

降雪を考慮した全層吹雪量の推定手法に関する研究

松澤 勝 (土木研究所寒地土木研究所)

1. はじめに

吹雪の危険度評価や吹雪対策計画策定のうえで、年累計吹雪量を把握することは重要である。吹雪量 Q と風速 V との関係式は、多くの研究者¹⁾²⁾³⁾によって得られており、年累計吹雪量は、吹雪量 Q を時間積分したものである。これらの関係式に基づき年累計吹雪量が推定されることが多い。しかし、既存の関係式は降雪項を持たず、風速の関数で表される。「雪氷辞典」⁴⁾によると吹雪は雪粒子が風によって空中を舞う現象であり、吹雪量は風向に直角な単位幅を単位時間に通過する雪の質量と定義される。従って、吹雪量全体を把握するためには、降雪成分と地吹雪成分両方を見積もる必要がある。そこで、本研究では降雪成分を考慮した吹雪量の推定手法について検討を行った。

2. 降雪を伴う吹雪時の吹雪量の推定手法

2. 1 推定のモデル

吹雪の運動形態はよく知られているように、転動、跳躍、浮遊の3種類ある。転動による雪の輸送量は小さいため、ここでは、跳躍と浮遊による輸送を考える。

はじめに浮遊層の吹雪量の推定手法について示す。吹雪の浮遊層では、飛雪流量 q ($\text{g/m}^2\text{s}$)は、飛雪空間密度 n (g/m^3)と風速 V (m/s)を用いて

$$q(z) = n(z) \cdot V(z) \quad \dots(1)$$

と表すことができる。吹雪量 Q は、飛雪流量 q を高さ方向に積分した値なので、浮遊層の吹雪量 Q_{sus} は(2)式で表される

$$Q_{sus}(z) = \int n(z) \cdot V(z) dz \quad \dots(2)$$

これらの式に、鉛直方向の風速分布を示す(3)式と降雪を伴う吹雪時の飛雪空間密度の鉛直分布を表す(4)式⁵⁾を代入して積分することで、解を求めることができる。

$$V(z) = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad \dots(3)$$

$$n(z) = \frac{P}{w} + \left(N_t - \frac{P}{w} \right) \left(\frac{z}{z_1} \right)^{-\frac{w}{ku_*}} \quad \dots(4)$$

ここで、 u_* :摩擦速度、 z_0 :表面粗度、 k :カルマン係数(=0.4)、 P :降水強度、 w :雪粒子の落下速度(一定)、 N_t :基準高さ z_1 での飛雪空間密度である。

次に、解を求める過程を示す。 $n_t = N_t - P/w$ と置き、(1)式に(3)式と(4)式を代入すると次の式が得られる。

$$q(z) = \frac{Pu_*}{kw} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) + \frac{n_t u_*}{k} \left(\frac{z}{z_1} \right)^{-\frac{w}{ku_*}} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad \dots(5)$$

ここで

$$a = \frac{n_t u_*}{k}$$

$$b = -\frac{w}{ku_*}$$

$$\cdots(6a) \qquad \qquad \qquad \cdots(6b)$$

と置いて式を展開すると

$$q(z) = \frac{Pu_*}{kw}(\ln z - \ln z_0) + \frac{a}{z_1^b} \cdot z^b \ln z - \left(\frac{a}{z_1^b} \ln z_0 \right) \cdot z^b \qquad \cdots(7)$$

(7)式を z で積分すると

$$\begin{aligned} Q_{sus}(z) &= \frac{Pu_*}{kw} \int (\ln z - \ln z_0) dz + \frac{a}{z_1^b} \int z^b \ln z dz - \frac{a}{z_1^b} \ln z_0 \int z^b dz \\ &= \frac{Pu_*z}{kw} (\ln z - 1 - \ln z_0) + \frac{a}{z_1^b} \frac{z^{b+1}}{b+1} \left(\ln z - \frac{1}{b+1} \right) - \frac{a}{z_1^b} \ln z_0 \frac{1}{b+1} z^{b+1} + c \\ &= \frac{Pu_*z}{kw} \left(\ln \frac{z}{z_0} - 1 \right) + \frac{a}{b+1} \frac{z^{b+1}}{z_1^b} \left(\ln \frac{z}{z_0} - \frac{1}{b+1} \right) + c \qquad \cdots(8) \end{aligned}$$

ここで、 c は積分定数である。吹雪対策の計画や対策施設の設計を行う上では、吹雪の高さは5 m程度までを考慮すればよい⁶⁾ので、浮遊層の底面を0.15 m、上端を5 mとして定積分した値を浮遊層の吹雪量 Q_{sus} とする。

$$Q_{sus} = \left[\frac{Pu_*z}{kw} \left(\ln \frac{z}{z_0} - 1 \right) + \frac{a}{b+1} \frac{z^{b+1}}{z_1^b} \left(\ln \frac{z}{z_0} - \frac{1}{b+1} \right) \right]_{0.15}^5 \qquad \cdots(9)$$

一方、跳躍層の吹雪量 Q_{sal} は、運動力学モデルより風速の3乗に比例する。また松澤他³⁾より、小林他¹⁾の(10)式¹⁾は跳躍層の吹雪量の最大値を与える式と見なせるので、

$$Q_{sal} = 0.03 \cdot V_1^3 \qquad \cdots(10)$$

を用いることとする。ここで V_1 は高さ1 mの風速である。(9)式と(10)式より跳躍層と浮遊層を含めた全層の吹雪量 Q は、次式で表される。

$$Q = Q_{sal} + Q_{sus} \qquad \cdots(11)$$

2. 2 計算の条件

計算に当たって、いくつかの値を仮定する必要がある。摩擦速度 u_* は、高さ10 mの風速 V_{10} を用いて $u_* = 0.036 \cdot V_{10}$ (m/s)で与える。表面粗度 z_0 は $z_0 = 1.5 \cdot 10^{-4}$ (m)とした。また、基準高さ0.15 mの飛雪空間密度 N_t (g/m³)は、以下にある松澤⁷⁾の実験式より求める。

$$\text{降雪弱or無し：} \qquad N_t = 0.021 \cdot e^{0.401V_{10}} \quad (\text{g/m}^3) \qquad \cdots(12a)$$

$$\text{降雪強：} \qquad N_t = 0.116 \cdot e^{0.309V_{10}} \quad (\text{g/m}^3) \qquad \cdots(12b)$$

なお、松澤⁷⁾では、降雪強度は目視で判断しており、(12)式の降雪強度の適用条件は示されていない。さらに、(12)式は、風速 V_{10} が15 m/s以下での観測結果から求めているので、風速 V_{10} が15 m/s以上における(12)式の精度は十分に検証されていない。また、雪粒子の落下速度 w は粒径によって変わるので、0.15, 0.35, 0.55, 1.0 m/sの4ケースとした。以上の条件で降水強度 P と風速 V_{10} を任意に与えて吹雪量を計算した。

3. 吹雪量の推定値と観測値との比較

ここでは、前述の手法で推定した吹雪量と、飛雪流量観測から求めた吹雪量とを比較する。

飛雪流量観測は2003年の1～2月の吹雪発生日に行った。飛雪流量は箱型（タンズ型）吹雪計を用いて高さ0.025, 0.75, 0.15, 0.25 mで、また直径約0.1 mの円筒型のネット式吹雪計を用いて高さ0.15, 1.2 mで測定した。これらの高さはそれぞれの吹雪計の開口部の中央の高さを示している。並行して三杯式風速計で高さ1.2 mで風速を計測し、目視により降雪の有無を判別した。飛雪流量観測は計4日、34計測を行った。内訳は、降雪無しが24計測、降雪有りが10計測であった。

吹雪量 Q は定義上、飛雪流量を雪面から高さ ∞ まで積分した値であるが、高さ 5 m を上限とした。高さ 0～0.025 m では高さ 0.025 m の飛雪流量の値を用い、高さ 0.025 m から 1.2 m までは台形近似を行い、高さ 5 m での飛雪流量を 0 と仮定して、飛雪流量を累計し Q を求めた。その模式図を図-2 に示す。塗りつぶした部分が吹雪量 Q に相当する。

この方法で、松澤他³⁾は、降雪なしの24計測のデータを用いて、降雪のない場合の高さ 1.2 m の風速 $V_{1.2}$ と吹雪量 Q の関係として次式を導いた。

$$Q = 0.005 \cdot V_{1.2}^4 \quad \dots(13)$$

(13)式で表される風速と吹雪量の関係と、前述した推定手法を用いて求めた吹雪量を比較したのが図-2 である。吹雪量の推定においては、降水強度 P を 0 mm/h とし、高さ 0.15 m の飛雪空間密度 N_t は (12a)式を用いた。なお、(13)式の風速は高さ 1.2 m での値であるが、高さ 1 m の風速の値と等しいと仮定した。

図より、風速が 10 m/s 以下では、雪粒子の落下速度が 0.15 m/s での推定値が実測値に近い。風が強くなるにしたがい、雪粒子の落下速度が大きい場合の推定値が実測値に近くなる。これは、風が強くなるにしたがい、吹雪全体における大きな雪粒子の占める割合が高くなることを裏付けるものである。これらの結果より、降雪のない場合、本研究の手法で推定した吹雪量は、実測の吹雪量を概ね再現しているといえる。

次に、降雪のある場合の吹雪量を求める。吹雪量の計算においては、降水強度 P を 1

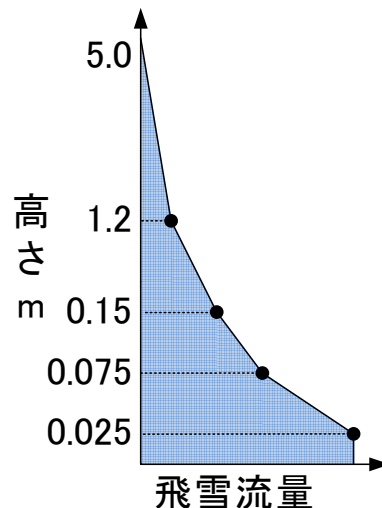


図-1. 吹雪量算出の模式図. 塗りつぶした部分が吹雪量に相当する。

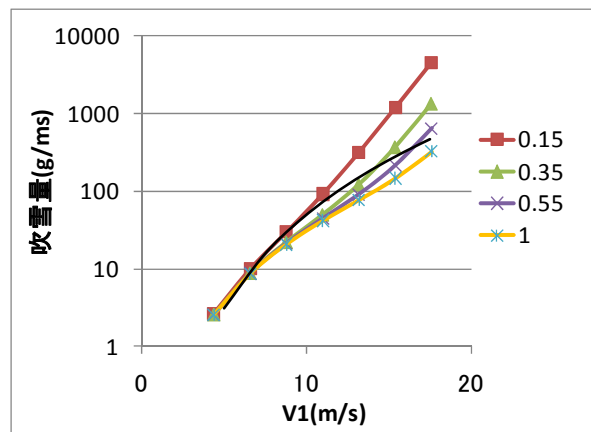


図-2. 降雪のない吹雪時において雪粒子の落下速度 0.15, 0.35, 0.55, 1.0 m/s で計算した推定吹雪量および(13)式による実測の吹雪量と高さ 1 m の風速との関係。

mm/hとし、高さ 0.15 mの飛雪空間密度 N_t は(12b)式を用いた。その計算結果と、飛雪流量の観測値から求めた吹雪量を図-3に示す。図より雪粒子の落下速度が 0.55 m/sでの吹雪量の推定値が観測値から求めた吹雪量と比較的近い。粒径の大きな降雪粒子が混ざっているため、 w が大きい方が計算結果が実測値に近いのは妥当な結果と考えられる。風速 7~8 m/sで吹雪量が小さく外れている観測値があるがこれらは吹雪が飽和状態に達していなかった可能性がある。

Takeuchi²⁾や松澤他³⁾は、風速と吹雪量の関係式を導く際に、飽和状態であるかを考慮して測定データの検討を行っている。今回は、測定例が少ないので、その検討は行っていないが、これらの観測値を除くと、降雪が有る場合も、本研究で示した手法を用いることで飽和状態の吹雪量を推定することが可能であると考えられる。

4. まとめと今後の課題

飛雪流量を高さ方向に積分することで、降雪を伴う吹雪時の浮遊層の吹雪量を与える式を導いた。さらに、跳躍層の吹雪量を加えることで、全層の吹雪量を推定する手法を明らかにした。定数を仮定して与え、風速と全層の吹雪量の関係を計算したところ、飛雪流量観測から得た、風速と吹雪量の関係にほぼ近い結果が得られた。

今後の課題は、精度の高い吹雪量の実測値を用いた推定値の検証である。例えば、降雪強度のデータを飛雪流量観測と同時に取得することや、飽和状態の吹雪時のデータの抽出を行うことである。さらに風速 V_{10} が 15 m/sを超える場合の基準高さの飛雪空間密度 N_t の関係式の検討、および、粒径の大きな降雪粒子を考慮した落下速度の検討も必要と考えられる。今後これらの課題について取り組みたいと考えている。

参考文献

- 1) 小林大二他, 1969 : みぞによる地吹雪量の測定, 低温科学・物理編, 27, 99-106.
- 2) Takeuchi M., 1980 : Vertical Profile and Horizontal Increase of Drift-Snow Transport, J. Glaciology, 26, 481-492.
- 3) 松澤勝他, 2010 : 風速と吹雪量の経験式の適用に関する一考察, 寒地技術論文報告集, 26, 45-48.
- 4) 日本雪氷学会, 1990 : 雪氷辞典, 古今書院, 196pp.
- 5) 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.
- 6) Tabler R.D., 2003 : Controlling Blowing and Drifting Snow with Snow Fences and Road Design, NCHRP Project 20-7 (147), 307pp.
- 7) 松澤勝, 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.

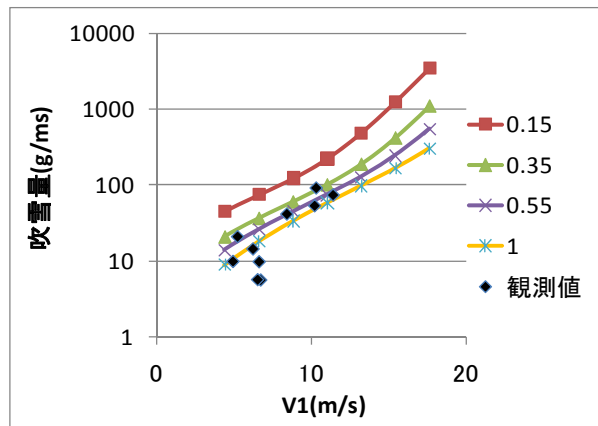


図-3. 降雪を伴う吹雪時において雪粒子の落下速度が 0.15, 0.35, 0.55, 1.0 m/s で計算した推定吹雪量および飛雪流量観測値から求めた吹雪量と高さ 1 m の風速との関係。