

## 3 分力計を用いた雪面せん断応力の直接計測

新屋啓文<sup>1</sup>・大風翼<sup>2</sup>・富永禎秀<sup>3</sup>・根本征樹<sup>4</sup>

(1:新潟大学災害・復興科学研究所 2:東京工業大学環境・社会理工学院

3:新潟工科大学工学部 4:防災科学技術研究所雪氷防災研究センター)

## 1. はじめに

吹雪の発生条件は、雪面に作用する流体せん断応力と流体臨界と呼ばれる閾値の関数として定式化されている。流体せん断応力を見積もる手法として、プロファイル法や渦相関法がある。これらの手法は風速の計測に基づいているため、雪面での流体せん断応力は間接的に推定された値となる。十分に発達した境界層であれば、コンスタント・フラックス層が成り立つので、境界層中の流体せん断応力と同じ値が雪面にも作用していると仮定できる。しかし、吹雪時では、風と飛雪の運動量交換により、流体せん断応力は吹雪発生前より低下する。加えて、飛雪粒子によるせん断応力も雪面に作用するため、雪面せん断応力の計測は困難となる。

Nemoto and Nishimura (2001)は、ロードセルに積雪を載せることで、吹雪発生前と吹雪時の雪面せん断応力を直接計測した。得られた雪面せん断応力はプロファイル法の値よりも若干過大評価しているものの、吹雪時の流体・粒子せん断応力の合計値が計測可能となった。Walter *et al.* (2014)は、飛砂の実験において、Irwin センサーと呼ばれる風速計を用いて砂床から5 mmの高さの風速に基づいて地表面での流体せん断応力を推定した。せん断応力の直接計測では、流体と粒子のせん断応力を分離できないが、跳躍粒子を伴う場合でも、流体せん断応力の算出が可能となった。しかし、Niiya and Nishimura (2022)の数値計算によると、吹雪時の流体せん断応力の変化は雪面から高さ数 cm まで及んでいる。そのため、風速から雪面での流体せん断応力を正確に推定することは困難であると考えられる。

以上のように、雪面での応力は、吹雪発生の条件を解明するため、流れ方向のせん断応力のみに着目されてきた。新屋ほか(2021)は防雪柵周辺に形成される吹きだまりの内部構造を調査したところ、吹きだまり内部の密度は表面付近の値より小さいという観測結果を得ている。そして、飛雪粒子の堆積過程が吹きだまりの成長とともに変化するため、この影響が吹きだまり密度に反映されたという仮説を唱えた。つまり、飛雪粒子による雪面と垂直方向の応力が、積雪を圧密していることになる。したがって、雪面せん断応力のみならず垂直応力の直接計測が、吹雪による吹きだまりメカニズムの解明に重要となる。

本研究では、吹雪発生や吹きだまり構造で重要となる雪面応力3成分を高精度に直接計測するため、3分力計(ロードセル)を用いた実験系の構築と計測試験を行った。

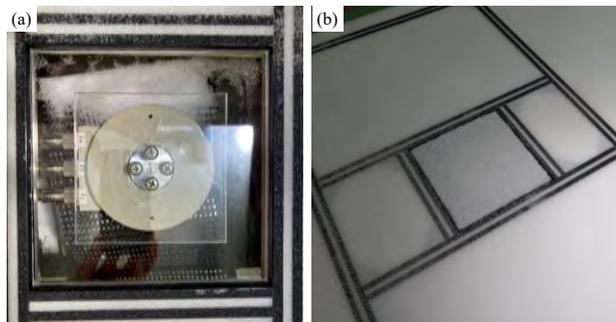


図1 3分力計の配置:(a)アクリル板のみ、(b)積雪あり。

## 2. 実験方法

実験は、防災科学技術研究所新庄雪氷環境実験所の大型境界層風洞において $-10^{\circ}\text{C}$ で実施された。

## 2.1 雪面せん断応力の計測

雪面せん断応力を計測するため、図1(a)に示すように風洞底面に穴を開けたベニヤ板を固定し、穴の部分に150 mm×150 mmのアクリル板を取り付けた3分力計(KYOWA ELECTRONIC INSTRUMENTS Co., LTD.: LSM-B-5NSA37B-P)を配置した。3分力計の配置位置は、風洞入口から十分に離れた地点とした: $x = 12.5\text{ m}$ ,  $y = 0.5\text{ m}$ 。風洞底面およびアクリル板に敷き詰めた積雪は散水で硬化させたhard snowであり、アクリル板の積雪深 $D_s$ は20 mmと3.5 mmの2通りとした。3分力計の出力(ひずみ $\varepsilon$ )は動ひずみ測定カードを取り付けたユニバーサルレコーダー(KYOWA ELECTRONIC INSTRUMENTS Co., LTD.: EDX-200A-4H (DPM-42B-F))で収録され、サンプリング周波数を20 Hzと設定した。注意として、アクリル板に載せた積雪が周囲のアルミフレームに接すると、ひずみは時間的に変化する挙動を示した。そのため、図1(b)のようにヘラで積雪とアルミフレームに2 mmの隙間を空けた。

低温環境で計測したひずみを力に正確に変換するため、3分力計のキャリブレーションを行った。まず、3分力計を任意の角度に傾け、 $x \cdot y$ 方向の傾斜角を2軸の水準器で測定した。次に、3分力計に数本のネジ(1.0165 g/本)を取り付け、ひずみ3成分の変化量を計測した。最後に、積載荷重と傾斜角から3分力計に作用する力 $F$ をそれぞれ算出し、式(1)の校正係数を求めた。ここで、 $a_i$ は校正係数であり、添字の $i$ は $x, y, z$ 成分を表す。

$$F_i = a_i \varepsilon_i \quad (1)$$

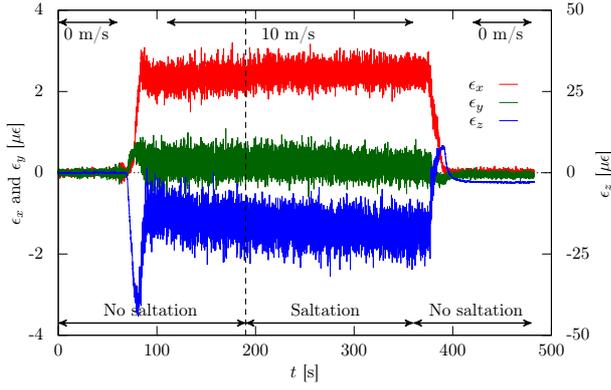


図 2 ひずみ 3 成分の時系列データ。

## 2.2 流体せん断応力の推定

3 分力計で雪面せん断応力を直接計測するとともに、風速分布から雪面に作用する流体せん断応力を間接的に推定した。3 次元超音波風速計 (KAIJO SONIC Co.: DA-650 (TR-92T)) を用いて、各設定風速において雪面から異なる高さで風速を計測した:  $z = 40, 80, 160, 320, 495$  mm。風速のサンプリング周波数を 20 Hz と設定し、各高さでの計測時間は 60 秒であった。得られた風速分布  $\bar{u}_x(z)$  に式(2)の対数則をフィッティングすることで、摩擦速度  $u_*$  と粗度長  $z_0$  を推定した。

$$\bar{u}_x(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (2)$$

ここで、 $\kappa$  はカルマン定数 (0.4) である。流体せん断応力  $\tau$  は、空気密度と摩擦速度を用いて式(3)で記述される。

$$\tau = \rho u_*^2 \quad (3)$$

ここで、 $\rho$  は  $-10^\circ\text{C}$  での空気密度 ( $1.3413 \text{ kg m}^{-3}$ ) とした。さらに、風洞内の境界層は十分に発達しているため、コンスタント・フラックス層が形成されていると判断できる。したがって、流体せん断応力は空間一様であり、算出した流体せん断応力が雪面にも作用していると仮定し、式(4)の 3 分力計による雪面せん断応力  $\tau_{\text{surf}}$  と比較した。

$$\tau_{\text{surf}} = F_x/S \quad (4)$$

ここで、 $S$  はアクリル板の面積 ( $2.25 \times 10^2 \text{ m}^2$ ) である。

## 2.3 実験条件

吹雪発生前の雪面せん断応力を計測するため、風洞の設定風速  $u_{\text{set}}$  を 2, 4, 6, 8, 10, 12  $\text{m s}^{-1}$  の 6 通りに設定した。また、風洞入口の底面にある雪供給装置 (充填率 100%) を作動させた吹雪時においても雪面せん断応力を計測した。吹雪時の設定風速は 6, 10  $\text{m s}^{-1}$  の 2 通りとし、雪供給装置の上昇率は風速 6  $\text{m s}^{-1}$  で 2%、風速 10  $\text{m s}^{-1}$  で 10% と設定した。

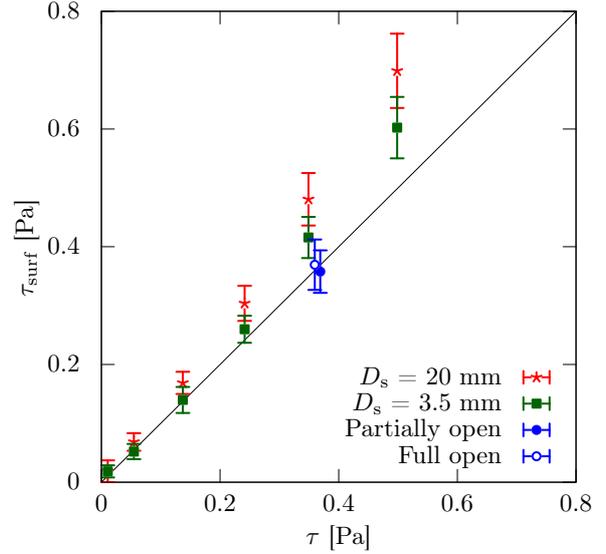


図 3 吹雪発生前の流体せん断応力と雪面せん断応力の比較。

## 3. 結果と考察

### 3.1 ひずみ値の raw データ

図 2 は積雪深 3.5 mm で設定風速 10  $\text{m s}^{-1}$  において計測された等価ひずみ (単位:  $\mu\epsilon = \epsilon \times 10^{-6}$ ) の時系列データを示しており、基準点は風を吹かせる前 ( $t = 0-60$  s) の平均ひずみである。図 2 上部の数値と両矢印は、それぞれ設定風速と風洞内の風速が安定した時間帯を表している。一方、図 2 下部の両矢印は雪供給装置の動作の有無を意味しており、雪を供給した時間帯 ( $t = 190-360$  s) が“Saltation”に相当する。風を吹かせ始めると ( $t = 70-380$  s)、風向のひずみ  $\epsilon_x$  はオーバーシュートして横ばいになり遷移したが、鉛直方向のひずみ  $\epsilon_z$  はアンダーシュートした後も減少傾向を示した。スパン方向のひずみ  $\epsilon_y$  は、風向と鉛直方向のひずみと比較すると、相対的に小さい変化に留まった。そして、風を停止させた後では ( $t > 400$  s)、風向とスパン方向のひずみは基準点にほぼ戻ったものの、鉛直方向のひずみは基準点より低い値に収束した。つまり、積雪表面が吹雪で侵食されたと判断できる。

### 3.2 吹雪発生前の流体・雪面せん断応力の比較

図 3 は、雪供給装置を作動させず風を吹かせた状態における流体せん断応力  $\tau$  と雪面せん断応力  $\tau_{\text{surf}}$  の比較を示している。なお、雪面せん断応力のプロットは、60 秒間のひずみデータから計算された平均値と標準偏差である。飛雪粒子が存在しないため、風速分布から推定した流体せん断応力が真値であると仮定し、3 分力計による雪面せん断応力の計測値を評価した。積雪深 20 mm での雪面せん断応力は、流体せん断応力を上回っていた。積雪深 3.5 mm での雪面せん断応力は  $\tau < 0.2 \text{ Pa}$  の範囲で流体せん断応力と一致していたが、 $\tau > 0.2 \text{ Pa}$  では雪面せん断応力は過大評価したままであった。

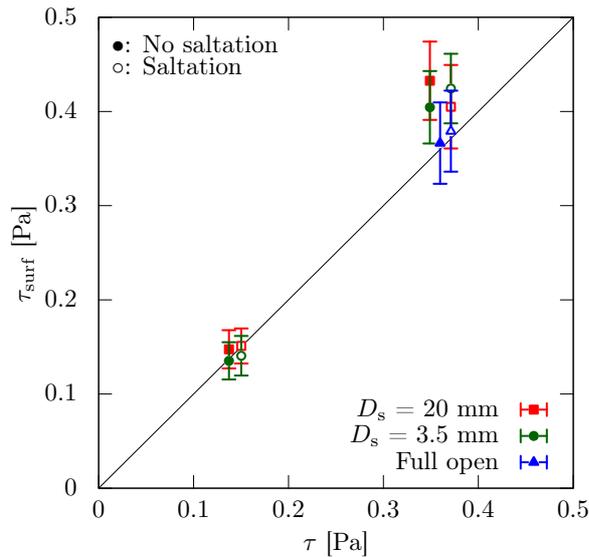


図4 吹雪時の流体せん断応力と雪面せん断応力の比較

### 3.3 雪面せん断応力の過大評価

我々は、雪面せん断応力の過大評価の原因について、次のような仮説を考えた。図2に示される鉛直方向のひずみは風を吹かせた直後にマイナスとなり、3分力計の積載荷重が軽くなったことを意味している。ただし、雪供給装置を停止させた実験データによると、風速が増加するほど鉛直方向のひずみ変化量が大きくなった。つまり、積載荷重の減少は風による雪面の侵食量でなく、図1(b)に示される積雪とアルミフレームの2mmの隙間に起因した風洞底面と風洞内部の圧力差が原因であると考えられる。この圧力差が風向にも影響することで、雪面せん断応力の過大評価が生じたと仮定した。

風洞底面と風洞内部の圧力差を解消するため、3分力計を配置した風洞側面( $x = 12\text{--}14$  m)のドアを開放した状態で実験を行った。積雪深は3.5 mmであり、設定風速は $10\text{ m s}^{-1}$ とし、ドアの下部10 cmを開ける部分開放と全面開放の2通りを試みた。図3において、部分開放と全面開放での雪面せん断応力は流体せん断応力と一致したため、3分力計で風洞内の風による応力を正確に検出することが可能となった。

### 3.4 吹雪時の流体・雪面せん断応力の比較

図4は、吹雪発生前および吹雪時に計測した流体せん断応力と雪面せん断応力の比較を示している。一般的に、吹雪時の摩擦速度は、飛雪粒子による跳躍層の風速弱体化で吹雪発生前より増加する。しかし、雪面近傍の流体せん断応力は粒子せん断応力に分配されるが、粒子せん断応力と粒子せん断応力の和は空間一様に保たれる。図4に示される吹雪発生前後の流体せん断応力の変化量(●→○)は小さいものの、全てのケースで摩擦速度は増加した。雪面せん断応力に関して、積雪深20 mm・設定風速 $10\text{ m s}^{-1}$ のケースを除いて、流体せん断応力と同様に微小な増加が確認された。したがって、3分力計は、雪面で作用する流体せん断応力

のみならず、飛雪粒子の雪面での衝突により生じる粒子せん断応力も検出した。

### 4. まとめ

本研究では、吹雪の物理素過程である風による雪粒子の取り込みで必須となる雪面せん断応力を直接計測するため、3分力計を用いた実験系の構築を風洞実験で実施した。積雪に作用する応力を正確に3分力計で計測するためには、3分力計に載せた積雪を周囲と切り離す必要があった。加えて、風洞底面と風洞内の圧力差が3分力計の出力値に影響を与えたため、風洞壁面を開放する等の対策が必須であった。雪面せん断応力は微小な値であるため、実験系の構築には繊細な作業が求められるものの、吹雪発生前後の雪面せん断応力を高精度で直接計測することに成功した。

### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 20H01983, 21H01489, 21H04601 の助成を受けた。

### 文献

- 新屋啓文, 大宮哲, 砂子宗次朗, 西村浩一, 大風翼 (2021): UAV-SfM 写真測量によるフェンス周辺の吹きだまり観測. 雪氷研究大会 (2021・千葉-オンライン) 講演要旨集, A1-2.
- Niiya, H. and Nishimura, K. (2022): Hysteresis and surface shear stresses during snow-particle aeolian transportation. *Boundary-Layer Meteorol.*, **183**, 447–467.
- Nemoto, M. and Nishimura, K. (2001): Direct measurement of shear stress during snow saltation. *Boundary-Layer Meteorol.*, **100**, 149–170.
- Walter, B, Horender, S., Voegeli, C., and Lehning, M. (2014): Experimental assessment of Owen's second hypothesis on surface shear stress induced by a fluid during sediment saltation. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 6298–6305.