UAV-SfM 写真測量および LiDAR によるフェンス周辺の吹きだまり観測

新屋啓文[1]・大宮哲[2]・砂子宗次朗[3]・西村浩一[4]・大風翼[5]
(1:新潟大学災害・復興科学研究所 2:土木研究所寒地土木研究所 3:防災科学技術研究所雪氷防災研究センター
4:名古屋大学 5:東京工業大学環境・社会理工学院)

1. はじめに

風により雪面から飛ばされた雪粒子が風の弱い箇所で停止することで, 吹きだまりや雪庇が平野部や山岳部で形成される. 吹雪による積雪再配分は車両の立ち往生の原因や雪崩発生の要因となるため, 数値モデルによる吹きだまり・雪庇の予測が期待されている(Tanji et al., 2021). 現状, 数値モデルの検証データに使用可能な面的な観測データは十分に得られておらず, Tabler (1986)に代表される防雪柵周辺の吹きだまり観測は主風向の 2 次元鉛直断面で行われてきた.

これまで我々は, 無人航空機(UAV)と Structure from Motion (SfM)による写真測量を用いて, 吹きだまりの面的分布を誤差数 cm の高精度で推定することに成功した(新屋ら, 2021). しかし, UAV による撮影は快晴や弱風, 雪面のコントラストなど多くの条件を満たさなければならず, 吹雪時や夜間にも吹きだまりの観測ができなかった. 本研究では, 吹きだまりの時間発展を取得する第一段階として, Laser imaging Detection And Ranging (LiDAR)を用いてフェンス周辺に形成される吹きだまりの観測を実施した.

2. 手法

吹きだまり観測は, 釧路圏摩周観光文化センターの敷地内に寒地土木研究所が構築した吹雪観測サイトにおいて実施された. 観測サイトの詳細は, 増澤ら(2021)を参照されたい. 図 1 は観測サイトの空中写真であり, 矢印は卓越風向を表している. フェンスは高さ 1 m の柵に長さ 7.5 m のブルーシートを覆うことで仮設された. 吹きだまりの面的測定は UAV-SfM 写真測量と LiDAR の 2 種類の方法で行われ, 一方, 吹きだまり深さの断面はフェンス面の法線方向にかけて実測された. 観測期間は 2022 年 1 月 6 日から 11 日であったが, 観測サイトの気象データは継続して観測中で回収できていない. 簡単な日程は表 1 のとおりである.

UAV-SfM 写真測量に関して, 吹雪前後に UAV (DJI, Phantom 4 Pro+)で空撮を行い, SfM (Agisoft, Metashape)処理によって数値表層モデル(DSM)を作成した. 地上基準点(GCP)について, 積雪が少なかったため, 境界杭を雪塊に固定し配置した. GCP の位置は, GNSS (Drogger, RWP)による RTK 測位で取得された. 一方, LiDAR (Livox, Horizon)はフェンスと小屋の間に固定治具を立て固定し, その傾き(ヨー, ロール, ピッチ)は GNSS のデジタルモーションプロセッサで計測された(図 2). 使用した LiDAR は長さ 115 mm, 幅 77 mm, 高さ 84 mm と小型であり, レーザー波長 905 nm

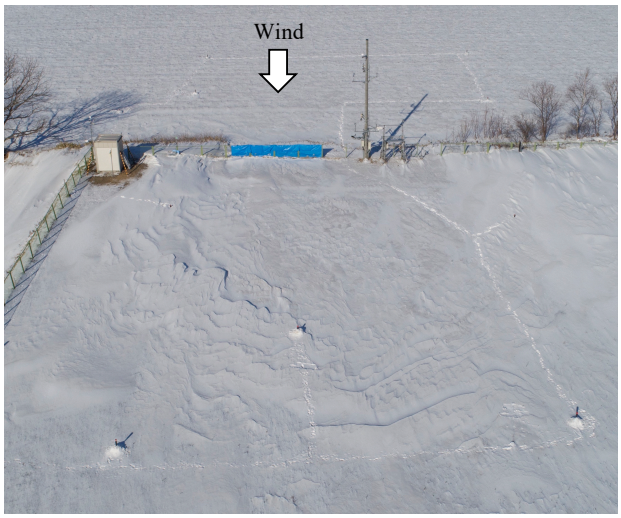

図 1 吹きだまり観測の状況.

表 1 吹きだまり観測の日程.

月日	1月7日	1月8日	1月9日	1月10日
天候	晴れ	晴れ	曇り一時雪	晴れ
吹雪の有無	なし	なし	あり	なし
フェンス	設置			撤去
UAV空撮		午前		午前
LiDAR測定		午後	朝～夕方	午前
断面観測				午後

の視野角は水平方向に81.7°, 鉛直方向に25.1°であり, 最大 48 万点/秒のデータが取得可能である. UAV 空撮に合わせて, LiDAR による吹きだまり測定を行うだけでなく, 吹雪時の吹きだまりの発達過程を 30 分間隔で測定した.

3. 結果

1 月 7 日のフェンス設置後, 吹雪が 1 月 9 日の 9 時から 17 時まで観測サイトで発生し, 吹きだまりが発達する様子を確認できた. 1 月 9 日の風速について, 観測サイトから約 1 km 離れた AMeDAS 弟子屈の気象データを参照した. 吹雪発生の目安である 10 分間平均風速が 5 m/s を越えた時間帯は 6 時 10 分から 18 時 40 分であり, 10 分間平均風速の最大値は 12 時 40 分に記録された 7.7 m/s(風向:北北西)であった.

作成した数値表層モデル(DSM)は吹雪前の 1 月 8 日と吹雪後の 1 月 10 日の 2 つであり, 水平解像度は 1 cm である. 10 点の GCP の内, 8 点を SfM 処理に使用し, 残りの 2

© 2022（公社）日本雪氷学会

図 2 LiDAR の設置状況.

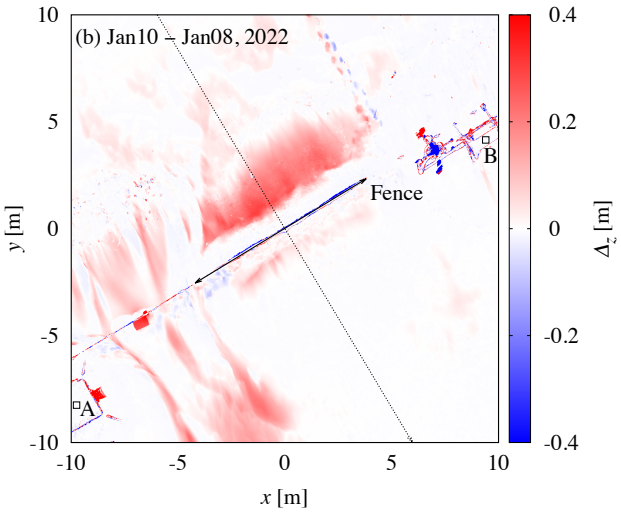

図 3 数値表層モデル(DSM)の差分から推定された吹きだまりの面的分布.

点を精度検証に用いた. SfM 処理と精度検証いずれにおいても, 推定された GCP 位置の誤差は, RTK 測位で得られた位置に対して水平方向で 6 cm 以内・鉛直方向で 2 cm 以内に収まっていた. 図 3 は, 1 月 10 日と 1 月 8 日の DSM 差分から推定されたフェンス周辺の吹きだまりの面的分布を示している. 図 3 の赤色と青色の領域は, それぞれ飛雪粒子の堆積と風による雪面の侵食を表している. 1 月 8 日と 1 月 10 日の DSM の水平方向のズレは, 柵やフェンス, 小屋, 観測塔の位置が一致しているため, 数 cm 以内であった. 一方, 鉛直方向のズレについて, 小屋の屋根(図 3 の領域 A)と観測塔の足場(図 3 の領域 B)の 30 cm 四方で検証したところ, DSM の差分は 1 cm 以内であった. つまり, 吹雪前後に作成した DSM の位置関係は問題なかった.

1 月 9 日の吹雪時の風向は北北西であったため, フェンス風上に高さ 30 cm 程のピークを持つ吹きだまりが形成されて

図 4 吹きだまり深さの状況.

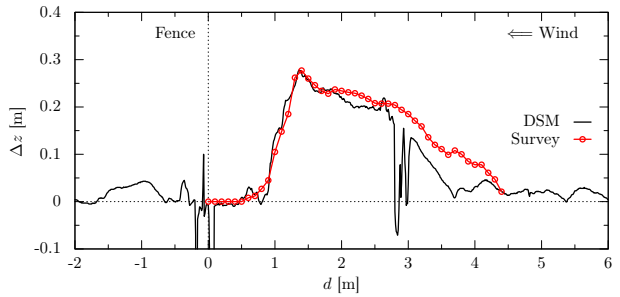

図 5 吹きだまり深さの比較:DSM 差分と実測.

おり, フェンスの風下に高さ 10 cm 弱の吹きだまりも確認される(図 3). 図 4 は, 1 月 10 日に実施した風上の吹きだまり断面観測の写真である. 吹きだまりの下に硬い積雪層が存在したため, 吹きだまり表面から硬化した積雪層までの高さを吹きだまり深さと定義した. 図 5 は, DSM 差分から推定された吹きだまり深さ(図 3 の点線に沿った鉛直断面)と断面観測で測定した吹きだまり深さを示している. 吹きだまりの形状はフェンスの風上 1.5 m の位置に深さ 30 cm のピークを持つ凸型であり, 吹きだまりの範囲はフェンスの風上 1〜4 m に及んでいた. 吹きだまり深さの DSM 差分と実測はフェンスから風上 2 m まで一致しており, 吹きだまりのピークの位置・深さともに良く捉えられていた. しかし, 風上 2 m 以降の DSM 差分は過小評価であった. 植生が雪で完全に覆われていなかったことに加え, 観測前(1 月 6 日)に吹雪いていたため, 植生周りに薄い吹きだまりが形成された可能性が考えられる.

吹きだまり深さに関して, DSM 差分と実測は良い対応関係を示していたため, UAV-SfM 写真測量と LiDAR で得られた結果を比較した. LiDAR によって得られた点群データを UAV-SfM 写真測量の DSM に合わせるため, GNSS で得られた LiDAR の傾き(ヨー, ロール, ピッチ)を用いて, 水平解像度 5 cm の LiDAR 版 DSM を作成した. 図 6 は, 1 月 10 日のフェンス周辺の雪面と構造物の標高を示している:(a) UAV-SfM 写真測量, (b) LiDAR 測定. 図 6 の円は LiDAR の位置を表している. LiDAR の視野角の制約上, 図 6(b)の

© 2022（公社）日本雪氷学会

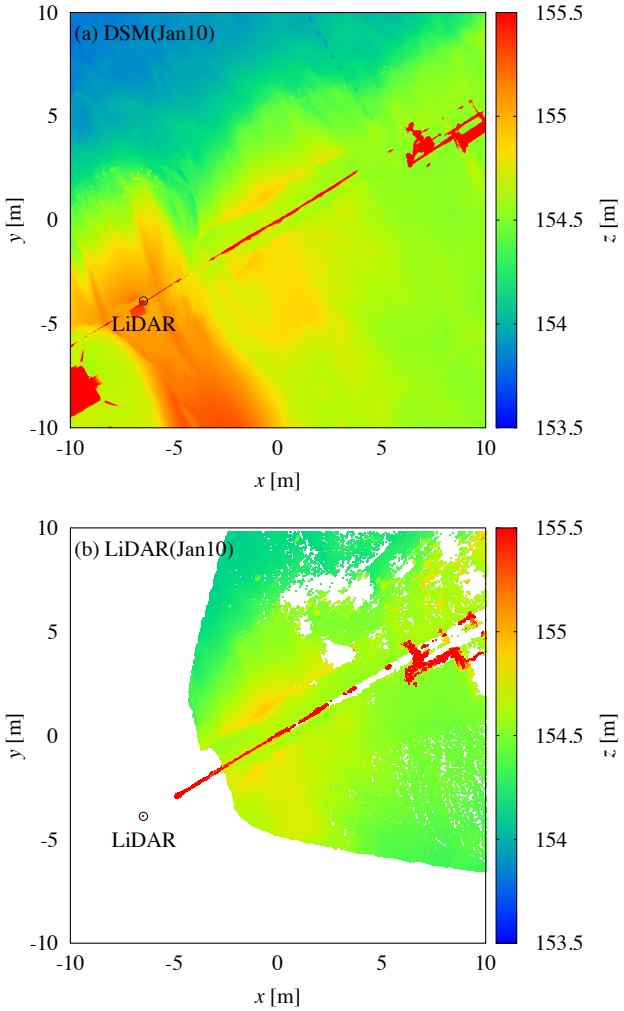

図 6 雪面と構造物の標高:(a) UAV-SfM, (b) LiDAR.

白い範囲は，点群データの存在しない領域を意味する．LiDAR によって，柵や観測塔が確認されるだけでなく，フェンスの風上・風下に標高 155 m 程の吹きだまりが捉えられている．LiDAR 版 DSM は UAV-SfM 写真測量で作成した DSM と良く類似しているため，LiDAR は吹きだまり形状を短時間（数十秒）で高精度に測定できると考えられる．

4. まとめ

本観測では，LiDAR を用いてフェンス周辺に形成される吹きだまり形状を測定した．UAV-SfM 写真測量で得られた DSM と LiDAR の点群データから作成した DSM を比較したところ，柵や観測塔といった巨視的構造物だけでなく，吹きだまりや雪面の起伏も概ね一致していた．注意として，LiDAR から距離が遠くなるほど，LiDAR の傾きを高精度で補正する必要があり，傾斜の大きい場所では点群データを正しく標高に変換できない可能性がある．今後，LiDAR により吹雪時の吹きだまり形状を推定するとともに，飛雪流量と関連付けた吹きだまりの時間発展を議論する予定である．

文献

増澤諭香，大宮哲，大風翼，新屋啓文 (2021): 降雪を伴う吹雪の鉛直構造の解明．雪氷, 83(3), 259–274.

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），A1-2.

Tabler, R. D. (1986): Snow fence handbook. Tabler and Associates.

Tanji, S., Inatsu, M. and Okaze, T. (2021): Development of a snowdrift model with the lattice Boltzmann method. Prog. Earth Planet. Sci., **8**, 57.

© 2022（公社）日本雪氷学会