

## 飛雪流量の推定モデルを用いた吹雪量と視程との関係

### Relation between snow transport rate and visibility using the estimation model on mass flux of snow

松澤 勝<sup>1</sup>

Masaru Matsuzawa<sup>1</sup>

Corresponding author: masaru@ceri.go.jp (M. Matsuzawa)

吹雪量は吹雪の強さを示す基本となる指標であるが、その値から、具体的な吹雪の強さをイメージしづらい。そのため、道路管理等の実務者向けには、理解しやすい値への変換が必要と考えられる。そこで、感覚的に吹雪の強さをイメージしやすい視程で表現する方法を検討した。飛雪流量の推定モデルを用いて高さ 7 m までの吹雪量を算出し、視程と飛雪流量の経験式を用いて推定した高さ 1.2 m の視程と比較し、両者の関係式を得た。この関係式を用いて推定した視程の値は、概ね妥当であることが示された。

#### 1. はじめに

吹雪量は、風向に直角な単位幅を単位時間に通過する吹雪粒子の質量であり、吹雪の強さを示す指標として、基本となるものである。大宮ら<sup>1)</sup>は、2013 年 3 月の北海道東部に大きな被害を与えた暴風雪などを対象に、累計吹雪量や時間吹雪量が国道の通行止めに与える影響を示した。しかし、風や降雪の強さを示す風速や降雪量と異なり、吹雪量の値から吹雪の強さをイメージするのは難しい。そのため、吹雪防災に携わる実務者向けには、理解しやすい値への変換が必要と考えられる。

飛雪流量は、風向に直角な単位断面積を単位時間に通過する吹雪粒子の質量であり、鉛直方向に積分した値が吹雪量になる。また、飛雪流量は視程と密接な関係があり、既往研究<sup>2)3)4)</sup>で、飛雪流量と視程との経験式が得られている。

本研究は、道路管理等の吹雪防災の実務者が、吹雪量から吹雪の強さを簡易に把握できるようにすることを目的とする。この目的の下、飛雪流量の推定モデルを用いて吹雪量と視程値を算出し、両者の関係を分析した。

#### 2. 研究の方法

##### 2.1 飛雪流量の推定モデル

浮遊層(吹雪粒子が浮遊運動によって輸送される領域)において、飛雪流量は、飛雪空間密度と風速の積で表すことができる。ここで飛雪空間密度は単位空間に存在する吹雪粒子の質量である。

松澤<sup>5)</sup>は、松沢・竹内<sup>3)</sup>の飛雪空間密度の鉛直分布式と風速の鉛直分布式の積を取ることで、任

意の高さ  $z$  における飛雪流量  $q(z)$  ( $\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) の鉛直分布式(式(1))を導いた。

$$q(z) = \frac{Pu_*}{kw_f} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \cdot \left(N_t - \frac{P}{w_f}\right) \left(\frac{z}{z_1}\right)^{-\frac{w_b}{ku_*}} \quad \dots(1)$$

ここで、

$P$ : 降雪粒子の鉛直フラックス( $\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )

$u_*$ : 摩擦速度( $\text{m s}^{-1}$ )

$z_0$ : 表面粗度 (m)

$z_1$ : 基準高さ(m)

$N_t$ : 基準高さ  $z_1$  での飛雪空間密度( $\text{g m}^{-3}$ )

$w_f$ : 降雪粒子の落下速度( $\text{m s}^{-1}$ )

$w_b$ : 浮遊粒子の落下速度( $\text{m s}^{-1}$ )

$k$ : カルマン定数(=0.4)

である。

本研究では、松澤<sup>5)</sup>や松澤<sup>6)</sup>を参考にして、式(1)に含まれるパラメータを以下のように与える。

$$P=0.278 P_h \text{ (mm h}^{-1}\text{)}$$

$$u_*=0.036 V_{10} \text{ (m)}$$

$$z_0=0.00015 \text{ (m)}$$

$$z_1=0.15 \text{ (m)}$$

$$N_t=0.021 \cdot \exp(0.401 \cdot V_{10}) \text{ (g m}^{-3}\text{)}$$

$$(P_h \leq 0.5 \text{ mm h}^{-1}) \quad \dots(2a)$$

$$=0.116 \cdot \exp(0.309 \cdot V_{10}) \text{ (g m}^{-3}\text{)}$$

$$(P_h > 0.5 \text{ mm h}^{-1}) \quad \dots(2b)$$

$$w_f=1.2 \text{ (m s}^{-1}\text{)}$$

$$w_b=0.031 V_{10}-0.15 \text{ (m s}^{-1}\text{)} \quad \dots(3)$$

ここで、

$V_{10}$ : 高さ 10 m の風速( $\text{m s}^{-1}$ )

<sup>1</sup> 土木研究所 寒地土木研究所

Civil Engineering Research Institute for Cold Region, Public Works Research Institute

$V_1$  : 高さ 1 m の風速( $m s^{-1}$ )

$P_h$  : 時間降水量( $mm h^{-1}$ )

である. なお  $w_b$  は風速の鉛直分布式を用いて,

$$w_b = 0.031 \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{1}{z_0}\right) - 0.15 \quad \dots (3')$$

とする.

以上の式と値を用いることで, 高さ 10 m の風速  $V_{10}$  と時間降水量  $P_h$  から任意の高さの飛雪流量  $q(z)$  を算出することができる.

## 2. 2 飛雪流量と視程の関係式

吹雪時の視程と飛雪流量は関係が深く, 竹内・福沢<sup>2)</sup>や, 松沢・竹内<sup>3)</sup>が, 視程と飛雪流量との実験式を示している. 武知ら<sup>4)</sup>は, 一般市民を被験者とした実験を行い, 既往研究のデータに加えて分析し, 実験式(式(4))を得た. 本研究では式(4)を用いて, 任意の高さの飛雪流量  $q(z)$  から視程  $Vis(z)$  を求める. なお, 本研究では, 道路構造令に示される小型車のドライバーの目線高さである高さ  $z = 1.2 m$  での視程を求める.

$$Vis(z) = 10^{-0.886 \log(q(z)) + 2.648} \quad \dots (4)$$

## 2. 3 飛雪流量を用いた吹雪量の推定方法

吹雪量は飛雪流量を鉛直方向に積分した値であり, 降雪がある場合, 積分の上端を定めないと値が無限になる不都合が生じる. このため, 本研究では, 演算対象の上限の高さを 7 m とする.

松澤<sup>5)</sup>は, 解析的に式(1)を高さ  $z$  で積分して, 浮遊層の吹雪量を求める式を示した. そして, 跳躍層の吹雪量を Kobayashi<sup>7)</sup>の実験式より算出し, 両者の和を取ることで全層の吹雪量を求める方法を示した. しかし, 本研究では, 簡易さを優先し以下の式(5)より吹雪量  $Q$  ( $g m^{-1} s^{-1}$ ) を求める.

$$Q = \{q(0.1) + q(0.2) \dots + q(6.9) + q(7.0)\} \cdot 0.1 \quad \dots (5)$$

図 1 は, 式(5)で求められる吹雪量  $Q$  の模式図である. 高さ 0.5~6.7 m は省略しているが, 網掛けの部分の総和が吹雪量になる. ところで, 実際の飛雪流量の鉛直分布は連続であり図の実線のようになる. 従って, この手法の場合, 実際の吹雪量を過小評価することになる. これについては, 後で議論するが, 本研究は, 実務者が目安として吹雪量から吹雪の強さを把握する方法を提示することが目的なので, 厳密さを欠くが, 本章では, この手法を用いる.

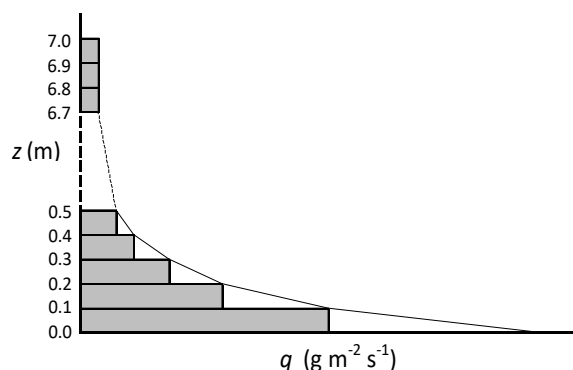


図 1 吹雪量  $Q$  算出の模式図. 図の網掛け部分の総和が吹雪量に相当する.

## 3. 計算結果

吹雪量の計算においては, 以下の値を式(1)~(3)に与えて飛雪流量を求め, 式(4)から視程を, 式(5)から吹雪量をそれぞれ算出した.

$$V_{10} = 7.5, 10.0, 12.5, 15.0, 17.5, 20.0 (m s^{-1})$$

$$P_h = 0.0, 1.0, 3.0, 5.0 (mm h^{-1})$$

図 2 は, 計算結果である. 時間降水量  $P_h$  によらず, 視程と吹雪量との間には, 一定の関係があり, 両対数のグラフで直線になることがわかる.

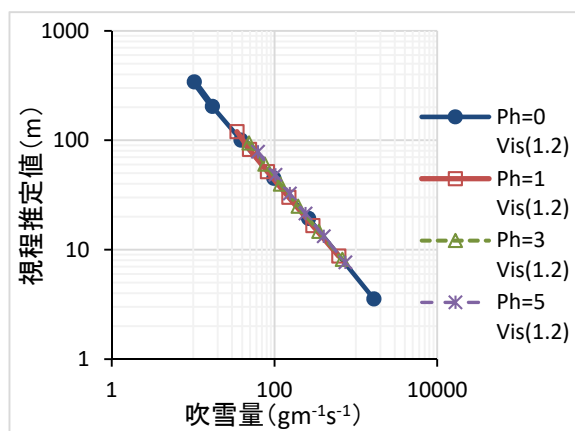


図 2 吹雪量と高さ 1.2 m の視程の推定値との関係.  $P_h$  は時間降水量( $mm h^{-1}$ ).

## 4. 跳躍層を考慮した吹雪量推定手法の改良検討

ところで, 2.3 節で断ったように, 上記の手法では, 吹雪量を過小評価する. 特に, 雪面近くの跳躍層での吹雪量の推定誤差が無視できない可能性がある. そこで, 雪面付近の吹雪量の推定に関して改良を検討する.

松澤ら<sup>8)</sup>は, 任意の高さの飛雪流量と雪面からその高さまでの吹雪量との関係を解析した. 雪面から高さ 0.1 m まではダンス型ネット式吹雪計を, 高さ 0.3, 0.5, 1.0 m では筒型吹雪計を用いて飛

雪流量の観測を行った。その計測値から吹雪量を推定し、任意の高さの飛雪流量と雪面からその高さまでの吹雪量を比較して、両者の関係式を求めた。その結果、雪面から高さ 0.5 m までの吹雪量  $Q_{0.5}$  と、高さ 0.5 m の飛雪流量  $q(0.5)$  との間、

$$Q_{0.5} = 1.68 q(0.5) \quad \dots(6)$$

なる関係式を得た。図 3 の網掛け部分が  $Q_{0.5}$  に相当する。図 1 に比べ、過小評価が改善されることがわかる。

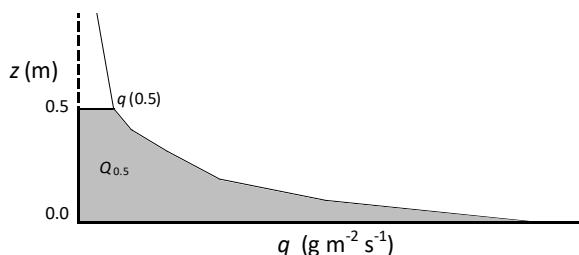


図 3 高さ 0.5 m の飛雪流量  $q(0.5)$  と高さ 0.5 m 以下の吹雪量  $Q_{0.5}$  の関係を示す模式図

そこで、高さ 0.5 m より上では、2.3 節で示した方法で吹雪量を求め、高さ 0.5 m 以下は、式(6)から吹雪量を求め、両者の和を取ることで、雪面から高さ 7 m までの吹雪量を算出する。以下では 2 章で示した吹雪量算出手法を手法 1、本章の手法を、手法 2 とする。

3 章と同じ計算条件を与えて  $V_{10}$  と  $P_h$  を変化させて計算した結果を図 4 に示す。演算で算出した全てのデータを対象にして、累乗式で回帰分析を行った結果、以下の関係式が得られた。

$$\text{手法 1 : } Vis(1.2) = 2224 \cdot Q^{-0.887} \quad \dots(7)$$

$$\text{手法 2 : } Vis(1.2) = 2695 \cdot Q^{-0.891} \quad \dots(8)$$

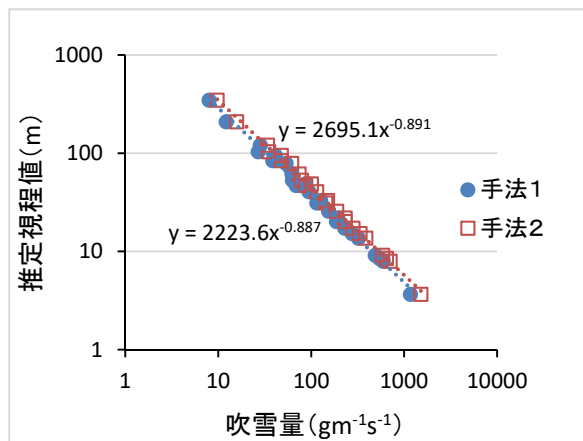


図 4 吹雪量と視程の推定値との関係。手法 1 と手法 2 による推定結果の比較。

図 4 より、手法 2 で得られる吹雪量は手法 1 より、やや大きい値となり、過小評価が改善されているものの、その差は小さいことがわかる。

### 5. 既往の吹雪量推定式との比較

次に、本研究の吹雪量の推定手法について、大宮ら<sup>9)</sup>の解析に用いた吹雪量の推定式<sup>9)</sup>と比較する。比較に当たっては、粗度を  $1.5 \times 10^{-4}$  m とし、高さ 10 m の風速に換算した式(9)を用いた。

$$Q = 1.37 \cdot P_h \cdot V_{10} + 0.000455 \cdot V_{10}^{4.6} \quad \dots(9)$$

結果を図 5 に示す。図 5 上、図 5 下はそれぞれ時間降水量  $P_h$  が  $0.0 \text{ (mm h}^{-1}\text{)}$ 、 $1.0 \text{ (mm h}^{-1}\text{)}$  での計算結果である。

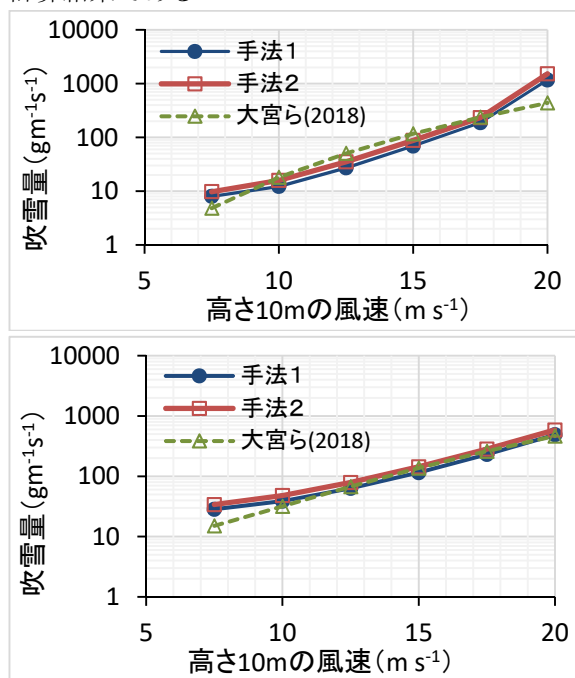


図 5 大宮ら<sup>9)</sup>の吹雪量推定手法と手法 1、手法 2 による吹雪量推定値と風速との関係 (上:  $P_h=0.0 \text{ mm h}^{-1}$ , 下:  $P_h=1.0 \text{ mm h}^{-1}$ )

図より、本研究の吹雪量推定手法は、大宮ら<sup>9)</sup>の推定式に近い計算結果となることがわかる。なお、風速が  $20 \text{ m s}^{-1}$  を超えると降雪の無い場合に乖離が生じている。これは式(2)や式(3)を得た際の観測に風速  $15 \text{ m s}^{-1}$  以上のデータが含まれておらず、風速の大きな条件下で、これら関係式の信頼性が低下していることが理由の一つである。

### 6. 時間吹雪量と時間平均視程との比較

大宮ら<sup>9)</sup>は、吹雪による通行止めが、時間吹雪量や累計吹雪量と関係があることを示した。図

6は、大宮ら<sup>9)</sup>による2013年3月2日の国道通行止めと時間吹雪量の関係を示した図から一部を抜粋したものである。赤線が通行止めを実施している区間である。ところで、式(7)、式(8)は、毎秒の吹雪量と視程の関係式である。そこで、時間吹雪量  $Q_h$  ( $\text{kg m}^{-1} \text{h}^{-1}$ ) に換算して、視程との関係について検討する。

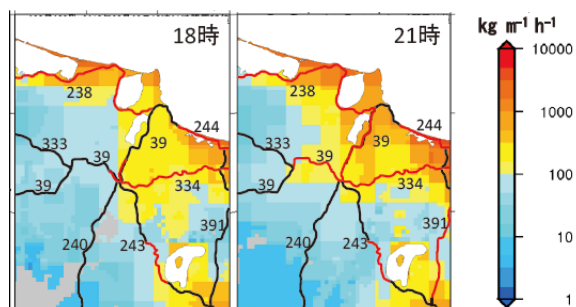


図6 2013年3月2日の国道通行止め実施路線(赤線で表示)と時間吹雪量の関係<sup>9)</sup>

ここでは、吹雪の変動を無視し、時間吹雪量  $Q_h$  ( $\text{kg m}^{-1} \text{h}^{-1}$ ) を3600で除した値を1秒あたりの吹雪量  $Q$  ( $\text{g m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) とする。次に、式(7)や式(8)を用いて1秒あたりの吹雪量  $Q$  ( $\text{g m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) から視程を求める。吹雪の変動は無視しているため、この値は時間平均視程  $\overline{Vis}(1.2)$  (m) と見なすことができる。図7は、時間吹雪量  $Q_h$  を3~3000 ( $\text{kg m}^{-1} \text{h}^{-1}$ ) まで変化させて、高さ1.2 mの時間平均視程  $\overline{Vis}(1.2)$  (m) を求めたものである。図より、式(10)、式(11)の回帰式が得られる。(  $Q = Q_h / 3.6$  として式(7)、式(8)を変換した式に等しい。)

$$\text{手法1: } \overline{Vis}(1.2) = 6928 \cdot Q_h^{-0.887} \quad \dots(10)$$

$$\text{手法2: } \overline{Vis}(1.2) = 8438 \cdot Q_h^{-0.891} \quad \dots(11)$$

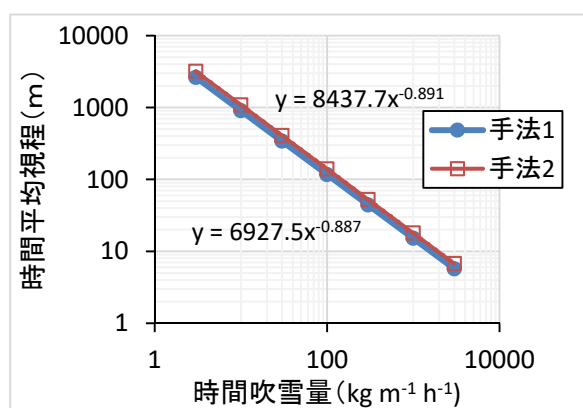


図7 時間吹雪量  $Q_h$  ( $\text{kg m}^{-1} \text{h}^{-1}$ ) と高さ1.2 mの1時間平均視程  $\overline{Vis}(1.2)$  (m) との関係。

図6より、時間吹雪量が100 ( $\text{kg m}^{-1} \text{h}^{-1}$ ) を超えると国道の通行止めが発生し、継続する傾向が見

られる。ここで、式(10)を用いると、時間吹雪量が100 ( $\text{kg m}^{-1} \text{h}^{-1}$ ) のときの平均視程は117 m、式(11)では平均視程は142 mとなる。実際の吹雪は変動が激しく、石本ら<sup>10)</sup>によると、平均視程290 mの時の無対策区間での視程変動強度は70%に達する。そのため、最低視程が100 mを下回る吹雪発生の可能性は高く、概ね妥当な結果と言える。

## 7. まとめと今後の課題

本研究において、吹雪量から視程を推定する手法を提示し、その計算結果の妥当性を確認することができた。

但し、本研究は机上での検討であるため、実測値の比較による検証が必要である。さらに、6章で、吹雪の変動を無視する仮定を置いたが、実際の吹雪の変動は大きく、視程の最低値など、実務上考慮すべき値が検討されていない。従って、今後、吹雪の変動を考慮した吹雪量と視程との関係についても検討する必要がある。

### 【参考文献】

- 1) 大宮ら, 2020: 「一回の暴風雪の厳しさ」の適切な評価に向けた取り組み—極端な暴風雪時における吹雪量と国道通行止めの関係解析—, 寒地土木研究所月報, **801**, 31-36.
- 2) 竹内・福沢, 1976: 吹雪時における光の減衰と視程. 雪氷, **38**, 165-170.
- 3) 松沢・竹内: 気象条件から視程を推定する手法の研究, 雪氷, **64**, 77-85.
- 4) 武知ら, 2009: 吹雪時に人間が感じる視程と視程計や吹雪計による計測値との関係, 北海道の雪氷, **28**, 17-20.
- 5) 松澤, 2016: 降雪を伴う吹雪時の吹雪量推定手法に関する研究, 雪氷, **78**, 255-268.
- 6) 松澤, 2007: 吹雪時の視程推定手法の改良に関する研究, 雪氷, **69**, 79-92.
- 7) Kobayashi, 1972: Studies of Snow Transport in Low-Level Drifting Snow, Contributions from the Institute of Low Temperature Science, **A24**, 1-58.
- 8) 松澤ら, 2017: 任意の高さの飛雪流量とその高さ以下の吹雪量の関係, 雪氷大会(十日町)講演要旨集, 280.
- 9) 大宮ら, 2018: 降雪時における吹雪量推定式の提案, 雪氷研究大会(札幌)講演要旨集, 273.
- 10) 石本ら, 1980: 道路防雪林による吹雪時の視程障害緩和効果, 土木試験所月報, **320**, 7-18.