
報 告

飛雪流量を活用した吹雪の危険度予測 Snowstorm risk forecast by using blowing-snow mass flux

稲飯 洋一¹・菊田 弘樹¹・栗山 奨平²・白取 直也¹・
大我 一憲³・青木 篤史¹・西村 隆⁴・今井 達也¹

要 旨

冬季の北海道では吹雪に起因する災害が度々発生しており、防災・減災の観点から吹雪の予測精度の向上が求められている。札幌管区気象台では吹雪による視程障害の客観的指標として飛雪流量を活用する研究を行ってきた。本研究では、気象庁メソスケールモデル (MSM) の気象データを用いて計算した飛雪流量を用いて、冬季の北海道石狩・空知・後志地方を対象として吹雪の危険度予測の精度検証を行った。この検証は、吹雪災害として主要道路の交通障害をデータベース化して、飛雪流量計算値と紐付けて飛雪流量値に任意の閾値を設定した場合のスレットスコアなどの予測スコアを計算することで行った。その精度は MSM の解析値を用いた場合ではスレットスコアが 0.21 と評価され、同様に予測値を用いた場合では予測誤差により精度が悪化することが示された一方で、飛雪流量のパーセンタイル値を用いることにより、ある程度精度が改善することが示された。本研究をとおして、吹雪による視程障害に関する客観的指標として飛雪流量が有効であり、これを活用する事で吹雪の危険度予測を効果的に行える可能性が示された。

1. はじめに

冬季の北海道では風が強まると吹雪や地吹雪が度々発生し、これに起因する災害が各地で頻発している。大きな被害を引き起こしたのものとしては 100 台以上の自動車が立ち往生した 2008 年 2 月の長沼町の事例や道東地方で 9 名の犠牲者を出

した 2013 年 3 月の事例が挙げられる。2.1 節で記述する吹雪による災害データベースに基づくと、本研究の対象とした 2012 年 11 月から 2022 年 3 月末日までの石狩・空知・後志地方だけに限っても 300 件以上の交通障害などの災害が発生している。このように防災・減災の観点から吹雪の予測

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 帯広測候所)

³ 札幌管区気象台気象防災部予報課 (現 函館地方気象台)

⁴ 札幌管区気象台気象防災部予報課 (現 新千歳航空測候所)
(令和 6 年 2 月 16 日発行)

精度の向上が求められている。

北海道における暴風雪警報発表の基準は、平均風速基準と「雪による視程障害を伴う」という視程障害の基準の組み合わせとなっている（例として石狩・空知・後志地方の警報・注意報発表基準一覧を別添 1 に示す）。暴風雪警報に関わる気象要素の中でも、特に視程障害については客観的なデータを得ることは困難であり、また吹雪による視程障害は風速に限らず、気温や降雪の強弱など複数の気象要素が関与している（例えば、松澤ほか、2019）。このため、暴風雪警報の発表判断には、風速や降雪の強弱、気温の高低など広範な気象要素について実況及び予測資料を把握する必要がある、高度な気象予測技術が求められる。

札幌管区気象台では、北海道開発局土木試験所（現国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所）が開発した飛雪流量（単位時間単位面積を通過する雪粒子の質量（竹内・福沢、1976；雪氷チーム、2016）を吹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）。特に近年は、吹雪が原因で発生した主要道路の交通障害をデータベース化して吹雪の危険度を把握する事で、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）。本節の以下のパートでは、飛雪流量の活用に関するこれまでの取組について、その概要を紹介する。なお、2014年以前の取組については、山口ほか（2017）の第2節に分かりやすくまとめられている。

宗ほか（2015）では、気象庁メソスケールモデル（MSM）データを用いて飛雪流量を計算し、松沢・竹内（2002）の経験式から視程の予測を行うツールを作成した。さらに、道内で発生した吹雪事例を対象に、このツールにより推定された視程と視程計による観測値と比較し、ある程度定量的に推定できた事例があったことを示した。一方で、内陸域では視程悪化の程度を過小評価、海岸付近では過大評価する傾向があることも示された。

この過大評価/過小評価に対して、野村ほか（2016）では、その改善に取り組んだ。彼らは飛

雪流量計算に用いる風速データや、海上・海岸付近では地吹雪の取扱い方についての見直しを行った。また、飛雪流量を用いた暴風雪警報発表判断の有効性について言及した。

続く山口ほか（2017）では、野村ほか（2016）で開発されたツールによる視程予測と視程計による観測値を比較して、その精度の検証を行った。その結果、例えば視程 800 m を閾値とした場合では、スレットスコアにして 0.15-0.2 程度の精度であることが示された。また、市町村や道路交通、報道、学校関係機関に対する聞き取り調査を行い、吹雪に伴い生じる災害（航空機の欠航、公共交通機関の運休、道路の通行止め、立ち往生の発生、交通事故、学校の休校、停電など）について、「警報級」「注意報級」などの階級（災害レベル）付けを行った。

青木ほか（2019）では 2006 年 1 月から 2017 年 4 月までに発生した吹雪を主要因とする災害（132 事例）について、個々の事例の災害レベルを推定しながら、山口ほか（2017）の階級付けの枠組みを取り入れたデータベースの作成を推進した。さらに予報作業での活用を念頭に暴風雪警報発表基準の一部である「雪による視程障害を伴う」部分を判定するワークシートを作成した。

その後、青木ほか（2019）のワークシートは予報作業において試験的に使用されたが、その結果は必ずしも良好ではなかった。その原因について、池上ほか（2019）は、飛雪流量の計算値が風速に伴って指数関数的に増大してしまう性質を持つ事やアメダス観測地点のみを計算対象にしている事を挙げ、これらの見直しと改善に取り組んだ。さらに続く池上ほか（2020）では、航空機の欠航、公共交通機関の運休、学校の休校、停電などについては吹雪以外の要因で発生した事例も多く含まれるため解析の対象外とするなど、青木ほか（2019）による災害データベースの品質管理の見直しや、予報作業での活用を想定したアプリケーションソフト（以下アプリ）の開発を行ってきた。

本稿では、このような池上ほか（2019；2020）により開発された飛雪流量予測アプリについて、

第 1 表 石狩・空知・後志地方における予報区分（左列）と除外格子を除いた 5 km 格子数（中列），市町村名（右列）。

市町村等をまとめた地域	5 km 格子数	市町村名
石狩北部	44	石狩市，当別町，新篠津村
石狩中部	30	札幌市，江別市
石狩南部	22	千歳市，恵庭市，北広島市
北空知	41	深川市，妹背牛町，秩父別町，北竜町，沼田町
中空知	52	芦別市，赤平市，滝川市，砂川市，歌志内市，奈井江町，上砂川町，浦臼町，新十津川町，雨竜町
南空知	68	夕張市，岩見沢市，美唄市，三笠市，南幌町，由仁町，長沼町，栗山町，月形町
後志北部	39	小樽市，積丹町，古平町，仁木町，余市町，赤井川村
羊蹄山麓	39	ニセコ町，真狩村，留寿都村，喜茂別町，京極町，倶知安町
後志西部	63	島牧村，寿都町，黒松内町，蘭越町，共和町，岩内町，泊村，神恵内村

吹雪を要因とする立ち往生や通行止め事例（以下「通行止め事例等」という。）に対する予測精度の検証を行った結果を紹介する。

2. データと手法

2.1 災害データ

まず実際に発生した吹雪による災害を把握するため、札幌管区気象台でアーカイブされている気象災害報告や気象速報に加えて、北海道開発局、北海道、札幌市から、石狩・空知・後志地方の主要道路における交通障害として、国道及び道道の通行止めデータを入手した。それらの資料を基に、通行止め事例等を抽出して、災害発生時間は日単位に、発生場所は「市町村をまとめた地域」（第 1 表）にまとめて、石狩・空知・後志地方の吹雪による災害データベースを作成した。期間は 11 月 1 日から翌年 3 月 31 日までを 1 冬季として、2012 年冬季から 2021 年冬季までの 10 年間である。

2.2 気象データと飛雪流量値の計算

ある高度(z [m])の飛雪流量値(M_f [$\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$])は飛雪空間密度(N [g m^{-3}])と風速(V [m s^{-1}])の積

$$M_f = N(z) * V(z) \quad (1)$$

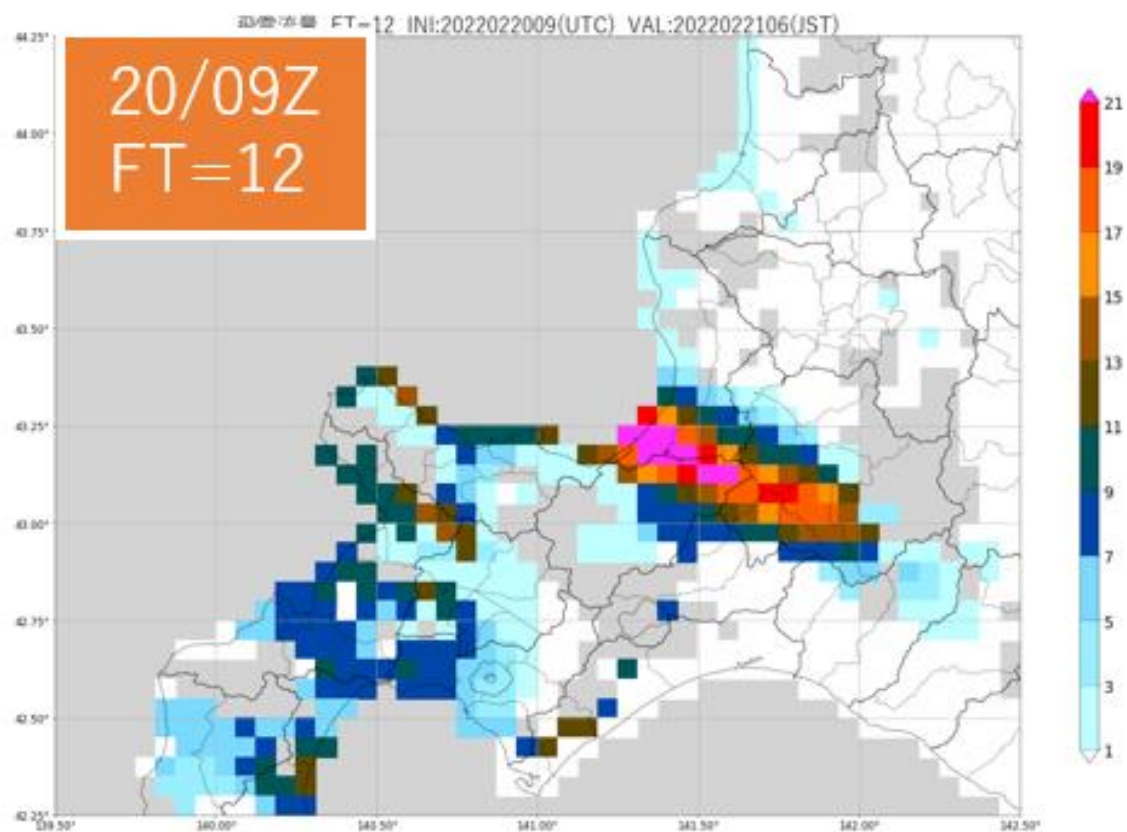
によって、さらに N は降雪粒子の空間密度と地吹雪粒子の空間密度の和

$$N(z) = \frac{P}{w_f} + N_t \left(\frac{z}{z_t} \right)^{-\frac{w_b}{ku_*}} \quad (2)$$

によって計算される。ここで、 P [$\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$]: 降雪強度、 w_f [m s^{-1}]: 降雪粒子の落下速度 ($= 1.2$)、 z_t [m]: 基準高度 ($= 0.15$)、 N_t [g m^{-3}]: 基準高度における飛雪空間密度 ($= 18$)、 w_b [m s^{-1}]: 地吹雪粒子の落下速度 ($= 0.35$)、 k : カルマン定数 ($= 0.4$)、 u_* [m s^{-1}]: 摩擦速度 ($= 0.036V_{10}$)、 V_{10} [m s^{-1}]: 高度 10 m の風速である (池上ほか, 2019)。また本調査では小型車の運転者を想定して $z = 1.2$ m とし、風速データは、気象庁 MSM による解析値及び予測値を使用した。また、降雪強度は降水強度データと気温の関数で与えられた雪水比から計算 (池上ほか, 2019) した値を用いた。

2.3 災害データと飛雪流量データの関連付け

第 1 式、第 2 式を用いて 5 km 格子データとして計算された飛雪流量予測値の水平分布図を一例として第 1 図に示す (2022 年 2 月 20 日 18 時 (JST) を初期時刻とした同年同月 21 日 6 時 (JST) に対する予測)。2022 年 2 月 21 日は、石狩・空知・後志地方では石狩市、当別町、新篠津村、札幌市など石狩北部・中部を中心に交通障害が発生していた (別添 2)。災害データと飛雪流量データの関連付けはデータ解析においてサンプルを仕分ける「箱」に相当する bin (ビン) を用いて行った。ビンは、時間方向は日単位、空間方向は「市町村をまとめた地域」単位に設定し、これに災害の有/無、飛雪流量データを格納することで災害デ



第 1 図 北海道石狩・空知・後志地方における 2022 年 2 月 21 日 6 時 (JST) を対象とした MSM 予測値 (予測期間 12 時間) を用いて計算された飛雪流量値 (カラーバー) の分布. 灰色で塗られた格子は海上や山岳部などの計算除外格子である. 石狩北部・中部から南空知にかけて飛雪流量値の大きな領域が広がっている様子が確認でき, 実際にそのような地域で吹雪による交通障害が発生した.

ータと飛雪流量値の紐付けを行った. そして, 各ビンに格納された飛雪流量データからその最大値やパーセンタイル値 (データを昇順にカウントして任意のパーセントに位置する値) を計算して, 吹雪による交通障害に対する予測精度に関わるスコア (例えば, スレットスコアなど) を評価した. 飛雪流量データの最大値についての検証は 3.2.1 節に, 任意のパーセンタイル値についての検証は 3.2.2 節に詳細を示す. また, 3.2.3 節では, 予報作業を想定し, 予測誤差が含まれる飛雪流量予測値を用いた場合の危険度予測精度の検証の結果を示す.

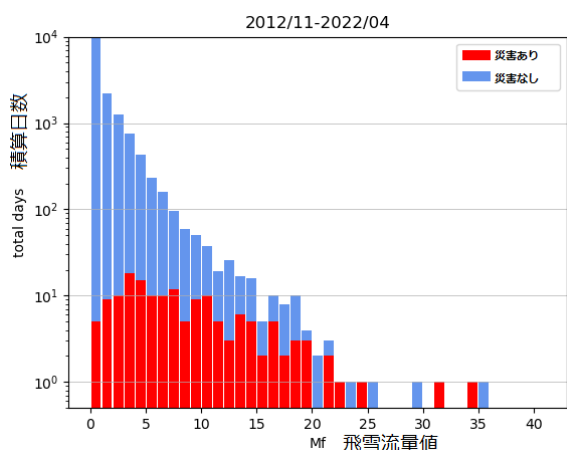
さらに上記の結果と比較するために, 3.2.4 節では飛雪流量に代わって風速のみを利用した場合

の危険度予測精度の検証結果を示す. これにはアメダスによる観測値や MSM 最大風速ガイダンス (以下「ガイダンス」という) 値 (國次, 1997 ; 気象庁予報部, 2018) を用いた.

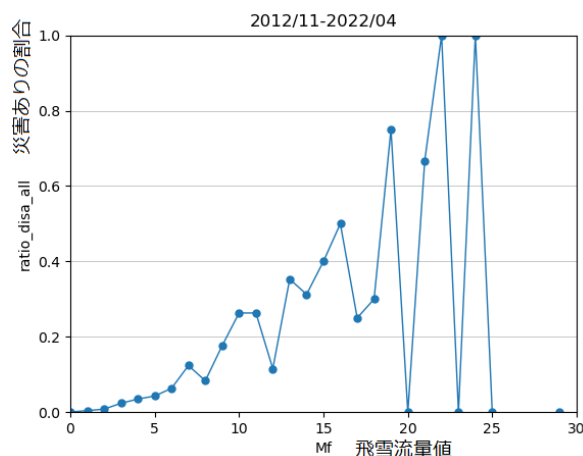
3. 検証結果

3.1 飛雪流量値に対する災害発生頻度

まず, 飛雪流量値に対する災害発生頻度を確認するため, 2.3 節で導入したビン全てについて MSM 解析値を用いて算出した飛雪流量最大値ごとに災害の有/無別に積算した日数を第 2 図に示す. 第 2 図を見ると, 「災害あり」の日数は飛雪流量値の小さな領域から大きな領域まで広く積算されている一方, 「災害なし」の積算日数は飛雪流

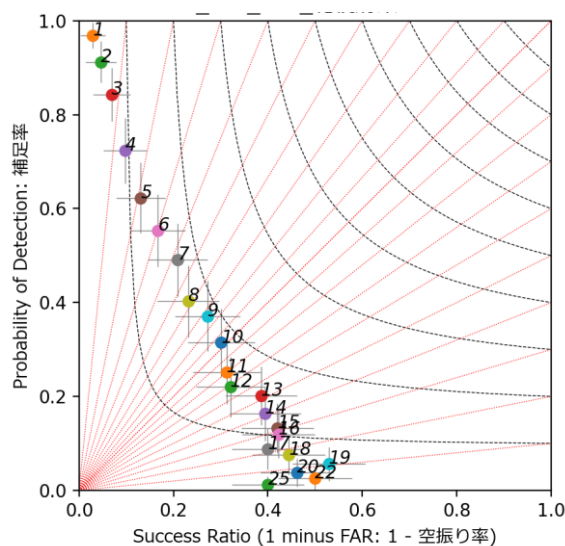


第 2 図 飛雪流量最大値（横軸）ごとに積算された災害あり（赤）/なし（青）の日数（縦対数軸）.



第 3 図 飛雪流量最大値（横軸）ごとに積算された災害ありの日数の割合（縦軸）.

量値の増大に伴い指数関数的に減少している．このため、災害ありの日数の割合（第 3 図）で見ると、飛雪流量値 5 以下では 0.05 未満である一方、飛雪流量値 7 付近から顕著な増加が見られ、10 以上ではおおむね 0.2 を超える割合となっている．吹雪による危険度予測の観点から、例えば飛雪流量 5 以下を閾値に設定した場合では空振りとなるケースが著しく多くなってしまふ．逆に 10 以上とすると空振りを低減することができるが、見逃すケースが増加してしまうというジレンマがこれらの図から読み取れる．



第 4 図 パフォーマンスダイアグラム（縦軸：捕捉率，横軸：1 - 空振り率，黒曲線：スレットスコア，赤線：バイアスコア）で示した、災害に対する飛雪流量最大値（MSM 解析値）の予報成績．点横のイタリックの数字は閾値を，灰バーは 95%信頼区間を表す．

3.2 パフォーマンスダイアグラム

このようなトレードオフな特性を持った危険度予測精度の成績を可視化し評価するには、「パフォーマンスダイアグラム」（Roebber, 2009）を用いることが有効である．パフォーマンスダイアグラムは「捕捉率」を縦軸に、「1 - 空振り率」を横軸に取った図であり、頻度の低い現象の適中率に相当する「スレットスコア」の値は図の右上ほど高くなる．つまり、右上ほど成績が良いことを示し、下ほど見逃しが、左ほど空振りが多いいことを示す．なお、スレットスコアの等値線は双曲線状に、バイアスコアの等値線は直線状にそれぞれ分布する．

このような図の中に任意の閾値を設定した場合に計算される捕捉率と空振り率の値にしたがって結果をプロットし、危険度予測精度の可視化を行った．

気象庁の発する警報は、重大な災害が起こるお

それのあるときに警戒を呼びかけて行う予報である。吹雪の危険度予測に用いる飛雪流量閾値の設定にあたり、本研究において災害として扱う通行止め事例等の全てが「重大な災害」に該当するのかという点と、数十 km という空間スケールのビンで飛雪流量値と通行止め事例等を紐付けているという点を考慮すると、本解析で用いる通行止め事例等を全て捕捉するような閾値の設定ではなく、捕捉率向上と空振り率低減の両観点から、バイアスコアが 1.0（パフォーマンスダイアグラム中の 1 対 1 ラインに対応）に近く、スレットスコアを最大化する閾値の使用が望ましいと考えられる。

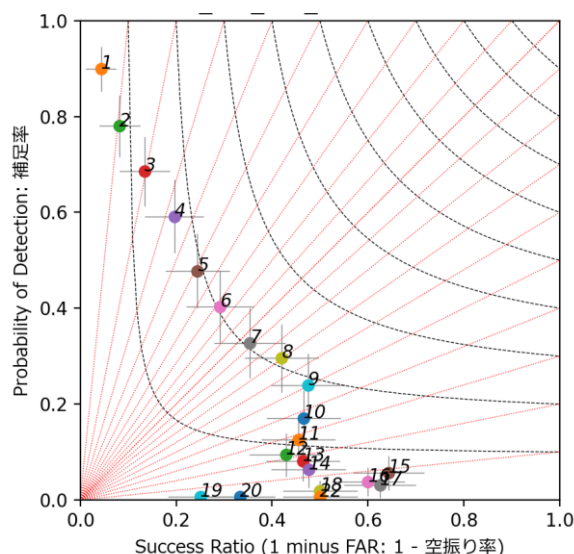
3.2.1 MSM 解析値による飛雪流量の最大値

2.3 節で導入した各ビン中飛雪流量の最大値を用いた場合のパフォーマンスダイアグラムを第 4 図に示す。図を見ると、飛雪流量値に設けた閾値を大きくことに伴ってグラフの左上（捕捉率が高いが空振りも多い）から右下（空振りが少ないが捕捉率も低い）に向けてスコアが遷移していく様子が見て取れる。飛雪流量値が 10 程度の場合に、最も高いスレットスコアと 1.0 に近いバイアスコアを示している。例えば飛雪流量閾値 = 9 の場合、スレットスコアは 0.19、バイアスコアは 1.4、捕捉率は 0.37、空振り率は 0.73 と計算された。

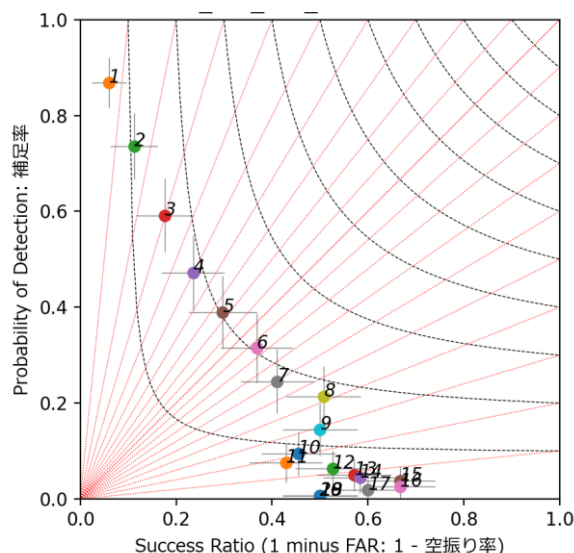
3.2.2 MSM 解析値による飛雪流量のパーセンタイル値

前節では飛雪流量の各ビン最大値と災害発生との対応を検証したが、最大値は小スケールの降水強度の強まりや初期値毎の予測値のばらつきに敏感なため、危険度予測の閾値として適さないケースも含まれるという問題がある。この点に対処するには、ある程度の時空間的な広がりを持つ値、言い換えると、飛雪流量予測において、より robust（ロバスト）な値を使用することが有効である。

ロバスト（名詞形はロバストネス）とは堅牢（性）、頑健（性）、構造安定（性）などと日本語訳される概念である。気象学的解析においては、



第 5 図 第 4 図と同様、ただし飛雪流量 90 パーセンタイル値で計算された予報成績。



第 6 図 第 4 図と同様、ただし飛雪流量 80 パーセンタイル値で計算された予報成績。

使用するデータや手法によって結果や結論が変わってしまうことがしばしば起こるが、そのような変化が小さく結果や結論が安定していることをロバストである（あるいはロバストネスが高い）と言う。ここでは、初期値変化に敏感な各ビンの最大値に代わって、最大値よりもロバストであると考えられるパーセンタイル値を用いることで、危険度予測精度の向上が見込めるかどうかパフ

パフォーマンスダイアグラムによる検証を行った。

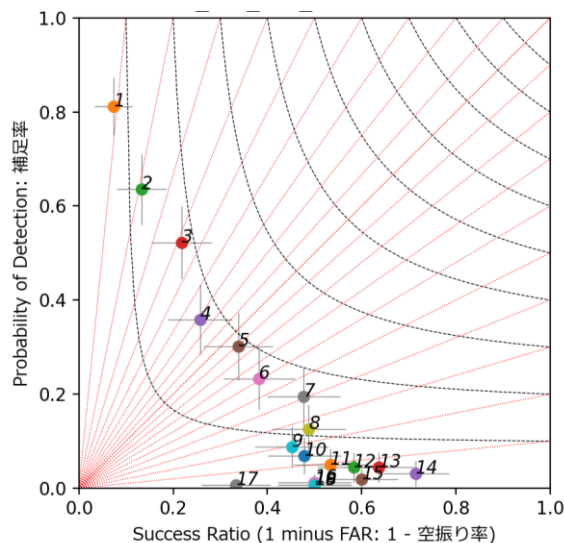
例として各ビン中の飛雪流量 90 パーセンタイル値を用いて計算したパフォーマンスダイアグラム (第 5 図) では, 最大値を用いた場合 (第 4 図) に比べて, 同じ閾値のスコアに注目すると, 捕捉率が低下するものの代わりに空振り率が低下することで図中右下に遷移している (例えば前節と同じ飛雪流量閾値 = 9 のスコアに注目するとスレットスコアは 0.19, バイアススコアは 0.50, 捕捉率は 0.24, 空振り率は 0.52 となっている)。他方, 全体的な分布で見るとバイアススコア = 1 付近のスコアが右上に変位しているのが見て取れる。90 パーセンタイル値を用いた場合, 最も高いスレットスコアを達成するのは飛雪流量閾値 = 8 の時で, そのスレットスコアは 0.21 (バイアススコアは 0.70, 捕捉率は 0.30, 空振り率は 0.58) と, 最大値を用いた場合 (第 4 図) の最高スレットスコアを上回る成績となっている。このようにパーセンタイル値の使用によって, 飛雪流量値のロバストネスが向上することにより, 最大値を用いた場合よりも災害との対応が改善する事が示された。

同様に 80 パーセンタイル値を用いた場合 (第 6 図) は飛雪流量閾値 = 6 の時に最高スレットスコア = 0.20 (バイアススコアは 0.86, 捕捉率は 0.31, 空振り率は 0.63), 70 パーセンタイル値を用いた場合 (第 7 図) は飛雪流量閾値 = 5 の時に最高スレットスコア = 0.19 (バイアススコアは 0.89, 捕捉率は 0.30, 空振り率は 0.66) という成績を達成することが示された。

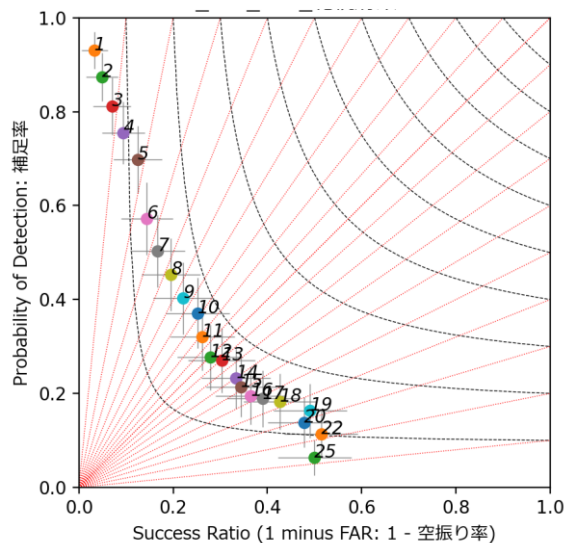
これらの結果から, 与えられたパーセンタイル値で計算される最高スレットスコアは, 80-90 パーセンタイル値付近に極大を持つ事が推察されるため, 危険度予測の閾値に関しては, 「パーセンタイル値は 80-90 パーセンタイル」で, そのパーセンタイル値に設定する閾値は「飛雪流量閾値 = 6-8」とするのが適切であると考えられる。これについては, 次節の後半で更に詳しく触れる。

3.2.3 飛雪流量の予測値

予報作業で飛雪流量を活用するためには, 前節



第 7 図 第 4 図と同様, ただし飛雪流量 70 パーセンタイル値で計算された予報成績。



第 8 図 第 4 図と同様, ただし飛雪流量最大値の予報値 (FT = 6 h) で計算され予報成績。

のような (時間的に過去に当たる) 解析値ではなく, 数値予報モデルによる予測値を用いる必要がある。しかし予測値に含まれる予測誤差は一般に予測期間の長期化に伴って増大するため, 上述の解析値に比べて予測期間を延伸するほど危険度予測の精度が悪化することが予想される。また, 予測誤差が系統的誤差 (バイアス) を持つ場合に

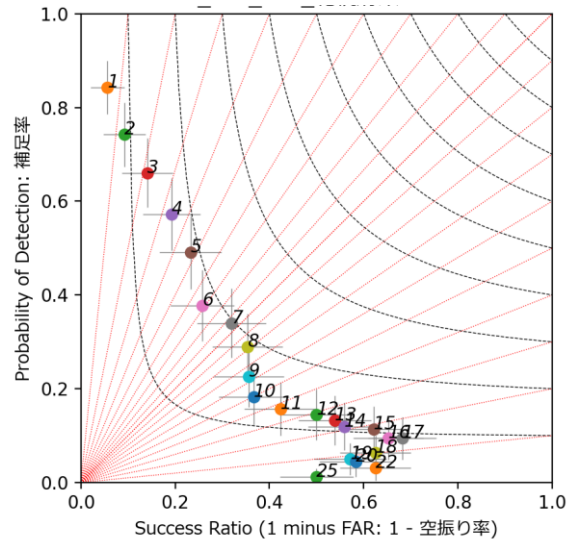
は、前節で吟味した適切なパーセンタイル値や閾値が予測期間に依存して変化することも考えられる。そこで本節では、このような予測期間の長期化に伴う危険度予測の精度の悪化や、適切な閾値の設定への影響について吟味する。

第 8 図は、予測期間 6 時間（以下「FT = 6 h」などと表記する。）の飛雪流量予報値の各ビン中の最大値を用いて計算したパフォーマンスダイアグラムである。解析値を用いた場合の結果（第 4 図）に比べて、スコアの分布が全体的に左下に変位している、すなわちスレットスコアが悪化している様子が示されている。また最も高いスレットスコアを達成するのは飛雪流量閾値 = 10 の場合で、スレットスコアは 0.18、バイアスコアは 1.5、捕捉率は 0.37、空振り率は 0.75 であった。

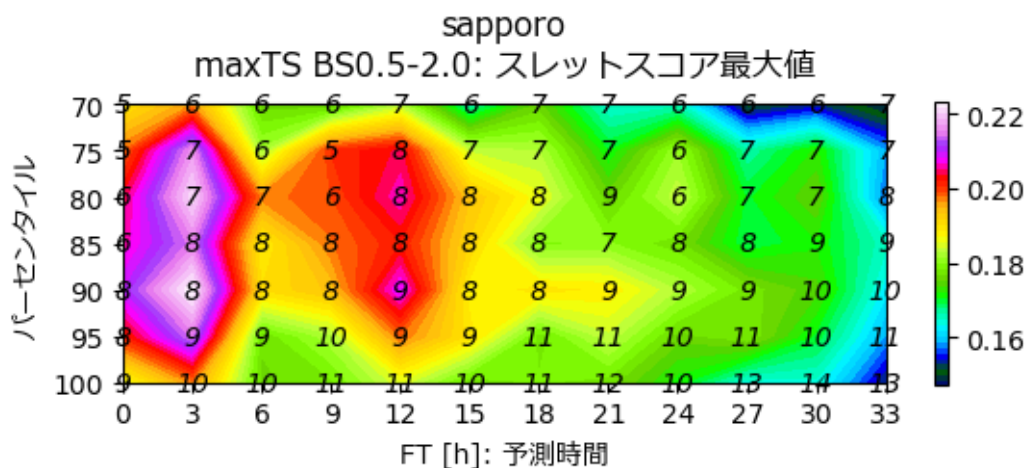
同様に第 8 図と同じ FT = 6 h の飛雪流量予報値の各ビン中 80 パーセンタイル値を用いて計算したパフォーマンスダイアグラム（第 9 図）では、最大値を用いた場合（第 8 図）に比べて、バイアスコア = 1 付近のスコアが若干ではあるが右上に変位しているのが見て取れる。最も高いスレットスコアを達成するのは飛雪流量閾値 = 7 の場合で、そのスレットスコアは 0.20（バイアスコアは 1.1、捕捉率は 0.34、空振り率は 0.68）と計算された。このように予測誤差が含まれる予測値

(FT = 6 h) を用いる場合でも、パーセンタイル値の使用により最大値を用いる場合に比べて災害との対応（危険度予測精度）が改善する事が示された。

FT = 6 h 以外についても、任意の予測期間（横軸）と任意のパーセンタイル値（縦軸）の組み合わせでスコアの計算を行い、スレットスコアの最



第 9 図 第 4 図と同様、ただし飛雪流量 80 パーセンタイル値の予報値 (FT = 6 h) で計算された予報成績。



第 10 図 飛雪流量のパーセンタイル値 (縦軸) と予測時間 (横軸) で計算されたパフォーマンスダイアグラムにおけるスレットスコアの最大値 (ただしバイアスコアが 0.5 より大きく 2.0 未満の範囲が対象)。図中のイタリックの数字は最大のスレットスコアを達成した飛雪流量閾値。

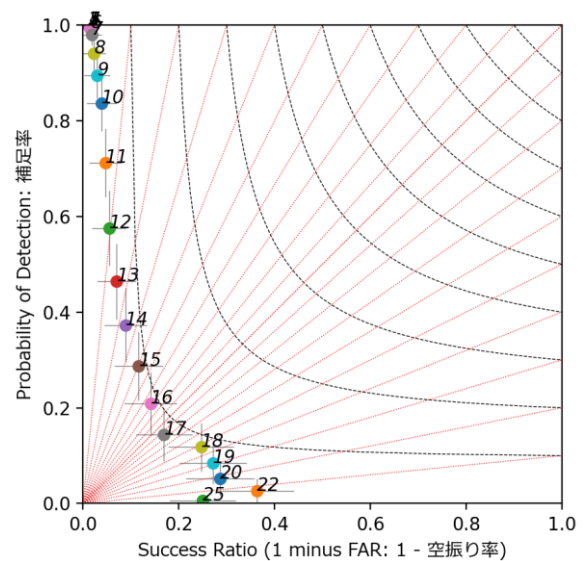
大値及びそのスレットスコアを達成する飛雪流量閾値の値に注目してまとめた結果を第 10 図に示す。全体的な特徴として図を横方向に見ると、 $FT = 0$ h (すなわち解析値) でスレットスコアは 0.20 以上と高く、 $FT = 15$ h では 0.19 程度、 $FT = 30$ h では 0.18 以下と、予測期間の長期化による飛雪流量の予測誤差の増大に伴って、成績が悪化していく様子が示されている。 $FT = 0$ h よりも $FT = 3$ h の方がスレットスコアが高い理由は不明であるが、解析値の算出の際に実況値を取り込む事によりデータ特性が変化するのもかもしれない。 $FT = 12$ h にスレットスコアの極大が見られる点もまた原因不明であるが、17 時予報前後に最大リードタイム 12 h で注意報を発出する事や早期注意情報 (警報級可能性) の発表が道路管理者の通行止め判断に影響を与えているのかもしれない。

一方で図を縦方向に見ると、解析値である $FT = 0$ h も含めておおむね全ての予測期間において、100 パーセント値 (つまり最大値) を用いた場合は比較的スレットスコアが低く、パーセンタイルの数値を下げることに伴ってスレットスコアが向上して 90 パーセントから 80 パーセント値を用いる場合に極大を取り、70 パーセントでは再びスレットスコアが低下するという特徴が示されている。さらに、その 80 あるいは 90 パーセントにおいてスレットスコア最大値を達成する飛雪流量閾値に注目すると、予測期間に関わらずおおむね 6-8 の値となっている。

このように任意の予測期間の予測値を用いた場合でも、解析値 (3.2.2 節) から得られた「飛雪流量の 80-90 パーセント値に対して、飛雪流量閾値 = 6-8 とするのが適切である」という結論は有効であることが示された。

3.2.4. 風速を用いた成績との比較

本節では、ここまでの結果と比較するために、飛雪流量に代わって風速のみを利用した場合の危険度予測精度を確認する。風速データは、予報作業で用いられるガイダンス予測値 ($FT = 3$ h - 15 h まで) や、アメダスの観測値を災害データや飛雪流量値と同様のピンに格納してパフォーマンス



第 11 図 第 4 図と同様、ただし領域日最大風速で計算された予報成績。

ンスダイアグラムを作成することで行った。

アメダス観測値を用いた場合に計算されたパフォーマンスダイアグラムを第 11 図に示す。閾値の増加に伴ってスコアがダイアグラムの左上から右下に遷移していく点は飛雪流量による結果 (第 4 図から第 9 図) と同様であるが、より双極線的な分布となっている。例えば、バイアスコア = 1 付近で最も高いスレットスコアを達成する風速閾値 = 16 の場合、スレットスコアは 0.09、バイアスコアは 1.5、捕捉率は 0.21、空振り率は 0.86 と計算された。このスコアは、飛雪流量解析値 (最大値) を用いた場合のスレットスコア (= 0.19) はもちろん、 $FT = 12$ h の飛雪流量予測値 (最大値) を用いた場合のスレットスコア (= 0.12) よりも低いスレットスコアであり、捕捉率や空振り率など他のスコアと比較しても、悪い成績となっている。

また、風速のガイダンス予測値を用いた場合の成績は、風速のアメダス観測値を用いた結果 (第 11 図) よりも、さらに悪い成績であった (図省略)。これらの結果から、風速のみを用いるよりも飛雪流量を活用する方が吹雪の危険度予測の精度を向上できると考えられる。

4. 今後に向けて

札幌管区気象台では飛雪流量値の平面図及び帳票表示アプリを作成(池上ほか, 2020)し, 石狩・空知・後志地方の予報作業への試験的な導入を進めてきた。2023年度は, 北海道全域の予報区において本稿で紹介した飛雪流量による吹雪の危険度予測精度の評価作業に取り組んでいる。その結果によっては北海道全域での飛雪流量を用いた暴風雪警報発表判断の改善を図り, さらに将来的には東北地方や北陸地方などへの展開も可能性があると考えている。

上記のような飛雪流量を用いて暴風雪警報の発表判断を改善するだけでなく, 暴風雪警報の発表基準の最適化を図ることも重要である。すなわち現行の「風速と視程障害の有無による基準」ではなく飛雪流量値を活用した基準を整備することで, 吹雪災害に関する防災気象情報の発表を指数化・改善できる可能性がある。

飛雪流量の推定手法を精緻化する事も今後取り組むべき課題である。飛雪流量は降雪粒子に加えて地吹雪による飛雪粒子も含まれる(第2式の第2項)。この地吹雪による飛雪粒子量は, 積雪面の状態を決定する気象要素(降雪終了後の経過時間, 気温履歴, 積算日射量)によって変化する(例えば, 武知ほか, 2013)。本研究及び札幌管区気象台に導入している飛雪流量表示アプリでは計算式として第2式を用いており, 第2項は雪面状態を考慮していない。しかし将来的に, 雪面状態を推定したデータ(例えば, 積雪変質モデル「SMAP (Snow Metamorphism and Albedo Process); Niwano *et al.*, 2012」など)を飛雪流計算に取り込むことができれば, 吹雪の危険度予測精度をさらに向上できると考えられる。また飛雪流量計算値を直接評価する方法としては, 視程の観測値や視程ガイダンス値との比較を行うことも有効であると考えられる。

5. まとめ

風速に加えて雪による視程障害を発表基準に持つ暴風雪警報に関して, 視程障害の客観的なデータを得ることは難しく, その運用には高度な気

象予測技術が求められている。札幌管区気象台では視程障害に関する客観的指標の候補として飛雪流量を活用する研究を行ってきた。本調査では, 2012年冬季から2021年冬季までの10年間について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/無と飛雪流量値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という成績が見込まれた。さらに, 最大値ではなくパーセンタイル値を用いることで, 計算結果のロバストネスが向上することが示された。特に, 80-90パーセンタイル値を使用する場合が最も成績が良いこと(スレットスコアが0.21に改善), さらにその成績を達成する飛雪流量閾値は6-8であることが示された。

予測期間の長期化に伴う飛雪流量の予測誤差の増大によって吹雪災害との対応(危険度予測精度)の悪化が示された一方で, 任意の予測期間において成績を最大化するパーセンタイル値やそれに設ける閾値は, 予測期間に依存して系統的に変化するような特性は見られなかった。また, 危険度予測精度は, 飛雪流量の方が風速のみの場合よりも全てのスコアで優っていることが示された。

本研究をとおして, 暴風雪警報の基準の一部である雪による視程障害に関する客観的指標として飛雪流量が有効であり, これを活用する事で吹雪の危険度予測を効果的に行える可能性が示された。飛雪流量は, 将来的な暴風雪警報運用において活用が期待できることに加えて, 吹雪による危険度の高まりを効果的に社会に伝える手段としても活用することができるのではないかと期待している。

謝辞

北海道開発局, 北海道, 札幌市には交通障害に関するデータを提供していただきました. 本調査にあたり土木研究所寒地土木研究所の雪氷チームの皆様には建設的な意見や有益なアドバイスをいただきました. また 2010 年度以降札幌管区気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 (特に 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た倉橋永氏, 池上慶希氏) に感謝申し上げます. 本稿の執筆にあたり札幌管区気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.

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.
- 気象庁予報部 (2018): 天気予報ガイドランスの解説. 数値予報課報告・別冊第 64 号, https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/nwpreport/64/No64_all.pdf. 2022 年 11 月 11 日閲覧.
- 國次雅司 (1997): カルマンフィルターを用いた天気予報ガイドランス, 天気, 44, 6, 日本気象学会, 37-41.
- 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
- 松澤勝, 竹内政夫 (2002): 気象条件からの視程を推定する手法の研究. 雪氷, 64, 77-85.
- 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.
- Niwano, M., Aoki, T., Kuchiki, K., Hosaka, M. and Kodama, Y. (2012): Snow Metamorphism and Albedo Process (SMAP) model for climate studies: Model validation using meteorological and snow impurity data measured at Sapporo, Japan. *J. Geophys. Res.*, **117**, F03008, doi:10.1029/2011JF002239.
- 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.
- Roebber, P. J. (2009): Visualizing multiple measures of forecast quality. *Weather Forecast.*, **24**, 601-608.
- 雪氷チーム (2016): 飛雪流量の計測方法について. 寒地土木研究所月報, 761, 48-50.
- 武知洋太, 川中敏朗, 松澤勝, 金子学 (2013): 地吹雪発生時の気象条件に関する調査, 寒地土木研究所月報, 719, 42-49.
- 竹内政夫, 福沢義文 (1976): 吹雪時における光の減衰と視程. 雪氷, 38, 165-170.
- 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.

警報・注意報発表基準一覧表

(札幌管区気象台管内)

令和4年5月26日現在

発表官署		札幌管区気象台			
札幌管区		石狩・空知・後志地方		後志地方	
一次細分区域		空知地方		後志北部	
市町村等をまとめた地域		石狩北部	石狩中部	北空知	南空知
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			
警	暴風(平均風速)	陸上 18m/s、海上 25m/s	18m/s ^{*1}	18m/s	陸上 18m/s、海上 25m/s
	暴風(平均風速)	陸上 16m/s、海上 25m/s	16m/s ^{*2}	16m/s	陸上 16m/s、海上 25m/s
	暴風(平均風速)	雪による視程障害を伴う	雪による視程障害を伴う	雪による視程障害を伴う	雪による視程障害を伴う
報	大雪	平地 6時間降雪の深さ30cm あるいは 12時間降雪の深さ40cm、 山間部 12時間降雪の深さ50cm	12時間降雪の深さ50cm	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	6.0m	6.0m
	大潮				
	洪水				
	強風(平均風速)	陸上 13m/s、海上 15m/s	13m/s ^{*3}	12m/s	陸上 13m/s、海上 15m/s
	風雪(平均風速)	陸上 11m/s、海上 15m/s	11m/s ^{*4}	10m/s	陸上 11m/s、海上 15m/s
	大雪	平地 12時間降雪の深さ20cm、 山間部 12時間降雪の深さ30cm	12時間降雪の深さ30cm	12時間降雪の深さ30cm	12時間降雪の深さ30cm
注	波浪(有義波高)	3.0m	3.0m	3.0m	3.0m
	大潮				
	雷				
意	濃霧(視程)	陸上 200m、海上 500m	200m	200m	陸上 200m、海上 500m
	乾燥				
報	なだれ				
	低温				
	霜				
	灌水	船体着氷:水温4℃以下 気温-5℃以下で風速8m/s以上			船体着氷:水温4℃以下 気温-5℃以下で風速8m/s以上
	着雪				
記録的短時間大雨情報(1時間雨量)		100mm			
		80mm			

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

別添 1 石狩・空知・後志地方の警報・注意報発表基準、気象庁ホームページ

(https://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/kijun/sapporo/0_sapporo.pdf) より。

▲	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
1	データNo	事例No	開始年	開始月	開始日	開始時分	終了年	終了月	終了日	終了時分	災害種別	情報源1	情報源2	運送No	運送No	気圧配置	災害レベル	石狩	当別	新篠津	札幌	江別	千歳	恵庭	北広島	深川
2	466	213	2022	2	21	2200	2022	2	22	600	気象庁	/	/	274	/	冬型	警報	0	0	0	0	0	1	0	0	1
3	465	213	2022	2	21	2200	2022	2	22	600	気象庁	/	/	337	/	冬型	警報	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	464	213	2022	2	21	2200	2022	2	22	600	気象庁	/	/	337	/	冬型	警報	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	463	213	2022	2	21	2200	2022	2	22	600	気象庁	/	/	337	/	冬型	警報	0	0	0	0	0	1	0	0	0
6	462	213	2022	2	21	2200	2022	2	22	600	気象庁	/	/	337	/	冬型	警報	0	0	0	0	0	0	1	0	0
7	461	213	2022	2	21	1730	2022	2	22	1700	気象庁	/	/	337	/	冬型	警報	0	0	0	0	0	0	1	0	0
8	460	213	2022	2	21	1500	2022	2	22	1200	気象庁	/	/	58	58	冬型	警報	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	459	213	2022	2	21	1500	2022	2	22	1200	気象庁	/	/	66	66	冬型	警報	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	458	213	2022	2	21	930	2022	2	22	800	気象庁	/	/	478	478	冬型	警報	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	457	213	2022	2	21	930	2022	2	21	1700	気象庁	/	/	393	393	冬型	警報	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	456	213	2022	2	21	900	2022	2	21	1730	気象庁	/	/	276	276	冬型	警報	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	455	213	2022	2	21	730	2022	2	21	1200	気象庁	/	/	998	998	冬型	注警報	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	451	213	2022	2	21	600	2022	2	22	1230	気象庁	/	/	453	453	冬型	警報	0	0	0	0	0	0	1	0	0
15	454	213	2022	2	21	600	2022	2	21	1150	気象庁	/	/	508	508	冬型	警報	1	0	0	0	1	0	0	0	0
16	453	213	2022	2	21	600	2022	2	21	1130	気象庁	/	/	337	337	冬型	警報	1	1	0	0	1	0	0	0	0
17	452	213	2022	2	21	600	2022	2	21	1130	気象庁	/	/	337	337	冬型	警報	0	0	0	0	0	1	0	0	0
18	450	213	2022	2	21	540	2022	2	21	1900	気象庁	/	/	1121	1121	冬型	警報	0	0	0	1	0	0	0	0	0
19	449	213	2022	2	21	531	2022	2	22	700	気象庁	/	/	139	139	冬型	警報	0	0	0	1	0	0	0	0	0
20	448	213	2022	2	21	530	2022	2	21	1030	気象庁	/	/	275	275	冬型	警報	0	1	0	0	0	1	0	0	0
21	447	213	2022	2	21	500	/	/	/	/	事故	災害報告	/	/	/	冬型	注警報	0	1	0	0	0	0	0	0	0
22	446	213	2022	2	20	2330	2022	2	21	1030	気象庁	/	/	231	231	冬型	警報	1	0	0	0	0	0	0	0	0
23	445	213	2022	2	20	2100	2022	2	22	1000	気象庁	/	/	276	276	冬型	警報	0	0	0	0	0	0	1	0	0
24	444	213	2022	2	20	2000	2022	2	22	600	気象庁	/	/	337	337	冬型	警報	0	0	0	0	0	0	0	0	0

別添 2 災害データベースの一部、2022年2月21日について通行止めに関するデータが市町村と対応付けながら
まとめられている。また当日の通行止めの状況は北海道開発局のプレスリリース

(<https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/release/slo5pa00000050th-att/slo5pa0000000h1q1.pdf>) にまとめられている。