

格子ボルツマン法を用いた吹きだまりモデルと観測との比較 Comparison of the snowdrift model with the lattice Boltzmann method with the observation result

丹治星河^{*1}, 稲津將^{*2}
Seika TANJI, Masaru INATSU

In this study, the three-dimensional fence experiment was conducted to be compared with the 1-dimensional snowdrift height in the observation quantitatively using the observed wind speed and the amount of inflow snow particles during a drifting snow event as the boundary conditions in the model. We used the model developed in Tanji et al. (2021). The snowdrift estimated by the model was able to reproduce the observed features of the peak height and position of snowdrift on the windward of the fence.

1. はじめに

吹雪とは地表面に降り積もった雪が強風により巻き上げられる現象である。吹雪によって移動した雪粒子は、風の弱い場所で再堆積する。このような局所的な積雪は吹きだまりと呼ばれる。吹きだまりの高さが 15 cm 以上の条件下では、自動車は発進が困難となるため、道路上の吹きだまりは交通障害の原因の一つである(金子ら 2011)。そこで、冬季積雪地域では、道路のそばに防雪柵を設置することで吹きだまり対策を行っている。防雪柵には様々な形状のものが存在するが、どのような形状の防雪柵が吹きだまりの形成緩和に最適であるかはわかっていない。

これまで、現地観測(Tabler 1980; Takeuchi 1980; Tabler 1994)、風洞実験(Iversen 1981; Takeuchi et al. 2001)、数値シミュレーション(Beyers et al. 2004; Tominaga et al. 2011a, 2011b; Zwaafink et al. 2014)によって、吹きだまりの形成過程や形成メカニズムが研究されてきた。特に、数値シミュレーションを用いた研究は、計算技術の発展とともに、近年活発に行われている。吹きだまりの形成をシミュレーションする際に最も重要な点は、吹雪の主因である地表風を数値流体計算によって再現することである。先行研究では、RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes equations) や LES(large-eddy simulation)といった数値流体計算法を用いて障害

まわりの風分布をシミュレーションしている。しかし、これらの RANS や LES を用いた数値流体計算は計算コストが高い。また、風に伴う吹雪粒子の軌跡のすべてを陽に解くことも大きな計算コストを要する。

一方、Tanji et al. (2021)で開発された格子ボルツマン法を用いた吹きだまりモデル(以下、LBM 吹きだまりモデルとする)は、前述の先行研究で問題となっていた点を解決できるツールである。このモデルは数値流体計算(CFD)モジュールと雪粒子モジュールとで構成されている。CFD モジュールでは並列化効率の高い格子ボルツマン法(LBM; McNamara and Zanetti 1988)を用いて数値流体計算を行う。雪粒子モジュールでは、有限個の代表雪粒子の軌跡を陽に解くことにより、低い計算コストで吹雪中の雪粒子を追跡する。しかし、Tanji et al. (2021)では、再飛散過程やリバウンド過程といった積雪面付近の雪粒子の運動を陽に解いていないため、吹きだまりの定量的な評価ができない。

そこで、本研究の目的は、Tanji et al. (2021)で開発された LBM 吹きだまりモデルに再飛散過程とリバウンド過程を導入し、モデルの計算結果と観測の結果とを定量的に比較することである。

2. 観測データ

本研究で使用する観測データは、北海道弟子屈

*1 北海道大学大学院理学院 seika@sci.hokudai.ac.jp
Graduate School of Science, Hokkaido University

*2 北海道大学大学院理学院
Faculty of Science, Hokkaido University

町の観測サイトにおける風データである(大風ら 2019)。この観測サイトには、長さ 6 m、厚さ 4 mm、高さ 1 m の柵が設置されており、柵の風上は数 km にわたる平地となっている。柵の隣には観測塔が設置されていて、超音波風速計によって高さ 1 m、1.5 m、3 m、7 m の 4 点における風向風速が観測されている。また、同様の 4 点を通過する雪粒子の個数が SPC(Snow particle counters)によって測定されている。

本研究では、境界条件として観測データを使用する。使用したデータは、2019 年 2 月 18 日に強風及び吹雪が観測された事例のものである。吹雪が収まった翌 19 日に、この吹雪事例で形成された柵中央の吹きだまりの高さが測定された。吹きだまりのデータは、モデルの計算結果との比較に使用した。

3. モデル

CFD モジュールとして、Tanji et al. (2021)と同様に、単一緩和時間衝突則を用いた D3Q19 モデルの格子ボルツマン法を使用した。計算領域は、水路内を一方の端から他方の端へ風が流れる水路とした。上面はすべり条件を、底面は平坦な滑りなし条件を課した。

雪粒子モジュールは、代表雪粒子の移動過程、再飛散過程、リバウンド過程、及び沈着過程の 4 つの過程から成り立っている。雪粒子の移動過程は Nishimura and Hunt (2000)の手法で計算した。再飛散は、積雪面付近の摩擦速度が閾値を上回る場合、代表粒子が飛び出すものとして表現した(Bagnold 1941; Clifton et al. 2006; Werner and Wengle 1991)。また、雪粒子が積雪面に衝突した後、雪粒子が持つ運動エネルギーが 5 cm を超える大きさである場合、その雪粒子は再飛散するものとした(Okaze et al. 2018)。一方、そうでない場合、雪粒子はその場に沈着するものとした。

4. 計算設定

4. 1. 流入条件

CFD モジュールの流入条件として、以下の対数則を満たす層流 $u_0(z)$ を課した。

$$\langle u_0(z) \rangle = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right), \quad (1)$$

ただし、粗度長 $z_0 = 0.1$ mm (Hiroo and Ishida 1973)、カルマン係数 $\kappa = 0.4$ である。摩擦速度

u_* (m s^{-1})は、観測点 4 点における観測データと式(1)との二乗平均誤差の最小値を計算して決定した。

雪粒子モジュールでは、計算領域の風上から代表雪粒子が流入させた。代表雪粒子は、水平方向 5 cm ごと、鉛直方向 2.5 cm ごとに並べた。代表雪粒子が沈着したグリッドは、以下の体積フラックス $v_f(z)$ に相当する積雪を持つ。

$$v_f(z) = \alpha \frac{n(z) \langle u_0(z) \rangle}{\rho_p}. \quad (2)$$

ただし、 $n(z)$ は雪粒子空間濃度(g m^{-3})であり、以下の式で表される(松澤・竹内 2002)。

$$n(z) = \min \left(30, 30 \left(\frac{z}{0.15} \right)^{-\frac{0.30}{\kappa u_*}} \right), \quad (3)$$

雪粒子の密度 $\rho_p = 450 \text{ kg m}^{-3}$ とした。摩擦速度 u_* は、式(1)と同じ値とした。また、 α は吹雪発生時間(hr)に相当する。

4. 2. 実験設定

計算領域は 18 m×15 m×5 m の 3 次元領域で、格子間隔は 5 cm である(図 1)。ただし、CFD モジュールでは、風下 1 m に人工摩擦を設けている(Inagaki et al. 2017)。計算領域内に設置した柵は、長さ 6 m、幅 0.1 m、高さ 1 m の大きさで、これは観測サイトに設置されている柵とほぼ同じ大きさである。CFD モジュールでは、積分時間は 3630 s で、初めの 30 s はスピニング時間として除いた。計算時間間隔は 0.5 ms である。

雪粒子モジュールでは、計算時間間隔は 0.1 s で、積分時間はすべての雪粒子が落下するまでである。風データは 1 s ごとに更新した。また、初期風データを 1 s ごとに変更することで、計 3600 メンバーの風データを用いて雪粒子の軌跡及び積雪分布

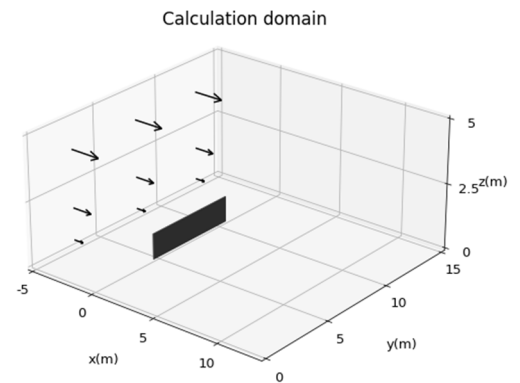


図 1 実験における、計算領域と初期風場の概念図。

を計算した。

5. 結果

5. 1. 流入条件

図 2 は、2019 年 2 月 18 日の風速と雪粒子の体積フラックスの時間変化を高さごとに示している。0830JST ごろに風速が強まり、雪粒子の体積フラックスが増加していることが分かる。特に、0900JST から 1100JST でそれらの値が顕著に大きくなった。よって、本研究では 0900JST から 1300JST の 4 時間を吹雪発生時間と判断し、この 4 時間の平均風速に対して最小二乗誤差を求め、式(1)及び式(2)の摩擦速度 u_* を推定した。

推定した風速の対数分布は 4 点の観測とよく一致していることが分かる(図 3)。一方、雪粒子の体積フラックスの推定結果は、積雪面付近でやや過大評価していた。しかし、体積フラックスが積雪面ほど大きいという観測結果の特徴は、推定された分布でも再現されている。よって、図 3 の風速分布および体積フラックスの分布をそれぞれ CFD モジュールと雪粒子モジュールの境界条件に使用した。

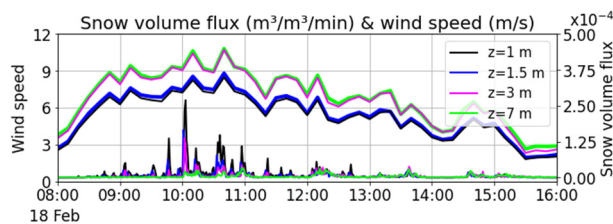


図 2 観測された風速と雪粒子の体積フラックスの時系列。黒線が高さ 1m、青線が高さ 1.5 m、ピンク線が高さ 3 m、緑線が高さ 7 m の結果を表す。

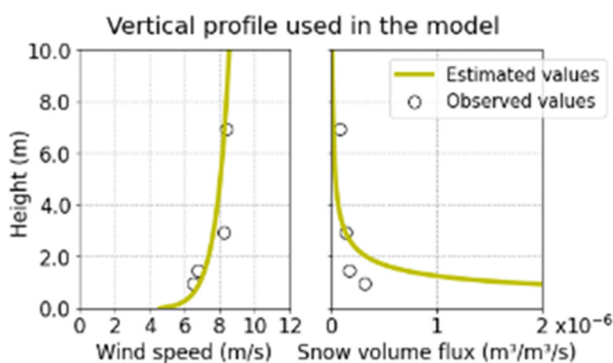


図 3 風速と雪粒子の体積フラックスの鉛直分布。黄色線が推定値を、丸印が観測値を表す。

5. 2. 吹きだまり分布

図 4 は吹きだまり分布の結果を表している。柵まわりに形成された吹きだまりの 2 次元分布には 3 つの特徴がみられる。風上側は柵に近づくにつれて吹きだまりの高さが高くなっている点、柵の真後ろは吹きだまりがほとんど形成されていない点、柵の両端からまわりこむ吹きだまりが風下に形成されている点である(図 4a)。これらの特徴は、先行研究のシミュレーションによる吹きだまり分布の特徴と整合的であった(Beyers et al. 2004; Okaze et al. 2013; Tanji et al. 2021)。また、柵中央における吹きだまりの高さは、観測とよく一致した(図 4b)。特に、柵の風上に形成される吹きだまりの高さのピーク、ピークの位置が観測と一致した。以上より、本研究における LBM 吹きだまりモデルは、吹きだまりの分布を定量的にシミュレーションすることが可能と言える。

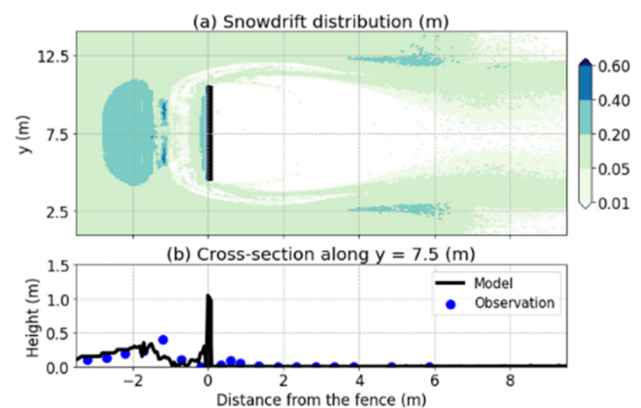


図 4 (a)モデルの吹きだまり分布の結果。(b) $y = 7.5$ mにおける吹きだまりの高さ。黒線がモデルの結果を、青丸が観測の結果を表す。 $x = 0$ における黒線が柵である。

6. まとめ

本研究では、Tanji et al. (2021)で開発した LBM 吹きだまりモデルに、観測された風速・雪粒子の量をモデルの境界条件として使用し、モデルの計算結果と観測の結果を定量的に比較した。風上における吹きだまり分布のシミュレーション結果は、観測の 1 次元分布とよく一致した。また、風下における吹きだまりの 2 次元分布の特徴も先行研究と一致した。

今後は、このモデルを用いて吹雪粒子の再飛散過程、リバウンド過程、粒径、密度に関する感度実験を行うことで、吹きだまり分布に寄与している雪粒子の運動過程や物性を調べる予定である。

また、形成された吹きだまりの形状によって CFD モジュールの境界条件を変化させることで、吹きだまり分布が風分布に与える影響評価も行いたいと考えている。

謝 辞

北海道弟子屈町における観測データは、寒地土木研究所の大宮哲博士、東京工業大学の大風翼准教授より提供いただきました。

参 考 文 献

- 金子学、松澤勝、渡邊崇史、2011：吹きだまりの発達と車両の発進限界に関する実験、平成 23 年度技術研究発表会
- 大風翼、新屋啓文、大宮哲、砂子宗次郎、西村浩一、2019：1 つの吹雪イベントを対象とした 2 次元フェンス周辺の吹きだまり観測、雪氷研究大会(2019・山形)
- 大風翼、富永禎秀、持田灯、2013：2 つの飛雪空間密度の輸送方程式に基づく新たな飛雪モデルの開発 CFD による建物周辺の飛雪現象の数値予測（その 2）日本建築学会環境系論文集、第 78 巻、684 号
- Bagnold R. A., 1941: The physics of blown sand and desert dunes. Methuen, London
- Beyers J. H. M., P. A. Sundsbo, and T. M. Harms, 2004: Numerical simulation of three-dimensional, transient snow drifting around a cube. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 92:725–747.
- Clifton A., J. D. Rüedi, and M. Lehning, 2006: Snow saltation threshold measurements in a drifting snow wind tunnel. J. Glaciol. 39:585–596.
- Hiroo F. and T. Ishida, 1973: Rate of Turbulent Energy Dissipation During Snow Drifting. Low Temp. Sci. Series A, Phys. Sci. 31:69–85.
- Inagaki A., M. Kanda, H. N. Ahmad, A. Yagi, N. Onodera, and T. Aoki, 2017: A numerical study of turbulence statistics and the structure of a spatially-developing boundary layer over a realistic urban geometry. Bound.-Layer Meteor. 164:1651–181.
- Iversen J. D., 1981: Comparison of wind-tunnel model and full-scale snow fence drifts. J. Wind Eng. Ind. Aerod. 8:3:231–249.
- McNamara G. R. and G. Zanetti, 1988: Use of the Boltzmann equation to simulate lattice-gas automata.
- Nishimura K. and J. C. R. Hunt, 2000: Saltation and incipient suspension above a flat particle bed below a turbulent boundary layer. J. Fluid Mech. 417:77–102.
- Okaze T., H. Niiya, and K. Nishimura, 2018: Development of a large-eddy simulation coupled with Lagrangian snow transport model. J. Wind Eng. Ind. Aerod. 183:35–43.
- Tabler R. D., 1980: Geometry and density of drifts formed by snow fences. J. Glaciol. 26:405–419.
- Tabler R. D., 1994: Design guidelines for the control of blowing and drifting snow. Strategic Highway Research Program Report SHRP-H-381.
- Takeuchi M., 1980: Vertical profile and horizontal increase of drift-snow transport. J. Glaciol. 26:481–492.
- Takeuchi Y., S. Kobayashi, T. Sato, K. Izumi, K. Kosugi, W. Xin, J. P. Zhang, and Y. H. Peng, 2001: The effect of wind direction on drift control by snow fences. Annals of Glaciology 32: 159–162.
- Tanji S., M. Inatsu, and T. Okaze, 2021: Development of a snowdrift model with the lattice Boltzmann method. Prog. in Earth and Planet. Sci. 8:57.
- Tominaga Y., A. Mochida, T. Okaze, T. Sato, M. Nemoto, H. Motoyoshi, S. Nakai, T. Tsutsumi, M. Otsuki, T. Uamatsu, and H. Yoshino, 2011a: Development of a system for predicting snow distribution in built-up environments: combining a mesoscale meteorological model and a CFD model. J. Wind Eng. Ind. Aerod. 99:460–468.
- Tominaga Y., T. Okaze, and A. Mochida, 2011b: CFD modeling of snowdrift around a building: an overview of models and evaluation of a new approach. Build. Environ. 46:899–910.
- Werner H. and H. Wengle, 1991: Large-eddy simulation of turbulent flow over and around a cube in a plate channel. In Proceedings of 8th Symposium on Turbulent Shear Flows 155–158.
- Zwaafink C. D. G., M. Diebold, S. Horender, J. Overney, G. Lieberherr, M. B. Parlange, and M. Lehning, 2014: Modelling small-scale drifting snow with a Lagrangian stochastic model based on large-eddy simulations. Bound.-Layer Meteor. 153:117–139.