

風速と降雪強度から吹雪時の視程を推定する手法について

Estimating Visibility in Blowing Snow by Wind Velocity and Snowfall Intensity

松沢 勝* 加治屋安彦** 竹内 政夫***

Masaru MATSUZAWA, Yasuhiko KAJIYA and Masao TAKEUCHI

吹雪による視程障害の発生状況に関する情報は、ドライバーが安全かつ適切な経路選択を行う上で有効である。道路における視程障害の監視には、視程計が用いられているが、設置個所は一部の箇所に限られており、広域的な吹雪の発生状況を把握するには不十分である。そこで、比較的容易に得られる風速や降雪強度から、視程障害の程度を推定する手法を検討した。最初に、飛雪流量 (Mf) と視程 (Vis) に関する過去の研究より、視程が3000m以下のデータから両者には $\log(\text{Vis}) = -0.773 \cdot \log(\text{Mf}) + 2.845$ なる関係式が成り立つことを示した。飛雪流量は飛雪濃度と風速の積であることから、次に、飛雪濃度を求める方法を検討した。ここでは、高い地吹雪が発生する気象条件と、高い地吹雪を伴わない降雪時という気象条件に分けて、風速と降雪強度から飛雪濃度を推定する方法を示した。これらの式を用いた視程の推定結果と実測値とを比較したところ、いずれの気象条件においても視程が1000m以下の範囲では、両者は比較的良く一致した。このことは、この視程推定手法が、道路における視程障害の広域監視に十分有効であることを示すものである。

強い風によって地上高く吹雪粒子が巻き上がる地吹雪。しばしば、目の高さの水平視程を悪くする。吹雪粒子が地を這うような低い地吹雪 (目の高さでの水平視程を悪くすることはない) と区別して使う。

キーワード：視程、吹雪、道路管理、道路気象情報

Provision of real-time information on the distribution of poor visibility caused by blowing snow will enable drivers to select safer routes. Visibility meters currently are used to monitor poor visibility on roads. However, too few of such devices are installed to adequately monitor the regional distribution of blowing snow. This has led us to seek estimation methods for the degree of poor visibility based on wind velocity and snowfall intensity, data that are available relatively easily. First, based on findings of past studies on mass flux of snow (Mf) and visibility (Vis) we established that $\log(\text{Vis}) = -0.773 \cdot \log(\text{Mf}) + 2.845$ when the visibility is 3000m or less. We then attempted to establish methods to obtain snow concentration based on the fact that mass flux of snow is snow concentration multiplied by wind velocity. For this, we used two specific scenarios in order to estimate snow concentration based on wind velocity and snowfall intensity: the case in which the suspended snow was observed; and the case in which the falling snow without suspended snow was observed. The visibility estimated by our formulae corresponded fairly well to measured values, which indicates that our visibility estimation method can be used for regional monitoring of poor visibility on roads.

Keywords : Visibility, Blowing snow, Road management, Road and weather information

1. はじめに

道路交通はドライバーの視覚情報を基に成り立っている。視覚情報の確保は交通の安全に不可欠であるが、積雪寒冷地では降雪や吹雪による視程障害の形で視覚情報が阻害され、最悪の場合には通行が不能になる。また、視程障害を誘因とする交通事故は多発・大型化の傾向にある。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。最近でも、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ている。いずれのケースも吹雪で視程の低下している状態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、北海道北部の様な吹雪常襲地や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。このような状況の中で吹雪災害を防ぎ、冬期道路交通安全を確保することは、今まで以上に重要な課題となっている。

2. 視程障害対策に関するこれまでの研究

従来からの視程障害対策としては、防雪柵、防雪林、視線誘導施設（デリネータ、矢羽型視線誘導標）などがあげられる。竹内¹⁾は、石狩町（現在は石狩市）の一般国道337号の防雪柵設置区間で調査を行い、防雪柵の視程障害緩和効果を示した。さらに、岩見沢市の一般国道12号に設置した防雪林の周りで視程を計測し、防雪林が視程の変動を緩和することを示した。また、石本²⁾は、道路防雪林の視程障害緩和効果について定量的な調査結果を示すとともに、視線誘導樹の有効性について示している。

さらに、最近では、ITS（高度道路交通システム）の取り組みの中で、情報通信技術を活用した視程障害対策の研究が進められている。松沢ら³⁾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、ミリ波レーダで停止車両を検知し、後続車に対して自発光視線誘導標で発光警告を行う、寒冷地走行支援道路システムの開発を行っている。

さらに、インターネットの普及で、広くドライバーに情報を提供することが可能になったことで、これらのハード的な対策に加えて、ソフト的な対策に関する研究も進められている。特に、道路の状況をドライバーに提供することによって、激しい吹雪の発生している

路線の迂回を促進するなどのソフト的な対応が可能であることが明らかになってきた⁴⁾。

このため、面的な吹雪の発生状況をリアルタイムに把握し、ドライバーに迅速に提供すること、さらに吹雪の発生予測は、冬期道路交通安全性を確保する上で極めて重要となってきている。

本研究では、面的な気象データの得られやすい風速及び降雪強度から視程値を推定する手法について検討を行い、数値計算を行った結果を報告する。

3. 研究の目的

道路における吹雪による視程障害の監視には、視程計が用いられているが、設置箇所は一部の箇所に限られており、広域的に吹雪の発生状況を把握するには不十分である。一方、吹雪の強さは、風速や降雪強度と関係が深い。風速や、降雪強度は、アメダスや気象レーダによって比較的容易に面的なデータを得ることができる。また、冬期の道路交通安全を目的とする場合、視程値はメートル単位の精度は必要なく、100m未満、100～200m、200～500m、500～1000m、1000m以上、の5段階程度の吹雪の強弱がわかれば、実用的には十分である。すなわち、直接、視程を測定できなくても、風速や降雪強度のような比較的入手しやすい気象値から、吹雪による視程障害の程度を推測することが可能であれば、吹雪の広域モニタリングと、吹雪情報の適切な提供によって、冬期交通の安全性の向上を図ることができると考えられる。

本研究は、風速や降雪強度など、比較的容易に得られやすい気象値から視程を推定する手法を明らかにし、吹雪による視程障害の面的把握や、将来的な吹雪による視程障害の予測に資することを目的にしたものである。

4. 浮遊層における視程の推定方法に関する検討

吹雪粒子の主な運動形態には、図1の様に転動、跳躍、浮遊の3種類ある⁵⁾。転動と跳躍との違いは、雪粒子が積雪表面から離れる瞬間の有無で、実際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し得る。また、跳躍は、0.01～0.1mの高さで卓越する。この層を跳躍層と呼び、Bagnold⁶⁾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、跳躍粒子が浮遊粒子に転化する。浮遊による吹雪粒子が卓越する層を浮遊層と呼び、塩谷⁷⁾に始まる乱流拡散理論が適用される。

道路構造令⁸⁾によると道路における視程は小型車を運転するドライバーの視点の高さである1.2mが一つの基準になるので、特に断らない限り、本報で論ずる吹雪粒子は浮遊層におけるものとする。

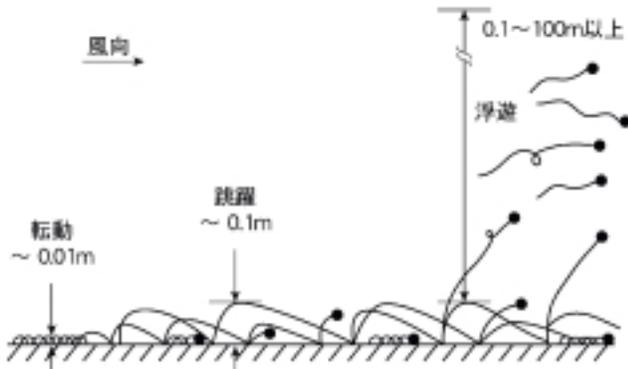


図1 吹雪の運動形態⁵⁾

4.1 視程と飛雪流量との関係

吹雪の強さを表す物理量として、飛雪濃度 N (単位体積空間に存在する雪粒子の質量) と飛雪流量 Mf (単位時間に単位面積を通過する雪粒子の質量) とがある。この両者の間には、風速を V とすると次の関係が成り立つ。

$$Mf = N \cdot V \quad (1)$$

一方、視程 Vis と飛雪流量 Mf との関係は、Mellor⁹⁾ による無風時の降雪、斉藤¹⁰⁾ による季節風下での降雪、Buddら¹¹⁾ による南極の吹雪、そして竹内ら¹²⁾ による北海道での降雪を伴う吹雪時において研究が行われている。竹内・福沢¹³⁾ は、これらの結果を整理して、視程と飛雪流量の関係を明らかにした(図2)。この両対数グラフにおいて視程3000m以下のデータを用いて直線近似を行った結果、視程 Vis と飛雪流量 Mf の関係を表す次の式が得られた。視程3000mを越えると、実測値が近似直線から外れてくるが、道路交通に影響を与える視程という観点では、視程1000m以下に着目すれば良いので、視程3000m以下の近似で十分である。

$$\log(Vis) = -0.773 \cdot \log(Mf) + 2.845 \quad (2)$$

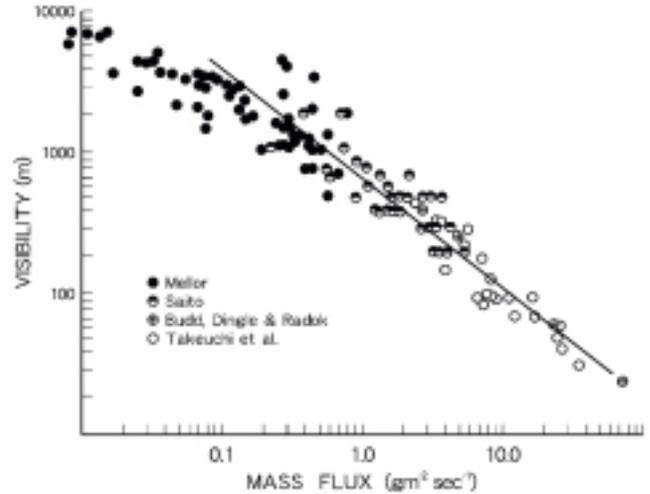


図2 視程と飛雪流量の関係¹³⁾ (両対数のグラフで、両者は直線近似できる)

4.2 飛雪濃度の垂直分布式

(1) 式と (2) 式から、視程を求めるためには、飛雪濃度 N と風速 V を与えれば良いことがわかる。風速は実測することが容易であるが、飛雪濃度の実測は容易でない。そこで、次に実測可能な気象値を用いて飛雪濃度を求める手法について検討する。

浮遊層における飛雪濃度は、乱流拡散の方程式を解くことによって表すことができる。 Z 軸を上向きにとり、 K を雪粒子の乱流拡散係数 ($= kU_*^2$)、 w を雪粒子の落下速度 (= 定数)、降雪強度を P とすると、任意の高さ Z での飛雪濃度 $N(Z)$ は

$$N(Z) = \frac{P}{w} + \left(N_t - \frac{P}{w} \right) \left(\frac{Z}{Z_t} \right)^{-\frac{w}{kU_*^2}} \quad (3)$$

とあらわすことができる¹⁴⁾。ここで、 N_t は、基準高度 Z_t での飛雪濃度、 k はカルマン定数 (通常は0.4とする)、 U_* は摩擦速度である。(3) 式の第1項 P/w は、降雪を起源とする雪粒子 (以下、降雪粒子と呼ぶ) の飛雪濃度と見なすことができる。従って $P = 0$ のとき (3) 式は、降雪を伴わない吹雪時の飛雪濃度の垂直分布式 (塩谷の式⁷⁾) に一致する。また、 $(N_t - P/w)$ は、 Z_t での飛雪濃度 N_t から降雪粒子の飛雪濃度を除いたもの、すなわち高さ Z_t における地吹雪を起源とする雪粒子 (以下、浮遊粒子と呼ぶ) の濃度と言える。このことから、(3) 式の第2項は、浮遊粒子の飛雪濃度と見なすことができる。

(3) 式では、 w は一定とおいたが、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入すると考えられる。

そこで、次のような降雪を伴う吹雪のモデルを考える。任意の高さ Z において、降雪粒子の落下速度を w_f 、浮遊粒子の落下速度を w_b とし、降雪粒子と浮遊粒子が独立して存在すると仮定する。このとき、(3) 式は、次のように書き換えられる。

$$N(Z) = \frac{P}{w_f} + \left(N_t - \frac{P}{w_f} \right) \left(\frac{Z}{Z_t} \right)^{-\frac{w_b}{kU_*}} \quad (4)$$

4.3 視程値の推定手法

(4) 式において、降雪強度 P は、気象レーダや地上観測で、比較的容易に実測値が得られる。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_* 、 Z_t での飛雪濃度 N_t であり、どれもリアルタイムで直接計測を行って実測値を得るのは容易でない。本研究の目的は、“容易に得られやすい” 気象値から視程を推定する手法を求めることにあるので、これらは、既存の研究に基づき適当と考えられる値を定めることにする。

4.3.1 雪粒子の落下速度

浮遊粒子の落下速度については、Budd¹⁵⁾による、南極における雪粒子の落下速度を測定結果から、 $w_b = 0.35 \text{ m/s}$ とすることとした。

一方、降雪粒子の落下速度に関しては、石坂¹⁶⁾の詳しい研究により、ここでは雲粒の付着が少ない雪片の観測値から $w_f = 1.2 \text{ m/s}$ を採用した。

4.3.2 摩擦速度

摩擦速度 U_* は、表面粗度 Z_0 と深い関係があることは良く知られている。この両者は、平均風速の垂直分布式の中で次のように表現される。

$$V_z = \frac{U_*}{k} \ln \left(\frac{Z}{Z_0} \right) \quad (5)$$

ここで、 V_z は、任意の高さ Z での風速である。西尾・石田¹⁷⁾は、札幌で観測した高さ 1 m での風速と摩擦速度の関係をプロットし、地吹雪時には、ほぼ $Z_0 = 1.5 \times 10^{-4} \text{ (m)}$ なることを示した。粗度定数にこ

の値を用い、カルマン定数 $k=0.4$ 、高さ 10 m の風速の値 V_{10} を用いて(5) 式を変形すると摩擦速度は次の式で与えることができる。

$$U_* = 0.036 \cdot V_{10} \quad (6)$$

4.3.3 基準高度での飛雪濃度

次に基準高度 Z_t と、 Z_t での飛雪濃度 N_t について検討する。

(4) 式は浮遊層で成り立つ式なので、 Z_t は浮遊層の中に定める必要がある。竹内¹⁸⁾によると、跳躍層の高さは、米国での雪面上で $0.08 \sim 0.13 \text{ m}$ 、湖氷上で $0.09 \sim 0.15 \text{ m}$ 、北海道で、 $0.07 \sim 0.09 \text{ m}$ である。 Z_t が浮遊層から外れない範囲で、かつ跳躍層に近い値をとるように考え、ここでは、基準高度 Z_t を 0.15 m とする。

次に Z_t における飛雪濃度 N_t について検討する。竹内¹²⁾の石狩での測定例(図3)によると、高さ 0.15 m での飛雪濃度の値はほぼ $0.1 \sim 10 \text{ g/m}^3$ である。また、竹内¹⁸⁾のワイオミングでの測定例(図4)では、高さ 0.15 m での飛雪濃度の値は $1 \sim 30 \text{ g/m}^3$ となっている。

実際の道路管理では、吹雪が発生した場合には、視程がもっとも悪くなるケースを想定して、道路管理の用意を整え、ドライバーへの注意喚起を行うのが現実的と考えられる。従って、吹雪の発生条件を満たす気象条件においては、 N_t として十分大きな値をとって視程値の計算を行えば、実用的には十分有効であると考えられる。これらの理由から、ここでは、 $N_t = 30 \text{ g/m}^3$ として計算を行うこととする。

以上で定めた w_f 、 w_b 、 N_t 、 U_* と、降雪強度 P として適当と考えられる値を(4) 式に与えることで、任意の高さ Z での飛雪濃度を求めることができる。この飛雪濃度と同じ高さにおける風速を(1) 式に代入することで飛雪流量が求められ、さらに、その値を(2) 式に代入することで視程を導くことができる。

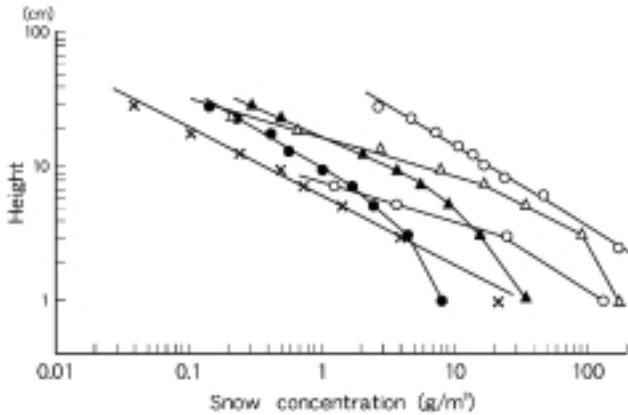


図3 石狩での飛雪濃度の垂直分布¹²⁾

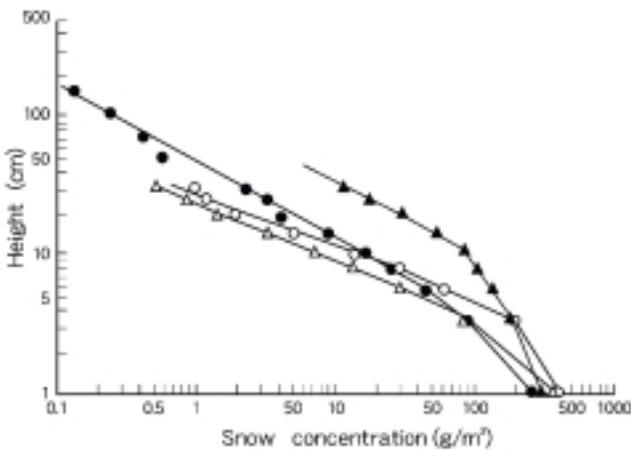


図4 ワイオミングでの飛雪濃度の垂直分布¹⁸⁾

4.4 適用条件

ここでは、前節で求めた視程の推定手法の適用条件について整理する。

(4)式は浮遊層で成り立つ式であるから、この推定手法は、浮遊層を持つ吹雪(高い地吹雪を伴う吹雪)に適用できる。高い地吹雪では、しばしばドライバーの目の高さに飛雪が舞い上がる。これに降雪が加わると、視程は急激に低下し、しばしば交通障害を発生させる。

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¹⁹⁾の研究(図5)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 (°C) と高さ7mでの風速 V_7 (m/s) を用いて、次のように整理される。

$T < -2$ の場合 $V_7 > 8.5$ m/s

$T > -2$ の場合 $V_7 > 8.5 + (1 + 0.5T)$ m/s

一方、低い地吹雪のみの場合で、路側の雪堤が低い状態では、ドライバーの目の高さに飛雪が舞い上がることはない。しかし、このような場合でも、降雪を伴うことで、視程が悪くなることもある。この場合は、

跳躍層の高さより上での飛雪濃度は、降雪成分((4)式の第1項)のみを考慮すれば良いと考えられる。

なお、以降の計算においては、高さ7mでの風速を用いるべきであるが、気象庁等の気象観測所では、通常10mの高さで風速を測定している。高さ10mでの風速と、高さ7m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、以下では、特に断らない限り、風速は10mの高さでの値とする。

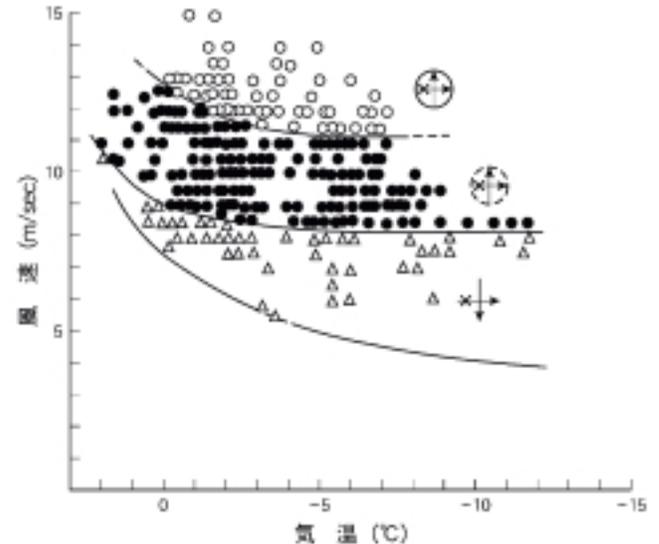


図5 地吹雪の発生臨界風速と気温¹⁹⁾(●:連続的に高い地吹雪が発生する。▲:断続的に高い地吹雪が発生する。×:低い地吹雪が発生する。)

5. 数値計算と妥当性の検討

5.1 高い地吹雪を伴う場合

ここでの計算において、降雪強度は、0 mm/h、0.5 mm/h、1.0 mm/h、2.0 mm/h、5.0 mm/h の5ケースとし、風速を、8.5 m/s、12.5 m/s、17 m/s、21 m/s、25 m/s と変化させた。

また、計算手法の妥当性検討のために、北海道開発土木研究所の石狩吹雪実験場で測定した視程の実測値と、計算結果の比較を行うこととした。視程は透過型視程計によって計測しており、投受光部の高さは2.0 mである。データを採用した期間の積雪が、ほぼ0.4 mであったことから、積雪表面からの投受光部の高さは1.6 mとなる。従って、数値計算も高さ1.6 mで行った。

比較を行う実測データは、2000年12月22日03:00~04:00で、風速と視程の1分平均値である。この期間の1分平均風速は、8.4 m/s~15.4 m/sで、気温は-5.7~-6.4°Cであった。現地に設置した雨雪量計に降

水は記録されなかったが、21日の15時の積雪が38cm、22日9時の積雪が43cmであった。積雪を測定している場所の周囲は開けており、吹き溜まりによって積雪深が増加したとは考えにくい。このことから、強い風で捕捉率が悪くなったため、雨雪量計では観測できなかったものの断続的な降雪があったと考えられる。

この期間の風速と視程の実測値を散布図に示したグラフに、先の条件で求めた視程の計算値のグラフを重ねた(図6)。グラフより、0.0~1.0mm/hの降雪強度を考えると、計算値が現象をうまく説明できる。さらに、降雪強度が0.5mm/hの場合の計算値と実測値を比較したところ、両者の相関係数は0.55となった(図7)。先にも述べたように、吹雪情報としては5段階程度の吹雪の強弱が把握できればよいので、今回求めた計算手法で得られる視程値の精度は、実用的には十分と考えられる。

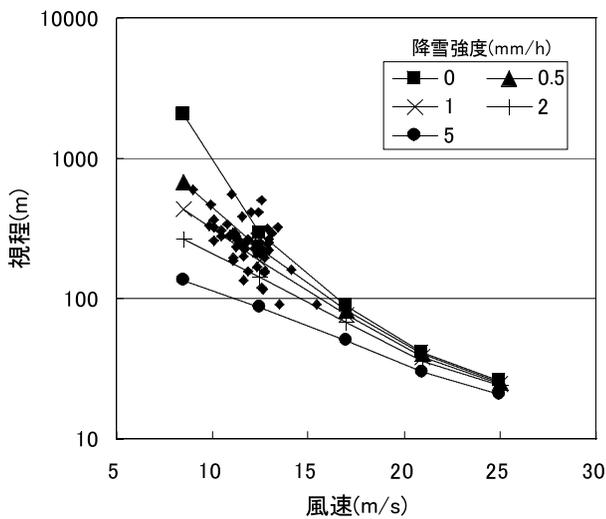


図6 高さ1.6mにおける視程の計算値と実測値の比較 (: 2000年12月22日03:00~04:00の実測値。 : 降雪強度 = 0 mm/h。 : 降雪強度 = 0.5 mm/h。 × : 降雪強度 = 1 mm/h。 + : 降雪強度 = 2 mm/h。 : 降雪強度 = 5 mm/h の場合の計算値)

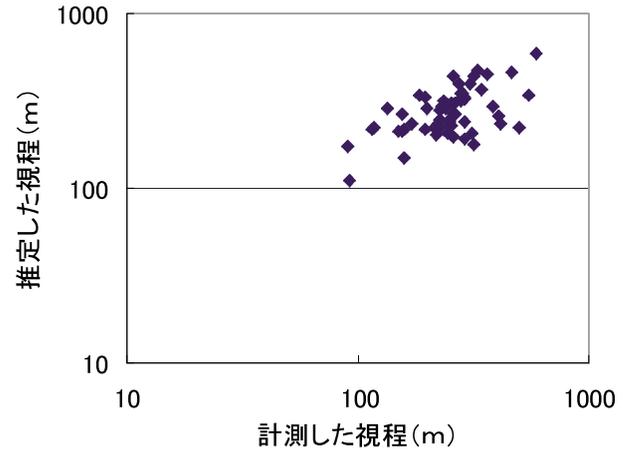


図7 降雪強度を0.5mm/hと仮定して計算した視程と実測値との比較

5.2 高い地吹雪を伴わない場合

5.2.1 数値計算結果

図5によると、以下の条件では、高い地吹雪は発生しない。しかし、このような条件でも、激しい降雪によって、視程障害が発生することがある。なお、 $T > 2$ の場合は、雨になる場合が多いので除外した。

$T = -2$ の場合 $V_7 < 8.5 \text{ m/s}$

$T > -2$ の場合 $V_7 < 8.5 + (1 + 0.5T) \text{ m/s}$

そこで、上記の条件では、降雪成分のみの計算を行うこととする。ここでは、降雪強度が、0.1mm/h、1mm/h、5mm/hの3ケースで、風速を0m/s、2m/s、4m/s、6m/s、8.4m/sと変化させて計算を行った。

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¹⁾。風速が8.5m/s以上の場合、雪粒子の運動速度は、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、風速に対する降雪粒子の落下速度が無視できなくなるので、飛雪流量 M_f を計算する際には(1)式では無く、以下の式を用いる方が適切と考えられる。

$$M_f = N \cdot \sqrt{V^2 + w_f^2} \quad (7)$$

図8は、その計算結果である。降雪のみの場合は、降雪強度が5mm/hという極めて強い降雪の場合でも、視程が100m以下になることは無い。しかし、風速が8.4m/sのケースでは、視程は200mを切っており、降雪だけでもかなり視程を悪くすることが示されている。

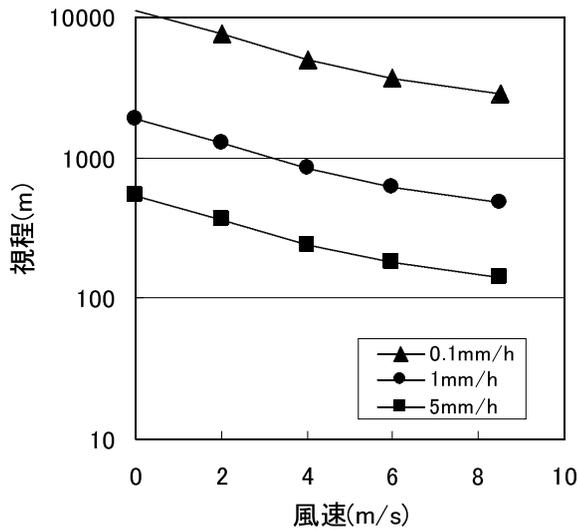


図8 降雪成分のみの場合における視程の計算値
 (▲ : 降雪強度 = 0.1mm/h、● : 降雪強度 = 1 mm/h、
 ■ : 降雪強度 5 mm/h の条件で、風速を 0 m/s、
 2 m/s、4 m/s、6 m/s、8.4 m/s と変化させた)

5.2.2 妥当性の検討

数値計算で得られた結果を、無風時の降雪時に視程を測定した Mellor⁹⁾と、季節風下での視程を測定した 斉藤¹⁰⁾の結果と比較し、この視程推定手法が、風速が 8.5 m/s 未満の場合に適用できるかを検討した。

斉藤¹⁰⁾は、Mellor⁹⁾と斉藤¹⁰⁾の視程の測定結果から、視程と降雪の強さとの関係を表す式を導いた。これを Vis (m) と P (mm/h) を用いて書き換えると次の式が得られる。

$$\text{斉藤: } Vis = 1150 \cdot \left(\frac{5}{3}P\right)^{-0.76} \quad (8)$$

$$\text{Mellor: } Vis = 2170 \cdot \left(\frac{5}{3}P\right)^{-0.421} \quad (9)$$

実測値から求められた上の2つの式を、降雪強度と視程の両対数グラフで表したものに、5.2.1で求めた計算結果から表されるグラフを重ねると図9になる。

図9より、今回の手法で求めた視程は、斉藤¹⁰⁾の実測例と、風速が 4 m/s 強で、ほぼ一致することがわかった。斉藤¹⁰⁾は視程観測時における風速について記していないが、季節風下での降雪と記されているので、この風速は妥当なものといえる。一方 Mellor⁹⁾の実測例とはうまく一致しないが、これは Mellor⁹⁾の実測例では、視程1000m以上のデータが多く含まれているためと考えられる。

最初に断っているように、道路交通を考えた場合、視程が1000m以下の場合に着目すれば良いので、この不一致は無視することとする。

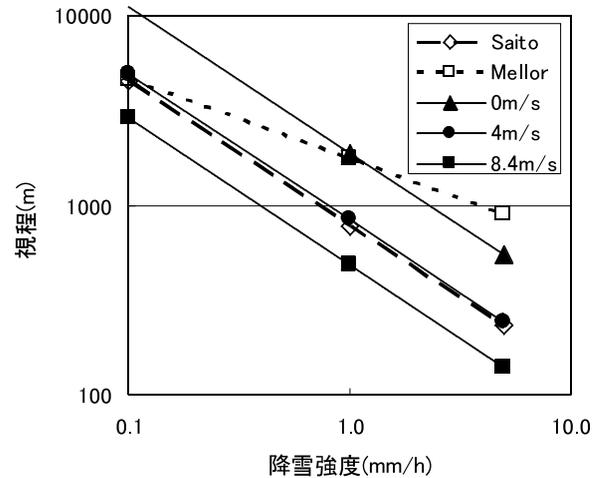


図9 風速が8.5 m/s 未満の場合の降雪強度と視程の関係
 [○ : 斉藤¹⁰⁾が、自らの実測値から求めた式に基づく計算値。
 □ : 斉藤¹⁰⁾が Mellor⁹⁾の実測値から求めた式に基づく計算値。
 ▲ : 本研究で求めた式に基づく計算値 (風速 = 0 m/s)、
 ● : 本研究で求めた式に基づく計算値 (風速 = 4 m/s)、
 ■ : 本研究で求めた式に基づく計算値 (風速 = 8.4 m/s)]

6. まとめ

冬期道路管理において問題となっている吹雪による視程障害を広域的に把握するため、比較的観測しやすい気象データを用いた視程の推定手法を開発し、その適用性について検討した。

まず、高い地吹雪が発生する気象条件での視程の推定値を、透過型視程計による実測値とを比較したところ、両者は比較的良く一致することが明らかになった。

さらに、高い地吹雪を伴わない降雪時における視程の推定値を、斉藤¹⁰⁾の実測値に基づく関係式と比較した結果、視程の推定値は実測値と良い一致を示した。

これらの結果から、降雪強度と風速から視程を推定する手法は、実際の吹雪現象に対して、おおむね妥当な視程値を与えることがわかった。

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。(例えば、気象庁の「数値予報格子点値」など)。今回の手法に対して、これらのデータを用いることで、吹雪による視程障害の総観的な予測も可能となり、本手法の実用面での利用が期待できる。

一方、実際の道路における局所的な吹雪現象については、地形や防雪対策の有無など、道路周辺の状況に影響を受ける。さらに、ドライバーの視点の高さによる視程の違いも含めて、今後、研究を進める予定である。

参 考 文 献

- 1) 竹内政夫, 1980: 吹雪時の視程に関する研究, 土木試験所報告, 74, 31p.
- 2) 石本敬志, 1995: 雪粒子による視程変動の研究, 開発土木研究所報告, 107, 57p.
- 3) 松沢勝, 金子学, 加治屋安彦, 2002: 寒冷地 AHS のユーザ受容性にかかる基礎的検討(第1報), 北海道開発土木研究所月報, 585, 9 - 18.
- 4) 加治屋安彦・千葉隆広・熊澤義昇・石塚健司, 1997: インターネットを活用した道路情報提供 - 96/97冬期の峠画像伝送実験報告 -, 第17回交通工学研究発表会論文報告集, 181 - 184.
- 5) 竹内政夫, 1984: 吹雪と吹きだまりの発生機構, 鉄道土木, 26, 12, 41 - 44.
- 6) Bagnold R. A. ,1941: The Physics of Blown Sand and Desert Dunes. Methuen and Co.LTD, 265pp.
- 7) 塩谷正雄, 1953: 吹雪密度の垂直分布にたいする一考察, 雪氷, 15, 6 - 9.
- 8) 社団法人日本道路協会, 1983: 道路構造令の解説と運用, 丸善, 521p.
- 9) Mellor M., 1966, Light scattering and particle aggregation in snow storm, J. Glaciology ,6 ,No 44, 237 - 248 .
- 10) 斉藤博英, 1971: 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 .
- 11) Budd W. F., Dingle W. R. and Radok U., 1966 : The Byrd snow drift project: Outline and basic results, Meteorology Department, Publication No.7, 23p.
- 12) 竹内政夫・石本敬志・野原他喜男, 1975: 吹雪量と飛雪量垂直分布, 雪氷, 37, 3, 8 - 15 .
- 13) 竹内政夫・福沢義文, 1976: 吹雪時における光の減衰と視程, 雪氷, 38, 165 - 170 .
- 14) 竹内政夫・松沢勝, 1991: 吹雪粒子の運動と垂直分布. 雪氷, 53, 309 - 315 .
- 15) Budd W. F., 1964: Turbulent Transport of Non Uniform Snow Particles, University of Melbourne A. G. U. Antarct. Res. Ser., 9, 51 - 134 .
- 16) 石坂雅昭, 1995: 雲粒付き雪片の落下速度について, 雪氷, 57, 229 - 238 .
- 17) 西尾文彦・石田完, 1973: 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 .
- 18) 竹内政夫, 1981: 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 .
- 19) 竹内政夫・石本敬志・野原他喜男・福沢義文, 1986: 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 .



松沢 勝*

北海道開発土木研究所
道路部
防災雪氷研究室
主任研究員



加治屋安彦**

北海道開発土木研究所
道路部
防災雪氷研究室
室長



竹内 政夫***

(財)日本気象協会北海道
支社
調査役