

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、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、吹雪時に道路管理者や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に視程を予測する技術を開発し、インターネットを通じて道路利用者に情報提供する実験を行った。

平成 26 年度は、無降雪時の地吹雪発生条件について検討し、視程演算フローを変更するなど、吹雪視程障害予測技術の改良を行った。そして視程予測情報提供実験を行うとともに、アンケート調査を実施し情報提供の効果を明らかにした。

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の整備が進められており、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おり、ハード対策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視程を予測する技術を開発し、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、試験運用を行うことにより、吹雪時の道路利用者の判断を支援し、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。

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

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)及び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3冬期間に吹雪の発生状況を記録した動画映像と気温、風向風速、日射量、視程の気象データを連続して記録を行い、地吹雪の発生状況と気象条件に関する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、平成24年度には降雪の有無を判別するため高さ5mにおける飛雪流量の計測を併せて行った。

過年度までの研究においては、石狩吹雪実験場、初山別村、猿払村において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個別での分析を行った。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²⁾が、時間とともに雪粒子間の結合が発達し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、地吹雪の発生には、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、平成26年度は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、複数の気象条件を説明変数とし地吹雪発生の有無について次の通り判別分析を実施した。

2.1.1 無降雪時の地吹雪発生条件の分析データ準備

分析では、地吹雪の発生事例をできるだけ正確に把握するため、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。

地吹雪発生の有無の分類は、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」に分類を10分毎に行った。

なお、地吹雪発生の有無の分類は、映像が判読できる日中のみ行った。

降雪有無の分類は、高さ5mで計測した飛雪流量及び動画映像より同様に10分毎に行った。

表-1 地吹雪発生の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	
降雪終了後の経過時間	t	h
降雪終了後の最高気温	Tmax	
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 $\times 10^{-3}$	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	SD	cm
降雪終了直前の降雪量(降雪深)の積算値	SF	cm

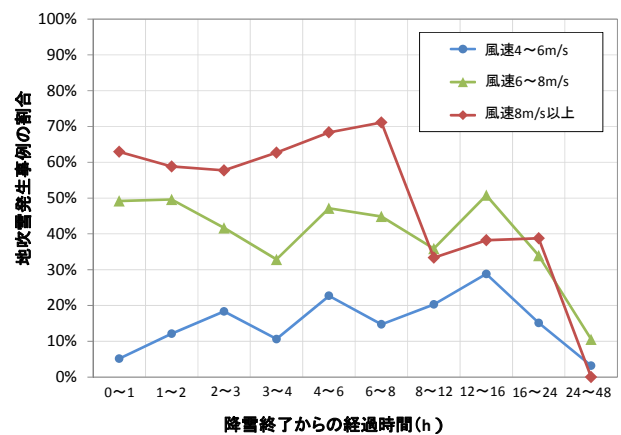


図-2 降雪終了後の経過時間と無降雪時の地吹雪発生事例の割合

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。

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、過年度までの研究において地吹雪発生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全事例数に対する地吹雪発生が確認された事例数の割合(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。

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の発生臨界風速への経過時間の影響度が異なることが考えられる。

そこで、判別分析は降雪終了からの経過時間 t が12時間未満の場合と12時間以上の場合に場合分けし、ステップワイズ法などによる変数選択をそれぞれ行った後に実施した。

なお、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 以上の場合には、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 $t < 12$ の場合には式 1 に示す判別式、 $t \geq 12$ の場合には式 2 に示す判別式が得られた。この式は N 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。

$t < 12$ の場合

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

$t \geq 12$ の場合

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

ここで、

- N : N < 0 で地吹雪が発生
- U : 現況の高さ 10m の風速(m/s)
- T : 現況の気温()
- SF : 降雪終了直前の降雪量 (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

表 - 2 適中率他の定義

		予報	
		あり	なし
実況	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

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

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 つ判別式により無降雪時の地吹雪の発生を適中率が 92.3% と高い精度で判別できることを確認した。

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/m³) 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 $z = 1.2m$ 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/(m²s)) : 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(2)の飛雪空間密度 N (g/m³) 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 Mf (g/(m²s)、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、さらに、式(4)の飛雪流量 Mf を式(5)⁵⁾に代入し、視程値 V_{is} (m) を求める。

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

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

本研究では過年度までに、必要な気象データをリアルタイムで入手し地吹雪発生の有無を判別するとともに、このような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-3)。また、開発した「吹

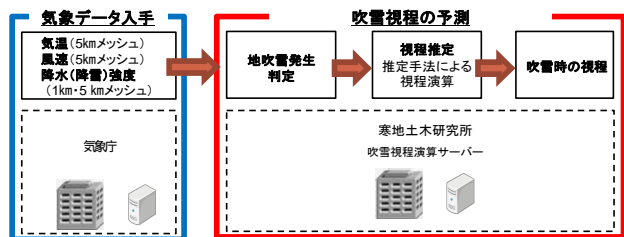


図 - 3 吹雪視程障害の予測技術の概略

「吹雪視程障害を予測する技術」で予測した視程の推定精度について検証を行った。

その結果、視程 200m 未満の吹雪視程障害が実際に発生した事例において、現地で実測された気象データより推定した視程に比べ、気象庁からの気象予測データより推定した視程で見逃しが増加する傾向を確認した⁶⁾。

この原因の1つに、開発した吹雪視程障害を予測する技術では、視程の推定高さを1.2mの一定に設定しており道路周辺の積雪や雪堤の上昇による高さの変化を考慮していないことが考えられる。そこで、平成26年度はリアルタイムで積雪深データを入手し積雪深の変化を考慮したドライバー目線高さでの視程の演算が行えるよう「吹雪視程障害を予測する技術」のプログラムについて改良を行った。さらに、2.1節で分析した地吹雪の発生条件(判別式)を用い過年度まで用いていた視程演算フロー(地吹雪判定フロー)を図-4に示す通り赤字の部分について改良を行った。

主な改良点は、降雪が無い場合の地吹雪発生の判定方法である。2.1節において無降雪時の地吹雪発生条件について分析した結果、「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」のいずれか1つの条件に該当した場合には、地吹雪の発生事例がほとんど見られなかったことから、これらの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た。

2.3 吹雪視程障害予測に関する情報提供技術の開発

暴風雪時のドライバーの行動判断を支援するため、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)の提供実験を平成20年度から行っている。平成24年度には、視界の予測情報の提供を開始し、道路利用者が有益な情報を入手できる「吹雪の視界情報ポータルサイト」としてリニューアルした。

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-5)。さらに平成26年度からは、2.2節で改良

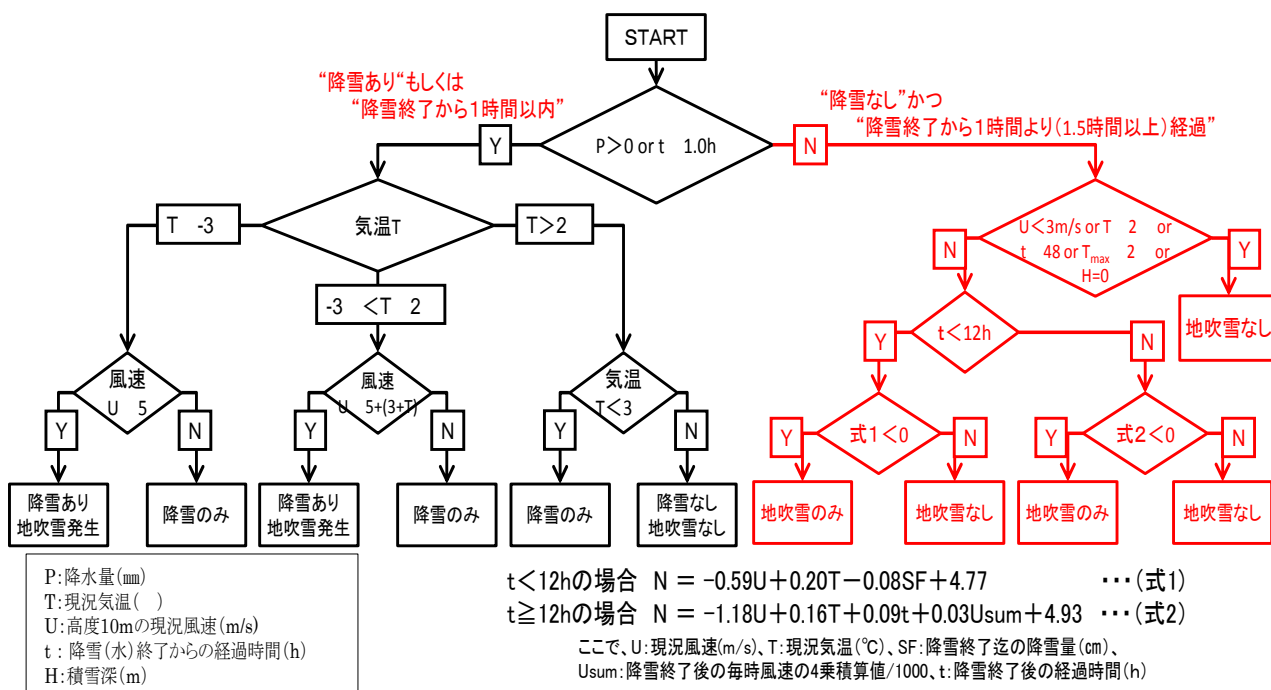


図 - 4 視程演算フロー(地吹雪判定フロー) 飛雪空間内の計算項目を判定

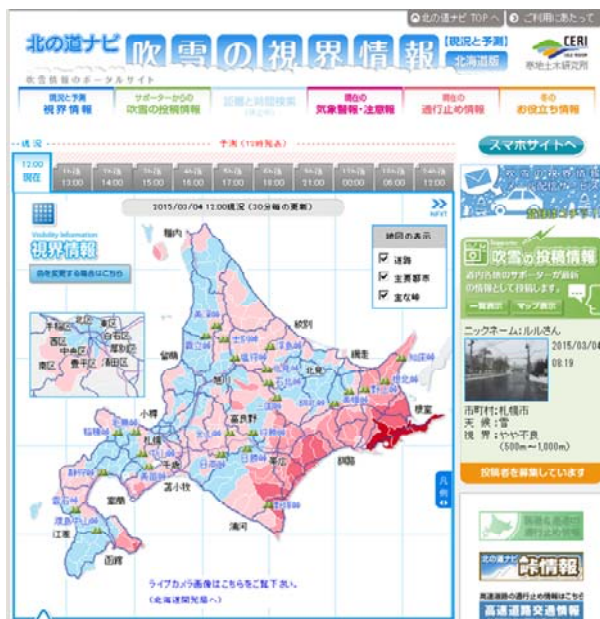


図-5 吹雪の視界情報ポータルサイト

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

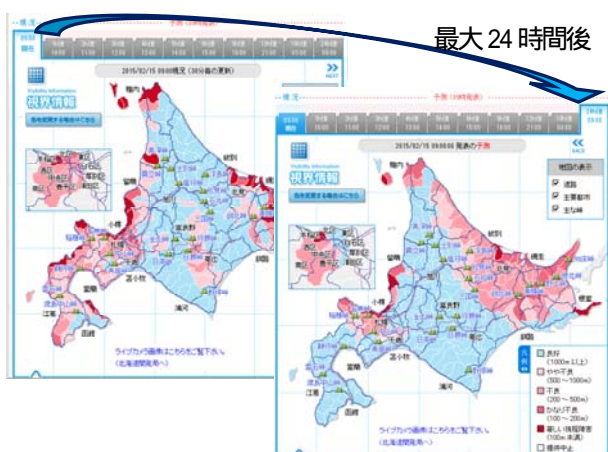


図-6 吹雪の視界情報のエリアと予測時間

したプログラム及び図-4に示す視程演算フローで運用を行った。

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)。

吹雪の視界状況は、吹雪時のドライバーの運転挙動に関する研究成果⁷⁾をもとに、「著しい視程障害(100m未満)」「かなり不良(100~200m)」「不良(100~500m)」「やや不良(500~1000m)」「良好(1000m以上)」の5ランクに区分し、エリアごとに色分け表示している(図-5、図-6)。

さらに平成25年度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-7)。

インターネットサイト「吹雪の視界情報」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件と年々増加傾向にあり、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り、平成26年度は日平均で4,200件近いアクセスを記録している。平成25年度シーズンの1日ごとのアクセス数を図-8に示す。気象庁が「数年に一度の猛吹雪のおそれ」と発表した平成26年12月17日には、過去最多の34,000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「吹雪の視界情報ポータルサイト」を行動判断に活用していることが伺われる。



図-7 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

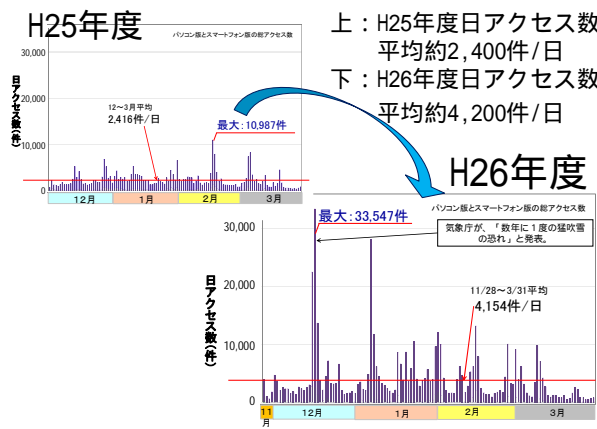


図-8 「吹雪の視界情報」アクセス数の推移

3. まとめ

本研究では、暴風雪による吹雪視程障害予測技術の開発に関し、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とし、吹雪視程障害の予測技術について視程演算高さへの積雪深による補正を新たに加えたほか、視程演算フローの改良を行った。

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、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、さらに新たなメールによる配信サービスを開始した結果、アクセス数の増加が顕著にみられ、利用者が情報提供により行動判断に活用していることが伺えた。今後はさらなる PR に努め、吹雪災害の減災に寄与していきたい。

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，p256, 1986年
- 2) 前野紀一：吹雪の発生機構と雪の流動化，科学，岩波書店，p34-41，1982年
- 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，p77-85, 2002年1月
- 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，79-92, 2007年1月
- 5) 武知洋太ほか：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，No.28，日本雪氷学会北海道支部，2009
- 6) 土木研究所寒地土木研究所：平成25年度重点プロジェクト研究報告書 - 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 - ，土木研究所，2014
- 7) 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，p325-331, 2004年10月

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

KOKUBU Tetsuya

TAKECHI Hiroataka

HARADA Yusuke

OMIYA Satoshi

Abstract :

Winter cyclones, which develop quickly, have brought snowstorms and the resulting traffic hindrances more frequently than ever to areas where snowstorms had only rarely occurred. The installation of snow fences and snowbreak woods is time- and cost-intensive, and the effects of these facilities against disastrous snowstorms may be limited. This study aims to mitigate snowstorm disasters by supporting decision-making by road administrators and the 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.

In FY 2014, improvements in snowstorm-induced poor visibility forecasting technology, including modification of the visibility calculation flow were made based on investigations of the occurrence conditions of blowing snow without concurrent falling snow. The effectiveness of information provision was clarified by experimental provision of visibility forecast information and a questionnaire survey.

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