

## スプラッシュ過程における粒子の3次元挙動の定量化

新屋啓文<sup>1</sup>・中山智靖<sup>2</sup>・富永禎秀<sup>3</sup>

(1:新潟大学研究推進機構 2:新潟大学理学部 3:新潟工科大学工学部)

### 1. はじめに

地表面に降り積もった雪が風により舞い上げられる現象を吹雪と呼ぶ。吹雪は、視程障害や吹きだまり、着雪といった付随現象を引き起こすため、時として大規模な雪氷災害を引き起こす。2021年1月19日に宮城県大崎市の東北自動車道で発生した吹雪による多重衝突事故(約140台)は記憶に新しく、局所的に発生していた吹雪の視程障害が事故の原因と指摘されている。他方で、吹雪発生後の地表面に目を向けると、多様な雪面模様を確認することができる。例えば、飛雪粒子の堆積地形であるスノーバルハン、風による侵食地形であるサスツルギが挙げられる。Kochanski *et al.* (2019)によると、降雪時または降雪直後の吹雪では堆積地形が形成されるのに対し、積雪焼結後に発生した吹雪では侵食地形が雪面に生じると報告されている。つまり、新雪による柔らかい雪面や焼結で硬化した雪面など雪面状態の違いが、吹雪に伴い形成される侵食・堆積地形の変化に現れていると示唆される。吹雪において雪面で生じる物理素過程の1つとして、雪面への飛雪粒子の衝突過程(以後、スプラッシュ過程)がある。スプラッシュ過程は、衝突によって新たな雪粒子を飛散させる侵食過程や衝突した雪粒子の運動停止による堆積過程を担っている。そのため、上記で述べた雪面硬度に依存した地形変化は、スプラッシュ過程の効果で生じた可能性がある。

雪のスプラッシュ過程を測定した先駆的研究として、Sugiura and Maeno (2000)の風洞実験が知られている。高速カメラを用いて、スプラッシュ過程を風向-高さの鉛直2次元断面で撮影することに成功し、雪粒子の2次元挙動の衝突角度・速度依存性が明らかにされている。また、Ammi *et al.* (2009)による粉体物理実験では、無風状態で樹脂製粒子のスプラッシュ過程が計測されており、衝突粒子の反発(Rebound)と新たな飛散粒子(Splash)を区別した解析が3次元で行われている。さらに、O'Brien and Neuman (2016)による飛砂の実験では、風洞上部から照射したレーザーシートの向きを風向に直交する奥行(スパン)方向へ変えることで、飛砂のスパン方向の運動を抽出することに成功している。スプラッシュ過程に関する地表面近傍の粒子挙動の解明は雪氷分野に限らず取り組まれているものの、スプラッシュ過程における粒子の3次元挙動の計測は技術的困難さのため研究例が少ない状態である。

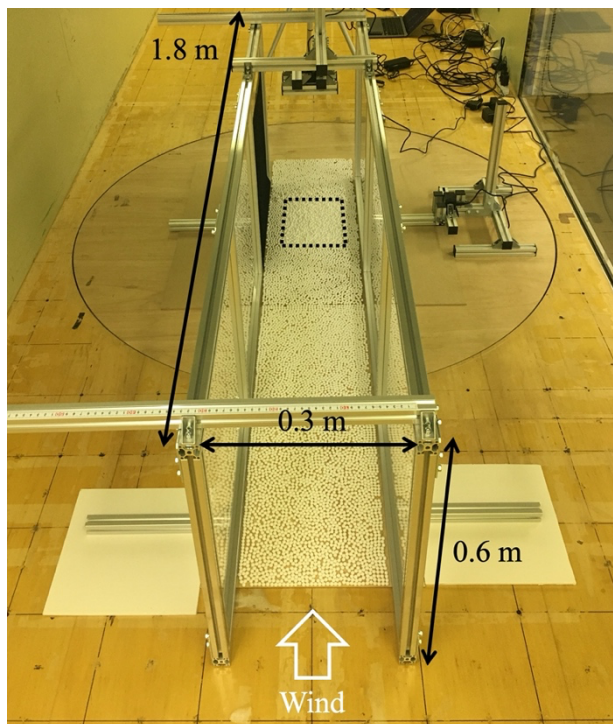


図1 実験系の全体像。黒の点線内は粉体層の位置を示す。

本研究では、雪や砂のスプラッシュ過程を3次元で計測するための実験系構築および幅広い粒径分布を示す雪や砂のスプラッシュ過程の基準値取得を目的とし、均一粒径の発泡スチロール球を用いた風洞実験を実施したので、その結果を報告する。

### 2. 風洞実験

本実験は、新潟工科大学 風・流体工学研究センターの大型境界層風洞(測定部:長さ13 m,幅1.8 m,高さ1.8 m)で行われた。風洞内にアルミフレームとアクリル板を組み合わせた風路を配置し、その底面に発泡スチロール球(直径8 mm,質量13.7 mg,密度 $51.1 \text{ kg m}^{-3}$ )を接着させたベニヤ板を敷いて粗度を与えた(図1)。加えて、スプラッシュ過程を発生させるため、風路の風下側に粒子を堆積させた粉体層(充填率60%)を作成した。実験を行う度、粉体層の表面が平坦になるように均した。

粉体層表面で生じるスプラッシュ過程を撮影するため、デジタルスチルカメラ(Sony, DSC-RX0M2)を風路の上部および側面に2台設置した(図1)。風路内への粒子供給は、風上からの手動散布とした。そして、粉体層をLEDビデオライト(Yonguno, YN-600)で照らしつつ、スプラッシュ過程をフレームレート960 fps・撮影時間4秒で動

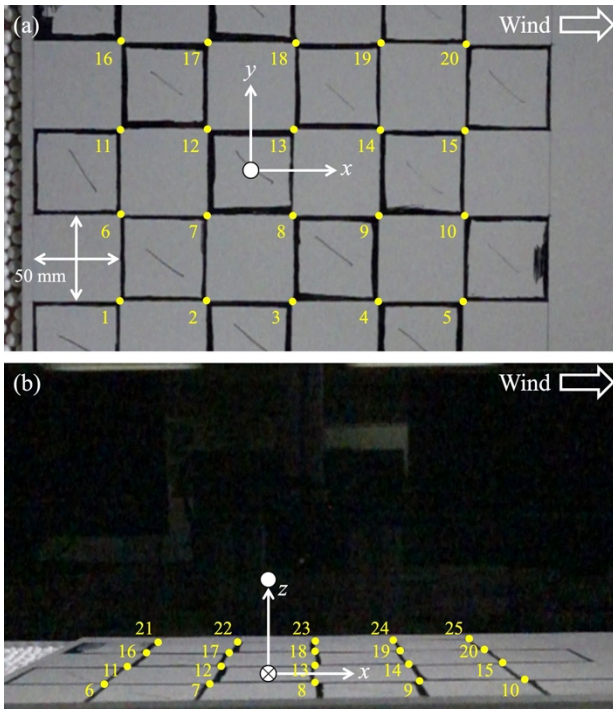


図2 チェッカー盤によるカメラキャリブレーション：(a)上部カメラ、(b)側面カメラ。(b)の×印は盤上の粒子位置を示す。

画撮影した。撮影時の風洞中心風速は、粉体層表面の粒子が風によって飛散しない風速  $5, 7 \text{ m s}^{-1}$  の2条件を採用した。

### 3. 画像解析

同期した2台のカメラで捉えたスプラッシュ過程における粒子挙動を定量化するため、画像解析によって粒子の3次元座標を推定した。座標推定の手順は以下のとおりである。

画像のピクセル座標と実座標の対応関係を把握するため、1辺50 mmの自作チェッカー盤を地表面へ水平に配置し、上部・側面画像に写る交点から画像解像度と画像間の位置関係を整理した(図2)。ここで、実座標は、風向を  $x$  座標、奥行方向を  $y$  座標、鉛直方向を  $z$  座標と定義した。図2の数値は交点の番号を示しており、番号6-20の交点は上部・側面の両画像に写っていた。

動画編集ソフト(Ffmpeg)を用いて、スプラッシュ過程を撮影した動画から1コマ毎の静止画を作成した。本研究では、粉体層への粒子の衝突前後に着目するので、粒子の水平座標を上部画像から算出した(図2(a))。一方、粒子の鉛直座標は側面の画像から推定されるが、粒子の高さは水平座標に基づくチェッカー盤上の位置(図2(b)の×印)から実際に撮影された位置までの距離として計算した。その際、画像解像度は  $y$  方向で異なるため、 $x$  方向の解像度を用いてピクセル距離から実際の高さに変換した。

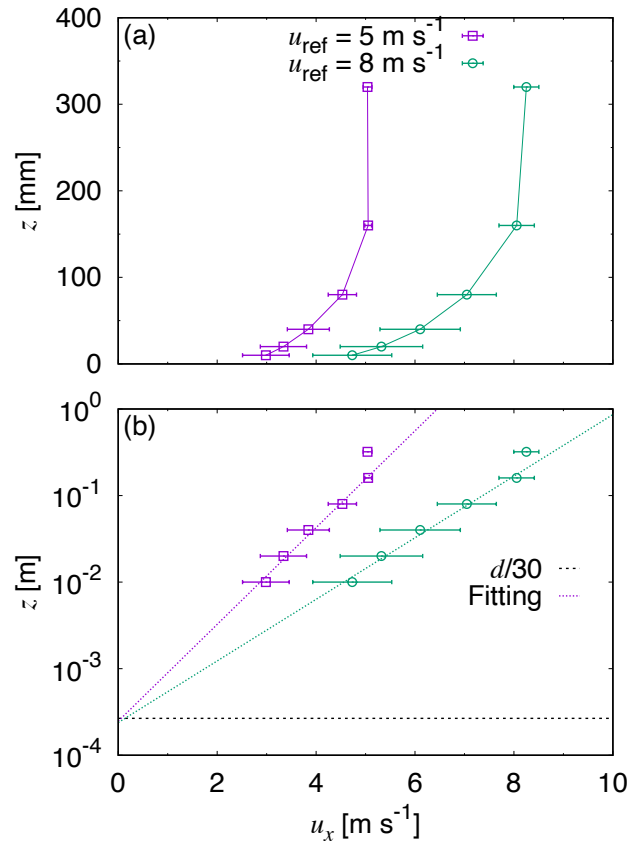


図3 風速の鉛直分布(跳躍粒子なし)。(a)と(b)は同一データであり、点とエラーバーはそれぞれ平均風速と標準偏差を表している。 $u_{ref}$ は風洞中心の風速、 $d$ は粒径(8 mm)である。

## 4. 結果

### 4.1 風速分布

本実験系では、風路内に境界層が発達するよう底面に粗度を与えていた(図1)。そこで、スプラッシュ過程を撮影する前段として、熱線風速計(DANTEC, 90C10)を用いて、風路内の風速の鉛直分布を計測した。計測は粉体層の風上10 cmの地点で行い、ベニヤ板に接着した粒子の頂点を高さ0 mmと定義し、高さ10, 20, 40, 80, 160, 320 mmの計6点で  $x$  方向の風速  $u_x$  を測定した。

図3は、風洞中心風速  $u_{ref} = 5, 8 \text{ m s}^{-1}$  における風速分布を示している。図3(a)で示されるように、風速勾配は地表面近傍で大きくなっており、高さ160 mm以上で風洞中心風速に達していた。また、高さ320 mmの風速を除いて、風速分布が対数則に従っていることも分かった(図3(b))。ここで、粗度の影響を評価するため、風速分布に次式を適用した。

$$u_x(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad (1)$$

式(1)において、 $u_*$ は摩擦速度、 $\kappa$ はカルマン定数(0.4)、 $z_0$ は粗度長である。図3(b)の点線は、高さ320 mmを除い

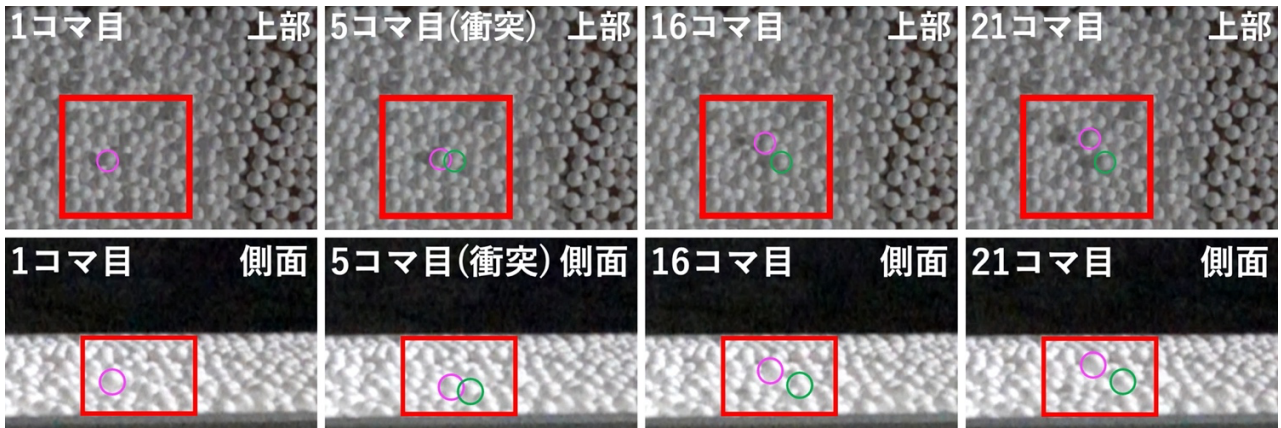


図 4 スプラッシュ過程のナップ写真. 1コマ毎の時間間隔は1/960 sである. 写真中の丸は粒子の反発と飛散を示している.

て式(1)をフィッティングしたものである. Bagnold(1941)によると, 境界層における粗度長は粒径の30分の1に相当すると知られている. 図 3(b)に示されるフィッティング曲線の切片が粗度長であり, これらは本実験で使用した発泡スチロール球の粒径 8 mm から推測される粗度長 ( $d/30$ ) と良く一致していた. 従って, 本実験系で境界層が形成されていたと言える.

#### 4.2 スプラッシュ過程における粒子挙動

図 4 は, 上部と側面に設置した高速カメラで捉えたスプラッシュ過程における粒子挙動の様子を示している. 各画像は動画から切り出された静止画の拡大図であり, 1コマ毎の時間間隔は1/960 sである. 5コマ目は粉体層への入射粒子の衝突状態を表しており, 衝突後, 入射粒子は大気中へ跳ね返っている. さらに, 衝突により粒子が新たに粉体層から飛散した様子も確認された (図 4 の5コマ目以降の丸).

撮影されたスプラッシュ過程の内, 粒子が反発・停止 (堆積) した代表例に関して, 画像解析により粒子の3次元挙動を定量化した. 図 5 は, 粒子の3次元座標の時間変化を示しており, 縦の破線と一点鎖線は粉体層への粒子の衝突を確認できた時間を意味する. 図 5(a), (b)は, それぞれ衝突後に粒子が反発・停止した解析例である. 図 5(a)を見ると, 衝突前の粒子は風向に移動しつつ下降しているが, 奥行方向にほとんど動いていないことが分かる. 衝突後の反発粒子は, 風向に移動しつつ上昇していることに加え, 奥行方向への移動も確認された. これに対して, 図 5(b)を見ると, 衝突前の粒子は風向・奥行ともに移動しながら下降しているものの, 衝突後の停止粒子はいずれの方向にも移動が抑えられていた.

図 5 の粒子座標の時間変化に基づき, 風向・奥行の水平断面と風向・高さの鉛直断面における反発・停止の粒子飛跡を図 6 に示す. 縦の破線と一点鎖線は, それぞれ反発と停止で粒子が粉体層に衝突した  $x$  座標を表している. 反発粒子は, 図 6(a)で衝突による進行方向 (方位角) の変化と1/960 s 間隔の点線から速度の低下を, 図 6(b)で入射

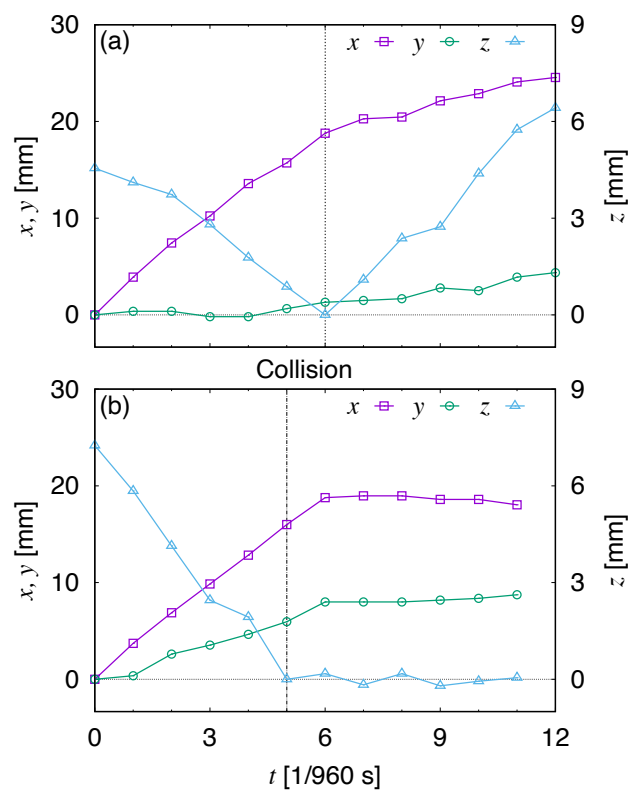


図 5 スプラッシュ過程における粒子座標の時間変化: (a)反発, (b)停止. 風向と奥行方向は0コマ目を  $x=y=0$  mm, 鉛直方向は衝突時を  $z=0$  mm とする.

角を上回る反発時の仰角を確認できる. 一方, 停止粒子は, 衝突点近傍に留まっていたことが分かる. 現状, 解析数は2例と非常に少ないもの, 風洞実験でスプラッシュ過程における粒子の3次元挙動を定量化できると考えられる.

#### 5. まとめ

本実験では, 雪や砂のスプラッシュ過程を3次元で計測するための実験系構築および幅広い粒径分布を示す雪や砂のスプラッシュ過程の基準値取得を目的とし, 均一粒径の発泡スチロール球を用いた風洞実験を実施した. 本実験系で, 風路内に底面粗度を反映した境界層を形成

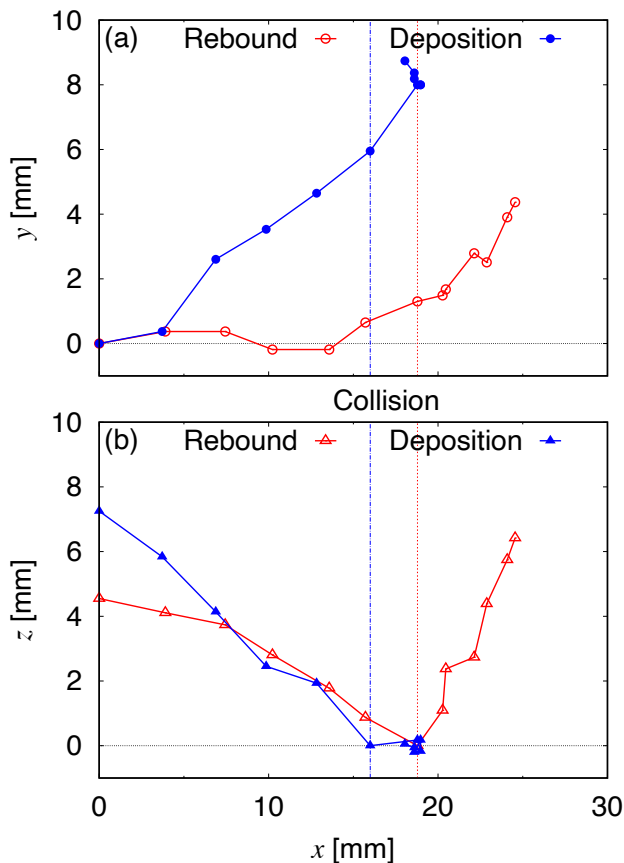


図 6 スプラッシュ過程における反発・停止粒子の飛跡：(a) 水平断面、(b) 鉛直断面。座標データは図 5 と同一である。

するとともに、風路の上部と側面から同期した小型カメラによるスプラッシュ過程の高速度撮影に成功した。そして、撮影した動画を 1 コマ毎の静止画に変換し、画像解析によって粒子の 3 次元座標の推定手法を構築した。スプラッシュ過程を捉えた動画から粒子衝突後の反発と停止の代表例を選択し、画像解析手法を適用した結果、反発粒子の移動方向と速度の変化や停止粒子の粉体層上への堆積過程を定量化することに成功した。今後、雪や砂の基準値となるスプラッシュ過程の 3 次元特徴を明らかにするだけでなく、本実験系を用いて雪・砂のスプラッシュ過程の 3 次元計測を予定している。

#### 文献

- Ammi, M., Oger, M., Beladjine, D., and Valance, A. (2009): Three-dimensional analysis of the collision process of a bead on a granular packing. *Phys. Rev. E.*, **79**, 021305.
- Bagnold, R. A. (1941): *The physics of Blown Sand and Desert Dunes*. Methuen, London.
- Kochanski, K., Anderson, R. S., and Tucker, G. E. (2019): The evolution of snow bedforms in the Colorado Front Range and the processes that shape them. *The Cryosphere*, **13**, 1267–1281.

O'Brien, P. and Neuman, C. M. (2016): PTV measurement of the spanwise component of aeolian transport in steady state. *Aeolian Res.* **20**, 126–138.

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.