

気象レーダを用いた吹雪時の視程推定 ～視程急変予測情報の社会実装を見据えて～

大宮 哲*1、武知 洋太*1、越國 一九*1、西村 敦史*1

1. はじめに

吹雪による視程障害は、多重衝突事故や長時間にわたる車両滞留の原因となり、人的被害のみならず、人流・物流の停滞による経済的損失をもたらす。吹雪の視程障害に起因する近年の多重衝突事故としては、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台が絡んだ事故が挙げられる。いずれも平均風速（近隣アメダス）が10m/sを超える強風下で発生した事故であった。

吹雪による視程障害の様子を図1に例示する。この写真は、降雪を伴った吹雪時の日中に走行中の車内から前方を撮影したものである。かろうじて見えるアスファルト路面や対向車のヘッドライトによって走行車線を想像することができるが、運転環境が極めて悪いことが伺える。

吹雪による視程障害対策は、ハード対策とソフト対策に大別される。ハード対策には防雪柵や防雪林、視線誘導施設（矢羽根型視線誘導標、デリネーター、スノーポール等）等がある。一方、ソフト対策は主として情報提供であり、近年は複数の機関において吹雪時の視程予測に関する研究や情報提供がなされている^{1)~6)}。これらの予測システムは、いずれも気象庁から配信される気象データを元に1時間ごとの平均的な視程を推定するものである。しかし、吹雪は時間的かつ空間的変動が大きい^{7)、8)}、現行の予測システムでは実際の視程変動を推定することはできない。加治屋⁹⁾は、視程が急変した時に多重衝突事故が発生しやすいことを報告している。したがって、交通障害の発生リスクを低減するためには、吹雪の強弱やそれに伴う視程変動を短い時間間隔かつ細かい空間分解能で予測し、ドライバーに対して注意喚起することが望ましい。

本研究では、高い時空間分解能を有するXバンドMP気象レーダ（観測間隔およびデータ配信頻度は1分毎。空間

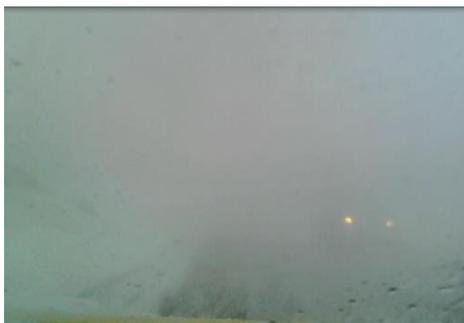


図1 吹雪による視程障害(視程 100m 未満)

分解能は250m。以下、X-MP) による上空の観測データから、数分後の地上における視程を面的かつリアルタイムに把握することを目標とした。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¹⁰⁾に基づく解析を行った。本報では、X-MPデータを用いた地上視程の推定手順、実測視程との比較結果、実際の交通事故を対象とした事例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。

2. 使用データと研究手順

本研究では、データ統合・解析システム (DIAS) のWebサイト¹¹⁾より入手したレーダデータ (レーダ雨量・ドップラー速度) を使用した。本研究のフローを図2に記す。日本雪氷学会¹²⁾によると「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。「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。「視程」は「昼間の空を背景として、視角0.5~5° 程度となるような黒ずんだ目標物が肉眼で識別できる最大の距離」と定義されている。なお、現在では視程計によって計測された気象光学距離 (meteorological optical range; MOR) を吹雪時の視程とする場合が多い。

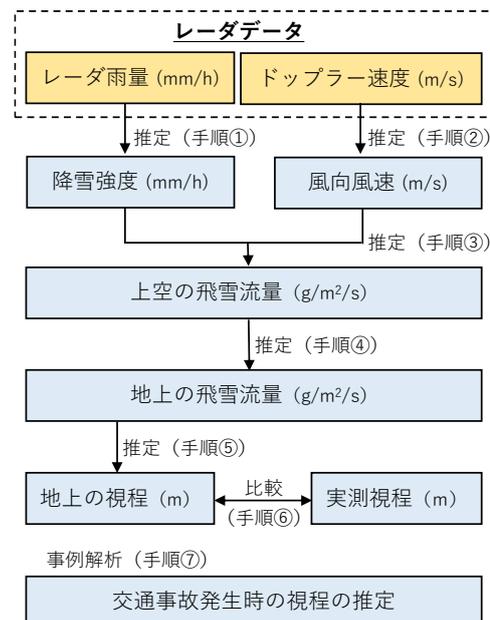


図2 本研究のフロー

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、降雪と風の強さについての情報が必要となる。そこで、まず、大宮ら¹³⁾の補正係数を用い、降雪時のレーダ雨量から降雪強度を求めた(手順①)。次に、立平・鈴木¹⁰⁾によるVVP法を用い、X-MPのドップラー速度から上空の風向風速を推定した(手順②)。手順①と②で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(手順③)。次に、VVP法で求めた風向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移流を考慮し、地上における飛雪流量分布を推定した(手順④)。武知ら¹⁴⁾による経験式を用いて飛雪流量を視程に換算したのち(手順⑤)、地上での実測視程と比較した(手順⑥)。最後に、実際の交通事故事例を対象に視程を推定した(手順⑦)。

レーダ観測と地上観測の概念図を図3に、X-MP石狩局と視程観測を行った寒地土木研究所の石狩吹雪実験場(北緯43° 12′、東経141° 23′)の位置関係を図4に記す。なお、参考としてX-MP北広島局の位置も図4中に付記してある。

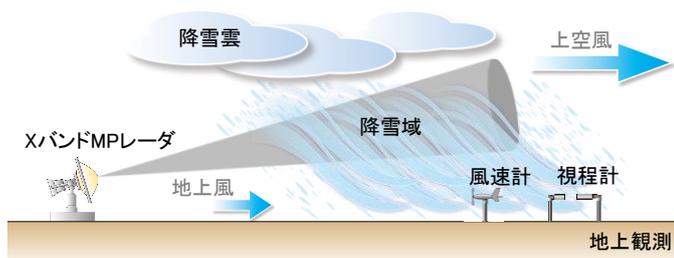


図3 レーダ観測と地上観測の概念図

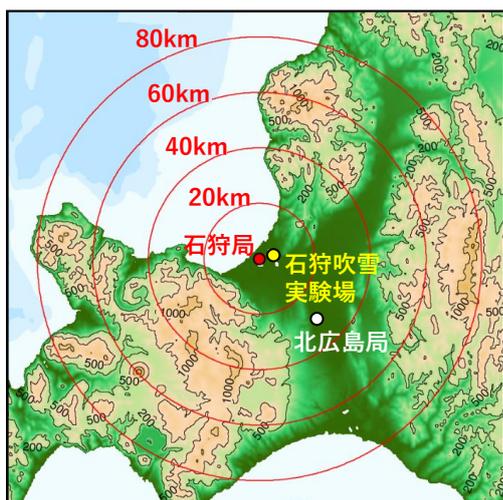


図4 X-MPと石狩吹雪実験場の位置関係

3. 降雪強度の算出

元々、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に比べて劣る^{15)~17)}。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扱くと推定誤差の一因になりうる。そこ

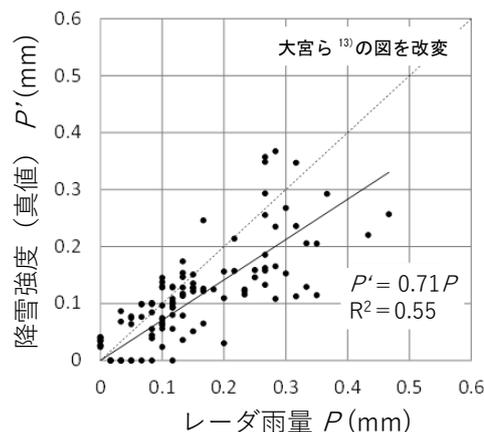


図5 降雪強度(真値)とレーダ雨量の関係

で、本研究では大宮ら¹³⁾が示した補正係数(0.71)をレーダ雨量に乗じて求めた値を降雪強度として使用した。この補正係数は、世界気象機関(WMO)が推奨する降水観測システム(Double Fence Intercomparison Reference、以下DFIR)による観測結果から求めた降雪強度(真値) P' とレーダ雨量 P の比較から得られた回帰係数である(図5)。DFIRの諸元や観測原理、降雪強度(真値)の算出方法についてはWMOのレポート他^{18)、19)}を、 P' と P の比較時における各種条件(気象条件等)については大宮ら¹³⁾を参照されたい。

4. 上空の風向風速の推定

気象レーダによって得られるドップラー速度は、風によって流されている降雪粒子に反射した電波のドップラー効果から求められた降雪粒子の移動速度である。一般にはドップラー速度と風速を等しく取り扱うことから²⁰⁾、ここでも降雪粒子の移動速度と風速が等しいものとして扱う。1基のレーダ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、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¹³⁾は2基のX-MPデータを要するDualドップラー解析によって風向風速を求めたが、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¹⁰⁾により推定した。この手法は、ドップラー速度の空間分布から平均的な風向風速を求める手法である(解析対象とする空間内の風向風速が一樣であると仮定)。まず、ドップラーレーダで観測される全空間領域の中から任意の三次元領域(解析対象領域)を定める。次に、この領域内に含まれる動径方向(レーダビーム方向)の速度分布を動径方向に平均する。方位角ごとに求めたこの平均速度に最小二乗法を適用することで、領域内を代表する風向風速を算出するものである。詳細については先行研究¹⁰⁾を参照されたい。以降、VVP法により推定した風をVVP風と呼ぶこととする。

本研究では、2018～2020年度冬期に発生した冬型気圧配置時における吹雪84事例（1時間×84セット）を対象に解析を行った。これらの事例は、レーダによって石狩平野上空に数時間程度継続的に降水が観測されており、かつ石狩アメダスの時間平均気温が氷点下、時間平均風速が5m/s以上の条件を満たしたの中から、任意の1時間のデータを84セット抽出したものである。ここでは、抽出した全84時間のデータのうち、それぞれの毎正時前5分間のレーダデータを解析し、その結果を、当該時刻（当該事例）を代表する吹雪データとして扱った。解析の対象高度は6高度（300m、500m、750m、1000m、1250m、1500m）とした。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までを解析対象とした（図4参照）。なお、解析対象範囲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ことに留意されたい。

5. 解析結果

VVP法によって求めた上空1000mの風向風速の一例（2020年12月19日4:00）を図6に示す。図6中の▲は石狩吹雪実験場の位置を示している。求めた風速と、一般配信されているレーダ雨量（図7）から算出した降雪強度より、上空1000mにおける飛雪流量の面分布を求めた（図8）。次に、VVP風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される距離と方向を計算し、地上における飛雪流量の面分布を求めた（図9）。最後に、武知ら¹⁴⁾の経験式を用いて飛雪流量から視程に換算した結果を図10に示す。なお、ここでは、先行研究²¹⁾、²²⁾に基づき、降雪粒子の落下速度を一律1.2m/s（上空1000mにある降雪粒子が地上に到達するまでに要する時間は約14分間）と仮定した。すなわち、図9および図10は、レーダ観測の約14分後の地上の推定結果を意味している。この結果から、当該日時（2020年12月19日4:14）の地上視程は、広範囲にわたって自動車の運転に影響が出始めるとされる200m以下²³⁾であったと推定された。なお、図6には標高1000mを超える山岳域（図4参照）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計算を行ったことによる。等高度面データを作成する際、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

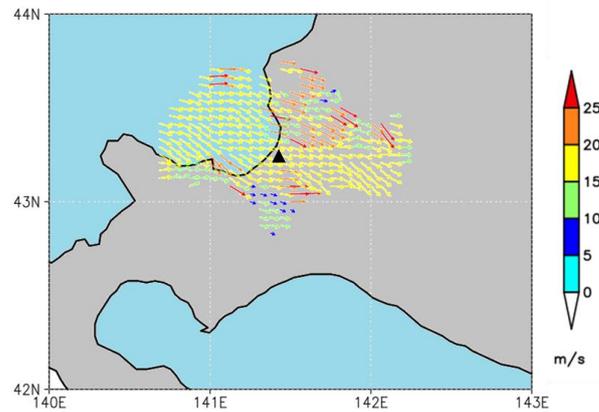


図6 VVP法によって求めた上空1000mの風向風速
（2020年12月19日4:00の例）

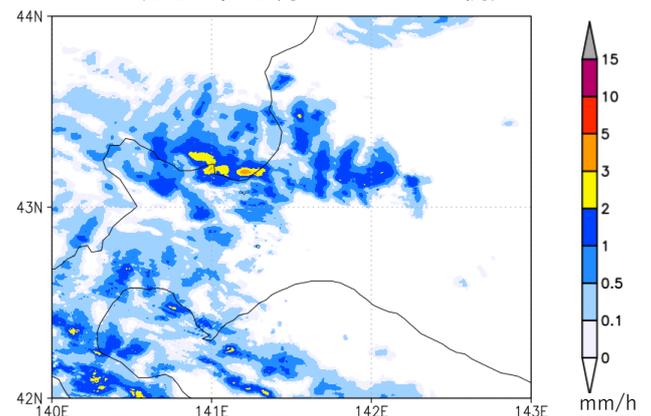


図7 一般配信されているレーダ雨量画像
（図6と同日同時刻）

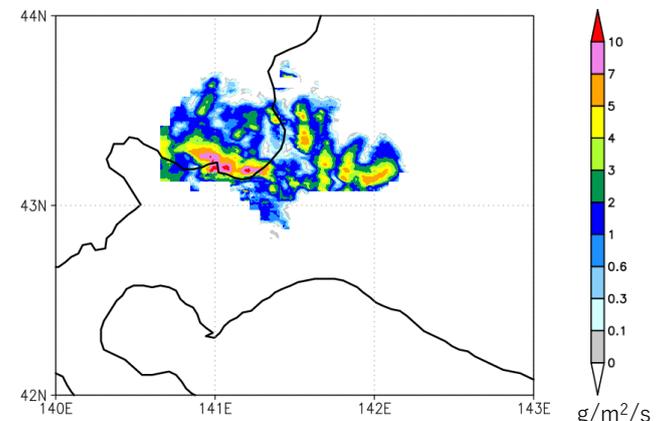


図8 上空1000mにおける推定飛雪流量

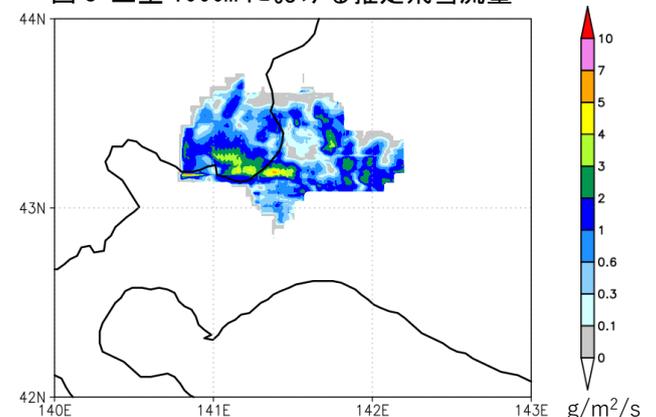


図9 地上における推定飛雪流量
（4:00のレーダ観測に基づく4:14の地上の推定結果）

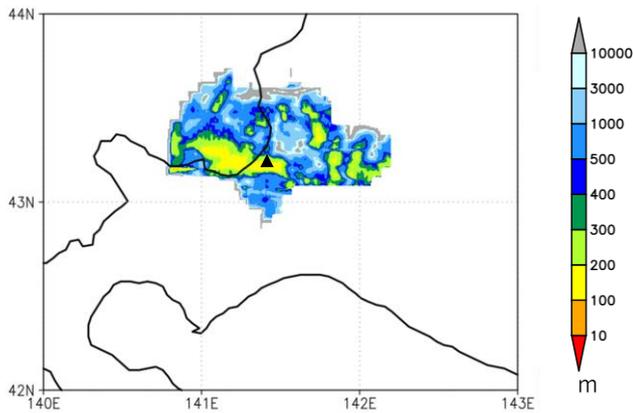


図 10 地上における推定視程

(4:00 のレーダ観測に基づく 4:14 の地上の推定結果)

に基づく本解析では誤差要因となり得る。したがって、山岳域における風向風速の推定精度は平地に比べ劣る可能性が高いと考えられる。

6. 推定視程と実測視程の比較

推定視程と実測視程の比較には、石狩吹雪実験場(図6、図10中に示す▲地点)に常設している透過型視程計(図11。明星電気株式会社製; TZE-2T)の観測値を使用した。この設置高度は2.1m、出力は10分平均値である。透過型視程計は、大気の透過率に基づく平均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。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。

推定視程と実測視程の比較結果を図12に記す。道路交通の観点からは視程1000m以下の時についてのみ着目すれば十分である。また、竹内ら²⁴⁾によると、気温が氷点下の時には、地上風速が約9m/sを超えると目線高さまで達する地吹雪(高い地吹雪)が断続的に発生する。本研究の対象は降雪起因の吹雪であり、地吹雪は対象外としていることから、図12には視程1000m以下かつ地上風速9m/s以下の結果(84事例中19事例)を用いている。

この結果より、推定視程と実測視程は概ね一致することが確認された(相関係数Rは0.67)。以上より、降雪起因の吹雪については、X-MPを用いた面的かつリアルタイムな地上視程の把握が可能であると考えられる。

7. 多重衝突事故発生時の推定視程(事例解析)

実際の多重衝突事故事例を対象に、X-MPデータから地上視程を推定した。本論文では、2016年2月23日8:30~8:35頃に美唄市光珠内(道央自動車道)で発生した計26台が絡んだ事故について解析した結果を述べる。美唄市は札幌市中心部から北東約50kmの場所に位置している。



図 11 石狩吹雪実験場に設置された透過型視程計

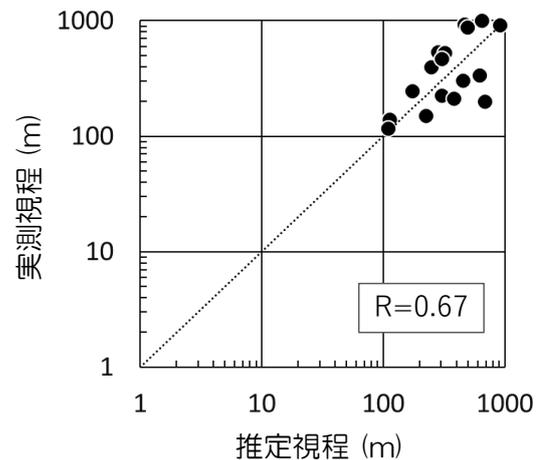


図 12 推定視程と実測視程の比較

新聞報道等^{25)、26)}によると、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(ほぼ直線)で、旭川方面の車線(下り線)を走っていた乗用車が単独事故により停車していたところ、後続車両が相次いで衝突した。事故当時、現場の路面は圧雪アイスバーン、気温は氷点下であった。事故の直接の原因はスリップであったと報告されているが、当時現場では吹雪による視界不良が発生しており、最高速度が50km/hに規制されていた。以上より、スリップと視界不良の複合的な要因によって事故が大規模化したものと推察される。

近隣の美唄アメダスによると、事故発生時刻の平均風速は4m/s程度であり、低い地吹雪(雪面からの高さ数10cm以下をバウンドしながら移動する吹雪)の発生臨界風速とされる5m/s²⁴⁾を下回っていた。また、事故現場は森の中に位置し、周辺には風速を低減させうる樹木が数多くあることから、事故発生時に現場で地吹雪が発生していた可能性は低い。すなわち、事故発生時の視界不良の主な要因は、降雪起因の吹雪であったと考えられる。

一般配信されているレーダ雨量およびX-MPデータに基づく推定視程の時間変化を、事故発生の約2時間前から15分ごとに図13に記す。図中の黒点は事故発生地点を指す。上述のとおり、6:44の推定視程は6:30の高度1000mのレーダデータに基づく14分後の地上の推定結果を意味している。同様に、6:59の視程は6:45のレーダデータから、7:14

の視程は7:00のレーダデータからそれぞれ推定された結果である。事故発生の約1時間30分前の事故発生地点の推定視程（6:59の図）は1000m以上であったが、その後徐々に低下し、7:29には視程200m以下に、そして8:14には視程100m以下となった。8:29および8:44の視程も100m以下であったことから、事故が発生した8:30～8:35頃においても視程100m以下であった可能性が高いと考えられる。以上より、事故発生時の視界不良の様子を、14分前の高度1000mのレーダデータから推定することができていたと言える。一方で、レーダ雨量と推定視程のコンターには空間的差異が認められる。これは、一般配信されているレーダ雨量情報のみから地上の吹雪状況を判断するのは難しいことを意味し、本論文で述べた一連の視程推定プロセスの有効性を示すものである。

8. まとめと今後

本研究では、吹雪時の視程を面的かつリアルタイムに把握すべく、X-MPデータの解析を行った。一般配信されているレーダ雨量から求めた降雪強度と、VVP法によって求めた風向風速から上空における飛雪流量分布を推定した。風による移流を考慮して地上の飛雪流量分布を推定したのち、経験式を用いて視程に換算した。推定視程の妥当性を確認すべく、地上の視程計による実測値と比較したところ、両者は概ね整合していた。吹雪による視界不良時に発生した多重衝突事故とレーダデータから推定した地上視程の関係を調べたところ、視程の低下が推定された地点・時刻において事故が発生していたことが確認された。

本研究では降雪に起因する吹雪を研究対象としたが、今後は地吹雪に起因する吹雪についても解析を行う。ま

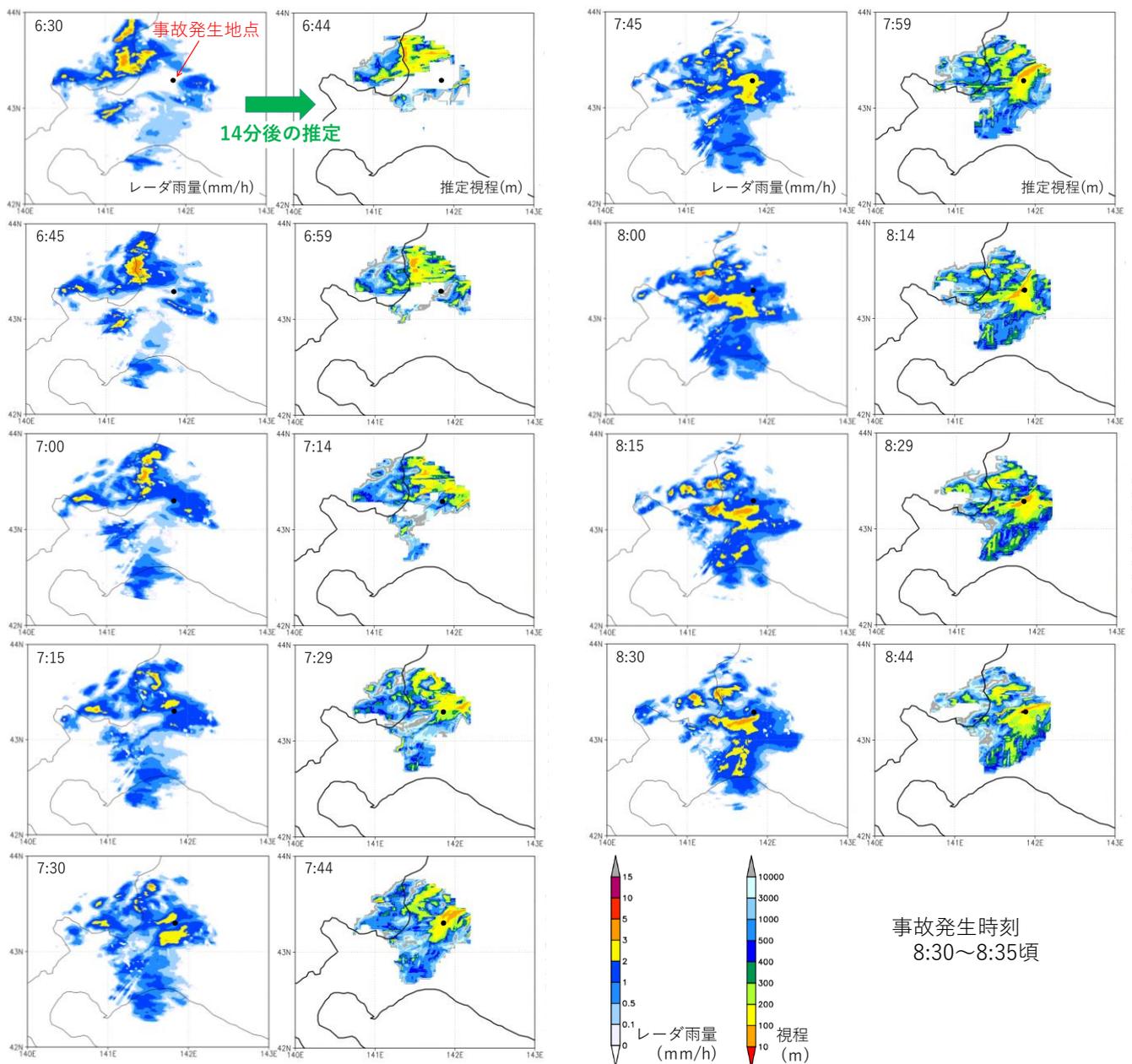


図 13 一般配信されているレーダ雨量画像（左）と X-MP データに基づく地上の推定視程（右）の時間変化（推定視程図は 2016 年 2 月 23 日 6:30～8:30 の高度 1000m の各レーダデータから求めた 14 分後の推定結果）

た、X-MP以外のデータ（高解像度降水ナウキャスト、CバンドMP気象レーダ、気象数値モデル等）を複合的に用いることで、予測時間および予測エリアの拡大に臨む。本研究は、吹雪時の視程障害の発生を面的かつリアルタイムに推定するものであり、交通障害リスク軽減への貢献が期待できる。一刻も早い社会実装を目指し、視程推定アルゴリズムの完成および情報提供システムの構築に臨む。

本論文は、大宮ら²⁷⁾を編集したものである。より詳細な解析結果については大宮ら²⁷⁾を参照されたい。

謝辞

本研究では、データ解析において、一般財団法人日本気象協会、及びいであ株式会社の各位にご協力いただきました。本研究の一部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) 北の道ナビ【吹雪の視界情報 北海道版】
<http://northern-road.jp/navi/touge/fubuki.htm>
(2024年10月21日閲覧)
- 2) 松澤：吹雪時の視程推定手法の改良に関する研究, 雪氷, Vol. 69, No. 1, pp. 79-92, 2007
- 3) 武知ら：“吹雪の視界情報”における吹雪視程推定手法について, 寒地技術論文・報告集, Vol. 32, pp. 157-162, 2016
- 4) 星野ら：道路カメラ画像および GPV 気象予報にもとづく道路構造・沿道環境を加味した吹きだまり深さ予測技術の開発, 寒地技術論文・報告集, Vol. 32, pp. 105-110, 2016
- 5) 根本ら：2014/15 冬期における北海道中標津町周辺での吹雪予測システム試験運用について, 防災科学技術研究所主要災害調査, No. 49, pp. 119-122, 2016
- 6) 三上ら：津軽自動車道における吹雪時の走行支援策とその評価, ゆきみらい 2016 in 盛岡 研究発表会, 2016
http://www.thr.mlit.go.jp/yukimirai_morioka/pdf/804B_14.pdf (2024年10月21日閲覧)
- 7) 松澤・大宮：吹雪時の平均視程と瞬間視程の関係, 雪氷, Vol. 83, No. 3, pp. 299-305, 2021
- 8) 池田ら：発達した吹雪境界層における飛雪流量の最大瞬間値と平均値の関係, 雪氷, Vol. 84, No. 3, pp. 213-227, 2022
- 9) 加治屋：寒地 ITS の利用者ニーズと有効な導入方策に関する実証的研究, 北海道開発土木研究所報告, Vol. 122, p. 73, 2004
- 10) 立平・鈴木：単一ドップラーレーダーによる上層風推定の精度, 天気, Vol. 41, No. 11, pp. 33-36, 1994
- 11) データ統合・解析システム (DIAS), XRAIN 原データダウンロードシステム
https://dias.jp.net/app_list/xrain-data/ (2024年10月21日閲覧)
- 12) 日本雪氷学会：新版雪氷事典, 古今書院, 2014
- 13) 大宮ら：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, Vol. 82, No. 3, pp. 145-156, 2020
- 14) 武知ら：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, pp. 17-21, 2009
- 15) 岡村：レーダエコーと降雪分布について (第3報), 天気, Vol. 28, No. 9, pp. 30-42, 1981
- 16) 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, Vol. 27, No. 2, pp. 67-76, 2014
- 17) 増田ら：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), Vol. 74, No. 4, pp. I_85-I_90, 2018
- 18) WMO : International Organizing Committee for the WMO Solid Precipitation Measurement Intecomparison, Final Report of the First Session, WMO, Geneva, p. 31, 1985
- 19) 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, Vol. 744, pp. 31-34, 2015
- 20) 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, Vol. 200, pp. 1-38, 2001
- 21) 梶川ら：雪片の落下速度と構成結晶形との関係, 雪氷, Vol. 58, No. 6, pp. 455-462, 1996
- 22) Ishizaka et al. : A new method for identifying the main type of solid hydrometeors contributing to snowfall from measured size-fall speed relationship, J. Meteor. Soc. Japan, Vol. 91, Issue 6, pp. 747-762, 2013
- 23) 加治屋ら：降雪・吹雪による視程障害条件下のドライバーの運転挙動に関する一考察, 寒地技術論文・報告集, Vol. 20, pp. 325-331, 2004
- 24) 竹内ら：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
- 25) 日本経済新聞：“道央自動車道で車 26 台絡む事故 11 人搬送 軽傷か”, 2016 年 2 月 23 日記事, 2016
https://www.nikkei.com/article/DGXLASDG23H2Y_T20C16A2000000/ (2024年10月21日閲覧)
- 26) 北海道新聞：“道央道で 26 台衝突 11 人がけ”, 2016 年 2 月 23 日夕刊 1 面記事, 2016
- 27) 大宮ら：X バンド MP レーダによる吹雪時の視程分布のリアルタイム推定, 日本雪工学会論文集, 39 巻 3 号, pp. 50-61, 2023