

雪粒子追跡型吹きだまりモデル Numerical simulation model for snowdrifts tracing snow particles

○丹治 星河
○Seika TANJI

We have developed a numerical simulation model to estimate snowdrift distribution during a drifting snow event. The model uses the lattice Boltzmann method as a computational fluid dynamics solver. Using the estimated wind profile by the lattice Boltzmann method, velocities and trajectories of each drifting snow particle are predicted. This model has succeeded in estimating snowdrift distribution around a simple ideal fence which agreed with the observed results quantitatively. We also investigated the impact of bottom boundary changes due to snowdrift formation during a drifting snow event on the subsequent snowdrift distribution with the model because the model was suitable for applying complicated boundaries such as snowdrift structures. As the next step, we plan to estimate snowdrift distribution over mountainous areas and around realistic snow fences on roads (129 words).

1. はじめに

吹雪とは、地表面に降り積もった雪粒子あるいは降雪粒子が地表付近の強風により移動する現象である。吹雪によって移動した雪粒子は、障害物や地形によって局地的に風が弱まる場所で再堆積し、吹きだまりを形成する。吹きだまりの分布を数値シミュレーションするためには、風および風に伴う雪粒子の軌跡を精緻にモデル化することが重要である。発表者は、数年にわたり、吹きだまり分布を数値シミュレーションするモデルの開発を進めてきた(Tanji et al. 2021^[1]; Tanji et al. 2023^[2]; Tanji 2024^[3])。本発表では、開発したモデルの概要と単純な柵まわりにおける理想実験の計算実績について紹介する。

2. 開発した吹きだまりモデルの概要

開発した吹きだまりモデルは、数値流体計算部と雪粒子計算部とで構成され、3次元空間における風速および雪粒子の軌跡を予報する。

数値流体計算部では、格子ボルツマン法(LBM; McNamara and Zanetti 1998^[4])を用いて風速を計算する。LBMは、仮想流体粒子の速度分布関数を解くことで流体の巨視的な流れ場を求める数値流体計算法である。並列化効率が高く、複雑な境界面に適用しやすいという特長がある。本モデルでは、3次元19方向の速度分布関数を予測し、サブグリッドスケールの渦はSmagorinskyモデル^[5]で計算する。計算格子間隔は5cmである。

雪粒子計算部では、数値流体計算部の計算結果

を使用して、雪粒子の速度および軌跡をラグランジュ的に予測する(Nishimura and Hunt 2000^[6])。計算対象とするのは計算格子1つ当たり1~2個配置した代表雪粒子である。代表雪粒子は、計算領域の風上から流入するものと、強風により積雪面から飛び出すものがある。代表雪粒子が作る吹きだまりの体積は、計算領域流入時の初期高さや積雪面上の風速に依存する。代表雪粒子が地表あるいは積雪面に衝突した際、リバウンドし得るエネルギーを持つか否かで積雪するか否かを判断する。

3. モデルの実績

Tanji et al. (2021)は、このモデルを用いて空隙なしの単純な柵まわりに形成される吹きだまりを計算した。吹きだまり分布の結果は、観測や先行研究の結果と定性的に一致した。また、雪粒子の軌跡の結果から、どの高さから流入した雪粒子が吹きだまり形成に関与するかを明らかにした(図1)。

Tanji et al. (2023)では、モデルの妥当性を定量的に調べるために、柵の大きさや吹雪粒子の流入量を実地と同様の条件としたシミュレーションが実施された。推定された吹きだまり分布は、現場で観測された結果とよく一致した(図2)。特に、柵に対して風上側に形成される吹きだまりの最大高さや最大高さの位置が観測結果と整合的であった。

このモデルで使用されているLBMは、複雑な境界面において適用可能であるという特徴があるため、Tanji (2025)は、吹きだまりの形成に伴う底面境界の変化が後続の吹きだまり分布および風の

場に与える影響を調査した(図 3)。実験は、長さ無限の柵、長さ 1.5 m の柵、下部に隙間を持つ柵の 3 種類に対して行われた。その結果、吹雪イベント中の吹きだまり形成に伴う底面境界の変化を考慮した場合、柵に対して風上側の吹きだまりが高くなるという結果が得られた。柵の風下側は、柵の種類によって結果が異なった。例えば、底面境界の変化を考慮しなかった場合、長さ無限の柵まわりでは吹きだまりを過大評価する場所が少なかった一方、下部に隙間をもつ柵まわりでは吹きだまり高さが過大評価された。

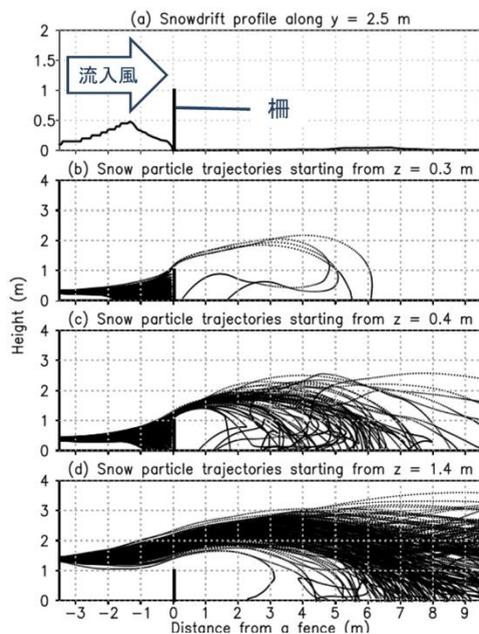


図 1 Tanji et al. (2021)より、(a) 吹きだまり高さ、(b) 高さ 0.3 m、(c) 高さ 0.4 m、(d) 高さ 1.4 m から流入した雪粒子の軌跡を表す。ベクトルは流入風の主風向を表す。

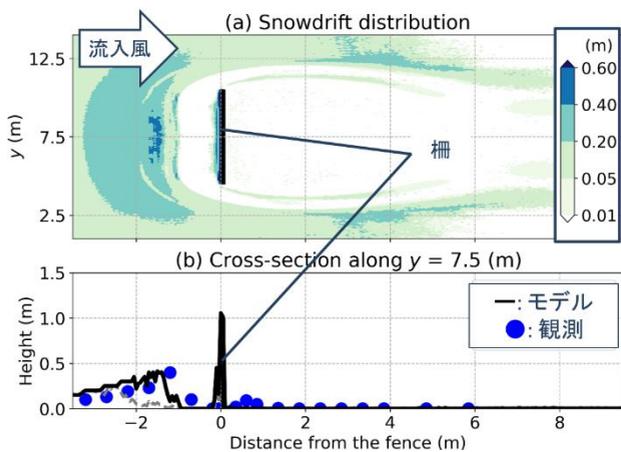


図 2 Tanji et al. (2023)より、(a) 吹きだまり高さの分布、(b) 柵の中心における吹きだまりの断面。線はモデル、青丸は観測の結果を示す。

4. 今後の展望

これまで本モデルは、主に理想的な柵まわりにおける吹きだまり分布を推定を目的としてきた。今後は、現実的な条件下における吹きだまり分布の推定に適用する予定である。例えば、山岳地域への応用が挙げられる。山岳地域における吹きだまりは雪崩の原因の一つとなるため、正確な吹きだまりの推定は重要である。山岳地域といった複雑な境界面において、風および吹きだまり分布を高解像度で推定できることが本モデルは期待される。また、本モデルは防雪柵の研究にも応用できる。防雪柵は道路上の吹きだまり防止を目的に多くの積雪地域に設置されているが、数値シミュレーションを用いた研究は少ない。本モデルで様々な形状の防雪柵まわりの吹きだまり分布を推定し、道路への吹きだまり形成を防止するために最適な防雪柵の形状を調べることができる。

5. 参考文献

- [1] Tanji, S. et al., 2021, Prog. in Earth and Planet. Sci. 8, 57. [2] Tanji, S. et al., 2023, Prog. in Earth and Planet. Sci. 10, 67. [3] Tanji S., 2025, J. Wind. Engineer. Indust. Aerodyn., under review. [4] McNamara, G.R., Zanetti, G., 1988., Phys. Rev. Lett. 61, 2332–2335. [5] Nishimura, K., Hunt, J.C.R., 2000, J. Fluid Mech. 417, 77–102. [6] Smagorinsky, J., 1963, Mon. Wea. Rev. 91, 99–164.

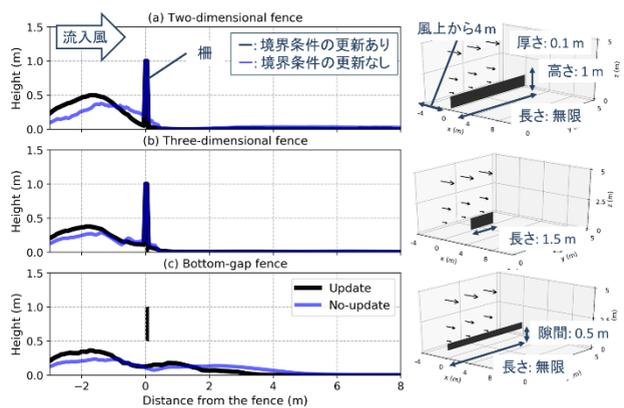


図 3 Tanji et al. (2025)より、(a) 長さ無限の柵、(b)長さ 1.5 m の柵、(c) 下部に隙間を持つ柵それぞれのまわりにおける吹きだまりの高さ。黒線が吹きだまり形成に伴う底面境界の更新あり、青線がなしの計算結果を表している。それぞれの図の右には、それぞれの柵の概念図を示す。