## X バンド MP レーダを用いた吹雪検知技術の高度化に関する研究

研究予算:運営費交付金 研究期間:平30~令3 担当チーム:雪氷チーム

研究担当者:西村敦史、松下拓樹、大久保幸治、

菅原邦泰、大宮哲

#### 【要旨】

本研究の目的は、X バンド MP レーダを用い、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手法を構築することである。まず、レーダデータから求めた降雪強度と風速より、上空における吹雪の強さの分布(飛雪流量分布)を推定した。次に、風による降雪粒子の移流を考慮し、地上における飛雪流量分布を推定したほか、既往研究で得られた経験式を用い、視程分布に換算した。地上における実測値との比較検証によって、推定飛雪流量・推定視程ともに概ね妥当であることが確認された。最後に、このプロセスで推定した地上の視程分布と実際の交通事故事例の関係について整理した。

キーワード:XバンドMPレーダ、飛雪流量、視程障害

## 1. はじめに

吹雪は時間的・空間的変動が大きい現象であり、 交通事故の発生を誘発する。例えば、吹雪によって 突発的に発生したホワイトアウトはドライバーの急 ブレーキ・急ハンドルを誘い、多重衝突事故の原因 となる。近年の事例としては、2021年1月に宮城県 大崎市(東北自動車道)で発生した約140台が絡ん だ事故や、2022年2月に北海道北斗市(函館江差自 動車道)で発生した約80台が絡んだ事故が記憶に新 しい。吹雪の視程障害による交通事故を減らすため には、吹雪の発生状況を面的かつリアルタイムに把 握し、ドライバーに対して注意喚起することが望ま しい。しかし、吹雪を監視するための観測機器を多 点配置することは非現実的であるため、吹雪を面的 かつリアルタイムに把握することは容易でない。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 く推測りによって判断している。

本研究では、高い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について検討した。既報 2)では、X-MP 石狩局および X-MP 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、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、解析可能なエリアが限られる。また、一方のX-MPでデータ欠測が生ずると解析不可能となる。そこで、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 $^3$ (Volume Velocity Processing 法)に基づく解析を行い、吹雪の発生状況を推定する手法について検討した。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 $^2$ と同様)。

# 2. 観測概要と解析手順

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および視程を面的に推定した。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/m²/s)のことであり、吹雪の強さを示す指標の一つである。推定結果の検証には、スノーパーティクルカウンター(新潟電機株式会社製; SPC95、以下 SPC)による実測飛雪流量(地上5 地点)と、透過型視程計(明星電気株式会社製; TZE-2T)による実測視程(地上1 地点)を用いた。レーダ観測と地上観測の概念図を図-1 に、X-MP 石狩局および飛雪流量観測を行った5 地点の位置関係を図-2 に示す。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(北緯 43°12′,東経 141°23′)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。なお、視程観測は石狩吹雪実験場においてのみ行った。本研究で使用した X-MP データは、データ統合・解析システム(DIAS)の Web ページ <sup>4)</sup>より入手した。

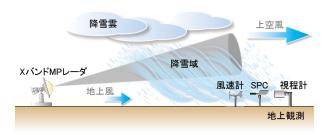


図-1 レーダ観測と地上観測の概念図



図-2 X-MP 石狩局と飛雪流量観測点の位置関係

以下に、本研究の手順を記す。

- ① X-MP レーダ雨量から降雪強度の算出
- ② X-MP レーダのドップラー速度から上空の風 向風速の推定
- ③ 上空の飛雪流量分布の推定
- ④ 地上の飛雪流量分布の推定
- ⑤ 地上の視程分布の推定
- ⑥ 地上実測値を用いた推定値の比較検証
- ⑦ 交通事故発生時における推定視程との関係整 理

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、吹雪の強さについて議論する際には、降雪強度と風速の情報が必要となる。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)。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、その単位はレーダ雨量 (mm/h) に等しい。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)。そして、武知ら<sup>5</sup>による 経験式を用い、推定飛雪流量から視程を求める(手 順⑤)。この推定結果を検証するため、地上における 実測飛雪流量および実測視程と比較する(手順⑥)。 最後に、吹雪時の交通事故事例を対象に、レーダデー タから推定した地上視程分布との関係を整理する (手順⑦)。

## 3. レーダ雨量から降雪強度の算出

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、雪の観測精度は雨よりも劣る。。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観測の結果から、X-MPレーダ雨量を降雪強度に変換する式を求めた。

#### 3.1 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、二重の防風柵で降水量計を囲った降水観 測システム (Double Fence Intercomparison Refference, 以下 DFIR) を使用した。DFIR は、現在最も高精度 な降雪強度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 <sup>7)</sup>を参照され たい。なお、石狩吹雪実験場の DFIR には Geonor 社 製の重量式降水量計 (T-200BMD) を使用している。

# 3.2 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。ここでは、1 分おきに配信される X-MP レーダ雨量 (mm/h) から DFIR 直上メッシュにおける 10 分間降水量を求め、DFIR で観測した降雪強度 (mm/h) から求めた 10 分間降水量と比較した。なお、本研究の対象は雪であることから、地上気温が 0 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 の落下速度についての情報が必要である。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、その大きさ 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 <sup>9),10)</sup>。この落下速度幅を元に高度 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 度である。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1.2 m/s に相当) と定め、比較時にはその時間差を考慮に入れた。

## 3.3 比較結果

X-MP レーダ雨量から求めた 10 分間降水量と DFIR による観測から求めた 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(切片ゼロ)を示す。この結果から、降 雪時の X-MP レーダ雨量は地上の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。なお、近似直線に対する標準偏差は 0.056 であった。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の関係は式(1)が成り立つものとして扱い、Pを P に変換した値を解析に使用した。

# P' = 0.71P (1)

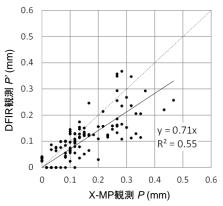


図-3 10 分間降水量の比較 (X-MP vs DFIR)

## 4. VVP 法による上空の風向風速の推定

## 4.1 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、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 <sup>2)</sup>においては、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 ることによって風向風速を求めた。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 VVP 法<sup>3)</sup>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。なお、VVP法は領域内の 風が一様であるとの仮定に基づく計算処理方法であ るため、山岳域など地形的影響等によって局所的に 風が急変する領域では推定精度が低下する。

ここでは、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 VVP 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 までを解析対象領域とした(図-2)。なお、解析対象領域内であっても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風を 算出することができない。

#### 4.2 解析結果

解析結果の一例として、2019 年 1 月 21 日 13:00 の高度 1000m における VVP 風 (5km メッシュ)を図-4 に示す。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。図-5 に、石狩吹雪実験場の直上メッシュにおける VVP 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、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、N(=45)が VVP 解析を行った吹雪事例数(84)より少ないが、これは 84 事例中 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ことに因る。

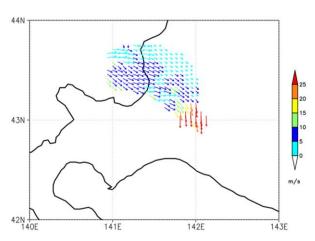


図-4 VVP 法で求めた高度 1000m の風向風速 (2019 年 1 月 21 日 13:00)

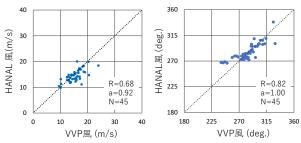


図-5 高度 1000m における WP 風と HANAL 風の比較 (左: 風速、右: 風向)

# 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(地上の値は風向風速計

による実測値)。 高度 300m 以上では鉛直方向の風速 変化が小さく、上層で風が強いときは下層でも風が 強いこと、高度 300m より下では風速の減少が大き いことが確認された。この傾向は、他の4地点全て においても同様であった。 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、風速変化量は高度 500m から 1500m の 1000m で 0.5m/s であった。一方、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κ =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。高度 1000m の VVP 風に、 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)を適用して求めた地上 の推定風と、風向風速計による実測風の比較を図-7 に示す。なお、風向は上空と地上で変化しないと仮 定した。この結果より、全体として推定風速は実測 風速を過小評価する傾向にあるが、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。

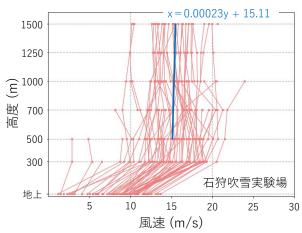


図-6 WP 法で求めた風速の鉛直分布

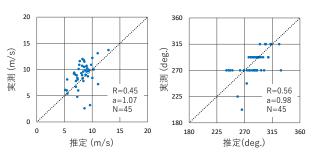


図-7 地上における推定風と実測風の比較 (左:風速、右:風向)

## 4. 飛雪流量および視程の推定

## 5.1 飛雪流量の推定方法

#### 5.1.1 上空の飛雪流量

一般配信されているレーダ雨量 (図-8。図-4 と同日同時刻) から式(1)によって求めた降雪強度と高度 1000m における VVP 風を元に、高度 1000m における飛雪流量を面的に算出する。

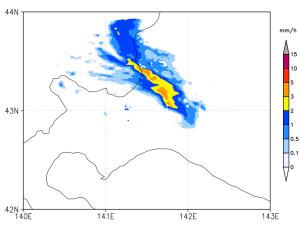


図-8 レーダ雨量 (2019年1月21日13:00)

飛雪流量Mf (g/m²/s)は、飛雪空間密度n (g/m³) と風速V(m/s)の積で与えられる(式 (2))。

$$Mf = nV$$
 (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 Mv ( $g/m^2/s$ )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、Mv 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。

$$n = Mv/w \tag{3}$$

Mv 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 Mv =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 Mv 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。

$$Mv = 0.20P \tag{4}$$

$$n = 0.20P/w \tag{5}$$

このn と高度 1000m における VVP 風速 V から、式 (2) より、高度 1000m における飛雪流量 Mf 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。推定結果の一例( $\mathbf{Z}$ -4 と同日同時刻)を  $\mathbf{Z}$ -9 に示す。

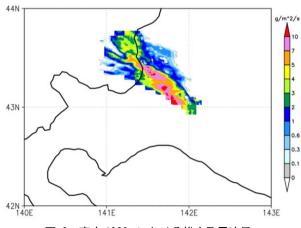


図-9 高度 1000m における推定飛雪流量 (2019 年 1 月 21 日 13:00)

#### 5.1.2 地上の飛雪流量

次に、地上における飛雪流量の面分布を推定する。 既報 <sup>2)</sup>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 れる影響を考慮に入れる必要があることが示された。 そこで、本推定においても、風による降雪粒子の移 流効果を考慮する。

式(1)によってレーダ雨量(図-8)から求めた降雪 強度分布(250m メッシュ)に対し、メッシュ毎に VVP 風の鉛直分布を適用することで、移流後の地上 降雪強度分布を求めた。なお、VVP 風は 5km メッ シュで計算されている。ここでは、5km メッシュに 含まれる 250m メッシュ(全 400 メッシュ)の風向 風速は全て等しいと仮定して計算した。図-10 に、 降雪粒子の移流イメージを示す。移流後の地上降雪 強度分布と地上風(高度 1000m の VVP 風から推定 した風)より、地上における飛雪流量分布を求めた (図-11)。この吹雪時の風向は概ね西北西であった ため(図-4)、上空の飛雪流量分布が地上では全体的 に東南東に移動した。また、地上では上空よりも風 速が小さいため、飛雪流量は全般に小さくなった。 なお、落下中の降雪粒子が高度 1000m から地上に到 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。したがって、図-11 は、13:00 のレーダ観測結果に基づく 13:14 の地上飛 雪流量の面分布の推定結果である。

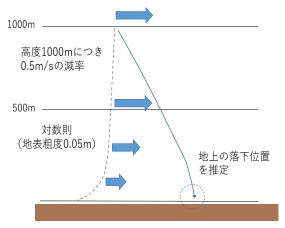
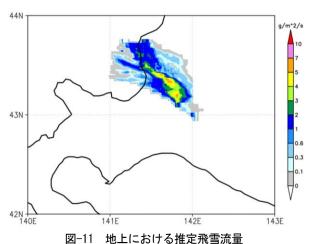


図-10 降雪粒子の移流イメージ



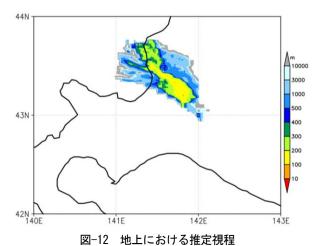
(13:00の観測結果に基づく13:14の地上の推定結果)

# 5.2 視程の推定

次に、武知ら  $^{5}$ の経験式(式 (6))を用い、地上の推定飛雪流量分布から視程分布を求める。この経験式は、吹雪時における目視観測結果に基づくものであり、前方  $10\sim255$ m に設置された全 9 枚の黒色視程板の視認性と飛雪流量の関係を統計的に整理し、導出されたものである。式中の Vis は視程 (m)、Q は飛雪流量 $(g/m^2/s)$ を指す。

# $Vis = 10 - 0.886 \cdot \log Q + 2.648$ (6)

求められた視程分布を図-12 に記す。これは、図-11 同様、13:00 のレーダ観測結果に基づく 13:14 の地上の推定結果である。この結果から、当該日時(2019年1月21日13:14)の地上視程は、広範囲にわたって 200m 以下であったと推定された。



(13:00の観測結果に基づく13:14の地上の推定結果)

## 6. 飛雪流量と視程の推定結果の検証

#### 6.1 飛雪流量の推定値の検証

#### 6.1.1 SPC を用いた飛雪流量の実測値

飛雪流量の実測には SPC を使用した。元々、SPC は地吹雪粒子(丸みを帯びた小さな雪粒子)を計測するために開発された機器であり、非接触で光学的に粒径と個数を記録する(計測可能な粒径範囲は0.05mm~0.5mm)。図-13 に SPC の外観を、図-14 にセンサー部分の詳細を示す。図-14 に示す投光部から受光部に向けて近赤外光が照射されており、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。光量の減衰量および減衰回数から、計測領域を通過した吹雪粒子の粒径および個数が求められ、1 分おきに 1 秒毎の飛雪流量が出力される。

SPCの設置箇所は、図-2に示す地上5地点(石狩吹雪実験場、厚田ST、江別ST、月形ST、美唄ST)である。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、その設置高度を7mとした。Naaim et al.<sup>12</sup>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。

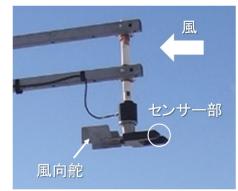
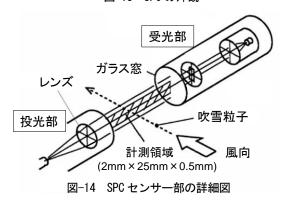


図-13 SPC の外観



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「3)。一方で、粒径が0.5mmを超えるものは全て0.5mmの粒子として計算される。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、飛雪流量が過小評価される「4)。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。

## 6.1.2 検証結果

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-15 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(0.36~0.70)、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、任意の風速以上のデータを除くことで相関性の向上と誤差の低減が確認されたが、その考察は次項で述べる。

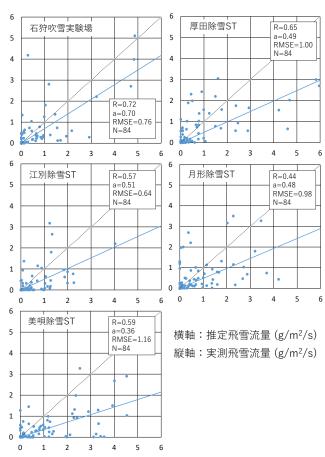


図-15 飛雪流量の推定値と実測値の比較

# 6.1.3 考察

図-15 で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での SPC 観測によって得られた粒径分布を図-16 に記す。図中には、実測飛雪流量に対する粒径ごとの体積寄与率を付記してある。この結果から、粒径0.5mm以上の吹雪粒子が相当数あったことが確認され、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。ただし、降雪粒子の大半は非球体であるため、図-16 に示すほどの体積寄与率には達しないと推測される。

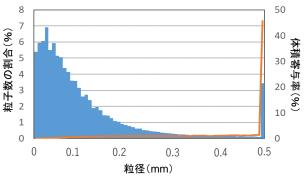


図-16 SPC 観測で得られた粒径分布および体積寄与率

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-15 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-17 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。 Naaim 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。つま り、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。ここで、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-15 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)。

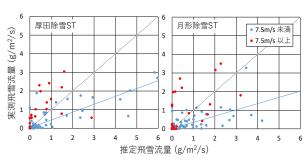


図-17 厚田および月形除雪 ST における飛雪流量の比較 (図-15 の再掲)

# 6.2 視程の推定値の検証

## 6.2.1 透過型視程計を用いた実測値

実測視程との比較には、石狩吹雪実験場に常時設置されている透過型視程計のデータを使用した(図-18。設置高度は2.1m)。透過型視程計は、大気の透過率に基づく平均的かつ客観的な視程を表すものであり、向かい合う投光器と受光器からなる(石狩吹雪実験場に設置されている投光器と受光器の間隔は30m)。投光器からは近赤外光が受光器に向けて常時投射されており、霧や雨滴、雪粒がある場合には近

赤外光が遮断されるため、光量が減衰する。この減 衰量に基づき、視程が求められる。



図-18 透過型視程計の外観

#### 6.2.2 検証結果

石狩吹雪実験場における実測視程と推定視程(図-12)の比較検証を行う。道路交通の観点からは、視程 1000m 以下の時についてのみ着眼すれば十分である。そこで、視程 1000m 以下の結果について、図-19 に示した。この図より、概して推定視程は実測視程を過大評価する傾向(実際には視界が悪いにも関わらず、視界が良いと評価する傾向)にあることが見てとれる。

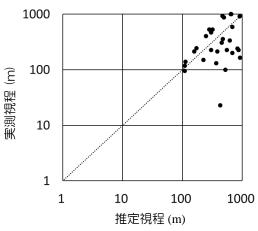


図-19 推定視程と実測視程の比較

竹内ら  $^{15)}$ によると、気温が 0 C以下の時には、地上風速が 9m/s 以上になると目線高さにまで達する地吹雪が断続的に発生することが報告されている。そこで、地上風速の閾値を 9m/s とした比較結果を図 -20 に再掲した。図中には、風速 9m/s 未満のデータのみを対象とした相関係数 R、近似直線(切片ゼロ)、決定係数  $R^2$  についても付記してある。この結果より、実測視程を過大評価していた推定結果(図中の点線よりも下方にプロットされた結果)の約 63 %は風速 9m/s 以上の結果、すなわち地吹雪が発生していた可

能性が高い吹雪事例であったことが確認された。風速 9m/s 以上のデータを除いた場合の R は 0.67 であり、降雪起因の吹雪時の推定視程と実測視程には相関があることが確認された。また、近似直線の決定係数  $R^2$  は 0.43 であることから、この近似式は実測値を概ね良く説明できるといえる。

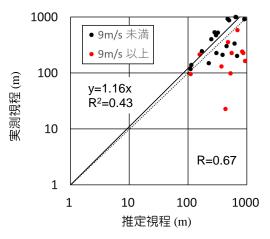


図-20 推定視程と実測視程の比較 (図-19の再掲。風速条件あり)

## 5. 交通事故発生時における推定視程との関係整理

吹雪時の交通事故とレーダデータから推定した地 上視程分布の関係を整理すべく、事例解析を行った。 ここでは、2015~2020 年度冬期に発生した全 10 事 例の交通事故を対象に、事故発生時刻周辺の地上視 程分布図を15 分毎に作図し、事故との関係について 調べた。

本報では、一例として、2016年2月23日8:35頃に美唄市光珠内(道央自動車道)で発生した計26台が絡んだ多重衝突事故について述べる。事故現場は三笠ICから旭川方面へ約5kmの片側2車線の緩いカーブで、旭川方面の車線を走っていた乗用車がスリップして停車していたところ、後続車両が相次いで衝突した。当時、現場は吹雪によって視界不良だったことが報告されている。

事故発生の約2時間前からの推定視程の時間変化を、15分ごとに図-21に記す。図中の黒点は事故発生地点を指す。ここで、6:44の図は、6:30時点の高度1000mのレーダデータから推定された6:44における地上の視程分布を意味している。同様に、6:59の図は6:45時点のレーダデータから、7:14の図は7:00時点のレーダデータからそれぞれ推定された視程分布である。図-21より、6:44時点では事故現場付近において視程が計算されなかったことが確認で

きる(降雪が無かったため飛雪流量がゼロであった)。 その後、6:59には視程が計算され、その後、徐々に 視程が低下していった様子が伺える。7:29には視程 が 200m以下に、そして 8:14には視程が 100m以下 となったと推定された。8:29 および 8:44 の視程も 100m以下であったことから、交通事故が発生した 8:35頃においても視程が 100m以下であったものと 想像される。

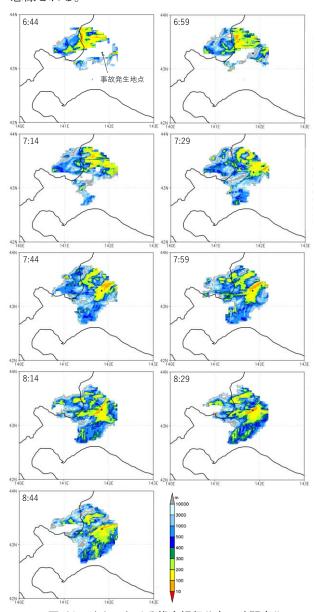


図-21 地上における推定視程分布の時間変化 (2016 年 2 月 23 日の事故事例)

ただし、解析を行った交通事故事例全てにおいて 視程低下が推定されたわけではない。なかには広範 囲にわたって降雪が無かったにも関わらず事故が発 生していたケースもあった。本研究では降雪起因の 吹雪による視程低下について議論したものであり、 地吹雪起因の視程低下については対象としていない。 したがって、それらの交通事故は地吹雪を主体とし た吹雪時の視程障害によるもの、あるいは凍結路面 を主要因とした事故であった可能性も考えられる。

#### 6. まとめ

本研究では、1 基の X-MP による観測データから 地上における吹雪の発生状況を面的かつリアルタイ ムに把握するための手法を構築すべく、降雪起因の 吹雪を対象に、データ解析を行った。まず、地上DFIR による観測結果に基づき、一般配信されているレー ダ雨量から降雪強度を求めるための補正係数を提示 した。次に、X-MP のドップラー速度を用い、VVP 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、上空における飛雪流量分布を推 定した。次に、風による降雪粒子の移流を考慮し、 地上における飛雪流量分布を推定したほか、武知ら 5の経験式を用いて視程分布を求めた。推定結果の 検証のため、地上における実測値(SPC・透過型視 程計)と比較した。飛雪流量については実測値を過 大評価する傾向があった(1.4~2.8 倍程度)。バラツ キはあったものの、推定値と実測値には相関がある ことが確認された(ただし、SPCには様々な計測誤 差が含まれていると考えられる)。視程については、 道路交通に影響を及ぼすと考えられる視程 1000m 以下について比較した。推定視程は実測視程を過大 評価する傾向(実際には視界が悪いにも関わらず、 視界が良いと評価する傾向) があったが、地吹雪が 発生していたと考えられる強風条件を除いたことで、 過大評価傾向が軽減され、近似式によって実測値を 概ね良く説明できるようになった。レーダデータか ら推定した地上視程と実際の交通事故事例との関係 について事例解析を行った結果、視程低下のタイミ ングと事故発生のタイミングが一致する事例もあっ たことが確認された。

本研究の完成は、既設の防災インフラである X-MP のデータから数分後の地上吹雪の発生状況を 面的かつリアルタイムに推定することを可能とする ものであり、突発的に発生したホワイトアウトによる交通事故を未然に防ぐための注意喚起情報の一つとなる。

# 謝辞:

吹雪観測において、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。本研究の一部(レーダデータ解析の一部について)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。ここに記して謝意を示す。

# 参考文献

- 大宮哲,武知洋太,國分徹哉,原田裕介,松澤勝:複数の気象要素に基づく吹雪発生条件,寒地土木研究所 月報,第750号,pp.14-22,2015.
- 2) 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), pp.145-156, 2020.
- 3) 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, pp.762-764, 1994.
- 4) データ統合・解析システム(DIAS) HP.http://www.diasjp.net/ (2022 年 3 月 10 日閲覧)
- 5) 武知洋太,松澤勝,中村浩:吹雪時に人間が感じる視程と視程計や吹雪計による計測値との関係,北海道の雪氷,Vol.28,17-21,2009.
- 6) 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.
- WMO: International Organizing Committee for the WMO Solid Precipitation Measurement Intecom parison, Final Report of the First Session. WMO, Geneva, p.31, 1985.
- 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/know/kansoku\_guide/t ebiki.pdf (2022年3月10日閲覧)
- 9) 梶川正弘,谷口泉子,伊藤誠子:雪片の落下速度と構成結晶形との関係,雪氷,58,pp.455-462,1996.
- 10) 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, pp.747-762, 2013.
- 11) 日本道路協会: 道路橋耐風設計便覧(平成 19 年改訂版),日本道路協会編,p.296,2007.
- Naaim, F., Bellot, H., Nishimura, K., Genthon, C., Palerme,
  C. and Guyomarc'H, G: How to detect snow fall occurrence during blowing snow event?, Proc. 2012

- International Snow Science Workshop, Anchorage, pp.976-982, 2012.
- 13) 佐藤威,望月重人,小杉健二,根本征樹: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,pp.493-503, 2005.
- 14) 佐藤篤司: 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,pp.19-23,1991.
- 15) 竹内政夫, 石本敬志, 野原他喜男, 福沢義文: 降雪時 の高い地吹雪の発生臨界風速. 昭和 61 年度日本雪氷 学会全国大会予稿集, p.252, 1986.

# A STUDY ON THE DEVELOPMENT OF SNOWSTORM DETECTION ALGORITHM USING X-BAND MP RADAR

Research Period: FY2018-2021

Research Team: Snow and Ice Research Tem, Cold-Region

Road Engineering Research Group

Author: NISHIMURA Atsushi MATSUSHITA Hiroki

OKUBO Koji

SUGAWARA Kuniyasu

OMIYA Satoshi

Abstract: The goal of this study is to construct a method for estimating the occurrence of blowing snow on the ground in real time using an X-band MP radar. The strength of the blowing snow (mass flux) was calculated from the snowfall intensity and wind speed derived from the X-band MP radar data. We considered the effect of snow particles being carried by the wind and estimated the mass flux distribution on the ground. Using an empirical formula, visibility was converted from the mass flux. The comparison results with the measured values showed that the estimated mass flux and the estimated visibility were both valid. The relationship between the visibility distribution estimated by this estimation process and the actual traffic accident cases was summarized.

Keywords: X-band MP radar, Mass flux of blowing snow, Poor visibility