

4.2 暴風雪による吹雪視程障害予測技術の開発に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：寒地道路研究グループ（雪氷）

研究担当者：松澤勝、西村敦史、國分徹哉、
武知洋太、原田裕介、大宮哲

【要旨】

近年、急激に発達した低気圧の影響により、今まで吹雪の発生頻度が低かった地域でも、吹雪による交通障害が発生するようになってきている。防雪柵や防雪林等の対策施設の整備には、多くの時間と費用が必要となるほか、激甚な吹雪事象への対応には限界がある。そこで本研究では、吹雪時に道路利用者の行動判断を支援することで吹雪災害を減災することを目的として、視程を予測する技術を開発し、道路利用者にインターネットを通じて視界情報を提供する実験を行った。

その結果、情報提供したホームページへのアクセス数が、暴風雪警報時に顕著に増加しており、視界情報の利用者が行動判断に活用していることが伺える結果となった。

キーワード：吹雪、視程障害、予測、情報提供

1. 研究の背景

我が国の積雪寒冷地の道路では、冬期に吹雪視界不良による交通障害がしばしば発生するなど、厳しい走行環境にある。このため、防雪施設（防雪柵、防雪林など）の整備によるハード対策が進められており、被害の軽減に効果を上げてきている。しかし、近年、急激に発達した低気圧の影響により、今まで吹雪の発生頻度が低かった地域でも、吹雪災害が発生するようになってきている。しかし、ハード対策施設の整備には多くの費用と時間が必要となる他、極端な暴風雪への対応には限界がある。早急かつ効果的な吹雪災害の被害軽減には、従来のハード対策に加えて、吹雪の現況及び予測情報を提供するソフト対策を行うことが必要である。

そこで本研究では、気象データを用いて吹雪時の視程を予測する技術を開発した。さらに、インターネットを通じて道路利用者に情報提供するシステムを構築し、試験運用を通じて、吹雪時の道路利用者の判断を支援するとともに、暴風雪による吹雪視程障害の被害軽減を図ることとした。

2. 研究概要と成果

2.1 気象等の履歴を考慮した吹雪発生条件の解明

吹雪時の視程を気象条件（風速や気温等）から推定する場合、前提条件として吹雪発生の有無を正確に判別することが重要である。降雪時については、吹雪の発生と

風速や気温との関係（吹雪発生条件）が竹内らにより整理されている¹⁾。しかし、降雪が無い場合については、吹雪（以下、降雪がない場合の吹雪を地吹雪と呼ぶ）の発生条件は、地吹雪の発生源となる雪面の状態に影響を及ぼす様々な要因が複雑に関係することから、地吹雪の発生条件は研究者によってかなり異なる。

そこで本研究では、当研究所が石狩市に所有する実験施設（石狩吹雪実験場）、北海道北部日本海側の初山別村を走る一般国道 232 号、及びオホーツク海側の猿払村を走る一般国道 238 号の路側において、平成 23 年 12 月より平成 25 年 4 月までの 2 冬期間に地吹雪の発生状況と気象条件に関するデータ、吹雪時の動画映像及び気温、風向風速、日射量、視程の気象データの蓄積を行った（図-1）。

なお、地吹雪の発生条件を分析する際には、降雪の有無を正確に判定することが非常に重要となる。このため、高さ 5m における飛雪流量の計測を併せて行い、降雪の有無を判別した。

次に、取得したデータを用い、地吹雪の発生臨界風速に寄与する気象条件について分析を行った。その結果、降雪終了後の経過時間 (h)（以下、経過時間と呼ぶ）や降雪終了後の積算日射量 (MJ/m²)（以下、積算日射量と呼ぶ）の増加とともに地吹雪が発生する臨界風速は高くなる傾向が見られることを把握した。

これは、降雪直後の雪粒子同士は結合が弱い、時間

とともに雪粒子間の結合が強まり²⁾、地吹雪が発生し難くなるためと考えられる。しかし、このような雪面の雪粒子間の結合状態は、経過時間 (h) や積算日射量 (MJ/m²)、気温など複数の気象の履歴条件が寄与していると考えられる。また、地吹雪発生の有無には、供給される雪面の雪粒子の量も寄与していることが考えられる。

そこで、地吹雪が発生する気象条件をこれらの複数の気象条件から明らかとするため、地吹雪発生の有無について次の通り複数の気象条件を説明変数とした判別分析を実施した。

一般国道 232 号路側 (初山別村)



一般国道 238 号 (猿払村)



図-1 地吹雪発生状況の撮影と気象観測状況

2.1.1 無降雪時の地吹雪発生条件の分析データ準備

地吹雪の発生事例をできるだけ正確に把握するため、分析では、降雪有無の判断に高さ 5m での飛雪流量が活用できる平成 24 年度冬期のデータを対象とした。

地吹雪発生の有無は、動画映像を基に、地表面を雪が移動する「低い地吹雪」、人の視線高さまで雪が舞い上がる断続的な「高い地吹雪」、「連続的な高い地吹雪」が確認できる「地吹雪あり」と「地吹雪なし」の 4 種類に分類し、10 分毎に行った。

なお、地吹雪発生の有無は、映像が判読できる日中のみ行った。

降雪有無は、動画映像及び高さ 5m で計測した飛雪流量により判別した。

また、地吹雪発生や雪面の雪粒子の結合などに影響を及ぼしていると考えられる表-1 に示す気象データを併せて整理した。

表-1 地吹雪発生判別分析に利用した気象条件

気象条件	記号	単位
現況の風速	U	m/s
現況の気温	T	°C
降雪終了後の経過時間	t	h
降雪終了後の最高気温	Tmax	°C
降雪終了後の最大風速	Umax	m/s
降雪終了後の毎時風速の4乗値の毎時での積算値 × 10 ⁻³	Usum	m ⁴ /s ⁴
降雪終了後の日射量の積算値	Sol	MJ/m ²
降雪終了直前の降雪イベントでの降雪深の差	ΔSD	cm
降雪終了直前の降雪量 (降雪深) の積算値	SF	cm

2.1.2 無降雪時の地吹雪発生条件の分析

判別分析を実施する前に、地吹雪発生時の臨界風速への影響が確認された経過時間 t に着目し、経過時間の階級毎に地吹雪発生が確認された事例数の全事例数に対する割合 (地吹雪発生事例の割合) を、風速階級別に整理し図-2 に示した。

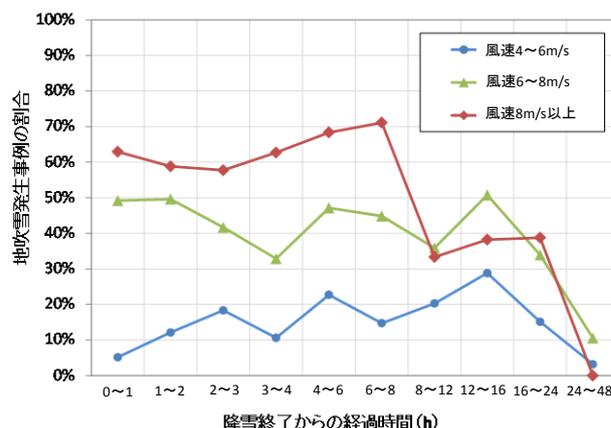


図-2 降雪終了後の経過時間と地吹雪発生事例の割合

その結果、風速 8m/s 以上の場合には、経過時間 t が 8 ~ 12 時間の階級において地吹雪発生事例の割合が大きく低下する傾向が見られた。このことから、降雪終了後の経過時間 t が概ね 8 ~ 12 時間を境界として地吹雪発生の臨界風速に与える影響度が異なることが考えられる。

そこで、判別分析は、ステップワイズ法などにより表-1 に示す気象条件について変数選択を行った後に、降雪終了からの経過時間 t が 12 時間未満の場合と 12 時間以上の場合に区分し実施した。

なお、現況の風速 U が 3m/s 未満、現況の気温 T が 2°C 以上、降雪終了後の経過時間 t が 48 時間以上、降雪終了後の最高気温 Tmax が 2°C 以上の場合 (全て or 条件である) には、その他の着目した気象条件に関わらず地吹雪の発生事例がほとんど見られなかった。このため、これ

らの気象条件に一致するデータは判別分析の対象から除外した。

このような条件で判別分析を行った結果、経過時間が $t < 12$ (h) の場合には式 (1) に示す判別式、 $t \geq 12$ (h) の場合には式 (2) に示す判別式が得られた。これらの式は D が 0 未満の場合に地吹雪が発生することを示す判別式である。

$t < 12$ (h) の場合

$$D = -0.59U + 0.2T - 0.08SF + 4.77 \quad \dots (1)$$

$t \geq 12$ (h) の場合

$$D = -1.18U + 0.16T + 0.09t + 0.03U_{sum} + 4.93 \quad \dots (2)$$

ここで、

- U : 高さ 10m の現況の風速 (m/s)
- T : 現況の気温 (°C)
- SF : 降雪終了直前の降雪量の積算値 (cm)
- t : 降雪終了後の経過時間 (h)
- Usum: 降雪終了後の毎時風速の 4 乗値の積算値 $\times 10^{-3}$

次に、得られた 2 つ判別式の精度を確認するため、無降雪時の地吹雪発生の有無について適中率、スレッドスコア、一致率、見逃し率、空振り率を表-2 に示す定義に基づいて表-3 に示す通り整理した。

表-3 より、得られた 2 つの判別式により無降雪時の地吹雪発生の有無を適中率 92.3% と高い精度で判別できることを確認した。

表-2 精度評価指標の定義

データ数		推定	
		あり	なし
観測	あり	A	B
	なし	C	D

適中率	$(A+D)/(A+B+C+D)$
スレッドスコア	$A/(A+B+C)$
一致率	$A/(A+C)$
見逃し率	$B/(A+B+C+D)$
空振り率	$C/(A+B+C+D)$

表-3 無降雪時の地吹雪判別条件の判別精度

データ数		推定		適中率	92.3%
		あり	なし		
観測	あり	780	352	スレッドスコア	43.1%
	なし	677	11611	一致率	53.5%
				見逃し率	2.6%
				空振り率	5.0%

2.2 吹雪視程障害の予測技術の開発

2.2.1 吹雪視程障害の予測技術の改良

当研究所では、これまでの研究において気象データ (降雪強度、風速、気温) から吹雪時の視程を推定する手法を開発している³⁾⁴⁾。この手法では、まず式 (3) より降雪強度と風速から飛雪空間密度 N (g/m^3) を求める。式 (3) の右辺の第 1 項は降雪による飛雪空間密度を、第 2 項は地吹雪による飛雪空間密度を表わす。本研究では、ドライバーの視点高さを想定し道路構造令の値 $z = 1.2$ m で計算する。

$$N(z) = \frac{P}{w_f} + \left(N_t - \frac{P}{w_f} \right) \left(\frac{z}{z_t} \right)^{-\frac{w_b}{kU_*}} \quad \dots (3)$$

ここで

- P ($g/(m^2s)$) : 降雪強度
- w_f (m/s) : 降雪粒子の落下速度 (=1.2m/s)
- w_b (m/s) : 浮遊粒子の落下速度 (=0.21m/s)
- z (m) : 高さ (=1.2m)
- z_t (m) : 基準高度 (=0.15m)
- N_t (g) : 基準高度 z_t における飛雪空間密度
- [降水 (雪) 強度 ≥ 0.4 mm/h] $N_t = 0.116 \times e^{0.309V_{10}}$
- [降水 (雪) 強度 < 0.4 mm/h] $N_t = 0.021 \times e^{0.401V_{10}}$
- ただし、 V_{10} は、高さ 10m での風速
- U_* (m/s) : 摩擦速度 (=0.036 $\times V_{10}$)
- ただし、 V_{10} は、高さ 10m での風速
- k : カルマン定数 (=0.4)

次に、式 (3) の飛雪空間密度 N (g/m^3) と、地上高 1.2m の風速 $V_{1.2}$ (m/s) を式 (4) に代入し、飛雪流量 M_f ($g/(m^2s)$)、1 秒間に単位面積の断面を通過する雪粒子の質量) を求める。さらに、式 (4) の飛雪流量 M_f を式 (5)⁵⁾ に代入し、視程値 V_{is} (m) を求める。

$$M_f = N \times V_{1.2} \quad \dots (4)$$

$$V_{is} = 10^{-0.886 \times \log(M_f) + 2.648} \quad \dots (5)$$

この手法を用いた視程推定を行う際には、降雪が無い場合の吹雪の発生条件が解明されていなかったため、便宜的に降雪を伴う吹雪の発生条件を用いていた。このため、降雪がなく積雪深がない、もしくは雪面が硬く風が強くても吹雪が発生していない場合にも視程の低下を推定してしまう場合がある等の課題が残されていた。また、降雪強度に相当する気象データとして降水強度を利用し

ているため、気温の高い初冬期や晩冬期には、降雨を降雪と誤って判断し視界不良と予測する恐れがあった。そこで、本研究において、従来の視程演算フロー（図-3の黒枠部分）に、地吹雪発生の判定及び雨雪判別の条件（図-3の青枠部分）と、2.1節で分析した地吹雪の発生条件（図-3の赤枠部分）を追加し、吹雪視程障害の予測精度の向上を図った。

図-3の青枠部分については、既往の研究³⁾により、地吹雪の発生する気温が2℃以下とされていることから、気温2℃で地吹雪発生を判別し、さらに、雨雪判別については、気温3℃で判別することとした。

図-3の赤枠部分については、2.1節において地吹雪の発生事例がほとんど見られなかった「現況風速Uが3m/s未満、現況気温Tが2℃以上、降雪終了後の経過時間tが48時間以上、降雪終了後の最高気温Tmaxが2℃以上」

の気象条件のいずれかに合致した場合には、地吹雪の発生をなしと判定することとした。一方、これらの気象条件全てに合致しない場合には、経過時間tが12時間未満と12時間以上の場合に分けて、それぞれ2.1節で得られた2つの判別式により、地吹雪発生の有無を判定することとしている。そして、完成されたフローと、(3)から(5)式で示される視程推定手法を用いることにより、24時間先までの吹雪時の視程が推定できる「吹雪視程障害を予測する技術」の開発を行った（図-4）。

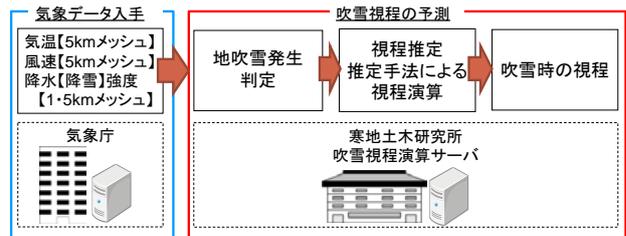
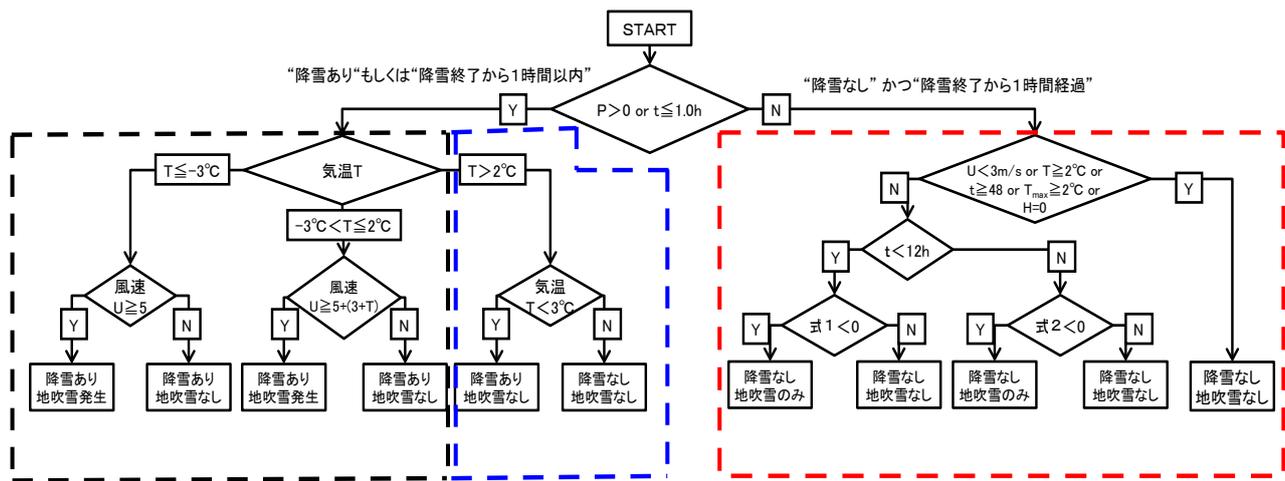


図-4 吹雪視程障害の予測技術の概略



P: 降水量 (mm)
 T: 現況気温 (°C)
 U: 高度10mの現況風速 (m/s)
 t: 降雪(水)終了からの経過時間 (h)
 H: 積雪深 (m)

$t < 12$ (h) の場合 $D = -0.59U + 0.20T - 0.08SF + 4.77 \dots (1)$
 $t \geq 12$ (h) の場合 $D = -1.18U + 0.16T + 0.09t + 0.03U_{sum} + 4.93 \dots (2)$
 ここで、U: 現況風速 (m/s)、T: 現況気温 (°C)、SF: 降雪終了迄の降雪量 (cm)、
 Usum: 降雪終了後の毎時風速の4乗積算値 / 1000、t: 降雪終了後の経過時間 (h)

図-3 視程演算フロー（地吹雪判定フロー） ※ 飛雪空間密度の計算項目を判定

2.2.2 吹雪視程障害の予測技術の精度検証

2.2.1 項で改良した吹雪視程障害の予測技術を利用して、北海道内4箇所（石狩市、初山別村、猿払村、弟子屈町）で現地観測した気温、風速及び解析雨量データを入力値として演算を行った視程推定値と、視程計で実測した視程とを比較し精度検証を行った。

適中率検証は、吹雪時のドライバーの運転挙動に関する研究成果⁵⁾をもとに、視程を“100m未満”、“100～200m”、“100～500m”、“500～1000m”、“1000m以上”の5ランクに区分して行った。また、適中精度は表-4の様に整理し、“空振り”、“1ランク空振り”、“完全適中”、“1ランク見逃し”、“見逃し”を求めた。

その結果、吹雪視程演算の完全適中率は84%以上と、高い精度で予測できることを確認した(図-5)。

2.3 吹雪視程障害予測に関する情報提供技術の開発

暴風雪時におけるドライバーの行動判断を支援するため、平成20年度からインターネットサイト「吹雪の視界情報」において、北海道内の視界情報（現況）の提供実験を行ってきた。本研究では、道路利用者には有益な情報を集約した「吹雪の視界情報ポータルサイト」を開発し、そのコンテンツの一つとして、視界の予測情報の提供を平成24年度から行った。

この「吹雪の視界情報ポータルサイト」は、(1)吹雪の視界情報、(2)吹雪の投稿情報、(3)冬期道路の距離と時間検索、(4)気象警報・注意報、(5)道路通行止め情報等を集約したもので、平成25年2月1日から運用を行っている(図-6)。なお、吹雪視程障害予測に関しては、2.2節で開発した視程演算フローで運用を行っている。

表-4 吹雪視程の適中率

			吹雪時の視程推定					総計
			1	2	3	4	5	
			100未満	100～200m	200～500m	500～1000m	1000m以上	
現地観測の視程	1	100未満	<i>n</i> 11	<i>n</i> 12	<i>n</i> 13	<i>n</i> 14	<i>n</i> 15	
	2	100～200m	<i>n</i> 21	<i>n</i> 22	<i>n</i> 23	<i>n</i> 24	<i>n</i> 25	
	3	200～500m	<i>n</i> 31	<i>n</i> 32	<i>n</i> 33	<i>n</i> 34	<i>n</i> 35	
	4	500～1000m	<i>n</i> 41	<i>n</i> 42	<i>n</i> 43	<i>n</i> 44	<i>n</i> 45	
	5	1000m以上	<i>n</i> 51	<i>n</i> 52	<i>n</i> 53	<i>n</i> 54	<i>n</i> 55	<i>n</i>

$$\text{空振り} = (n_{31} + n_{41} + n_{42} + n_{51} + n_{52} + n_{53}) / n$$

$$\text{1ランク空振り} = (n_{21} + n_{32} + n_{43} + n_{54}) / n$$

$$\text{完全適中} = (n_{11} + n_{22} + n_{33} + n_{44} + n_{55}) / n$$

$$\text{1ランク見逃し} = (n_{12} + n_{23} + n_{34} + n_{45}) / n$$

$$\text{見逃し} = (n_{13} + n_{14} + n_{15} + n_{24} + n_{25} + n_{35}) / n$$

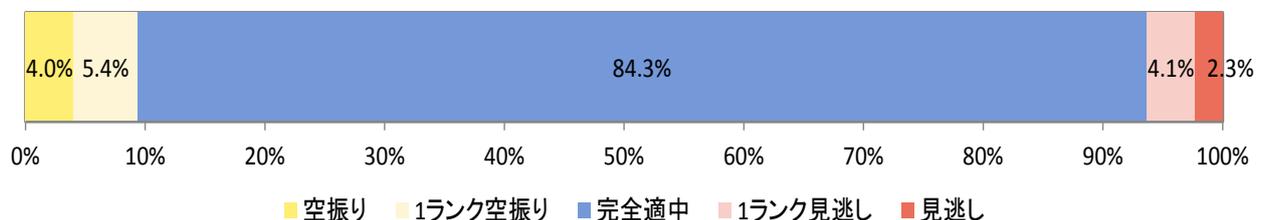


図-5 吹雪視程演算の適中率

4.2 暴風雪による吹雪視程障害予測技術の開発に関する研究

提供しているエリア区分については、北海道の市町村単位を基本とし、札幌市については区単位に細分化した221エリアごとに提供している。提供情報は現況と予測であり、予測は1~6時間先までは1時間ごと、それ以降は9、12、18、24時間先の情報となっている（図-6）。

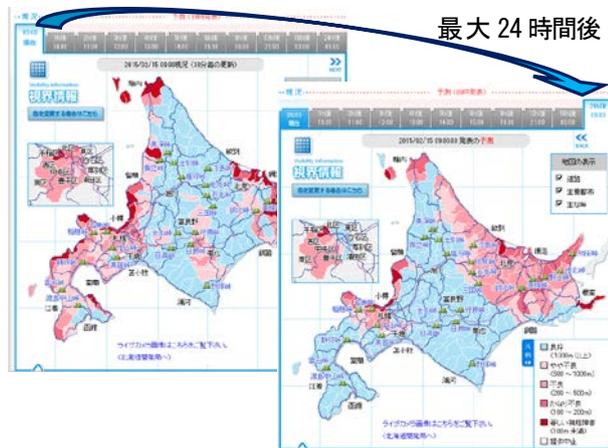


図-6 吹雪の視界情報のエリアと予測時間

吹雪の視界情報では、視程を精度検証で定義した5ランクに区分し、色分けして表示している（図-6、図-7）。

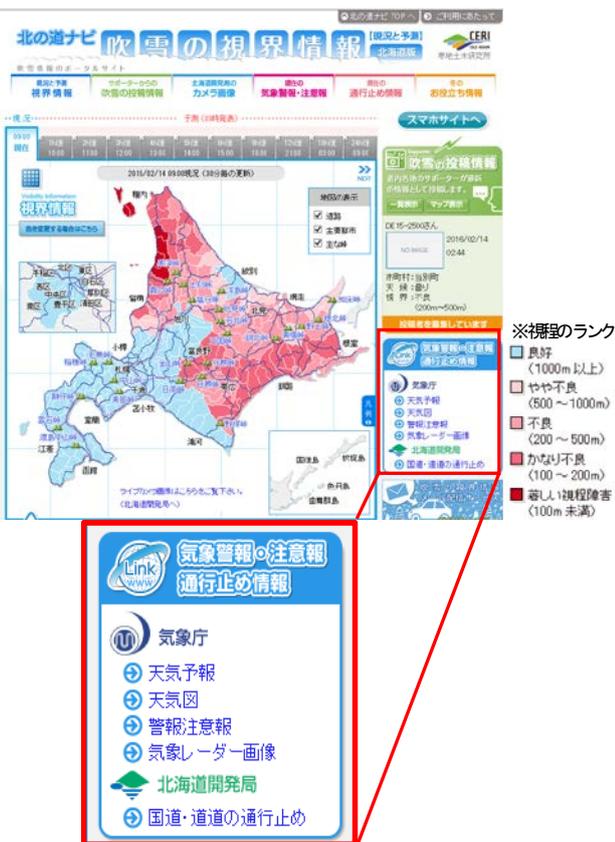


図-7 吹雪の視界情報ポータルサイト

URL : <http://northern-road.jp/navi/touge/fubuki.htm>

平成25年度からは、年々増加傾向にある移動中の利用者の利便性を向上させるため、スマートフォン版サイトを構築し、さらに新たにメールによる配信サービスを開始した（図-8）。

さらに、平成27年度は、暴風雪警報発表中の情報の使われ方を分析し、利用する頻度の高いリンク先をトップ画面に配置する改良を行った（図-7の赤枠部分）。



図-8 スマートフォン版サイトの構築とメール配信サービスの開始

インターネットサイト「吹雪の視界情報ポータルサイト」の日平均アクセス数は、平成22年度は426件、23年度は616件、24年度は1,119件、25年度は2,416件、26年度は4,200件と年々増加傾向にある。特に予測情報の提供を開始した平成25年2月以降の増加が顕著であった。平成27年度シーズンの1日ごとのアクセス数を図-9に示す。平成27年度は日平均で約3,000件のアクセスを記録している。さらに、気象庁が「数年に一度の猛吹雪の恐れ」と発表した平成28年2月29日には、今冬期最多の23,000件近いアクセス数となっている。天候悪化時のアクセス数の増加から、利用者が「吹雪の視界情報」を行動判断に活用していることが伺われる。

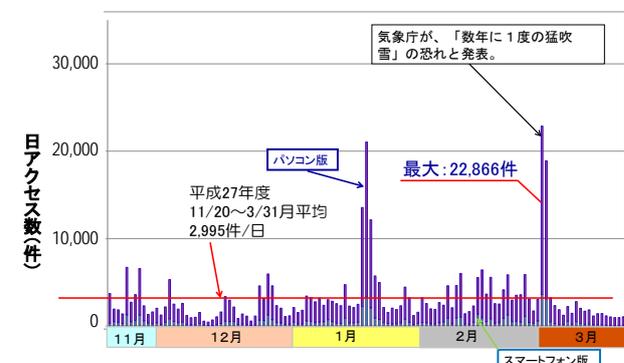


図-9 平成27年度「吹雪の視界情報」

アクセス数の推移

3. まとめ

本研究では、気象等の履歴を考慮した地吹雪の発生条件について明らかにし、吹雪視程障害の予測技術について開発を行った。開発した吹雪視程障害の予測技術により、推定された視程について精度検証を実施した結果、完全適中率は 84%以上と高い精度で予測できることを確認した。

また、吹雪時のドライバーへの安全支援に向けて、吹雪時の視界予測情報の提供を開始した。さらに、移動中の利便性を向上させるためにスマートフォン版サイトを構築し、メールによる配信サービスを開始した。その結果、暴風雪警報時にポータルサイトのアクセス数が顕著に増加する傾向がみられ、利用者が暴風雪時の行動判断に「吹雪の視界情報を活用していることが伺える結果となった。

参考文献

- 1) 竹内政夫ほか：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，日本雪氷学会，pp. 256, 1986
- 2) 前野紀一：吹雪の発生機構と雪の流動化，科学，岩波書店，pp. 34-41, 1982
- 3) 松澤勝ほか：気象条件から視程を推定する手法の研究，雪氷，64 巻第 1 号，pp. 77-85, 2002. 1
- 4) 松澤勝：吹雪時の視程推定手法の改良に関する研究，雪氷，69 巻第 1 号，pp. 79-92, 2007. 1
- 5) 武知洋太ほか：吹雪時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，No. 28，日本雪氷学会北海道支部，2009
- 6) 加治屋安彦ほか：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, (社)北海道開発技術センター，pp. 325-331, 2004. 10

RESEARCH ON THE TECHNOLOGY FOR POOR VISIBILITY ESTIMATE IN SEVERE SNOWSTORMS

Budget : Grants for operating expenses
General account

Research Period : FY2011-2015

Research Team : Cold-Region Road Engineering
Research Group
(Snow and Ice Research Team)

Author : MATSUZAWA Masaru
ATSUSHI Nishimura
KOKUBU Tetsuya
TAKECHI Hiroataka
HARADA Yusuke
OMIYA Satoshi

Abstract :

Winter low-pressure systems, which develop quickly, have been bringing snowstorms and resulting traffic hindrances more frequently than ever to areas where snowstorms had only rarely occurred. The installation of snowfences and snowbreak woods is cost-intensive and takes much time. In addition, these facilities may have limited effectiveness against disastrous snowstorms. This study aims to mitigate snowstorm disasters by supporting decision-making by road users at times of snowstorm. The authors developed a technology to forecast visibility and conducted an experiment in which visibility information was provided to road users by Internet.

The experiments clarified that the number of page views of the website that provides the visibility information markedly increased at times of snowstorm. This suggests that the road users use the visibility information in making their travel decisions.

Key words : snowstorm, snowstorm-induced poor visibility, forecasting, information provision