

ISSN 1881-0489

寒地土木研究所報告

第126号

吹雪時の視程推定手法とその活用に関する研究

松澤 勝



平成18年5月

独立行政法人土木研究所
寒地土木研究所

吹雪時の視程推定手法と
その活用に関する研究

松澤 勝

The Development and Use of a Method for Estimating Visibility during Snowstorm

by

Masaru MATSUZAWA

松澤 勝**

Abstract

Snowstorm-induced visibility hindrance reduces the safety of winter driving and can be a factor in multi-vehicular collisions. Measures against such visibility hindrance are important in cold, snowy regions. The severity of snowstorm-induced visibility hindrance differs greatly from one place to another and from one time to another. It is expected that provision of snowstorm information will enable drivers to avoid snowstorms, thereby improving winter road safety and driver's sense of security. However, visibility meters tend to be concentrated at a limited number of locations, such as mountain passes, and currently there is no simple, general method for measuring, estimating or forecasting visibility on a wide area during a snowstorm. For this reason, no study has examined how well the provision of snowstorm information can improve winter road safety and the driver's sense of security. In this study, a method of estimating visibility during snowstorm was developed that uses available meteorological data. Using this method, a system for offering wide-area snowstorm (visibility) information was constructed on a trial basis. Drivers were provided with snowstorm information and were surveyed on their opinions of the effectiveness of that information in enhancing their safety and their sense of security.

Chapter 1: "Introduction"

The background of the study is outlined and conventional visibility estimation methods are reviewed, toward positioning this research in snowstorm measures.

Chapter 2: "Physical model of blowing snow"

First, a vertical distribution equation is derived for spatial concentration of snow particles during snowstorm. It is the first such equation ever derived. Called the Takeuchi-Matsuzawa equation, it is derived by obtaining a general solution to a turbulent diffusion equation in which the turbulent diffusion coefficient is given as a function of height.

Conventionally, turbulent diffusion theory has been applied to blowing snow without snowfall, a situation under which Shiotani's vertical distribution equation for snow concentration is proven to be valid. Some studies have solved the turbulent diffusion equation for vertical distribution of snow concentration during snowstorm. However, those equations give solutions different from Shiotani's equation when the snowfall intensity approaches zero, because the turbulent diffusion

* 本稿は北海道大学審査学位論文である。

** 独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所 寒地道路研究グループ 雪氷チーム 総括主任研究員
(旧 独立行政法人 北海道開発土木研究所 道路部 防災雪氷研究室 副室長)

coefficients are given as constants regardless of the height. The author derives the abovementioned Takeuchi-Matsuzawa equation by obtaining a general solution to the turbulent diffusion equation to which the turbulent diffusion coefficient is given as a function of height, following Shiotani's approach. The Takeuchi-Matsuzawa equation is the first equation for vertical distribution of snow concentration to incorporate Shiotani's equation. By distinguishing between the falling velocity of suspended snow particles and the falling velocity of snowfall particles, the Matsuzawa-Takeuchi equation for vertical distribution of snow concentration (Equation 2.7) is a refinement of the Takeuchi-Matsuzawa equation.

$$N = \frac{P}{w_f} + \left(N_t - \frac{P}{w_f} \right) \left(\frac{z}{z_t} \right)^{-\frac{w_b}{kU_*}} \quad \cdots (2.7)$$

where,

N : snow concentration [g/m^3], P : snowfall intensity [$\text{g}/(\text{m}^2\text{s})$], w_b : falling velocity of suspended snow particles [m/s], w_f : falling velocity of snowfall particles [m/s], z_t : reference height [m], N_t : snow concentration [g/m^3] at reference height z_t , U_* : friction velocity [m/s], and k : Karman's constant

Chapter 3: "Theory of estimating visibility during snowstorm according to the meteorological conditions"

A method for estimating visibility during snowstorm is clarified. A relational expression between the mass flux of snow and the visibility is first modified. The conventional Takeuchi-Fukuzawa Equation, with which deviations from observed values increase in situations of poor visibility, was modified so as to reduce the error under such situations (Equation 3.5').

$$Vis = 10^{\{-0.773 \log(N \cdot V) + 2.85\}} \quad \cdots (3.5')$$

where, Vis : visibility [m], N : snow concentration [g/m^3] and V : wind velocity [m/s]

As a next step, a method of estimating visibility is developed on the basis of available meteorological data. This method differs from conventional ones in that it employs a physical model to describe the relationship between visibility and meteorological data. The method is characterized by changeable parameters, which makes it applicable to any region by adjusting the parametric values. The method can be used to estimate visibility from forecasts of metrological values.

The estimation procedure is:

- 1) Snow concentration, N , at the given height of z is obtained by setting unknown parameters of Equation 2.7. In accordance with existing studies, the following values are given as

parameters: $w_b=0.35$ [m/s], $w_f=1.2$ [m/s], $z_t=0.15$ [m], $N_t=30$ [g/m³], and $U_*=0.036V_{10}$ [m/s] (V_{10} is wind velocity at the height of 10 m). These parameters and snowfall intensity are used in Equation 2.7 to obtain N .

- 2) Visibility for wind velocity V at a given height of z is obtained by substituting the snow concentration N derived in 1) into Equation 3.5'.

Chapter 4: “Accuracy of the visibility forecast”

The accuracy of visibility estimates is examined. Visibility observed on 16 days when snowstorm occurred in winter 2002/03 is grouped into five grades, and estimated values are compared with measured values. The hit rate of estimated values to measured values for ten-minute-interval data is 36%. The hit rate for more loosely defined agreement is 71%, and the undetected rate is 0%. Regarding one-hour-interval data, the hit rate is 38%, the hit rate for more loosely defined agreement is 79% and the undetected rate is 0%. In the 81 cases where the measured visibility is less than 200 m, agreement is confirmed in 70 cases, suggesting that a situation in which the visibility is less than 200 m could be predicted from meteorological conditions with a great degree of accuracy. An equation describing the relation of snow concentration N_t [g/m³] and friction velocity U_* [m/s] at the height of z_t to wind velocity at the height of 10 m was obtained by substituting parameters with different values from those used in the equations mentioned above. The equation proved to have the potential for improving the accuracy of visibility forecast for one-hour-interval data. It yielded a 53% hit rate and a 79% rate for loosely defined agreement.

Chapter 5: “Development of a wide-area snowstorm information provision system”

A system for processing wide-area visibility information and providing drivers with snowstorm visibility information is developed on the basis of the visibility estimation method developed in this study. In addition to the provision of information via computer- and mobile phone-accessible website, emergency e-mail notification at a preset visibility/snowfall intensity threshold was made available.

Chapter 6: “Effect of snowstorm information on winter road safety and driver’s sense of security”

An experiment to provide drivers with snowstorm information is conducted to determine the effect of provision on winter road safety and driver’s sense of security. It is confirmed for the first time that drivers who are provided with snowstorm information including visibility under snowstorm formulated on the basis of the visibility estimation method in this study change their traffic behavior to avoid snowstorm. The trial reveals that 60% of drivers who received snowstorm information changed their traffic behavior, mostly by changing their planned time of departure, followed by changing their planned travel route. Even those who did not change their traffic behavior tended to report increases in sense of security. This shows that snowstorm information provision enhances the driver’s sense of security and has the potential to enhance road safety as well. In the survey on driver’s satisfaction with the accuracy of snowstorm information, nearly 70% of the respondents who received snowstorm information responded “satisfied” or “fairly satisfied.”

Chapter 7: "Conclusion"

Findings from this study are summarized, and these conclusions are made: 1) the visibility estimation method that the author has developed can be used for road information provision under snowstorm, and 2) the provision of snowstorm and visibility information is effective in enhancing the driver's sense of security and has the potential to enhance driving safety as well.

吹雪時の視程推定手法とその活用に関する研究

目 次

第1章 序 論	1
1. 1 研究の背景と目的	2
1. 2 本研究の構成	7
1. 3 既往研究と本研究の位置づけ	8
第1章 参考文献	11
第2章 吹雪の物理モデル	13
2. 1 はじめに	14
2. 2 既存の物理モデル	14
2. 3 竹内・松沢の式	17
2. 4 竹内・松沢の式の改良（松沢・竹内の式）	17
2. 5 実測値との比較	18
2. 6 まとめ	19
補 遺	20
第2章 参考文献	21
第3章 気象条件による吹雪時の視程推定手法の理論	23
3. 1 はじめに	24
3. 2 既存研究	24
3. 3 松沢・竹内の式を用いた視程推定手法の開発	25
3. 4 議論	29
3. 5 本手法の特長	32
3. 6 まとめ	35
第3章 参考文献	36
第4章 視程推定精度の評価	37
4. 1 はじめに	38
4. 2 視程推定手法の精度評価	38
4. 3 実際に提供されている気象データを用いた検証	49
4. 4 視程推定手法改良に関する検討	51
4. 5 雪堤による道路上の視程低下	56
4. 6 まとめと考察	60

第4章 参考文献	62
第5章 吹雪の広域情報提供システムの開発	63
5. 1 はじめに	64
5. 2 吹雪情報提供システムの構成	64
5. 3 吹雪情報提供のコンテンツ	68
5. 4 まとめ	75
第5章 参考文献	76
第6章 吹雪情報が冬期道路の安全性や安心感に与える効果	77
6. 1 はじめに	78
6. 2 札幌圏における吹雪情報提供実験	78
6. 3 アンケート結果	78
6. 4 議論	83
6. 5 まとめ	85
第6章 参考文献	86
第7章 結論	87
7. 1 はじめに	88
7. 2 本研究の成果	88
7. 3 結論	92
7. 4 今後の課題と展望	92

第1章 序論

1. 1 研究の背景と目的

(1) 冬期道路が抱える諸問題

北海道のような積雪寒冷地の冬期道路は、吹雪による視程障害や吹きだまりによって、道路交通の安全確保にとって厳しい環境にある。これまで、道路管理者は、防雪林や防雪柵、スノーシェルター等の吹雪対策を整備し、また除雪機械を改良し除雪能力の向上を図ってきた結果、かつては年間 1500～4000 時間程度あった冬の国道における通行止めは大きく減少した（図 1.1）。しかし、吹雪による通行止め件数は、近年でも年間約 20～50 件の間（1996～2000 年度の 5 冬期）で推移しており¹⁾、また、2004 年 1 月に北海道東部を襲った暴風雪のように、近年の異常な気象によって、しばしば既存の防雪施設で対応できない吹雪災害に見舞われる。さらに、1986～2000 年度の北海道の国道の通行止めの要因では吹雪によるものが 40%以上を占め、要因別第一位となっている（図 1.2）。加えて、視界不良に伴う交通事故も依然として多く、年間 100 件弱～300 件近く発生している。図 1.3 では、原因別の冬期事故の発生件数を示しており、スリップ事故の方が視界不良事故より件数が多い。しかし、事故全体に占める多重衝突事故の割合を見ると、吹雪時は通常時の 2 倍以上となっている（図 1.4）。このように、吹雪時の事故は後続車からの発見が遅れるため多重衝突事故が発生しやすく、時に大規模な多重衝突事故に発展する事例もある。このため、人や車両の直接的な被害に加え、長時間の通行止めによる地域経済への影響など、社会的なインパクトは大きい。

1992 年 3 月 17 日には、道央自動車道北海道千歳市において 186 台が巻き込まれる事故が発生し、死者 2 名、重軽傷者 73 名という、日本の交通事故史上最大規模の多重衝突事故となった。その後、防雪林や防雪柵などの防雪対策が進められてきたが、2000 年 12 月 12 日に東北自動車道三本木パーキングエリア付近で 64 台の、翌 13 日には美唄市の道央自動車道で 82 台の多重衝突事故が発生した。さらに 2003 年 2 月には、道央自動車道美唄付近で 42 台の多重衝突事故が発生し 3 名が亡くなっている。いずれのケースも吹雪で視程の低下している状況下で発生したものである。その一方で、現在、高規格道路の整備は、北海道北部や東部、及び、山間部を通過するルートなど、冬期の気象条件の厳しい地域へと進められている。

吹雪の道路交通に与える影響は統計的な数値だけでは表せない。冬道におけるヒヤリ体験アンケートでは、94%のドライバーが吹雪や降雪による視程障害を経験しており、そのうち 91%のドライバーが、「事故に巻き込まれる危険性を感じた」と回答している²⁾。

このような状況から、吹雪災害を防ぎ、冬期道路交通の安全を確保すること、さらにドライバーの安心感を確保することは、積雪寒冷地に住む国民の冬期の生活を守り、社会経済活動を維持する上で極めて重要な課題である。

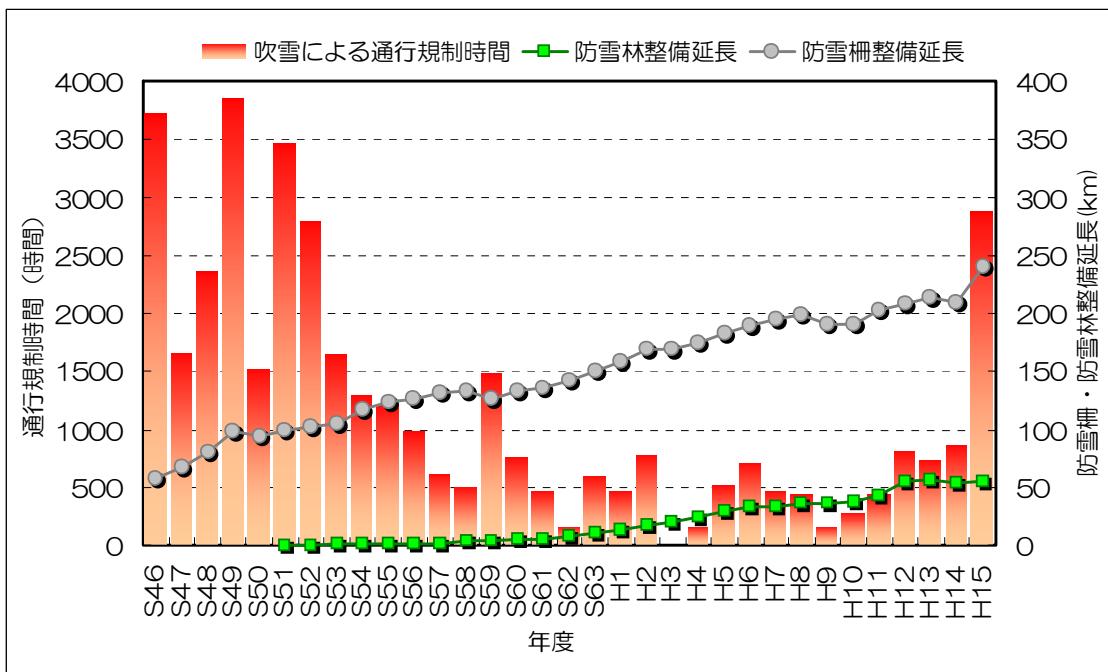


図 1.1 北海道の国道の通行規制時間の推移

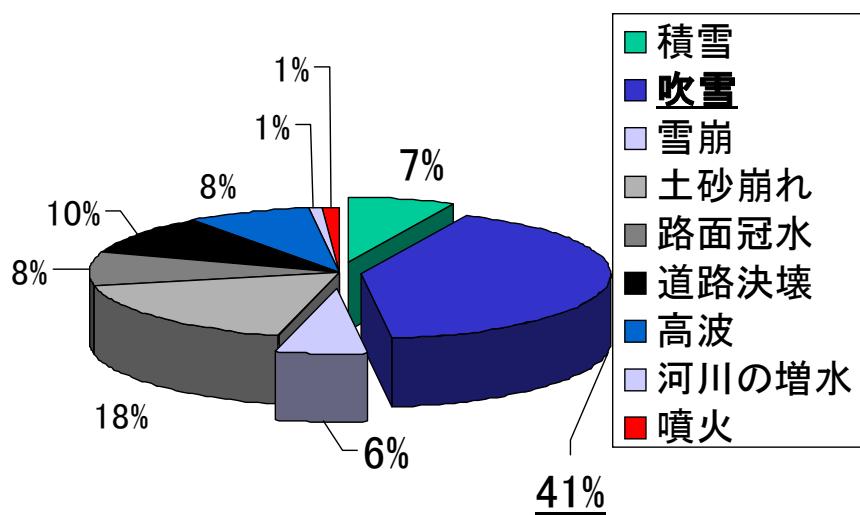


図 1.2 北海道の国道の通行止め要因の割合 (1986~2000 年度 ; 北海道開発局資料)

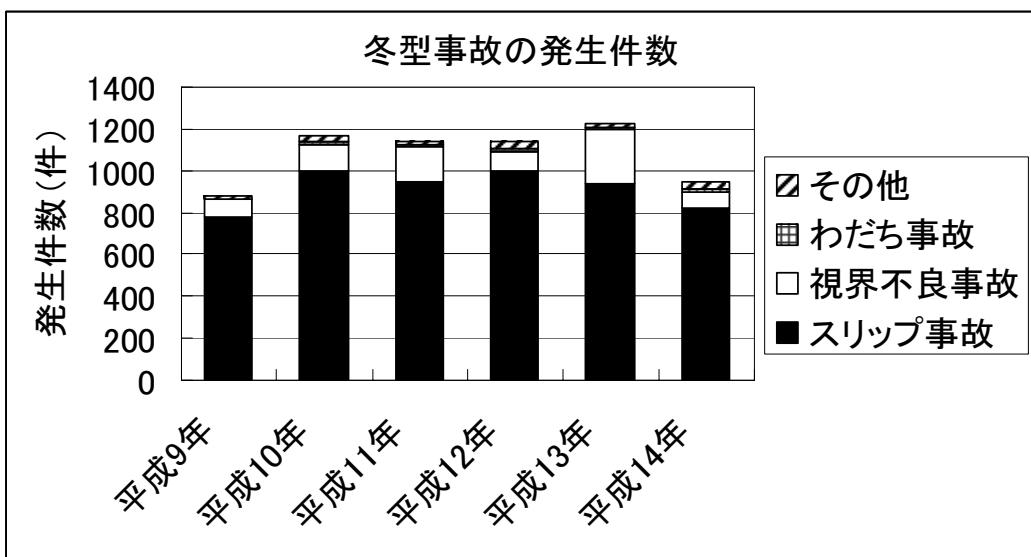


図 1.3 冬型事故の発生件数の推移

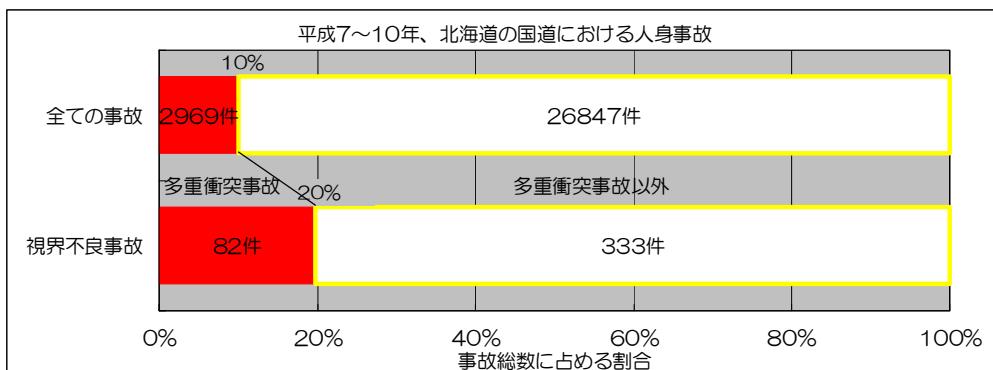


図 1.4 全事故および視界不良事故に占める多重衝突事故の割合 (平成 7~10 年, 国道事故)

(2) これまでの吹雪対策

従来からの吹雪対策としては、路線計画によるもの、道路構造によるもの、防雪柵、防雪林、視線誘導施設などの道路付属施設によるもの等があげられる。

道路の交通障害を引き起こす吹雪災害には吹きだまりと視程障害がある。かつては、吹きだまりが主たる障害であった。防雪盛土や防雪切土と呼ばれる道路構造による対策や、吹きだめ式防雪柵（吹きだめ柵）は、主に吹きだまり防止のために開発・導入されたものである。その後、視程障害に対しても効果のある吹雪対策施設として、吹き払い式防雪柵（吹き払い柵）や吹き止め式防雪柵（吹き止め柵）が開発されてきた。また防雪林については、昭和 50 年代以降整備が進められるとともに、その効果について研究も行われている^{3) 4)}。

この 10 年以上の間に、防雪林や防雪柵など、様々な吹雪対策施設の整備を行ってきた結果、前述の通り、吹雪（特に吹きだまり）による通行止めは減少したが、依然として、視程障害を要因とする多重衝突事故が発生しており、新しい技術の活用による道路の吹雪対

策が求められている。

(3) 吹雪対策における新技術

このような背景で近年研究が進められているのがITS（高度道路交通システム）技術を活用した吹雪対策である。Kajiya *et al.*⁵⁾は、吹雪の中で停止した車両が多重衝突事故の発生誘因であるとの見地から、ミリ波レーダーで停止車両を検知し、後続車に対して発光警告を行う、インテリジェント・デリネータの開発を行った。

また、著者らは、冬期道路における安全性を高めるシステムとして、冬期道路の高度情報提供システムの開発に取り組んでいる。冬期道路の高度情報提供システムは、路側情報提供サービスと広域情報提供サービスの2つのサービスを提供する。

路側情報提供サービスは、前述のKajiya *et al.*⁵⁾の研究を発展させたものであり、インテリジェント・デリネータの開発と同じコンセプトのもとで、自発光視線誘導標による視線誘導と前方での障害事象に関する危険警告を行うものである。このサービスを提供する路側情報提供システムについて、著者ら⁶⁾は試験道路での実験を行いその有効性を確認した。さらに、実道実験を実施し、路側情報提供システムの実現化に取り組んでいる⁷⁾。

一方、広域情報提供サービスは、広域で吹雪の情報をドライバーに提供して、吹雪に巻き込まれることを防ぐサービスである（図1.5）。加治屋ら⁸⁾は、平成10年1月7日に、札幌圏で群発した吹雪を発生要因とする8件の多重衝突事故に関して、降雪データとの比較を行った。その結果、多重衝突事故は、降雪域が時間とともに移動していく過程において、強い降雪域の中で発生しているケースが多いことを明らかにした。また、これらの降雪域は筋状でその幅は数km～数10km程度で、数時間程度で移動することを示した。そして、吹雪の現況や予測を事前にドライバーに情報提供することで、ドライバーが出发時間の変更や迂回など、適切に吹雪を避ける対応をとることが可能となり、このような多重衝突事故に巻き込まれる危険性を抑える可能性を示唆した。広域情報提供サービスは、このようなコンセプトに基づくものである。そして、広域情報提供サービスの実現には、吹雪情報の取得が不可欠である。

(4) 視程情報の重要性

吹雪に関する情報は、大きく分けて降雪（降雪強度）情報と視程情報に分けられる。このうち、降雪情報については、気象庁の気象レーダーや、レーダ・アメダス合成図などによって現況値が得られる。また予測値も気象庁により $20 \times 20 \text{ km}$ メッシュの1時間毎の情報等が提供されている。さらに、いくつかの気象予測会社では詳細な降雪情報の提供を有料で行っている。しかし、吹雪時の視程は降雪だけでなく、風速や気温にも影響を受ける⁹⁾。同じ降雪強度でも、気温が低く強い風の伴う場合と、気温が高く静穏な場合とでは視程は大きく異なる。従って視程に関する情報も降雪情報以上に重要であると考えられる。

また、道路構造を考える際に視距が重要である様に、視程は道路交通にとって重要な情

報である。加えて、視程の低下によって速度の低下や、車両相互の速度のバラツキが大きくなるなど、視程は走行速度に影響を与える。また視程が100mを下回って1時間以内に多重衝突事故が発生しやすくなる⁸⁾など、吹雪時の多重衝突事故の発生要因には視程が深く関連する。また、吹雪時の多重衝突事故の潜在的な危険度（リスクポテンシャル）評価⁸⁾において、視程は多重衝突事故の要因となる7つの項目の一つに挙げられており（表1.1）、冬期の吹雪による多重衝突事故と視程は密接な関係にある。



図1.5 広域情報提供サービスイメージ

表1.1 吹雪時の多重衝突事故の要因⁸⁾

種別	多重衝突事故要因	条件値
環境要因	昼夜の区分	昼間
	道路環境	周囲の開けた郊外部の单路
気象要因	視程	50m未満
	視程100m以下の経過時間	1時間以内
	路面状況	凍結・積雪
交通要因	車線あたりの10分間交通量	40~80台
	速度の標準偏差	8km/h以上
	大型車率	10%以上

（6）本研究の目的

このように、見通すことのできる距離である視程は、道路交通に直接的に影響を与える要因の一つである。しかし、視程の情報は、峠など一部の地点に視程計が設置されているだけで、現時点では、吹雪時の視程を簡易に広域で現況把握・予測する汎用的な方法・技術は明らかにされていない。このため、吹雪情報を提供することによる吹雪回避の可能性について示された研究は存在しない。そこで、本研究は、吹雪時の道路交通の安全性やドライバーの安心感の向上を図ることを念頭に、道路情報としてドライバーに広域での吹雪情報（視程情報）を提供するために、容易に入手できる気象データから吹雪時の視程値を推定する手法を明らかにすることを目的とする。また、この手法で求めた視程情報を含む吹雪情報を道路利用者に提供し、吹雪情報が交通行動に与える影響や冬期道路の安全性と安心感の向上に与える影響、および、視程情報への満足度について明らかにすることで、本研究で開発した視程推定手法の実用性を示す。

なお、本研究では、降雪情報と視程情報をあわせて吹雪情報と呼ぶことにする。

また、本節で示すそれぞれの吹雪対策を分類・整理したものを表1.2に示す。この中で、本研究は下線で記載した情報提供（ソフト対策）による吹雪対策に資するものである。

表1.2 吹雪対策全体における本研究の位置づけ（表の太字下線部分）

対策の種別		具体例	目的・効果
	路線計画	吹雪危険地域の回避等	吹きだまり、視程障害対策
ハード対策	道路構造	防雪切土や盛土等	主に吹きだまり対策
	対策施設	スノーシェルター、防雪柵、防雪林	吹きだまり、視程障害対策
		視線誘導施設等	視程障害対策
	維持管理・交通管理	除排雪、吹雪時の交通規制等	吹きだまり、視程障害対策
ソフト対策	情報提供	道の駅端末、インターネット等	視程障害対策

1. 2 本研究の構成

本論文では、ドライバーが旅行計画の判断に利用する道路気象情報として、吹雪時の視程を容易に入手できる気象データから推定する手法を明らかにし、その精度や活用可能性について以下の研究を行った結果をまとめたものである。

第2章で、吹雪現象を表す物理モデルについて述べる。強風で巻き上げられて浮遊運動をする飛雪粒子に対しては、乱流拡散理論が適用され、降雪のない吹雪（地吹雪）の条件

では、塩谷の式で知られる飛雪空間密度の垂直分布式が成り立つ。ここでは、降雪を伴う吹雪時に対しても同様に、乱流拡散理論を適用することで、塩谷の式を包含する、降雪を伴う吹雪時の飛雪空間密度の垂直分布式（竹内・松沢の式）を導く。さらに、地吹雪を起源とする浮遊粒子と、降雪粒子の落下速度を区別することで、式の改良を行う（松沢・竹内の式）。

第3章で、気象条件から吹雪時の視程を推定する手法として、気象条件と視程との関係式に関して既存の研究を整理する。そして、第2章で示した松沢・竹内の式を用いて、容易に入手できる気象データから吹雪時の視程を推定する手法を示す。

第4章では、第3章で求めた視程推定手法の精度を検証する。始めに第3章で示した視程推定手法自体の精度検証を行う。このためには入力値はできるだけ真の値に近いものを使う必要がある。本研究では直接計測した地上観測の気象データを使って視程を推定し、その結果と、地上での視程計での計測値とを比較して、視程推定精度を検証する。加えて、既往研究で与えられた気象条件と視程との関係式に基づく視程推定結果と、本手法で求めた視程推定結果を比較する。次に、視程情報を実際にドライバーに提供する際の視程情報の精度を検証するため、実際に提供されている気象データを用いて視程を推定（予測）したときの視程推定（予測）精度について検証する。その上で、手法の課題を整理し、改良点に関して検討を行う。

第5章で、実際に本研究で開発した視程推定手法によって計算した視程を用いる吹雪情報提供システムの開発を行う。

第6章で、第5章で開発したシステムを用いてドライバーに吹雪情報を提供して、交通行動の変化や安心感の向上についてアンケート調査を行った結果を示す。加えて、本手法で推定（予測）した吹雪時の視程情報の精度に対する満足度も明らかにする。その結果により、視程推定手法の実用上の有効性を明らかにする。

第7章で以上の結果をまとめる。

これらの構成を図1.6に整理する。

1. 3 既往研究と本研究の位置づけ

視程は視角 0.5° 以上 5° 以下で、黒または黒に近い色の地物を目標物として、その目標を空を背景に目視で認めることが出来る最大距離である¹⁰⁾。目視によって視程を連続的に観測することには限界があるので、視程情報を収集する手法として、現状では、道路上の視程の現況を監視するために主に視程計が用いられている。

視程計には、透過型視程計、反射型視程計などがある。このうち、吹雪を計測する視程計としては、透過型視程計が古くから用いられている。透過型視程計は吹雪や降雪によって透過光が減衰する性質を利用して視程を測定するもので、投光部と受光部の設置間隔を L 、透過率を Tr とすると

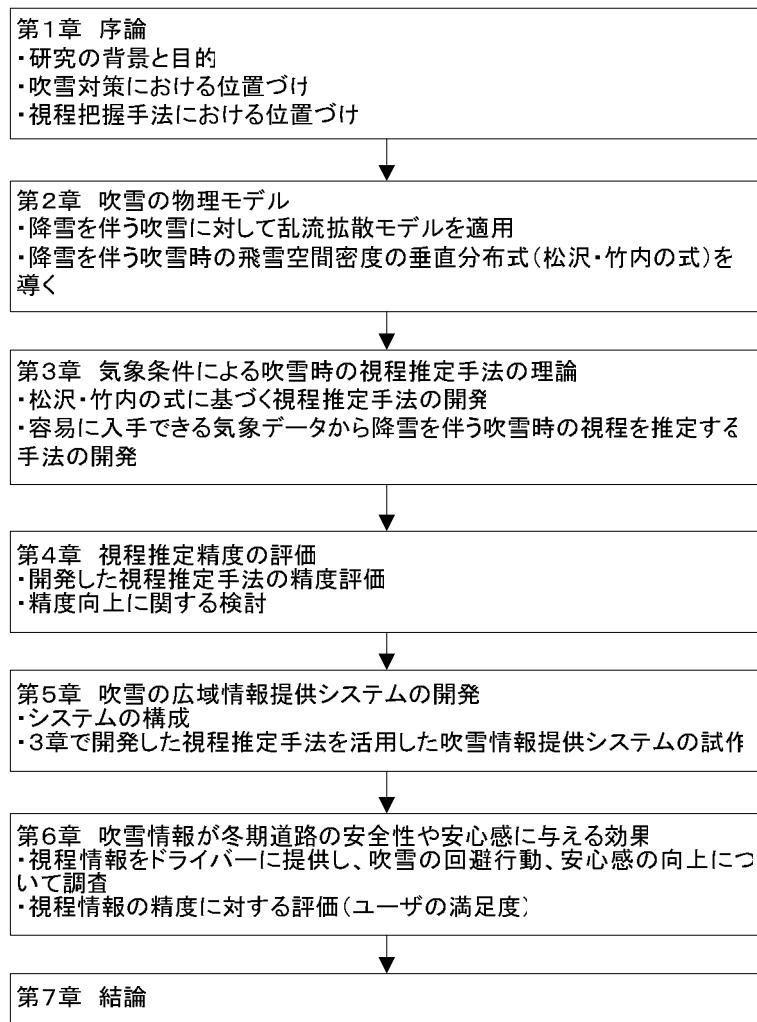


図 1.6 本論文の構成

$$Vis = \frac{L}{\ln \frac{1}{Tr}} \ln \frac{1}{\varepsilon} \quad \cdots (1.1)$$

が成り立つ。ここで、 ε は、人間の目の明暗対照の臨界定数で、経験的に 0.05 を採用している³⁾。

しかし、視程計はコストが高いため設置個所は一部の箇所に限られているため広域の視程を把握するには向かない。また、CCTV カメラ画像から視程を推定する手法について研究が行われているが¹¹⁾¹²⁾¹³⁾、まだ実用化には至っていない。また、これらの手法は、視程計やカメラの設置している点での情報であるため、その地点での視程は比較的正確に把握できる一方、機器の無い地点でのデータを得ることができない。加えて、視程の現況値の把握に用いることができるが予測に用いることはできないという短所がある。

一方、吹雪時の視程は、風速や降雪強度と関係がある。風速や降雪強度などの一般的な気象データは広範囲で詳細に得られる。従って、風速や降雪強度等と視程との関係式を導き、これから視程を推定する方法が明らかになれば、面的に視程を把握できる。加えて、気象予測値を用いることで視程予測値が推定できるので、視程の現況把握に加えて視程の予測にも利用可能であるという特長を持つ。

吹雪時の視程と風速や降雪強度などの気象条件との関係について調べた研究は過去に存在する^{14) 15) 16) 17)}。しかし、風速と視程（文献 14），降雪強度と視程（文献 15, 16），風速と気温と視程（文献 17）との関係を示したものであり、降雪強度と風速とともに考慮した視程の推定手法はまだ明らかにされていない。

また、気象データを使う吹雪の予測システムが存在することは文献 18 に示されているがその原理はブラックボックスである。さらに、1 日に 2 回しか提供されない高層気象データを使っているため特殊性が高く、きめ細かな情報提供としての発展性に乏しいため、ある特定地域の道路管理者内部で用いられているにすぎない。

従って、汎用的な視程推定手法を開発するためには、降雪を伴う吹雪に適用可能で、かつ、容易に得られる気象データから視程を推定する手法を明らかにする必要がある。すなわちデータの更新間隔が比較的短く、かつ面的でかつ詳細な情報を容易に入手できる風速や降雪強度などの気象要素だけで視程を推定することが要求される。

吹雪時の視程情報収集技術・研究における本研究の位置づけは、あるエリアの視程障害の概略を把握し道路情報としてドライバーに提供するため、一般に入手できる気象情報から降雪を伴う吹雪時の視程を推定する手法を開発することにある（図1.7）。

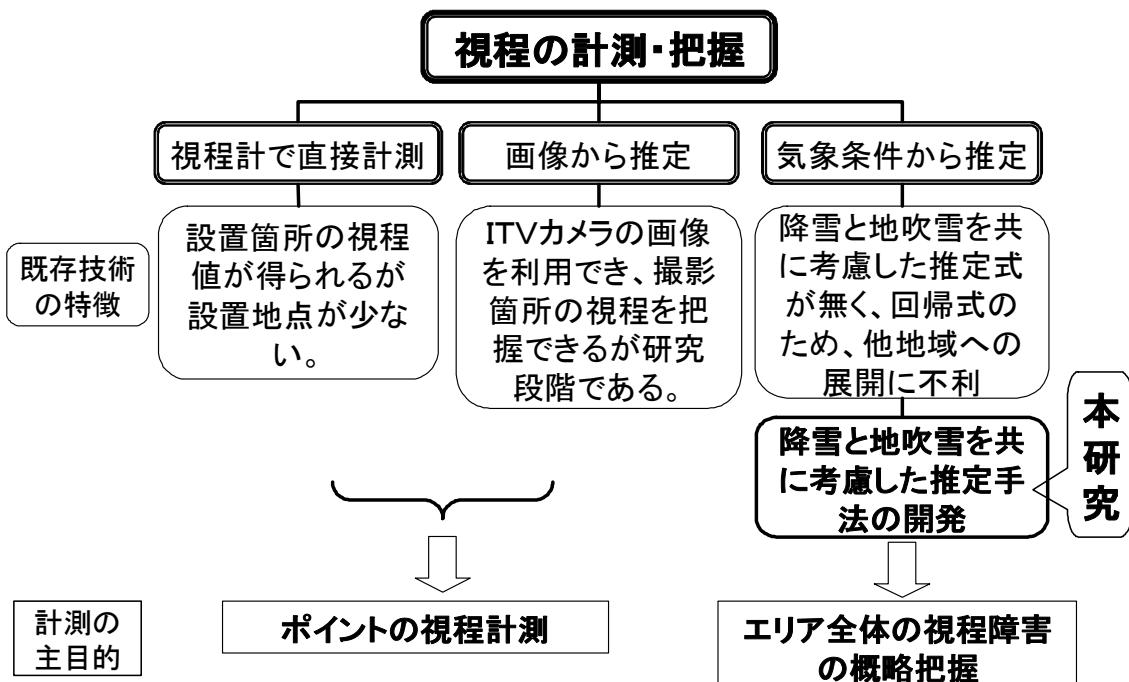


図 1.7 吹雪時の視程情報収集に関する既存の技術研究と本研究の位置づけ

第1章 参考文献

- 1) 北海道開発局, 北海道開発土木研究所: 道路吹雪対策マニュアル, (2003)
- 2) 金子学, 加治屋安彦, 福沢義文, 金田安弘, 丹治和博: 冬期道路とヒューマンファクターに関する研究(第1報) -ドライバー・ニーズ調査の結果から-, 土木学会北海道支部(2002)
- 3) 竹内政夫: 吹雪時の視程に関する研究, 土木試験所報告, 74, 31p (1980)
- 4) 石本敬志: 雪粒子による視程変動の研究, 開発土木研究所報告, 107, 57p (1995)
- 5) Kajiya Y., Fukuzawa Y., Ishimoto K.: Field Test Results of Intelligent Delineator Systems, Snow Removal and Ice Control Technology, Selected Papers Presented at the Fourth International Symposium on Snow Removal and Ice Control Technology, Transportation Research Board (1997)
- 6) 松沢勝, 加治屋安彦, 鈴木武彦: 冬期道路の高度情報提供システムに関する基礎研究～路側情報提供サービスのユーザ受容性～, 北海道開発土木研究所月報 (2003)
- 7) 鈴木武彦, 松沢勝, 加治屋安彦, 菅野誠: 冬期道路の高度情報提供システムの開発～自発光式視線誘導標を利用した安全走行支援サービスの実道実験～, 第3回ITSシンポジウム (2004)
- 8) 加治屋安彦, 福沢義文, 松沢勝, 金田安弘, 丹治和博: 吹雪危険度評価に関する一考察 (2) -多重衝突事故の発生要因-, 寒地技術論文・報告集 vol. 18, 359-366 (2002)
- 9) 竹内政夫, 石本敬志, 野原他喜男, 福沢義文: 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 (1986)
- 10) 気象庁: 地上気象観測指針, 154pp (2002)
- 11) 石本敬志: 北海道の国道における吹雪対策とビデオカメラによる視程計測, 雪氷, 52, 195-202 (1990)
- 12) Chiba T., Ishimoto K., Kajiya Y.: Spatial and Temporal Changes of Visibility in Blowing Snow and in Fog, Proceedings on the Fourth International Symposium on Snow Removal and Ice Control Technology, Transportation Research Board (1996)
- 13) 萩原亨, 藤田諭, 木坂聖: デジタル静止画像を用いた吹雪時の道路視環境評価に関する研究, 寒地技術論文・報告集, 17, 145-152 (2001)
- 14) Budd W. F. : Turbulent Transport of Non Uniform Snow Particles, University of Melbourne A. G. U. Antarctic. Res. Ser., 9, 51-134 (1964)
- 15) 斎藤博英: 降雪の強さと視程, 国立防災科学技術センター研究報告, 5, 33-40 (1971)
- 16) Mellor M: Light scattering and particle aggregation in snow storm, J. Glaciology, 6, No. 44, 237-248 (1966)
- 17) 石本敬志, 竹内政夫, 福沢義文: 吹雪時の視程と気象条件の相互関係, 第25回北海道開発局技術研究発表会, 57-60 (1982)
- 18) (社) 日本建設機械化協会, (社) 雪センター: 2005除雪・防雪ハンドブック (防

雪編), (2005)

第2章 吹雪の物理モデル

2. 1 はじめに

吹雪は、雪粒子が空气中を輸送される現象である。吹雪現象を理解するためには、吹雪粒子の運動について理解する必要がある。

吹雪粒子の主な運動形態には、図2.1の様に転動、跳躍、浮遊の3種類ある¹⁾。転動は雪面上を雪粒子が転がって移動する運動であり、跳躍は外因（例えば風の応力や、他の雪粒子の衝突など）で雪面から飛び出した雪粒子が飛び跳ねて移動する運動である。跳躍との違いは、雪粒子が積雪表面から離れる瞬間の有無で、实际上も区別がつきづらいため、転動は跳躍の初期段階と見なされることが多い。跳躍は、主に0.01～0.1mの高さで卓越する。この層を跳躍層と呼び、跳躍運動をしている飛雪粒子を跳躍粒子と呼ぶ。跳躍粒子についてはBagnold²⁾の飛砂の研究を基に発展した運動力学理論が適用される。跳躍層の上端では、風の乱流によって雪粒子が巻き上げられ、跳躍粒子が浮遊し始める。浮遊した飛雪粒子は浮遊粒子と呼び、浮遊粒子が卓越する層は浮遊層と呼ばれる。浮遊粒子の粒径は0.02～0.4mm程度と小さいため³⁾、風によって輸送されるものと見なし、塩谷⁴⁾に始まる乱流拡散理論が適用される。

道路上の視程障害を考えた場合、小型車のドライバーの目線の高さ1.2mが一つの目安になることから、本章では浮遊層における吹雪の物理モデルを扱う。

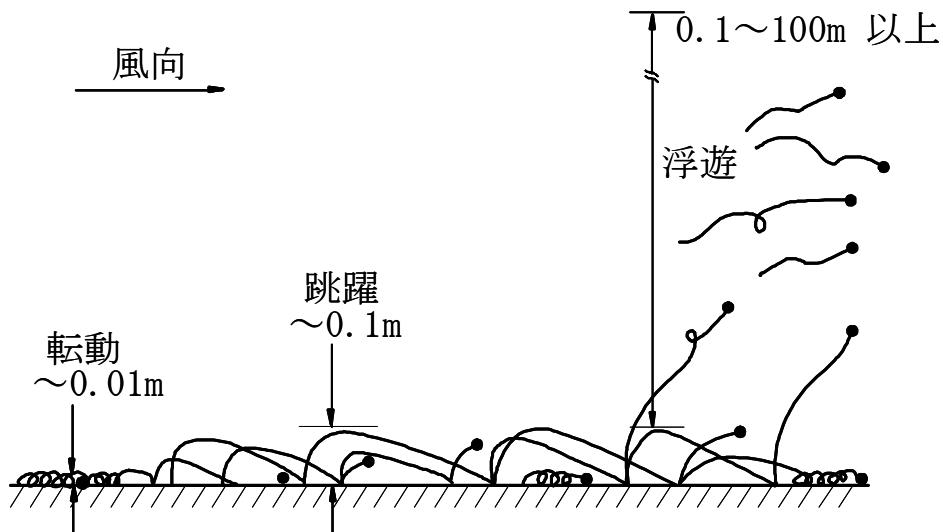


図2.1 飛雪の運動には転動、跳躍、浮遊の3つの形があり、地吹雪は転動、跳躍からなる低い地吹雪と風速が大きく浮遊粒子を含む高い地吹雪に分けられる¹⁾。

2. 2 既存の物理モデル

(1) 塩谷の式⁴⁾

吹雪の強さを示す物理量として、飛雪流量と飛雪空間密度がある。飛雪流量 $M_f[g/(m^2s)]$ は、流れに直交する単位断面積を単位時間に通過する飛雪の質量であり、飛雪空間密度 $M[g/m^3]$ は、単位空間に存在する飛雪粒子の質量である。浮遊層においては、飛雪流量

$Mf[g/(m^2s)]$ は、飛雪空間密度 $N[g/m^3]$ と風速 $V[m/s]$ の積で表すことができる。

吹雪の発達から衰退までを水平方向に見ると、雪面の雪粒子を取り込んで発達する浸食域、吹雪が十分に発達し（このとき吹雪の輸送量は飽和吹雪量に達する）定常状態になる定常領域、風速が弱まるなどのために吹雪が衰退し、雪面に雪粒子を堆積する堆積領域の3段階に分けられる⁵⁾。定常状態のときに吹雪の輸送量が最も大きいとみなすことができる。

ここでは、吹雪は十分発達して定常状態の場合を考える。このとき、雪面での雪粒子の浸食と堆積が釣り合い、乱流拡散で上に輸送される雪と、落下する雪が釣り合うと見なすことができる。このような状態では巨視的に水平方向に吹雪は一様であり時間変動も無視できるので、鉛直方向だけを考慮すればよい。いま、図2.2に示すように、高さ z に厚さ Δz 、底面積が1の微小空間があり、その空間での飛雪粒子の質量収支を考える。高さ z での飛雪空間密度を $N(z)$ とする。飛雪が落下することにより、単位時間に鉛直方向下向きに流れる飛雪量は、飛雪粒子の平均の落下速度を $w(z)$ とすると $w(z)N(z)$ となる。また、乱流拡散によって飛雪空間密度の高い場所（下方）から飛雪空間密度の低い場所（上方）に向けた鉛直上向きへの飛雪の流れは、その場所での飛雪空間密度の勾配 (dN/dz) と鉛直上向きの乱流拡散係数 K の積 $K(z)*dN(z)/dz$ である。このような条件において、 z 軸を上向きにとると次式が成り立つ。

$$\frac{d}{dz} \left(K \frac{dN}{dz} \right) + \frac{d}{dz} (wN) = 0 \quad \cdots (2.1)$$

式(2.1)は、乱流拡散によって鉛直上向きに移動する飛雪の流れの収支と自然落下する雪粒子による飛雪の流れの収支が均衡状態にあることを示すものである。

乱流拡散係数 K は、大気の安定度によって値が異なる。簡単に言うと、放射冷却現象などで、雪面近くの大気の温度が低くなると、相対的に空気が重くなるため上方への乱流拡散は起こりづらくなる。このような状態を「大気が安定」と呼ぶ。この逆を「大気が不安定」と呼び、その中間を「大気が中立状態」と呼ぶ。吹雪の発生時は、大気が中立状態であることが知られている⁶⁾。大気が中立状態のとき、乱流拡散係数は、カルマン定数 k (= 0.4) と摩擦速度 U_* から次式で表される。

$$K = kU_*z \quad \cdots (2.2)$$

式(2.1)を $z=0$ から高さ z まで積分すると

$$K \frac{dN}{dz} + wN = P \quad \cdots (2.3)$$

となる。 P は積分定数で、 $z=\infty$ における降雪強度に相当する。

塩谷⁴⁾は、降雪がない地吹雪の場合（即ち $P=0$ で）式(2.3)を解き、飛雪空間密度の垂直分布を求め、次式を得た。

$$\frac{N}{N_t} = \left(\frac{z}{z_t} \right)^{-\frac{w}{kU_*}} \quad \cdots (2.4)$$

ここで、 z_t は基準となる高さで、浮遊層の下端の高さを取る場合が多い。また N_t は z_t における飛雪空間密度である。即ち、浮遊層の下端が最も飛雪空間密度が高く、そこから鉛直上方に飛雪が拡散するという吹雪の物理モデルを考えている。これが、降雪のない吹雪時の飛雪空間密度の垂直分布を表す、いわゆる塩谷の式として知られているものである。

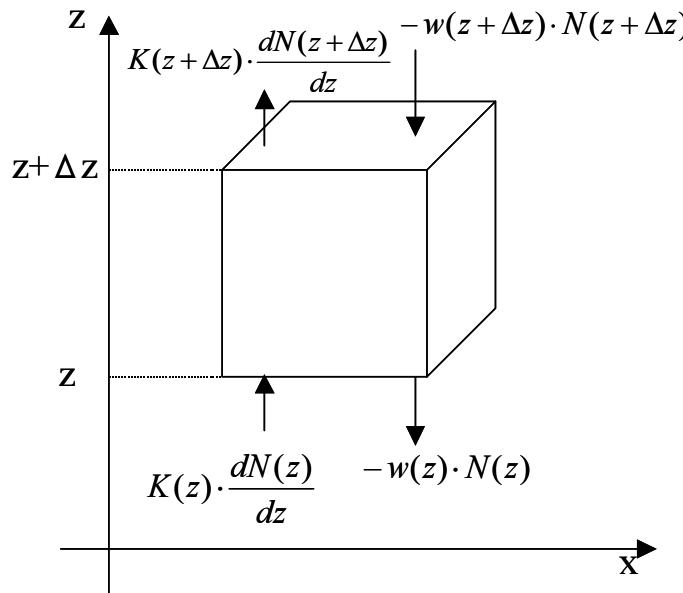


図 2.2 浮遊層における飛雪粒子の乱流拡散モデルの模式図

(2) 小林の式

降雪のある吹雪に乱流拡散理論を初めて適用したのは小林である⁷⁾。小林は $w=$ 一定、 $K=$ 一定、 $P \neq 0$ の条件で式(2.3)を解いて次式を得た。

$$N = \frac{P}{w} + \left(N_t - \frac{P}{w} \right) \exp \left(- \frac{w}{K} z \right) \quad \cdots (2.5)$$

ところが、 $K=$ 一定としたため、 P を 0 に限りなく近づけたとき、式(2.4)との乖離が生じる

という問題があった。降雪強度は、連続した量であるから、このように $P=0$ で値が不連続になるのは扱いに不便である。これを解決したのが次に述べる竹内・松沢の式である。

2. 3 竹内・松沢の式

著者らは、 $w=一定$, $K=kU_*z$, $P\neq 0$ の条件で、式(2.3)を解くことによって、次式を得た⁸⁾。(計算過程は、補遺に示す)

$$N = \frac{P}{w} + \left(N_t - \frac{P}{w} \right) \left(\frac{z}{z_t} \right)^{-\frac{w}{kU_*}} \quad \cdots (2.6)$$

式(2.6)において、 $P=0$ と置くと、降雪のない吹雪時の飛雪空間密度の垂直分布である塩谷の式(式(2.4))と一致することがわかる。式(2.6)によると、 $z \gg z_t$ では、第2項が無視できるので、横軸を N 、縦軸を z とするグラフ上で、 z を限りなく ∞ に近づけたとき、 N は P/w に漸近する。

式(2.6)は現在では、雪氷学の教科書的な文献⁹⁾にも記載されている。

この式の適用条件としては、吹雪が十分に発達していることである。吹雪の発達については、強風が続くこと以外にも、雪面からの雪の供給が必要である。しかし、吹雪が運ぶことのできる雪の質量は限界がある。この限界に達するためには、風上側の吹送距離が 200 m 以上必要であることが知られている⁵⁾。従って、ここで示した式(2.6)は、周囲が十分に開け、風上に十分な吹送距離をもつ平坦な雪原上での飛雪空間密度を与える。一方、道路の風上側に樹木や建物、防雪対策施設など吹雪を遮るものが無く、開けた田畠等の区間は、吹雪が良く発達して交通に障害を与える危険度が高いことが知られている(例えば文献 10)。このことから、言い換えると、式(2.6)は、吹雪危険度の高い箇所での飛雪空間密度を与える式と考えることができる。

2. 4 竹内・松沢の式の改良(松沢・竹内の式)¹¹⁾

降雪を伴う吹雪時においては、粒径の大きな降雪粒子と、地吹雪によって巻き上げられる粒径の小さな浮遊粒子が混在すると考えられる。式(2.6)では、両者の落下速度を同じと扱っているが、高さ z を無限大に近づけていたときの飛雪空間密度である式(2.6)の第1項 P/w の飛雪粒子の落下速度 w は、降雪強度が P であるから、降雪粒子の落下速度とした方がより正確である。また、第2項は、基準高さ z_t での飛雪空間密度 N_t から、降雪粒子の飛雪空間密度 P/w を除いた値、すなわち基準高さ z_t での地吹雪を起源とする浮遊粒子の上向きの拡散を示したものである。よって、式(2.6)のべき乗の係数に含まれる雪粒子の落下速度 w は、地吹雪を起源とする浮遊粒子の落下速度とした方がより正確と考えられる。

以上より、著者は、浮遊層内では降雪粒子と、地吹雪を起源とする浮遊粒子が独立して存在すると仮定し、降雪粒子の落下速度 w_f と地吹雪を起源とする浮遊粒子の落下速度 w_b に分けて考慮し式(2.6)を次の式(2.7)に書き換えた¹¹⁾。

以下では、式(2.7)を松沢・竹内の式と呼ぶこととする。また、浮遊粒子は、地吹雪を起源とする浮遊粒子に限定して呼ぶこととして、浮遊層内の降雪粒子と区別することとする。

$$N = \frac{P}{w_f} + \left(N_t - \frac{P}{w_f} \right) \left(\frac{z}{z_t} \right)^{-\frac{w_b}{kU_*}} \quad \cdots (2.7)$$

2. 5 実測値との比較

浮遊層における飛雪空間密度の垂直分布の理論式である式(2.7)が実際の現象を表しているかを確かめるため、著者は、石狩吹雪実験場で飛雪流量と風速を測定し飛雪空間密度の垂直分布を求めた。

飛雪流量の観測は、口径約 10 cm の捕雪袋型吹雪計によって行った。捕雪袋のネットにはメッシュ間隔 105 μm のプランクトンネットを用いた。吹雪計は、専用の固定器具に据え付ける。固定器具は、上部と下部の間にベアリングがあり、上部（吹雪計取り付け部）の首が自由に回るようになっている。吹雪計を固定器具上部に設置すると、吹き流しの原理で、開口部が風上に向くようになっている（図 2.3）。

観測に先立ち、吹雪計の質量をそれぞれ測定しておく。また、固定器具の下部を適当なポールに固定する。この時、吹雪計を取り付けたときに吹雪計の中心が目的の高さとなるようにする。観測ではまず、吹雪計を固定器具の上部にはめ込んだ後、吹雪計の蓋を開け、計時を始める。捕雪袋内に雪粒子がたまり始めたら、ネットが目詰まりしないうちに蓋を閉め計時を終える。次に、外側に付着した雪を払い落とした後、ネット内の雪粒子が昇華しないように、速やかに吹雪計の質量を測定する。この質量から、事前に測定しておいた吹雪計の質量を差し引いたものが、捕捉した雪粒子の質量となる。捕捉した飛雪の質量を、蓋を開けていた時間と吹雪計開口部の断面積で割ると、飛雪流量が得られる。

図 2.4 は観測結果を式(2.7)に最小二乗法で近似させて係数を定めたものである。降雪のある場合は z が大きくなるに従い飛雪空間密度は P/w_f に漸近し、降雪のない場合は漸近しないことが分かる。また、降雪粒子の落下速度 w_f を 1.2 m/s と仮定すると降雪強度はそれぞれ 3.6 cm/h, 1.5 cm/h, 0.3 cm/h, 0.1 cm/h となり概ね妥当な値となった。図 2.4 より、式(2.7)は、降雪を伴う吹雪時の飛雪空間密度の垂直分布をよく表していることがわかる。

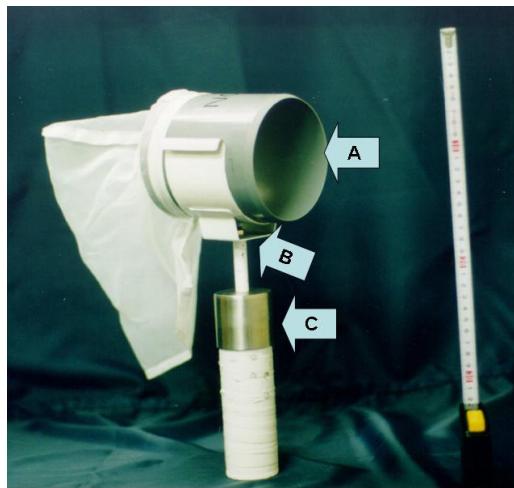


図 2.3 捕雪袋型吹雪計(A)と固定金具(B)。(C)部分の内部にベアリングがあり風上に開口部が向く。

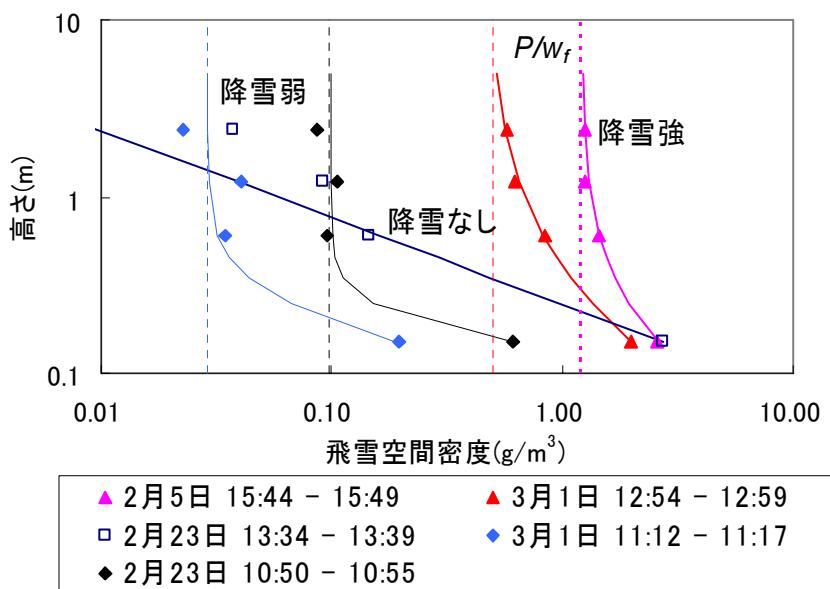


図 2.4 飛雪空間密度の垂直分布の実測値に式(2.7)を近似させた結果

2. 6 まとめ

浮遊層の吹雪粒子の輸送を表現するには、乱流拡散理論が適用される。これを初めて適用したのは塩谷で、降雪 $P=0$ 、即ち降雪を伴わない吹雪（地吹雪）の条件下での乱流拡散方程式を解いて塩谷の式を導いた。著者は、降雪を伴う吹雪に対して乱流拡散モデルを当てはめ、初めて降雪 $P \neq 0$ かつ拡散係数 $K=kU_{*Z}$ の条件で乱流拡散方程式の一般解を解き、降雪を伴う吹雪時の飛雪空間密度の垂直分布式(2.6)を導いた。その式は、雪氷学の基本となる書籍にも記載されるようになっている。

さらに、降雪粒子と浮遊粒子の落下速度を分けて与えることで、さらに精度の高い式(2.7)が得られた。飛雪空間密度の垂直分布を測定し、式(2.7)に当てはめたところ、実際の現象を良く表すことができるものであった。

補 遺

式(2.6)への展開について以下に示す。

文献6によると、式(2.3)の一般解は、次式で表される。なお、文献6では $z=0$ からの積分となっているが、浮遊層を考えるため $z=z_t$ から積分した。

$$N(z) = \exp\left(-\int_{z_t}^z \frac{w}{K} dz\right) \left\{ \int_{z_t}^z \frac{P}{K} \exp\left(\int_{z_t}^z \frac{w}{K} dz\right) dz + N_t \right\} \quad \cdots (2.8)$$

ここで

$$\int_{z_t}^z \frac{w}{K} dz = \frac{w}{kU_*} \left[\log z \right]_{z_t}^z = \frac{w}{kU_*} \log \left(\frac{z}{z_t} \right) \quad \cdots (2.9)$$

また、

$$\begin{aligned} \int_{z_t}^z \frac{P}{K} \exp\left(\int_{z_t}^z \frac{w}{K} dz\right) dz &= \int_{z_t}^z \frac{P}{K} \exp\left(\frac{w}{kU_*} \log \frac{z}{z_t}\right) dz = \frac{P}{kU_*} \int_{z_t}^z \frac{1}{z} * \left(\frac{z}{z_t}\right)^{\frac{w}{kU_*}} dz \\ &= \frac{P}{kU_*} \int_{z_t}^z z_t^{-\frac{w}{kU_*}} * z^{\left(\frac{w}{kU_*}-1\right)} dz = \frac{P}{kU_*} * z_t^{-\frac{w}{kU_*}} \left[\frac{kU_*}{w} * z^{\frac{w}{kU_*}} \right]_{z_t}^z = \frac{P}{w} \left\{ \left(\frac{z}{z_t}\right)^{\frac{w}{kU_*}} - 1 \right\} \quad \cdots (2.10) \end{aligned}$$

式(2.9)と式(2.10)を式(2.8)に代入すると

$$\begin{aligned} N(z) &= \exp\left\{ -\frac{w}{kU_*} \log\left(\frac{z}{z_t}\right) \right\} \left\{ \frac{P}{w} \left(\frac{z}{z_t}\right)^{\frac{w}{kU_*}} - \frac{P}{w} + N_t \right\} \\ &= \left(\frac{z}{z_t}\right)^{-\frac{w}{kU_*}} \left\{ \frac{P}{w} \left(\frac{z}{z_t}\right)^{\frac{w}{kU_*}} - \frac{P}{w} + N_t \right\} = \frac{P}{w} + \left(N_t - \frac{P}{w}\right) \left(\frac{z}{z_t}\right)^{-\frac{w}{kU_*}} \quad \cdots (2.6) \end{aligned}$$

第2章 参考文献

- 1) 竹内政夫：ふぶき（地吹雪）吹きだまりの発生機構と対策，雪氷工学講座，北陸建設弘済会，259-280 (1985)
- 2) Bagnold R. A. :The Physics of blown sand and desert dunes. Methuen and Co. Ltd., 265pp (1941)
- 3) Budd W. F., Dingle W. R. and Radok U. :The Byrd snow drift project: Outline and basic results, Meteorology Department, Publication No. 7, 23p (1966)
- 4) 塩谷正雄：吹雪密度の垂直分布にたいする一考察，雪氷，15，6-9 (1953)
- 5) 竹内政夫：吹雪時の視程に関する研究，土木試験所報告，74，31pp (1980)
- 6) 西尾文彦, 石田完:地吹雪における乱れのエネルギー消散率, 低温科学, A31, 69-85 (1973)
- 7) Kobayashi S. :Annual precipitation estimated by blowing snow observation at Mizuho Station, East Antarctica, 1980. Memoirs of National Institute of Polar Research., Special Issue, 117-122 (1985)
- 8) 竹内政夫, 松沢勝:吹雪粒子の運動と垂直分布, 雪氷, 53, 309-315 (1991)
- 9) 前野紀一, 遠藤八十一, 秋田谷英次, 小林俊一, 竹内政夫:基礎雪氷学講座III 雪崩と吹雪, 古今書院 (2000)
- 10) 北海道開発局, 北海道開発土木研究所:道路吹雪対策マニュアル, (2003)
- 11) 松沢勝, 竹内政夫:降雪強度と風速から視程を推定する手法に関する研究(2), 1998 年度日本雪氷学会全国大会予稿集 (1998)

第3章 気象条件による吹雪時の視程 推定手法の理論

3. 1 はじめに

吹雪に関しては、風速や、降雪強度などと関係が深い。従って、気象条件と視程との関係を明らかにすることで、気象データから視程を推定することができると考えられる。気象データは、実況値、予測値とも詳細な情報が得られるので、気象条件から吹雪時の視程を推定する手法が明らかになることで、視程の現況把握だけでなく、予測にも利用することができる。

道路における吹雪による視界不良の監視には、視程計が用いられ、メートル単位で出力が得られる。しかし、ドライバーへの吹雪情報の適切な提供によって、冬季交通の安全性の向上を図るために、メートル単位の細かな視程は必要ではない。Goodwin¹⁾は、既存の道路情報板を用いた濃霧の警告システムを整理した。これによると、4～5段階の濃霧の程度に応じて警告を行うシステムがほとんどである。このことから吹雪についても、4～5段階程度の吹雪視程の強弱を推定できれば、実用的には十分であると考えられる。

3. 2 既存研究

気象条件と視程との関係については、いくつか既存研究があり、それぞれ観測データから統計的に求められた関係式が得られている。

式(3.1)は、斎藤²⁾が新潟県で降水量計と目視での視程計測データから求められた降雪強度 P_w [cm/h] と視程 Vis [m] との関係式である。文献2では異なる単位が用いられていたので単位を変換して書き換えた。

$$Vis = 1150 * \left(\frac{5}{3} \right) * P_w^{-0.76} \quad \cdots (3.1)$$

斎藤は、風速は計測しておらず、季節風下での降雪とだけ記している。一方式(3.2)は石本ら³⁾が北海道北部地域での観測により得たデータより、高さ 7m の風速 V_7 [m/s] と気温 T [°C] を説明変数として重回帰分析を行って得られた関係式である。

$$Vis = \frac{4 * 10^6}{V_7^3 (2 - T)^2} \quad \cdots (3.2)$$

式(3.2)では、斎藤とは逆に降雪の項が含まれていない。

重回帰式の特徴として、式を作成したときの気象条件や雪質の条件が近い場合は、他の事例にも適用できるが、条件が異なる場合に対して拡張して適用する場合は誤差が大きくなると考えられている。現在、これらの関係式が実用面で用いられていないのは、これらの関係式があくまで統計的に求められた式であるため、条件の異なる地域で適用する場合に、精度が十分確保できない可能性があることに起因すると考えられる。(これについては、第4章で実際に計算を行って検討を行う。)

さらに、最大の理由として、実際の吹雪現象は、降雪と地吹雪が一緒になって視程障害

を引き起こす場合が多い一方で、過去の研究では、降雪を伴う吹雪時の視程と気象条件の関係を明らかにしたもののが挙げられる。そこで、本章では、第2章で示した吹雪の物理モデルを用いて、降雪のある吹雪時の視程推定手法について検討する。

3. 3 松沢・竹内の式を用いた視程推定手法の開発⁴⁾

(1) 視程と飛雪流量との関係式

吹雪の強さを表す物理量として、飛雪空間密度 $M[\text{g}/\text{m}^3]$ と飛雪流量 $Mf[\text{g}/(\text{m}^2\text{s})]$ とがあることを第2章で示したが、浮遊層においてはこの両者の間には、風速を $V[\text{m}/\text{s}]$ とすると次の関係が成り立つ。

$$Mf = N \cdot V \quad \cdots (3.3)$$

一方、視程 Vis と飛雪流量 Mf との関係については、Mellor⁵⁾、斎藤²⁾、Budd *et al.*⁶⁾、竹内他⁷⁾、Tabler⁸⁾などの研究がある。竹内と福沢⁹⁾は、Tabler⁸⁾を除く4者の結果を整理して、視程と飛雪流量の関係を明らかにした(図3.1)。Budd *et al.*⁶⁾、竹内他⁷⁾、Tabler⁸⁾の視程と飛雪流量の測定はそれぞれ高さ 2.0 m, 1.5 m, 0.5 m で行われた。Mellor⁵⁾と斎藤²⁾は観測の高さを述べていないが、地吹雪を伴わない降雪時の観測であるので、結果は高さに依存しない。

竹内と福沢⁹⁾は、近似式として次の式(3.4)を得た。式(3.4)に相当する線を図3.1の破線で表す。図3.1 からわかるように、視程が 100 m 未満の領域で誤差が大きくなる傾向にあった。そこで、著者は図3.1において視程 3000 m 以下の範囲で直線近似を行い、視程 Vis と飛雪流量 Mf の関係を表す式(3.5)を得た。図3.1 で示す実線が式(3.5)に相当する。図からわかるように、式(3.4)の結果に比べると、視程の低い領域でも、実測値によく近似している。

$$Vis = \frac{683}{(Mf + 0.154)} + 2.6 \quad \cdots (3.4)$$

$$\log(Vis) = -0.773\log(Mf) + 2.85 \quad \cdots (3.5)$$

式(3.5)を、式(3.3)を用いて書き変えると、視程 $Vis[\text{m}]$ は次の式(3.5')で表すことができる。

$$Vis = 10^{\{-0.773\log(Mf) + 2.85\}} \quad \cdots (3.5')$$

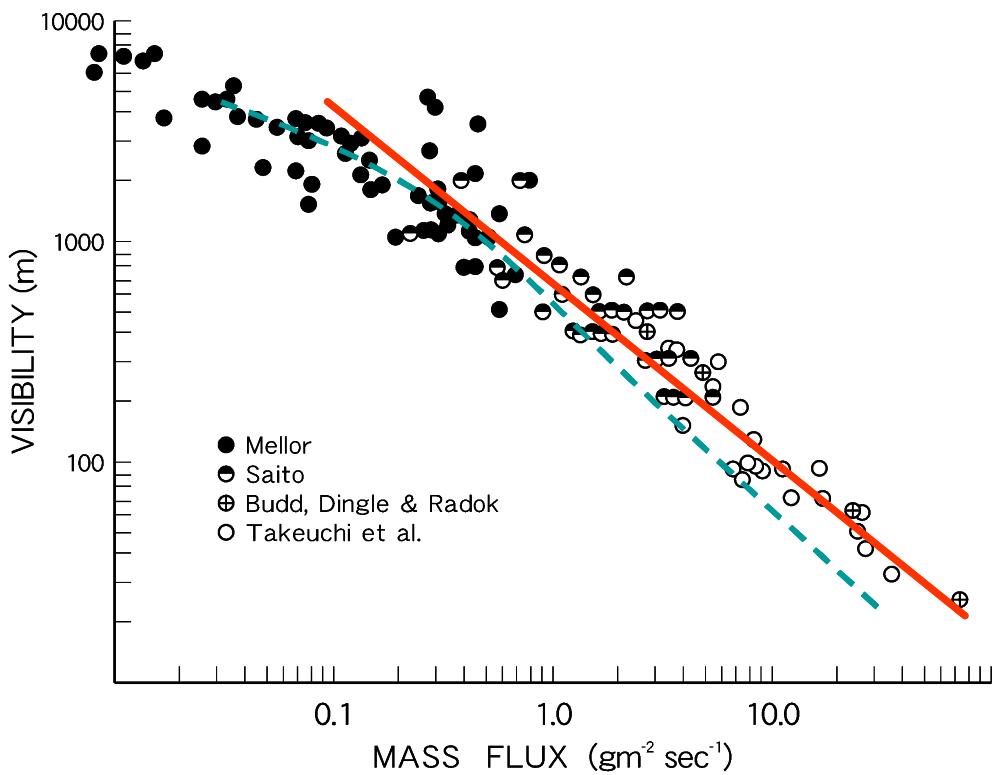


図 3.1 視程と飛雪流量の関係 (文献 9 に加筆)

(2) 任意の高さにおける飛雪空間密度の決定

式(3.5')から、視程を求めるためには、飛雪空間密度 N と風速 V を与えれば良いことがわかる。風速は一般的に容易に得られるが、飛雪空間密度は容易に得ることができない。そこで、飛雪空間密度は、第 2 章で求めた、式(2.7)から、計算で与えるとする。

$$N(z) = \frac{P}{w_f} + \left(N_t - \frac{P}{w_b} \right) \left(\frac{z}{z_t} \right)^{-\frac{w_b}{kU_*}} \quad \cdots (2.7) \text{再掲}$$

式(2.7)において、降雪強度 P は、気象レーダーなどにより実測値が得られる。残る未知数は、降雪粒子の落下速度 w_f 、浮遊粒子の落下速度 w_b 、摩擦速度 U_* 、基準高さ z_t での飛雪空間密度 N_t であるが、どれもリアルタイムで直接計測を行って実測値を与えるのは容易でない。そこで、これらについては既存の研究から値を定める。

降雪粒子や浮遊粒子の落下速度は、理論計算や、室内実験、野外観測によって求められている。Budd *et al.*⁶⁾は、飛雪粒子の落下速度を測定して、高さ 0.125 m において、落下速度 = 0.3~0.38 m/s という値を得た。これより、 $w_b = 0.35$ m/s を採用した。一方、降雪粒子の落下速度に関しては、石坂¹⁰⁾の研究に基づき、ここでは雲粒の付着が少ない雪片の観

測定値から $w_f=1.2$ m/s を採用した。

また、基準高度 z_t [m]には、一般的に跳躍粒子の卓越する層の上端の高さ（跳躍層の高さ）を取ることが多い。この高さは、摩擦速度に依存することが知られているが¹¹⁾、式(2.7)自体は浮遊層で成り立つことを考えると、境界条件としての z_t は、浮遊層に含まれる任意の高さを与えてよい。摩擦速度が大きくなると跳躍層が厚くなるので、十分に浮遊層に含まれる高さをとることを考慮する必要があり、竹内¹²⁾の計測結果より、基準高度 $z_t=0.15$ m として計算を行うものとした。また、基準高度 z_t [m]での飛雪空間密度 N_t [g/m³]については、計算の結果得られる視程値がもっとも悪くなるように（すなわち安全側に）与えるのが現実的と考えられる。竹内¹²⁾の測定例によると、高さ 0.15 m での飛雪空間密度は 0.5~30 g/m³ である。以上のことから、基準高度 $z_t = 0.15$ m、飛雪空間密度を $N_t=30$ g/m³ として計算を行うこととした。

摩擦速度 U_* [m/s]は、式(3.6)に示す風速の垂直分布式に、西尾・石田¹³⁾が北海道での観測から得た表面粗度(地表面の凹凸を表すパラメータ) $z_0=1.5 \times 10^{-4}$ m とカルマン定数 $k=0.4$ を代入することにより求められる式(3.7)に、高さ 10m の風速 V_{10} [m]を与えることで求める。

$$V_z = \frac{U_*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad \cdots (3.6)$$

$$U_* = 0.036 \quad V_{10} \quad \cdots (3.7)$$

(3) 気象条件からの視程推定の手順

以上を整理して気象条件からの視程推定の手順を示すと次のようになる。

(手順 1) 下記の値と、風速を式(3.7)に代入することで得られる U_* 、および、降雪強度 P [g/(m²s)]を式(2.7)に代入することで、任意の高さ z [m]の飛雪空間密度 $N(z)$ [g/m³]が得られる。

$$w_b=0.35 \quad [\text{m/s}]$$

$$w_f=1.2 \quad [\text{m/s}]$$

$$z_t=0.15 \quad [\text{m}]$$

$$N_t=30 \quad [\text{g/m}^3]$$

(手順 2) 得られた任意の高さ z [m]での飛雪空間密度 $N(z)$ [g/m³]と高さ z [m]での風速 $V(z)$ [m/s]を式(3.5')に代入することで任意の高さ z [m]での視程値が得られる。

なお、気象レーダー等での降雪強度 Pr の単位は時間降水量[mm/h]もしくは時間降雪量[cm/h]として表される場合が多い。降雪直後の新雪の密度を 0.1 g/cm³ とすると、時間降雪量 1 cm/h は時間降水量 1 mm/h に等しい。このとき、式(2.7)における降雪強度 P は $P=0.28Pr$ で表される。

(4) 適用条件

北海道における降雪時の吹雪発生臨界風速を調べた竹内ら¹⁴⁾の研究(図3.2)によると、高い地吹雪(乱流によって発生する浮遊粒子が主となる)が断続的に発生する臨界条件は、気温 $T[^\circ\text{C}]$ と高さ 7m での風速 $V_7[\text{m/s}]$ を用いて、次のように整理される。

$$V_7 \geq 8.5 \text{ [m/s]} \quad (\text{但し } T \leq -2^\circ\text{C}) \quad \cdots (3.8a)$$

$$V_7 \geq 8.5 + (1 + 0.5T) \text{ [m/s]} \quad (2^\circ\text{C} \geq T > -2^\circ\text{C}) \quad \cdots (3.8b)$$

なお、気象庁等の気象観測所では、通常 10 m の高さで風速を測定している。高さ 10 m での風速と、高さ 7 m での風速は、周囲が開けている状態で測定している場合、ほとんど差異は無い。従って、ここでは $V_{10} = V_7$ と見なすこととする。

また、上記の条件を満たさない場合(すなわち高い地吹雪が発生しない場合)でも、強い降雪により視程障害が発生する。この場合は、式(2.7)の第1項と風速より、飛雪流量が得られるので、同様にして視程を求めることができる。

ところで、視程が飛雪流量に依存するのは、人間は、運動している雪粒子を点では無く残像を含めて知覚しているためである⁹⁾。風速が強い場合、雪粒子の移動速度は、風速と等しいと仮定しても大きな差異は無い。しかし、風速が弱くなると、風速に対する雪粒子の落下速度が無視できなくなるので、飛雪流量 Mf を計算する際には式(3.3)では無く、以下の式(3.9)を用いる方が適切と考えられる。本研究での視程の計算において、特に断りのない場合は、風速が 8.5 m/s 未満の場合には、式(3.9)を適用する。

$$Mf = N \cdot \sqrt{V^2 + w_f^2} \quad \cdots (3.9)$$

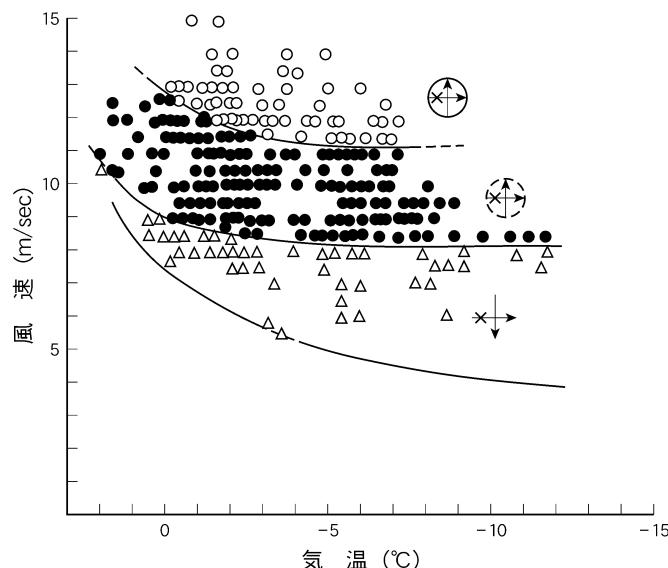


図 3.2 地吹雪の発生臨界風速と気温¹⁴⁾ (○: 連続的に高い地吹雪が発生する。●: 断続的に高い地吹雪が発生する。△: 低い地吹雪が発生する。)

3. 4 議論¹⁵⁾

今回開発した視程推定手法では、浮遊粒子の終端落下速度を $w_b=0.35 \text{ m/s}$ と定数で与えた。すなわち浮遊粒子の粒径が高さに依らず一定であるとして計算を行っている。しかし、Budd *et al.*⁶⁾が示すように、浮遊粒子の粒径は高さによって一様ではない。さらに、同じ高さでも、様々な粒径の浮遊粒子が含まれている。したがって浮遊粒子の終端落下速度 w_b を一定としたことが、視程の計算にどのような影響を与えるか考察する必要がある。そこで、ここでは、粒径分布を考慮して計算した結果と粒径を一定として計算した結果とを比較する。なお、降雪粒子は高さに依存しないと考えることができるので、本章では、降雪項は考慮しないこととする。

(1) 粒径分布を考慮しなかったことの影響

既に示したように、飛雪流量 Mf は、飛雪空間密度 N と風速 V の積である。飛雪粒子の粒径を m 階級に分けると、任意の高さでの飛雪流量 Mf は、次式で与えられる。なお、それぞれの階級に含まれる飛雪粒子の空間密度の垂直分布は独立して成り立つと仮定する。

$$Mf = \sum_{i=1}^m N_i \cdot V \quad \cdots (3.10)$$

ここで、 N_i は、階級 i に含まれる粒子の単位体積当たりの質量である。 N_i は、飛雪空間密度の垂直分布式から次式で与えることができる。

$$N_i = N_{ti} \left[\frac{z}{z_t} \right]^{-\frac{w_{bi}}{kU_*}} \quad \cdots (3.11)$$

ここで、 N_{ti} [g/m³] は、基準高さ z_t における階級 i の飛雪粒子の空間密度である。また、 w_{bi} [m/s] は、階級 i の飛雪粒子の落下速度である。なお、階級 i に含まれる粒子の粒径は全て同じと仮定する。

表 3.1 では、粒径階級毎の飛雪粒子の落下速度を示すと共に、高さ 0.125m, 0.5m, 1m, 2m における、各粒径階級における飛雪粒子の空間密度が、その高さでの飛雪空間密度全体に占める割合を示した。これらの値は、Budd *et al.*⁶⁾が、南極で観測した結果 (Budd *et al.*⁶⁾ の Table5) から求めたものである。

ここで、粒径毎の吹雪粒子の落下速度については、Budd *et al.*⁶⁾が得た次式に基づいて与えることとした。

$$w_b=2.44 \text{ d} \quad [\text{m/s}] \quad (\text{不規則形}) \quad \cdots (3.12a)$$

$$w_b=3.88 \text{ d} \quad [\text{m/s}] \quad (\text{球形}) \quad \cdots (3.12b)$$

ここで d [mm] は、粒子の代表直径である。

式(3.12)に、粒径ランク毎に代表直径を代入して、それぞれ吹雪粒子の落下速度を求め、球形、不規則形の両者の落下速度を平均したものを、その粒径ランクにおける吹雪粒子の落下速度とした。

次に各粒径ランク毎に、飛雪空間密度の垂直分布式を求める。計算では、基準高さ $z_t=0.125$ m、基準高さでの飛雪空間密度 $N_t=30$ g/m³ として計算を行った。また、高さ 10 m での風速が 10 m/s と 20 m/s の 2 条件で計算を行うこととし、摩擦速度 U_* は式(3.7)より求めた。一方、吹雪粒子の粒径を一定として計算を行う際の落下速度には、高さ 0.125 m での粒径分布から質量全体に占める割合の最も大きい階級を代表値として採用し、落下速度 0.35 m/s を用いることとした。

図 3.3 に計算結果を示す。図で実線は吹雪粒子の粒径分布を考慮せず、落下速度を一定として計算したもので、点線は、吹雪粒子の粒径分布を考慮したものである。風速が 10 m/s の場合に、高さ 2 m では、落下速度を一定として計算した視程がやや大きい値となることが分かる。しかし、この時の視程は両者とも 1000m を越えており、道路交通で用いる視程であることを考慮すると、この違いは実用上特に問題ないと考えられる。

表 3.1 各粒径ランクに含まれる粒子の落下速度と質量の比

粒径[mm]	代表直径[mm]	落下速度[m/s]			各階級の質量が全体の質量に占める割合			
		球	不規則	平均	0.125m	0.5m	1m	2m
0.000-0.034	(0.028)	0.11	0.07	0.09	0.000	0.000	0.000	0.000
0.034-0.046	0.04	0.16	0.10	0.13	0.000	0.000	0.001	0.001
0.046-0.058	0.052	0.20	0.13	0.16	0.005	0.003	0.014	0.007
0.058-0.077	0.064	0.25	0.16	0.20	0.022	0.018	0.054	0.061
0.077-0.082	0.076	0.29	0.19	0.24	0.053	0.083	0.116	0.122
0.082-0.094	0.088	0.34	0.21	0.28	0.100	0.134	0.159	0.185
0.094-0.106	0.1	0.39	0.24	0.32	0.133	0.190	0.219	0.195
0.106-0.118	0.112	0.43	0.27	0.35	0.180	0.166	0.123	0.189
0.118-0.130	0.124	0.48	0.30	0.39	0.134	0.092	0.110	0.116
0.130-0.142	0.136	0.53	0.33	0.43	0.123	0.085	0.070	0.033
0.142-0.154	0.148	0.57	0.36	0.47	0.073	0.097	0.069	0.068
0.154-0.166	0.16	0.62	0.39	0.51	0.039	0.049	0.017	0.011
0.166-0.178	0.172	0.67	0.42	0.54	0.016	0.041	0.022	0.000
0.178-0.190	0.184	0.71	0.45	0.58	0.026	0.000	0.026	0.017
0.190-0.202	0.196	0.76	0.48	0.62	0.048	0.000	0.000	0.000
0.202-0.214	0.208	0.81	0.51	0.66	0.000	0.000	0.000	0.000
0.214-0.226	0.22	0.85	0.54	0.70	0.001	0.022	0.000	0.000
0.226-0.238	0.232	0.90	0.57	0.73	0.040	0.000	0.000	0.000
0.238-0.250	0.244	0.95	0.60	0.77	0.000	0.029	0.000	0.000

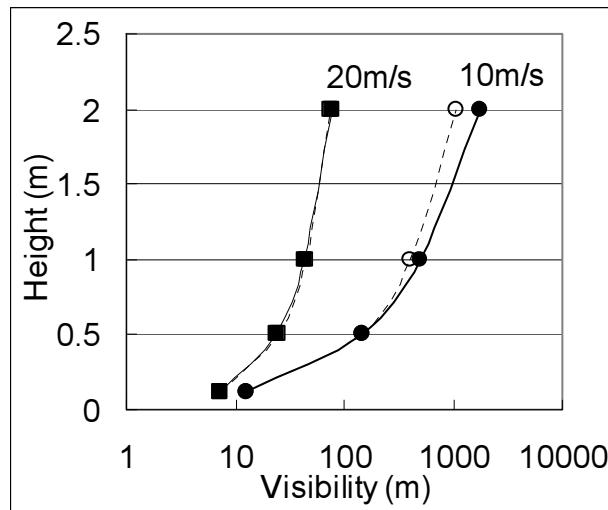


図 3.3 飛雪粒子の粒径分布を考慮した場合と、考慮しない場合の視程推定値の垂直分布。実線は粒径分布を考慮しない場合、点線は粒径分布を考慮した場合。風速 10m/s と 20m/s での計算結果を示した。

(2) 高さによって落下速度が異なることの影響

次に高さによって、吹雪粒子の落下速度が異なることについて検討する。ここでは、それぞれの高さにおける吹雪粒子の粒径分布は考慮せず、粒径の代表値を取ることとする。表 3.1 より、高さ 0.5 m, 1 m, 2 m での粒径分布において、質量全体に占める割合の最も大きい階級を粒径の代表値として考えると、吹雪粒子の落下速度は 0.32 m/s となる。既に述べたように、高さ 0.125 m での飛雪粒子の落下速度は 0.35 m/s である。

そこで、基準高さ z_t の上での飛雪空間密度に関して 2 層モデルを考える。低い方から順に第 1 層、第 2 層とすると、第 1 層の飛雪空間密度 N_1 は、次の式で与えられる。

$$N_1 = N_t \left[\frac{z}{z_t} \right]^{-\frac{w_{b1}}{kU_*}} \quad \cdots (3.13)$$

ここで、 w_{b1} は、第 1 層での飛雪粒子の落下速度である。また、第 2 層での飛雪空間密度 N_2 は次の式で与えられる。

$$N_2 = N_{1top} \left[\frac{z}{z_{1top}} \right]^{-\frac{w_{b2}}{kU_*}} \quad \cdots (3.14)$$

ここで、 N_{1top} は第 1 層の上端高さ z_{1top} での飛雪空間密度で、 w_{b2} は、第 2 層での飛雪粒子の落下速度である。

次に、式(3.13)と式(3.14)に次の値を与える

$$z_{1top} = 0.5 \text{ [m]}$$

$$w_{b1} = 0.35 \text{ [m/s]}$$

$$w_{b2}=0.32 \text{ [m/s]}$$

$$U_s=0.036 V_{10} \text{ [m/s]}$$

$$k=0.4$$

風速 10 m/s と 20 m/s で計算した結果を図 3.4 に示す。図 3.4 より、粒子の落下速度の垂直分布を考慮した場合と考慮しない場合で、視程の推定結果に、あまり違いは無いことがわかる。

以上の結果から、浮遊粒子の粒径分布に関して、今回の視程推定手法においては考慮しなくても良いと考えられる。従って、以降の章で行う視程値の計算に当たっては浮遊粒子の落下速度は平均値（一定値）を使うものとする。

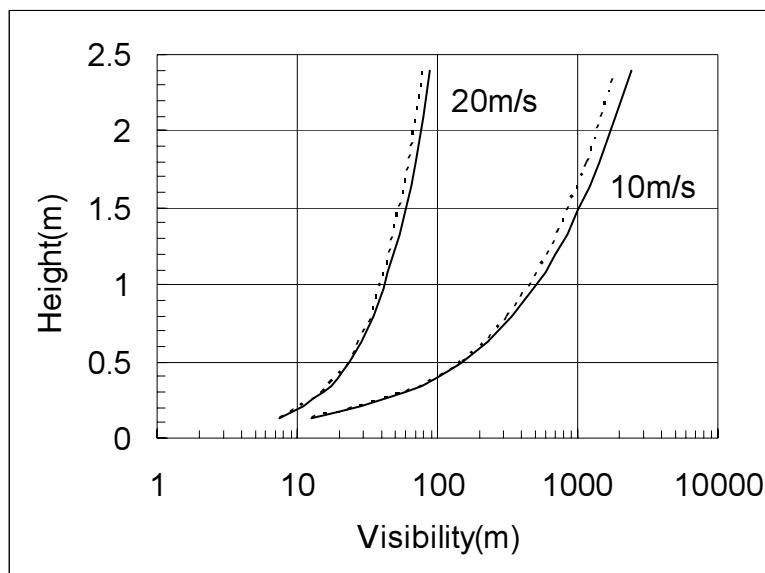


図 3.4 高さによる飛雪粒子の落下速度の違いを考慮した場合と考慮しない場合の視程推定値の垂直分布。実線は、飛雪粒子の落下速度を 0.35m/s と高さによらず一定とした計算結果。点線は、飛雪粒子の落下速度を高さ 0.5m 未満で 0.35m/s、高さ 0.5m 以上で 0.32m/s として計算した視程である。

3. 5 本手法の特長

本章で開発された視程推定手法の特長について考察すると、重回帰式に基づく従来の手法と異なり次のような特長を持つ。

- (1) 降雪を伴う吹雪時の視程の推定が可能である。
- (2) 任意の高さでの視程を求めることができること。
- (3) 降雪成分と地吹雪成分を分けることができるため、視程障害に対してどちらの影響が大きいか比較できること。

これらに加え、パラメータの調整が可能であること。すなわち与えた定数を変えることで、その地域の雪質にあった視程の推定が可能であることも、本研究で開発した視程推定

手法の特長として挙げることができる。

(1) 降雪を伴う吹雪時の視程の推定¹⁵⁾

本研究で開発した視程推定手法では、気象条件に応じた視程の概略把握ができる。図3.5は風速および降雪強度と視程との関係を求めたものである。図3.5では、高さを1.2mとして計算した。図より風速が15m/sを越えると、ほぼ視程は100m未満になるという結果が得られる。また、風速が弱くなるに従って、視程低下に対する降雪強度への依存が大きくなることがわかる。もっとも、この計算結果の妥当性、即ち視程推定値の精度については議論が必要であり、それに関しては次章で扱う。なお、式(3.8)の条件を適用し風速8.5m/s以下では、高い地吹雪（目の高さまで巻きあがるような地吹雪）が発生しないと仮定し、降雪の影響のみを考慮した。

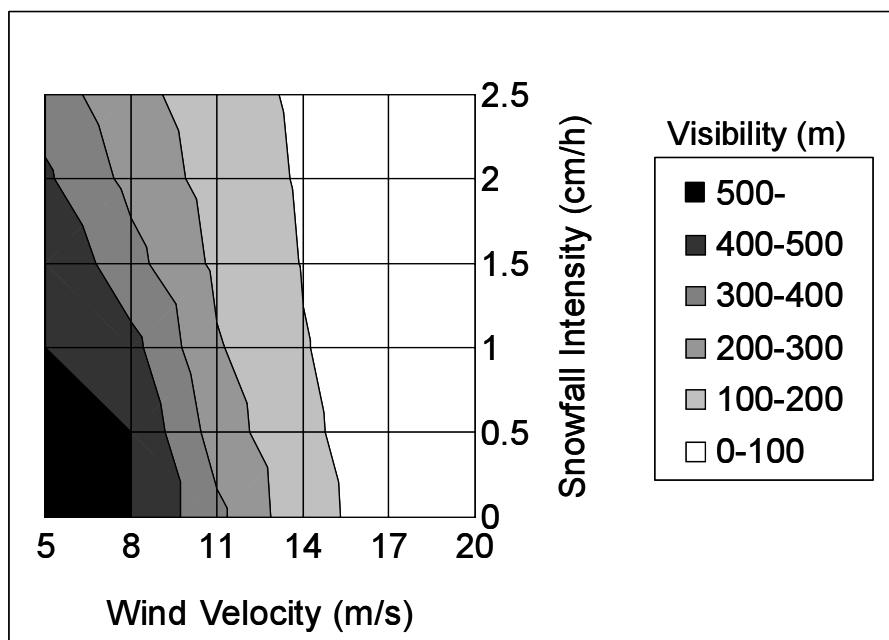


図3.5 視程と気象条件（風速と降雪強度）との関係。

(2) 任意の高さでの視程の推定¹⁵⁾

加治屋ら¹⁶⁾の研究によると、数十台の車を巻き込む多重衝突事故の特徴の一つに、大型車の混入が上げられており、吹雪の中で停止した小型車に後続の大型車が追突する事故がトリガーとなるケースも少なくない。一般に、雪原上では雪面に近くなるに従い、吹雪の飛雪流量は急激に増加する。このことから、小型車のドライバーからの視程に比べ、バスやトラックなど大型車のドライバーからの視程は良いと考えられる。吹雪時には、このような視点の高さの違いによる視程の差が、車両走行の挙動差を大きくし、多重衝突事故の危険性を高めている可能性が考えられる。

今回、明らかにした視程推定手法を用いることで、任意の高さにおける視程を推定する

ことができる。従って、大型車と小型車のドライバーの視線の高さでどの程度の視程の違いがあるかを計算で求めることができる。そこで、計算によって、高さ 1.2 m と高さ 2.4 m の視程を求める差について比較する。なお、高さ 1.2 m は小型車のドライバーの目の位置に、また高さ 2.4 m は大型車のドライバーの目の位置に相当する。また、本章の計算では、風速はすべて高さ 10 m の風速とする。

図 3.6 は、降雪強度が 0.1 cm/h と 2.0 cm/h の条件で計算した視程である。高さ 1.2 m と高さ 2.4 m での風速と視程の関係を比較した。図より、降雪強度が 0.1 cm/h の場合、風速が 8.5 m/s 以上では高さ 1.2 m と高さ 2.4 m の視程は両者の視程は 2 倍程度異なる。一方、降雪強度が 2 cm/h の場合は、風速が 15 m/s 以上で 1.5 倍程度まで差が縮まる。また風速が 15 m/s 以下では視程の差は縮まる傾向にあり、風速 10 m の場合は差が 1.2 倍以下まで縮まる。すなわち、降雪が強く風が弱い場合は、高さによる視程の違いが小さくなる結果が得られる。

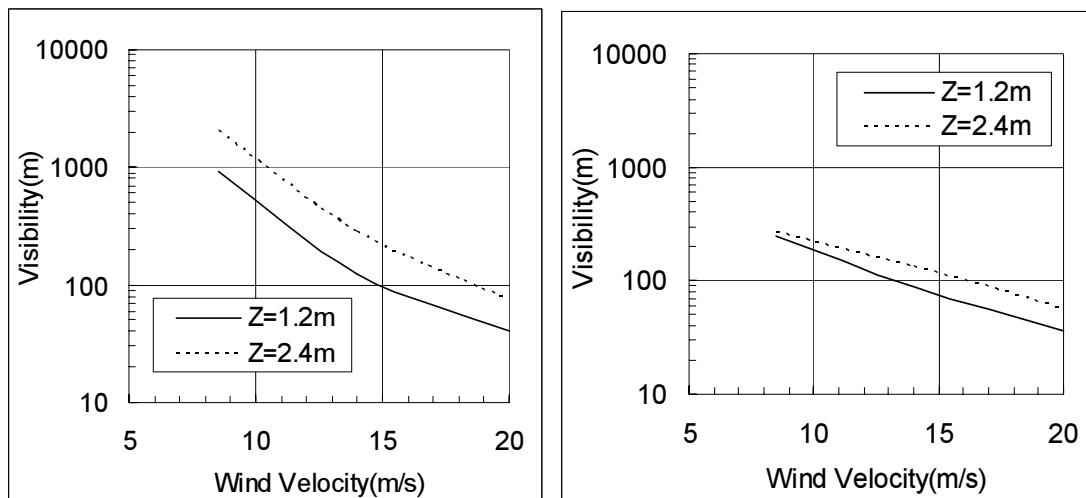


図 3.6 高さ 1.2 m と高さ 2.4 m における風速と視程の関係。左図は降雪強度=0.1 cm/h での計算結果で、右図は降雪強度=2 cm/h での計算結果である。

(3) 地吹雪による視程低下と降雪による視程低下の影響分析¹⁵⁾

次に、吹雪時の視程低下に、降雪成分と地吹雪成分のどちらの影響が大きいかを検討するため、本研究で開発した視程推定式を用いて風速および降雪強度と視程との関係を求めた（図 3.7）。図 3.7 では、高さを 1.2 m として計算した。図より風速が 15 m/s を越えると、ほぼ視程は 100 m 未満になることが分かる。また、風速が弱くなるに従って、視程低下に対する降雪強度への依存が大きくなることがわかる。なお、風速 8.0 m/s 以下では、地吹雪成分は無視し、降雪の影響のみを考慮した。

これらの結果は、実際の現象をよく表していると考えられる。従来、降雪を伴う吹雪時の現象を表す物理モデルや視程推定手法が無かったため、このような机上の検討は出来なかつたが、本研究で、降雪を伴う吹雪現象を表す式が示されたことで、このように、吹雪

時の視程障害の現象解明が可能になった。

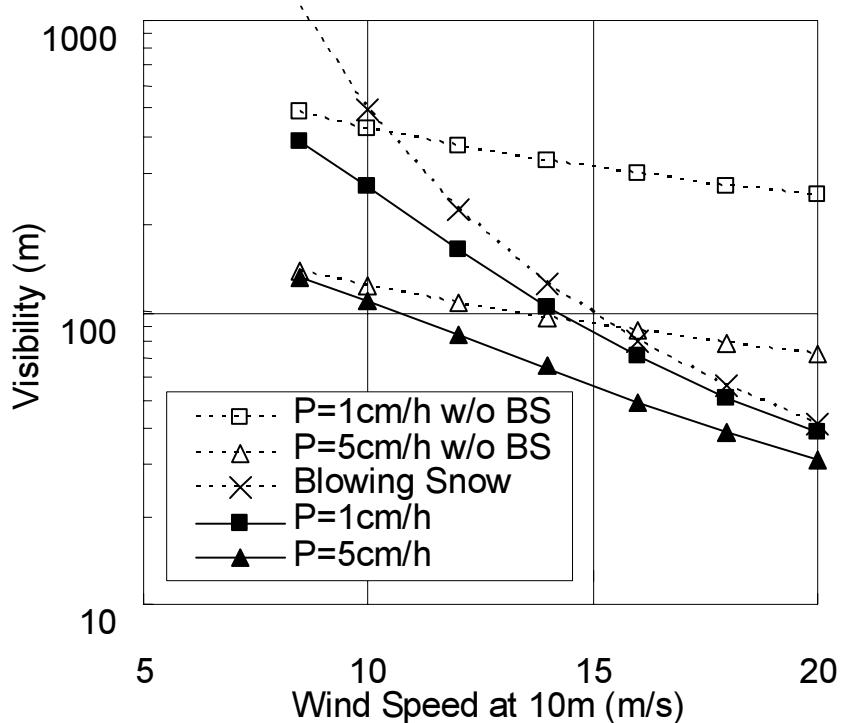


図 3.7 視程に与える降雪成分と地吹雪成分の影響度合いの比較。四角と三角は降雪成分のみ考慮し、それぞれ、降雪強度 P が 1cm/h , 5cm/h で視程を計算した結果。黒四角と黒三角は、地吹雪成分も含めて計算した視程で、それぞれ降雪強度 P が 1cm/h , 5cm/h での計算結果である。×印は、地吹雪成分のみ、即ち降雪強度 $P=0\text{ cm/h}$ での視程の計算結果である。

3. 6 まとめ

松沢・竹内の飛雪空間密度の垂直分布式を用いて、一般に入手できる気象値を用いて降雪を伴う吹雪時の視程を簡易に推定する手法を開発した。この手法では、降雪粒子と浮遊粒子の落下速度をそれぞれ一定とおいて、簡略化を図っているが、このことが視程の計算結果に与える影響は小さいことを確認した。また、この手法は、吹雪による視程障害の現象を解明する上で有用なツールとなりうることを示した。

ただし、1)松沢・竹内の式が、吹雪が十分に発達した定常状態を仮定して導かれたこと。
2)一般に入手できる気象データは、あるエリアを代表する値で、周囲の開けた箇所での値と見なせることから、本手法で得られる視程は、当該エリアのポテンシャル的な視程、即ち、周囲が十分開けた雪原上（吹雪が最も発達する条件と見なせる）の視程である。

次章では、この視程推定手法の精度を評価する。

第3章 参考文献

- 1) Goodwin L. C. : Best Practices for Road Weather Management Version 2.0, FHWA-OP-03-081, <http://www.ops.fhwa.dot.gov/weather/> (2003)
- 2) 斎藤博英 : 降雪の強さと視程, 国立防災科学技術センター研究報告, 5, 33-40 (1971)
- 3) 石本敬志, 竹内政夫, 福沢義文 : 吹雪時の視程と気象条件の相互関係, 第25回北海道開発局技術研究発表会, 57-60 (1982)
- 4) 松沢勝, 竹内政夫 : 気象条件からの視程を推定する手法の研究, 雪氷, 64, 77-85 (2002)
- 5) Mellor M. : Light Scattering and Particle Aggregation in Snow Storm, J. Glaciology, 6, No. 44, 237-248 (1966)
- 6) Budd W. F., Dingle W. R. and Radok U. : The Byrd Snow Drift Project: Outline and Basic Results, Meteorology Department, Publication No. 7, 23p (1966)
- 7) 竹内政夫, 石本敬志, 野原他喜男 : 吹雪量と飛雪量垂直分布, 雪氷, 37, 3, 8-15 (1975)
- 8) Tabler R. D. : Visibility in Blowing Snow and Applications in Traffic Operations, Snow Removal and Ice Control Research, Spec. Rep. 185, National Academy of Science, Washington DC, 208-214 (1979)
- 9) 竹内政夫, 福沢義文 : 吹雪時における光の減衰と視程, 雪氷, 38, 165-170 (1976)
- 10) 石坂雅昭 : 雲粒付き雪片の落下速度について, 雪氷, 57, 229-238 (1995)
- 11) Owen P. R. : Saltation of Uniform Grains in Air, J. Fluid Mech., 20 225-242 (1964)
- 12) 竹内政夫 : 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 (1981)
- 13) 西尾文彦, 石田完 : 地吹雪における乱れのエネルギー消散率, 低温科学物理編, 31, 69-85 (1973)
- 14) 竹内政夫, 石本敬志, 野原他喜男, 福沢義文 : 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 (1986)
- 15) Masaru Matsuzawa, Yasuhiko Kajiyama, Masao Takeuchi : The development and Validation of a method to estimate visibility during snowfall and blowing snow, Cold regions science and technology, 41, 91-109 (2005)
- 16) 加治屋安彦, 福澤義文, 松沢勝, 金田安弘, 丹治和博 : 吹雪危険度評価に関する一考察, 第18回寒地技術シンポジウム (2002)

第4章 視程推定手法の精度検証

4. 1 はじめに

第4章では、第3章で明らかにした視程推定手法の精度を評価するため、地上観測で得られた風速と降雪強度を用いて視程の推定を行い、地上観測で得られた視程と比較する。視程推定精度の検証には、(1) 視程推定手法自体の精度と、(2) 現状で入手できる気象データを用いたときの視程推定の精度の2通りの意味がある。前者については、4.2節で、後者については4.3節で述べる。なお、入力値に予測気象値を用いることで視程の予測を行うこともできるため、後者については、視程予測精度の評価も行う。また、4.4節で視程推定手法の課題を整理して、視程推定手法の改良手法について検討する。

4. 2 視程推定手法の精度評価¹⁾

第3章で開発した視程推定手法自体の精度の評価を行うためには、できるだけ正確な気象データを用いて視程を推定し、その結果と視程の実測値を比較することが必要である。そこで、地上で観測された風速、気温、降雪量を用いて計算された視程推定値と地上で観測した視程実測値との比較を行う。

(1) 地上データの概要

地上観測は、石狩川の河川敷にある北海道開発土木研究所の石狩吹雪実験場で行った。観測項目は、気温、風速、積雪深、視程である。気温は高さ2m、風速は高さ10mで計測を行った。積雪深は、太陽電池をセンサーとして用いた積雪深計で、1時間毎に計測を行った。なお、センサーの特性から夜間のデータは得られない。また視程は、透過型視程計にて高さ2mで計測を行い、それぞれ10分平均値を得た。透過型視程計は、投光部から赤外光を射出し受光部に届いた受光強度から視程を換算する仕組みである。ここで用いた透過型視程計の計測範囲は視程が10~3411mであり、3411m以上の視程については全て3411mと出力される。この視程計は、道路用の視程計として改良されており²⁾、本研究の目的に對しては十分な精度を有すると考えられる。

第3章より地吹雪が発生する条件は式(3.8)で与えられる。式(3.8)の高さ7mの風速を高さ10mの風速に等しいと見なし、これに置き換えると次式が得られる。

$$V_{10} \geqq 8.5 \text{ [m/s]} \quad (\text{但し } T \leqq -2^\circ\text{C}) \quad \cdots (4.1a)$$

$$V_{10} \geqq 8.5 + (1 + 0.5T) \text{ [m/s]} \quad (2^\circ\text{C} \leqq T > -2^\circ\text{C}) \quad \cdots (4.1b)$$

これより解析対象日として、地上観測のデータを用いて2002年12月から2003年2月の3ヶ月で、気温が-2°C以下であり、風速が8.5m/s以上である時間帯が多く、かつ走行に影響が出始める視程200m未満³⁾になった時間帯を有する日を抽出した。

降雪強度(降水強度)については、石狩実験場では計測していないので、外部のデータを用いる。気象レーダーによる降雪強度(降水強度)のリアルタイムデータは10分おきに提供

されている（レーダー雨量）が、風による移流の影響（特に降雪の場合は顕著である）を受けるため正確でない。そこで、地上での降雪量計測値との統合処理を行って補正を行う。解析降水量（気象庁では解析雨量と表示しているが、降雪の場合も含めているので本論文では解析降水量とする）と呼ばれるものはその一例である。しかし、このような合成データは1時間値のみで10分値は得られていない。実際に視程情報を作成するに当たっては、気象データとして入手しやすい1時間値（気温、風速の10分値は気象情報として一般に提供されていない。10分値の予測情報は1時間先までの降水量のみで他は1時間値）を用いることが想定されるので、降雪強度については1時間値を用いることにする。

また、視程推定の際に雪面からの視程計の高さが必要となる。ここでの解析では、積雪深を既定の視程計の高さから引くことで、雪面からの高さを算出する。なお、積雪深のデータのない夜間も扱うため、検証対象日それぞれについて日平均積雪深を求め1日の代表値として扱った。日平均積雪深については、積雪深の観測が行われた日中8時から15時の間の平均とした。今回選んだ対象日については、前後1日での極端な日積雪深差は観測されておらず（すなわち夜間に多量の降雪がなかった）、数cmの高さの差は視程推定に対して、大きな影響を与えない事から、妥当な方法と考えられる。表4.1に解析対象日と平均日積雪深を示した。

表4.1. 視程推定手法の検証に用いた2002/2003冬期の解析対象日の日中の平均積雪深

Date	Daytime avg. snow depth (8:00 - 15:00) (m)
7-Dec	0.02
19-Dec	0.36
26-Dec	0.58
27-Dec	0.54
29-Dec	0.5
30-Dec	0.45
5-Jan	0.48
6-Jan	0.48
12-Jan	0.5
25-Jan	0.57
30-Jan	0.56
31-Jan	0.55
1-Feb	0.54
12-Feb	0.55
14-Feb	0.54
17-Feb	0.55

(2) 視程推定値と視程実測値の時系列による比較

次に、解析対象日の中から代表的な事例について視程実測値、視程推定値、気象観測値を示す。

ここでは、代表的な事例として、2003年2月14日(図4.1)、2002年12月27日(図4.2)、2003年1月25日(図4.3)の事例を取り上げて説明する。また、計算に当たっては、式(4.1)で表す地吹雪の発生条件を適用し、これに合致しない場合は、降雪項のみ(式(2.7)の第一項)を計算して視程を求めた。

2003年2月14日は、風速は10m/s前後、気温は-5°C前後で、時折降雪を伴っていた。降雪のない地吹雪時と、降雪を伴う吹雪時の代表事例として取り上げた。降雪がない場合でも、強い風速により地吹雪が発生して視程が悪化していることが観測値から読み取れる。図4.1より、視程推定値が視程実測値に対して、視程値および視程の変化の傾向ともによく一致していることがわかる。特に、降雪のない場合は良く一致している。しかし、降雪のある時間帯では14:40~16:00に、推定値が実測値より小さい値を示している。

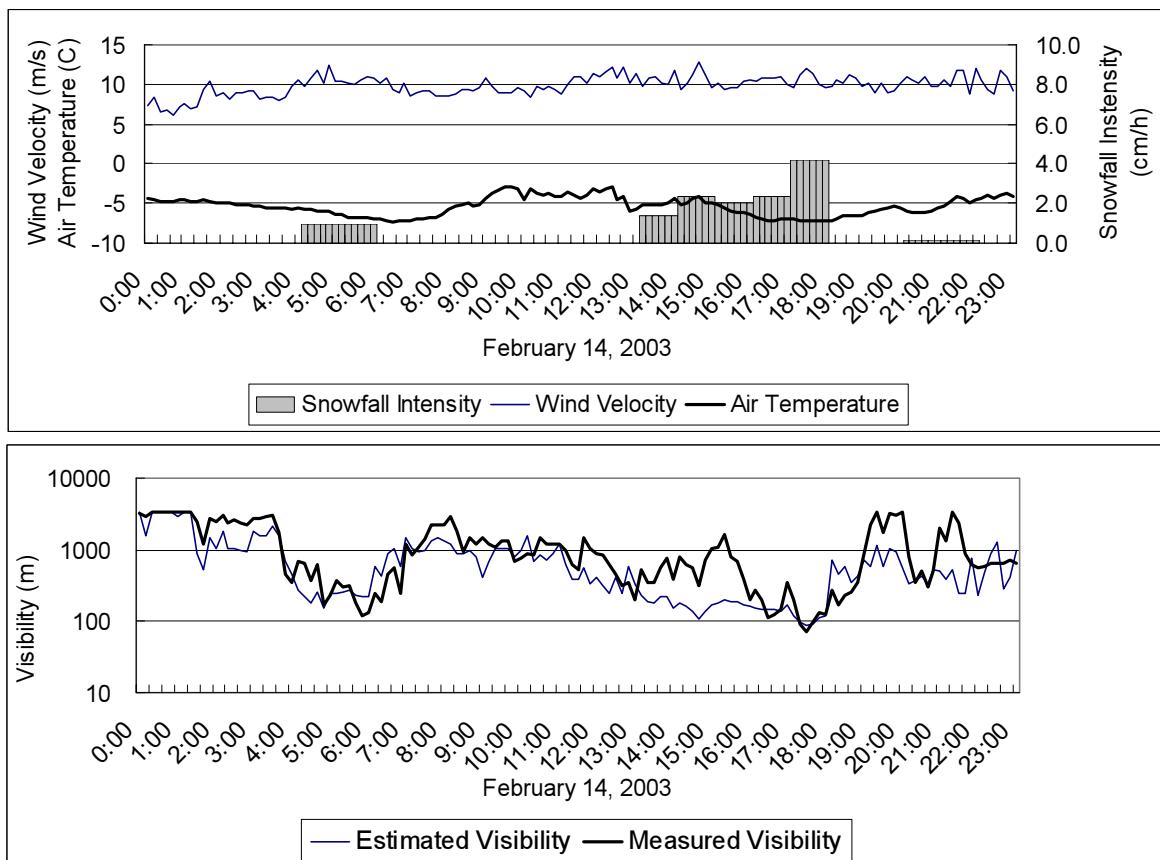


図4.1 2003年2月14日の降雪強度、風速、気温（上）、および、視程実測値と視程推定値（下）の推移。

図4.2は2002年12月27日の観測気象値と視程推定値である。6:00まで、風速は約10m/s

で、気温は-10°Cであり、時折4cm/hを超える強い降雪があった。11:10～13:00にかけて、風速は5m/s以下で、降雪強度が7cm/h以上に強まっている。風速が弱くても降雪強度が大きいことによって、視程が低下している典型的な事例である。この日は14:00頃から、再度、風速が強くなり約10m/sになった。図4.2より、視程の推定結果は、強い降雪による視程障害の実態をうまくとらえていることがわかる。

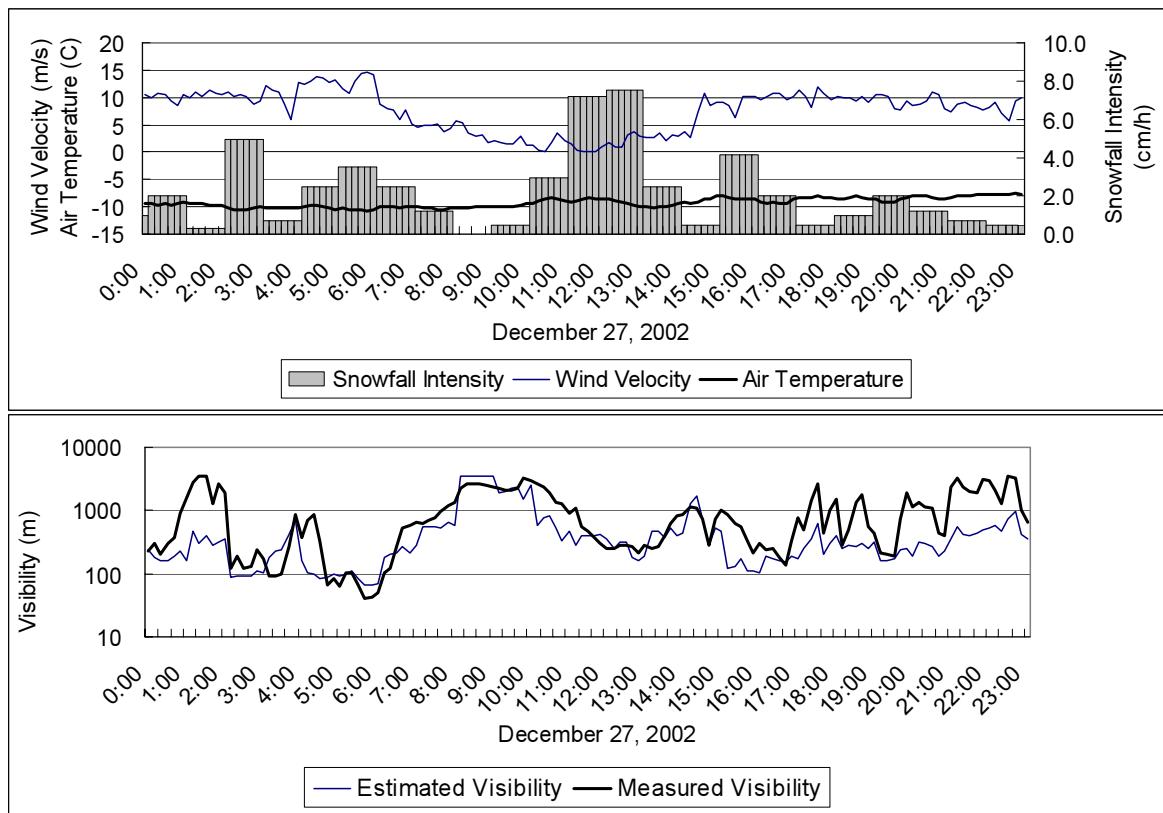


図4.2 2002年12月27日の降雪強度、風速、気温（上）、および、視程実測値と視程推定値（下）の推移。

一方、観測視程より、推定視程が小さく計算される場合もある。図4.3は2003年1月25日の気象状況と視程推定結果である。風速は午前中約10m/sで、7:50～8:00頃から5m/sに低下した。気温は、-4.1～1°Cとやや高めに推移した。降雪強度はほぼ1.0cm/h以下であり、午前中は8:00～9:00を除き、降雪強度は0cm/hであった。図より、視程推定値は視程実測値に比べ、特に午前中において誤差が大きくなっていることがわかる。

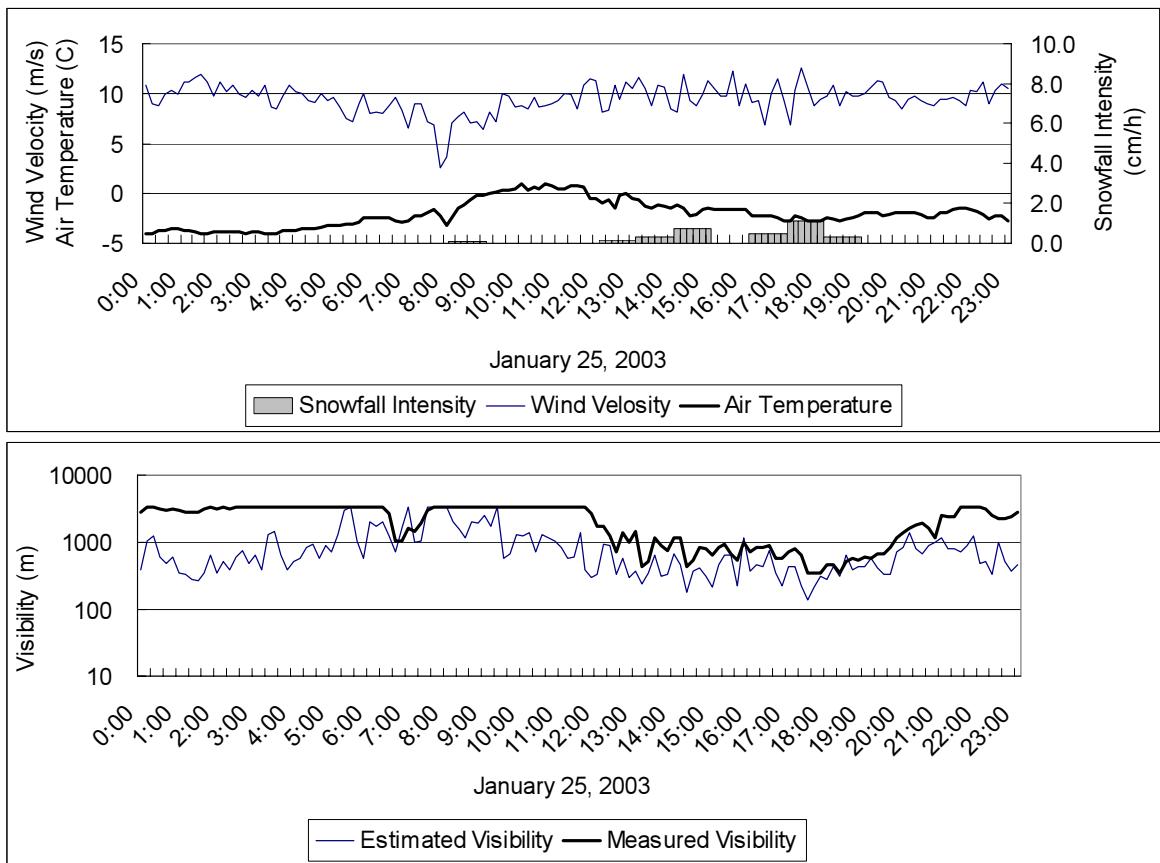


図 4.3 2003 年 1 月 25 日の降雪強度、風速、気温（上）、および、視程実測値と視程推定値（下）の推移。

（3）誤差の原因に関する考察

このように視程推定値が視程実測値をうまく表現できない理由として、いくつか考えられる。

まず、視程値の推定過程で与えた基準高さ z_t [m] での飛雪空間密度 N_t [g/m³] が、吹雪の激しい時を想定して与えているため、吹雪のあまり激しくないときには、過小に視程を推定してしまう可能性があるためである。

第 2 に、降雪の後しばらく時間が経過すると、積雪表面の雪粒子の結合力が強くなり、風速が 8.5 m/s を越えても飛雪が発生しない場合があると考えられる。これも視程推定値が実測値より過小になる理由の一つに挙げられる。

また、文献 4 では、雪面付近の大気が安定状態（鉛直方向への大気の拡散が起こりづらい状態）のとき、高さ 1 m の風速が 9.5 m/s でも吹雪が発生していないことを明らかにしている。このような場合も、風速が強くなても吹雪が発生しないため、視程推定値が実測値より過小となる。

このように、ここで示された視程推定モデル自体には不十分な点が含まれている。しかし、この不十分さによって生じる誤差が、道路情報として許容範囲であれば、今回の視程推定モデルの実用性を否定するものではない。これについては、実際に視程情報をドライバーに提供して、視程情報の精度に対する受容性をドライバーに評価してもらった結果を後の章で述べることとして、本章では、この視程推定モデルの精度について、気象予測などに用いられている評価手法を用いて定量的に評価を行う。

(4) 視程推定値と実測値との相関図による精度検証

まず、解析対象の全 16 日の視程推定値と実測値を相関図に示し、両者の相関度合いを確認する。吹雪の変動は激しいので、現況の吹雪視程を把握することを考慮すると、10 分毎にデータを更新できるのが理想的である。そこで、10 分毎の気象データを用いて計算した視程推定値と 10 分平均の値を計測している視程実測値との比較を行うこととする。図 4.4 は、その結果である。相関の度合いを調べるために相関係数を求める方法が良く使われるが、すでに述べたように、視程計の機器仕様から実際の視程が 3411 m を越える場合は全て 3411 m として出力される。このため、両変数の相関を評価する相関係数は正確な値ではない。しかし、後で求める 1 時間値での視程推定結果と比較することを目的とすれば用いて差し支えないと考え、相関係数を計算し 0.71 を得た。（相関係数 = $\sqrt{\text{決定係数}(R^2)}$ とした）図 4.4 より視程推定値と視程実測値には、正の相関があることが示される。また、破線上で視程推定値と視程実測値が同じ値となる。これより視程推定値が視程実測値より低く計算される傾向にあることがわかる。しかし、図より誤差が特に大きくなるのは視程が良い領域であること、また、知覚心理学の分野でよく知られているフェヒナーの法則⁵⁾（感覚の強さは、刺激の強さの対数に比例する）も併せて考慮すると、この誤差が致命的なものと断定することはできない。

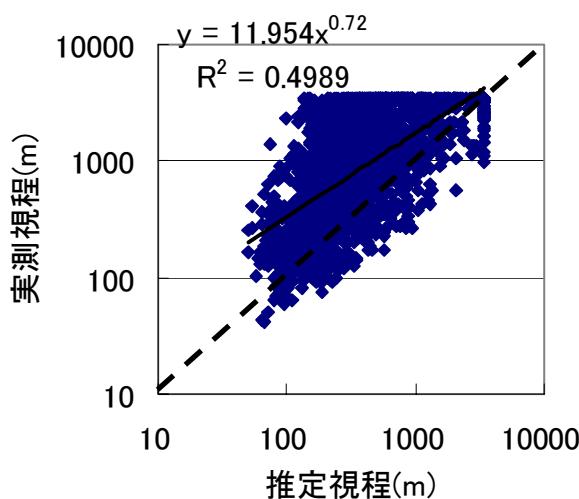


図 4.4 10 分値データによる、視程実測値と視程推定値の相関

(5) 他の視程推定式との比較

次に、齊藤⁶⁾および石本ら⁷⁾の研究から得られた、視程と気象条件の関係式から求めた視程値と今回の視程推定手法で得られる視程値との比較を行う。

式(3.1)は、齊藤が新潟県で求めた降雪強度と視程との関係式をもとに単位を変換して書き換えた式である。

$$Vis = 1150 * \left(\frac{5}{3} \right) * P_w^{-0.76} \quad \cdots (3.1) \text{再掲}$$

ここで、 P_w は、降雪強度[cm/h]である。また、式(3.2)は、石本らが北海道北部地域での観測により得た関係式である。

$$Vis = \frac{4 * 10^6}{V_7^3 (2 - T)^2} \quad \cdots (3.2) \text{再掲}$$

ここで、 V_7 は、高さ7mの風速[m/s]で、高さ10mの風速[m/s]と等しいと見なすことができる。また T は気温[°C]である。

式(4.2)と式(4.3)に、前節で用いた石狩実験場での気象データを代入し、視程推定値と視程実測値との比較を行った(図4.5)。図4.4と、図4.5を比較すると、式(3.1)、式(3.2)から求めた視程推定値は、石狩における視程実測値とはあまり一致しておらず、本研究で示された視程推定手法の優位性が明らかである。

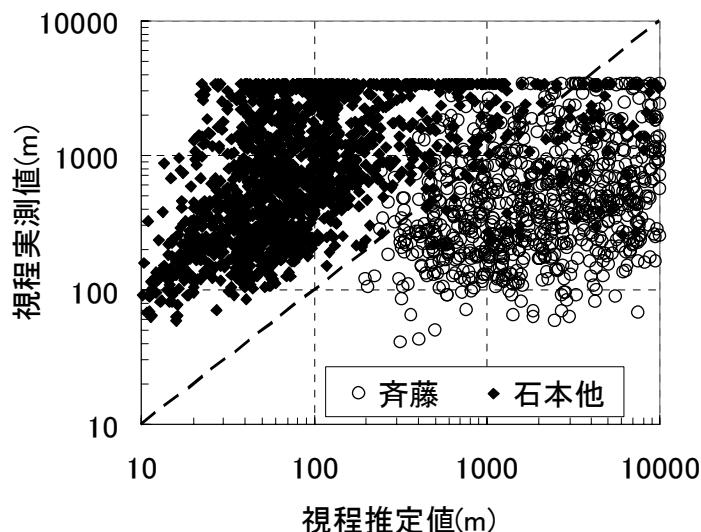


図4.5 視程の推定値と実測値との比較結果

(6) 分割表による精度検証(10分値)

気象予測精度の評価においては、視程のような連続変量については、散布図で調べる他に、カテゴリーに分けた分割表を用いた検証が行われる（文献8）。

すでに述べたが、ドライバーへの情報提供により、冬期交通の安全性の向上を図るためには、5段階程度の吹雪の強弱がわかれば十分であると考えられる。ここでは、視程が100m未満、100～200m、200～500m、500～1000m、1000m以上、の5段階で、視程推定値の検証を行う。

この5段階に分けた根拠については、以下の通りである。吹雪時には視程100m未満の状態で常に車群を形成し、多重衝突事故の危険性が高まる。また、視程が100～200mでも交通量によっては車群を形成することがある。ともに、車群の先頭車の走行速度のばらつきが大きく、追突の危険性が高くなっている³⁾。これより、ドライバーへの注意喚起のために、視程100m未満および視程100～200mのカテゴリーを入れた。また、著者の研究によると、凍結路面上の制動停止時の減速度はほぼ1.0m/s²である⁹⁾。60km/hで対向する車両が互いに相手を発見して制動停止するためには、約370m必要である。吹雪時の視程は変動が大きいので、余裕をみて視程が500m以下の吹雪時にはドライバーへの注意喚起は必要と考えられるので、視程200～500mのカテゴリーを定めた。また、視程が500m以上では、あまり走行に影響はない。しかし、弱い降雪のある場合と、晴れて見通しの良い場合は区別する必要があると考えられるので、視程1000mを境に視程500～1000mのカテゴリーと視程1000m以上のカテゴリーの2つに分けた。

次に、検証手法について説明する。

(7) 分割表による精度検証の方法

検証においては、まず、視程推定値と視程実測値をこの5段階に分けた5×5分割表を作成した。分割表において、視程推定値と実測値が同じカテゴリーだった場合を「適中」とした。一方、視程や風速など連続変量をカテゴリーに分けた分割表による検証は、推定値（予測値）が実測値と1ランク異なっていても適中と扱うこともある⁸⁾。本研究では安全側に1ランクはずれても、ドライバーへの視程情報としては有効と考え、視程推定値のカテゴリーに対して実測値が1カテゴリー大きな場合まで含めたものを「広義の適中」とした。また、実測値のカテゴリーより2カテゴリー以上、推定値のカテゴリーが大きかった場合を「見逃し」とした。各々の出現回数を出現回数の総和で除した数値をそれぞれ適中率(PPC: Perfect Percent Correct)、広義の適中率(PC: Percent Correct)、見逃し率(PM: Percent Missed)と定義し評価を行うものとした（表4.2）。また、計算に当たっては、式(4.1)で表す地吹雪の発生条件を適用し、これに合致しない場合は、降雪項のみ（式(2.7)の第一項）を計算して視程を求めた。

表 4.2 5×5 分割表による適中率, 広義の適中率, 見逃し率の定義

		Estimated Visibility (m)					Total
		1	2	3	4	5	
		<100	100–200	200–500	500–1000	1000=<	
Measured Visibility(m)	1	<100	n11	n12	n13	n14	n15
	2	100–200	n21	n22	n23	n24	n25
	3	200–500	n31	n32	n33	n34	n35
	4	500–1000	n41	n42	n43	n44	n45
	5	1000=<	n51	n52	n53	n54	n55
Total							n

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

$$\text{広義の適中率(PC)} = (n_{11}+n_{22}+n_{33}+n_{44}+n_{55}+n_{21}+n_{32}+n_{43}+n_{54})/n$$

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

(8) 分割表による視程推定精度の検証結果(10 分値)

始めに 10 分毎のデータによる視程推定の検証を行う。前述の通り, 解析降水量や降水短時間予報は 1 時間毎の値 (以下 1 時間値と呼ぶ) であり, 同じ 1 時間の中でも変動がある。レーダー雨量だけは, 10 分更新で得られるが, 降雪の場合, 風による移流の影響が大きいため誤差が大きくなるという欠点がある。このため, 1 時間値の解析降水量 (時間降雪強度) をそのまま 10 分毎の値 (以下 10 分値と呼ぶ) として用いた。

表 4.3 は, 観測対象の全てのデータを集計したものである。表 4.3 より適中率は 36% であるが, 広義の適中率は, 71% である。また見逃し率は 0% であった。表 4.3 を見ると, 視程実測値が 1000m 以上であるのに, 視程推定値が 500m 未満となったケースが 418 事例 (全体の約 20%) あり, 適中率を下げる主な要因となっている。これは, 前述の視程推定手法を明らかにする過程で, 視程推定値が小さくなる様に基準高度 z_t での飛雪空間密度 N_t を定めたことが原因と考えられる。すなわち, 視程実測値が 1000m を越えるような気象条件では N_t の値は $30\text{g}/\text{m}^3$ よりもかなり小さく, これが推定視程の誤差を大きくしていると考えられる。

そこで, 地吹雪が弱い, または発生しない気象条件を除外するため, 気温-2°C 以下かつ風速 8.5m/s 以上という条件を満たすデータのみを集計した。しかし, 完全適中率が 27% に, 適中率は 66% に減少した (表 4.4)。これは, データの選別により観測値, 推定値ともに視程 1000m 以上のカテゴリーに属するデータが少なくなったためである。しかし, 視程 1000m 以上の値は, 冬期の道路交通上あまり意味がないので, 単純にこの方法が良くないとはいえない。つまり, カテゴリーによって重みが違うデータの検証の方法として, 分割表だけでなく, 別の指標が必要と考えられる。

そこで, 次にスレットスコアを用いて検証する。スレットスコアとは, 出現確率が小さくかつ重要度の高い現象を予測する手法の精度評価に用いられる指標である。ここでは,

視界不良時の運転に影響が見られる視程 200m 未満を重要度の高い事象と考え、表 4.5 のような 2×2 分割表を与える。この時、スレットスコア (TH) は、 $TH=N11/(N11+N12+N21)$ で与えられる。全データを対象に集計するとスレットスコアは 0.29 であり、風速 8.5m/s 以上かつ気温 -2°C 以下の条件で絞り込んだ場合は、スレットスコアは 0.32 となり、地吹雪発生の条件でデータを絞り込むことで、200m 未満の視程の推定精度の向上が判明した。

表 4.3. 10 分値の視程実測値と視程推定値の分割表

All Data (10-min data)		Estimated Visibility (m)					Total
		1	2	3	4	5	
		< 100	100-200	200-500	500-1000	≥ 1000	
Measured Visibility (m)	1	18	13	4	0	0	35
	2	45	107	29	1	0	182
	3	34	220	207	40	4	505
	4	9	96	234	49	12	400
	5	2	64	352	271	438	1127
Total		108	500	826	361	454	2249
PPC: 36%				PC: 71%		PM: 0%	

表 4.4. 気温 -2°C 以下、かつ風速 8.5m 以上の条件における 10 分値の視程実測値と視程推定値の分割表

Drifting snow occurrence (10-min data)		Estimated Visibility (m)					Total
		1	2	3	4	5	
		< 100	100-200	200-500	500-1000	≥ 1000	
Measured Visibility (m)	1	18	13	4	0	0	35
	2	45	106	28	1	0	180
	3	33	193	176	32	3	437
	4	7	77	171	28	5	288
	5	1	51	254	163	68	537
Total		104	440	633	224	76	1477
PPC: 27%				PC: 66%		PM: 1%	

表 4.5 スレットスコアを求める 2×2 分割表

		Estimated Visibility (m)		Total
		< 200	≥ 200	
Measured Visibility	< 200	$N11$	$N12$	$N11+N12$
	≥ 200	$N21$	$N22$	$N21+N22$
Total		$N11+N21$	$N12+N22$	N

Threat score (TH) : $TH=N11/(N11+N12+N21)$

(9) 分割表による視程推定精度の検証結果(1時間値)

現在提供されている各種の気象予測値は 1 時間間隔のデータである。このため、視程の予測を行なうことを想定すると 1 時間値で高い適中率を得る必要がある。そこで、1 時間値による視程の推定を検証する。

1時間値においても、レーダー推定降雪量を適用した視程推定値と視程実測値を比較した。風速は10分値で収録されているので、視程の計算においては、前1時間の内、最大の風速を用いて計算した。図4.6は、視程推定値と視程実測値の相関を取った結果である。相関係数は、0.79であり、10分値に比べ相関が強くなっている。また、破線は、視程推定値と視程実測値が一致するラインを示している。これから、10分値での推定結果と同様に視程推定値は視程実測値より低く出る傾向にあることがわかる。

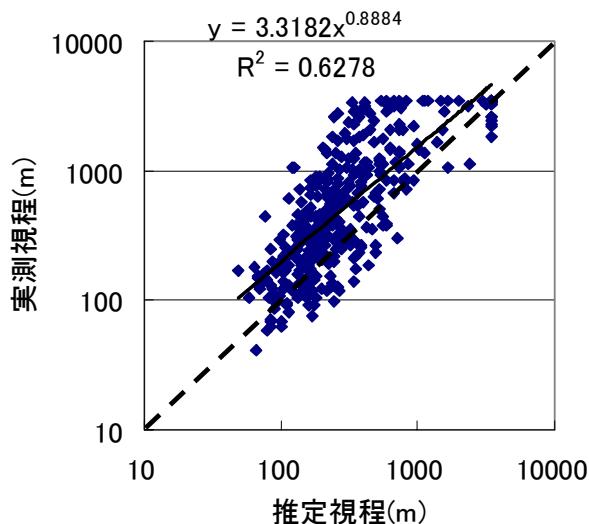


図4.6 1時間値での視程推定値と視程実測値の相関図

次に、10分値での検証と同様に、解析対象期間のすべてのデータを用いた場合と、高い地吹雪の発生する条件を満足する場合の2通りで、分割表を用いた検証を行った。推定視程と実測視程値の全ケースについての分割表を表4.6に、気温と風速による条件を適用したデータについての分割表を表4.7に示した。

1時間値では、10分値に比べ、適中率、広義の適中率ともに向上した。広義の適中率でみると、全データを対象とした場合は79%，気温-2°C以下かつ風速8.5m/s以上の条件下で76%と高い値となった。また、表4.5に示したスレットスコアを用いて検証すると、全データを用いた場合0.45、気温-2°C以下かつ風速8.5m/s以上の条件下で0.46といずれも10分値に比べ高い値になっている。全データを対象とした表4.6によると、実測視程が200m未満の81回のうち70回が推定視程値も200m未満となっている。同様に、視程100m未満に関しては16回発生したうち8回を推定している。このことから視程100m未満と100～200mの判別は難しいが、視程200mの状態を把握する精度はかなり高いことがわかる。

これは、10分値の気象データでの視程推定においては、本来1時間値であった降雪強度を10分値として用いた。しかし、降雪強度は変動が大きいので、10分毎の気象データで視程の推定を行うときに、降雪強度の変動が誤差として含まれていたのに対して、1時間値の気象データによる視程推定では、その誤差が無いためと考えられる。

表 4.6 視程実測値と視程推定値の対応（1時間値）

All data (hourly data)		Estimated Visibility (m)					Total
		1 < 100	2 100–200	3 200–500	4 500–1000	5 ≥ 1000	
Measured Visibility (m)	1 < 100	8	7	1	0	0	16
	2 100–200	21	34	10	0	0	65
	3 200–500	3	58	44	6	0	111
	4 500–1000	0	12	40	10	0	62
	5 ≥ 1000	0	2	38	32	47	119
Total		32	113	133	48	47	373
PPC: 38%				PC: 79%			PM: 0%

表 4.7 視程実測値と視程推定値の対応（1時間値）気温・2°C以下かつ風速 8.5m/s 以上

Drifting snow occurrence (hourly data)		Estimated Visibility (m)					Total
		1 < 100	2 100–200	3 200–500	4 500–1000	5 ≥ 1000	
Measured Visibility (m)	1 < 100	8	7	1	0	0	16
	2 100–200	21	34	10	0	0	65
	3 200–500	3	54	39	2	0	98
	4 500–1000	0	12	35	6	0	53
	5 ≥ 1000	0	2	36	26	6	70
Total		32	109	121	34	6	302
PPC: 31%				PC: 76%			PM: 0%

4. 3 実際に提供されている気象データを用いた検証

前節では、視程推定手法自体の精度を調べるために、できるだけ精度の高い気象データを入力に用いて視程の推定を行った。次に、一般にサービスされている気象情報を用いて、視程推定値および視程予測値を計算し、その結果と視程実測値とを比較し精度を検証する。これは、次章以降で論ずる吹雪情報提供システムで実際に提供される視程情報の精度とみなすことができる。なお、前述の通り、一般に提供されている気象値は、レーダー雨量を除くと1時間毎なので、ここで検証は1時間データで行う。

（1） 検証の方法

視程値の計算には、(財)日本気象協会が毎正時に更新する1kmメッシュの気象情報から、石狩吹雪実験場の該当するメッシュの気象実況値と気象予測値（各々、風速、時間降雪量、気温）を用いた。なお、これらの気象情報は、気象庁から配信されている解析降水量の実況・短時間予測降水量の情報や、GPV（格子点気象値）¹⁰⁾をもとに作成したもので、一般に有料で提供されている気象情報としては代表的なものである。これらの気象データを用いて計算した現在視程（以下では現在視程推定値と称する）および視程予測値と、対象時刻の視程実測値を比較した。解析対象日として、視程障害の主要因である降雪と強風の条件が偏らないよう、弱風下で強い降雪が観測された2002年12月27日、風速10m/s前後の強風で地吹雪が観測された2003年2月14日、両条件の混在した同年2月17日を選んだ。

(2) 分割表による検証

次に、4. 2節での検証と同様に、現在視程推定値および視程予測値（1時間先、3時間先）と視程実測値の関係を分割表にまとめ、それを表4.8～4.10に示した。

現在視程推定値の精度は、適中率49%，広義の適中率79%，見逃し率3%だった（表4.8）。また、視程200m未満を1つのカテゴリーとして扱うと、視程実測値が200m未満の事例では、現在視程推定値も同じカテゴリー（視程200m未満）に属していることがわかる。このことより、現在利用できる気象データに基づき視程200m未満の状況を把握する手法として、活用できる可能性が高いことが改めて確認された。

表4.9、4.10に、1時間後および3時間後の視程予測値と視程実測値との5×5分割表を示す。広義の適中率は両者とも71%となる。次に、視程200mを一つの閾値として2階級に分けると、視程実測値が200m未満になった事例に対して、1時間先の予測では4事例中3事例で適中しているが、3時間先予測では、4事例中1事例しか適中していないことがわかる。しかしこのうち2事例は、1ランクはずれただけであり、大きくはずれたわけではない。以上より、視程200m未満の状態の予測に関して、1時間先の予測の精度はかなり期待できるものの、3時間先の予測精度はまだ低いことが推測できる。

本モデルにおいて気象予測値を入力とした場合、気象予測値自体が誤差を持つため、計算して得られる視程予測値と視程実測値との誤差が拡大する。これは、視程推定モデルの問題ではなく、気象予測技術の問題であり、本研究の範囲を越える。事実、視程予測値が5000m以上にも関わらず視程実測値が1000m未満となった事例は全て、時間降雪量（降雪強度に相当する）の予測0cm/hに対し、実際は降雪が有ったケースである。このように、現在の気象予測技術では降雪強度に関して、正しく予測するのは難しいことがわかる。しかし、気象予測技術の向上によってこの点の解決は期待できる。いずれにせよ、視程の予測手法が全く存在しない中、1時間先とはいえ予測の可能性を示すことのできた意義は大きいといえる。

表4.8 現在視程推定値と視程実測値との比較

Actual		Predicted Visibility (m)					Total
		1	2	3	4	5	
		-100	100-200	200-500	500-1000	1000-	
Measured Visibility (m)	1	-100	0	1	0	0	1
	2	100-200	1	2	0	0	3
	3	200-500	1	4	13	0	20
	4	500-1000	0	2	7	0	10
	5	1000-	0	3	5	9	36
Total		2	12	25	9	22	70
PPC: 49%				PC: 79%			PM: 3%

表 4.9 視程予測値（1 時間先）と視程実測値との比較

1-hour Prediction		Predicted Visibility (m)					Total
		1	2	3	4	5	
		-100	100-200	200-500	500-1000	1000-	
Measured Visibility (m)	1	-100	0	1	0	0	1
	2	100-200	0	2	1	0	3
	3	200-500	2	6	5	3	19
	4	500-1000	0	0	7	2	10
	5	1000-	0	3	6	8	36
Total		2	12	19	13	23	69

PPC: 41% PC: 71% PM: 4%

表 4.10 視程予測値（3 時間先）と視程実測値との比較

3-hour Prediction		Predicted Visibility (m)					Total
		1	2	3	4	5	
		-100	100-200	200-500	500-1000	1000-	
Measured Visibility (m)	1	-100	0	0	0	1	0
	2	100-200	0	1	2	0	0
	3	200-500	0	3	8	5	2
	4	500-1000	1	0	6	3	0
	5	1000-	0	0	7	8	16
Total		1	4	23	17	18	63

PPC: 44% PC: 71% PM: 5%

4. 4 視程推定手法改良に関する検討

本研究で開発した視程推定手法自体は、1 時間値での広義の適中率が 79% であることが示された。本節では、課題を整理して、視程推定手法自体の精度向上の可能性について検討する。

（1）課題の整理

4. 2 節で示したとおり、本手法では、以下の点で課題が残っている。
 - (イ) 今回の視程の推定過程で与えた基準高さ z_t [m] での飛雪空間密度 N_t [g/m³] が、吹雪の激しい時を想定して与えているため、吹雪のあまり激しくないときには、過小に視程を推定してしまう可能性がある。
 - (ロ) 降雪の後しばらく時間が経過すると、風上側の積雪表面の雪粒子の結合力が強くなり、風速が 8.5 m/s を越えても飛雪が発生しない場合がある。これも視程推定値が実測値より過小になる理由の一つと考えられる。
 - (ハ) 雪面付近の大気が安定状態（鉛直方向への大気の拡散が起こりづらい状態）のとき、高さ 1m の風速が 9.5 m/s でも吹雪が発生していないことがある。このような場合も、風速が

強くなっても吹雪が発生しないため、視程推定値が実測値より過小となる。

これらの条件を加味することで、視程推定精度の向上が期待できる。ただし、本研究の主旨が容易に入手できる気象データから視程を推定することであり、上記の（ロ）（ハ）については、一般的な気象条件で表すことは難しい。このため、本章では、これらのうち、（イ）について検討し、視程推定精度の向上に関する可能性について示す。

（2）基準高さの飛雪空間密度 N_t と摩擦速度 U^* の検討

第3章では、基準高さ z_t (=0.15 m) での飛雪空間密度 N_t を定数 (=30 g/m³) で与えた。しかし、この値は、風速などの気象要素に依存すると考えられる。そこで、実際に飛雪流量と風速を測定して、基準高さ z_t [m/s] での飛雪空間密度 N_t [g/m³] と、風速との関係を求めるとともに、風速と摩擦速度 U^* [m/s] との関係式を明らかにして、視程推定手法の精度の向上可能性について検討する。

飛雪流量については、北海道開発土木研究所の石狩吹雪実験場で計測を行った。捕雪袋型吹雪計（第2章図2.3参照）を用いて高さ 0.15m で飛雪流量を計測した。また、高さ 0.15 m, 0.6 m, 1.2 m, 2.4 m で三杯式風速計により風速を計測した。また、降雪強度として、現地で目視観測を行い、降雪無し、降雪弱、降雪強の3段階に区分した。解析では鉛直方向に風速の対数分布式（式(3.6)）が成り立つと仮定し、高さの異なる4点の風速から、表面粗度 z_0 [m]、摩擦速度 U^* [m/s] を求め、これらの値から、高さ 10m での風速を外挿して求めた。観測は、2004年2月5, 23日, 3月1日の3日間、計47回測定を実施した。観測状況を図4.7に示す。

$$V_z = \frac{U^*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad \cdots (3.6) \text{ 再掲}$$

図4.8に、高さ 0.15m の飛雪空間密度 $N_{0.15}$ (= N_t) の計測値と外挿して求めた高さ 10m の風速 V_{10} [m/s] を比較した結果を示す。図より近似曲線を求める式(4.2)が得られる。

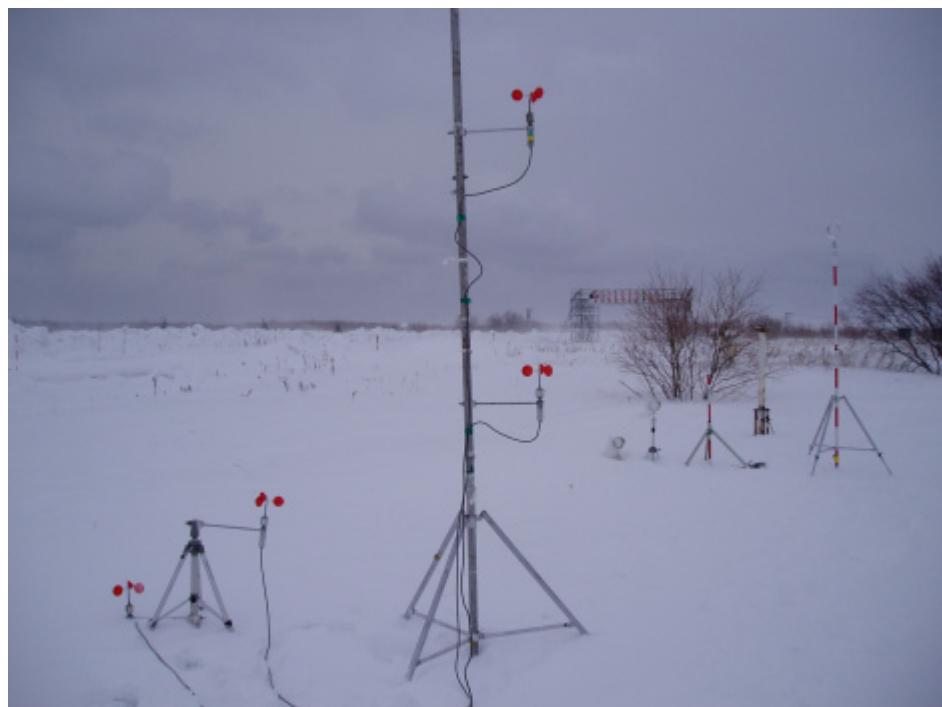


図 4.7 風速と飛雪流量の観測状況。高さ 0.15 m, 0.6 m, 1.2 m, 2.4 m で計測。

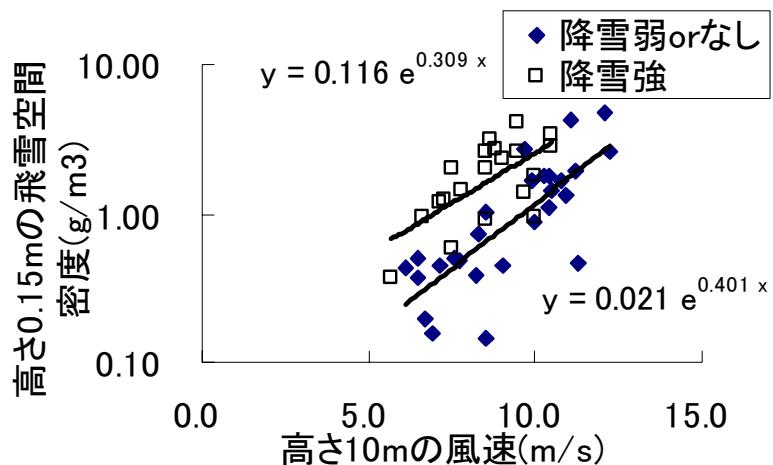


図 4.8 飛雪空間密度 $N_{0.15}$ と風速との関係

降雪の強い場合

$$N_{0.15} = 0.116 \exp(0.309 \cdot V_{10}) \quad [\text{g}/\text{m}^3] \quad \cdots(4.2a)$$

降雪が弱い, もしくは無い場合

$$N_{0.15} = 0.021 \exp(0.401 \cdot V_{10}) \quad [\text{g}/\text{m}^3] \quad \cdots(4.2b)$$

次に, 摩擦速度 $U^*[\text{m}/\text{s}]$ と高さ 10 m の風速 $V_{10}[\text{m}/\text{s}]$ の関係を調べた。第 3 章では式(3.7)

で、高さ 10 m の風速と摩擦速度の関係式を 1 次式で示した。1 次式で表す場合は、雪面の表面粗度 z_0 [m]が一定であることを意味する。しかし、飛砂の場合に Bagnold¹¹⁾が示したように、吹雪の場合も、風速によって雪面の表面粗度が変化すると考えられる。南極の様にサスツルギ（常に強風にさらされることによって出来た大きな凹凸の雪面）に覆われた場合を除くと、一般に、風速が強まるほど、表面粗度 z_0 は大きくなると考えられる。Tabler¹²⁾や、Pomeroy and Gray¹³⁾は、この現象を考慮して摩擦速度 U^* [m/s]を高さ 10m の風速 V_{10} [m/s]のべき乗式で表している。

本研究でも、これらの研究に習い、べき乗式で近似することにする。図 4.9 は、高さの異なる 4 点の風速から求めた摩擦係数 U^* と、外挿して求めた高さ 10m の風速 V_{10} [m/s]の関係を表した結果である。このグラフから、関係式を求める

$$U^* = 0.0274 \cdot V_{10}^{1.13} \quad \cdots (4.3)$$

となる。

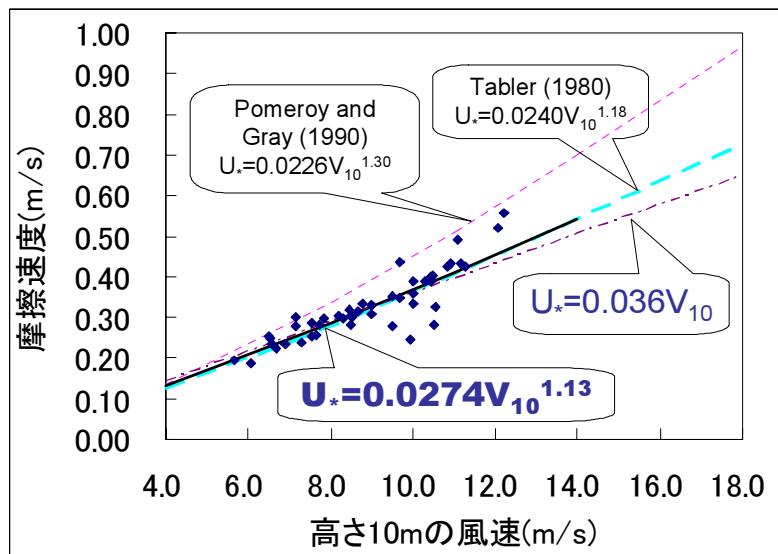


図 4.9 高さ 10m の風速と摩擦速度との関係と既存研究

(3) 改良した手法による視程推定値と視程観測値との比較

第 3 章の視程推定手法にこれらの結果を適用し、4.3 節と同じ、石狩吹雪実験場での 2002/03 冬期のデータを用いて、視程の実測値と視程推定値の比較を行った。式(4.2)の適用に関して、降雪強度が 0.5 cm/h 以下の場合を降雪弱(または無し)、0.5 cm/h を超える場合を降雪強とした。また、降雪粒子の落下速度と浮遊粒子の落下速度は、値を変えながら適中率が高くなるように適当に値を定め、降雪粒子の落下速度を 1.2 m/s、浮遊粒子の落下速度を 0.21 m/s とした。浮遊粒子の落下速度が、第 3 章で採用した値に比べ小さいのは、雪の粒子形の影響（式(3.12)による）もしくは、表 3.1 で示した南極での結果と異なり、北海道では高さ 1~1.5m で飛雪粒子の平均粒径が小さくなっている可能性も考えられるが、現

時点では明らかでない。

本節で示した $U^* [\text{m/s}]$ と $N_{0.15} [\text{g/m}^3]$ の関係式を用いて再計算した推定視程と、実測視程を比較した結果を表 4.11 に示す(10 分値)。ここで、PPC, PC, PM はそれぞれ適中率、広義の適中率、見逃し率で、表 4.2 にその定義が示されている。表 4.11 の結果を表 4.3 で示す結果と比較すると、適中率が 36%から 50%へ、広義の適中率が 71%から 76%に向上した。一方で見逃し率は 0%から 2%へ増加した。このとき表 4.5 で示すスレットスコア(TH)を求めるとき、TH=0.29 から TH=0.35 に改善されている。

次に、1 時間値を用いて推定した視程と、実測視程を比較した。表 4.12 はその結果である。表 4.6 で示した結果と比較すると、適中率が 38%から 53%へ増加した。また広義の適中率は 79%で変わらなかった。また見逃し率は 0%から 2%へ増加した。このときスレットスコアは、TH=0.45 から TH=0.52 に改善されている。

表 4.11 改良した手法によって計算した視程推定値と視程実測値との比較 (10 分値)

All Data (10-min data)		Estimated Visibility (m)					Total
		1	2	3	4	5	
		<100	100–200	200–500	500–1000	1000=<	
Measured Visibility (m)	1	18	9	8	0	0	35
	2	34	109	29	8	2	182
	3	33	134	250	55	33	505
	4	6	53	201	94	46	400
	5	1	42	217	224	643	1127
Total		92	347	705	381	724	2249
PPC: 50%				PC: 76%		PM: 2%	

表 4.12 改良した手法によって計算した視程推定値と視程実測値との比較 (1 時間値)

All Data (1-hour data)		Estimated Visibility (m)					Total
		1	2	3	4	5	
		<100	100–200	200–500	500–1000	1000=<	
Measured Visibility	1	8	6	2	0	0	16
	2	19	33	10	3	0	65
	3	4	34	57	14	2	111
	4	0	7	31	18	6	62
	5	0	2	21	16	80	119
Total		31	82	121	51	88	373
PPC: 53%				PC: 79%		PM: 2%	

(4) 考察

前節で得られた結果で、適中率が増加したのは、基準高さでの飛雪空間密度を風速の関数として与えることで、視程の良い領域で視程推定値が実測値に比べ小さく計算されるという、本視程推定手法が当初持っていた偏りが修正されたためと考えられる。表 4.3 と表

4.11 を比較してみると、視程 1000 m 以上の領域で、視程推定値と視程実測値が適中するデータが増加していることがわかる。すなわち、このことは、視程推定精度向上の可能性を示すものであり、統計学的手法に見られない本手法の特長である。しかし、その一方で、見逃し率が増加している。このように視程推定値を小さめに計算するという誤差を解消しようとしたため、情報としてはリスクが増加することもわかった。

4. 5 雪堤による道路上の視程低下¹⁴⁾

実際の道路上の視程は、道路構造や道路付属物の有無、周囲の植生、建物などに影響を受ける。特に路側の雪堤から吹き出す飛雪による視程障害はしばしば体験するものである。しかし、本研究で求められる視程は、風上側に十分な吹送距離をもち周囲に障害物のない場所でのポテンシャル的なもので、路線に沿って刻々と変わる視程を示すものではない。実際に道路情報として吹雪情報を提供する場合を想定すると、安全側の情報を提供する方が良いと考えられる。そのためには、雪堤による吹雪視程の低下割合をあらかじめ知っておき、必要に応じて、雪堤の高さに応じた視程値の補正を行う場面もあると考えられる。そこで、次に、雪堤の影響によって道路上で視程がどの程度低下しているか、雪原上の視程と道路上の視程を比較するため、飛雪流量の測定を行った。

(1) 観測状況

観測場所は、北海道開発土木研究所の石狩吹雪実験場内の道路である。石狩吹雪実験場は、札幌の中心部から北方約 17 km の石狩川下流部右岸の旧河川敷に位置する。この地域の冬期の主風向は、西北西から北西であり、観測は、南北に走っている直線区間で行った。観測地点の風上は、十分な広さを持つ草地となっている。

飛雪流量の観測は、風上の雪原上（雪面からの高さ 0.15 m, 1.2 m）と車道上（高さ 1.2 m, 2.4 m）で行った（図 4.10）。道路上の高さ 1.2 m は小型車のドライバーの目線の高さに、高さ 2.4 m は、大型車のドライバーの目線の高さに相当する。なお同時に三杯式風速計により、風速も測定した。

飛雪流量は、2.5 節で述べた要領で行い、測定した飛雪流量は、式(3.5')により視程に換算して表すこととする。

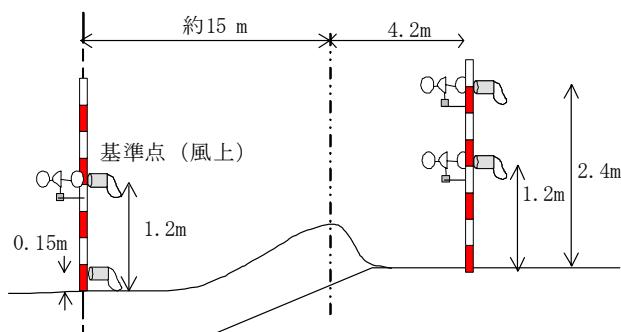


図 4.10 飛雪流量と風速の観測状況

(2) 観測結果

図 4.11 に視程の観測結果を示す。高さは両者共に 1.2 m である。図より、道路上の視程は雪原上の視程より悪い傾向にある。

雪原上より視程が悪い（飛雪流量が多い）ということは、道路上の風速が強くなっているか、飛雪の空間密度（単位体積の空間における飛雪粒子の総質量）が大きいかのどちらかである。そこで、次に道路上での風速の測定結果を示す。

図 4.12 は、雪原上の高さ 1.2 m の風速と道路上高さ 1.2 m の風速を比較したものである。道路上の風速は、雪原上の風速とほぼ同じか、若干弱いことがわかる。このことから、道路上の視程が雪原上の視程より悪いのは、風速が強くなつたためではなく、飛雪の空間密度が大きくなつたことによるものと判断できる。

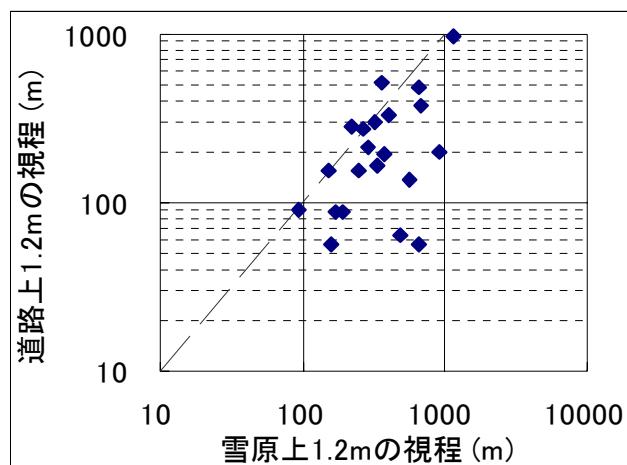


図 4.11 雪原上高さ 1.2 m の視程と道路上高さ 1.2 m の視程

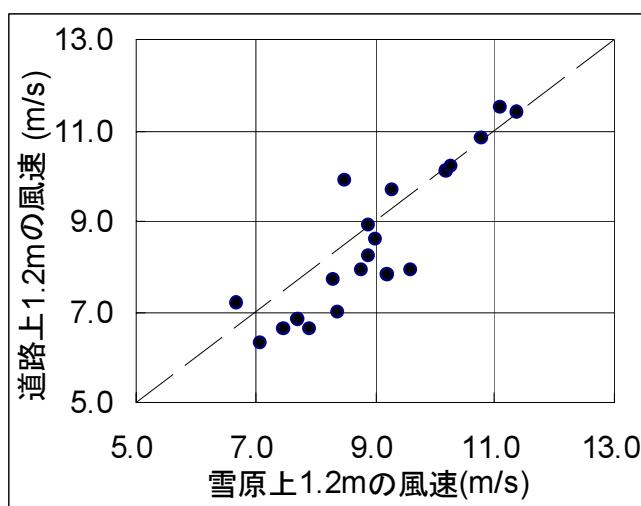


図 4.12 雪原上高さ 1.2 m の風速と道路上高さ 1.2 m の風速

(3) 道路上の視程低下と雪堤の関係

気温と降雪強度は雪原上も道路上も同じと見なすことができるので、雪原上の視程と道路上の視程の差は、雪堤の影響によるものが大きいと考えられる。図4.13は、雪原上高さ1.2mの視程に対する道路上高さ1.2mの視程の比と雪堤の高さの関係である。図4.13より雪堤の高さが高くなるに従い、雪原上の視程に比べ道路上の視程が低下することがわかる。雪堤の高さ0.8mを境に回帰式を求めるとき次の結果が得られた。

$$y = 0.68H^{-0.22} \quad (H \leq 0.8 \text{ m}) \cdots \text{(4.4a)}$$

$$y = 0.21H^{-5.84} \quad (H \geq 0.8 \text{ m}) \cdots \text{(4.4b)}$$

ここで、 y は雪原上高さ1.2mの視程に対する道路上高さ1.2mの視程の比で、 H は雪堤の高さ[m]である。雪堤の高さが0.8mを越えると、道路上の視程が雪原上の視程に比べ低下する傾向が強く見られる。雪堤の高さが1mを越えると、視程は風上の雪原上の5分の1程度まで悪くなることを示している。

以上より、雪堤の高さが0.8mより高い区間が連続してある場合は、式(4.4)を用いて、視程の値を補正することで、より安全側の視程情報となる。ただし、雪堤の高い区間が短い場合や断続的にある場合は、雪堤のない区間で視程を過小に推定する恐れがあり、ドライバーにとっては、「空振り」情報となり、この頻度が多いと吹雪情報そのものに対する信頼度が低下する。また、雪堤状況を何らかの方法で入手する必要もあり、実際の情報提供で用いる場合は、十分な検討が必要であると考えられる。

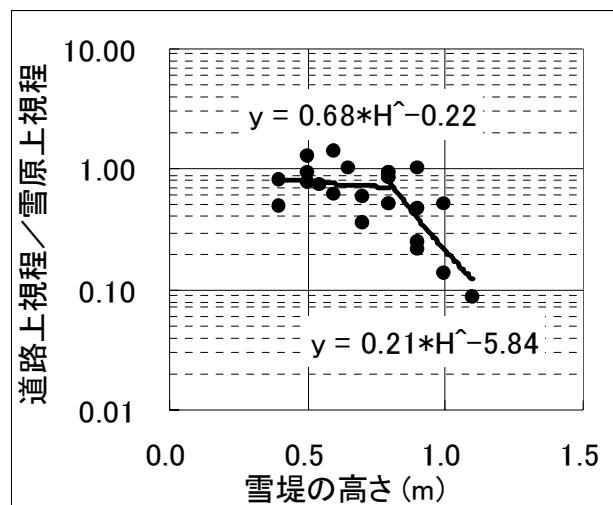


図4.13 雪堤の高さが道路上の視程低下（雪原上1.2mの視程に対する道路上1.2mの視程の比）に与える影響。

(4) 雪堤のある道路上での本視程推定手法の適用性の検討

ここでは、前節のように、雪堤があることで道路上の視程が低下する現象について検討し、本研究で開発した視程推定手法の適用可能性を考察する。ここで、雪堤の高さを $H[m]$ とおき、雪堤に十分近い道路上 1.2 m の高さに、雪原上高さ $(1.2-H)\text{ m}$ の飛雪が流れ込むと仮定する（図 4.14）。この仮説のもと、雪原上の高さ $(1.2-H)\text{ m}$ の飛雪流量と、道路上の高さ 1.2 m の飛雪流量の比較を行う。

なお、雪原上では高さ $(1.2-H)\text{ m}$ の飛雪の測定を行っていない。そこで、飛雪流量は z 軸（鉛直方向上向き）の対数に比例すると仮定し¹⁾、高さ 0.15 m での飛雪流量と、高さ 1.2 m の飛雪流量から内挿して、高さ $(1.2-H)\text{ m}$ の飛雪流量を求めた。

図 4.15 は、雪原上高さ 1.2 m の視程と道路上高さ 1.2 m の視程との関係、および、雪原上高さ $(1.2-H)\text{ m}$ の視程と道路上高さ 1.2 m の視程との関係を示したものである。前者の相関係数が 0.48 であるが、後者の相関係数は 0.82 であった。この結果は、仮説の妥当性を裏付けるものである。

図 4.16 は、図 4.15 で示した雪原上高さ $(1.2-H)\text{ m}$ の視程と道路上高さ 1.2 m の視程との関係を、雪堤の高さが 0.8 m 以上と 0.8 m 未満で場合分けしたものである。雪堤の高さが 0.8 m 未満では相関係数が 0.92 となり、特に高い相関が見られた。

即ち、雪堤の高さより 0.4 m 以上高い箇所では、雪堤の高さだけ補正することで飛雪空間密度の垂直分布式（式(2.7)）が成立し、本研究で開発した視程推定手法の利用が可能であると考えられる。

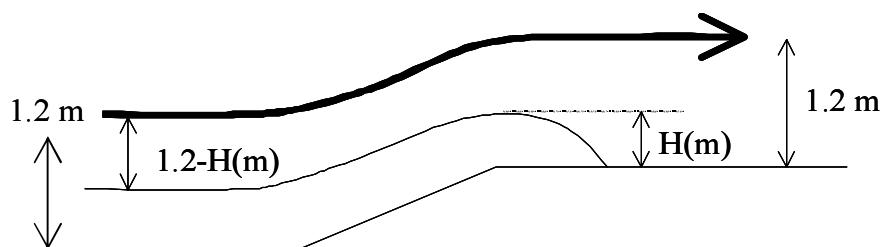


図 4.14 雪堤のある道路上での飛雪流の模式図。

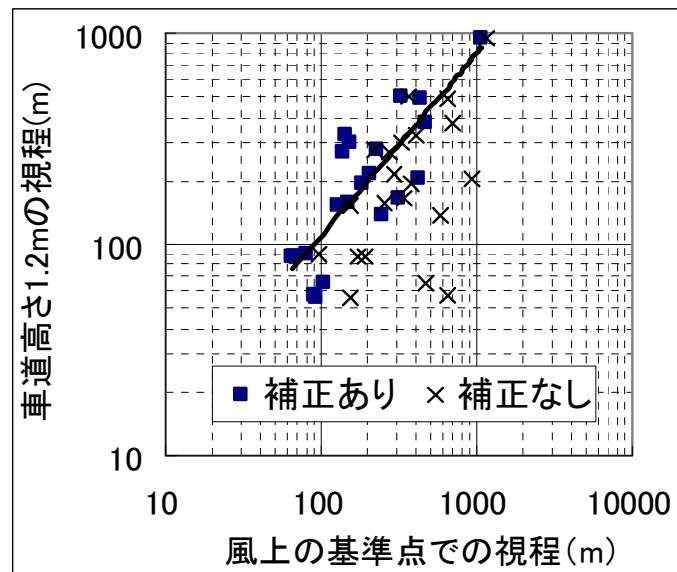


図 4.15 雪原上の視程と道路上の視程の相関図。■：雪原上高さ $(1.2-H)$ m の視程。×：雪原上高さ 1.2 m の視程。

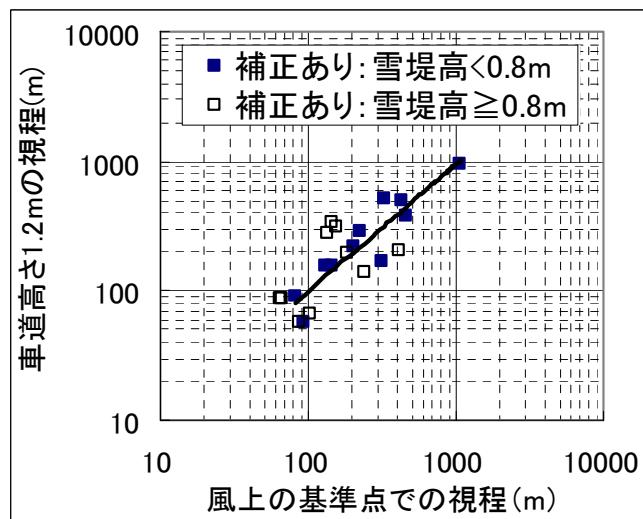


図 4.16 雪原上高さ $(1.2-H)$ m の視程と、道路上高さ 1.2 m の視程との関係を、雪堤の高さが 0.8 m を境に分けた結果。

4. 6 まとめと考察

本章では、第3章で明らかにした、視程推定手法に気象値を与えて実際に視程推定と予測の事後検証を行った。

はじめに、4.2節で地上観測データを用いて視程推定モデル自体の検証を行った。視程を5段階で情報提供することを想定し、 5×5 分割表による検証を行った結果、適中率は38%，広義の適中率は79%となり、かなり精度が高いことが示された。

次に、4.3節で実際に提供されている気象情報を使った視程推定・予測について精度を検証した。その結果、地上データを使ったときと比べ精度がやや落ちるもの、現在視程推定値では、ほぼ同程度の精度があることがわかった。また、1時間先予測で視程200m未満の状態の発生を予測することが可能であることが示された。

4.4節では、本研究で開発した視程推定手法の改良に関する検討を行った。その結果、基準高度 z_t での飛雪空間密度 N_t と高さ10mでの風速 V_{10} との関係、および摩擦速度 U_* と高さ10mでの風速 V_{10} との関係を求めて、それらに基づいて視程を推定することで、視程推定値の視程実測値への適中率が向上した。また、視程200mを閾値としたときのスレットスコアの向上が見られた。その一方で、見逃し率の増加が伴う危険性があることもわかった。即ち、第3章で示した当初の視程推定手法は、安全側に推定する傾向があるため広義の適中率が高く、見逃し率が低いという特徴がある。一般に気象予測などでは危険側の情報を許容する傾向にあり、当初の方法はその傾向に沿っている。ただし、これも度が過ぎると情報に対する信頼度が低下する恐れがある。一方4.4節で述べた改良方法を用いると、見逃し率が増加するが、適中率は向上し、スレットスコアも向上する。したがって、どちらかを採用するかについては、用途によって視程値に要求される精度が異なり、リスクの許容度も異なるので、それに応じて、ふさわしいものを選択すればよいと考えられる。

続いて、4.5節では路側の雪堤の高さが、1.0mを越える状況では、雪堤の高さの増加に応じて、雪原上の視程に対する道路上の視程の比が急激に低下する傾向にあることがわかった。従って、雪堤の高さが何らかの方法で容易に得られるのであれば、計算で求めた視程に補正をかけることも、実際の道路上の視程を推定し、安全側の吹雪視程情報を提供する上では有効になると考えられる。

基本的には、ドライバーへ情報提供するために用いる視程情報は、ある程度、安全側（即ち視程値が実測値より小さい側）に推定できれば、1次的には要求水準をクリアできると考えられる。従って、第6章で実際に情報提供実験を行うに当たっては、広義の適中率が高く見逃し率が低い、第3章で開発した方法を用いる。また、この際は、4.5節で述べた補正は行わない。これは、雪堤の高さについてはデータが得られていないこと、および、対象地域（札幌圏）に建物の多い市街部や、防雪施設の整備されている区間が含まれているため、このような補正を行うことで、逆に視程を過小に推定してしまい、情報への信頼度が低下する危険性があることによる。

第4章 参考文献

- 1) Masaru Matsuzawa, Yasuhiko Kajiya, Masao Takeuchi : The development and Validation of a method to estimate visibility during snowfall and blowing snow, Cold regions science and technology, 41, 91-109 (2005)
- 2) 竹内政夫 : 吹雪時の視程に関する研究, 土木試験所報告, 74, 31pp (1980)
- 3) 福澤義文, 加治屋安彦, 金子学, 丹治和博, 金田安弘 : 吹雪時における多重衝突事故の発生要因とその対策について (第2報) 一平成10年1月7日における札幌圏の事故事例解析からー, 寒地技術論文・報告集 vol.14, 49-56 (1998)
- 4) 西尾文彦, 石田完 : 地吹雪における乱れのエネルギー消散率, 低温科学物理編, 31, 69-85 (1973)
- 5) 和田陽平, 大山正, 今井省吾編 : 感覚+知覚心理学ハンドブック, 誠信書房, 1030pp, (1969)
- 6) 斎藤博英 : 降雪の強さと視程, 国立防災科学技術センター研究報告, 5, 33-40 (1971)
- 7) 石本敬志, 竹内政夫, 福澤義文 : 吹雪時の視程と気象条件の相互関係, 第25回北海道開発局技術研究発表会, 57-60 (1982)
- 8) 菊地原英和 : 気象予測の検証と評価, 気象研究ノート, 日本気象学会, 161, 191pp (1988)
- 9) 松沢勝, 加治屋安彦, 金子学, 丹治和博, 永田泰浩 : 冬期道路条件下における車載端末による情報提供実験, 寒地技術論文・報告集 vol.17, 153-158 (2001)
- 10) 気象庁編 : 気象業務はいま 2003, 富士マイクロ, 125pp (2003)
- 11) Bagnold R. A. : The Physics of Blown Sand and Desert Dunes, 265pp (1954)
- 12) Tabler R. D. : Self-Similarity of Wind Profiles in Blowing Snow Allows Outdoor Modeling, J. Glaciology, 26, 421-434 (1980)
- 13) Pomeroy J. W. and Gray D. M. : Saltation of snow, Water Resource Research, 26, 1583-1594 (1990)
- 14) 松沢勝, 加治屋安彦, 伊東靖彦 : 吹雪時のドライバーの目線の高さの視程に与える雪堤の影響, 寒地技術論文・報告集, Vol. 20, (2004)

第5章 吹雪の広域情報提供システム の開発

5. 1 はじめに

本研究の最終目的は、吹雪情報をドライバーに提供することで、ドライバーが吹雪時に最適な交通行動を取ることを可能とし、冬期道路の安全性や安心感の向上を図ることにある。ドライバーへの冬期の道路気象情報の提供に関する試みに関しては、札幌市内都市部の降雪や路面の情報提供による朝の通勤時の交通行動の変更に関しては著者らの研究¹⁾がある。しかし、吹雪情報に関しては、実際にドライバーに提供した事例は無い。これは、容易に入手できる気象情報から吹雪時の視程を推定する手法がなく、広域にわたる視程情報の取得が困難であり、視程を含めた吹雪情報を提供するシステムが無かつたためである。のために、吹雪情報の一要素である視程を、気象条件から容易に推定できる手法の開発を行った。吹雪情報提供が、吹雪対策の一つの手段として認められるためには、実際に吹雪情報を提供してドライバーに評価してもらう必要がある。そこで、本章では、次章で示す札幌圏の吹雪の広域情報提供実験に用いるため、前章までに示した容易に入手できる気象データから吹雪時の視程を推定する手法を用いて、吹雪情報提供システムの開発を行う。

5. 2 吹雪情報提供システムの構成

(1) システムのフレーム設計

吹雪情報提供システムで提供する情報については、降雪強度と、視程情報を基本とする。対象地域は札幌圏として、インターネットを通じてPCおよび携帯電話に提供するものとした。第3章で示したように視程情報の作成（視程の推定）には、降雪強度、風速、気温（条件分けに用いる）が必要である。

気象情報は、気象庁の気象レーダーや、解析雨量・降水短時間予報、天気分布予報のように色分けで量を示して地図と重ねて提供する例が多いので²⁾³⁾、これに準じ、降雪強度と視程は、程度毎に色分けして地図上に表示することとした。データの空間分解能は、吹雪の強さは場所によってかなり異なるので、なるべく細かい方がよい。その一方で、視程を推定するために必要な既存の気象データ（降雪強度、風速、気温）利用を考慮し、1kmメッシュで提供するものとした。データの更新頻度は、吹雪のような変動の大きい気象値については、10分ごとの更新が望ましい。実際、レーダー降雨量は10分ごとに更新している²⁾³⁾。しかし気象レーダーは上空での値であり、誤差を伴うので、地上データを使った補正が行われる。解析雨量と呼ばれるものはその一例である²⁾。特に、降雪の場合、雨と異なり風による移流の影響があるので、地上の値との誤差が大きくなると考えられている。また、吹雪の予測情報の作成に必要な気象データのうち降雪強度（降水短時間予測）は30分間隔でデータ更新するが、風速と気温の予測情報は1日2回の更新で提供情報自体が1時間間隔である⁴⁾。以上のこと考慮して、本システムでの吹雪情報は1時間更新で、現況、1時間先、3時間先、6時間先の予測情報を作成することとする。

一方、道路利用者の立場からは、1kmメッシュで示す面的な吹雪状況の分布情報よりも、出発地と目的地を結ぶルート沿い（代替路を含む）の情報にニーズがあり、「北の道ナビ」

⁵⁾や「しりべし e 街道実験」⁶⁾では、経路に沿った道路関連情報の提供も行っている。そのため、本システムにおいても、2 地点を結ぶ経路に沿った吹雪情報も提供するものとする。出発地と目的地は自由に設定できるのが望ましいが、プロトタイプなので、代表的な区間に限定して構築するものとした。

また、情報提供の手段として、PC や携帯の Web の他に、メールでの情報提供も考えられる。すでに、雨量などをトリガーに注意喚起を行うメールを配信するサービスが存在する⁷⁾。但し、吹雪情報をトリガーとするものは、まだ存在しないので、本システムでは、吹雪情報をトリガーとした、プッシュ型のメール配信機能を持たせることとした。

(2) システム全体の情報のフロー

システム全体の情報の取得と提供までのプロセスを整理したものを図 5.1 に示す。

気象庁から配信される気象データ（気象レーダーのデータ、アメダスデータ、数値気象情報のデータなど）は、気象予測を行う機関（例えば（財）日本気象協会など）のデータ集配信用のホストサーバに取り込まれる。このデータをもとに、気象情報作成サーバで、 $1 \times 1\text{km}$ メッシュの降雪強度、気温、風速の現況値と予測値（1～6 時間先）を作成する。また、著者らの視程推定手法を用いて、 1km メッシュの気象データからメッシュ毎に視程値を計算して 1km メッシュの視程値を作成する。これらの降雪と視程情報の処理プロセスは次項で詳しく示す。Web サーバではこれらの 1km メッシュの気象データ（視程を含む）と、アメダスのデータを取り込む。並行して、FTP によって道路管理者の公開用データサーバから道路気象観測所の気象データなど道路関連情報を取り込む。これらのデータを統合して、Web 公開用のコンテンツを作成し、インターネット上で公開する。なお、これらの提供する気象情報は毎時更新される。

センターサーバには Web での情報提供に加えて、メールを自動的に配信する機能（プッシュメール機能）も付加した。これは、センターサーバで、特定のメッシュに含まれる降雪強度や視程などを監視し、その値が、あらかじめ設定した条件値を超えると、道路気象情報に関するメールを作成し利用者に配信するものである。

今回用いたセンターサーバのスペックは次の通りであり、汎用の PC サーバで十分である。

機種:DELL powerEdge1650

OS: windows2000server

CPU: PentiumIII 1.2GHz

メモリ: 512MB

HDD: 16GB

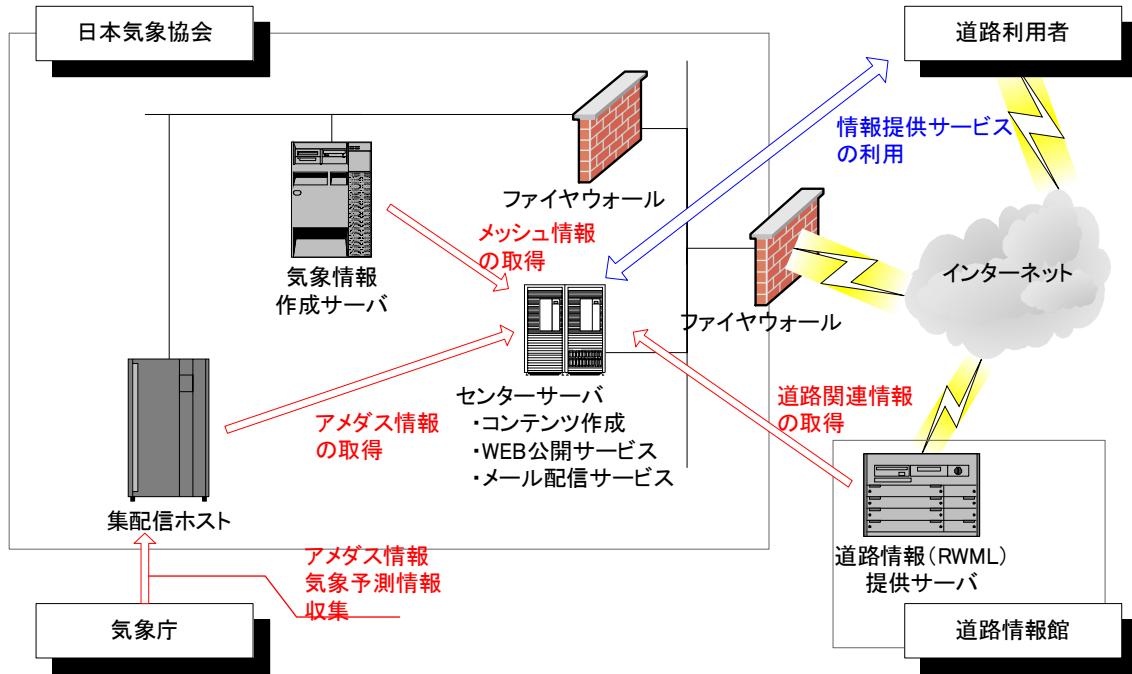


図 5.1 広域吹雪情報提供システムでの情報の収集と提供の流れ

(3) 吹雪情報作成のプロセス

吹雪情報には、降雪強度の情報と視程の情報の2種類有ると述べた。本システムでは、吹雪情報として降雪強度と視程に関する情報を提供する。降雪強度の情報は気象レーダーなどで一般に提供されているので、それらのデータを使う。視程情報については、今回開発した視程推定手法を用いることとし、入力する気象データとして一般に配信されている気象データを用いる。また、吹雪の予測情報を提供するため、気象業務法を考慮して、気象予測会社のデータ処理サーバにシステムを組み込んで運用することとした。

本システムにおける吹雪情報作成のフローを図 5.2 に示す。気象庁からは1時間毎に、 $5 \times 5 \text{ km}$ メッシュの解析雨量・降水短時間予報（現況と6時間先までの予測値）と、1日2回、 $20 \times 20 \text{ km}$ メッシュの気温と風速データ（現況から72時間先までの予測値）の配信を受ける。これらのデータをもとに（財）日本気象協会が加工して、 $1 \times 1 \text{ km}$ メッシュでの降水量、気温、風速の現況値と6時間先までの1時間毎の予測値を作成する。降水量と気温をもとに降雪強度を計算する。これらは、一般に有料サービスとして提供されている情報であり、本研究ではこれらの情報を入力情報として、以下のシステム開発を行った。

視程情報は、この時間降雪量と風速および気温の現況及び予測情報から、第3章で示した視程推定手法を用いて視程値を計算して得る。本研究で開発したシステムでは、 $1 \times 1 \text{ km}$ メッシュの降雪、これらの現況・予測値を入力情報として用いることで、 $1 \times 1 \text{ km}$ メッシュでの、現況の視程値と6時間先までの予測の視程値を得る。

降雪情報と視程情報は毎時更新し、ユーザーに理解しやすいように地図データと重ねる

などの加工を行い Web 上で提供した。その際、表 1 に示す 5 段階で分けて表した。なお、視程と視界は専門用語としては異なるが、一般には視界と表現されることが多い。このため、開発する吹雪情報提供システム上では、視程を視界と表現する。

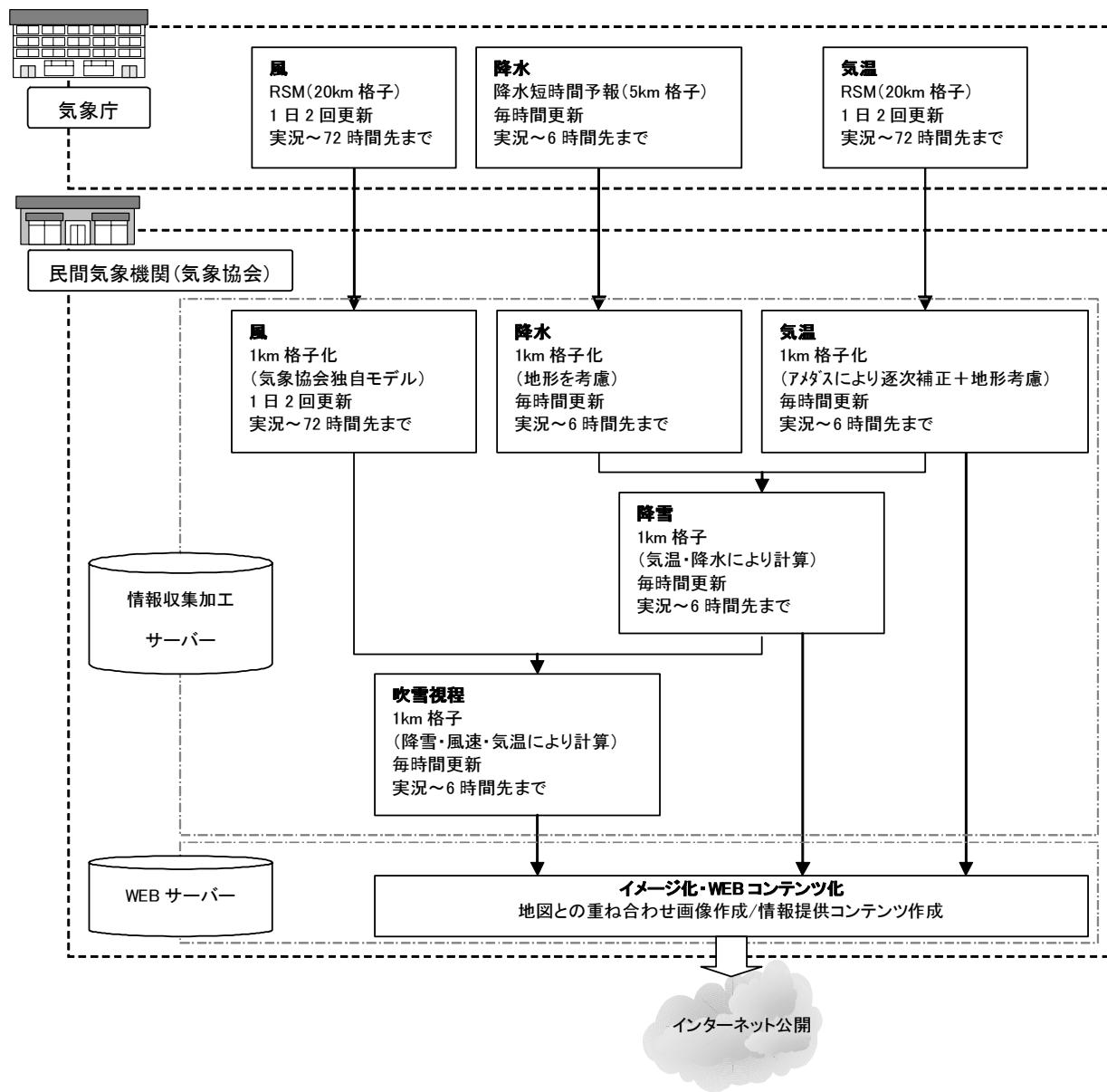


図 5.2 吹雪情報の収集から提供に至るフロー

表 5.1 降雪強度と視程のランク分け

降雪強度		視程	
文字表現	定義	文字表現	定義
降雪なし		良好	1000 m 以上
弱い雪	0.1 - 1 cm/h	やや不良	500 - 1000 m
雪	1 - 3 cm/h	不良	200 - 500 m
強い雪	3 - 6 cm/h	かなり不良	100 - 200 m
非常に強い雪	6 cm/h 以上	著しい視程障害	100 m 未満

5. 3 吹雪情報提供のコンテンツ

吹雪情報の提供手段は、パソコン（PC）向けの Web 画面、携帯電話向けの Web 画面、プッシュ型メール配信の 3 種類有る。なお、実験情報提供ホームページは、誰でもアクセス可能とし、プッシュ型メール配信は登録者にのみ提供を行った。

（1）PC 向け提供画面

- i) トップページ：トップページには札幌圏全体の路線上の視程または降雪強度の情報を掲載した（図 5.3）。経路選択のための情報と、降雪や視程の広域メッシュ情報については、別メニューとした。
- ii) 経路選択情報：札幌圏の主要地点を結ぶ 9 区間にに対して、その間で多く利用される 2 つの経路を選定し（表 5.2），それぞれの経路上での吹雪情報（降雪・吹雪視程）や距離などの情報を表示した。経路上で、地上気象観測所がある場合はその気象観測値も掲載した（図 5.4）。また、降雪、吹雪視程については、区間の状態を示すためにアイコンを利用し、アイコンの外枠の色と、イラストで降雪・視界の状況をイメージさせた（表 5.3）。
- iii) 降雪・吹雪視程メッシュ情報：1km メッシュの降雪（実況・予測）や吹雪視程（実況・予測）の面的分布マップの表示（図 5.5）。1 ページに、降雪と視程の現況値と予測値（1, 3, 6 時間先）を掲載した。



図 5.3 トップページの概要。A:情報提供メニューの見出しで、経路情報のページや降雪や視程のメッシュ情報などの下層ページへ移動する。B:道路上で色塗り表示される情報を（視程または降雪）切り替える。C:道路上に色塗りで表示される視程または降雪の現況。D:気象庁および道路管理者の地上気象観測地点で、クリックするとポップアップ表示で、現在の気象状況を表示する。

経路情報

札幌 - 小樽 2005/03/08 08:00現在



図 5.4 経路選択情報のページ。A:設定した 2 つの経路地図, B: 対象エリアの本日の天気予報, C:F で表示している降雪と視程のアイコンの凡例。D: 経路上の道路気象状況, E: 経路上の代表的な地点と距離。F: 降雪と視界状況 (アイコンと色で表示), G: E で示した地点での気象実況で, 1km メッシュのデータから該当箇所の値を抽出した。地上気象観測点がある場合はそのデータ (気温, 風速, 時間降雪量, 積雪深) も掲載した。

表 5.2 経路選択情報を提供した区間と経路

1. 札幌一小樽	
(1)	札幌都心—(R5)—北 34 条—(R5)—宮の沢—(R5)—銭函—(R5)—小樽
(2)	札幌都心—(R230)—北 1 西 10—(石山通—新川通)—手稻前田—(R337)—銭函—(R5)—小樽
2. 札幌都心—石狩(八幡)	
(3)	札幌都心—(R5)—北 34 条—(R231)—花畔—(R231)—石狩(八幡)
(4)	札幌都心—(R5)—北 15 条—(環状通)—本町—(伏古拓北通—R337)—札幌大橋—(石狩川沿広域農道)—美登位—(岩見沢石狩線)—石狩(八幡) (注 1)
3. 札幌都心—石狩(八幡)	
(5)	札幌都心—(R12—R275)—角山—(R275)—当別
(6)	札幌都心—(R5)—北 15 条—(環状通)—本町—(伏古拓北通)—札幌大橋—(札幌当別線)—当別
4. 札幌都心—江別	
(7)	札幌都心—(R12)—厚別—(R12)—江別
(8)	札幌都心—(R275)—角山—(R337)—江別
5. 小樽—石狩(八幡)	
(9)	小樽—(R5)—銭函—(R337)—花畔—(R231)—石狩(八幡)
6. 小樽—当別	
(10)	小樽—(R5)—銭函—(R337)—花畔—(R231)—石狩(八幡)—(岩見沢石狩線)—当別 (注 1)
(11)	小樽—(R5)—銭函—(R337)—花畔—(R337)—札幌大橋—(R337)—蕨岱—(R275)—当別
7. 小樽—江別	
(12)	小樽—(R5)—銭函—(R5)—北 34 条—(R274)—雁来—(R275)—角山—(R275—R337)—江別
(13)	小樽—(R5)—銭函—(R337)—花畔—(R337)—札幌大橋—(R337)—対雁—(R275—R337)—江別 (注 2)
8. 札幌都心—あいの里	
(14)	札幌都心—(R5)—北 34 条—(R231)—篠路—(R231)—茨戸—(茨戸福移通)—あいの里
(15)	札幌都心—(R5)—北 15 条—(環状通)—本町—(伏古拓北通)—丘珠—(伏古拓北通—茨戸福移通)—あいの里
9. 札幌都心—千歳	
(16)	札幌都心—(R36)—大曲—(R36)—恵庭—(R36)—千歳
(17)	札幌都心—(R12—R274)—共栄—(江別恵庭線)—恵庭—(R36)—千歳

表 5.3 降雪強度と視程のランク分けとアイコンおよび色

降雪強度		吹雪視程	
	赤(吹雪 6cm/h 以上)		赤(著しい視程障害 100m 未満)
	橙(強い雪 3-6cm/h)		橙(かなり不良 100-200m)
	黄(普通の雪 1-3cm/h)		黄(不良 200-500m)
	青(弱い雪 0.1-1cm/h)		青(やや不良 500-1000m)
	緑(降雪なし)		緑(良好 1000m 以上)

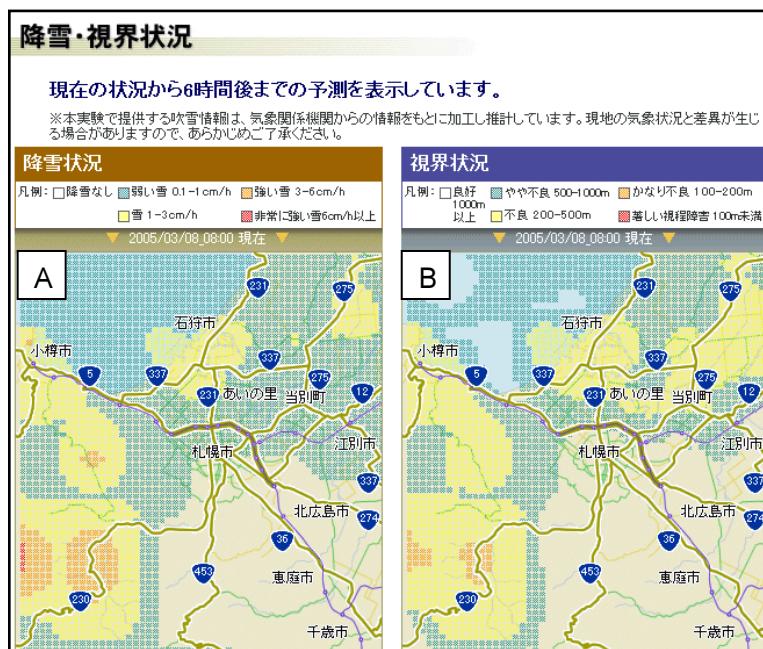


図 5.5. 降雪・視程状況のページ。1km メッシュで札幌圏における降雪状況 (A) と視程状況 (B) の分布を表 1 で示した 5 段階で提供した。提供情報は、現況値と、1, 3, 6 時間先の予測値で、1 時間毎に更新した。

(2) 携帯電話 Web 向け提供画面

携帯電話でも、同様な情報提供を行った。ただし、扱う画面が小さいことと、通信速度が遅い携帯電話での使用を考慮したため、トップページに情報を集中させることは避け、経路情報、降雪情報メッシュ、視程情報メッシュおよび地上気象観測値について下層ページを用意して、情報提供を行った (図 5.6)。



図 5.6 携帯電話の Web での情報提供例

(3) プッシュ型メール配信による情報提供

Web での情報提供に加えて、プッシュ型メール配信による情報提供も行った。

利用者は、あらかじめ、Web 上で、対象区間とプッシュ型メール配信のトリガーとなる降雪量や吹雪視程の閾値を設定する。区間は、経路選択情報と同様に、札幌圏の主要地点を結ぶ 9 区間から選ぶことができる。利用者が選択した区間の道路状況（降雪・吹雪視程）が悪化した際にメールにて情報を取得するものである。気象条件の閾値は、降雪は「吹雪（6cm/h 以上）」「強い雪（3-6cm/h）」「普通の雪（1-3cm/h）」、吹雪視程は「著しいし視程障害（100m 未満）」「かなり不良（100-200m）」「不良（200-500m）」のそれぞれ 3 段階を閾値として選択できるようにして、経路情報のアイコンを利用して、希望のランクを選択することで設定できるようにした。また、夜間の走行のないドライバーでは夜間のメール配信は迷惑メールとなる事が想定されたので、利用者の形態に応じて配信時間帯を、昼間に限定することも可能にした。なお、このサービスについては利用者へのイメージアップを意図して「頼めーる」という名称を付けた（図 5.7）。

システムでは、対象区間に含まれるメッシュの降雪強度や視程値を監視し、それらの値が閾値を越えると、登録したメールアドレス宛に、対象区間における降雪・視程情報を記載したテキストメールを自動的に送信した（図 5.8）。

札幌圏
吹雪の広域情報 提供 実験

札幌圏の吹雪・道路の状況をお伝えしています。

▶ 経路情報 ▶ 降雪・視界状況 ▶ 頼めーる ▶ アンケート ▶ 実験について

頼めーる

受信先メールアドレス:

氏名: 電話番号: (ハイフン無し半角数字)

郵便番号: (ハイフン無し半角数字)

住所:

利用の形態: 職業ドライバー(バス・タクシー・トラック等)
 一般ドライバー サンデードライバー ペーパードライバー 免許なし

希望区間の選択

<input type="checkbox"/> 札幌-小樽	<input checked="" type="checkbox"/> 札幌-石狩	<input type="checkbox"/> 札幌-当別	<input checked="" type="checkbox"/> 札幌-江別	<input type="checkbox"/> 小樽-石狩
<input type="checkbox"/> 小樽-当別	<input type="checkbox"/> 小樽-江別	<input type="checkbox"/> 札幌-あいの里	<input type="checkbox"/> 札幌-千歳	

※メールは、1区間につき1通配信されます。(例:3区間選択した場合、最大で3通、同時にメールが配信されます)

札幌-石狩

【1】札幌-(R5)-北34条-(R231)-花畔-(R231)-石狩(八幡)
 【2】札幌-(R5)-北15条-(0環状線)-本町-(伏古拓北通-R337)-札幌大橋-(石狩川沿広域農道)-美登位-(岩見沢石狩線)石狩(八幡)

降雪が   
 cmを超えたたら mを下回ったら メールを受信

24時間受信する 夜間(夜9時～翌朝6時)は受信しない 受信しない

札幌-江別

【1】札幌-(R12)-厚別-(R12)-江別
 【2】札幌-(R275)-角山-(R337)-江別

降雪が   
 cmを超えたたら mを下回ったら メールを受信

24時間受信する 夜間(夜9時～翌朝6時)は受信しない 受信しない

Civil Engineering Research Institute of Hokkaido. All rights reserved, 2004

図 5.7 メール配信条件の設定ページ。希望区間のボックスにチェックを入れると、閾値を入力する枠が現れる。

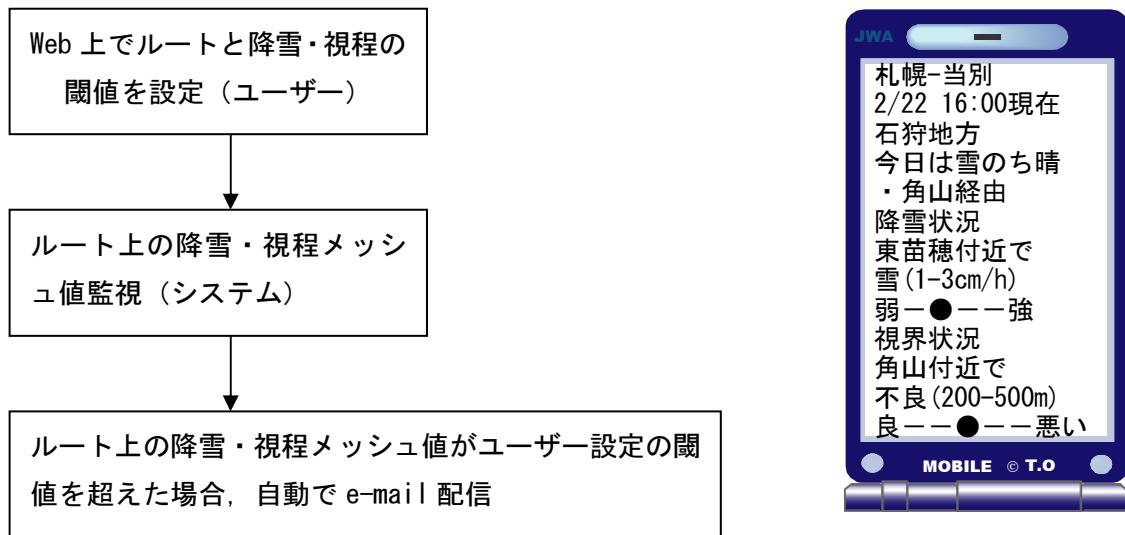


図 5.8 プッシュ型メール配信システムの仕組みと送信メールの例

5. 4 まとめ

本章では、第3章で開発した視程推定手法を用いて、吹雪情報提供を行うシステムの開発を行った。視程情報は、入力する気象情報の精度の向上によって、その精度も向上する。近年、気象予測の精度が向上し、また、更新頻度などが短くなるなど、気象予測技術の向上が著しい。よって、吹雪情報の精度も改善されるものと考えられる。

また、情報提供する上でのインターフェースも重要である。気象情報は一般に面的な分布図で提供されるものが多いが、道路情報という特性を考えると経路に沿った情報の方が使いやすいと考えられる。また、ホームページは、情報を求めるドライバーが自らアクションを起こす必要があるが、アクションを起こさなくても情報が得られるプッシュ型情報配信機能も考慮した。

次章では、今回開発したシステムを用いて実際に情報提供実験を行い、吹雪情報が、冬期道路の安全性やドライバーの安心感の向上に対する効果に関する評価を行う。

第5章 参考文献

- 1)Masaru Matsuzawa, Yasuhiko Kajiyama, Nobuo Konagai, Yasuhiro Kaneda: Information-Sharing Experiments for Better Winter Roads – Greater Sapporo WHITE-NET Experimental Project, Transportation Research Record, 1741, pp147-151, (2001)
- 2)気象庁：<http://www.jma.go.jp/jma/menu/flash.html> 「防災気象情報」
- 3)国土交通省防災情報提供センター：<http://www.bosaijoho.go.jp/radar.html> 「リアルタイムレーダー」
- 4)（財）気象業務支援センター：<http://www.jmbsc.or.jp/>
- 5)加治屋安彦：寒地 I T S の利用者ニーズと有効な導入方策に関する実証的研究, 北海道開発土木研究所報告, 122, 208pp(2004)
- 6)山際祐司, 加治屋安彦, 松島哲郎：官民連携による冬期道路の情報収集・提供実験（第一報）－しりべし e 街道－, 寒地技術論文報告集, 20, 162-167(2004)
- 7)例えば（財）気象協会：<http://www.jwa.or.jp/> “トピックス・バックナンバー” – “「全国のお天気」新サービス「お天気リクエスト」開始”

第6章 吹雪情報が冬期道路の安全性や 安心感に与える効果

6. 1 はじめに

本章では、前章で開発した吹雪情報提供システムを用いて、吹雪情報をドライバーに提供することによる安全性や安心感の向上に与える効果を明らかにし、吹雪対策の一方策としての吹雪情報の活用可能性を示す。そして、これらの検討を通じて、本研究で開発した視程推定手法を用いて作成した吹雪情報が道路情報として利用可能性、有用性を有することを明らかにする。対象地域は、札幌周辺地域で、吹雪情報を実際に利用した方に対して、交通行動の変化、安心感の向上、および吹雪情報の精度に関してアンケートを取った結果に基づいて分析を行った。

6. 2 札幌圏における吹雪情報提供実験

実験対象エリアは、札幌市とその近郊である。自動車での所要時間としては、札幌市中央部からほぼ1時間圏内である。2004/2005年冬期に実験を行った。なお、2003/2004冬期にも実験は行っている¹⁾が、視程情報の作成には同じシステムを使っているが、インターフェースが2004/2005年のものと異なっているため、本章では第5章で示したシステムを用いた2004/2005年冬期の実験結果を示す。

吹雪情報の提供媒体は、前述のとおり、PCと携帯電話のWebとプッシュ型メール配信である。吹雪情報提供の効果を把握するため、実験の終盤で、情報利用者にアンケートを採った。アンケートの方法は2通りで、Web上に構築されたアンケートに入力してもらう方法と、プッシュメール登録者に対しては、アンケート用紙を郵送して、回答を返送してもらう方法をとった。両者合わせて、145名の回答を得た。

6. 3 アンケート結果

(1) 吹雪情報提供による交通行動の変化

「この冬、吹雪の広域情報を利用して、あなたは実際に交通行動を変更しましたか」という問い合わせに対する回答結果である。交通行動の変更の種類について選択肢を提示し、それから当てはまるものを全て選んでもらった。回答結果を集計した結果、60%の回答者が交通行動を変更したことがわかった(図6.1)。また、交通行動変更の種類については、「予定していた出発時刻を変更したことがある」が37%と最も高く、「予定していた経路を変更したことがある」が32%でそれに続いている。また、交通行動の変更をしなかった場合でも「参考になったが変更しなかった」に32%もの回答が得られ、「参考にならなかった」と回答した者は0%であった(図6.2)。

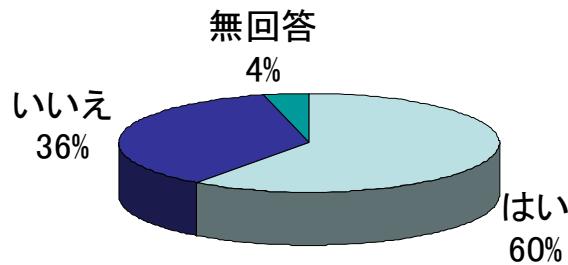


図 6.1 「この冬、吹雪の広域情報を利用して、あなたは“実際に“交通行動を変更しましたか”という問い合わせに対する回答結果。

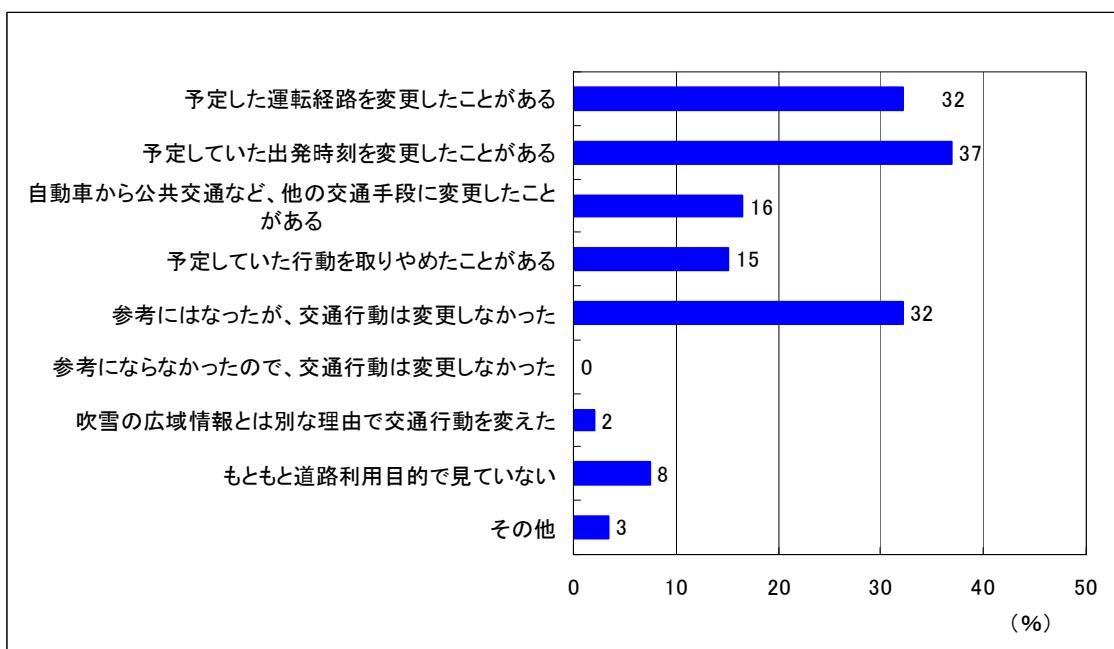


図 6.2 吹雪の広域情報を利用して実際にとった交通行動の種類。与えられた選択肢から複数選択で回答した結果。

(2) コンテンツの有効性

次に、コンテンツの有効性について、PC と携帯電話での Web 情報提供とプッシュメールの評価を行った。「実験で提供した情報の役立ち度を教えてください」という設問に対し、「非常に役立った」から「全く役立たなかった」までの 5 段階と「利用しなかったのでわからない」の 6 つの選択肢から選んでもらった。

図 6.3 に、「利用しなかったのでわからない」を除いて集計を行った結果を示す。PC での情報提供では、トップ画面である国道の吹雪降雪状況（図 5.3 参照）と、降雪・視界状況情報（図 5.5 参照）の評価が高い。両者とも地図に吹雪情報を重ねた表示であり一度に得られる情報量が多いことが特徴である。一方、携帯電話での情報提供は、PC での提供に比

べ、降雪や視界状況の分布情報の評価が低くなっている。これは、PCでは、現況から6時間先までの分布図を1つのページ内に配置して提供しているのに対し、携帯電話では、1つのページに1つの分布図のみを表示しており一覧性に劣るためと考えられる。この結果、携帯電話では、経路上の吹雪情報や、各地の気象状況（地上気象観測点での気象情報）と、これら気象分布情報との評価の差が小さくなっている。つまり一覧性を高めることで評価が高くなると言うことは、利用者が、地図に重ねて提供される面的な降雪や視程の分布のような情報を求めていることを示すものである。

なお、一般利用者は視界という用語を視程と同義で使っており、かつ視界という用語の方が理解しやすいと考えられるので、吹雪情報提供システム上やアンケートの設問においては、「視程」の代わりに「視界」という用語を用いている。アンケート調査上においても視界という用語を使っているので、本章では、視程と視界を同義で用いることとする。

ところで、視程情報（視界状況情報）の有効性について、PCのWeb情報では、視程情報と降雪情報を一緒に扱ったため、視程情報だけに着目した評価は行っていない。しかし、携帯電話のWebに提供した視程情報（視界状況）に関しては、視程（視界状況）と降雪状況を分けて評価しており、視程情報は、降雪情報と同程度の「役に立つ」という評価が得られている（図6.3）。

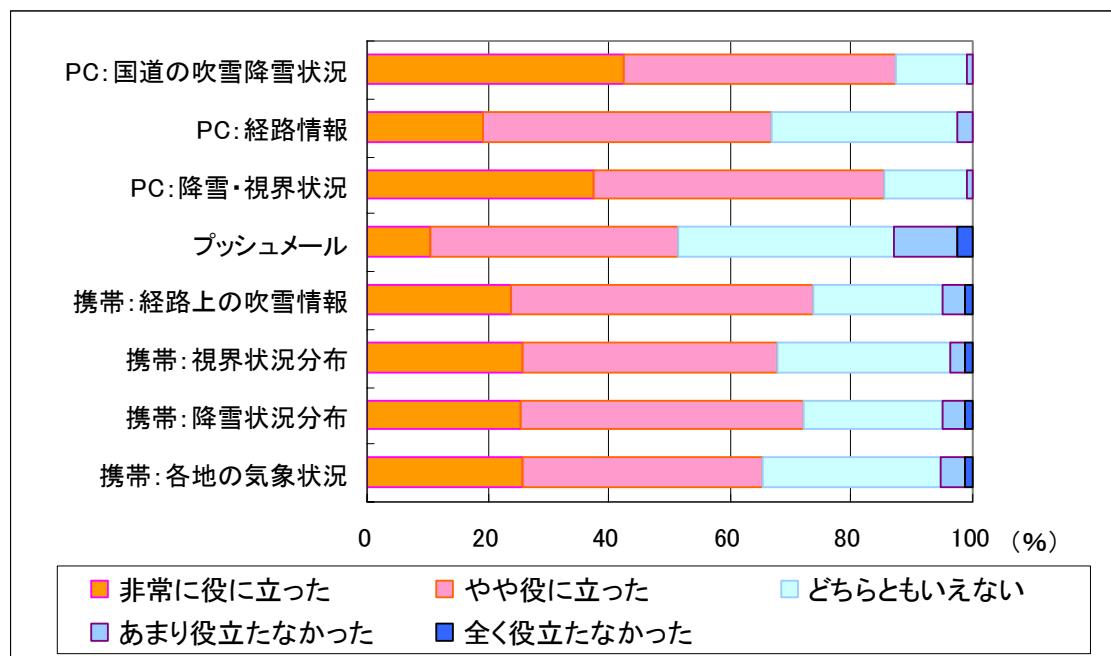


図6.3 実験で提供した情報の役立ち度に対する評価。それぞれの情報を使わなかつた回答者を除いて集計した。

（3）視程のランク分けの妥当性

次に、視程のランク分けに関する妥当性を調べた。視程は表5.1に示す5段階で表示し

ている。アンケート結果によるとこのランク分けについてはおおむね妥当であるという結果が得られた（図 6.4）。

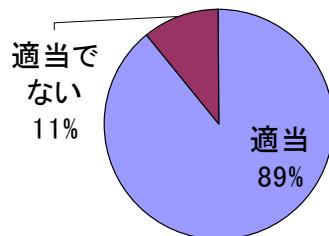


図 6.4 今回の実験における視程のランク分け（5段階）は妥当だったか。

（4）冬期事故の防止可能性

「あなたは、吹雪の広域情報のような情報を得ることで、冬期交通事故の拡大を防止できると思いますか？」という問い合わせに対する回答結果を図 6.5 に示す。図より、冬期事故防止効果を肯定する者が 98%を占め、冬期道路における安全性の向上への期待感が強く表れている。

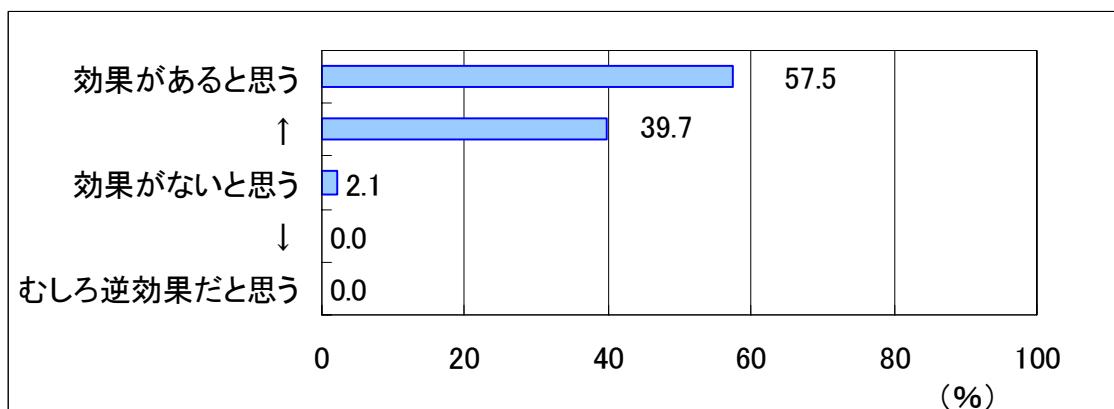


図 6.5 冬期事故防止に対する効果が有ると思うか？

（5）吹雪情報による冬期道路に対する不安感の低減

吹雪情報による不安感低減の程度を評価するため、「吹雪の広域情報を利用することで、あなたの冬道への不安感や事故等の危険性はどの程度軽減されますか？この情報を利用する前の不安感・危険性を 100%として、情報を利用して交通行動をした後の不安感・危険性について教えて下さい。」という質問を行った。9割以上の利用者が、不安感が減少すると回答し、3割の利用者は不安感が半分以下になると回答している（図 6.6）。これらのことから、吹雪情報の提供は交通行動の変化という顕在的な効果に加えて、安心感の向上など心理的な側面にも効果があり、平均すると 2～3割、不安感が低減されていることが確認

できた。

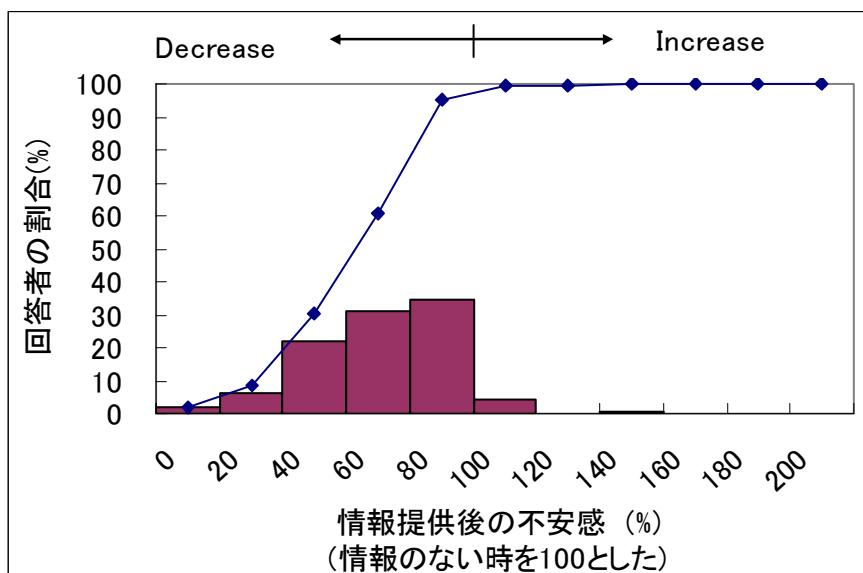


図 6.6 「今回の情報提供によって不安感がどの程度軽減するのか」という問い合わせに対する回答結果。情報のない場合を 100%とした時の、情報提供後の不安感の割合を回答した。

(6) 冬期道路に対して重要視するもの

都市内の道路の渋滞の緩和を目的とする道路交通情報提供と、冬期道路における吹雪情報提供とは、その効果を評価する上で、評価する対象が異なると考えられる。前者であれば所要時間短縮に対するニーズが大きいので、所要時間短縮や渋滞解消に対する効果を示せばよい。後者について、まず、冬期道路に対して、どのような点をドライバーが重要視しているかを把握する必要がある。

今回のアンケート調査では、冬の運転計画を立てるときに重要視することについても質問した。「より早く目的地につける」、「予定通り目的地につける」、「安全に走行できる」、「最短の経路」などの項目に対して「重要である」から「重要でない」までの 5 段階で評価してもらった。これに対する回答結果を図 6.7 に示す。図によると、冬期の積雪寒冷地においては、「安全に走行できる」が最優先されていることがわかる。また、より早く目的地へ到着することよりも、予定通りに到着する定時性への重点が置かれていることが示されている。「最短の経路」や「早く目的地に着ける」という選択は、冬期道路での運転においての重要度は低いことがわかる。

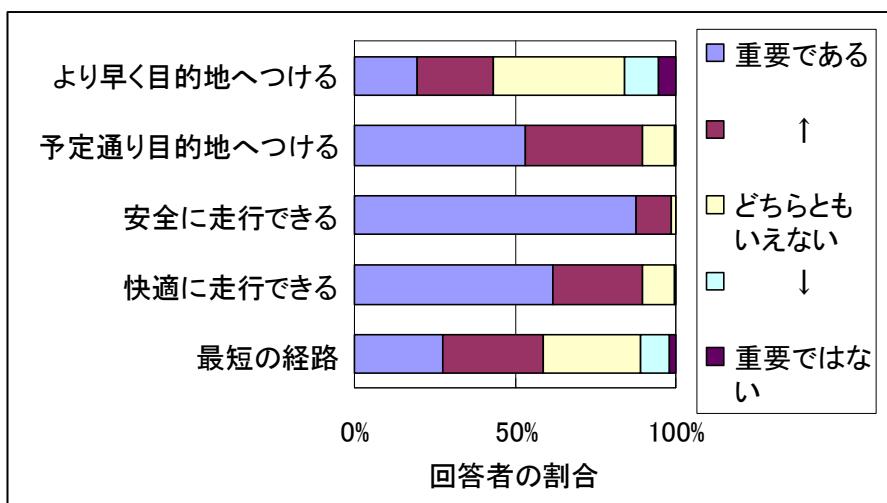


図 6.7 冬期道路において重要視すること

(7) 本実験に対する意見

アンケートでは、情報提供実験に対する意見を自由記述で記載してもらった。その結果、「道路の画像を提供する」、「降雪情報、視程情報の更新時間を早くする」、「エリアを拡大する」、「携帯の Web サイトを軽くする」の意見が、それぞれ数件寄せられた。

6. 4 議論

(1) 視程情報の精度に対する満足度

視程情報（現況、予測）の精度については、第4章で示したとおりである。しかし、視程情報の精度がどの程度有れば十分と言えるのかは、明らかになっておらず、利用者の精度に対する満足度を把握する必要がある。視程情報の精度に対する満足度は、2004/05年冬期の実験では調査を行っていないが、2003/04冬期に行った同様な実験で調査を行っている。

2003/04年冬期の実験では、インターフェースは異なるが吹雪情報のデータ作成フローは同一のシステムを用いて、157名にアンケートを採った。実験で提供した視程情報の精度に対する満足度を尋ねたところ、「非常に満足」、または「比較的満足」と回答したのは予測値に対しては55%だったが、現況値に対しては69%と、視程情報を提供する初めての実験としては、かなり高い満足度が得られた（図6.8）。

4.3節に示した実際の気象データを用いた視程推定精度の検証結果では、視程200m未満の状況は把握可能であるが、視程100m未満か視程100～200mかを判別することの精度は落ちることが示されていた。しかし、今回の結果から、視程200m未満の状態が判別できるだけでも、かなり高い満足度が得られることがわかった。

また、視程予測については、同じく4.3節より1時間先の視程200m未満の状態が予測できる程度でも、予想以上の満足度が得られることがわかった。これは、今まで視程の予測情報が無く、初めての視程予測情報として価値が高かったことに加え、視程情報自体に

要求される精度がそれほど高いものではないことなどが理由として考えられる。

一方、満足度を下げる要因として、視程推定手法が持つ誤差の他、入力として与える気象情報自体の誤差が考えられる。また、情報の更新間隔が1時間であることに加え、吹雪情報として処理して提供されるまでに20分程度のタイムラグがあり、リアルタイム性に欠けることも原因の一つと考えられる。一方、現在の気象予測技術では、気象データ自体が1時間毎に更新されているものが主なうえ、情報加工のための演算時間も必要なため、リアルタイムに、短い間隔でデータを更新するのは困難な側面がある。しかし、図6.8において、「満足できない」と回答したものは、何れも10%以下であり、視程推定の精度の向上に加え、道路利用者のニーズと情報に対する受容性を考慮した情報提供を行うことで満足度を向上できる可能性は高いと考えられる。

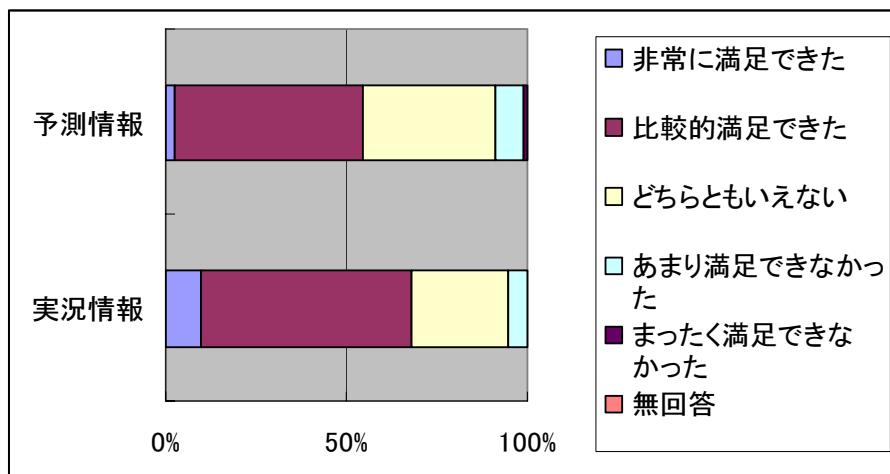


図6.8 視程情報の精度に対する満足度。2003/04冬期の札幌圏の吹雪情報提供実験の調査結果による。回答者数157名。

(2) 吹雪情報の有効性

2004/05年冬期の実験において、冬期道路に対しては、「早く目的地に着く」ことより、「安全、確実に目的地に着く」ことが重要視されていることがわかった。道路利用者に対する満足度調査でも、冬期に遠くに出かけるときの道路に対して、約67%が不満を感じている。また、不満の理由として74%が「吹雪や地吹雪で危険を感じるから」と回答している³⁾。これらのことからもわかるように、冬期道路において走行の安全性を高め、ドライバーの安心感の向上を図ることは、道路利用者の満足度向上を図る上で重要なポイントである。

今回の実験で、吹雪情報の提供は、吹雪時の迂回や、主発時刻の変更などの判断を支援し、冬期道路に対する不安感を低減させる効果があることが示された。つまり、吹雪情報は、冬期道路においてドライバーが重要視するポイントである「安全に走行できる」ことに適切に応えている。従って、吹雪情報が、冬期の道路気象情報として提供効果の高いものであると考えられる。

本実験のもう一つの目的は、著者らが開発した視程推定手法で作成した視程情報の有効性を示すことにある。先に述べたように、視程情報と降雪強度から成る吹雪情報は、ドライバーの交通行動の判断材料となり、また安心感を向上させるなどの効果があることがわかった。さらに、図6.3に示すように、今回の実験で提供した視程情報が降雪情報に匹敵する有用性も示された。従って、視程情報は吹雪情報の一要素として必要であり、そして、今回用いた視程推定手法が広域の視程分布情報を求める方法として有用であると考えられる。

6. 5. まとめ

札幌圏を対象とした吹雪情報提供実験によって、当初の研究目的に対して以下の結論が得られた。

- ・ 視程情報を含む吹雪情報は冬期のドライバーの交通行動の判断や、不安感の低減にとって大きな影響を与える情報である。すなわち、視程情報は、冬期の道路気象情報提供システムで提供する価値の高い情報である。そして、吹雪対策の一方策としての吹雪情報提供の有効性が示された。
- ・ 広域の視程分布情報が役に立ったという回答が7割近く得られた（携帯電話のWebへの提供の場合）。また、視程推定精度についても実況視程で約6割が満足できると回答している。このことから、著者らが開発した視程推定手法は、ドライバーへの道路情報としての視程情報の作成に利用できると判断できる。

第6章 参考文献

- 1) Matsuzawa M., Kajiya Y., Suzuki T., Saka N. : Visibility Estimation in Snowstorm and the Effects of Snowstorm Information on Transportation Behavior, 11th World Congress on ITS Nagoya, Aichi (2004)
- 2) 鈴木武彦, 加治屋安彦, 松沢勝:吹雪の広域情報提供による交通行動変更と情報の評価について, 第24回交通工学研究会 (2004)
- 3) 鈴木武彦, 松沢勝, 加治屋安彦, 菅野誠:冬期道路の高度情報提供システムの開発～自発光式視線誘導標を利用した安全走行支援サービスの実道実験～, 第3回 ITSシンポジウム, 71-78 (2004)

第7章 結論

7. 1 はじめに

本研究では、容易に入手できる気象データから視程を簡易に推定する手法を開発し、これを用いて、吹雪情報をドライバーに提供した。その結果、吹雪を避ける交通行動が促されることが判明し、本研究で開発した視程推定手法の有用性が確認された。

7. 2 本研究の成果

本研究の成果については、以下の通り整理できる（図 7.1）。

- (1) 従来、降雪のない吹雪時（地吹雪）には乱流拡散理論が適用され、塩谷の式で知られる飛雪空間密度の垂直分布式が成り立つことが知られていた。しかし、降雪を伴う吹雪時の飛雪空間密度の垂直分布については、乱流拡散方程式を解いた研究はあったが、乱流拡散係数を高さによらず一定とおいたため、降雪強度を限りなく 0 に近づけたときに塩谷の式との連続性が失われるという問題があった。そこで、著者は、塩谷と同様に、乱流拡散係数を高さの関数で与えて乱流拡散方程式の一般解を解くことで、塩谷の式を包含する飛雪空間密度の垂直分布式（竹内・松沢の式）（式(2.6)）を初めて導いた。さらに、浮遊粒子の落下速度と降雪粒子の落下速度を分けて、この垂直分布式を改良した松沢・竹内の式（式(2.7)）を導いた。

$$N = \frac{P}{w} + \left(N_t - \frac{P}{w} \right) \left(\frac{z}{z_t} \right)^{-\frac{w}{kU_*}} \quad \cdots (2.6)$$

$$N = \frac{P}{w_f} + \left(N_t - \frac{P}{w_f} \right) \left(\frac{z}{z_t} \right)^{-\frac{w_b}{kU_*}} \quad \cdots (2.7)$$

ここで、

N : 飛雪空間密度 [g/m^3], P : 降雪強度 [$\text{g}/(\text{m}^2\text{s})$], w_b : 浮遊粒子の落下速度 [m/s], w_f : 降雪粒子の落下速度 [m/s], z_t : 基準となる高さ [m], N_t : z_t での飛雪空間密度 [g/m^3], U_* : 摩擦速度 [m/s], k : カルマン定数
である。

- (2) 飛雪流量と視程の関係式の改良を行った。竹内と福沢による従来の式では、視程の悪い領域で実測値との誤差が大きくなつた点を改良し、視程の悪い領域で誤差が小さい関係式（式(3.5')）を示した。

$$Vis = 10^{\{-0.773 \log(N \cdot V) + 2.85\}} \quad \cdots (3.5')$$

ここで、 Vis : 視程 [m], N : 飛雪空間密度 [g/m^3], V : 風速 [m/s]

(3) 容易に入手できる気象データから視程を推定する手法を開発した(3.3節)。過去にも気象と視程との関係式は存在したが、本研究の手法は、(1)で述べた物理モデルを適用している点が異なる。この手法の特長は、パラメータの値の変更が可能であり、他の地域へもパラメータの調整によって適用が可能な点にある。また、入力する気象値に予測値を用いることで、視程の予測も可能になる。ただし、道路に沿って急激に変化する視程を表すことはできず、あくまでもその地域のポテンシャル的な視程(すなわち周囲に地物がない雪原上での視程)を表すものである。具体的な視程推定手法の手順は次の通りである。

①式(2.7)の定数(未知数)を定める。定めた定数と、降雪強度を式(2.7)に用いて、任意の高さ z の飛雪空間密度 N を求める。なお、以下に示した定数の値は、既存研究で得られたもので、本研究の第3章で採用した値である。

$$w_b = 0.35 \text{ [m/s]}$$

$$w_f = 1.2 \text{ [m/s]}$$

$$z_t = 0.15 \text{ [m]}$$

$$N_t = 30 \text{ [g/m}^3]$$

$$U_* = 0.036 V_{10} \text{ [m/s]} \quad (V_{10} \text{ は、高さ } 10 \text{ m の風速})$$

② 任意の高さ z での風速 V と、①で求めた飛雪空間密度 N を式(3.5')に与えることで視程が得られる。

(4) (3)で示された視程推定手法の精度については、上で示された定数を用いて視程を計算する場合、10分値に対しては、視程推定値と視程実測値との適中率が36%、広義の適中率が71%、見逃し率が0%となった。また、1時間値に対しては、適中率が38%、広義の適中率が79%、見逃し率が0%となった。また視程200m未満を一つのカテゴリーとすると、実際に視程200m未満の状態が発生した81事例中70事例を適中させていることから、視程200m未満の状態を気象条件から推定することについては、かなり精度良く推定できることがわかった。

(5) 現在、実際に情報提供されている気象情報を使って現在視程の推定と視程の予測(1時間先、3時間先)を行い、その場合の視程の推定(予測)精度を検証した。その結果、現在視程の推定値で適中率が49%、広義の適中率が79%、見逃し率が3%であった。また、視程予測値(1時間先)では、広義の適中率71%、見逃し率が4%と精度が低下していることが判明した。また、視程の実況値については、視程100m未満と視程100~200mの判別は難しいものの、視程200m未満の状態については、気象条件から推定できる可能性が高いことが明らかになった。また、視程の予測については、視程の実況の推定に比べると精度は落ちるが、1時間先の視程予測に関しては視程200m未満の状態を予測

する可能性があることが示された。しかし、3時間先の予測についてはまだ十分な精度が得られなかつた。但し、これらの精度については、入力する気象データ自身が持つ誤差によるものが大きく、これは、今後、気象観測・予測技術が向上することによって改善されるものである。

- (6) (3)で示した定数のうち、 z_t での飛雪空間密度 N_t [g/m³] や摩擦速度 U_* [m/s] と、高さ 10m の風速との関係式を求め、その式で得られる値を用いることで、視程推定精度が向上する可能性があることが示された。ただし、適中率やスレットスコアが増加する一方で、見逃し率が若干増加するリスクがあり、適用については、適用場面によって異なる視程情報に対して要求される精度を考慮して決定することが必要である。
- (7) 広範な視程情報をドライバーに提供する実験を初めて行った。過去には視程を広範囲で把握・予測する手法が無かったが、本研究で気象条件から視程が簡易に推定できるようになって、このような実験が可能になった。
- (8) 本研究で開発した視程推定手法を用いて作成した視程情報を含む吹雪情報をドライバーに提供し、ドライバーが情報を受けて吹雪を避けるような交通行動の変更があることを、初めて確認した。これによると、吹雪情報を受けとったドライバーの 6 割が、情報によって交通行動を変えたことがわかつた。また、交通行動を変えなくても、安心感が向上したと答えたドライバーも多かつた。
- (9) 吹雪情報を受け取ったドライバーに吹雪情報の精度に対する満足度を尋ねたところ、現況値については約 70% のドライバーが「満足」、「ほぼ満足」と回答した。一方予測値については 55% であったが、初めての実験としては、かなり満足度が高いと考えられる。

第1章 序論

- ・吹雪による視程障害対策は、積雪寒冷地では重要な課題
- ・吹雪情報(降雪、視程)の提供で、吹雪を回避できる(推論)
- ・視程情報を広域で把握→視程を気象値から推定する手法が必要

第2章 吹雪の物理モデル

- ・降雪を伴う吹雪に対して乱流拡散モデルを適用。
- ・初めて乱流拡散係数 $K=kU^*z$ の条件で一般解を解いた。(竹内・松沢の式)
- ・竹内・松沢の式を改良し、飛雪空間密度 N の垂直分布式を求めた。(松沢・竹内の式)

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

第3章 気象条件による吹雪時の視程推定手法の理論

- ・視程と、風速および飛雪空間密度との関係式を示す。

$$Vis = 10^{\{-0.773\log(NV)+2.85\}}$$

- ・定数を過去の研究から決定し、 N を求めることで、降雪強度、風速、気温から、視程を推定する手法を示す。(降雪を伴う吹雪時の視程を推定する手法を初めて開発)

第4章 視程推定精度の評価

1) 視程推定手法自体の精度

- ・分割表による検証～広義の適中率79%

2) 実際の気象情報を用いた視程推定精度

- ・1時間先の視程200m未満の状態を予測することが可能

3) 改良手法の検討

- ・基準高さの飛雪空間密度 N_t と高さ10mの風速 V_{10} との関係、および摩擦速度 U^* と V_{10} との関係式を用いることで、視程推定精度が向上

第5章 吹雪の広域情報提供システムの開発

- ・web上で吹雪情報を提供するシステムを設計し構築
- ・メール配信機能も付加
- ・1時間更新で、6時間先までの1kmメッシュの吹雪情報を提供

第6章 吹雪情報が冬期道路の安全性や安心感に与える効果

- ・初めて視程情報をドライバーに提供した実験を実施
- ・60%の利用者が実際に交通行動を変更した
- ・安心感向上にも効果が確認
- ・視程の精度については、現況値で69%が満足

第7章 結論

- ・今回開発した視程推定手法は吹雪情報の作成に有用である。
- ・視程情報提供は吹雪対策として有効な手法の一つである。

図 7.1 本論文の結論の概略

7. 3 結論

- 以上より、本研究の目的に照らし合わせて、研究の結論を整理すると次の2点になる。
- 1)著者が開発した視程推定手法は、視程推定の精度の面で改善の余地はあるものの、道路情報提供における吹雪時視程の推定手法として十分利用可能なものである。
 - 2)吹雪時の視程情報を含めた吹雪情報提供は、吹雪対策の一方策として有効である。

7. 4 今後の課題と展望

本研究での、今後の課題と展望を改めて整理すると

- (1)視程推定モデルの精度の向上：視程推定モデル自体は、約79%の広義の適中率を有しているが4.4節で検討した様に基準高さの飛雪空間密度 N_t を精度良く与えることができれば、適中率を向上させることができる。この改良手法を、吹雪情報提供システムでの視程の計算においてこの手法を活用して、精度に対する道路利用者の満足度の向上を図ることが出来るか検討する必要がある。
- (2)雪堤の影響：道路上の視程は、路側の雪堤によって急激に低下する。これらのリスクを見込んだ情報の作成について必要性の有無も含めて検討が必要である。
- (3)情報の更新頻度：現在の技術では、1時間毎に視程を計算しているが、吹雪自体は変動が大きいので、もっと細かい頻度で情報が更新されるのが望ましい。今回は、観測精度に対して疑問があったため、10分ごとに更新されているレーダー降雨量（降水量）のデータを使わなかったが、更新頻度の短縮を望む声も多い。従って、10分ごとに吹雪情報を更新することの可能性およびその精度についても検証する必要がある。

以上その他に、我々が関与することが出来ないが、今後の課題として入力する気象情報（特に予測値）の精度向上が挙げられる。視程推定手法自体はかなり高い精度を有している一方で、視程予測の精度が十分でなかった理由としては、入力する気象予測値の誤差が影響していると考えられるためである。現在、気象庁や民間の気象機関によって、面的な気象現況値や気象予測値が提供されている。今後これらの精度が向上することに伴い、本モデルによる視程予測の精度の向上も期待できる。また吹雪情報の更新頻度も、短い間隔で気象情報が更新されることによって、視程情報についても短時間での更新が可能になる。一方、上に示したように、このモデル自体もまだ改良すべき点が残されている。今後はこれらの課題について改良を図り、より信頼性の高い視程情報の提供を実用化することで、さらなる冬期道路の安全性、安心感の向上を図りたい。

謝　　辞

本研究は、筆者が北海道開発土木研究所において実施してきた吹雪時の視程推定手法に関する研究をとりまとめたものです。この間に多くの方にご指導いただきましたので、ここに謝意を表します。

本学位論文をまとめるに当たって、ご高配と懇切なるご指導をいただいた北海道大学佐藤馨一教授、加賀屋誠一教授、清水康行教授、西村浩一客員教授（独立行政法人防災科学技術研究所長岡雪氷防災研究所総括主任研究員）に対し、心から深く謝意を表します。

また（株）雪研スノーアイーターズの竹内政夫博士（元北海道開発土木研究所道路部長）には、本研究の理論構築と視程推定手法の開発に関して、長年にわたりアドバイスをいただき、吹雪時の視程に関する深い知見を与えていただきました。（財）日本気象協会の石本敬志博士（元北海道開発土木研究所道路部長）、（株）雪研スノーアイーターズの福澤義文博士（元北海道開発土木研究所道路部防災雪氷研究室副室長）には、上司として吹雪の研究に関して長年にわたりご指導いただきました。北海道開発土木研究所道路部防災雪氷研究室室長の加治屋安彦博士には、ITS（高度道路交通システム）の研究、特に情報提供システムのサービス・コンテンツのあり方について長年にわたりご指導いただきました。また、道路部防災雪氷研究室の各位におかれましては、日頃の業務の中、様々な面でご支援いただきました。ここに心より謝意を記します。加えて、この様な研究環境を与えていただいた斎藤智徳理事長、高木秀貴理事、能登繁幸前理事、相馬和則道路部長をはじめ北海道開発土木研究所および国土交通省北海道開発局の関係各位に心から感謝いたします。

北海道大学名誉教授の前野紀一博士、北海道大学低温科学研究所の石川信敬助教授、水野悠紀子前助教授には、本研究における吹雪時の視程推定のロジックに関しての改善すべき点について議論いただきました。（財）日本気象協会の佐藤隆光博士、加賀谷英和氏、岡村智明氏には、吹雪の広域情報提供実験のシステム開発と試験運用を、小林利章氏、丹治和博氏、西村満氏らには、飛雪流量観測に関してご協力いただきました。また、この他、多くの方々のご協力に支えられて論文をまとめることが出来ました。これらの皆様に対して深く感謝申し上げます。

また、北海道開発局道路計画課の西村泰弘課長（前北海道開発土木研究所道路部長）におかれましては、指導教官を捜していた小生に佐藤教授をご紹介いただいた上、北海道開発土木研究所から異動になった後も、事あるたびに励ましをいただきました。ここに合わせて感謝申し上げます。

最後に、私事になりますが、陰ながら支えてくれた家族に感謝します。

平成 18 年 3 月

編集委員会

委員長

川村和幸

委員

相馬和則

浅野基樹

Executive Editorial Board

Editor-in-Chief : Kazuyuki KAWAMURA

Editor Kazunori SOUMA Motoki ASANO

平成18年5月31日発行

独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所

〒062-8602

札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号

TEL 011-841-1636

FAX 011-824-1226

印刷所 有限会社 遠藤青写真工業所

〒062-0905

札幌市豊平区豊平5条10丁目 遠藤豊平ビル

TEL 011-816-3911

FAX 011-816-3912

「北海道開発土木研究所報告」(ISSN:1346-9967)は、2006年5月第126号より「寒地土木研究所報告」(ISSN:1881-0489)に改題・ISSNの変更を致しました。

REPORT
OF
CIVIL ENGINEERING RESEARCH INSTITUTE
FOR COLD REGION

126

CONTENT

The Development and Use of a Method for Estimating Visibility during Snowstorm

by Masaru MATSUZAWA

May. 2006

PUBLIC WORKS RESEARCH INSTITUTE
CIVIL ENGINEERING RESEARCH INSTITUTE FOR COLD REGION