論 文

低温風洞装置を用いた硬雪時の水平面風向直交方向への 吹雪粒子の速度と角度

杉浦幸之助^{1,2*}, 大井聖也¹, 根本征樹³, 小杉健二³

要 旨

風が強まると、雪粒子は雪面と衝突・反発・射出（スプラッシュ過程）を繰り返し、吹雪が立体的に発達していくことになる。本研究では、風洞装置を用いて硬雪時のスプラッシュ過程によりどのように風向に直交する水平方向に吹雪が発達するのか検討した。風洞実験の結果、風速が 6.0 m s^{-1} から 8.0 m s^{-1} へと増すにつれて、粒子に作用する空気抵抗により、水平面衝突速度は速くなり、角度は風向方向に近づいた。また、水平面反発速度の平均は衝突前の 0.66 倍であった。個々の粒子の水平面衝突速度に対する反発の比（水平面反発係数）はおおよそ 0.2 から 1 まで広く分布していた。さらに、これまでの鉛直断面からの観察では捉えることができなかった水平面風向直交方向に大きく反発する粒子が実験的に確認され、このような粒子が水平面風向直交方向への発達を担っているといえる。衝突する際の幾何学的関係から水平面反発角度の分布が説明された。加えて、風速が増すにつれて、鉛直方向と風向直交方向の飛雪流量の割合がわずかに変化していた。同じ吹走距離で比べると風速の増加とともに雪面への衝突回数が少なくなるために風向直交方向の発達が弱かった可能性が示唆された。

キーワード：吹雪、スプラッシュ過程、風洞実験、反発係数

Key words: Blowing snow, Splash process, Wind tunnel experiment, Restitution coefficient

1. はじめに

吹雪とは雪粒子が風によって移動する現象である。風が強まると、雪面に静止していた雪粒子は動きはじめ、雪面を転がりながら移動する（転動）。そして、次第に雪面から離れて雪面の上を跳ねながら、雪面に衝突して反発し、時として新たに雪面から雪粒子を射出させながら移動する（跳躍）。さらに風が強まると、雪粒子は空中を舞いながら移動していくようになる（浮遊）。このような一連の物理過程を経て、雪粒子は風下に移

動していく。飛雪流量や飛雪空間濃度が吹走距離とともに増して、やがて吹雪は平衡状態に達することになる。これらの運動形態の中でも、跳躍運動は質量輸送に最も寄与することから (Kobayashi, 1972)、跳躍に関する研究がなされてきた。例えば、吹雪粒子の跳躍の高さに関する研究 (佐藤・東浦, 2003 など) や、吹雪粒子の跳躍距離に関する研究 (Maeno *et al.*, 1995 ; Kosugi *et al.*, 2004 など) である。また、吹雪のランダムフライトモデルによる跳躍層近傍の輸送特性に関する研究も進んでおり (Nemoto and Nishimura, 2004 ; Niya and Nishimura, 2017)、柔らかい雪面と硬い雪面とでは吹雪粒子の挙動が大きく異なることなども示されている (Kosugi *et al.*, 2004)。さらに、吹雪粒子が雪面に衝突する際のスプラッシュ過程を鉛直断面方向から観測し、跳躍前後での速度や角度の変化などを明らかにした研究も行われている (Sugiura *et al.*, 1997 ; Sugiura and Maeno, 2000)。

1 富山大学

〒930-8555 富山市五福 3190

2 アラスカ大学フェアバンクス校国際北極圏研究センター

2160 Koyukuk Dr, Fairbanks, AK, 99775-7340, USA

3 防災科学技術研究所雪氷防災研究センター新庄雪氷環境実験所

〒996-0091 山形県新庄市十日町高壇 1400

* 問合せ先 : sugiura@sus.u-toyama.ac.jp

しかしながら, このスプラッシュ過程を風向に直交する水平方向に関して観測した研究, すなわち吹雪の水平面風向直交方向の発達についての研究は国内外ともに行われていない. 吹雪は空間的に発達する現象のため, 鉛直断面だけでなく水平断面での運動の理解を進めることが必要である. これにより, 吹雪の鉛直構造と水平構造の理解が進むため, 吹雪がどのように立体的に発達していくのか, 真の描像を捉えることが可能となる.

そこで本研究では, 水平面風向直交方向のスプラッシュ過程に着目し, 低温風洞装置を用いた吹雪の室内実験を実施した. 硬雪面上のスプラッシュ過程により水平面風向直交方向へ雪粒子がどのように挙動するのか, その速度と角度の分布を記述し, 水平構造を考察する.

2. 実験方法

吹雪の水平面風向直交方向の発達を定量的に明らかにするために, 本研究では吹雪粒子の運動が跳躍の際にどのように風向に直交する水平方向に変化するか調べる実験 (水平断面のスプラッシュ過程実験) と, 点発生に近い吹雪がどのように風向に直交する水平方向に発達するか調べる実験 (点発生からの吹雪発達実験) を実施した. 吹雪を発生させるために, 防災科学技術研究所雪氷防災研究センター新庄雪氷環境実験所の低温室内に設置されている風洞装置を用いた (根本, 2012). 測定部の長さ 14 m, 測定部の断面積 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ の回流型風洞装置が大型低温室内に設置されている. 風速は 0 ms^{-1} から 20 ms^{-1} , 温度は $+25^{\circ}\text{C}$ から -30°C の範囲で制御可能となっている. 風洞装置の床に野外で採取したしまり雪をふるいにかけて敷き詰めた. 風洞装置の風上底面には雪粒子供給装置 (幅 77 cm $\times$ 長さ 20 cm $\times$ 深さ 30 cm) が設置されている. これは, 雪粒子が硬い雪面上を跳躍しながら風下に輸送される現象を再現するために必要な装置である. 風洞装置床と同様に, 野外で採取したしまり雪をふるいにかけて雪供給装置に詰めた. ふるいにかけた後の 300 個データから, 本実験で使用した雪粒子の円相当の平均粒径および標準偏差はそれぞれ 0.52 mm および 0.19 mm であった. 図 1 に雪粒子の顕微鏡写真を示す. 2016 年 1 月 6 日から 8 日に吹雪実験を実

図 1 実験で使したしまり雪の顕微鏡写真.

図 2 水平断面のスプラッシュ過程実験での観測機器の配置.

施した.

水平断面のスプラッシュ過程実験では, 風下の吹走距離 10 m の位置に吹雪粒子を可視化するためのレーザー装置を設置した (図 2). 水平方向に雪面から厚さ 1 cm のレーザーを照射した. また吹雪粒子の速度を求めるため, レーザー光を一定時間間隔 (500 Hz) で遮断するシャッター装置を設置した. さらに, 吹雪粒子の運動を録画するためのビデオカメラ (パナソニック製デジタルハイビジョンビデオカメラ HC-V750 M, フレームレート 60 p) を風洞装置の上面に設置した. 実験開始前には風洞装置内の気温を -15°C に固定した. 風洞内の雪面を霧吹きにより固結させることで, 雪面から新たに飛び出す雪粒子を防いだ. また, 雪粒子供給装置の容器全体を雪で充満させた. そして, 風洞中心風速 (以下, 風速) が 6.0 ms^{-1} と 8.0 ms^{-1} のそれぞれに対し, 雪供給量を一定にして ($3.2\text{ cm}^3\text{ s}^{-1}$), 風洞装置を約 20 分間作動させた. 定常状態に達した吹雪が録画された動画を

図 3 吹雪粒子の雪面での衝突の瞬間の例. 1 cm 厚のレーザー光に照らされた固結雪面の凸部に加えて、このレーザー層に入り込み照らされた吹雪粒子の軌跡が破線として可視化されている. 中央部付近に見える吹雪粒子の破線軌跡から、雪面との衝突により吹雪粒子の速度と角度が変化していることがわかる. 粒子の進行方向は左から右へ.

フレーム単位の静止画に分解し、雪面との衝突の瞬間を捉えた静止画 100 枚を解析した. 衝突の前後で水平断面でのそれぞれ 100 個の吹雪粒子の速度と風向に対する角度を求めた (図 3).

また、ここでは衝突直前の吹雪粒子の水平断面速度を水平面衝突速度 v_i 、衝突直後の水平断面速度を水平面反発速度 v_r とする. さらに、衝突直前の吹雪粒子の水平断面角度を水平面衝突角度 θ_i 、衝突直後の水平断面角度を水平面反発角度 θ_r とする. 角度の定義は以下の通りである (図 4). 雪面に平行な平面上で、衝突点を原点とし、風向を x 軸、風向に直交する軸を y 軸とする. 吹雪粒子が第 3 (または第 2) 象限から入射して原点で衝突し、第 1 (または第 4) 象限と第 2 (または第 3) 象限に進んだ場合に第 1 (または第 4) 象限 x 軸からの角度を正 ($0^\circ \sim +180^\circ$)、あるいは第 4 (または第 1) 象限と第 3 (または第 2) 象限に進んだ場合に第 4 (または 1) 象限 x 軸からの角度を負 ($0^\circ \sim -180^\circ$) とする. 粒子速度の解析誤差^{*1}を算出したところ、風速 6.0 ms^{-1} では 0.037 ms^{-1} 、風速 8.0 ms^{-1} では 0.051 ms^{-1} であった. また、粒子角度の解析誤差^{*2}を算出したところ、風速 6.0 ms^{-1} と 8.0 ms^{-1} とで、粒子の速度を 5 ms^{-1} と仮定した場合にはそれぞれ 0.43° および 0.58° であった.

図 4 水平面に投影した雪面上の水平面衝突角度と水平面反発角度.

図 5 点発生からの吹雪発達実験でのネット式吹雪計の配置. (a) 上面からの配置図, (b) 側面からの配置図.

点発生からの吹雪発達実験では、口径 3.2 cm の筒で構成される自作したネット式吹雪計を用いた. ネット材は先行研究 (阿部, 1989; 石本・竹内, 1987 による $105 \mu\text{m}$ 開孔間隔, 開孔率 52%) 相当の化繊ネットを使用した.

このネット式吹雪計を風下の吹走距離 2 m の地点に立体的に設置した. 鉛直方向には雪面から 3 cm, 15 cm, 30 cm の 3 高度に、水平方向には風洞中心から左右に 0 cm, 15 cm, 30 cm の 5 地点に、合計 15 個の吹雪計を設置した (図 5). 吹雪計の配置についてそれぞれに図 6 のように番号を割り振った. 本研究では、幅 1 m, 高さ 1 m と限

図 6 点発生からの吹雪発達実験でのネット式吹雪計の配置番号。風は手前から奥へ。

られた風洞装置内で、雪粒子の挙動をできるだけ阻害することなく効率的に観測機器を配置する必要がある。15 個のネット式吹雪計のうち、風洞側面から 20 cm の位置に一番外側ネット式吹雪計を配置したが、風洞側面による風速の低下がこの一番外側ネット式吹雪計の実験に及ぼす影響を検討した。佐藤ら (1999) による硬雪面での風洞実験では境界層高さは 20 cm 程度、Okaze *et al.* (2012) による軟雪面での実験では 20~30 cm 程度までしか境界層が発達していないことが報告されている。さらに予察的に風洞側面による風速低下の影響を算出^{*3}しても、一番外側ネット式吹雪計に風洞側面による風速の低下が及ぼす影響は小さいと考えられた。加えて、ネット式吹雪計の設置位置が吹走距離 2 m と短いのは、雪粒子が風下へ移動する際に、風洞側面に衝突する可能性をできるだけなくすためである。予察的に風洞側面への衝突の影響を算出^{*4}したところ、吹走距離が 2 m あると風洞側面に達する雪粒子は少ないものと考えられた。

吹雪発達実験もスプラッシュ過程実験と同様に、実験開始前に風洞装置内の気温を -15°C に固定し、風洞内の雪面を霧吹きにより固結させた。点発生に近い吹雪を発生させるために、雪粒子供給装置の中心幅 20 cm の範囲にのみ雪を満たした。この雪粒子供給装置の最大供給量は $162\text{ cm}^3\text{s}^{-1}$ である。そして、風速が 6.0 ms^{-1} と 8.0 ms^{-1} のそれぞれに対し、雪供給装置から供給される雪粒子の供給量を 2 通り (供給量小: $1.3\text{ cm}^3\text{s}^{-1}$, 供

給量大: $1.7\text{ cm}^3\text{s}^{-1}$) に変えて、風洞装置を 5 分間作動させた後、ネット式吹雪計の各ネットに捕捉された雪粒子の質量を計測した。ネット式吹雪計の捕捉率に関して、先行研究によりネット式吹雪計の口径依存性は口径 3 cm から 8 cm の範囲でさほど大きくないこと (阿部, 1989), ネット式吹雪計とスノーパティクルカウンターとの比較から、ネット式吹雪計の捕捉率は風速 5 ms^{-1} 以上で 0.85 と推定されている (石本・竹内, 1987)。よって、本研究で使用したネット式吹雪計の捕捉率も 0.85 と仮定し、この捕捉率を用いて飛雪流量の補正をした。

なお、本実験開始前には、風洞内の雪面を固結させている。しかし、実験開始後に供給された一部の雪が雪面上に堆積すると、実験結果に影響を与えられられる。雪面が硬いと跳躍層が厚くなるものの (竹内・松澤, 1991), 雪が堆積するにしたがい、スプラッシュ過程が変化して跳躍層が薄くなると考えられるためである。スプラッシュ過程実験の吹走距離 10 m での位置、および吹雪発達実験の吹走距離 2 m での位置ともに目視による観察から堆積は生じていなかった。よって、いずれの実験結果にも雪の堆積が実験結果に影響を与えないと考えられる。

3. 結果

3.1 水平断面のスプラッシュ過程実験

3.1.1 速度に関して

風速 6.0 ms^{-1} と 8.0 ms^{-1} での衝突前後での雪粒子の水平面速度の変化を図 7 および図 8 に、表 1 には水平面衝突速度と水平面反発速度の平均・標準偏差をそれぞれ示す。風速 6.0 ms^{-1} と 8.0 ms^{-1} での衝突速度の平均を危険率 5% として Welch の t 検定により比較した結果、有意差が認められた。また、反発速度の平均に関しても危険率 5% として Welch の t 検定により比較した結果、有意差が認められた。図 7 と図 8 から水平面衝突速度と水平面反発速度にはばらつきがあるものの、表 1 から風速が 6.0 ms^{-1} から 8.0 ms^{-1} へと速くなると、水平面衝突速度は $3.0 \pm 0.7\text{ ms}^{-1}$ から $5.0 \pm 0.8\text{ ms}^{-1}$ へ、水平面反発速度は $1.9 \pm 0.7\text{ ms}^{-1}$ から $3.4 \pm 1.0\text{ ms}^{-1}$ へといずれも速くなり、さらにどちらの場合も水平面反発速度の平

図 7 風速 6.0 m s^{-1} での水平面衝突速度と水平面反発速度の関係. R^2 は決定係数.

図 9 風速 6.0 m s^{-1} および 8.0 m s^{-1} での水平面衝突速度と水平面反発速度の関係. R^2 は決定係数.

図 8 風速 8.0 m s^{-1} での水平面衝突速度と水平面反発速度の関係. R^2 は決定係数.

表 1 2 種類の風速に対する水平面衝突速度および水平面反発速度.

風速 (m s^{-1})	水平面衝突速度 (m s^{-1})		水平面反発速度 (m s^{-1})	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
6.0	3.0	0.7	1.9	0.7
8.0	5.0	0.8	3.4	1.0

均は水平面衝突速度の平均に比べて遅くなった. 図 7 と図 8 には原点を通るように最小二乗法で求めた近似直線を記載している. 衝突前後の水平面速度の関係式が以下のように求められた.

$$v_r = 0.64 v_i \quad (\text{風速 } 6.0 \text{ m s}^{-1}) \quad (1)$$

$$v_r = 0.67 v_i \quad (\text{風速 } 8.0 \text{ m s}^{-1}) \quad (2)$$

また, 風速によらずに水平面衝突速度と水平面反発速度の関係を調べるために, 図 9 に風速 6.0 m s^{-1} と 8.0 m s^{-1} で得られたすべての水平面衝突速度と水平面反発速度との関係を示す. 水平面衝突速度は 0.9 m s^{-1} から 7.0 m s^{-1} の範囲にあり, 水平面反発速度は 0.5 m s^{-1} から 5.6 m s^{-1} の範囲にある. 原点を通るように最小二乗法で求めた近似直線から, 水平面衝突速度が増すと水平面反発速度も増し, その割合は 0.66 倍となった. ここで決定係数 R^2 は 0.57 であり, 相関係数は 0.75 とかなり強い正の相関がある. 衝突前後の水平面速度の関係式が以下のように求められた.

$$v_r = 0.66 v_i \quad (\text{風速 } 6.0 \text{ m s}^{-1} \text{ および } 8.0 \text{ m s}^{-1}) \quad (3)$$

3.1.2 角度に関して

風速 6.0 m s^{-1} と 8.0 m s^{-1} での衝突前後の水平面角度変化を図 10 と図 11 に, 表 2 には水平面衝突角度と水平面反発角度の平均・標準偏差をそれぞれ示す. なお, 水平面反発角度には正負があることから, 正負での計算値に加えて, 絶対値での計算値も示している. 風速 6.0 m s^{-1} と 8.0 m s^{-1} での水平面衝突角度の平均を危険率 5% として Welch の t 検定により比較した結果, 有意差が認

図 10 風速 6.0 m s^{-1} での水平面衝突角度と水平面反発角度の関係.

図 11 風速 8.0 m s^{-1} での水平面衝突角度と水平面反発角度の関係.

められた. しかし, 水平面反発角度の平均に関して危険率 5% として Welch の t 検定により比較した結果, 有意差が認められなかった. 図 10 と図 11 から, 水平面衝突角度は風速 6.0 m s^{-1} のとき 20° 以下の範囲に密集しており, 風速 8.0 m s^{-1} のときは 10° 以下の範囲に密集している様子がわかる. また水平面反発角度は水平面衝突角度に比べて絶対値が大きい場合が多く, いずれの風速でも $\pm 50^\circ$ の範囲におおよそ分布している. また $\pm 50^\circ$ 以上の粒子数は風速 6.0 m s^{-1} で 12 個に対し, 風速 8.0 m s^{-1} では 7 個と, 風速 8.0 m s^{-1} のときの方がやや少なかった. さらに水平面反発角度が 90° を超える粒子も確認されるが, これは衝突時に逆に風上に向かって反発することを示している. これまでの鉛直断面からの観察では捉えることができなかった風向直交方向へ移動する雪粒子

表 2 2 種類の風速に対する水平面衝突角度および水平面反発角度とその絶対値.

風速 (m s^{-1})	水平面衝突角度 ($^\circ$)		水平面反発角度 ($^\circ$)		水平面反発角度の絶対値 ($^\circ$)	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
6.0	6.5	7.7	5.0	36.4	30.3	20.7
8.0	3.3	3.4	9.9	28.6	25.7	15.9

図 12 ネット式吹雪計を用いた飛雪流量の空間分布.

が確かに存在していることが確認された. 表 2 から, 風速 6.0 m s^{-1} と 8.0 m s^{-1} とでは, 水平面衝突角度は $6.5 \pm 7.7^\circ$ と $3.3 \pm 3.4^\circ$ であり, 水平面反発角度は $5.0 \pm 36.4^\circ$ (絶対値の場合は $30.3 \pm 20.7^\circ$) と $9.9 \pm 28.6^\circ$ (絶対値の場合は $25.7 \pm 15.9^\circ$) であった. いずれも平均とは離れた水平面反発角度をもつ雪粒子が多いことを示している.

3.2 点発生からの吹雪発達実験

図 12 にネットに捕捉された雪粒子の質量から, それぞれの飛雪流量を求めた結果を示す. 上段 30 cm 高のネットには雪粒子がほとんど捕捉されなかったため, 今後の説明からは省くものとする. 図 12 からいずれの場合も 3 番のネット, すなわち下段中央のネットに捕捉された雪粒子の飛雪流量が最も多かった. 風速が同じで供給量を多くすると (供給量小から供給量大へ), 下段と中段ともに飛雪流量が増加した. 供給量が同じで風速を大きくすると (6.0 m s^{-1} から 8.0 m s^{-1} へ), 下段の飛雪流量がやや減少し, 中段の飛雪流量が増加するという鉛直方向への吹雪の発達が見られた. 一方, 風速 6.0 m s^{-1} のときと 8.0 m s^{-1} のときの飛

図 13 ネット式吹雪計を用いた飛雪流量の割合。

雪流量の水平面風向直交方向の分布を見てみると、風速が大きい方が左右非対称の度合い（歪度）が小さくなっていった。

図 13 には下段（1～5 番）と中段（6～10 番）の飛雪流量の割合を示す。風速が同じで供給量を増やした場合は（ $1.3\text{ cm}^3\text{ s}^{-1}$ から $1.7\text{ cm}^3\text{ s}^{-1}$ へ）、下段中央（3 番）の飛雪流量の割合は $-2\sim-1\%$ の変化しかないが、供給量が同じで風速を大きくした場合は（ 6.0 m s^{-1} から 8.0 m s^{-1} へ）、下段中央（3 番）の飛雪流量の割合が $+4\sim+5\%$ と顕著ではないものの増していることがわかる。加えて、中段中央（8 番）を見てみると、風速が同じで供給量を増やした場合は、飛雪流量の割合は $-3\sim 0\%$ の変化であり、供給量が同じで風速を大きくした場合には、飛雪流量の割合は $+3\sim+6\%$ と下段と同様に増していた。これらは中段でも下段でも風速が大きくなると、水平面風向直交方向への発達が悪くなったことを示している。

さらに水平面風向直交方向の発達を調べるため、図 14 (a) にはそれぞれの位置での下段と中段を足し合わせた飛雪流量（吹雪量相当、ここでは 2 高度総和飛雪流量とする）と、図 14 (b) には下段と中段を足し合わせた 2 高度総和飛雪流量の割合を示す。図 14 (a) より、風速が同じで供給量を増やした場合は、いずれの位置でも 2 高度総和飛雪流量は大きく増加するものの、供給量が同じで風速を大きくした場合には、2 高度総和飛雪流量の増加はあまり大きくない。これは雪の供給量によってそれぞれの位置の 2 高度総和飛雪流量が決定されており、風速 6.0 m s^{-1} と 8.0 m s^{-1} とともに飽和吹雪量に達していないためである。図 14 (b) より、風速が同じで供給量を増やした場合は、中央（3 番+8 番）の 2 高度総和飛雪流量の割合は $-2\sim-1\%$ の変化であり、供給量が同じで風速を

図 14 ネット式吹雪計を用いた 2 高度総和飛雪流量。
(a) 空間分布、(b) 割合。

大きくした場合には、2 高度総和飛雪流量の割合は $+2\sim+3\%$ と顕著ではないものの増していた。これらのことから、やはり下段と中段を足し合わせた 2 高度総和飛雪流量（吹雪量相当）からも風速が 6.0 m s^{-1} から 8.0 m s^{-1} へと大きくなると、水平面風向直交方向への発達がわずかに弱くなっていた。

最後に、特に 6.0 m s^{-1} のときに、図 12 および図 13 に示されるようにネット式吹雪計 1 番、2 番、6 番、7 番の飛雪流量はそれぞれ 4 番、5 番、9 番、10 番よりやや少なく、図 14 に示されるように 1 番+6 番、2 番+7 番の飛雪流量はそれぞれ 4 番+9 番、5 番+10 番よりやや少なく、特定方向の偏りが見られる。風洞装置の測定範囲内の風の構造は左右対象であることから、この偏りは雪供給装置に起因する誤差ではないかと考えられる。つまり雪供給装置の本来の幅は 77 cm であるものの、本実験では点発生を再現するために雪供給装置の中心幅 20 cm の範囲にのみ雪を満たした。この幅 20 cm の中心がネット式吹雪計の中心 3 番と 8 番からややずれていたのではないかと考えられる。風速 6.0 m s^{-1} （供給量小と大）では、雪供給装置に一度形成した 20 cm 幅の雪を使用し、風速 8.0 m s^{-1} の実験の際には新たに雪供給装置に同じ雪を詰めて新たに幅 20 cm に形成したことから、特に 6.0 m s^{-1} のときに特定方向の偏りが見られたと考えられる。雪供給装置によって雪面近傍の流れが乱されたり、雪供給装置から雪粒子が射出する際の速度に大きな鉛直成分を与えていたという可能性も考えられる。

4. 吹雪粒子の力学的挙動の考察

4.1 大気中で粒子に作用する力

水平断面のスプラッシュ過程実験で得られたように, 風速が増すにつれて, 吹雪粒子の水平面衝突速度が増していた (図 7 と図 8), このことに関して, 衝突により反発する雪粒子の鉛直方向の速度成分が大きくなると, より高い高度に雪粒子が到達できるようになる. 高い高度の風速は速いことから, 雪粒子に作用する風との速度差にもとづく空気抵抗力により, 雪粒子は加速される. 一方で, 雪粒子には重力が作用することから, 跳躍粒子は落下するが, より高い高度に達した雪粒子の滞空時間はより長いことになる. これらのことから, 雪面に落下する雪粒子の水平面衝突速度が増したものと考えられる.

また, 水平断面のスプラッシュ過程実験から, 風速が増すにつれて, 吹雪粒子の水平面衝突角度が浅くなった (図 10 と図 11). これは, 衝突により反発する雪粒子が空中を移動する際に, 風速が増すと風ベクトルの風向方向成分の方が, 風向直交成分よりも大きくなるため, この空気抵抗力を受けて雪粒子の風向方向成分が大きくなり, 水平面衝突角度が浅くなったものと考えられる.

4.2 衝突前後の速度と反発係数

図 7 および図 8 から, 風速 6.0ms^{-1} および 8.0ms^{-1} のときに水平面反発速度は水平面衝突速度のそれぞれ 0.64 倍および 0.67 倍と求められたが, 水平面衝突速度が水平面反発速度を決定する強弱の度合い (決定係数 R^2) をみてみると, 風速 6.0ms^{-1} のときは 0.39, 風速 8.0ms^{-1} のときは 0.18 と, 風速が増すと小さくなっている. 風速 8.0ms^{-1} 時の決定係数が小さいのは, 画像解析の際に算出速度と算出角度に上述の解析誤差が含まれる可能性も考えられるものの, 遅い粒子に加えて, 風速の増加に伴い速い粒子も加わったためと考えられる.

次に, 水平面衝突速度に対する水平面反発速度の比が 1 より小さい場合, 非弾性衝突に加えて, 完全弾性衝突であっても雪面は雪粒子で構成される起伏をもつために, 粒子速度の水平面成分が鉛直面成分へ転化する衝突が考えられる. 一方, 水平面衝突速度に対する水平面反発速度の比が 1 に近い場合には, 水平面成分と鉛直面成分が衝突に

よってあまり変化しない雪面粒子の頂部付近での衝突が考えられる. このように衝突により粒子速度の鉛直面成分と水平面成分の割合が変化することで, 水平面衝突速度に対する水平面反発速度の比が変わりうる. 硬雪面上での本実験から, 風速が増加すると, 水平面衝突速度の平均に対する水平面反発速度の平均の比は 1 より小さく, それぞれ 0.64 から 0.67 へのわずかな変化であった. 風速 6.0ms^{-1} から 8.0ms^{-1} の増加とともにこの比もわずかに増すという傾向は, しまり雪を用いた固結していない雪面上での Sugiura *et al.* (1997) の結果 (それぞれ 0.58 から 0.67 へ) と同様である.

さらに, 水平面衝突速度に対する水平面反発速度の比は水平面の反発係数であり, 衝突前後における運動エネルギーの関係を示している. 雪粒子の衝突によりエネルギーは散逸されるが, そのメカニズムは多様である. 衝突により熱エネルギーとして散逸されたり, 荒岡・前野 (1979) によると, 粒子と氷表面に生じる塑性変形, 氷表面でのクラックの形成, 粒子が氷表面から離脱する際に働く付着力, 粒子と氷表面の微細な凹凸の破壊, 氷表面に液体状の薄膜が存在する時の粘性抵抗, 粒子と氷塊全体の弾性振動があげられている. 荒岡・前野 (1979) によると, 氷球速度 0.5ms^{-1} から 4ms^{-1} の範囲での氷球と氷表面の衝突実験から, 速い粒子速度の反発係数はおよそ一定値 ($0.8 \sim 0.9$) をとるが, エネルギーの損失は衝突速度が遅いほど大きくなり (反発係数 0 から 0.8), その主な原因として氷粒子あるいは氷表面の微細な凹凸や亀裂の影響が示唆されている. 図 15 に本実験で得られた水平面反発係数 (水平面衝突速度に対する水平面反発速度の比) を示す. 水平面反発係数はおよそ 0.2 から 1 と, 荒岡・前野 (1979) と同様に広い範囲にわたっている. 本実験で水平面反発係数が特に小さい場合には, 衝突粒子あるいは雪面粒子の表面の微細な凹凸や亀裂の影響が示唆される.

4.3 衝突前後の角度

水平断面のスプラッシュ過程実験の角度結果 (図 10 と図 11) によると, 水平面反発角度は水平面衝突角度と比べてばらつきが大きくなっている. 表 2 より, 風速 6.0ms^{-1} および 8.0ms^{-1} の水平面衝突角度の標準偏差はそれぞれ 7.7° と 3.4°

図 15 水平面反発係数.

に対し、水平面反発角度の標準偏差はそれぞれ 36.4° と 28.6° である。標準偏差の比は、風速 6.0 ms^{-1} および 8.0 ms^{-1} でそれぞれ 4.7 倍と 8.4 倍と大きくばらついている。雪面がなめらかな水平面であり、衝突粒子が球であれば、鏡面反射してほぼ同じ角度で反発するが、雪面は雪粒子で構成される起伏をもつ面であることが大きく影響して水平面反発角度の範囲が広がったと考えられる (図 16)。これにより、水平面衝突角度に比べて大きな角度で水平面風向直交方向に反発する粒子が存在し、このような粒子が水平面風向直交方向への発達を担っているといえる。

4.4 水平断面および鉛直断面方向の吹雪発達

点発生からの吹雪発達実験により得られた風速 6.0 ms^{-1} と 8.0 ms^{-1} での中央部の飛雪流量の割合には、危険率 5% のカイ二乗検定から有意差はなかったものの、風速が増すと水平面風向直交方向への発達がわずかに弱くなっている。これに関する可能性を以下で考察する。吹雪粒子は、吹走距離 2m の間に大気および雪面と相互に作用しながら風下に移動していくが、大気中での挙動に関して、粒子の軌道に影響を及ぼすものには、風速、あるいは静電気力、さらに揚力などが考えられる。

まず、大気中を舞う際に風向直交方向に影響を及ぼす風速変動の乱流に関して、中立時の水平面風向直交方向への乱れの強さの標準偏差 σ_v を用いると $\sigma_v/u_* \approx 2.0$ (近藤, 1994) である。本実験の風速 6.0 ms^{-1} と 8.0 ms^{-1} での u_* に後注 *3 で求めた 0.28 ms^{-1} と 0.38 ms^{-1} を用いると、 σ_v

図 16 水平面に投影した円粒子の衝突と反発の幾何学的関係の例。水平面衝突角度 θ_i が同じでも衝突粒子と雪面粒子の接触点が異なる場合の水平面反発角度 θ_r は異なる (a の場合は θ_r が正, b および c の場合は θ_r が負, c は θ_r が 90° を超える場合)。

はそれぞれ 0.56 ms^{-1} と 0.76 ms^{-1} と算定される。風速 6.0 ms^{-1} と 8.0 ms^{-1} で吹走距離 2m を進むのに、それぞれ 0.33s と 0.25s かかることになる。水平面風向直交方向の変動に吹雪粒子が完全に追従する場合、2m の吹走距離を進むのに、風速 6.0 ms^{-1} と 8.0 ms^{-1} とで水平面風向直交方向へ進む距離の差はわずか 3.3mm と算定される。よって、吹走距離 2m では乱流による水平面風向直交方向への発達の寄与は小さいと考えられる。また、帯電が起因する力に関して、先行研究によると吹雪粒子に帯電する静電気力が実験的に求められ (Omiya *et al.*, 2011), また粒子軌道が計算されており (Schmidt and Dent, 1993), 鉛直方向への軌道変化の影響が報告されている。しかし本実験では、水平面風向直交方向を対象としており、この方向に意図的に偏在する十分な帯電はないことから、水平面風向直交方向への発達の寄与は小さいと考えられる。さらに、揚力に関して、水平面風向直交方向では、風速勾配の大きい雪面付近の鉛直方向とは異なり、粒子の左右の流体に

生じる速度差ために粒子軌道が変化することは小さいと考えられる。

そこで、雪面での衝突の影響について検討する。1 個の吹雪粒子を追従して非常に多くの衝突を繰り返す場合、衝突時の水平面反発角度を「衝突回数」で平均をとると 0° へ収束することになる（それぞれの衝突時の水平面反発角度分布が独立同分布と仮定）。1 個の吹雪粒子について、最初の風向軸から直交する方向への距離をみると、遠ざかったり近づいたりすることになる。遠ざかっている場合が水平面風向直交方向に発達している場合に相当する。また、非常に多くの吹雪粒子が 1 回のみの衝突を繰り返す場合も、衝突時の水平面反発角度を「粒子数」で平均をとると 0° へ収束することになる（衝突時の水平反発角度分布が独立同分布と仮定）。この非常に多くの吹雪粒子について、最初の風向軸から直交する方向への距離をみると、遠くに反発する粒子もあり、近くに反発する粒子もある。遠くに反発する場合が水平面風向直交方向に発達している場合に相当する。よって、1 個の吹雪粒子が遠ざかったり近づいたり衝突を繰り返しつつ、そのような粒子が同時に非常に多く存在することになる。これを重ね合わせると、最初の風向軸付近に粒子が存在しつつ、風向軸から直交方向に離れても粒子が存在することになる。時間が変化してもそのような構造が保たれると考えられる。

これらをふまえて、点発生からの吹雪発達実験の結果によると、風速が大きくなると同じ吹走距離で比べて水平面風向直交方向への発達がわずかに弱くなっていたが（図 14）、これには以下のような吹雪粒子の衝突回数による影響が考えられる。吹雪粒子の跳躍距離は、一般に風速が大きくなると長くなることが報告されている（Maeno *et al.*, 1995 ; Kosugi *et al.*, 2004）。風速が大きくなると跳躍距離が長くなり、衝突回数は少ないことになる。雪面で衝突する際に吹雪粒子には水平面風向直交方向の力も作用するため、吹雪はその水平面風向直交方向にも発達していくことになる。よって、風速が大きくなると、同じ吹走距離であれば衝突回数が少なくなるために、水平面風向直交方向への発達が鉛直方向に比べて弱くなると考えられる。供給装置の影響の可能性なども考えら

れるものの、本研究では吹雪の構造は同じ吹走距離であれば風速の増加とともに鉛直方向および水平面風向直交方向に均等に相似形として発達することなく、鉛直方向に発達していた可能性が示唆される。

5. ま と め

本研究ではスプラッシュ過程における硬雪面上での水平面風向直交方向の吹雪粒子の挙動を検討するために、低温風洞装置を用いた 2 つの実験を実施した。水平断面のスプラッシュ過程実験と点発生からの吹雪発達実験である。実験にあたって、観測機器の配置に関する妥当性を検討した。解析誤差の検討をふまえて、実験結果から以下のことが明らかになった。

水平断面のスプラッシュ過程実験の結果から、吹雪粒子に作用する空気抵抗により、風速が増すにつれて、水平面衝突速度は速くなり、水平面衝突角度は風向方向に近づいた。また、水平面衝突速度と水平面反発速度の関係を記述する式が求められた。風速の増加によらず、水平面反発速度は水平面衝突速度よりも小さく、6~7 割程度とほぼ一定であった。これは、非弾性衝突に加えて完全弾性衝突であっても吹雪粒子が雪粒子で構成される面に衝突する際の水平断面の幾何学的関係から、粒子速度の水平面成分が鉛直面成分へ転化するためと考えられた。さらに、個々の雪粒子の水平面反発係数はおよそ 0.2 から 1 まで広く分布していた。水平面反発係数が特に小さい場合、衝突粒子あるいは雪面粒子の表面の微小な凹凸や亀裂の影響が示唆された。加えて、水平面反発角度をみると、水平面衝突角度よりも大きく、時として衝突時に逆に風上に向かって反発する粒子も確認された。これまでの鉛直断面からの観察では捉えることができなかった水平面風向直交方向に反発する粒子の存在が確認された。このような粒子が水平面風向直交方向への発達を担っているといえる。吹雪粒子が雪粒子で構成される円に衝突する際の水平断面の幾何学的関係で反発角度分布が説明された。

点発生からの吹雪発達実験の結果から、風速が 6.0 m s^{-1} から 8.0 m s^{-1} へと増すにつれて、下段の飛雪流量がやや減少し、中段の飛雪流量が増加

するという鉛直方向への発達が見られた。また、下段でも中段でも風速が増すにつれて中央部の飛雪流量の割合がわずかに増加した。これは同じ吹走距離で比べると、風速が増すと水平面風向直交方向の吹雪の発達が相対的に弱いことを示している。つまり、供給装置の影響の可能性も考えられるものの、風速が増すと吹雪粒子の跳躍距離は長くなり、跳躍距離が長くなると水平面風向直交方向への発達を誘起する雪面への衝突回数が少なくなるために、本研究では水平面風向直交方向への発達が鉛直方向に比べて弱くなったという説明付けが可能と考えられた。

謝 辞

実験に協力していただいた防災科学技術研究所雪氷防災研究センター新庄雪氷環境実験所の大川元造氏に感謝の意を表します。また、雪氷編集委員長の亀田貴雄氏、吹雪特集号論文担当委員の大宮哲氏および3名の匿名査読者から有益なご指摘をいただきました。ここに記して厚く御礼申し上げます。

後 注

*1 粒子速度の解析誤差

風速 6.0ms^{-1} と 8.0ms^{-1} とでカメラから雪面までの距離は同じであるものの、風速が増すと吹雪粒子の軌跡が画面から切れることを避けるため、ズーム機能で画面を縮小させた。このため風速 6.0ms^{-1} では 1cm あたり 134 ピクセルの画像解像度であり、 8.0ms^{-1} では 1cm あたり 98 ピクセルであった。風速 6.0ms^{-1} および 8.0ms^{-1} の場合、1 ピクセルはそれぞれ $0.01/134\text{m}$, $0.01/98\text{m}$ に相当する。レーザー光の遮蔽間隔は 500Hz なので 0.002s に進む破線軌跡で 1 ピクセル分がずれた時の粒子速度の解析誤差は、それぞれ 0.037ms^{-1} ($\equiv (0.01/134)/0.002$), 0.051ms^{-1} ($\equiv (0.01/98)/0.002$) である。

*2 粒子角度の解析誤差

風速 6.0ms^{-1} と 8.0ms^{-1} とで、粒子の速度を 5ms^{-1} と仮定した場合、レーザー光の遮蔽間隔

0.002s に進む距離は 0.01m ($=5 \times 0.002$) である。これは風速 6.0ms^{-1} と 8.0ms^{-1} とで、それぞれ 134 ピクセルと 98 ピクセルに相当する。これだけ進む破線軌跡で 1 ピクセル分が風向に対して垂直にずれた時の粒子角度の解析誤差は、それぞれ 0.43° ($\equiv \text{atan}(1/134)$) および 0.58° ($\equiv \text{atan}(1/98)$) と見積もることができる。

*3 風洞側面による風速低下の影響

対数法則から、

$$U = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad (4)$$

であり (U : 風速, u_* : 摩擦速度, κ : カルマン定数 $=0.4$, z : 高さ, z_0 : 粗度), 風洞中心風速 ($z=0.5\text{m}$ の風速) が 6.0ms^{-1} のときに u_* は 0.28ms^{-1} , 8.0ms^{-1} では 0.38ms^{-1} と見積もることができる。ただし、雪面の z_0 は近藤 (1994) によると 10^{-4}m から 10^{-2}m の範囲であることから、 10^{-4}m として計算した。この u_* を用いて、風洞側面から 20cm の位置 ($z=0.2\text{m}$ に相当) の風速を逆算すると、風洞中心風速が 6.0ms^{-1} と 8.0ms^{-1} のときには、それぞれ 5.4ms^{-1} と 7.1ms^{-1} の風速となる。ここで、 z_0 は地表面状態が森林から草地、平らな裸地と、凹凸が小さくなるにつれて小さくなる定数である。また、風洞装置のアクリル板の側面の z_0 は明らかに雪面の値より凹凸が小さいことから、風洞中心風速が 6.0ms^{-1} と 8.0ms^{-1} のときには、さらに風洞中心風速に近い値となる。よって、側面から 20cm の位置では側面による風速の低下が小さいと考えられる。

*4 風洞側面への衝突の影響

風向に直交する風洞装置の幅は 1m であり、 20cm 幅の雪供給装置の端は風洞側面と 40cm の距離にある。ここで、雪粒子が鉛直方向へ射出する速度を 0.5ms^{-1} 程度 (杉浦・前野, 2003) とすると、再び雪面に衝突するまでの時間は、風と粒子の速度差にもとづく抵抗などを無視して、簡便に $t=2v_z/g$ (t : 滞空時間, v_z : 鉛直方向の初速度, g : 重力加速度) より、 0.1s 程度と見積もることができる。1 回の衝突で 90° の角度 (風洞側面方向) へ反発する場合、 0.1s 間に 40cm 進むには粒子の

水平面速度として 4 m s^{-1} が必要である。また、風洞実験による先行研究 (Maeno *et al.*, 1995; Kosugi *et al.*, 2004) から、雪面が固結している場合、風速 6.0 m s^{-1} および 8.0 m s^{-1} では吹雪粒子の平均跳躍距離はそれぞれ 67 cm および 129 cm である。よって、ネット式吹雪計を設置した吹走距離 2 m の位置では風速 6.0 m s^{-1} 時に 3.0 回、 8.0 m s^{-1} 時では 1.6 回の衝突回数と見積もることができる。よって、吹走距離 2 m 程度では、衝突回数が 2 回程度で風向直交方向へ速い速度が必要なことから、風洞側面に達する粒子は少ないものと考えられる。

文 献

- 阿部 修 (1989): ネット式吹雪計の捕捉率. 国立防災科学技術センター研究報告, **43**, 247-254.
- 荒岡邦明, 前野紀一 (1979): 氷の反発係数の測定. 低温科学, 物理篇, **36**, 55-65.
- 石本敬志, 竹内政夫 (1987): 車載型吹雪計の開発. 土木試験所月報, **413**, 13-17.
- Kobayashi, D. (1972): Studies of snow transport in low-level drifting snow. *Contr. Inst. Low Tem. Sci.*, **A24**, 54 pp.
- 近藤純正 (1994): 水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支—, 東京, 朝倉書店, 350 pp.
- Kosugi, K., Sato, T. and Sato, A. (2004): Dependence of drifting snow saltation lengths on snow surface hardness. *Cold Reg. Sci. Technol.*, **39**, 133-139.
- Maeno, N., Nishimura, K., Sugiura, K. and Kosugi, K. (1995): Grain size dependence of eolian saltation length during snow-drifting. *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 2009-2012.
- 根本征樹 (2012): 低温風洞装置を用いた吹雪の実験的研究. 日本風工学会誌, **37** (1), 34-41.
- Nemoto, M. and Nishimura, K. (2004): Numerical simulation of snow saltation and suspension in a turbulent boundary layer. *J. Geophys. Res.*, **109**, D18206, doi:10.1029/2004JD004657.
- Niia, H. and Nishimura, K. (2017): Spatiotemporal structure of aeolian particle transport on flat surface. *J. Phys. Soc. Japan*, **86** (5), 054402, 10.7566/JPSJ.86.054402.
- 佐藤 威, 東浦将夫 (2003): 吹雪跳躍層の鉛直構造と気象・積雪条件の関係. 雪氷, **65** (3), 197-206.
- 佐藤 威, 小杉健二, 佐藤篤司 (1999): 雪粒子を用いた風洞実験による吹雪の研究. 寒地技術論文・報告集, **15**, 50-54.
- Sugiura, K. and Maeno, N. (2000): Wind-tunnel measurements of restitution coefficients and ejection number of snow particles in drifting snow: determination of splash functions. *Boundary Layer Meteorol.*, **95**, 123-143.
- 杉浦幸之助, 前野紀一 (2003): 吹雪における雪粒子の衝突・反発・射出. 雪氷, **65** (3), 241-247.
- Sugiura, K., Nishimura, K. and Maeno, N. (1997): Velocity and angle distributions of drifting snow particles near the loose snow surface. *Polar Meteorol. Glaciol.*, **11**, 108-116.
- Schmidt, S. and Dent, J.D. (1993): A theoretical prediction of the effects of electrostatic forces on saltating snow particles. *Ann. Glaciol.*, **18**, 234-238.
- 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.
- Okaze, T., Mochida, A., Tominaga, Y., Nemoto, M., Sato, T., Sasaki, Y. and Ichinohe, K. (2012): Wind tunnel investigation of drifting snow development in a boundary layer. *J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn.*, **104-106**, 532-539.
- Omiya, S., Sato, A., Kosugi, K. and Mochizuki, S. (2011): Estimation of the electrostatic charge of individual blowing-snow particles by wind tunnel experiment. *Ann. Glaciol.*, **52** (58), 148-152.

Velocity and angle of blowing snow particles in the direction perpendicular to the wind over a hard snow surface using a low-temperature wind tunnel

Konosuke SUGIURA^{1,2*}, Seiya OOI¹, Masaki NEMOTO³ and Kenji KOSUGI³

¹ *University of Toyama, 3190, Gofuku, Toyama, 930-8555*

² *International Arctic Research Center/ University of Alaska Fairbanks,
2160 Koyukuk Dr, Fairbanks, AK, 99775-7340, USA*

³ *Shinjo Cryospheric Environment Laboratory/ Snow and Ice Research Center/ National Research Institute
for Earth Science and Disaster Resilience, 1400, Takadan, Tokamachi, Shinjo, Yamagata 996-0091*

* *Corresponding author: sugiura@sus.u-toyama.ac.jp*

Abstract: As the wind becomes strong, snow particles repeat an impact/rebound/ejection on the snow surface, and blowing snow develops three-dimensionally. In this study, we investigate how blowing snow develops horizontally perpendicular to the wind direction during the splash process on a hard snow surface using a low-temperature wind tunnel. The obtained results showed that as the wind velocity increased from 6.0 m s^{-1} to 8.0 m s^{-1} , the horizontal impact velocity increased, and the impact angle approached the wind direction due to the air resistance acting on the snow particles. The mean horizontal plane rebound velocity was 0.66 times that of the impact velocity. The ratio of the horizontal plane rebound velocity to the horizontal plane impact velocity of individual snow particles was widely distributed, ranging approximately from 0.2 to 1. Besides, large rebound snow particles were experimentally observed in the direction perpendicular to the horizontal plane wind direction, which had not been captured by previous observations from a vertical cross-section. The distribution of the horizontal plane rebound angle was explained by the geometric relationship of the collision. These snow particles are responsible for development horizontally perpendicular to the wind direction. In addition, as the wind velocity increased, the percentage of the blowing snow mass flux in the vertical and perpendicular directions to the wind changed slightly. The development in the direction perpendicular to the wind direction may have been weaker because the number of collisions with the snow surface decreased as the wind speed increased.

(2020 年 7 月 29 日受付, 2020 年 9 月 9 日改稿受付, 2021 年 4 月 7 日再改稿受付,
2021 年 4 月 7 日受理, 討論期限 2021 年 11 月 15 日)