

気象条件を用いた吹雪時の視程推定手法とその精度について

—北海道と青森における観測結果より—

An Accuracy of the Visibility Estimation Method under Snowstorm using Meteorological Conditions - Results of Observation at Hokkaido and Aomori -

武知 洋太¹, 國分 徹哉², 大宮 哲¹, 高橋 丞二¹, 松澤 勝¹
Hitotaka Takechi¹, Tetsuya Kokubu², Satoshi Omiya¹, Joji Takahashi¹, Masaru Matsuzawa¹
hiro-takechi@ceri.go.jp (H. Takechi)

Abstract: We have developed the visibility estimation method under snowstorm using meteorological conditions, and provide road users with the prediction information on a poor visibility during snowstorms in Hokkaido. In the paper, the meteorological observation was carried out in Hokkaido and Aomori prefecture, and the accuracy was evaluated about the visibility estimation method. As a result, the hitting ratio of the estimated visibility was about 80 %.

1. はじめに

積雪寒冷地の冬期道路では、吹雪による視程障害や吹きだまりによる交通障害がしばしば発生し、社会的に影響を与えている。

そこで寒地土木研究所では、道路利用者の吹雪時における交通行動の判断支援を目的とし、気象条件を用いた吹雪時の視程推定手法を開発し吹雪時に発生する北海道内の視程障害に関する予測情報（吹雪の視界情報¹⁾）を提供している。

本論文では、「吹雪の視界情報」¹⁾の予測に用いている気象条件による吹雪時の視程推定手法について精度検証を行ったので結果を報告する。

2. 気象条件を用いた吹雪視程推定手法

吹雪時の視程 V_{is} と飛雪流量 q の間には強い相関関係があり、浮遊層の飛雪流量は飛雪空間密度 N と風速 V の積 ($q=N \cdot V$) で表せる。そこで、本推定手法では松澤ら²⁾による式(1)を用いて任意の高さ z における $N(z)$ を求め、風速 V を乗じることで q を算出する。なお、式(1)の第1項は降雪による飛雪空間密度、第2項は地吹雪による飛雪空間密度に該当する項である。次に武知ら³⁾による式(2)を用いて視程 V_{is} に換算する。

$$N(z) = \frac{P}{w_f} + \left(N_t - \frac{P}{w_f} \right) \left(\frac{z}{z_t} \right)^{-\frac{w_b}{ku_*}} \dots (1)$$

$$V_{is} = 10^{-0.886 \log(q) + 2.648} \dots (2)$$

ここで、 P : 降雪フラックス ($\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 N_t : 基準高さ z_t の飛雪空間密度 (gm^{-3})、 w_f : 降雪粒子の落下速度 (ms^{-1})、 w_b : 浮遊雪粒子の落下速度 (ms^{-1})、 k : カルマン定数 (=0.4)、 u_* : 摩擦速度 (ms^{-1}) である。なお本推定手法では、既往研究²⁾を参考とし式(1)の変数には以下の値を与えている。

$$w_f = 1.2 \text{ (ms}^{-1}\text{)}, w_b = 0.21 \text{ (ms}^{-1}\text{)}, \\ z_t = 0.15 \text{ (m)}, u_* = 0.036 V_{10} \text{ (ms}^{-1}\text{)}, \\ N_t = 0.116 \exp(0.309 V_{10}) \text{ (gm}^{-3}\text{)} \\ \text{(} Ph \geq 0.4 \text{ mmh}^{-1} \text{の場合)} \\ N_t = 0.021 \exp(0.401 V_{10}) \text{ (gm}^{-3}\text{)} \\ \text{(} Ph < 0.4 \text{ mmh}^{-1} \text{の場合)}$$

ここで、 V_{10} : 高さ 10m の風速 (ms^{-1})、 Ph : 降雪強度 (mmh^{-1}) である。なお、 Ph は降雪を降水に換算した値とする。またドライバーの目線高さを考慮し、任意高さ z は 1.2m を基本としている。ただし、雪面から目線までの高さは積雪量により変化するため、 z は積雪深を考慮した変数とした。

3. 地吹雪発生及び雨雪の判別方法

前述の式(1)により $N(z)$ を推定する手法は、雪面に飛び出しやすい雪が十分に存在する状態を想定したものである。このため、地吹雪が発生する状況であるかの判別や、雨ではなく雪が降って

¹土木研究所 寒地土木研究所
Civil Engineering Research Institute for Cold Region, Public Works Research Institute
²北海道開発局 室蘭開発建設部
Hokkaido Regional Development Bureau

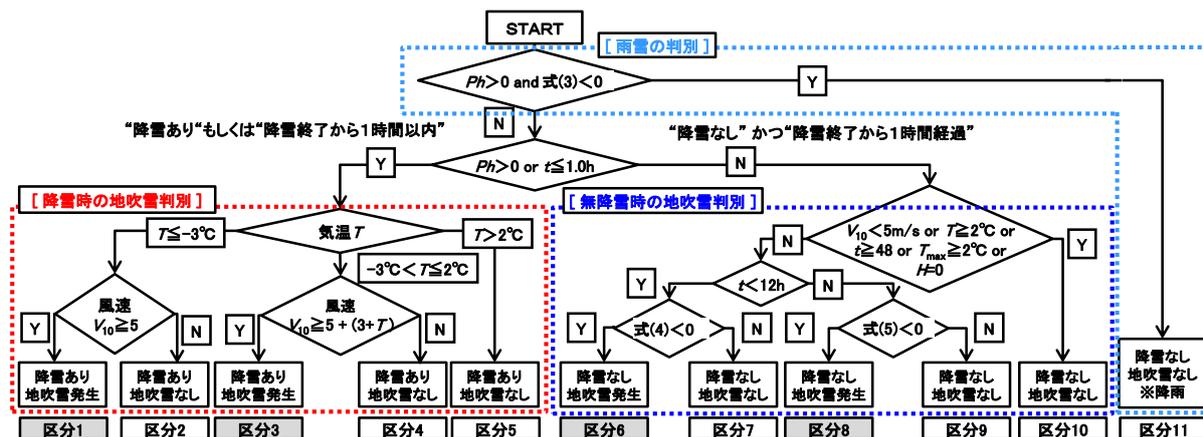


図 2 地吹雪発生及び雨雪判別フロー

いるかの判別を行った上で視程を推定することが必要である。そこで、本推定手法では地吹雪発生と雨雪の判別を図 2 に示した判別フローで行うこととしている。

図 2 の最初の条件は、式(3)に示した判別式により相対湿度 ϕ と現況気温 T (°C) から降雪か降雨 (区分 11) かを判別するもの⁴⁾である。なお、 N が 0 未満の場合に雨の判定となる。

$$N = -\phi + (100/9) \times (T - 9.75) \times -1 \quad \dots(3)$$

次に、図 2 の左側 (区分 1, 2, 3, 4, 5) は降雪を伴った場合における地吹雪発生を判別する条件で、竹内ら⁵⁾による既往研究を参考とし気温と風速により設定した条件である。また、その右側 (区分 6, 7, 8, 9, 10) は降雪を伴わない場合の地吹雪の発生を判別する条件である。

ここで、 t : 降雪終了後の経過時間(h), T : 現況気温(°C), T_{max} : 降雪終了後の最高気温(°C)である。また、式(4), 式(5)は無降雪時の地吹雪発生を t に応じて判別するための判別式⁶⁾である。なお、 D が 0 未満の場合に地吹雪発生の判定となる。

$$D = -0.59 V_{10} + 0.2 T^2 + 0.08 SF + 4.77 \quad \dots(4)$$

$$D = -1.18 V_{10} + 0.16 T^4 + 0.09 t + 0.03 U_{sum} + 4.93 \quad \dots(5)$$

ここで、 SF : 降雪終了直前の降雪量の積算値 (cm), U_{sum} : 降雪終了後の毎時風速の 4 乗の積算値 $\times 10^{-3}$ ($m^4 s^{-4}$)

4. 視程推定手法の精度検証

2 章及び 3 章で示した視程推定手法の推定精度を、推定した視程と実測した視程とを比較することにより検証した。

(1) 検証方法

検証箇所は、北海道内 4 箇所 (石狩市, 初山別村, 猿払村, 弟子屈町) 及び青森県内 2 箇所 (青森市, 五所川原市) とした。検証期間は北海道内が 2016 年度及び 2017 年度の冬期 (12 月 ~ 3 月), 青森県内が 2017 年度の冬期 (12 月 ~ 3 月) とした。検証箇所では視程推定に必要な気象データ (視程, 気温, 相対湿度, 風速, 積雪深) を観測した。なお、観測は風上に 200m 以上の吹走距離を有し地吹雪が発生しやすい地点で行った。

検証する視程の推定値は、表 1 に示した現地実測した気象データと検証箇所近傍のアメダス, 道路テレメータでの観測データを活用し時別値を求めた。なお、視程の推定高さは視程計の設置高さとして積雪深を考慮し視程計の雪面からの高さに設定した。

視程の真値は、後方散乱型視程計の実測値から求めた 1 時間毎の中央値とした。ただし、青森県内 2 箇所は、別途撮影した動画映像内の背景 (目標物) の視認性を 1 時間毎の主たる状況から読み取り視程を判定した。なお、視程は「吹雪の視界情報」¹⁾ で用いている「視程 100m 未満」, 「視程

表 1 視程推定に用いた気象データ

気象要素	実測・推定の区分	統計方法
視程	V_{is} 実測値	①北海道内 前1時間の中央値 (視程計) ②青森県内 主たる状況を判読 (動画映像)
気温	T 実測値	前10分値
相対湿度	ϕ 実測値	前10分値 (猿払村はMSMデータ利用)
風速	V_{10} 実測値	前1時間の平均値 (高さは対数則により10mへ補正)
積雪深	H 実測値	前10分値
降雪フラックス	P 推定値	毎時の解析雨量データの単位を換算し利用
降雪強度	Ph 推定値	毎時の解析雨量データ利用
降雪終了後の最大気温	T_{max} 実測値	降雪終了時からの気温 T の最大値*
風速4乗の積算値	U_{sum} 実測値	降雪終了時からの毎時風速 V_{10} の4乗値の積算値*
降雪深の積算値	SF 推定値	降雪終了時からの降雪深の積算値* ただし、降雪深は解析雨量データより換算

*降雪終了は解析雨量データにより判定

100m 以上 200m 未満」, 「視程 200m 以上 500m 未満」, 「視程 500m 以上 1000m 未満」, 「視程 1000m 以上」の 5 段階に区分し整理した。

次に, 視程推定手法の推定精度は, 「吹雪の視界情報」で用いている視程 5 ランクでの適中率を分析することにより検証した。なお適中率の分析では, 図 3 の分割表により「完全適中率」, 「見逃し率」, 「1 ランク見逃し率」, 「空振り率」, 「1 ランク空振り率」を定義し, それぞれ整理した。

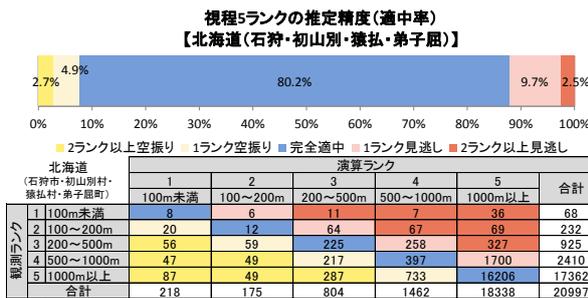
観測地点	観測された視程	推定した吹雪時の視程					合計
		1	2	3	4	5	
石狩市	1 100m未満	n11	n12	n13	n14	n15	
	2 100m以上200m未満	n21	n22	n23	n24	n25	
	3 200m以上500m未満	n31	n32	n33	n34	n35	
	4 500m以上1000m未満	n41	n42	n43	n44	n45	
	5 1000m以上	n51	n52	n53	n54	n55	
	合計					SUM(n)	

見逃し率=(n13+n14+n15+n24+n25)/n
 1ランク見逃し率=(n12+n23+n34+n45)/n
 完全適中率=(n11+n22+n33+n44+n55)/n
 1ランク空振り率=(n21+n32+n43+n54)/n
 空振り率=(n31+n41+n42+n51+n52+n53)/n

図 3 視程 5 ランクでの精度検証方法

(2) 適中率の分析結果

図 4 は, 北海道内 4 箇所と青森県内 2 箇所での推定視程の適中率を整理した結果である。図 4 より, 適中率は北海道内が 80.2%, 青森県内が 77.8%であり, 青森県内での適中率は北海道内より 2.4%低いものの北海道内と同程度であった。ただし, 2 ランク以上の空振りが青森県内は 6.6%であり北海道内の 2.7%に比べ若干高い傾向が見られる。



次に, 大きな見逃し・空振りの改善に向け, 2 ランク以上の見逃しや空振りに着目し, それらが地吹雪判定フロー (図 1) のどの判定区分で発生頻度が高いかを分析した。図 5 は各検証箇所における 2 ランク以上の見逃し, 2 ランク以上の空振り, 広義の適中 (1 ランクの見逃し及び空振りを含めた割合) を地吹雪判定区分毎に整理した結果である。図 5 より, 見逃しは地吹雪が発生しないと判定された区分 2 (降雪を伴った気温-3℃未満かつ風速 5ms⁻¹未満) で割合が高い (石狩市: 2.2%)。また, 空振りは地吹雪が発生すると判定された区分 3 (降雪を伴った気温 0℃前後の強風時) で割合が高い (五所川原市: 8.7%)。

(3) 区分 2 の見逃し事例の分析

見逃しが多かった区分 2 の石狩での事例に着目し, その原因について分析した。区分 2 は風速 5ms⁻¹未満で地吹雪が未発生となる。このため本推定手法の区分 2 では, 降雪強度 Ph から式(1)により換算した飛雪空間密度 N と風速 V から飛雪流量 q を求め式(2)により視程を推定している。

そこで, 視程と降雪強度の関係を整理した。(図 6)。なお, 石狩では二重柵基準降水量計 (DFIR) により降雪強度を実測しており, 解析雨量が実際とは異なっていた恐れがあるため, 図 6 ではこの実測値を用いた。また, 降雪強度, 風速に応じた本推定手法の推定視程を図 6 に併記した。

図 6 より, 実測の視程は降雪強度の増加に伴い低下する関係が見られるものの, 本視程推定手

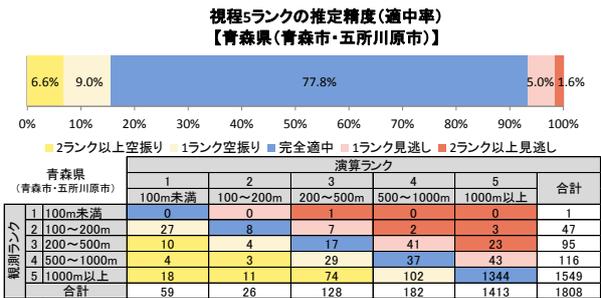


図 4 視程 5 ランクでの適中率

検証箇所別の発生頻度	区分	2ランク以上の空振り					広義の適中 ※1ランクの空振り・見逃しを含む					2ランク以上の見逃し							
		五所川原市 (動画)	青森市 (動画)	石狩市	弟子屈町	初山別村	猿払村	五所川原市 (動画)	青森市 (動画)	石狩市	弟子屈町	初山別村	猿払村	五所川原市 (動画)	青森市 (動画)	石狩市	弟子屈町	初山別村	猿払村
1		1.3%		0.6%	0.2%	1.0%	0.8%	5.4%	6.8%	11.9%	2.7%	8.1%	1.6%		0.7%	0.6%	0.0%	0.4%	0.1%
2				0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.1%	9.2%	2.1%	1.9%	4.4%	1.8%		1.0%	2.2%	0.2%	1.6%	0.3%
3		8.7%	0.4%	1.4%	0.5%	0.7%	1.6%	7.9%	3.0%	3.7%	1.8%	1.4%	0.6%		0.1%	0.0%			
4		0.9%	0.3%	0.2%	0.0%	0.2%	0.3%	10.4%	13.7%	9.2%	3.2%	6.6%	3.2%	0.2%	0.8%	0.7%	0.1%	0.6%	0.1%
5		1.2%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.7%	2.3%	0.8%	0.2%	0.3%	0.0%		0.0%				
6		0.1%		0.1%	0.6%	0.4%	1.4%	4.1%	1.2%	3.4%	5.9%	5.1%	5.1%	0.1%	0.1%			0.1%	0.3%
7								3.2%	3.8%	2.5%	1.7%	5.0%	2.3%	0.2%				0.0%	0.0%
8				0.2%	0.1%	0.7%	0.9%	1.2%	0.7%	3.8%	2.2%	3.6%			0.0%				0.1%
9							0.7%	1.1%	0.1%	5.1%	1.3%	3.8%				0.0%			0.1%
10							42.6%	54.2%	50.9%	70.1%	57.7%	71.3%			0.5%	0.5%	0.4%	0.6%	
11							8.4%	6.9%	1.0%	1.2%	1.7%	0.5%			0.0%	0.0%	0.0%		

*発生頻度は各検証箇所の全事例数を母数とした割合

図 5 地吹雪判定区分別の 2 ランク以上の空振り・見逃しの発生頻度 (検証箇所別)

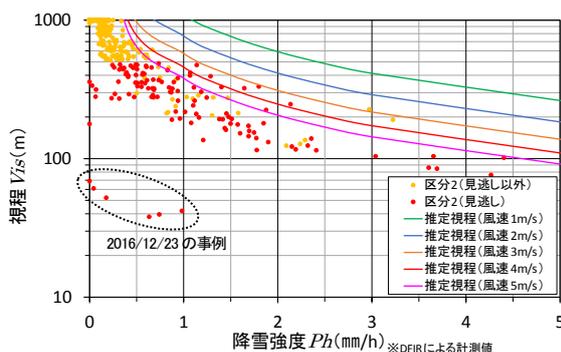


図 6 降雪強度と視程 (区分2 (石狩市))

法による降雪強度と風速から推定される最小値よりも小さい傾向が見られた。ただし、破線で囲んだ事例は視程 100m 未満の視程障害が動画映像から明らかに確認できなかった。このため視程計前方のフードへの着雪などにより視程の計測値に異常があったと考えられる。今後は、降雪による視程低下と降雪強度や飛雪流量との関係について調査し、視程推定手法の改善の必要性を検討していきたい。

(4) 区分3の空振り事例の分析

空振りが多かった区分3の五所川原の事例に着目し、その原因について分析した。区分3は降雪時の気温が -3°C より大きくかつ 2°C 以下で地吹雪発生と判定された事例であり、空振り原因に地吹雪発生自体を空振りしている恐れがある。そこで気温が -3°C より大きくかつ 2°C 以下で地吹雪発生と判定された区分3と発生なしと判定された区分4の実際の地吹雪発生状況を撮影していた動画映像から判別し、気温 T と風速 V_{10} の関係を整理した (図 7)。

図 7 より、地吹雪発生と判定された区分3の事例には地吹雪を空振りしていた事例が多く含まれており、推定視程の空振りは地吹雪発生の空振りによる影響が大きいと考えられる。

そこで、区分3において視程及び地吹雪を適中、空振りした事例の発生頻度について各種気象条件のランク別に整理した (図 8)。その結果、気温 T

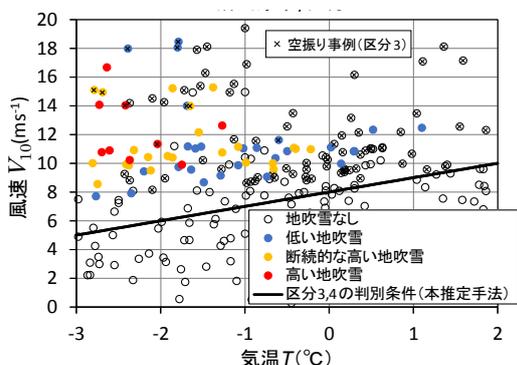


図 7 降雪時の地吹雪発生と気象条件 (区分3・4 (五所川原市))

各種気象条件	区分3における発生頻度				
	視程ランク空振り		視程ランク適中		
	地吹雪空振り	地吹雪適中	地吹雪空振り	地吹雪適中	
気温 $T(^{\circ}\text{C})$	$-3 \leq T < -2$	3.3%	3.3%	3.3%	9.9%
	$-2 \leq T < -1$	8.6%	2.6%	3.3%	7.9%
	$-1 \leq T < 0$	13.9%	0.7%	9.3%	5.3%
	$0 \leq T < 1$	14.6%		4.0%	3.3%
	$1 \leq T < 2$	5.3%		0.7%	0.7%
風速 $V_{10}(\text{ms}^{-1})$	$5.0 \leq V_{10} < 7.5$				4.0%
	$7.5 \leq V_{10} < 10.0$	18.5%		12.6%	7.9%
	$10.0 \leq V_{10} < 12.5$	3.2%	1.3%	4.0%	16.6%
	$12.5 \leq V_{10} < 15.0$	6.0%			1.3%
	$15.0 \leq V_{10} < 17.5$	5.3%	0.7%		1.3%
	$15.0 \leq V_{10} < 20.0$	2.6%	2.0%		
相対湿度 $\phi(\%)$	$40 < \phi \leq 45$	1.3%			
	$45 < \phi \leq 50$	2.6%		3.3%	
	$50 < \phi \leq 55$	3.3%			0.7%
	$55 < \phi \leq 60$	8.6%	1.3%	3.3%	2.0%
	$60 < \phi \leq 65$	8.6%		4.0%	4.0%
	$65 < \phi \leq 70$	8.6%	1.3%	2.0%	4.0%
	$70 < \phi \leq 75$	5.3%		2.6%	2.6%
	$75 < \phi \leq 80$	3.3%	0.7%	2.6%	6.0%
	$80 < \phi \leq 85$	0.7%	0.7%	0.7%	0.7%
	$85 < \phi \leq 90$	2.6%			5.3%
$90 < \phi \leq 95$	0.7%		0.7%	2.0%	

※発生頻度は区分3の全事例数に対する割合

図 8 視程・地吹雪の空振り・適中の発生頻度 (区分3・(五所川原市))

が -1°C 以上では視程ランク及び地吹雪発生を空振りした事例の発生頻度が 33.8%と高く、適中した事例の発生頻度は 9.3%と少なかった。また、視程ランク及び地吹雪発生を空振り事例の発生頻度は相対湿度 ϕ が 70%以下で高く、 ϕ が 75%より高い場合には視程ランク及び地吹雪発生の適中事例の発生頻度が比較的高い傾向が見られた。今後は、このような結果を基に降雪時における地吹雪発生の判別条件について改善方法を検討していきたい。

5. まとめ

気象条件を用いた吹雪時の視程推定手法について精度検証を北海道内及び青森県内で実施した結果、推定視程の5ランクでの適中率は概ね8割であった。ただし、降雪時の気温 -3°C 未満、風速 5ms^{-1} 未満の場合に見逃し、降雪時の気温 0°C 前後の強風時に空振りが発生する傾向が見られた。

【参考・引用文献】

- 1) 武知洋太ら：“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, **32**, 157-162, 2016
- 2) 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**, 79-92, 2007.
- 3) 武知洋太ら：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, **28**, 17-20, 2009
- 4) 気象庁：最大降雪量ガイドライン, 平成 21 年度数値予報研修テキスト, 2009
- 5) 竹内政夫ら：降雪時の高い地吹雪の発生限界風速, 日本雪氷学会全国大会予稿集, 1986
- 6) 大宮哲ら：複数の気象要素に基づく地吹雪発生条件, 寒地土木研究所月報, **750**, 14-22, 2015