

非平衡流れ場に適応可能な飛雪現象のモデリング

(その8) 風洞実験による吹雪境界層中の飛雪粒子の移動速度の PIV 計測

雪粒子移動速度 PIV 吹雪境界層
飛雪現象 風洞実験

正会員 ○佐々木康友^{*1} 同 大風 翼^{*2}
同 富永 禎秀^{*3} 同 持田 灯^{*4}
非会員 根本 征樹^{*5} 正会員 佐藤 威^{*6}
同 吉野 博^{*4}

1. 研究目的 筆者らは、都市・建築空間の積雪分布予測に適用可能な飛雪現象のモデリングについて検討を進めてきた¹⁾。これまでの筆者らが提案してきたモデル化においては、雪粒子の移動速度と流体の移動速度は等しいと仮定してきた²⁾。しかしながら、実際の吹雪境界層中の雪粒子の移動速度と風速の関係は十分明らかになっていない。本研究では、PIV(Particle Image Velocimetry: 粒子画像流速測定法)を用いた風洞実験によって、雪粒子の移動速度と風速との関係を明らかにすることを目的とする。

2. 雪粒子のモデル化検討のための風洞実験の概要

2.1. 風洞実験の概要 実験は防災科学技術研究所・雪氷防災研究センター新庄支所の低温風洞装置を使用した。実験に使用する雪は、同研究所実験棟で作製された人工雪である。実験時の風洞施設内の気温は $-10[^\circ\text{C}]$ とする。ふるいにかけた雪を風洞床に厚さ $2[\text{cm}]$ に様に敷き詰め、風を吹かせ吹雪を発生させる。その後、設定風速に達した瞬間から雪粒子が飛び始めたのを確認し測定を開始する。撮影時間は測定開始から10秒間とする。測定を終え、侵食された雪面を元に戻し各測定点、設定風速で繰り返し測定する。測定項目を表1に示す。

2.2. PIV計測システムの概要 PIVは、撮影した粒子の可視化動画からコンピュータで2時刻の画像間の濃淡の相関を計算し、粒子の移動量を算出することにより多点にわたり速度、ベクトルの向きを求めることができる流体計測手法である。PIV計測には、最大 $1000[\text{fps}]$ の撮影ができるハイスピードデジタル CCD カメラ k-II(カトウ光研)、シート厚約 $1[\text{mm}]$ の Green Laser Sheet 200m/G(カトウ光研)、を2台、解析ソフトに Dipp-Flow(DITECT)を使用した。測定機器の設置方法及び測定点の位置を図1に示す。

2.3. PIV解析条件 撮影された10秒間の動画(6000枚の画像)から5秒間の動画(1500~4500の3000枚の画像)を対象とし解析を行う。カメラの撮影スピードは $600[\text{fps}]$ とし、撮影範囲はx方向227ピクセル(約 $9[\text{cm}]$)、z方向320ピクセル(約 $12[\text{cm}]$)とする。カメラの設定により画像1ピクセル

ルあたり $0.4[\text{mm}]$ となるので、今回の解析結果は、基本的には $0.4[\text{mm}]$ 以上の雪粒子の挙動を解析していると考えられる。解析メッシュサイズは約 $5[\text{mm}]$ 間隔とする。

3. 実験結果及び考察

3.1. 平均速度ベクトルの算出 PIV計測においては、ベクトル算出の過程で実際存在しないベクトル(誤ベクトル)を算出してしまふことがある。本研究では、解析ソフト Dipp-Flow 上での過誤ベクトルの削除、自作の処理プログラムによる周囲ベクトルとの差からの誤ベクトルの削除の2つの方法を併用した³⁾。2枚の可視化画像から得られた瞬時速度ベクトルの解析例を図2に示す。2つの設定風速($U_0 = 5.0, 9.0[\text{m/s}]$)と2つの測定位置($x = 6.0, 11.5[\text{m}]$)における平均移動ベクトルを図3に示す。 $U_0 = 5.0[\text{m/s}]$ では、 $x = 11.5[\text{m}]$ より風上側の $x = 6.0[\text{m}]$ の方が上空にベクトルを算出できない点が多いことが分かる。 $U_0 = 9.0[\text{m/s}]$ では、 $x = 6.0[\text{m}]$ に比べ風下側の $x = 11.5[\text{m}]$ の方が雪粒子の移動速度が速く、上空の誤ベクトルが少ない結果が得られた。これは、風上側では風による雪粒子の輸送が少ないのに対し、風下側では吹雪境界層が十分に発達し、上空まで十分な雪粒子が輸送されたためと考えられる。

3.2. 雪粒子の移動速度と風速の比較 3.1のような時間的な平均を施しても、雪粒子が到達しにくい上方では、安定した結果が得られなかったため、本研究では、解析範囲内($\Delta x = 0.09[\text{m}]$)を高さ毎に流れ方向に平均する空間平均を

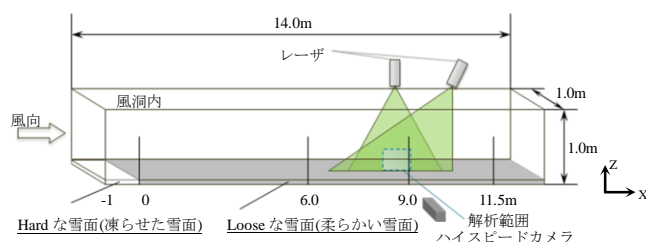
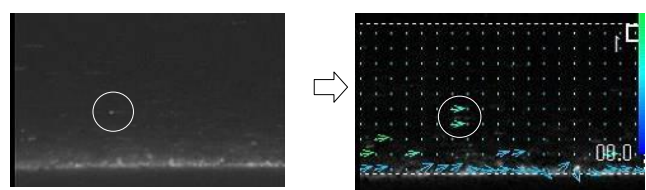


図1 設置方法及び測定点の位置



(1) 解析前 (2) 解析後

図2 設置方法及び測定点の位置

表1 測定項目

測定項目	設定風速(U_0)[m/s]	測定機器
雪粒子の移動速度	5.0, 7.0, 9.0	PIV装置
風速		3次元超音波風速計
		ピトー管

Modeling of snowdrift in non-equilibrium flowfields

(Part8) PIV Measurements of snow particle velocity in a boundary layer developed in a wind tunnel

Yasutomo SASAKI et al.

併用した。また精度の面から雪面に一番低い点 (0.0025[m])、誤ベクトルの多い点 (0.0475[m], 0.0425[m]) の3点も除外した。PIV 解析による雪粒子の移動速度とピトー管により測定された主流方向風速の鉛直分布を図4に示す。図4は吹雪境界層が十分に発達している風下側の測定点 ($x = 11.5[m]$) のものである。設定風速、測定点に関係なく雪粒子の移動速度の方が遅く、設定風速による違いはあるがその差は小さい。また雪粒子の移動速度は風速と同様に対数則にほぼ従う関係になっている。これらの結果は、既往の吹雪流の実験結果⁴⁾、砂粒子の実験結果⁵⁾と概ね同様の傾向である。図4の結果に基づき得られた雪粒子の移動速度と風速の関係を図5に示す。両者に概ね線形の関係があることが分かる。また雪粒子と風速の速度比と設定風速の関係から、今回測定した範囲では、雪粒子の移動速度は風速に対し20~50[%]程度であり、設定風速が速くなると、相対的な雪粒子の移動速度は小さくなる傾向にある。なお前述のように今回の解析結果は、基本的に0.4[mm]以上の雪粒子のみの挙動が捉えられているが、実際にはこれより小さい雪粒子も多く存在すると考えられる。風速が大きくなっても雪粒子の移動速度がほとんど変わらないのは、風速が大きくなるにつれて、より粒径が大きく速度の遅い雪粒子が移動するようになるため、結果的に移動速度の平均値としてはそれほど大きくならないためと推定される。

4. 結論

発達する吹雪境界層中の雪粒子の移動速度をPIVにより計測する風洞実験を行い、以下の知見を得た。

- 1) 設定風速、測定点の変化に関係なく、同じ点の風速に比べ、雪粒子の移動速度の方が遅く、風速に対し20~50[%]程度であった。

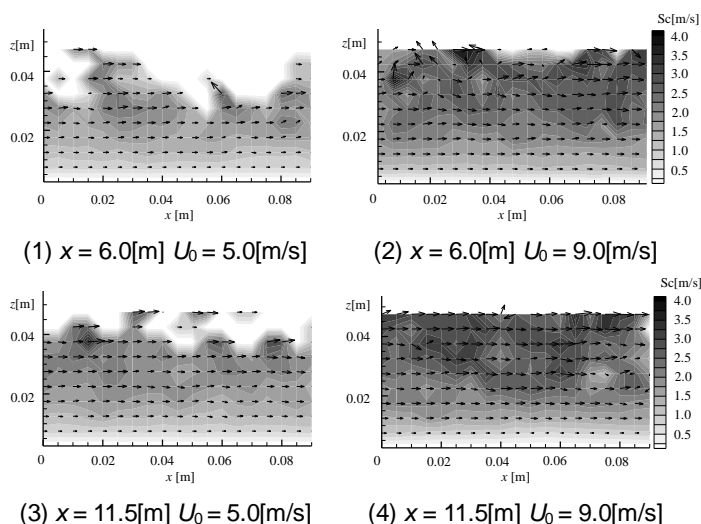


図3 雪粒子の平均移動速度

- 2) 設定風速が速くなると、相対的な雪粒子の移動速度は小さくなる傾向にあった。
- 3) PIV 解析では、基本的に撮影画像の1ピクセル(今回は0.4[mm] = 400[μm])以上の雪粒子の挙動のみが解析結果に反映されるため、解析結果の空間分解能への依存性を今後確認する必要がある。

【謝辞】

本研究の遂行にあたり新潟工科大学平成22年度卒業生の岡田良太氏には多大なご協力をいただいた。また、筆者の大風は、日本学術振興会特別研究員奨励費(DC1)の助成を受け、本研究の一部を遂行した。

【参考文献】

- 1) 富永禎秀他: 雪面の侵食・堆積のモデル化に関する基礎的検討 CFD による建物周辺の飛雪現象の数値予測, 日本建築学会環境系論文集, No.643, pp1083-1089, 2009.9
- 2) 大風翼他: 雪粒子の影響を組み込んだ新たな飛雪モデルの提案, 風工学シンポジウム論文集, Vol.20, pp73-78, 2008
- 3) 可視化情報学会編: PIV ハンドブック, 森北出版, 2002.7
- 4) Kuniaki Araoka, Norikazu Maeno, Observations of Particle Motions in Blowing Snow. Low Temperature Science, Ser. A, 39, 1980
- 5) Wei Zhang, Yuan Wang, Sang-Joon Lee, Two-phase measurements of wind and saltating sand in an atmospheric boundary layer, Geomorphology 88, 109-119, 2007

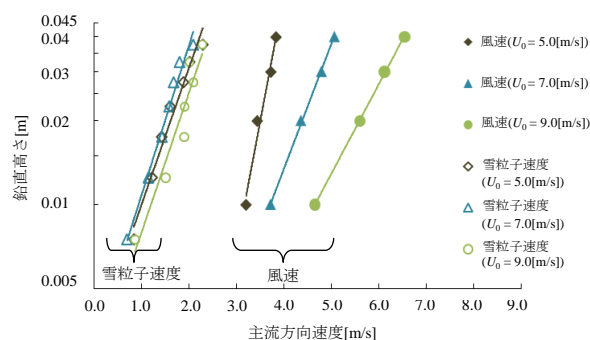


図4 雪粒子の移動速度と風速の比較 ($x = 11.5[m]$)

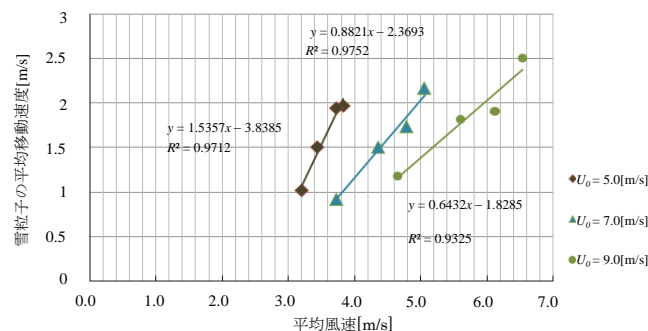


図5 雪粒子の移動速度と風速の関係 ($x = 11.5[m]$)

*1 東北大学大学院工学研究科 大学院生・博士課程前期
 *2 東北大学大学院工学研究科 大学院生・博士課程後期
 *3 新潟工科大学工学部 教授・博士(工学)
 *4 東北大学大学院工学研究科 教授・工博
 *5 (独)防災科学技術研究所雪氷防災センター 主任研究員・博士(地球環境科学)
 *6 (独)防災科学技術研究所雪氷防災センター センター長・理博

Graduate Student, Graduate School of Eng., Tohoku Univ.
 Ph.D. Candidate, Graduate School of Eng., Tohoku Univ.
 Prof., Faculty of Eng., Niigata Inst. of Technol., Dr. Eng
 Prof., Graduate School of Eng., Tohoku Univ., Dr. Eng.
 Senior Research Fellow, Snow and Ice Research Center, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Ph.D.
 Director, Snow and Ice Research Center, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Dr. Sci.