下に記す。

(i) レーダ雨量

単位時間あたりの降水量（降水強度）のことで、単位はmm/h。なお、Webサイト「国土交通省 川の防災情報HP」³⁾などで一般配信されている雨量情報（図-1）は、複数レーダで観測されたレーダ雨量を合成処理したものである。

(ii) ドップラー速度

レーダ基地局に向かう（もしくは遠ざかる）方向の風速のこと。2基のレーダから得られるドップラー速度を解析することによって、風の2次元分布を算出することができる。

(iii) レーダ反射強度

観測対象物から反射した電波の強さのこと。レーダ反射強度が強いほど降水も強い。X-MP観

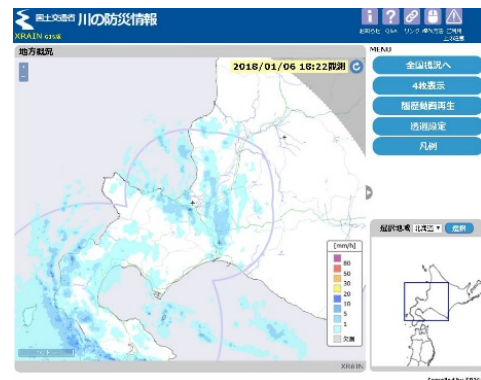


図-1 レーダ雨量情報（国土交通省 川の防災情報HP³⁾より）

測では、水平偏波・垂直偏波それぞれについてのレーダ反射強度が得られる。

(iv) 偏波間位相差

水平偏波と垂直偏波の位相差のこと。より大きく扁平した雨滴が存在するほど偏波間位相差は大きい。降雨の場合、この位相差をもとに高精度な降水強度が算出される。

(v) レーダ反射因子差

水平偏波によるレーダ反射強度と垂直偏波によるレーダ反射強度の差のこと。この差をもとに、雨滴の粒径分布が推定される。

2. 研究の手順

図-2に本研究の実施イメージを記す。X-MP観測で得られる上空のデータ（レーダ雨量、ドップラー速度）から算出される各要素と、地上での観測結果（降雪量、飛雪流量など）を比較解析する。なお、本研究に用いたX-MPデータは、地球環境情報統合プログラム（DIAS）のHP⁴⁾よりダウンロードした。

次に、本研究の手順を以下に記す。

- ① X-MPによる降雪観測結果（レーダ雨量）と地上降雪強度の関係解明
- ② 上空における飛雪流量の推定および地上における飛雪流量の実測
- ③ 上記②で求めた飛雪流量の比較により、X-MPを用いた吹雪観測の可能性に関する検討

本研究の対象は降雪を伴う吹雪であることから、X-MPデータから降雪量を正確に把握することが本研究の第一歩である。そこで、X-MPを用いた吹雪観測の可能性を検討するための前段として、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議論する。次に、X-MPデータから上空における飛雪流量を推定する。最後に、地上で実測した飛雪流量との比較を行い、X-MPによる吹雪観測の可能性について検討する。

なお、「新版雪氷辞典」⁵⁾によると、降雪強度とは「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、その単位はレーダ雨量と同じmm/hである。また、飛雪流量は吹雪の激しさを示す指標の1つであり、「風向に直交する単位面積を単位時間に通過する雪の質量（単位は $g/m^2/s$ ）」のことを指す。

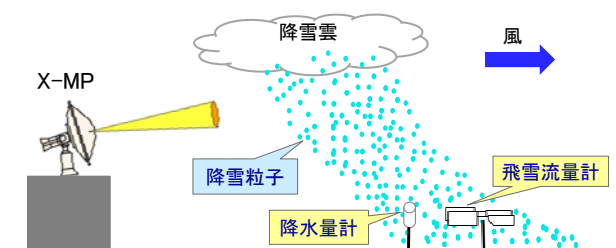


図-2 本研究の実施イメージ

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によって高精度な降雨観測をしていることは、上述したとおりである。一方、降雪粒子は気象条件の違いによって、あられや雪片、みぞれなど様々な状態に変化するため、降雪粒子の形状や密度、落下速度も様々である。それゆえ、X-MPを用いた降雪量の観測精度については検討の余地が残されており、その研究例も少ないのが現状である^{6) 7) 8)}。本章では、X-MPと地上の降雪量の観測結果を比較解析し、X-MPデータからより正確な地上降雪量を算出するための補正方法について検討する。

(1) 研究方法

北広島市と石狩市に設置されている2基のX-MP観測から求められた合成処理済みのレーダ雨量（mm/h）と、寒地土木研究所が所有する石狩吹雪実験場（北緯43°12′、東経141°23′）で行った地上降雪量の観測結果を比較する。

地上降雪量の観測には、二重柵基準降水量計（DFIR）を使用した。DFIRは、現在最も高精度な降水観測ができる地上降水量計として世界気象機関（WMO）によって推奨されている計器である。以後、本報に記す「地上降雪量」とは、DFIRにより観測された10分間降雪量を水量換算した値のことを指す（単位はmm）。なお、DFIRの緒元や観測原理、実測値に対する補正処理の方法については、WMOのレポート他^{9) 10)}を参照されたい。

本解析には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（mm/h）から10分間降水量を求め、地上降雪量と比較した。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レーダ雨量は上空のデータである一方、DFIR観測値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と考えられる。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るため、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」と記述されており、降雪粒子が風の影響を受けずに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考慮するうえで、降雪粒子の落下開始高度と落下速度を仮定する必要があるが、これらを正確に定めることは難しい。そこで本解析では、X-MP石狩局の冬期運用仰角と石狩吹雪実験場までの距

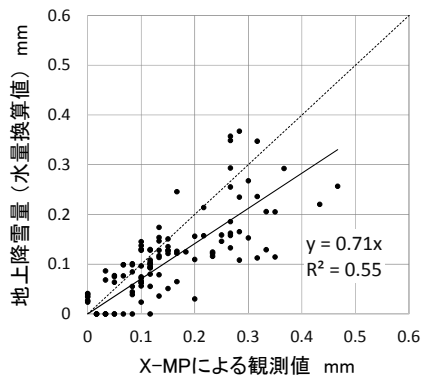


図-3 X-MPによる降雪観測値と地上降雪量の関係

離を加味したビーム高度から、降雪粒子の落下開始高度を一律340mと仮定した。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）によって異なる値を示すが、おおむね0.7~1.2m/s^{12), 13)}である。これらの落下開始高度と落下速度に基づいて試算した時間差は5~8分間であることから、ここでは降雪粒子が地上に達するまでに要する時間を10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分間降水量と地上降雪量の関係を図-3に記す。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。以上の結果から、降雪時のX-MPレーダ雨量に対して補正係数0.71を乗ずることで、従来よりも正確な地上降雪強度を把握することができることが示された。以降、本報では、レーダ雨量 P と降雪強度 P' の関係は、式(1)が成り立つものとして扱う。

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

4. X-MPを用いた上空における飛雪流量の推定

X-MP観測データから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))。

$$M_f = n \times V \quad (2)$$

(1) 上空における飛雪空間密度 n の算出

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。

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

ここで、 M_v と P' の関係は $M_v = 0.28 P'$ として表すことができることから、 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。

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

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

(2) 上空における風向風速の算出

a) Dualドップラー解析

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。そこで、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¹⁴⁾することにより、上空における風（以下、Dual風）の2次元分布を求めた。ここでは、吹雪発生時における毎正時のX-MPデータについて、2015年度冬期は58ケース分、2016年度冬期は24ケース分を解析した。

本解析で求められた高度500mにおけるDual風の一例（2015年12月25日12:00の結果）を図-4に記す。ここで、Dualドップラー解析の対象エリアは、図-4中における2つの円内（ただし、円の重なり部分は除く）である。解析対象エリア内においてDual風が示されていないエリアがあるが、そ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Dual風を算出することができなかったこと、また、実際には降雪があったとしても、レーダビームが山岳などの障害物によって遮断されることにより、Dual風が算出されなかったことを意味する。

b) Dual風の妥当性について

本解析結果の妥当性を確認するため、同日同時刻の気象庁毎時大気解析GPV（以下、HANAL）により得られ

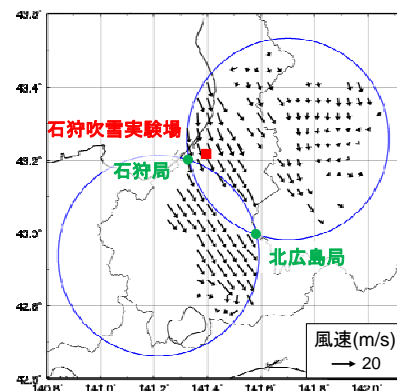


図-4 Dualドップラー解析により求めた風向風速の一例

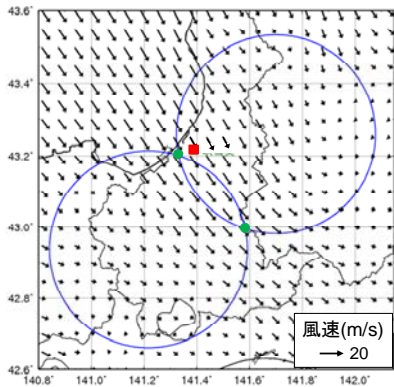


図-5 気象庁毎時大気解析GPV (HANAL) による風向風速の一例

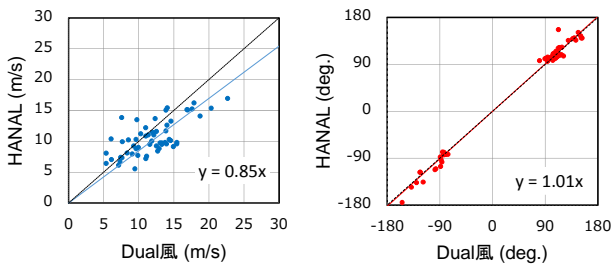


図-6 Dual 風と HANAL の比較 (左: 風速, 右: 風向)

た950hPa高度面 (高度約500m) の風向風速 (図-5) との比較を行う。ここでは、HANALの風向風速を真値とみなす。図-4、図-5より、Dual風とHANALは、風向、風速ともに定性的に概ね一致していることが確認される。

次に、Dual風とHANALを定量的に比較する。ここでは、2015年度冬期の吹雪58ケース分のDual解析結果について比較した。石狩吹雪実験場の直上メッシュにおけるDual風およびHANALの比較結果を図-6 (左: 風速, 右: 風向) に示す。なお、風向比較図の作成にあたっては360方位を用い、南風 (風向角180°) をオフセット値とした。すなわち、図中の-180および180が北風、-90が東風、0が南風、90が西風をそれぞれ示す。

比較の結果、Dual風の風速はHANALよりも大きい傾向にあること、風向はHANALとほぼ一致することが示された。図-6中には風速、風向それぞれについて近似直線を付記しており、その傾きはそれぞれ0.85、1.01であった。以降、Dual風の風速に補正係数0.85を乗じたものを、高度500mにおける風速として扱うこととする。なお、風向については補正しない。

c) 高度340mにおける風速の算出

前項までにおいて、X-MPによる観測データから高度500mにおける風向風速を算出した。一方、3章では降雪粒子の落下開始高度を340mとみなしたことから、ここでは大気の中立状態にあると仮定し、高度500mの補正済みDual風速を用い、風の対数則に従って高度340mにおける風速を求めた。本計算では、石狩吹雪実験場周辺の地表状況を加味し、道路橋耐風設計便覧¹⁵⁾に基づき、地面粗度長を0.05と仮定した。

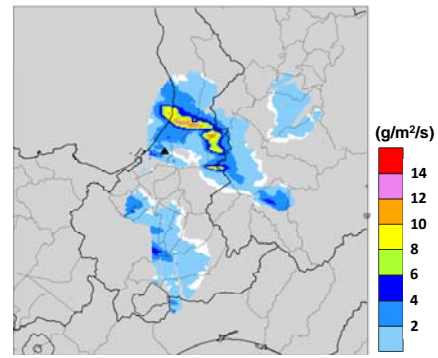


図-7 X-MP 観測データから求めた上空の飛雪流量の一例

(3) 上空における飛雪流量の推定結果

次に、2016年度冬期の吹雪24ケースを対象に、4章(1)節で求めた飛雪空間密度 n と4章(2)節で求めた高度340mにおける風速 V から、式(2)より高度340mにおける飛雪流量 M_f を面的に求めた。なお、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 (2017年2月17日22:00) を図-7に記す。なお、図中に示す黒三角は、石狩吹雪実験場の位置を示す。

5. 地上における飛雪流量の実測

地上の飛雪流量観測は、石狩吹雪実験場において、Snow Particle Counter (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¹⁶⁾。図-8にSPCの外観を、図-9にセンサー部分の詳細を示す。図-9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



図-8 Snow Particle Counter

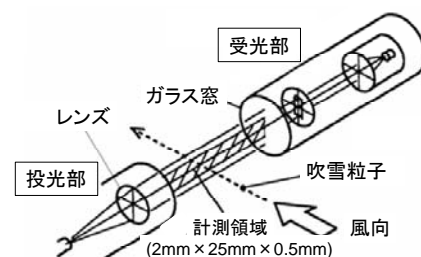


図-9 SPC センサー部分の詳細

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-8)、センサー部分が常時風向に直交する。なお、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。

6. 上空の推定飛雪流量と地上実測値の比較

X-MPによる上空の推定飛雪流量と地上における実測飛雪流量を比較し、X-MPを用いた吹雪観測の可能性について検討する。

本報4章において、X-MPによる観測データから上空における飛雪流量の面分布を推定した。しかし、降雪粒子は雨滴よりも軽く、密度も小さいため、風によって移流される効果が大いと考えられる。すなわち、上空における飛雪流量の面分布をそのまま地上に適用することはできない可能性が高い。そこで本章では、上空と地上の飛雪流量を比較するにあたり、降雪粒子の移流効果を考慮しない場合とした場合、その両方について検討した。なお、ここでは、4章(3)節で飛雪流量の計算対象とした吹雪24ケースについて比較する。

(1) 移流効果を考慮しない場合の比較結果

移流効果を考慮しない場合、すなわち石狩吹雪実験場の直上メッシュにおける推定飛雪流量と、地上での実測飛雪流量を比較した結果を図-10に記す。図中の破線は1対1の等値線である。なお、落下開始高度を340m、降雪粒子の落下速度を1.2m/sと仮定していることから、ここでは降雪粒子が落下を開始してから地上に達するまでの時間を5分間と定め、比較時にはその時間差を考慮に入れてある。図-10より、両者の間に明瞭な相関は確認されず、バラツキが大きいことが確認される。決定係数 R^2 はマイナス0.3(データ数は24)二乗平均平方根誤差(RMSE)は $1.86\text{g/m}^2/\text{s}$ であった。

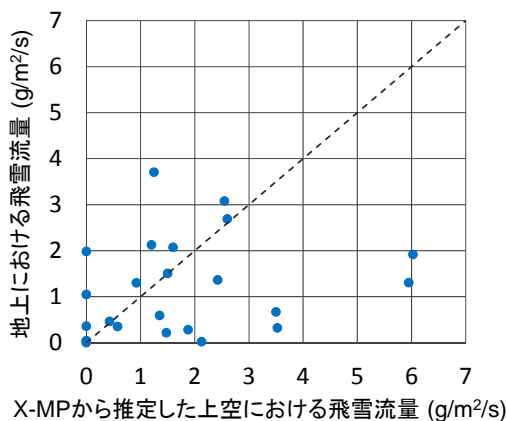


図-10 X-MPによる推定飛雪流量と地上の実測飛雪流量の比較(降雪粒子落下中の移流効果を考慮しない場合)

(2) 降雪粒子の移流に関する検討

降雪粒子の移流について、地上に到達した吹雪粒子が、上空のどこから落下してきたのかを推定した。

はじめに、4章(2)節c)項で求めた上空風を用い、風の対数則を用いて上空(高度340m)から地上(石狩吹雪実験場)までの間における水平風の鉛直分布を求めた。次に、地上で観測された吹雪粒子を時間を遡って逆移流させ、その移流距離と方角について計算し、高度340mでの落下開始地点を推定した。推定イメージを図-11に記す。ここで、水平風の鉛直分布の計算においては、各高度間を10mに分割し、地面粗度長は4章(2)節c)項と同様に0.05と仮定して行った¹⁵⁾。

吹雪24ケースについて、吹雪粒子の落下開始地点を推定した結果を図-12に示す。ここでは、計算した吹雪24ケースの結果をそれぞれナンバリングして示してある。

(3) 移流効果を考慮した場合の比較結果

図-12に示す推定落下開始地点における上空の推定飛雪流量と、石狩吹雪実験場で実測した地上飛雪流量を比較した結果を図-13に示す。図-10と同様、降雪粒子が落下を開始してから地上に達するまでの時間差についても考慮に入れてある。なお、図-13は図-10に比べてプロット数が少ないが、これは推定落下開始地点(図-12)の一部がDualドップラー解析の対象エリア(図-4参照)から外れたため、飛雪流量を計算できなかったことに起因する。

図-13より、X-MPデータから推定した飛雪流量は地上の実測飛雪流量を過大評価する傾向にあるものの、両者

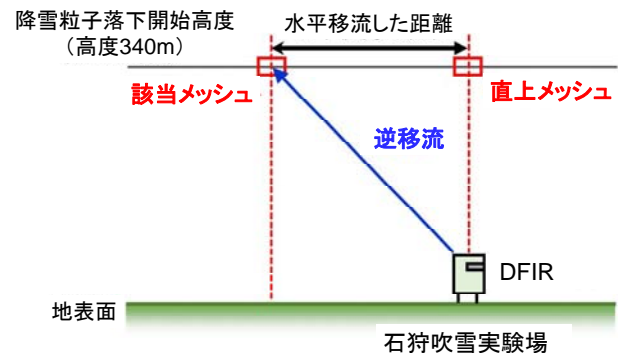


図-11 吹雪粒子の落下開始地点の推定イメージ

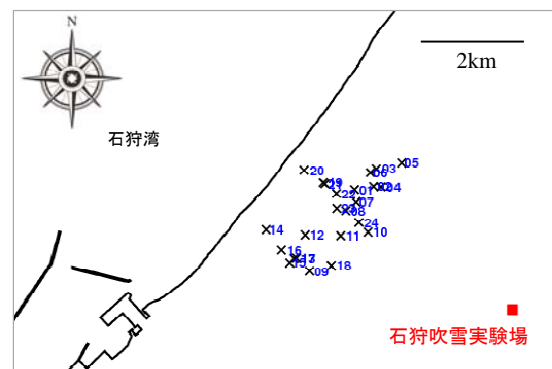


図-12 吹雪粒子の落下開始地点の推定結果

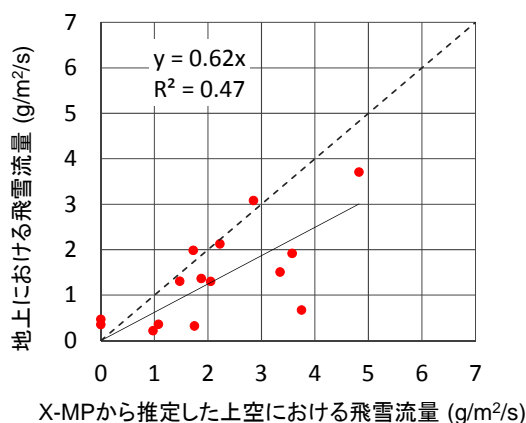


図-13 X-MPによる推定飛雪流量と地上の実測飛雪流量の比較
(降雪粒子落下中の移流効果を考慮した場合)

には正の相関があることが示された。図中に実線で示す線形近似式の傾きは0.62，決定係数 R^2 は0.47（データ数は15）であった。RMSEは1.23 $\text{g/m}^2/\text{s}$ であり，移流効果を考慮に入れなかった場合（図-10，RMSEは1.86 $\text{g/m}^2/\text{s}$ ）に比べ，地上における実測飛雪流量をより正確に表現できることが示された。

以上の結果は，X-MP観測から得られる上空のデータのみから，地上における吹雪状況を定量的に把握することができることを示唆するものである。

7. まとめと今後の展望

本報では，X-MP観測データを用いた吹雪観測の可能性について明らかにすることを目的とし，レーダデータと地上観測結果を解析した。本研究より，一般配信されているX-MP冬期レーダ雨量データからより正確な地上降雪量を算出するための補正係数について提案した。また，X-MPデータから求められた飛雪空間濃度および風向風速を用い，上空における飛雪流量を面的に推定した。その推定値を地上の実測値と比較したところ，両者の間には正の相関が見られた。この結果は，X-MP観測データのみから，地上における吹雪状況を定量的に把握することができることを示唆するものである。

本解析では，上空における推定飛雪流量と地上観測値の比較検証として，石狩吹雪実験場1地点のみでの実測データを用いた。今後は，複数地点（札幌近郊，全6地点）にSPCを配置し，飛雪流量観測を行う予定である。また，VVP法を用いてより広域にわたる風向風速の推定を行う。広域での推定飛雪流量と複数地点での地上実測値を比較検証に用い，X-MPデータのみから地上における吹雪情報をリアルタイムかつ面的に把握するためのアルゴリズム構築を目指す。

参考文献

1) Maki *et al.* : 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) 大手：新技術を用いたXバンドMPレーダ雨量計の整備について，国土交通省関東地方整備局，スキルアップセミナー関東，2013。
http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000080090.pdf（2018年10月11日閲覧）
- 3) 国土交通省川の防災情報HP，
<http://www.river.go.jp/x/xmn0107010.php>（2018年10月11日閲覧）
- 4) 地球環境情報統融合プログラムHP，
<http://www.diasjp.net/>（2018年10月11日閲覧）
- 5) 日本雪氷学会：新版雪氷辞典，古今書院，2014.
- 6) 林ら：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.
- 7) 今長ら：冬季除雪支援におけるレーダ技術の活用に関する一考察－Xバンドレーダによる雪検知性能と活用案について－，2017ふゆトピア・フェアin函館研究発表会，2017。
http://www.hkd.mlit.go.jp/ky/ki/chousei/PDF/34T_H.pdf（2018年10月11日閲覧）
- 8) 谷口ら：XRAINを用いた冬期降水量推定精度向上に向けた取り組み，平成29年度北陸地方整備局事業研究発表会，2017。
<http://www.hrr.mlit.go.jp/library/happyoukai/h29/b/B-10.pdf>（2018年10月11日閲覧）
- 9) WMO : International Organizing Committee for the WMO Solid Precipitation Measurement Intecomparison, Final Report of the First Session. Naskoping, Sweden. WMO, Geneva, 31pp, 1985.
- 10) 大宮：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HP，気象観測の手引き，
http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kansoku_guide/tebiki.pdf（2018年10月11日閲覧）
- 12) Ishizaka *et al.* : A New Method for Identifying the Main Type of Solid Hydrometeors Contributing to Snowfall from Measured Size-Fall Speed Relationship, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol.91, No.6, 747-762, 2013.
- 13) 梶川ら：雪片の落下速度と降雪結晶形との関係，*雪氷*，58，455-462，1996.
- 14) 石原：ドップラー気象レーダーの原理と基礎，*気象研究ノート*，2001，pp 1-38, 2001.
- 15) 日本道路協会：道路橋耐風設計便覧（平成19年改訂版），日本道路協会，P75，2007.
- 16) Schmidt, R. A : A system that measures flowing snow, USDA, Forest Service Research Paper, RM-194, 1977.