

吹雪量推定経験式に関する理論的一考察

A theoretical study on experimental relations between wind velocity
and snow transport

佐藤隆光 ((一財) 日本気象協会北海道支社)

Takamitsu Sato

1. はじめに

吹雪対策の調査・計画や道路管理者への吹雪予測情報として吹雪量が用いられている。気象データから吹雪量を推定する場合、風速と吹雪量の経験式から推定することが多く、その経験式は多くの研究者によって求められている。

これまで、吹雪量推定経験式に関する理論的な考察は少なかった。本研究では跳躍層と浮遊層の吹雪量の比を求める理論式を導入し、風速や粒径の依存性について解析した。さらに、既往の吹雪量推定経験式に関して考察した。

2. 解析モデル

吹雪量 Q を跳躍層の吹雪量 Q_{sal} と浮遊層の吹雪量 Q_{sus} との和として考える。本研究では両者の比 Q_{sus}/Q_{sal} に着目する。なお、簡単化するために降雪は考慮しない。

$$\frac{Q}{Q_{sal}} = 1 + \frac{Q_{sus}}{Q_{sal}} \quad (1)$$

2. 1 跳躍層の吹雪量 Q_{sal}

Q_{sal} は跳躍層の飛雪流量 $q(Z)$ を雪面から跳躍層高さ Z_t まで積分したものである。跳躍層上端の飛雪空間密度 Nt および風速鉛直分布に対数則を用いて式(2)で表す。

$$Q_{sal} = \int_0^{Z_t} q(Z) dZ = Nt \cdot Z_t \cdot \frac{U_*}{\kappa} \log\left(\frac{Z_t}{Z_0}\right) \quad (2)$$

2. 2 浮遊層の吹雪量 Q_{sus}

浮遊層における飛雪密度の鉛直分布に乱流拡散理論を、風速鉛直分布に対数則を用いると、 Q_{sus} は式(3)、(4)で表すことができる。

$$Q_{sus} = \int_{Z_t}^{\infty} q(Z) dZ = \frac{Nt \cdot U_*}{\kappa} \int_{Z_t}^{\infty} \left(\frac{Z}{Z_t}\right)^a \log\left(\frac{Z}{Z_0}\right) dZ \quad (3)$$

$$a = \frac{-|Wb|}{\kappa U_*} \quad (4)$$

ここで、 U_* : 摩擦速度、 κ : カルマン定数、 Z_0 : 表面粗度、 Wb : 雪粒子落下速度である。

2. 3 Q_{sus}/Q_{sal} の導入

式(2)、(3)を用いて Q_{sus}/Q_{sal} を求める。

$$\frac{Q_{sus}}{Q_{sal}} = \frac{1}{Z_t \cdot \log\left(\frac{Z_t}{Z_0}\right)} \int_{Z_t}^{\infty} \left(\frac{Z}{Z_t}\right)^a \log\left(\frac{Z}{Z_0}\right) dZ \quad (5)$$

式(5)の定積分は無限大になる。そのため積分区間上限に有限値 Z_u を与えて式(5)を積分すると式(6)が導入される。

$$\frac{Q_{sus}}{Q_{sal}} = \frac{\left(\frac{Zu}{Zt}\right)^{a+1} \left\{ (a+1) \log\left(\frac{Zu}{Z_0}\right) - 1 \right\} - \left\{ (a+1) \log\left(\frac{Zt}{Z_0}\right) - 1 \right\}}{(a+1)^2 \log\left(\frac{Zt}{Z_0}\right)} \quad (6)$$

2. 4 吹雪量 Q の算出

小林他(1969)¹⁾の吹雪量推定経験式(式(7))は跳躍層の吹雪量 Q_{sal} とみなすことができる²⁾.

$$Q_{sal} = 0.03U_1^3 \quad (7)$$

ここで, U_1 :高さ 1m の風速である.

式(1), (6), (7)を用いれば全層の吹雪量 Q を算出することができる.

3. 解析結果

3. 1 風速と Q_{sus}/Q_{sal} の関係

式(6)を用い, 高さ 1m の風速 U_1 と Q_{sus}/Q_{sal} の関係を図 1 に示す. 以降, 特に断りがない限り, $Z_0=1.5 \times 10^{-4}m$, $Zt=0.15m$, $Wb=0.35ms^{-1}$ とした(松沢, 2007)³⁾.

図 1 によれば, 風速の増加に伴い Q_{sus}/Q_{sal} が増加する. すなわち, 浮遊層の吹雪量 Q_{sus} が Q_{sal} に比較して大きくなることを示している. $U_1=10ms^{-1}$ 付近に着目すると, $Zu=1\sim 2m$ では U_1 と Q_{sus}/Q_{sal} がほぼ直線関係, すなわち Q_{sus}/Q_{sal} は U_1 の 1 乗に比例する. 一方, $Zu \geq 10m$ では下に凸の曲線関係, すなわち Q_{sus}/Q_{sal} は U_1 の n 乗 ($n>1$) に比例する.

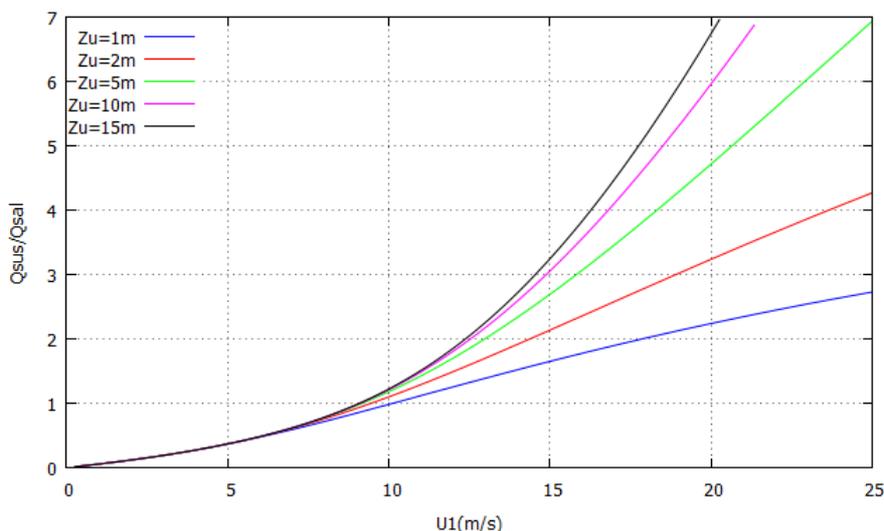


図 1 高さ 1m の風速 U_1 と Q_{sus}/Q_{sal} の関係

3. 2 吹雪量 Q

図 2 は前記 2.4 で示した方法で吹雪量を算出したものである. 同図では比較のために既往の経験式で算出した結果も示す.

図 2 によれば, 本研究による算出結果は小林他(1969)¹⁾の経験式(式

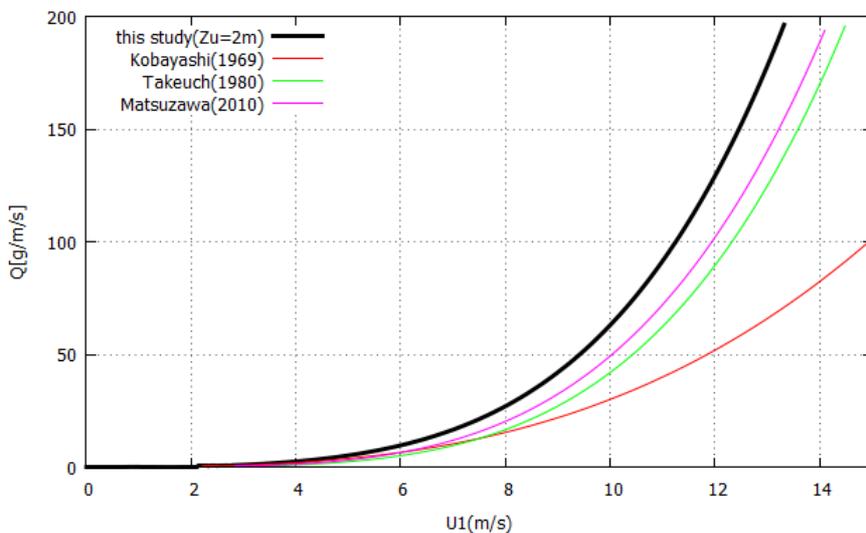


図 2 吹雪量 Q の算出結果 ($Zu=2m$)

(7))の結果と差が大きい. しかし, Takeuch(1980)⁴⁾の経験式(式(8))および松沢他(2010)²⁾の経験式(式(9))による結果に近い.

$$Q = 0.0029U_1^{4.16} \tag{8}$$

$$Q = 0.00504U_1^{3.99} \tag{9}$$

4. 考察

4. 1 既往の吹雪量推定経験式の考察

前記 3.1 で示したように $U_1=10\text{ms}^{-1}$ 付近において $Zu=1\sim 2\text{m}$ では U_1 と Q_{sus}/Q_{sal} がほぼ直線関係であり, 回帰式を求めると図 3 で示すとおりである. この回帰式と式(1), (7)を用いると式(10)が導入される. 式(10)は式(9)にほぼ等しい.

$$Q = 0.0054U_1^4 + 0.012U_1^3 \approx 0.0054U_1^4 \tag{10}$$

図 2 に示すように, 小林他(1969)¹⁾の経験式(式(7))と松沢他(2010)²⁾の経験式(式(9))による吹雪量算出結果は大きく異なる. しかし式(6)によって両経験式を結びつけたことは興味深い. ただし後述するように, Q_{sus}/Q_{sal} (式(6))は雪の粒径(落下速度)に対する依存性が大きいのでさらなる考察が必要であろう.

Takahashi(1985)⁵⁾は, 南極での観測結果から高さ 30m までの吹雪量は風速の 5.2 乗に比例することを示している. 前記 3.1 で示したように, $Zu \geq 10\text{m}$ では U_1 と Q_{sus}/Q_{sal} が曲線関係なので, 吹雪量算出の高度が高くなるほど風速のべき乗が大きくなることを示すことができる可能性がある.

4. 2 雪の粒径(雪粒子の落下速度)に対する依存性

竹内(1996)⁶⁾によれば風速 15ms^{-1} 程度で浮遊層の雪粒子の割合は 40%以下である. 一方, 図 1 によれば $U_1=15\text{ms}^{-1}$ でおおよそ $Q_{sus}/Q_{sal}=2$ であり浮遊層の雪粒子の割合

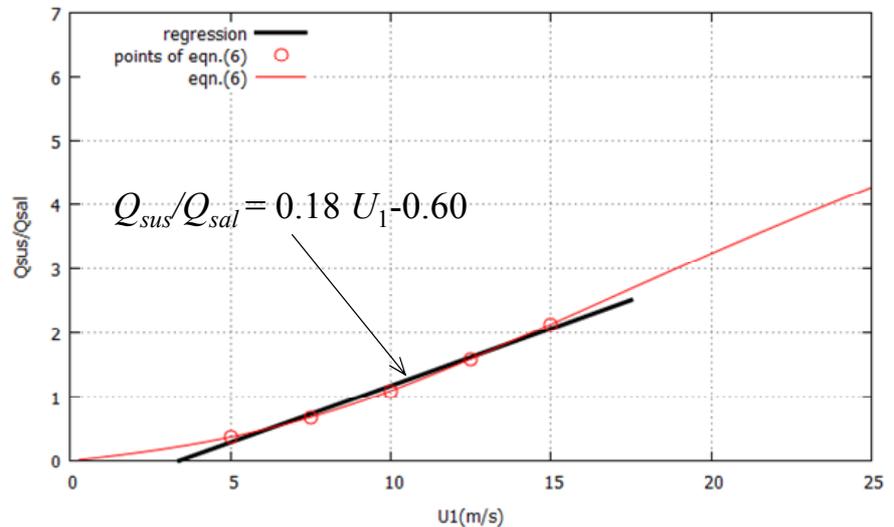


図 3 高さ 1m の風速 U_1 と Q_{sus}/Q_{sal} の相関関係 ($Zu=2\text{m}$)

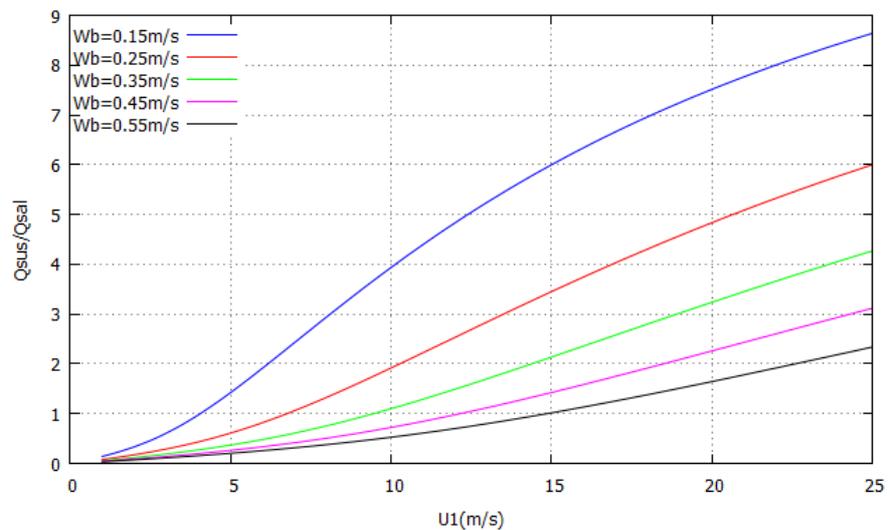


図 4 Wb を変化させたときの U_1 と Q_{sus}/Q_{sal} の関係 ($Zu=2\text{m}$)

は約 70%に達する.

図 4 は雪粒子落下速度 Wb を変化させ, 式(6)を用いて U_1 と Q_{sus}/Q_{sal} の関係を示したものである. 図 4 によれば, 落下速度 Wb が大きくなるに従い Q_{sus}/Q_{sal} は小さくなる. $Wb=0.55\text{ms}^{-1}$ の場合, 風速 15ms^{-1} のとき $Q_{sus}/Q_{sal}=1$ である. すなわち浮遊層の雪粒子の割合は 50%であり, 竹内(1996)⁶⁾の観測結果とほぼ等しい. このように, Q_{sus}/Q_{sal} は雪粒子の落下速度に対する依存性が大きい.

5. まとめ

吹雪量 Q を跳躍層の吹雪量 Q_{sal} と浮遊層の吹雪量 Q_{sus} との和として考え, 両者の比 Q_{sus}/Q_{sal} を求める理論式を導入した. 同式を用いて風速と Q_{sus}/Q_{sal} の関係, Q を風速から推定する経験式との比較, 風速と Q_{sus}/Q_{sal} の関係を用いた異なる経験式の結び付け, Q_{sus}/Q_{sal} に対する雪粒子落下速度の依存性について考察した.

理論的に整合した解析にはラグランジェ型モデル^{7,8)}を用いることが望ましいが, 同モデルは複雑である. 本研究は簡単なモデルを導入して, 吹雪量の考察を試みたものである.

【参考・引用文献】

- 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)松沢勝他, 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.
- 3)松沢勝, 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.
- 4)Takeuchi, M., 1980: Vertical Profile and Horizontal Increase of Drift-Snow Transport, *J. Glaciol.*, **26**, 481-492
- 5)Takahashi, S., 1985: Characteristics of drifting snow at Mizuho Station, Antarctica. *Annals Glaciol.*, **6**, 71-75.
- 6)竹内政夫, 1996: 吹雪とその対策(1), *雪氷*, **58**, 161-168.
- 7)Sato, T. et al., 1997: Application of a random walk model to blowing snow, *Snow Engineering: Recent Advances*, Izumi Nakamura & Sack (eds.), 133-138.
- 8)Nemoto, M. et al., 2004: Numerical simulation of snow saltation and suspension in turbulent boundary layer, *J. Geophys. Res.*, **109**, D18206.