

非平衡流れ場に適応可能な飛雪現象のモデリング

(その10) 単体建物周辺の野外観測との比較に基づく飛雪モデルの検証

飛雪空間密度 2つの輸送方程式 雪の落下速度
雪の再飛散 CFD

正会員 ○富永 禎秀*1 同 大風 翼*2
同 持田 灯*3

1. はじめに 筆者等は既報¹⁾において、降雪粒子及び雪面から舞い上げられた球形状の粒子の各々に対して、輸送方程式を解く形式の新たな飛雪モデルを提案の提案を行ったが、雪面からの雪の再飛散に関わるモデル係数の検討や実験結果との定量的な比較が課題として残されていた。

本研究では、既往の屋外観測結果²⁾を対象に、モデル係数が建物周辺の積雪分布へ及ぼす影響について検討を行い、積雪分布の定量的な比較を行った。

2. 飛雪モデルの概要 (詳細は文献1参照)

2.1. 2つの飛雪空間密度の輸送方程式 表1に飛雪モデルで用いる方程式群をまとめて示す。①複雑な結晶形状をしている降雪起源の雪粒子の空間密度 $\langle\Phi_{sky}\rangle$ 、②雪面との度重なる衝突を繰り返すことによって複雑な結晶形状が破壊され、降雪粒子の粒径に比べ、より小さな球形状になった雪面起源の雪粒子の空間密度 $\langle\Phi_{surf}\rangle$ の各々の輸送方程式(1), (2)式を解くことで、飛雪現象を予測するものである。

2.2. 雪面における雪粒子の質量収支と積雪深の算出

積雪深を算出するために雪面第一セルの各々の雪面において雪粒子の質量収支を考えた。降雪起源の雪の堆積量 D_{sky} (5式)、雪面から再飛散した雪の堆積量 D_{surf} ((6)式)および摩擦応力による雪面からの雪の剥剥量 E_{surf} (7式)の収支より、正味の堆積量 M_{total} [kg/s]で(8)式で与えた。積雪深の変化量 Δz_s [m/s]は M_{total} の値を積雪密度 ρ_s [kg/m³]と水平断面積 $\Delta x\Delta y$ [m²]で除し、(9)式から与えた。

削剥発生時($u^* > u^*_c$)の雪面の摩擦応力による単位時間当たりの削剥量 E_{surf} [kg/s]は、Anderson 等³⁾、Shao 等⁴⁾が、飛砂を対象として、単一粒径の粒子が空気の摩擦応力により表面から飛び出す質量流量を表現できると提案しており、本研究もこれに倣った (7式)。なお本研究では(7)式中の無次元のモデル係数 ζ を変化させて検討ケースとした (表2参照¹⁾)。

3. 立方体周辺の飛雪現象の数値予測

3.1. 解析概要 老川等²⁾が北海道工業大学のグラウンドに

表1 2つの輸送方程式を用いた飛雪モデル¹⁾

飛雪空間密度の輸送方程式	
$\frac{\partial\langle\Phi_{sky}\rangle}{\partial t} + \frac{\partial\langle\Phi_{sky}\rangle\langle u_i \rangle}{\partial x_i} + \frac{\partial\langle\Phi_{sky}\rangle\langle wf_{sky} \rangle}{\partial x_3} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{v_i}{\sigma_s} \left(\frac{\partial\langle\Phi_{sky}\rangle}{\partial x_i} \right) \right]$	(1)
$\frac{\partial\langle\Phi_{surf}\rangle}{\partial t} + \frac{\partial\langle\Phi_{surf}\rangle\langle u_i \rangle}{\partial x_i} + \frac{\partial\langle\Phi_{surf}\rangle\langle wf_{surf} \rangle}{\partial x_3} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{v_i}{\sigma_s} \left(\frac{\partial\langle\Phi_{surf}\rangle}{\partial x_i} \right) \right]$	(2)
輸送方程式の雪面境界条件	
$\frac{v_i}{\sigma_s} \left(\frac{\partial\langle\Phi_{sky}\rangle}{\partial x_3} \right) \Big _{surface} = 0$	(3)
$\frac{v_i}{\sigma_s} \left(\frac{\partial\langle\Phi_{surf}\rangle}{\partial x_3} \right) \Big _{surface} = \frac{ E_{surf} }{\Delta x\Delta y}$	(4)
雪面の雪の質量収支	
$D_{sky} = -\langle\Phi_{sky}\rangle_p \langle wf_{sky} \rangle \Delta x\Delta y$	(5)
$D_{surf} = -\langle\Phi_{surf}\rangle_p \langle wf_{surf} \rangle \Delta x\Delta y$	(6)
$E_{surf} = -\frac{\pi\zeta}{6} \rho_i \langle u^* \rangle \left(1 - \frac{\langle u^*_t \rangle^2}{\langle u^* \rangle^2} \right) \Delta x\Delta y \quad \text{for } \langle u^* \rangle > \langle u^*_t \rangle$	(7)
$M_{total} = D_{sky} + D_{surf} + E_{surf}$	(8)
$\Delta z_s = \frac{M_{total}}{\rho_s \Delta x\Delta y}$	(9)

て日別積雪深の詳細分布を測定している1辺1[m]の単体立方体建物モデル周辺の流れ場と積雪深分布を対象とし、低風速で風速が安定していた実験ケース SN19(文献2参照、1998年1月14日~1月15日)を解析対象として選定した²⁾。また、雪粒子の物性に関するパラメータは表3、解析条件等は表4参照³⁾。流入面における平均風向・風速は、老川等が積雪深観測時に建物風上側で測定している結果のうち降雪時間9時間⁴⁾での平均値とした。降雪起源の雪の空間密度 $\langle\Phi_{sky}\rangle$ は、降雪時間の基準積雪深が、老川らの実測における基準点での日積雪深増加量(0.1[m])と等しくなるよう与えた⁵⁾。

3.2. 野外観測と解析結果の比較 積雪深はすべて基準点での日積雪深増加量(0.1[m])で基準化している。図1に老川らの野外観測結果²⁾を、図2にCFDにより予測した積雪深の水平分布を示す。いずれの解析結果も、建物側方の剥離域で吹き

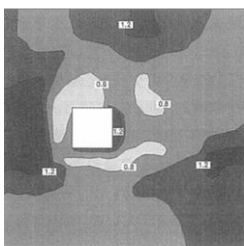


図1 野外観測で得られた無次元積雪深分布²⁾

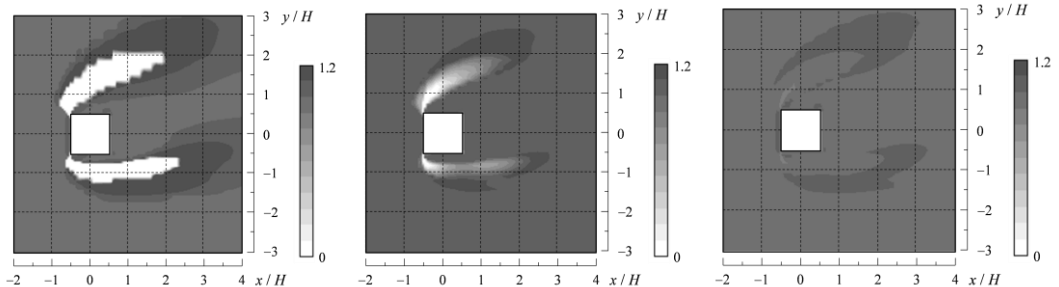


図2 CFDにより得られた無次元積雪深の水平分布 (Case 2の結果はCase 1と非常に近いため割愛)

表2 検討ケース

Case	モデル係数 ζ	備考
Case 1	1.0×10^{-3}	Shao 等の係数 ^{2,4)} と同オーダー
Case 2	1.0×10^{-4}	
Case 3	1.0×10^{-5}	
Case 4	1.0×10^{-6}	

表3 雪粒子に関するパラメータ

降雪起源の雪の落下速度($w_{f,sky}$)	-1.0[m/s]
雪面起源の雪の落下速度($w_{f,surf}$)	-0.2[m/s]
限界摩擦速度(u^*)	0.20[m/s]
雪面の粗度長 z_0	1.0×10^{-4} [m]
積雪密度 ρ_s	100.0[kg/m ³]

表4 解析条件

解析領域	$15H(x_1) \times 10H(x_2) \times 5H(x_3)$
メッシュ分割	$72(x_1) \times 61(x_2) \times 42(x_3)$ 最小メッシュ幅は $H/20$ とした。
流入境界	$\langle u_i \rangle, \langle u_2 \rangle$ は $\alpha = 0.14$ のべき乗則で、主流方向の平均風速は 3.7[m/s]、 $\langle u_3 \rangle = 0$ 。 平均風向は、建物前面法線方向より 10° 回転した向き。 $k: (u^*)^2 / C_\mu^{0.5}$ の仮定より与えた。 ϵ : 局所平衡の仮定より与えた。
側面・上空境界	slip 壁とした。
流出境界	法線方向の勾配をゼロとした。
地表面境界	z_0 型の対数則($z_0 = 1.0 \times 10^{-4}$ [m])を使用した。
建物壁面境界	一般化対数則を使用した。
移流項スキーム	QUICK を使用した。
乱流モデル	Durbin 型改良 $k-\epsilon$ モデル ⁸⁾ を使用した。

払いにより積雪深が減少し、その風下側に吹きだまりが形成されており、野外観測の傾向と概ね定性的には対応している。Case 1 では吹き払いが大きく、Case 4 では吹き払いがごく僅かにしか見られない。これに対し Case 3 では、吹き払い域からその風下側の吹きだまり域まで、野外観測と対応するように積雪分布がなめらかに広がっている。

図3に、建物側方に形成された吹きだまりを通る主流直交方向の建物後方での断面($x/H = 1.5$)の積雪深の鉛直分布を示す。 $\zeta = 1.0 \times 10^{-5}$ としたCase 3の結果が、建物側方に形成された吹きだまりのピークの位置、大きさとも実測と非常によく一致している。建物の後方では、いずれのケースも積雪深がほぼ変化せず1.0であるが、野外観測では、積雪深が一様に減少している。これは、現状のRANSモデルによる平均風速の予測では、建物後方の流れ場の周期的変動を再現できていないためと考えられる。

4. 結論 既往の単体建物モデル周辺の積雪分布実測²⁾に、筆者らの提案する新しい飛雪モデルを適用し、その精度を検証した。削剥に関するモデル係数 ζ の値を変化させても、吹き払いや吹きだまりが形成される位置については、大きな変化はなかった。野外観測結果との対応という観点では、 $\zeta = 1.0 \times 10^{-5}$ としたケースが、建物周辺に形成された吹きだまりのピーク位置、大きさともに観測と比較的よく一致した。

[謝辞] 筆者の大風は、日本学術振興会特別研究員奨励費(22・4770)の助成を受け、本研究の一部を遂行した。

[注釈]

注1) Shao 等⁴⁾は、White 等⁵⁾の石英を用いた風洞実験を参考に $\zeta = 1.74 \times 10^{-3}$ [-]としているが、値を同定するのに十分な実験データがな

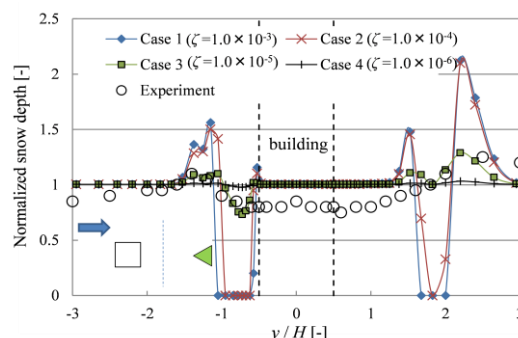


図3 無次元積雪深の鉛直分布(建物後方: $x/H = 1.5$ [-])

く、その値は様々な条件により大きく変化する可能性があるとして述べている。(7)式を吹雪境界層での雪粒子の飛散に適用した Nemoto 等⁶⁾は、Shao 等の検討に習い、 $\zeta \sim 10^{-3}$ のオーダーであるとして、 $\zeta = 1.0 \times 10^{-3}$ を用いていたが、その後の吹雪境界層を対象とした風洞実験との比較により、 $\zeta \sim 10^{-3}$ のオーダーよりも小さい可能性があることを示唆している⁷⁾。

注2) 今回は雪面からの再飛散のモデルの精度を検証するために、建物前方では地吹雪が発生しておらず、建物周辺の風速増速領域のみで再飛散が発生するような低風速の条件を対象とした。

注3) 本解析では、計算step毎の雪面の変化は考慮していない。また、積雪の変化が流れ場へ及ぼす影響は無視できると仮定した。定常状態の流れ場で、飛雪空間密度の輸送方程式を解き、(8)式の積雪深の変化量に降雪時間を乗じて、積雪深を算出した。

注4) 観測期間中の降雪時間は文献2に記載がなかったため、最寄りの札幌管区気象台のAMeDASにおける3時間毎の天気が北海道工業大学のグラウンドと等しいと仮定し、降雪時間を9時間と推定した。

注5) $\langle \Phi_{sky} \rangle$ の流入境界条件については、基準積雪深 h^* [m]を用いて与えた。ここで、 h^* は無風時の降雪時間 Δt_s [s]における建物の影響を受けない領域の積雪深のことである。雪の落下速度は $w_{f,sky}$ なので、鉛直方向の移流フラックスは $\langle w_{f,sky} \rangle \langle \Phi_{sky} \rangle$ [kg/(m²・s)]と書ける。積雪後の雪が融解や圧密などせず、一定の積雪密度であったと仮定し、 Δt_s 間の雪面への雪の流入量を積雪した雪の質量が等しいとすると(10)式となる。 $\langle \Phi_{sky} \rangle$ について解き、(11)式を $\langle \Phi_{sky} \rangle$ の側面及び上空面の流入境界条件とした。

$$\langle \Phi_{sky} \rangle \langle w_{f,sky} \rangle \Delta t_s = \rho_s h^* \quad (10), \quad \langle \Phi_{sky} \rangle = \frac{\rho_s h^*}{\langle w_{f,sky} \rangle \Delta t_s} \quad (11)$$

[参考文献]

- 1) 大風他: 風工学シンポジウム論文集, Vol. 21, pp101-106, 2010
- 2) 老川他: 日本雪工学会誌, Vol.15 No.4, pp3-11, pp283-291, 1999
- 3) Anderson R. S. et al.: Science, vol.241, pp820-823, 1988
- 4) Shao Y. et al.: Boundary-Layer Meteorology 91, pp199-225, 1999
- 5) White B. R. et al.: J. Fluid Mech., Vol.81, pp459-473, 1977
- 6) Nemoto M. et al: J. Geophysical Research Vol. 109, D18206, 14, 2004
- 7) 鈴木他: 雪氷研究大会(2009・札幌)講演要旨集, pp179, 2009
- 8) Durbin, P. A.: Int. J. Heat and Fluid Flow 17, pp.89-90, 1996

[記号表]

x_i	: 空間座標の3成分	[m]
u_i	: 風速の3成分	[m/s]
$\langle f \rangle$: アンサンブル平均	
Φ	: 飛雪空間密度	[kg/m ³]
u^*	: 摩擦速度	[m/s]
u^*_l	: 限界摩擦速度	[m/s]
w_f	: 雪の落下速度	[m/s]
M_{total}	: 単位時間当たりの正味の堆積量	[kg/s]
D	: 単位時間当たりの堆積量	[kg/s]
E	: 単位時間当たりの削剥量	[kg/s]
h^*	: 基準積雪深	[m]
Δz_s	: 積雪深の変化量	[m/s]
添え字		
sky	: 降雪起源の雪粒子に関する諸量	
surf	: 雪面起源の雪粒子に関する諸量	

*1 新潟工科大学工学部 教授・博士(工学)

*2 東北大学大学院工学研究科 日本学術振興会特別研究員 PD・博士(工学)

*3 東北大学大学院工学研究科 教授・工博

Prof., Faculty of Eng., Niigata Inst. of Technol., Dr. Eng. JSPS Research Fellow, Graduate School of Eng., Tohoku Univ., Dr. Eng.

Prof., Graduate School of Eng., Tohoku Univ., Dr. Eng.