
報 告

飛雪流量アプリによる吹雪の危険度予測 An application software for operational forecast of snowstorm

菊田 弘樹¹・稲飯 洋一¹・白取 直也¹・今井 達也¹・水上 威仁¹・
青木 篤史¹・渡邊 宏海¹・伊東 慎司¹・川村 容明²

要 旨

北海道の暴風雪警報には風速のほかに「雪による視程障害を伴う」という発表基準がある。北海道地方では、予報担当者が暴風雪警報の発表を判断するために、風速や降雪の強弱、気温の高低などの広範な気象要素を把握し、数時間先の視程障害状況をイメージする必要があるが、飛雪流量の活用により、吹雪の危険度の高まりを客観的に判断することが可能になる。本稿では、飛雪流量を予報作業に活用するために開発した飛雪流量アプリについて、その機能や使用方法及び特長についてまとめた。また、過去の吹雪事例の実況把握と危険度予測について、飛雪流量アプリを用いた予報作業を想定した事後検証を行うことで評価した。評価の結果、予報担当者が飛雪流量アプリを利用することによって、風速や降雪を個別に確認するよりも、吹雪の危険度が高まると予測される地域を確実に容易に把握でき、暴風雪警報の発表をより適切に判断できる可能性が示され、予報担当者の視点から当アプリの有用性や便益を認めることができた。今後は、飛雪流量アプリを組み込んだワークシートの作成等、予報作業の効率化の取組が必要である。

1. はじめに

吹雪の発生は、風速や降雪の強弱、気温の高低などの広範な気象要素が関与しており（例えば、松澤ほか、2019）、北海道地方の暴風雪警報発表判断にはこれらの気象要素の実況及び予測資料を把握する必要がある。

札幌管区気象台では、飛雪流量（単位時間単位面積を通過する雪粒子の質量；竹内と福沢、1976；

雪氷チーム、2016；概要は付録 A を参照）を暴風雪による視程障害の客観的指標として活用する研究を進めてきた（宗ほか、2015；野村ほか、2016；山口ほか、2017；青木ほか、2019）。札幌管区気象台の取組の概要については、2014 年度以前の取組は山口ほか（2017）の第 2 節に、2015 年から 2021 年度までの取組は稲飯ほか（2023）の第 1 節にまとめられている。

¹ 札幌管区気象台気象防災部予報課

² 札幌管区気象台気象防災部予報課（現 稚内地方気象台）
（令和 6 年 12 月 20 日発行）

近年は、吹雪が原因で発生した主要道路の交通障害などの吹雪災害をデータベース化することで、これを予測するための指標として飛雪流量を活用する研究を推進してきた（池上ほか、2019；2020）。池上ほか（2020）では、飛雪流量アプリケーションソフト（以下、飛雪流量アプリと表記する）の開発も行われた。この開発にあたっては、札幌管区気象台のイントラサーバー上に導入されたプロジェクト管理ソフト「Redmine」が活用され、2019年度以降の開発に関する議論や進捗の状況なども Redmine 上に記録されている。

稲飯ほか（2023）では、飛雪流量アプリを活用した吹雪災害の予測精度の検証が行われた。2012年冬季から2021年冬季までの10年間について、石狩・空知・後志地方（第1図）で実際に発生し

た吹雪災害（主要道路における通行止め事例等）をデータベース化して、災害の有/無と飛雪流量との対応について吟味した。検証の結果、飛雪流量解析値の「市町村等をまとめた地域」における最大値を用いた場合のスレットスコアは0.19という成績が得られ、さらに飛雪流量値の最大値ではなくパーセンタイル値を使用することで成績が改善する（スレットスコアが0.21に改善する）ことが示された。

本稿では稲飯ほか（2023）の検証結果を踏まえつつ、現業予報作業での利便性も考慮しながら改修を行った飛雪流量アプリについて紹介し、その飛雪流量アプリの有用性について実際の吹雪事例を用いた事後検証により考察する。本稿の構成として、2節で飛雪流量アプリの機能、3節でその特長を紹介し、4節で実際の事例を用いた吹雪の危険度予測事例を示す。5節で飛雪流量アプリの課題を、6節に今後の展望を記述し、7節で全体をまとめる。

2. 飛雪流量アプリの機能

飛雪流量アプリは、予報作業に活用するために開発され、2つの表示機能を持つ。1つは飛雪流量値の帳票表示機能（以下、飛雪流量帳票と表記する）で、もう1つは平面図表示機能（以下、飛雪流量平面図と表記する）である。2つの表示機能は、飛雪流量帳票で飛雪流量値が大きく計算されている時刻及び飛雪流量値を把握し、飛雪流量平面図で該当時刻の飛雪流量や風速等の面的な分布を確認して暴風雪警報の発表判断を行う、という流れを想定している。また、プログラミング言語にはpythonを使用しており、適切にモジュール化することで開発や改修を行いやすくする設計思想となっている。

以下本節では、2022年2月21日の吹雪事例を用いて、アプリの機能の説明に特化して記述するが、同事例の気象場の特徴などは4.1節の事例解析でより詳細に記述する。

2.1 飛雪流量帳票

まず、飛雪流量帳票について、初期値時刻2022



第1図 北海道石狩・空知・後志地方の警報・注意報発表区域図。太実線で囲まれた区域が一次細分区域を表し、囲み文字でその名称を記している。灰色の実線で囲まれた区域が二次細分区域を表し、影付き文字でその名称を記している。色分けされた区域が市町村等をまとめた地域を表し、点線囲み文字でその名称を記している。

(<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/saibun/sapporo.pdf> より)。

年 2 月 20 日 12UTC (協定世界時) の気象庁メソスケールモデルデータ (以下, MSM データと表記する) により計算された飛雪流量帳票を例に紹介する (第 2 図)。

ユーザーインターフェイス (UI) には『表示す

る細分』を切り替えるラジオボタン、『表示する FLV (フィルターレベル)』を切り替えるラジオボタン、『表示領域』を切り替えるラジオボタンが配置されている。

最上部の『表示する細分』については、「二府県」,

表示する細分
 二府県 府県 1次細分 市町村等まとめた地域

表示するFLV
 なし (FLV0) 上位5% (FLV0.5) 上位10% (FLV1) 上位20% (FLV2)

表示領域 (市町村等まとめた区域の場合のみで機能)
 全道 網走・稚内 釧路・帯広 札幌・旭川 室蘭・函館 稚内 旭川 網走 釧路 帯広 室蘭 札幌 函館

2022 / 02 / 20 12 送信 < 最新 >

初期値 2022-02-20 12UTC

実況値 (解析値) 優先

| 予報時間 | 00 | 03 | 06 | 09 | 12 | 15 | 18 | 21 | 24 | 27 | 30 | 33 | 36 | 39 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 対象時刻(JST) | 20/21 | 21/00 | 21/03 | 21/06 | 21/09 | 21/12 | 21/15 | 21/18 | 21/21 | 22/00 | 22/03 | 22/06 | 22/09 | 22/12 |
| 石狩北部 | 4.9 | 8.8 | 33.4 | 26.4 | 5.9 | 9.7 | 12.8 | 8.8 | 7.2 | 7.5 | 6.2 | 3.7 | 2.7 | 1.4 |
| 石狩中部 | 3.7 | 0.3 | 8.1 | 23.7 | 5.2 | 10.0 | 12.5 | 8.9 | 8.1 | 8.1 | 4.4 | 2.1 | 2.8 | 1.7 |
| 石狩南部 | 2.4 | 0.3 | 0.2 | 9.7 | 5.8 | 6.8 | 8.4 | 6.4 | 5.1 | 5.0 | 4.0 | 1.6 | 1.8 | 0.7 |
| 北空知 | 4.3 | 10.1 | 5.2 | 1.0 | 2.4 | 7.1 | 8.1 | 6.6 | 4.3 | 3.0 | 2.8 | 1.0 | 0.5 | 0.4 |
| 中空知 | 1.8 | 7.3 | 16.6 | 1.4 | 2.8 | 4.8 | 5.3 | 3.4 | 2.5 | 2.1 | 1.2 | 0.6 | 0.3 | 0.3 |
| 南空知 | 3.1 | 7.1 | 14.5 | 19.1 | 4.8 | 7.4 | 8.6 | 7.3 | 5.6 | 4.7 | 4.5 | 1.4 | 1.3 | 0.9 |
| 後志北部 | 4.0 | 5.0 | 12.0 | 12.9 | 9.6 | 8.1 | 10.7 | 9.9 | 7.6 | 7.6 | 3.3 | 2.1 | 2.3 | 2.6 |
| 羊蹄山麓 | 1.0 | 4.0 | 5.1 | 11.6 | 11.3 | 4.4 | 6.6 | 2.4 | 2.1 | 1.1 | 1.8 | 0.6 | 0.7 | 0.8 |
| 後志西部 | 4.0 | 6.4 | 6.9 | 12.0 | 17.2 | 17.4 | 9.5 | 6.8 | 4.9 | 5.5 | 2.7 | 2.0 | 1.6 | 2.2 |

第 2 図 北海道石狩・空知・後志地方における初期値時刻 2022 年 2 月 20 日 12UTC の MSM データから計算された飛雪流量帳票。飛雪流量値の単位は $g\ m^{-2}\ s^{-1}$ 。領域最大値 (100 パーセント値) を表示している (フィルターレベルは「なし (FLV0)」を選択している。詳細は 2. 1 節の本文を参照)。



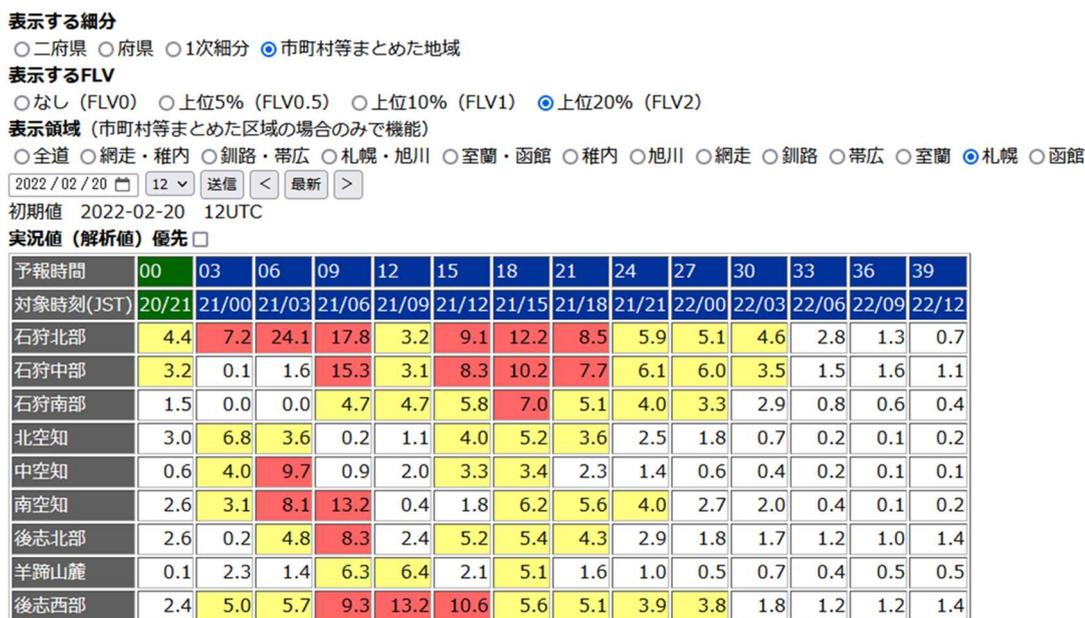
第 3 図 北海道上川・留萌地方の警報・注意報発表区域図。線種別や色分け, 名称標記は第 1 図と同じ。(https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/saibun/asahikawa.pdf より)。

「府県」、「一次細分」、「市町村等をまとめた地域」の4種類の選択メニューがある。後述の細分ほど北海道を細かく分割しており、分割したそれぞれの地域の飛雪流量の最大値を確認することができる。「市町村等をまとめた地域」のラジオボタンであれば、石狩・空知・後志地方の9つの地域それぞれにおける飛雪流量の最大値を確認することができる(第2図は「市町村等をまとめた地域」の細分を使用している)。「一次細分」については第1図の太実線で分割された3つの地域が該当し、それぞれ石狩地方、空知地方、後志地方に分けられる。「府県」、「二府県」のラジオボタンは、大掴みではあるが簡便に広域の状況を確認したい場合に使用するボタンである。例えば、石狩・空知・後志地方をひとまとめにした府県予報区(以下、札幌府県と表記する)や上川・留萌地方(第3図)をひとまとめにした府県予報区(以下、旭川府県と表記する)が「府県」の一例に、さらに札幌府県と旭川府県をひとまとめにした地域が「二府県」の一例に該当しており、これらは主に北海道全域を統率する地方予報中枢の予報作業の利便性を念頭においた細分である。

『表示する FLV』の項目は、池上ほか(2020)による開発段階の飛雪流量アプリからアップデ

ートされた部分であり、飛雪流量最大値に代えて稲飯ほか(2023)で予測精度の向上が確認されたパーセンタイル値を表示する機能を搭載したものである。アプリのUI上では、簡潔性と予報現業者への分かりやすさを考慮してパーセンタイルは段階的なFLVとして切り替え表示できるようにしている。一番左の選択メニューである「なし(FLV0)」は飛雪流量の100パーセンタイル値で、『表示する細分』で指定した領域内の最大値を表示する。二番目以降の『上位5%(FLV0.5)』、『上位10%(FLV1)』、『上位20%(FLV2)』の選択メニューは、それぞれ上位5%の値を取り除いた95パーセンタイル値、上位10%の値を取り除いた90パーセンタイル値、上位20%の値を取り除いた80パーセンタイル値を指す。稲飯ほか(2023)では、飛雪流量値の80-90パーセンタイル値を使用すると最も吹雪の危険度予測の精度(スレットスコア)が高くなることが示されており、第4節の事例解析では飛雪流量の80パーセンタイル値(FLV2)を多く参照している。

第4図は、第2図が飛雪流量の最大値(100パーセンタイル, FLV0)であるのに対し、同じ日時・領域で80パーセンタイル値(FLV2)の表示としたものである。『表示する細分』と『表示するFLV』



第4図 第2図と同様、ただし80パーセンタイル値について(フィルターレベルは「FLV2」を選択している。詳細は2.1節の本文を参照)。

及び飛雪流量帳票の初期値時刻を適切に設定することで、局地的な現象や突出して大きい値などの計算値のばらつきの影響を軽減した時空間的な広がりを持つ飛雪流量値を確認することができる。

『表示領域（市町村等まとめた区域の場合のみで機能）』では、選択した表示領域の市町村等をまとめた地域を一覧できる。飛雪流量帳票の初期値については、カレンダーのアイコンから初期値日、リストボックスから初期値時刻を選択できる。

『実況値（解析値）優先』のチェックボックスを入れると、各時刻において MSM データにおける予想値等から計算した飛雪流量予想値ではなく、飛雪流量解析値を表示することができる。この機能は、主に過去の事例を検証する際に利用する。

第 2 図の飛雪流量帳票にある予報時間と対象時刻（JST: 日本標準時）が緑に着色された列は飛雪流量解析値、青に着色された列は飛雪流量予想値を表示している。石狩北部の列を例に見ると、予報時間 00 時間（以下、FT = 00 h と表記する）の表示値 4.9 は初期値時刻 2022 年 2 月 20 日 12UTC の MSM データの解析値から計算された 2022 年 2 月 20 日 21 時の飛雪流量解析値で、石狩北部における最大値が 4.9 であることを示す。予報時間 18

時間（FT = 18 h）の表示値 12.8 は、初期値時刻 2022 年 2 月 20 日 12UTC の MSM の 18 時間後の予想データから計算された 2022 年 2 月 21 日 15 時の飛雪流量予想値で、その石狩北部における最大値が 12.8 であることを示す。この飛雪流量帳票は、MSM の初期値ごとに 3 時間間隔で更新され、39 時間先（FT = 39 h）までの 3 時間ごとの飛雪流量予想値を確認できる。

2.2 飛雪流量平面図

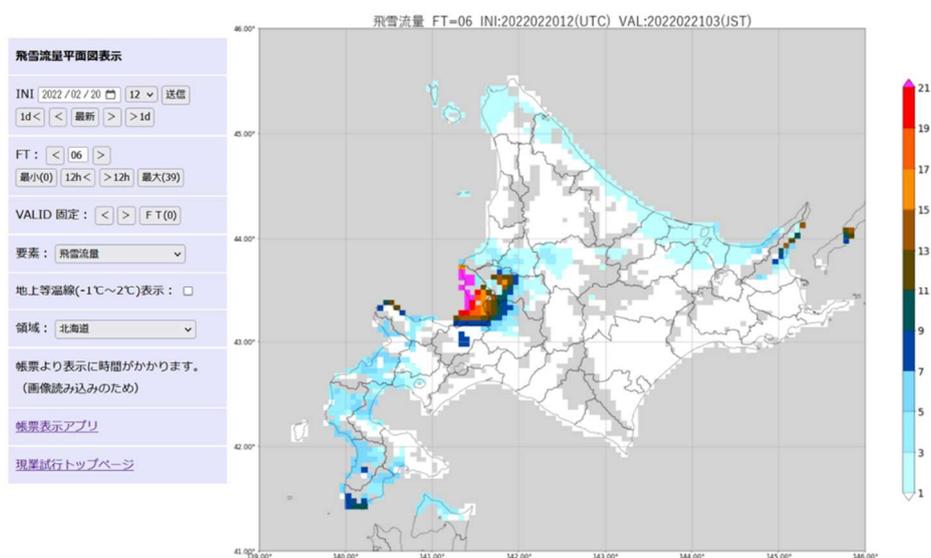
飛雪流量平面図の例として、初期値時刻 2022 年 2 月 20 日 12UTC、2022 年 2 月 21 日 3 時（FT = 6 h）の飛雪流量平面図を第 5 図に示す。飛雪流量平面図についても、MSM の初期値ごとに 3 時間間隔で更新され、39 時間先までの 3 時間ごとの飛雪流量予想値を、水平格子間隔 5 km の色分け表示で確認できる。飛雪流量平面図では、飛雪流量値が大きく計算されている領域や飛雪流量値の面的な分布を一目で確認することができる。

飛雪流量平面図の UI では、画面左側に表示設定ボタンが配置されている。

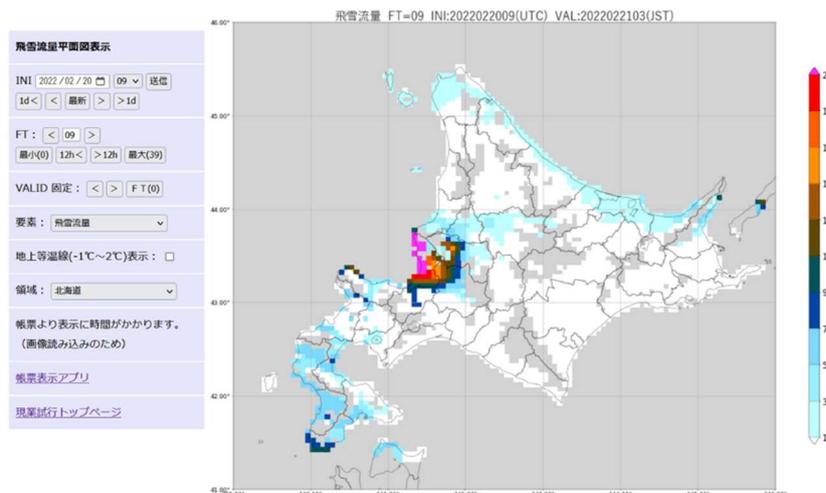
『INI』で初期値時刻を選択する。

『FT』で予報時間を選択する。

『VALID 固定』は複数の初期値による特定の時刻の予想を確認する際に利用する。第 6 図は、初



第 5 図 初期値時刻 2022 年 2 月 20 日 12UTC の MSM データから計算された 2022 年 2 月 21 日 03「JST」（予測時刻 6 時間（FT = 6 h））の飛雪流量平面図。



第 6 図 第 5 図と同様、ただし初期値時刻 2022 年 2 月 20 日 09UTC の MSM データから計算された 2022 年 2 月 21 日 03「JST」(FT = 9 h) の飛雪流量平面図について。

期値時刻 2022 年 2 月 20 日 09UTC (第 5 図の 3 時間前の初期値), FT = 9 h の MSM データから計算した 2022 年 2 月 21 日 3 時の飛雪流量予想値 (第 5 図と同じ時刻の予想値) である。『VALID 固定』を利用することで, MSM の予想資料が, 初期値ごとにどの程度変動しているかを把握できる。

『要素』のドロップダウンリストから表示する要素を変更できる。飛雪流量平面図は飛雪流量値以外にも, 飛雪流量の計算に利用する要素 (地上風速, 永井の式による風速, 前 1 時間降水量, バルクリチャードソン数) を表示可能な要素として搭載している。永井の式による風速は, 内陸の風速をより適切に予想するために導入したもので, バルクリチャードソン数と地表面粗度を用いた回帰式で作成する風速である (永井, 2008 ; 概要は付録 B を参照。永井 (2008) は最大瞬間風速の調査が主題となっているが, 平均風速についても調査が行われており, 本稿では平均風速を予想する回帰式を用いている。)。地上風速の平面図を作成するにあたって, 永井の式を適用できる条件 (バルクリチャードソン数の絶対値が 0.4 未満, MSM の予想地上風速 3 m s^{-1} 以上, 500 m 面風速 5 m s^{-1} 以上) を満たす格子には, 地上風速として永井の式による風速を採用し, 条件を満たさない格子には MSM の予想地上風速を採用することで地上風速の分布を作成している。飛雪流量の計算に利用する要素を飛雪流量の値と併せて確認する

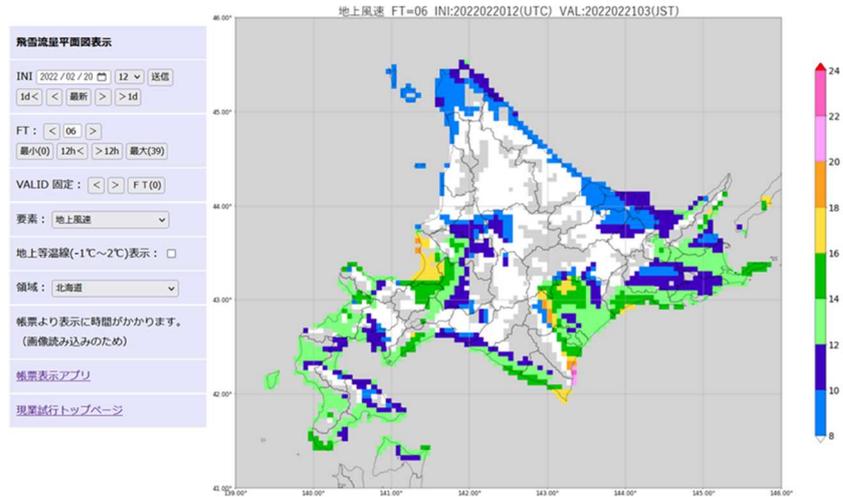
ことで, どの要素が飛雪流量に大きく寄与する予測となっているのか確認することが可能である。例として初期値時刻 2022 年 2 月 20 日 12UTC, FT = 6 h の地上風速の平面図を第 7 図, 永井の式による風速の平面図を第 8 図, 前 1 時間降水量の平面図を第 9 図に示す。

『地上等温線』のチェックボックスについては, MSM でマイナス $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ からプラス $2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ までの等温線の予想を図に重ねるものであり, 吹雪の危険度が高まりやすいかを推定する場合の参考資料である。また, 『領域』のドロップダウンリストでは, 石狩・空知・後志地方や北海道など, 表示する領域の変更が可能である。

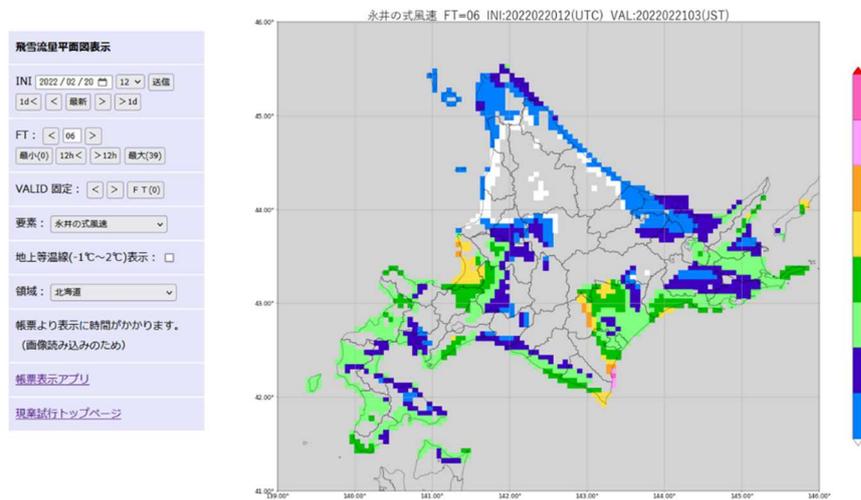
3. 飛雪流量アプリの利点

実際の吹雪事例を用いた事後検証による考察の前に, 飛雪流量アプリを活用した吹雪の危険度予測を予報作業に取り込むことによる利点を 3 点挙げる。

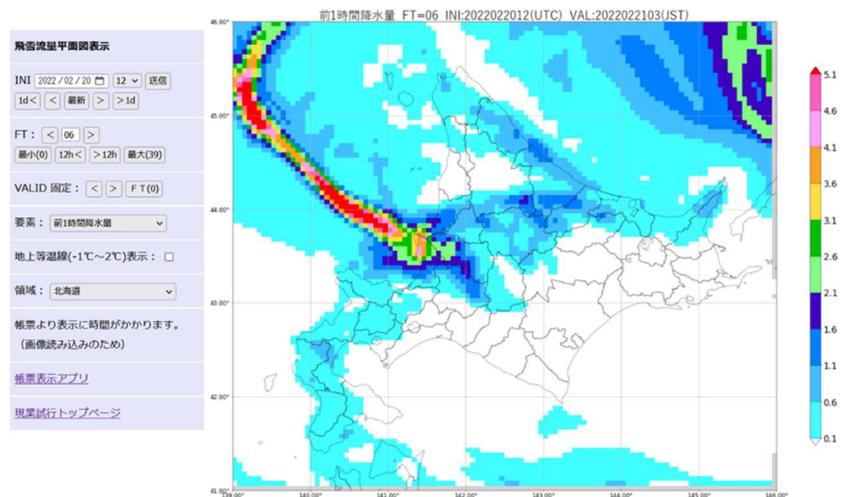
まず 1 つ目は, 吹雪の危険度の高まりを容易かつ確実に把握できることである。現状の予報作業においては, 吹雪の危険度が高まっている地域を特定するために地域気象観測システム (以下, アメダスと表記する) の風速や降水量, 気温などを確認する必要がある。例として, 2022 年 2 月 21 日 3 時のアメダスデータを第 10 図に示す。これらそれぞれの要素は分布を持って時々刻々と変



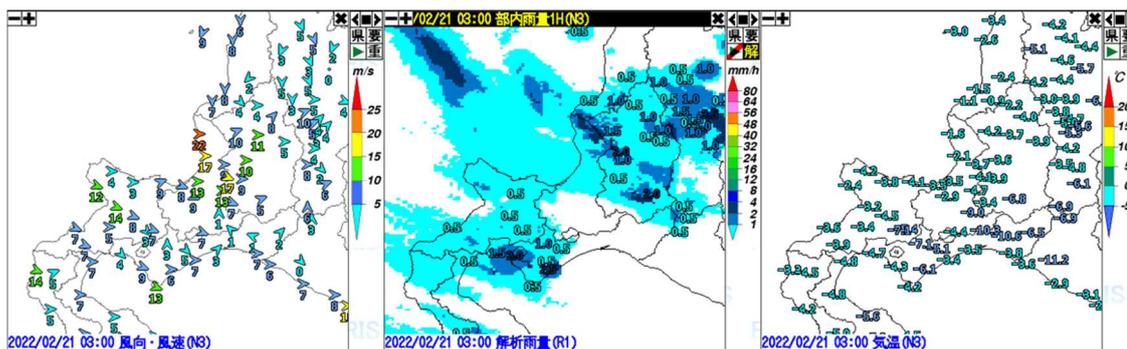
第 7 図 第 5 図と同様，ただし地上風速について．地上風速の単位は m s^{-1} ．



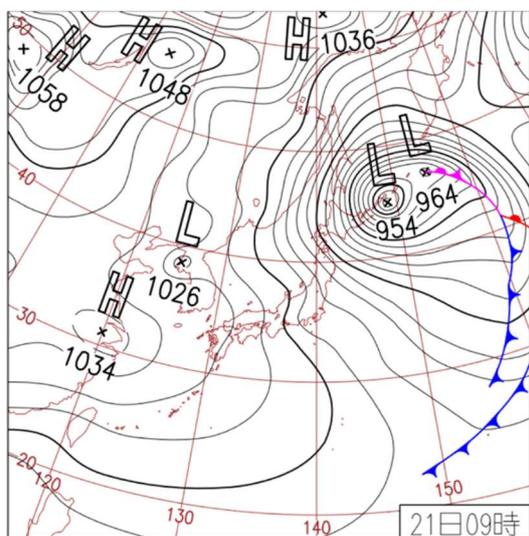
第 8 図 第 5 図と同様，ただし永井の式による風速について．地上 10 m 風速の単位は m s^{-1} ．永井（2008）の非線形重回帰分析の回帰式から求めている．



第 9 図 第 5 図と同様，ただし前 1 時間降水量について．単位は mm h^{-1}



第 10 図 2022 年 2 月 21 日 3 時のアメダス等による観測値 ((左) 風向・風速, (中) 1 時間解析雨量にアメダスの 1 時間降水量を重ねた図, (右) 気温)。



第 11 図 2022 年 2 月 21 日 9 時の地上天気図

化する。吹雪の危険度が高まっている地域を判断するためには複数の要素を予報現業者の頭の中で重ねて状況をイメージする必要がある。しかし飛雪流量平面図を利用することで、吹雪の危険度が高まっている地域を一目で、客観的に確認することができるようになる (第 5 図参照)。

2 つ目の利点としては、吹雪の危険度予測の精度が高まる可能性があることが挙げられる。稲飯ほか (2023) において、飛雪流量による吹雪の危険度予測は、普段の予報作業で利用される MSM 最大風速ガイダンスの風速予想による吹雪災害の予測よりも精度が高いと評価されている。

3 つ目の利点としては、開発言語を python にしてプログラムをモジュール化して管理しているため、アップデートや仕様の変更が比較的容易であることも挙げられる。この利点を生かして、稲

飯ほか (2023) によって石狩・空知・後志地方のみを対象に行われた飛雪流量による吹雪災害の予測精度検証を、北海道全域を対象にした精度検証へと拡張し、さらに本稿で紹介している飛雪流量アプリを全道の予報現業に展開するプロジェクトが進行中である。

4. 飛雪流量アプリによる吹雪の危険度予測事例

飛雪流量アプリを用いた予報作業の事後検証として、2022 年 2 月 21 日の暴風雪災害と 2022 年 2 月 28 日の事例を対象に飛雪流量による吹雪の危険度予測について考察を行った。その結果を以下に紹介する。飛雪流量の閾値は、稲飯ほか (2023) において、FLV2 の 6 から 8 を用いることで吹雪災害の予測精度が高いことが示されている。本稿では FLV2 の飛雪流量値 7 を目安とした。

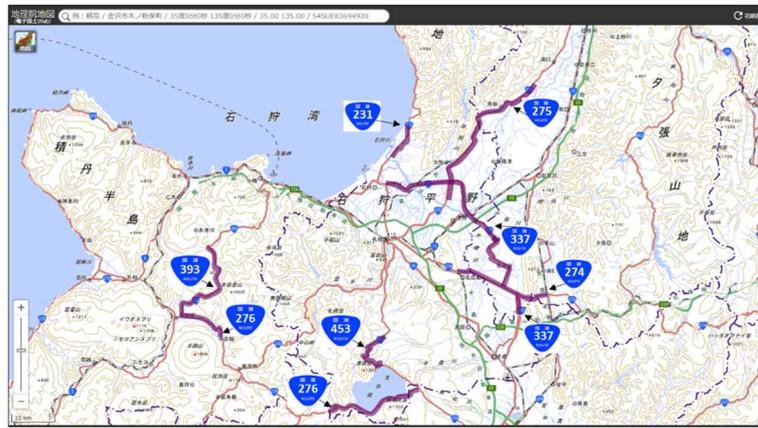
4.1 2022 年 2 月 21 日の暴風雪災害

4.1.1 気象状況と被害の経過

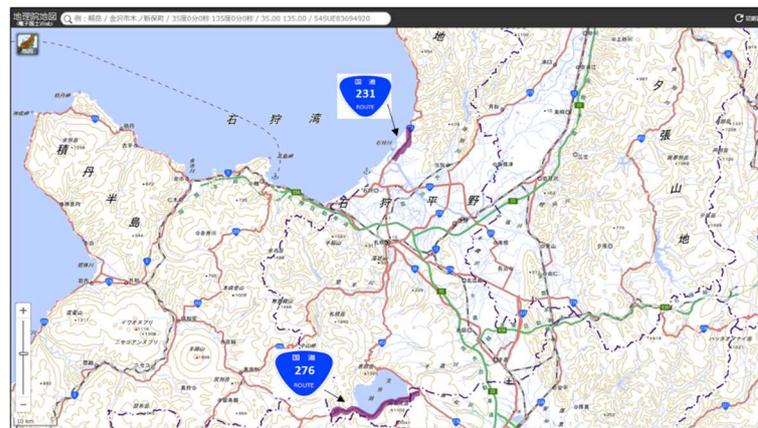
第 11 図に 2022 年 2 月 21 日 9 時の地上天気図を示す。2022 年 2 月 21 日は、石狩・空知・後志地方では千島近海に進んだ低気圧の後面となり気圧の傾きが大きく、北西の強風が吹きやすい気圧配置であった。当日は JR の札幌圏終日運転見合わせや、国道や道道、高速道路等の複数区間で通行止めが発生する交通障害が発生した。石狩・空知・後志地方における 21 日に発生した国道の通行止め区間全てを第 12 図に、同じく 21 日 3 時、6 時、10 時、15 時時点における通行止め区間を第

13 図, 第 14 図, 第 15 図, 第 16 図にそれぞれ示す. 第 12 図から 21 日に石狩平野を中心に複数の国道で通行止めが発生したことがわかる. 以下の節では 21 日の 3 時時点, 6 時時点, 10 時時点,

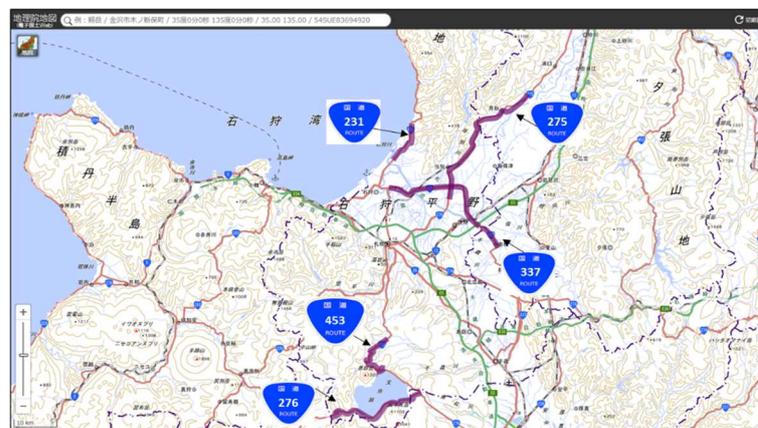
15 時時点と時間を追って通行止めの発生と飛雪流量予測の推移を対比させながら吟味していく.



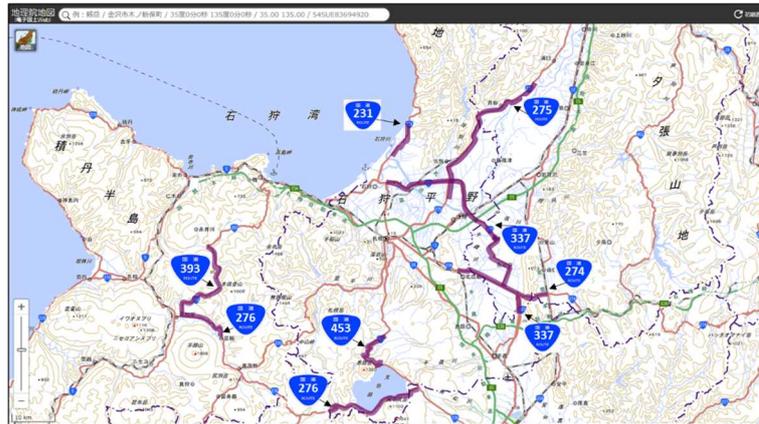
第 12 図 2022 年 2 月 21 日に石狩・空知・後志地方で発生した国道の通行止め区間 (紫太線). 地理院地図に重ね合わせて作成した.



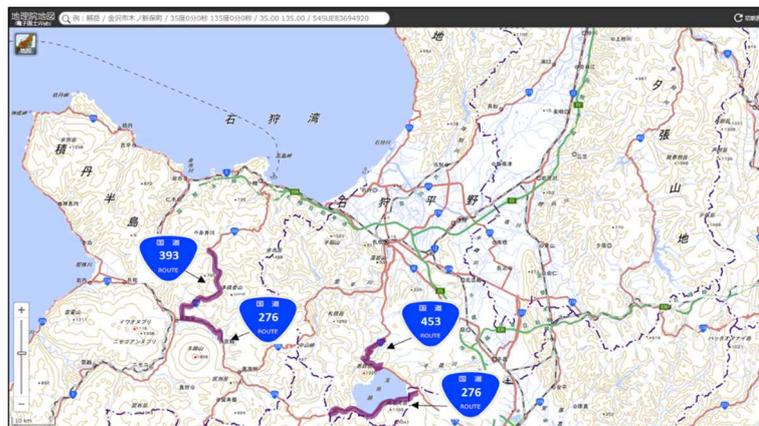
第 13 図 第 12 図と同様, ただし 2022 年 2 月 21 日 3 時時点について. 地理院地図に重ね合わせて作成した.



第 14 図 第 12 図と同様, ただし 2022 年 2 月 21 日 6 時時点について. 地理院地図に重ね合わせて作成した.



第 15 図 第 12 図と同様，ただし 2022 年 2 月 21 日 10 時時点について．地理院地図に重ね合わせて作成した．



第 16 図 第 12 図と同様，ただし 2022 年 2 月 21 日 15 時時点について．地理院地図に重ね合わせて作成した．

4.1.2 飛雪流量アプリによる予測可能性

初めに，飛雪流量帳票(第 4 図，初期値時刻 2022 年 2 月 20 日 12UTC，FLV2)を確認する．第 4 図では，21 日 3 時から 6 時にかけて飛雪流量値のピークが予想されている．また，その後も石狩地方では 21 日 18 時まで吹雪の危険度が高いと予測している．21 日 0 時から 12 時までの飛雪流量値 7 以上が予測された地域の推移に注目すると，まず石狩北部で飛雪流量=7.2 という予想が立ち，その後 3 時にかけて中空知，南空知に，さらに 6 時にかけて石狩中部，後志北部，後志西部へと飛雪流量値 7 以上の地域が拡大していることが確認できる．あわせて国道の通行止め状況を確認すると，21 日 3 時に石狩北部の国道 231 号で通行止めが発生し(第 13 図)，21 日 6 時には石狩中部と中空知，南空知に拡大し(第 14 図)，その後 21 日 10 時までに後志北部から羊蹄山麓でも通行止めが

発生している(第 15 図)．このように飛雪流量値 7 以上の地域の推移と国道の通行止め発生状況はおおむね一致しており，「市町村等をまとめた地域」の空間スケールで見ると飛雪流量によって吹雪の危険度の高まりを適切に予測できていたと言える．さらに，この 21 日 0 時以降の吹雪の危険度の高まりはもっと早い段階から予測されていたことが飛雪流量アプリで確認できる．初期値時刻 2022 年 2 月 19 日 03UTC の飛雪流量帳票(第 17 図，FLV2)では，FT=36h の 21 日 0 時に複数の地域で暴風雪警報の目安である 7 を超過する飛雪流量値を予想している．その後の初期値でも安定して飛雪流量値の目安を超過する予想がされていたため，飛雪流量は暴風雪の早期注意情報(警報級の可能性)[中]を予想する際の参考資料として活用できる可能性があると言える．このように全体的に見て，飛雪流量アプリを活用するこ

とで吹雪の危険度の高まりを効果的に把握できたと言える一方で、細かい点に注目すると見逃しや空振りと判断され得る部分も確認できる。例えば、21日6時時点の国道の通行止め発生状況を見ると、石狩南部の国道453号、国道276号で通行止めとなっているが、初期値時刻2022年2月20日12UTCの帳票(第4図)を確認すると飛雪流量の予測値は7未満にとどまっている。確かに、同初期値時刻の飛雪流量平面図(第18図, FT=9h)で見ても、これらの道路近傍の石狩南部支笏湖付近における飛雪流量の予測値は7未満であることが確認でき、飛雪流量=7を閾値とした場合は見逃しとなる。これらの国道は山間部に位置しており、地形による局地的な風雪の強まりや吹き溜りの発生があった可能性がある。ただ、別の初期値時刻の飛雪流量平面図(第19図, 初期値時刻2022年2月20日09UTC, FT=12h)を確認すると、21日6時に石狩南部支笏湖付近の同じ格子で飛雪流量7以上の値が予想されており、初期値時刻2022年2月20日12UTCによる見逃しは初期値のバラツキとも考えられる。例えば将来的にメソアンサンブルデータを本アプリに取り入れることで、このような見逃しを低減できる可能性がある。

また空振りについては、21日15時時点の国道

の通行止め状況(第16図)で示すように、同日10時(第15図)に発生していた石狩北部・中部から空知南部にかけての通行止めは解消されているにもかかわらず、21日15時の飛雪流量平面図(第20図, 初期値時刻2022年2月20日12UTC, FT=18h)によると、飛雪流量値は依然として21日6時と同様に石狩平野付近で7を超える値が予測されている。飛雪流量=7を閾値とした場合は空振りということになる。当時の実況を21日15時のアメダスデータ(第21図)から推察する。第21図左パネルに示したアメダス風速を見ると、石狩・空知地方の沿岸部で13 m s⁻¹程度、内陸部も含めて複数の地点で10 m s⁻¹以上の風速が観測されている。またアメダスの1時間降水量(第21図中パネル)を見ると広く0.5 mm h⁻¹が観測され、解析雨量では1 mm h⁻¹を超える領域がある。石狩北部・中部から空知南部にかけての気温(第21図右パネル)は氷点下2℃前後であるため、降雪があったと判断できる。これらの実況と、飛雪流量値を求めるために使用している地上風速、前1時間降水量の予測値とを比較するため、初期値時刻2022年2月20日12UTC, FT=18h(21日15時)の地上風速予測を第22図に、1時間降水量の予測を第23図に示す。第22図を見ると、石狩平野付近においては14 m s⁻¹-16 m s⁻¹の地上風速が予想

表示する細分

二府県 府県 1次細分 市町村等まとめた地域

表示するFLV

なし (FLV0) 上位5% (FLV0.5) 上位10% (FLV1) 上位20% (FLV2)

表示領域 (市町村等まとめた区域の場合のみで機能)

全道 網走・稚内 釧路・帯広 札幌・旭川 室蘭・函館 稚内 旭川 網走 釧路 帯広 室蘭 札幌 函館

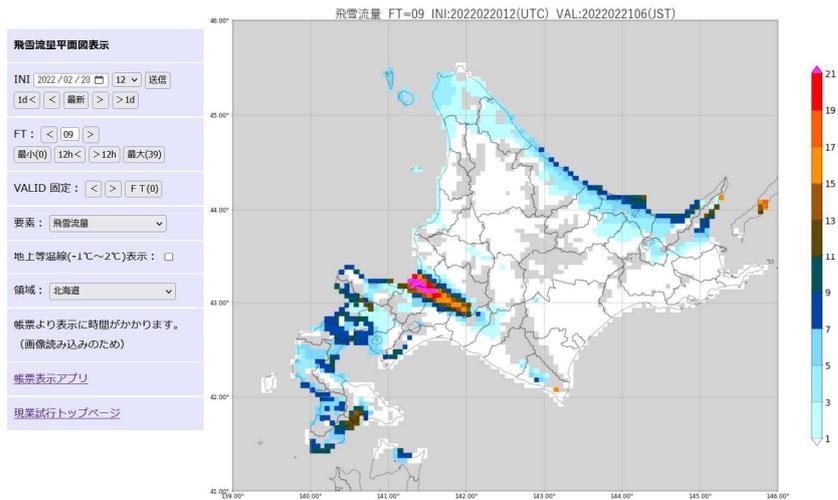
2022/02/19 03 送信 < 最新 >

初期値 2022-02-19 03UTC

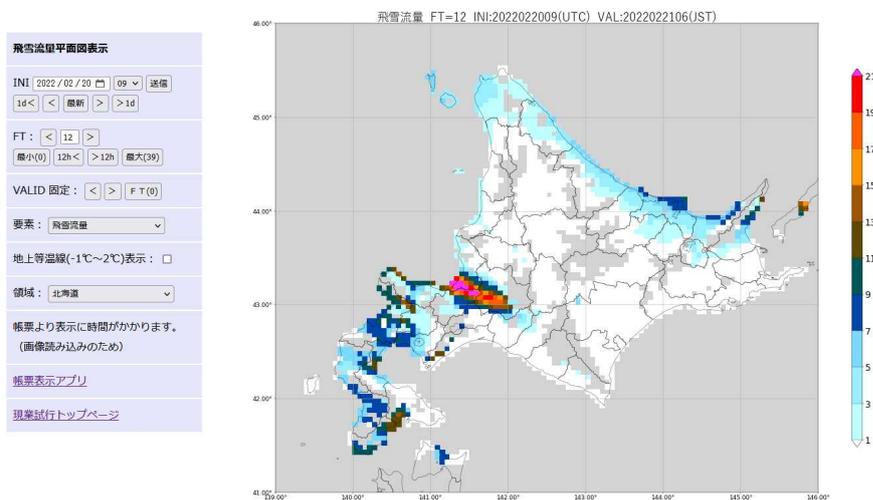
実況値(解析値)優先

| 予報時間 | 00 | 03 | 06 | 09 | 12 | 15 | 18 | 21 | 24 | 27 | 30 | 33 | 36 | 39 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 対象時刻(JST) | 19/12 | 19/15 | 19/18 | 19/21 | 20/00 | 20/03 | 20/06 | 20/09 | 20/12 | 20/15 | 20/18 | 20/21 | 21/00 | 21/03 |
| 石狩北部 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.2 | 0.4 | 2.9 | 0.3 | 0.9 | 0.0 | 1.4 | 2.4 | 4.2 | 13.3 | 0.2 |
| 石狩中部 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.4 | 3.1 | 1.0 | 0.3 | 0.0 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 7.1 | 4.6 |
| 石狩南部 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.6 | 4.1 | 1.5 | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 3.3 |
| 北空知 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.8 | 0.6 | 0.4 | 0.1 | 0.1 | 0.3 | 0.1 |
| 中空知 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 1.0 | 0.8 | 0.7 | 0.1 | 0.9 | 3.6 | 0.2 |
| 南空知 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.2 | 2.5 | 0.9 | 1.2 | 0.3 | 0.5 | 0.2 | 1.1 | 0.4 | 0.2 |
| 後志北部 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.2 | 0.2 | 0.4 | 1.4 | 0.2 | 0.4 | 1.1 | 1.3 | 2.8 | 22.1 | 2.8 |
| 羊蹄山麓 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 0.5 | 1.6 | 0.2 | 0.1 | 0.5 | 1.7 | 2.3 | 5.2 | 7.9 |
| 後志西部 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 1.5 | 2.2 | 1.3 | 1.4 | 0.0 | 0.2 | 1.4 | 2.9 | 7.2 | 22.2 | 26.9 |

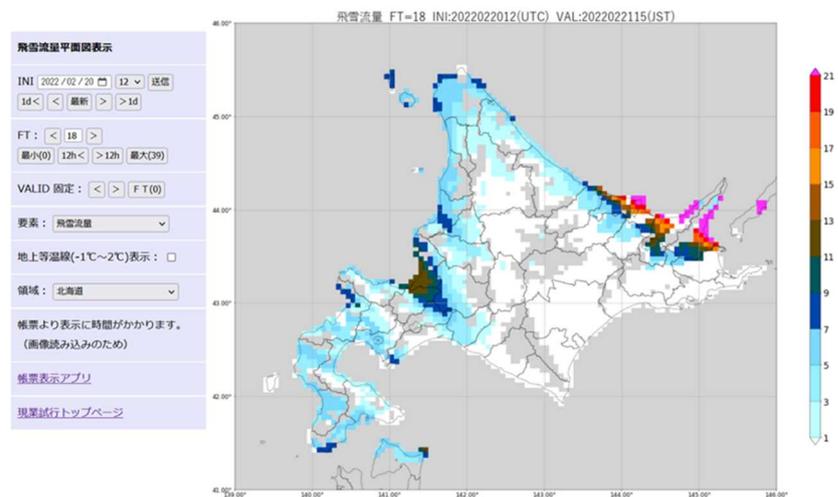
第17図 第4図と同様、ただし初期値時刻2022年2月19日03UTCのMSMから計算された飛雪流量。



第 18 図 第 5 図と同様、ただし、2022 年 2 月 21 日 06「JST」(FT = 9 h) の飛雪流量平面図。



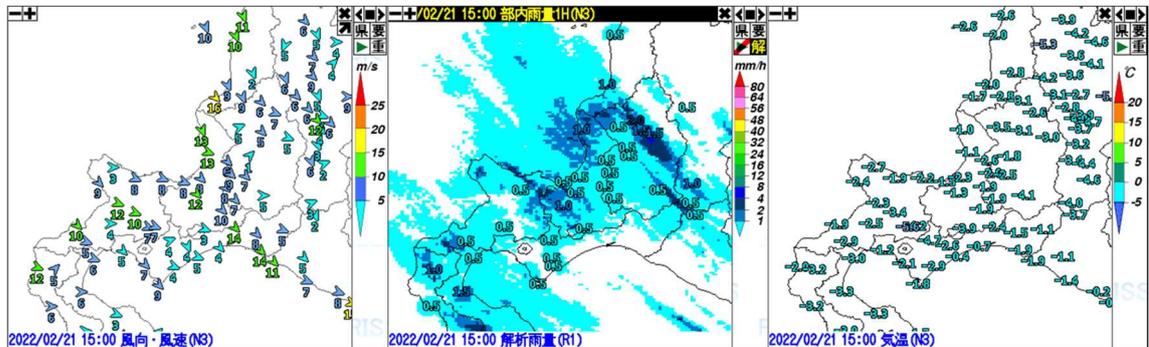
第 19 図 第 5 図と同様、ただし、初期値時刻 2022 年 2 月 20 日 09UTC の MSM から計算された、2022 年 2 月 21 日 06「JST」(FT = 12 h) の飛雪流量平面図。



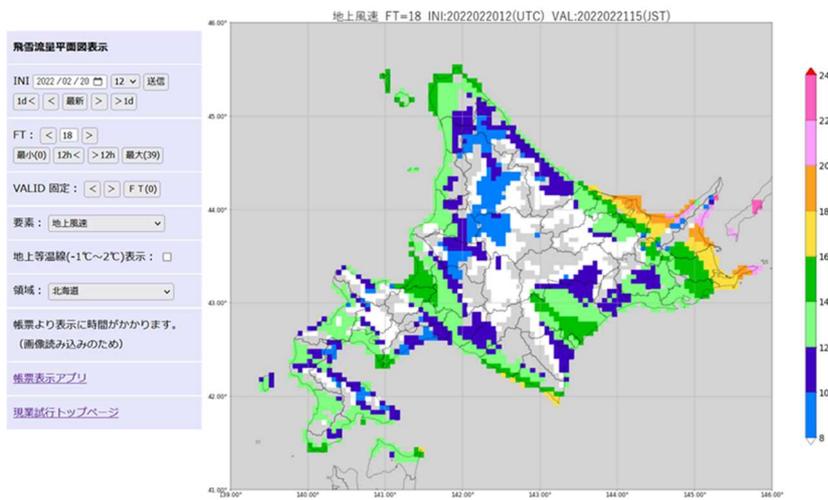
第 20 図 第 5 図と同様、ただし、初期値時刻 2022 年 2 月 20 日 12UTC の MSM から計算された、2022 年 2 月 21 日 15「JST」(FT = 18 h) の飛雪流量平面図。

されている。第 21 図のアメダスの風速と比較するとやや過大な値であると言える。1 時間降水量の予測 (第 23 図) は、石狩・空知地方においてはおおむね 1 mm h^{-1} 前後となっており、第 21 図の

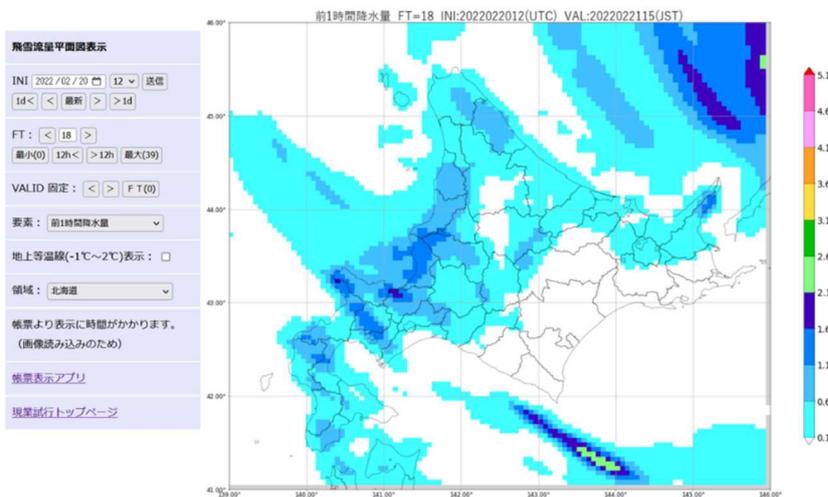
1 時間解析雨量との差は小さいと言える。これらを踏まえると、ピークは過ぎたものの実況でも注意報基準 (風速 11 m s^{-1}) 程度の吹雪は継続していたと考えられるが、飛雪流量の予測は実況に比べ



第 21 図 第 10 図と同様、ただし 2022 年 2 月 21 日 15 時時点について。



第 22 図 第 5 図と同様、ただし、初期値時刻 2022 年 2 月 20 日 12UTC の MSM から計算された、2022 年 2 月 21 日 15 「JST」 (FT = 18 h) の地上風速について。



第 23 図 第 5 図と同様、ただし、初期値時刻 2022 年 2 月 20 日 12UTC の MSM から計算された、2022 年 2 月 21 日 15 「JST」 (FT = 18 h) の前 1 時間降水量について。

てやや過大であった可能性がある。このようなケースもメソアンサンブルデータを利用することによって、今後改善できるかもしれない。

4.1.3 MSM 最大風速ガイダンスとの比較

稲飯ほか (2023) では MSM 最大風速ガイダンスの風速を用いて、風速基準のみで吹雪の危険度を予測するよりも、飛雪流量を活用することで、より高い精度で吹雪の危険度予測ができる可能性が示された。飛雪流量帳票 (第 4 図, 初期値時刻 2022 年 2 月 20 日 12UTC, FLV2) と同じ初期時刻の最大風速ガイダンスを第 24 図に示す。第 24 図を見ると、石狩・空知・後志地方における暴風雪警報の基準 (第 1 表) である「10 分間平均風速が 16 m s^{-1} (札幌管区気象台の観測値は 18 m s^{-1} を目安とする) 以上」を満たしているのは石狩北部のアメダスである浜益, 厚田, 新篠津の 3 地点

のみである。予想誤差を考慮して暴風雪警報の基準の 9 割程度で考えた場合は江別 (石狩中部), 千歳 (石狩南部), 共和 (後志西部) も暴風雪警報発表の対象となる。最大風速ガイダンスの風速予想のみでは空知地方で吹雪の危険度が高まる可能性を予測できていなかった。一方で、飛雪流量では吹雪の危険度の高まりを予測できていたので、空知地方については飛雪流量の方が適切であったと言える。また、飛雪流量と MSM 最大風速ガイダンスは同じ MSM データから計算されているため、21 日 15 時の浜益の 15.3 m s^{-1} 予想など、石狩北部の予想風速が第 21 図の風速と比べて過大な傾向も同様に表れていることがわかる。これらのことから 2022 年 2 月 21 日の災害事例については、MSM 最大風速ガイダンスよりも飛雪流量の方が適切に吹雪の危険度予測ができていたと考えられる。

| 番号 | 地点名 | 20日(JST) | | 21日(JST) | | | | | | |
|-------|------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | 21-24 | 00-03 | 03-06 | 06-09 | 09-12 | 12-15 | 15-18 | 18-21 | 21-24 |
| 14026 | 浜益 | 16.0WNW | 21.6 W | 9.5 NW | 9.9 NNW | 12.9 NW | 15.3 NW | 13.1 NW | 11.7 NW | 11.5 NNW |
| 14071 | 厚田 | 14.4 WNW | 17.2 W | 17.2 W | 6.8 NW | 11.8 NW | 12.2 WNW | 11.6 WNW | 10.9 WNW | 8.5 WNW |
| 14101 | 新篠津 | 13.7 W | 15.7 W | 16.6 W | 8.9 NW | 11.6 NW | 11.4 NW | 8.5 NW | 8.3 NW | 6.3 NW |
| 14121 | 石狩 | 12.5 W | 13.2 W | 14.7 W | 9.0 WNW | 10.7 NW | 10.5 NW | 11.0 NW | 9.6 WNW | 8.8 NW |
| 14116 | 山口 | 8.8 WNW | 9.2 W | 10.6 WNW | 9.1 WNW | 12.2 NNW | 12.3 NW | 11.4 NW | 10.2 NW | 10.0 NW |
| 14136 | 江別 | 11.6 WNW | 13.6 W | 15.5 WNW | 8.6 NW | 10.8 NW | 10.4 NW | 9.3 NW | 9.6 NW | 7.7 NNW |
| 14163 | 札幌* | 9.3 WNW | 11.6 WNW | 12.3 WNW | 10.6 WNW | 15.9 NNW | 13.4 NW | 12.8 NW | 12.7 NW | 11.4 NW |
| 14206 | 恵庭島松 | 5.6 NW | 6.1 WNW | 9.5 WNW | 7.5 NW | 11.1 NNW | 10.9 NW | 11.0 NW | 9.2 NW | 8.4 NW |
| 14286 | 支笏湖畔 | 4.9 WNW | 7.8 W | 8.5 W | 6.5 W | 4.5 WNW | 4.6 WNW | 4.5 WNW | 4.7 WNW | 4.7 WNW |
| 14296 | 千歳 | 7.0 NW | 3.6 WNW | 9.7 NW | 10.1 NW | 15.3 NNW | 13.5 NW | 13.5 NW | 12.3 NW | 10.0 NW |
| 15116 | 石狩沼田 | 11.3 WNW | 12.0 W | 5.1 NW | 9.4 NW | 11.4 NW | 11.3 NW | 9.7 NW | 6.2 NW | 7.0 NW |
| 15161 | 深川 | 8.7 SW | 9.3 SW | 4.7 W | 6.4 NW | 7.9 WNW | 8.7 NW | 9.4 WNW | 5.9 WNW | 5.2 WNW |
| 15231 | 空知吉野 | 7.8 WSW | 10.5 WSW | 2.8 WSW | 2.4 WSW | 2.9 WSW | 3.6 WSW | 3.7 W | 3.6 WSW | 2.5 WSW |
| 15241 | 滝川 | 7.9 WSW | 11.1 WSW | 7.2 NNW | 6.8 NNW | 10.8 NNW | 11.2 NNW | 8.9 NNW | 6.9 NNW | 7.7 NNW |
| 15251 | 芦別 | 5.1 W | 5.5 W | 5.1 WNW | 5.5 NW | 6.9 NW | 7.5 NW | 6.7 NW | 5.1 WNW | 6.0 WNW |
| 15311 | 月形 | 6.6 W | 9.2 W | 10.0 W | 4.8 NW | 9.4 NW | 8.6 NW | 7.4 NW | 6.0 NW | 4.0 NW |
| 15321 | 美唄 | 7.4 WSW | 12.4 W | 14.0 WSW | 3.2 NW | 10.7 NW | 10.1 NW | 7.3 NW | 4.5 NW | 3.6 NW |
| 15356 | 岩見沢* | 8.5 W | 12.1 W | 13.0 W | 5.3 NNW | 9.9 NNW | 11.9 NW | 9.5 NW | 7.8 NW | 5.5 NNW |
| 15431 | 長沼 | 7.2 WNW | 6.3 WNW | 8.6 NW | 6.5 NW | 9.7 NNW | 11.1 NW | 9.3 NW | 8.5 NW | 7.5 NNW |
| 15442 | 夕張 | 5.4 W | 6.2 WSW | 6.8 WSW | 3.0 W | 4.4 WNW | 5.4 W | 4.9 W | 4.1 W | 3.5 WNW |
| 16026 | 美幌 | 4.5 W | 7.0 W | 7.2 W | 6.1 W | 4.6 NW | 4.8 WNW | 3.7 WNW | 4.0 W | 3.8 W |
| 16061 | 神恵内 | 10.6 NW | 12.8 WNW | 12.7 WNW | 13.9 WNW | 9.5 NW | 9.8 NW | 9.4 NW | 7.4 NW | 7.3 NW |
| 16076 | 余市 | 4.0 WNW | 6.0 W | 5.1 W | 5.4 W | 8.8 NNW | 7.9 NNW | 7.3 NW | 4.9 WNW | 4.3 WNW |
| 16091 | 小樽* | 8.7 W | 9.7 WSW | 11.2 W | 11.3 WSW | 8.2 NW | 8.2 WNW | 7.7 WNW | 8.4 WNW | 8.3 W |
| 16156 | 共和 | 14.7 NW | 14.8 WNW | 15.5 WNW | 15.7 WNW | 10.9 NW | 14.4 NW | 13.6 WNW | 10.6 NW | 11.6 NW |
| 16206 | 蘭越 | 4.9 W | 7.8 W | 8.1 W | 8.2 W | 5.6 WNW | 6.4 W | 5.7 W | 4.3 W | 4.8 W |
| 16217 | 倶知安* | 10.3 WNW | 12.3 W | 13.4 WNW | 11.8 WNW | 10.6 NW | 12.8 NW | 12.0 WNW | 9.5 NW | 8.5 NW |
| 16252 | 寿都* | 12.0 NW | 10.2 NW | 11.7 NW | 12.3 NW | 13.6 NW | 12.7 NW | 11.0 NW | 10.6 NW | 10.1 NW |
| 16281 | 真狩 | 4.5 NW | 5.5 WNW | 5.4 WNW | 6.7 WNW | 6.6 NW | 7.3 NW | 7.5 NW | 5.8 NW | 4.2 NW |
| 16286 | 喜茂別 | 5.8 WNW | 7.2 W | 8.7 W | 8.3 W | 8.2 WNW | 8.2 WNW | 7.3 WNW | 5.9 WNW | 5.6 WNW |
| 16321 | 黒松内 | 6.6 NW | 7.0 NW | 8.6 NW | 9.0 WNW | 9.5 NW | 7.7 NW | 7.3 NW | 6.7 NW | 6.7 NW |

第 24 図 北海道石狩・空知・後志地方における、初期値時刻 2022 年 2 月 20 日 12UTC の MSM 最大風速ガイダンスの予想風速。単位は m s^{-1} 。

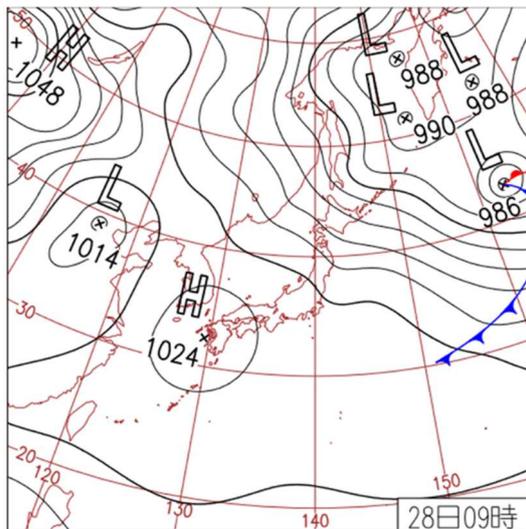
第 1 表 北海道石狩・空知・後志地方における警報・注意報発表基準一覧表
(https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kijun/sapporo/0_sapporo.pdf より).

警報・注意報発表基準一覧表

(札幌管区気象台管内) 令和5年6月8日現在

| 発表官署 | | 札幌管区気象台 | | | | | | | | | | |
|--------------------|--|---|--|------|------|----------------------|-----|------|----------------------------------|----------------------|--|--|
| 府県予報区 | | 石狩・空知・後志地方 | | | | | | | | | | |
| 一次細分区域 | | 石狩地方 | | | 空知地方 | | | 後志地方 | | | | |
| 市町村等までの地域 | | 石狩北部 | 石狩中部 | 石狩南部 | 北空知 | 中空知 | 南空知 | 後志北部 | 後志西部 | 平陸山麓 | | |
| 警 | 大雨 | 区域内の市町村で別表1の基準に到達することが予想される場合 | | | | | | | | | | |
| | 洪水 | 区域内の市町村で別表2の基準に到達することが予想される場合 | | | | | | | | | | |
| | 強風(平均風速) | 陸上 18m/s、海上 25m/s | 18m/s** | | | 18m/s | | | 陸上 18m/s、海上 25m/s | 18m/s | | |
| | 暴風(平均風速) | 陸上 18m/s、海上 25m/s 雪による視程障害を伴う | 18m/s** 雪による視程障害を伴う | | | 18m/s 雪による視程障害を伴う | | | 陸上 18m/s、海上 25m/s 雪による視程障害を伴う | 18m/s 雪による視程障害を伴う | | |
| | 大雪 | 12時間降雪の深さ50cm | 平地 8時間降雪の深さ30cm あるいは 12時間降雪の深さ40cm 山麓部 12時間降雪の深さ50cm | | | 12時間降雪の深さ50cm | | | | | | |
| 波浪(有義波高) | 6.0m | 6.0m | | | | | | | | | | |
| 高潮 | 区域内の市町村で別表5の基準に到達することが予想される場合 | | | | | | | | | | | |
| 注 | 大雨 | 区域内の市町村で別表3の基準に到達することが予想される場合 | | | | | | | | | | |
| | 洪水 | 区域内の市町村で別表4の基準に到達することが予想される場合 | | | | | | | | | | |
| | 強風(平均風速) | 陸上 13m/s、海上 15m/s | 13m/s** | | | 12m/s | | | 陸上 13m/s、海上 15m/s | 13m/s | | |
| | 暴風(平均風速) | 陸上 11m/s、海上 15m/s 雪による視程障害を伴う | 11m/s** 雪による視程障害を伴う | | | 10m/s 雪による視程障害を伴う | | | 陸上 11m/s、海上 15m/s 雪による視程障害を伴う | 11m/s 雪による視程障害を伴う | | |
| | 大雪 | 12時間降雪の深さ30cm | 平地 12時間降雪の深さ20cm、 山麓部 12時間降雪の深さ30cm | | | 12時間降雪の深さ30cm | | | | | | |
| 波浪(有義波高) | 3.0m | 3.0m | | | | | | | | | | |
| 高潮 | 区域内の市町村で別表5の基準に到達することが予想される場合 | | | | | | | | | | | |
| 寒 | 霜 | 霜害等により被害が予想される場合 | | | | | | | | | | |
| | 融雪 | 70mm以上、24時間雨量と融雪量(積雪水量)の合計 200m | | | | | | | | | | |
| | 凍結(凍程) | 陸上 200m、海上 500m | 200m | | | 200m | | | 陸上 200m、海上 500m | 200m | | |
| | 乾燥 | 最小湿度30%、実効湿度60% | | | | | | | | | | |
| | なだれ | ①24時間降雪の深さ30cm以上 ②積雪の深さ50cm以上で、日平均気温5℃以上 | | | | | | | | | | |
| 低温 | 5月～10月(平均気温)年平均5℃以上低い日が2日以上継続 11月～4月(最低気温)年平均5℃以上低い | | | | | | | | | | | |
| 霜 | 最低気温3℃以下 | | | | | | | | | | | |
| 雪氷 | 融けず氷・水温4℃以下 風速-5℃以下で風速8m/s以上 | 融けず氷・水温4℃以下 風速-5℃以下で風速8m/s以上 | | | | | | | | | | |
| 霧雪 | 風速0℃以下で、強度以上の雪が数時間以上継続 | | | | | | | | | | | |
| 記録的短時間大雨情報(12時間雨量) | | 100mm | | | | | | | 80mm | | | |

**札幌管区気象台の観測値は20m/sを目安とする。
*札幌管区気象台の観測値は18m/sを目安とする。
*札幌管区気象台の観測値は15m/sを目安とする。
*札幌管区気象台の観測値は13m/sを目安とする。



第 25 図 第 11 図と同様、ただし 2022 年 2 月 28 日 9 時時点について。

4.1.4 2022 年 2 月 21 日の事例のまとめ

2022 年 2 月 21 日の暴風雪事例は、飛雪流量アプリを活用することで吹雪の危険度の高まりを効果的に把握することができ、警報など防災気象情報の発表にアプリを有効に利用できるケースであったと考えられる。特に、21 日 3 時から 12 時にかけての吹雪の強まりは初期時刻 2022 年 2 月 19 日 03UTC の FT=36h でも予想されており、早期注意情報(警報級の可能性)の適切な運用に

も寄与できる可能性を示すことができた。一方で細かい点に注目すると見逃しや空振りと判断され得るケースも含まれていた。個々の災害全てを一律の目安で予測することは原理的に不可能であるが、将来的にはメソアンサンプルデータの活用などで改善できるかもしれない。また、MSM 最大風速ガイダンスのみでは吹雪の危険度の高まりと通行止めの発生を予測できなかった空知地方でも、飛雪流量アプリでは暴風雪警報の発表の目安を超える予想がなされており、MSM 最大風速ガイダンスよりも適切な吹雪の危険度予測であったと言える。

4.2 2022 年 2 月 28 日の事例

4.2.1 気象状況と被害の経過

2022 年 2 月 28 日 9 時の地上天気図を第 25 図に示す。石狩・空知・後志地方は冬型の気圧配置で、北西の強風が吹きやすい気圧配置であったことがわかる。しかし、この事例は 2022 年 2 月 21 日の天気図(第 11 図)と比較すると等圧線の間隔は広く、4.1 節の事例ほどの吹雪現象とはならなかった。当日は国道・道道の通行止めは実施されていない。

4.2.2 飛雪流量アプリと MSM 最大風速ガイダ ンスの比較

2022 年 2 月 28 日の飛雪流量と MSM 最大風速ガイダ
ンスによる予想風速の比較を行う。まず、
初期値時刻 2022 年 2 月 27 日 06UTC の MSM 最
大風速ガイダンスを第 26 図に示す。第 26 図を見
ると、3 時-6 時に石狩北部の浜益で暴風雪警報の

発表基準を超える最大風速 16.1 m s^{-1} を予想して
いる。石狩・空知・後志地方は冬型の気圧配置で
降雪を伴う可能性が高く、暴風雪警報を対応する
かどうかの検討が必要な事例であると言える。そ
こで、石狩北部の暴風雪警報の要否を検討するた
めに、アメダスデータを確認する。当日浜益は 1
時 39 分に日最大風速 15.1 m s^{-1} を観測した。当該

| 番号 | 地点名 | 27日(JST) | | | 28日(JST) | | | | | | | 1日(JST) | | |
|-------|------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|
| | | 15-18 | 18-21 | 21-24 | 00-03 | 03-06 | 06-09 | 09-12 | 12-15 | 15-18 | 18-21 | 21-24 | 00-03 | 03-06 |
| 14026 | 浜益 | 10.6 WNW | 10.5 WNW | 10.6 WNW | 13.9 WNW | 16.1 WNW | 13.7 WNW | 11.6 WNW | 12.8 WNW | 12.6 WNW | 11.9 W | 11.8 W | 11.7 W | 9.7 W |
| 14071 | 厚田 | 8.8 WNW | 10.0 W | 9.4 W | 10.8 W | 12.0 WNW | 11.6 WNW | 11.7 WNW | 10.5 W | 11.5 W | 10.2 W | 9.3 W | 8.6 W | 7.3 W |
| 14101 | 新篠津 | 5.7 WNW | 4.7 W | 6.3 W | 10.1 W | 11.0 W | 11.1 W | 12.0 W | 11.5 WNW | 8.5 W | 4.5 WSW | 4.1 SSE | 3.6 S | 3.5 SSE |
| 14121 | 石狩 | 7.3 WNW | 6.4 W | 6.7 W | 8.9 W | 10.5 W | 9.2 WNW | 9.0 WNW | 8.3 WNW | 8.0 W | 4.4 W | 2.0 SW | 1.8 SSW | 1.6 S |
| 14116 | 山口 | 5.6 NW | 4.5 WNW | 4.4 WNW | 6.1 WNW | 7.4 WNW | 7.3 WNW | 7.7 WNW | 6.3 NW | 5.7 WNW | 4.3 WNW | 3.2 WNW | 3.2 WNW | 2.2 W |
| 14136 | 江別 | 5.2 NW | 3.3 WSW | 4.2 SW | 6.5 W | 8.6 WNW | 10.1 WNW | 8.9 WNW | 8.3 WNW | 5.8 WNW | 3.5 WSW | 3.8 S | 4.4 S | 3.0 SSE |
| 14163 | 札幌* | 7.2 NW | 2.8 SW | 2.8 SSW | 4.9 WNW | 6.3 WNW | 7.1 WNW | 8.0 NW | 8.1 NW | 6.1 WNW | 4.3 SSE | 3.3 S | 3.7 S | 3.5 S |
| 14206 | 恵庭島松 | 5.0 NNW | 2.1 SSW | 2.5 SW | 1.9 SW | 2.4 SW | 4.4 NW | 6.5 NW | 5.8 NW | 2.8 WNW | 2.4 SSW | 2.6 SSW | 2.3 SSW | 2.3 SSW |
| 14286 | 支笏湖畔 | 3.1 WNW | 2.5 W | 2.2 W | 4.1 W | 3.1 W | 2.9 WNW | 4.0 W | 3.7 W | 3.2 W | 2.6 W | 1.5 W | 1.8 W | 1.2 W |
| 14296 | 千歳 | 9.7 NNW | 3.2 WSW | 3.3 SSW | 4.5 SW | 5.1 SW | 3.6 NW | 7.4 NW | 7.7 NW | 4.8 NW | 4.0 SSW | 3.0 S | 4.2 SSE | 3.0 SE |
| 15116 | 石狩沼田 | 4.4 WNW | 3.5 SW | 3.1 SSW | 4.1 WSW | 6.5 W | 7.0 WNW | 6.9 WNW | 8.5 WNW | 5.9 W | 3.6 SW | 4.3 S | 4.2 S | 2.8 S |
| 15161 | 深川 | 5.2 W | 5.5 SW | 4.7 SW | 6.9 SSW | 7.4 SW | 8.2 WSW | 8.9 WSW | 8.6 WSW | 6.3 WSW | 5.0 SW | 6.0 SSW | 6.3 SSW | 5.3 SSW |
| 15231 | 空知吉野 | 2.6 WSW | 2.3 W | 2.2 W | 5.2 WSW | 4.7 WSW | 6.4 WSW | 6.0 WSW | 5.0 WSW | 4.1 WSW | 3.6 WSW | 2.7 WSW | 1.1 WNW | 1.4 W |
| 15241 | 滝川 | 4.3 WSW | 3.3 SSW | 3.3 SSW | 3.9 SW | 5.7 WSW | 5.0 WSW | 5.8 W | 6.3 W | 4.4 W | 3.4 SSW | 4.0 SSW | 4.2 S | 4.2 S |
| 15251 | 芦別 | 3.1 WNW | 2.0 W | 1.4 ESE | 2.7 ESE | 2.6 WNW | 3.6 WNW | 4.3 WNW | 5.4 WNW | 4.3 WNW | 2.2 WNW | 1.2 WSW | 1.4 ESE | 1.4 ESE |
| 15311 | 月形 | 3.6 WNW | 3.7 WNW | 3.7 W | 5.8 W | 6.0 W | 6.6 W | 5.9 WNW | 6.2 W | 4.9 W | 4.4 W | 4.5 WSW | 2.8 SSW | 1.7 S |
| 15321 | 美唄 | 3.7 W | 3.2 S | 3.4 SSE | 4.7 S | 3.8 WSW | 5.7 W | 8.4 W | 8.2 W | 6.5 W | 3.8 S | 5.2 S | 3.8 S | 3.2 S |
| 15356 | 岩見沢* | 4.5 NW | 2.7 SW | 4.0 S | 5.4 SSW | 5.5 W | 7.4 WNW | 7.4 W | 8.3 WNW | 6.3 WNW | 4.4 S | 4.6 SSE | 5.3 SSE | 4.9 SSE |
| 15431 | 長沼 | 5.5 NNW | 2.2 SSW | 3.1 S | 2.6 S | 2.4 SW | 4.7 NW | 6.8 NW | 6.3 NW | 3.2 WNW | 3.0 SSE | 3.0 SSE | 3.4 SSE | 2.5 SSE |
| 15442 | 夕張 | 2.9 W | 3.4 WSW | 3.3 W | 2.6 WSW | 2.4 WSW | 4.2 W | 4.2 W | 4.6 W | 3.4 W | 2.3 WSW | 2.3 SW | 1.7 SW | 4.0 E |
| 16026 | 美国 | 2.7 W | 2.8 WSW | 2.5 WSW | 4.0 W | 4.5 W | 3.9 W | 4.2 W | 4.2 W | 4.0 W | 2.8 WSW | 3.2 WSW | 2.8 WSW | 2.8 SW |
| 16061 | 神恵内 | 8.1 WNW | 9.3 WNW | 9.0 WNW | 11.6 WNW | 9.2 WNW | 8.3 WNW | 6.9 WNW | 8.5 WNW | 9.0 WNW | 8.6 WNW | 8.5 WNW | 8.7 WNW | 5.2 W |
| 16076 | 余市 | 2.6 SW | 3.0 WSW | 2.8 WSW | 3.8 W | 3.2 WNW | 3.8 W | 4.1 WNW | 4.4 WSW | 3.4 WSW | 3.1 SW | 3.2 SW | 2.9 SW | 3.4 SW |
| 16091 | 小樽* | 4.5 W | 5.5 WSW | 5.1 WSW | 7.3 WSW | 7.2 W | 7.2 WSW | 7.2 W | 6.4 W | 5.5 W | 5.2 WSW | 5.2 WSW | 5.5 WSW | 4.3 WSW |
| 16156 | 共和 | 7.6 WNW | 7.7 WNW | 7.9 WNW | 11.3 WNW | 11.3 WNW | 11.3 WNW | 9.6 WNW | 10.0 WNW | 9.1 WNW | 7.4 WNW | 6.9 WNW | 6.2 W | 3.5 W |
| 16206 | 蘭越 | 4.2 W | 5.0 WSW | 4.3 WSW | 5.8 WSW | 4.5 W | 4.5 W | 4.7 W | 4.5 W | 4.8 WSW | 3.2 WSW | 2.8 SW | 2.2 SW | 2.9 NE |
| 16217 | 倶知安* | 5.9 WNW | 6.2 WSW | 4.1 SW | 7.0 WNW | 6.0 WNW | 7.3 WNW | 8.8 WNW | 8.0 W | 6.9 W | 3.5 SSW | 3.9 S | 3.9 SSW | 3.6 SSE |
| 16252 | 寿都* | 5.7 WNW | 5.5 WNW | 6.1 WNW | 8.2 NW | 8.3 NW | 7.8 NW | 8.1 NW | 6.8 NW | 5.2 WNW | 4.6 WNW | 3.9 WNW | 3.7 WNW | 2.2 W |
| 16281 | 真狩 | 3.9 WNW | 2.8 SSW | 3.7 S | 3.8 SW | 2.7 WNW | 3.7 NW | 4.6 NW | 4.6 WNW | 4.5 W | 3.1 S | 3.4 S | 3.3 S | 2.9 SSE |
| 16286 | 喜茂別 | 4.4 WNW | 4.3 W | 3.5 W | 5.9 W | 5.0 WNW | 5.3 WNW | 6.3 WNW | 5.7 WNW | 4.8 W | 1.4 SW | 1.5 ESE | 2.4 E | 2.8 E |
| 16321 | 黒松内 | 4.4 NW | 2.4 WNW | 2.2 WNW | 5.7 NW | 4.4 NW | 5.7 NW | 5.7 NW | 5.1 NW | 4.2 WNW | 3.1 SE | 2.4 SE | 2.5 SE | 2.1 SE |

第 26 図 第 24 図と同様、ただし初期値時刻 2022 年 2 月 27 日 06UTC の MSM 最大風速ガイダ
ンスについて。



第 27 図 第 10 図と同様、ただし 2022 年 2 月 28 日 1 時 40 分時点について (中央の図に示す 1 時間解析雨量に
ついては、30 分間隔で更新されるデータであるため、1 時 30 分時点で表示している。また、アメダス浜
益を赤丸で囲っている。)

時刻である 1 時 40 分のアメダスデータを第 27 図に示す。1 時間解析雨量を見ると、降水の主体は沿岸部から内陸に移動しつつあった。また、浜益の気温は 1.1℃で、その他沿岸部もおおむね 0℃以上の気温を観測しており、地吹雪が発生する可能性は低い。これらのことから、風は強まっていたものの、交通障害を発生させるほどの視程障害を伴う猛吹雪となっていた可能性は低いと考えられる。

次に初期値時刻 2022 年 2 月 27 日 06UTC, FLV2

の飛雪流量帳票を第 28 図に示す。石狩北部の飛雪流量値は、最大でも 3 未満の予想で、目安である 7 に届かない予想となっている。また、同初期値時刻、FT = 12 h となる 28 日 3 時の地上風速、前 1 時間降水量の予想平面図を第 29 図、第 30 図にあわせて図示する。第 29 図を見ると地上風速は 10 m s⁻¹ 以上だが、第 30 図において降水の主体が内陸に移動し、強風域と降水域がずれることを予想しており、吹雪の危険度が高まりづらい事例であることが確認できる。

飛雪流量帳票表示

表示する細分
 二府県 府県 1次細分 市町村等まとめた地域

表示するFLV
 なし (FLV0) 上位5% (FLV0.5) 上位10% (FLV1) 上位20% (FLV2)

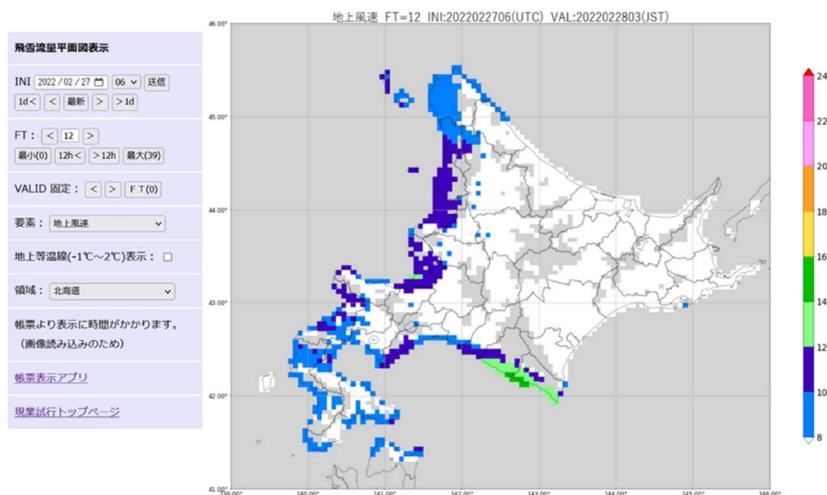
表示領域 (市町村等まとめた区域の場合のみで機能)
 全道 網走・稚内 釧路・帯広 札幌・旭川 室蘭・函館 稚内 旭川 網走 釧路 帯広 室蘭 札幌 函館

2022/02/27 06 送信 < 最新 >

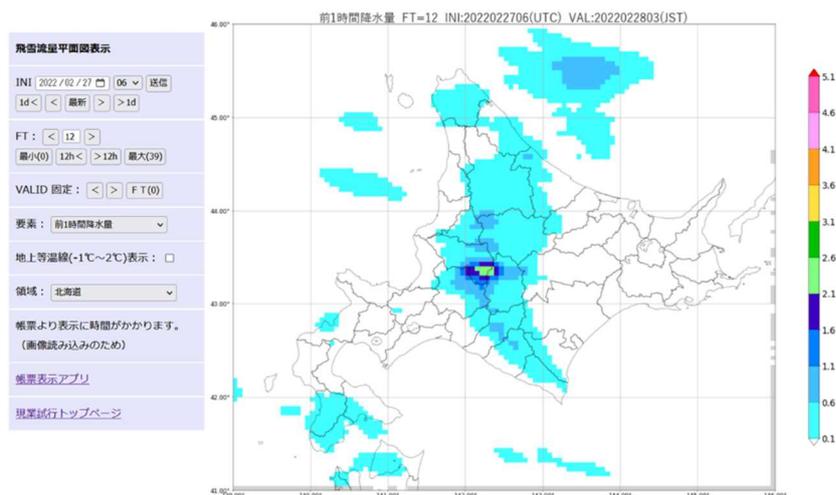
初期値 2022-02-27 06UTC
 実況値 (解析値) 優先

| 予報時間 | 00 | 03 | 06 | 09 | 12 | 15 | 18 | 21 | 24 | 27 | 30 | 33 | 36 | 39 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 対象時刻 (JST) | 27/15 | 27/18 | 27/21 | 28/00 | 28/03 | 28/06 | 28/09 | 28/12 | 28/15 | 28/18 | 28/21 | 01/00 | 01/03 | 01/06 |
| 石狩北部 | 0.1 | 0.1 | 0.3 | 0.1 | 0.1 | 0.7 | 1.6 | 1.0 | 1.1 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.0 | 0.1 |
| 石狩中部 | 0.2 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 石狩南部 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 北空知 | 0.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.3 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 中空知 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.5 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.0 |
| 南空知 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.4 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 後志北部 | 0.2 | 0.0 | 0.2 | 0.6 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.2 |
| 羊蹄山麓 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.4 | 0.0 | 0.5 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 後志西部 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 2.2 | 0.2 | 0.9 | 0.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 |

第 28 図 第 3 図と同様、ただし初期値時刻 2022 年 2 月 27 日 06UTC の MSM から計算された飛雪流量の 80 パーセンタイル値について。



第 29 図 第 5 図と同様、ただし、初期値時刻 2022 年 2 月 27 日 06UTC の MSM から計算された、2022 年 2 月 28 日 03「JST」(FT = 12 h) の地上風速について。



第 30 図 第 5 図と同様，ただし，初期値時刻 2022 年 2 月 27 日 06UTC の MSM から計算された，2022 年 2 月 28 日 03 「JST」(FT = 12 h) の前 1 時間降水量について．

4.2.3 2022 年 2 月 28 日の事例のまとめ

本事例は，実際の予報作業でも暴風雪警報の要否を検討した結果，警報を発表しなかった事例だが，第 26 図の MSM 最大風速ガイダンスを見ると暴風雪警報基準以上の風速が予想されている事例であった．地上気温などから地吹雪の発生の可能性は低く，「雪による視程障害を伴う」の発表基準を満たさないと判断し，暴風雪警報の発表を行わないことができると考えられるが，飛雪流量を確認することにより，より客観的に吹雪の危険度が高まる可能性は低いと判断し，風雪注意報ではなく強風注意報を発表するという判断ができる事例であった．このように，飛雪流量を用いることで，暴風雪警報の発表要否や，警報の対象となる地域をより精査できた．

5. 飛雪流量アプリの課題

稲飯ほか (2023) では，飛雪流量による吹雪の危険度予測精度について 10 冬季分の統計として調査したが，本稿では特定の事例に注目して飛雪流量アプリを紹介しつつ予報担当者の立場からその有用性について考察を行った．第 4 節で飛雪流量による吹雪の危険度予測と吹雪による通行止め区間を重ねて見ることにより，飛雪流量を活用することで吹雪の危険度予測をより高い精度で行うことができる可能性が示された．しかし，

より高い精度で吹雪の危険度予測を行うためにはいくつか課題も考えられる．ここでは 4 つ取り上げる．

1 つ目は，雪面の状態が考慮されていないことである．竹内 (1981) において，雪質により吹雪量が変動することが指摘されている (吹雪量とは，飛雪流量を鉛直方向に積分した値である)．飛雪流量は地吹雪の効果を計算しているため，巻き上がる雪粒子の雪質によって吹雪量と同様に変動すると考えられるが，現在の飛雪流量アプリでは考慮できていない．

2 つ目は，飛雪流量は MSM を用いて計算されているため MSM の地形の解像度で再現できない強風は飛雪流量でも再現されず，吹雪の危険度の高まりを捉えられない可能性がある．

3 つ目は，実際にどこで猛吹雪になっているかが非常に確認しづらく検証が難しいことが挙げられる．稲飯ほか (2023) では手法として，飛雪流量による吹雪の危険度予測と交通障害との紐付けに基づいて検証を行っているが，災害データベースの大部分を占める国道や道道の通行止めが，自然現象としての吹雪現象に完全に対応しているものではないことも考えられる．例えば，利用頻度の低い特定の道路が通行止めにされやすいことや，道路管理者が予報を参考にして事前に予防措置としての通行止めを実施するなど，人

為的な影響が入っている可能性が挙げられる。また、吹雪いてはいるが大雪により通行止めを実施するといった、暴風雪警報よりも大雪注意報や警報を発表する方が望ましい事例が含まれている可能性も考えられる。

4 つ目は、現業予報作業内での運用上の課題である。予報作業において、吹雪の危険度予測に適した飛雪流量値の閾値についてスレットスコアに注目して7としているが、7に近い予想だが7未満であった場合に、予報当番者の判断が難しい。氷点下の気温場の中で飛雪流量値が7に近いが目安未満、MSM 最大風速ガイダンスでは暴風雪警報基準以上の風速の予想がある場合は飛雪流量による危険度予測がないからといって暴風雪となる可能性が低いとは言い切れない。このような運用上の問題に対処するため、捕捉率の高さや空振り率の低さなどの観点からも議論して、複合的で段階的な飛雪流量アプリを組み込んだワークシート（以下、WS と表記する）が必要となることも課題である。

6. 今後の展望

2022年度は、本稿で紹介した飛雪流量アプリを活用した予報作業を石狩・空知・後志地方で試験的に行った。2023年度は石狩・空知・後志地方で行った飛雪流量による吹雪の危険度予測精度の評価作業（稲飯ほか、2023を参照）を北海道全域の予報区に拡大する取組を進めている。並行して取り組むべきこととして、1) 飛雪流量による吹雪の危険度予測精度向上、2) 視程観測データとの直接比較など猛吹雪の検証手法の確立、3) 予報作業に利用しやすくするための飛雪流量WSの作成が挙げられる。

1点目の飛雪流量による吹雪の危険度予測精度向上について、雪面の初期状態が考慮されていない課題を解決する必要があるが、積雪変質モデル「SMAP (Snow Metamorphism and Albedo Process)」などの雪面状態を推定したデータを取り込むことができれば課題を克服できる可能性がある。また、現在の飛雪流量は付録Aのとおり気温に応じて補正を行っているが、雪質を計算に取り込める

ようになるとさらに予測精度を向上させられる可能性がある。また、地上風速の予想について、現在の飛雪流量アプリではMSMによる予想風速を用いつつ、適用条件を満たす格子には永井の式による風速を採用することによりMSMの地形の解像度で再現できない強風の予想を試みているが、空間分解能が高い気象庁局地モデルデータなどを使用することによっても、風速の予想を改善し、飛雪流量による予測精度を向上させられる可能性がある。

2点目の猛吹雪の検証手法の確立については、視程と交通障害の関連の調査及び広範囲、複数の地点での視程の推定手法の確立が進むことで、定量的に評価できるようになると考える。先行研究として、視程と交通障害の関連について原田ほか（2022）で検討されている。さらに、原田ほか（2023）では、北海道における暴風雪・大雪の警戒レベルの評価指標の閾値を設定する研究が行われている。また、視程を推定するための手法として、大久保ほか（2020）では深層学習により車載カメラ画像を用いた吹雪視程ランクの判別実験が行われている。暴風雪となっていたかどうかを適切に判断できるようになると、飛雪流量による吹雪の危険度予測の精度検証を現在の日単位ではなくMSMの時間間隔である3時間単位と細かい単位でできるようになると考える。

3点目の予報作業に利用しやすくするための飛雪流量WSの作成については、飛雪流量値ごとに必要な対応を示すのみでなく、予想されている飛雪流量値がどの程度の吹雪現象に相当するのか関連資料を示すことが必要と考えられる。予報当番者がイメージを持ちながら予報作業を行うことができるようになることで、飛雪流量を活用した吹雪の危険度予測が予報現場に浸透すると考える。

最後に、飛雪流量を活用した吹雪の危険度予測を予報作業に導入、さらに危険度予測の精度を高めることで、暴風雪警報の基準を現行の平均風速と視程障害の有無による基準から飛雪流量を活用したものに変えられる可能性がある。また、大雨災害（土砂災害や浸水害、洪水災害）の危険度

の高まりを面的に把握できるキキクル（警報の危険度分布）のように、吹雪の危険度を面的に把握できるプロダクトを提供できるようになれば、吹雪の危険度をより分かりやすく伝えられるようになる。

7. まとめ

札幌管区气象台では、吹雪の危険度予測の向上のため、飛雪流量アプリを作成（池上ほか、2020）し、その予測精度の検証を行ってきた（稲飯ほか、2023）。本稿では、フィルターレベル切替など機能強化された飛雪流量アプリについて、その特長やUIデザイン、使用方法を紹介し、本アプリを用いた予報作業を想定した事後検証を行うことで、現業におけるアプリの有用性の検証を行った。

2022年2月21日を対象とした事後検証では、吹雪の危険度が高い地域が石狩地方から空知地方、そして後志地方へと遷移していく様子が適切に予測できた事例であった。また2022年2月28日を対象とした事後検証では、MSM 最大風速ガイダンスによると暴風雪警報基準を超える値が石狩北部を中心に予測されていたが、吹雪災害は発生しなかった。一方で飛雪流量予測値は過大な値となることなく、飛雪流量アプリによって暴風雪警報の発表の必要性は低いと判断できる事例であったと評価できた。

これらの事後検証によって、本アプリの帳票表示機能を活用することで吹雪の危険度の高まりを確実かつ簡便に確認できること、さらに平面図表示機能により任意の時刻の飛雪流量や風速の面的な分布を把握でき適切な暴風雪警報の発表判断に活用できることを確認することができた。

本アプリの今後の課題としては、地吹雪計算式の改善、空間分解能がより高い風速データの使用、暴風雪現象の基礎的な理解の向上、現業用WSの作成、一般向けの防災情報提供ツールの整備、などが挙げられる。

謝辞

2010年度以降札幌管区气象台において暴風雪警報高度化プロジェクトに関わってきた皆様に

感謝申し上げます。特に、倉橋永氏、池上慶希氏は2019年度から2021年度にかけて飛雪流量計算や予報作業用アプリケーションに資するプログラム群を開発されました。ここに深謝の意を表します。本稿の執筆にあたり、札幌管区气象台の竹田康生気象防災部長には多くの有益なコメントをいただきました。

付録 A 飛雪流量

札幌管区气象台で利用している、ある高度（ z [m]）における飛雪流量の定義については以下のとおりである。

$$M_f = N(z) * V(z)$$

$$N(z) = \frac{P}{w_f} + N_t \left(\frac{z}{z_t} \right)^{-\frac{w_b}{k u_*}}$$

ここで、

M_f [g m⁻² s⁻¹]: 飛雪流量

N [g m⁻³]: 飛雪空間密度

V [m s⁻¹]: 地上 10 m の風速

P [g m⁻² s⁻¹]: 降雪強度

w_f [m s⁻¹]: 降雪粒子の落下速度

N_t [g m⁻³]: 基準高度における飛雪空間密度

z_t [m]: 基準高度

w_b [m s⁻¹]: 地吹雪粒子の落下速度

k : カルマン定数

u_* [m s⁻¹]: 摩擦速度

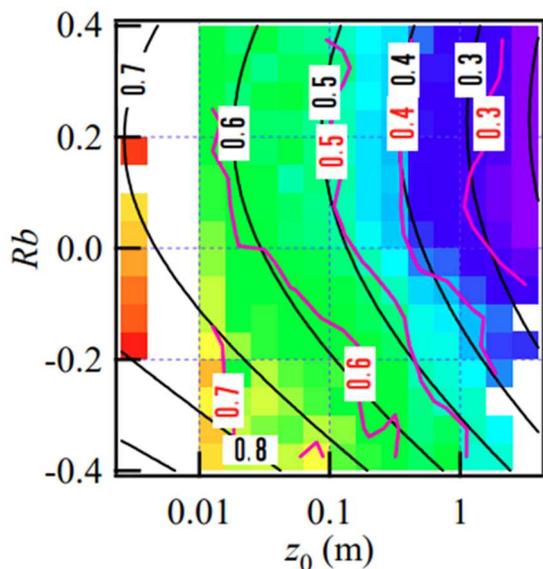
である、また、高度 z [m]については、小型車の運転者を想定して $z = 1.2$ m としている。また、飛雪流量には地上気温 t [°C]に応じて次式のとおり補正をかけている。

$$M_f = \begin{cases} N * V, & t \leq -1 \\ N * V * \left(-\frac{1}{3}t + \frac{2}{3} \right), & -1 < t \leq 2 \\ 0, & 2 < t \end{cases}$$

付録 B 永井（2008）の紹介

永井（2008）では、地上の最大瞬間風速と下層風速の関係について調査が行われた。最大瞬間風速は、大気の平均的な流れに乱れの成分が加わったものとして観測されるために力学的な予測が難しい性質を持つため、過去の観測値を用いて統

計的に調査することで量的に予想することを試みている。使用したデータは、北海道から沖縄県までの気象官署のうち、レーウィンゾンデ・GPSゾンデ観測を行っており、かつ地上気象とゾンデの放球場所が離れていない官署の高層気象観測資料及び地上気象観測資料である。風速計地上高が気象官署ごとに異なるために複数地点でまとめて風速の調査を行うことができない点については、気象官署で観測された平均風速と最大瞬間風速を、基準高度 20 m における平均風速 U [m s^{-1}] と最大瞬間風速に補正することで対応した。大気安定度（バルクリチャードソン数、以下、 R_b と表記する）、地表面粗度（以下、 z_0 と表記する）を考慮して、気象官署の上空 200 m または 500 m の下層風速 U_{upp} [m s^{-1}] に対する地上の平均風速 U



第 31 図 地上風速を高度 500 m 風速で割った風速比のカラー塗りつぶし（永井 2008 より）。縦軸はバルクリチャードソン数、横軸は地表面粗度。地表面粗度の単位は m。バルクリチャードソン数、地表面粗度の階級幅別に風速比を求めている（バルクリチャードソン数の階級幅は 0.05、地表面粗度の階級幅は $\log_{10}(z_0)$ の幅が 0.2 となるように設定している）。階級ごとに風速比の平均値を求めて着色し、等値線を赤実線で引いている。黒実線は非線形重回帰分析による風速比の等値線である。

の比 (U/U_{upp}) 及び最大瞬間風速 U_{max} [m s^{-1}] の比 (U_{max}/U_{upp}) の調査を行った（一例として、全地点における上空 500 m の下層風速と地上の平均風速の比 (U/U_{upp}) を第 31 図に示す。）。その後、最大瞬間風速を量的に予想するために、風速比を目的変数、 $\log_{10}(z_0)$ 、 R_b を説明変数とした多項式による非線形重回帰分析を行った。得られた回帰式による風速比の等値線（第 31 図黒実線）は、観測値の統計により得た風速比の等値線（第 31 図赤実線）をおおむね再現している。また、回帰式でもっとも確からしい風速比を求めたのちに、最大瞬間風速を予想するために、標準偏差を用いて上側・下側 5% 点（95% で予想し得る上限・下限値）の推定を行った。結果として、上空 200 m の下層風速に対する地上の平均風速の比、最大瞬間風速の比の上限値をそれぞれ、

$$U/U_{upp} + 0.17, U_{max}/U_{upp} + 0.32$$

と得た。

参考文献

- 青木篤史，水上涼介，小谷野陽介（2019）：石狩・空知・後志地方の暴風雪警報の高度化へ向けた調査。測候時報，**86**，29-39。
- 池上慶希，倉橋永，佐々木あゆみ，輪島千恵子，大我一憲（2019）：暴風雪警報の高度化に向けた調査第 3 報。平成 31 年度札幌管区気象研究会誌，256-268。
- 池上慶希，倉橋永，輪島千恵子，桑田路子，大我一憲（2020）：暴風雪警報の高度化に向けた調査第 4 報。令和 2 年度札幌管区気象研究会誌，203-207。
- 稲飯洋一，菊田弘樹，栗山奨平，白取直也，大我一憲，青木篤史，西村隆，今井達也（2023）：飛雪流量を活用した吹雪の危険度予測。測候時報，**90**，7。
- 大久保幸治，武知洋太，櫻井俊光，高橋丞二（2020）：車載カメラ画像を用いた AI 技術による視程ランク判別手法の試行について。寒地土木研究所月報，No. 810，2-10。
- 雪氷チーム（2016）：飛雪流量の計測方法について。寒地土木技術研究：国立研究開発法人

- 土木研究所寒地土木研究所月報: monthly report, (761), 48-50.
- 宗信宏, 佐藤直喜, 小谷野陽介, 前田潔史, 久保田隆信 (2015): 暴風雪警報基準の高度化に向けた基礎調査. 平成 27 年度札幌管区気象研究会誌.
- 竹内政夫, 福沢義文 (1976): 雪氷, **38**, 165-170.
- 竹内政夫 (1981): ワイオミングの吹雪とその対策. 第 24 回北海道開発局技術研究発表会論文集, 442-449.
- 永井康之 (2008): 地上の最大瞬間風速と下層風速の関係. 平成 20 年度札幌管区気象研究会誌.
- 野村達郎, 堀田純司, 前田潔史 (2016): 北海道日本海側における暴風雪警報の改善. 平成 28 年度札幌管区気象研究会誌.
- 原田裕介, 大宮哲, 武知洋太 (2022): 暴風雪・大雪の評価技術および冬期道路管理への活用案について. 第 66 回 (2022 年度) 北海道開発技術研究発表会論文, 524-529.
- 原田裕介, 大宮哲, 武知洋太, 西村敦史 (2023): 北海道における暴風雪・大雪警戒レベルの評価指標の閾値の設定. 寒地土木研究所月報, No. 845, 28-33.
- 松澤勝, 伊東靖彦, 國分徹哉, 武知洋太, 大宮哲 (2019): 極端な暴風雪等の評価技術に関する研究. 平成 30 年度土木研究所成果報告書
- 山口明, 小谷野陽介, 大矢恒太郎, 服部宏紀 (2017): 暴風雪警報の高度化に向けた調査. 平成 29 年度札幌管区気象研究会誌.