

多高度 SPC 連続観測による吹雪浮遊層の解析

A study on structure in suspension layer of snowdrift with multiple SPC observation

佐藤隆光 (一般財団法人日本気象協会北海道支社)
大宮哲, 松沢勝 (国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所)
Takamitsu Sato, Satoshi Omiya, Masaru Matsuzawa

1. はじめに

吹雪やそれに伴う視程障害を予測する上で、吹雪浮遊層の特性と風速等の気象要素を関係づけることは重要である。本研究は、4 高度に設置した SPC を用いて飛雪フラックスを約 2 か月間連続観測した。この観測結果を用いて浮遊層における雪粒子落下速度・飛雪空間密度と摩擦速度の関係を解析した。

2. 観測概要

(1) 観測地点及び観測要素

2015 年 1 月 23 日～3 月 31 日に北海道弟子屈町において飛雪フラックスの連続観測を実施した。観測地点の北北西側は約 1 km にわたって農地が広がっており、冬期間は平坦な積雪状態となっていた。

観測要素は飛雪フラックス、風向風速であり、飛雪フラックスの観測には SPC(Snow particle counter) (新潟電機株式会社製 SPC-S7)、風向風速の観測には風車型風向風速計 (ヤング社製 KDC-S04) を用いた。これらの観測機器は、高度 0.5 m, 1 m, 3 m, 7 m (無雪状態時) に設置し、支柱の影響を避けるため支柱に対して北北西側に配置した。さらにレーザ積雪深計 (KADEC21-SNOW) を高さ 6 m に設置して観測地点周辺の積雪深を観測し、SPC 及び風向風速計の雪面からの高度を求めた。

前記観測要素を 1 秒間隔で計測し 10 分平均値として整理した。以降では 10 分平均値を用いて解析を行う。

(2) 観測結果

観測期間中、高度 7 m 風速が 10 ms^{-1} を超える強風が半日以上継続した事例が 8 回あった。強風時に飛雪フラックスの増加が明瞭にみられた。図 1 に高さ 7 m の風配図を示す。北北西風向が卓越し、同風向は他風向に比べて風速 10 ms^{-1} 以上の頻度が多い。

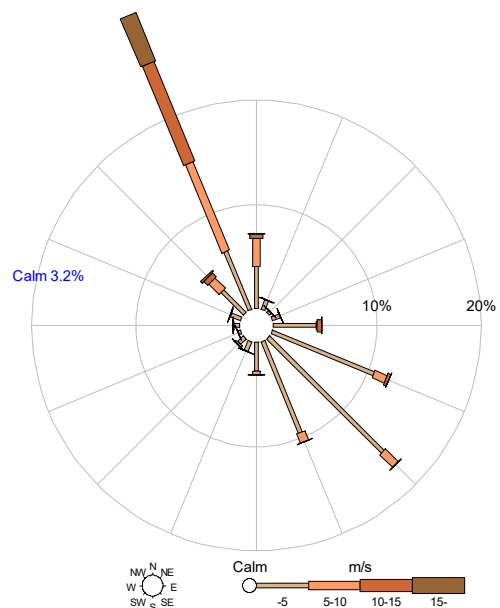


図 1 高度 7 m における風配図

3. 解析方法

(1) 解析モデル

本解析で使用したモデルは、風速 U の鉛直分布(式(1)), 飛雪フラックス Q (式(2)), 浮

遊層における飛雪空間密度 C の鉛直分布(式(3))である．ここで， U_* :摩擦速度， k :カルマン定数， Z_0 :雪面粗度， W_b :雪粒子の落下速度， Z_{ref} :基準高， C_{ref} :基準高における飛雪空間密度， Z :高度である．式(3)は降雪を考慮しない飛雪空間密度の鉛直分布式であることに注意されたい．

$$U(Z) = \frac{U_*}{k} \log \left(\frac{Z}{Z_0} \right) \quad (1)$$

$$Q(Z) = C(Z) \cdot U(Z) \quad (2)$$

$$C(Z) = C_{ref} \left(\frac{Z}{Z_{ref}} \right)^{-\frac{W_b}{kU_*}} \quad (3)$$

各高度の風速 $U(Z)$ 及び飛雪フラックス $Q(Z)$ の観測値から，各時刻毎に式(1)～(3)を用いて最小二乗法によって，摩擦速度 U_* ，雪面粗度 Z_0 ，基準高 ($Z_{ref} = 0.15 \text{ m}$) の飛雪空間密度 C_{ref} ，雪粒子の落下速度 W_b を算出した．

(2) 使用したデータ

観測機器の配置を考慮し，風向が北西，北北西，北のときで，さらに 4 高度すべての SPC が飛雪フラックスを観測している時刻のデータを抽出した．抽出した結果，1475 時刻分のデータが解析対象となった．

4. 解析結果

(1) 高度 10 m 風速 U_{10} と摩擦速度 U_*

高度 10 m 風速 U_{10} と摩擦速度 U_* の関係を図 2 に示す．ここで U_{10} は高度 7m 風速から式(1)を用いて外挿した．図 2 によれば， U_{10} と U_* はほぼ直線関係である．

(2) 摩擦速度 U_* と雪面粗度 Z_0

摩擦速度 U_* と雪面粗度 Z_0 の関係を図 3 に示す．同図によれば， U_* はおよそ $10^{-4} \text{ m} \sim 10^{-3} \text{ m}$ である．平均すると $Z_0 = 4 \times 10^{-4} \text{ m}$ であり，これまでの北海道における観測結果(松澤，2007)¹⁾ とほぼ同じである． Z_0 の U_* 依存性が指摘されているが(例えば Owen, 1964)²⁾，本解析ではその依存性はみられなかった．

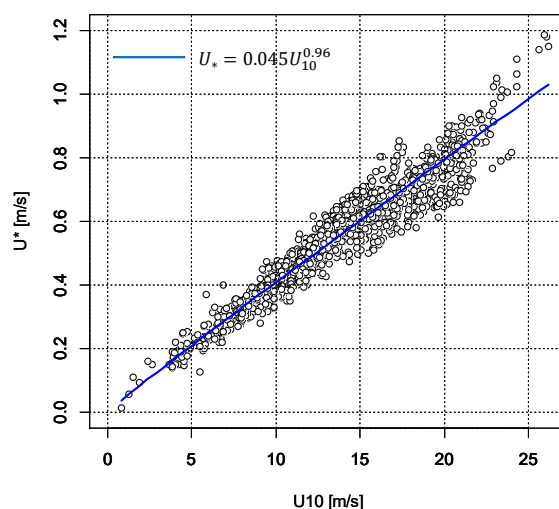


図 2 高度 10 m 風速 U_{10} と摩擦速度 U_* の関係

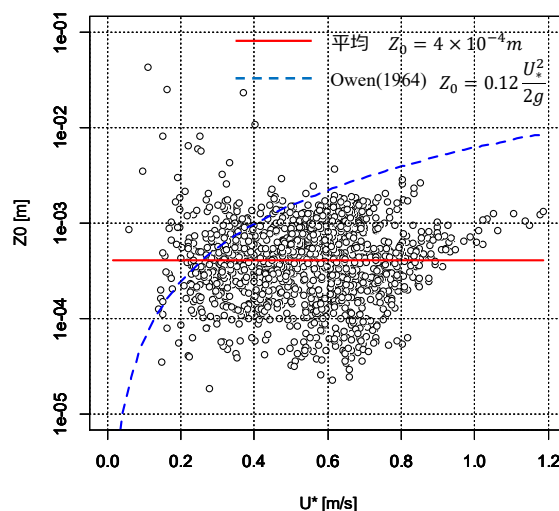


図 3 摩擦速度 U_* と雪面粗度 Z_0 の関係

(3) 摩擦速度 U_* と雪粒子落下速度 W_b

摩擦速度 U_* と雪粒子落下速度 W_b の関係を図 4 に示す. 一般的に W_b は高度によって異なるが, 本解析方法に基づけば本研究の W_b は高度 0.5~7 m の平均的な落下速度とみなすことができる.

図 4 によれば, U_* と W_b はほぼ直線関係がみられる. これは, 風速が大きくなるにつれて飛雪粒子の粒径が大きくなることを示している. U_* と W_b の回帰式を求めると (図 4 に掲載), $W_b = 0 \text{ ms}^{-1}$ のとき $U_* = 0.18 \text{ ms}^{-1}$ となる. これは吹雪発生臨界摩擦速度に近い値である. Naaim-Bouvet *et al.* (2010)³⁾ による経験式と比較すると, 摩擦速度が小さいとき同経験式は W_b を過大評価している.

(4) 摩擦速度 U_* と 15 cm 高の飛雪空間密度 C_{ref}

摩擦速度 U_* と 15 cm 高の飛雪空間密度 C_{ref} の関係を図 5 に示す. U_* の増加とともに C_{ref} が増加している. しかし, $U_* = 0.6 \text{ ms}^{-1}$ 付近では $C_{ref} = 0.1 \sim 50 \text{ gm}^{-3}$ であり, ばらつきが大きい. このばらつきについて, 後章で考察する.

5. 考察

先の解析結果によれば, 摩擦速度 U_* と 15 cm 高の飛雪空間密度 C_{ref} はばらついた関係であった. このばらつきに関して, 降雪の影響に着目して考察する.

本観測地点近傍に位置する気象庁弟子屈アメダスの降水量データ(10 分値)に基づき降雪の有無を判別した. 図 6(a)(b)は, この判別結果によって図 5 のデータを分離したものである. U_* が同じとき, 降雪ありのほうが C_{ref} が大きい. また降雪あり (図 6(a)) に着目すると, 図 5 に比べて U_* と C_{ref} の関係が明瞭になった.

一方降雪なしの場合 (図 6(b)) に着目すると, ばらつきが大きい. そこで, 降雪終了後に 10 ms^{-1} 以上の強風が継続した事例(2015 年 2 月 3 日~4 日)を除外してみた. その結果は図 6(c)である. 図 6(b)と比較して C_{ref} が小さな領域が削除され, U_* と C_{ref} の関係が明瞭になった.

これらのことから, 次が考えられる. 降雪時は雪粒子間の結合力が弱く飛雪しやすい粒子が多く, 飛雪空間密度 C_{ref} が大きくなる. 一方, 降雪後, 時間経過とともに焼結が進行して雪粒子間の結合力が大きくなり, 飛雪しやすい雪粒子が減少し C_{ref} が小さくなる.

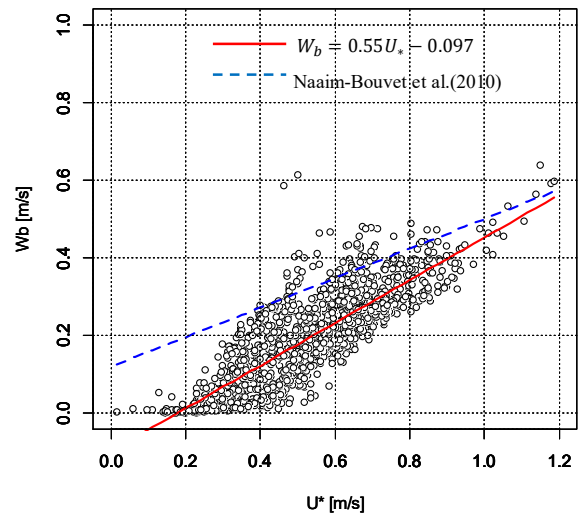


図 4 摩擦速度 U_* と雪粒子落下速度 W_b の関係

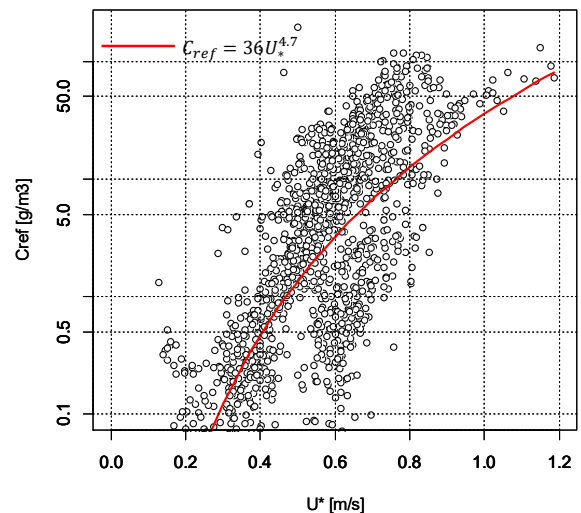


図 5 摩擦速度 U_* と 15cm 高の飛雪空間密度 C_{ref} の関係

図 6(c)には, Sato et al.(2002)⁴⁾, 松澤(2007)¹⁾の経験式もをプロットした. Sato et al.(2002)⁴⁾の経験式は, 本解析結果の上限となっている.

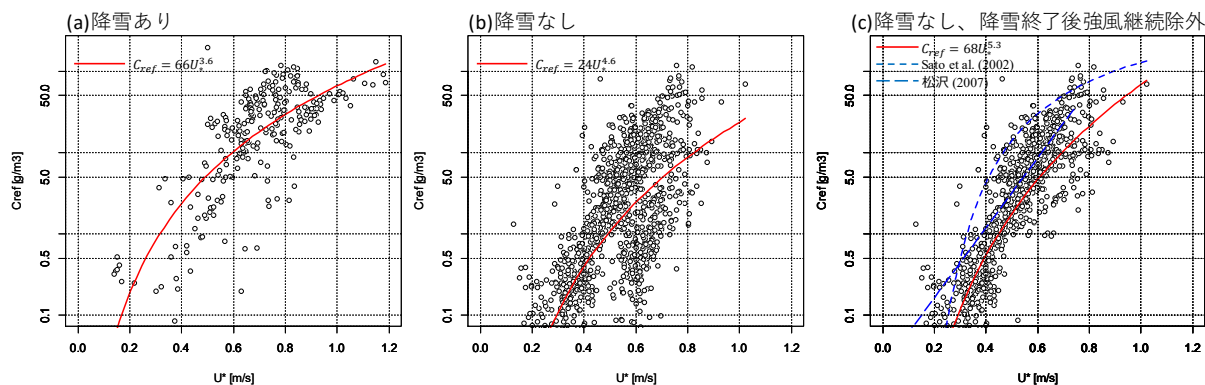


図 6 降雪有無等で分類した摩擦速度 U_* と 15 cm 高の飛雪空間密度 C_{ref} の関係

6. まとめ

4 高度で観測した SPC による飛雪フラックスデータを用いて, 浮遊層における雪粒子落下速度及び 15 cm 高の飛雪空間密度と摩擦速度の関係を解析した. 得られた結果を以下にまとめる.

- ・摩擦速度と雪粒子落下速度に直線関係がみられた.
- ・飛雪空間密度は降雪の影響を受け, 同じ摩擦速度でも降雪時のほうが大きい.
- ・降雪終了後に強風が継続すると, 降雪時よりも飛雪空間密度は減少した.

この原因として, 無降雪で強風が継続すると, 表層の飛雪しやすい小さな雪粒子が無くなること, 降雪後の時間経過とともに焼結が進行して雪粒子の結合力が大きくなり, 飛雪しやすい雪粒子が減少することが考えられる.

参考文献

- 1) 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.
- 2) Owen, P.R., 1964: Saltation of uniform grains in air. *J. Fluid Mech.*, **20**, 225-242.
- 3) Naaïm-Bouvet, F. et al., 2010: Back analysis of drifting-snow measurements over an instrumented mountainous site. *Ann. Glaciol.*, **51**, 207-217.
- 4) Sato, T., et al., 2002: Estimation of Blowing Snow and Related Visibility Distributions above Snow Covers with Different Hardness. *11th International Road Weather Conference*.