

## 非平衡流れ場に適応可能な飛雪現象のモデリング

## (その 11) 雪粒子が流れ場に及ぼす影響を表現するサブモデルの開発

飛雪現象  
CFDSaltation  
 $k$ - $\varepsilon$  モデルCanopy モデル  
吹雪風洞実験正会員  
同○大風 翼<sup>\*1</sup>  
持田 灯<sup>\*3</sup>同 高野 芳央<sup>\*2</sup>  
同 富永 禎秀<sup>\*4</sup>

1. はじめに 筆者らは、これまで都市・建築空間の積雪分布予測に適応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<sup>1)</sup>。しかしながら、雪面から雪粒子が再飛散する際には、雪面付近で飛雪空間密度が高密になるにも関わらず、雪粒子が流れ場へ及ぼす影響は全く考慮していなかった。

そこで本報では、飛雪粒子が流れ場に及ぼす影響を表現するサブモデルの開発を行い、吹雪境界層を対象とした風洞実験<sup>2)</sup>と比較することでモデル係数の最適化を行ったので、その結果を示す。

2. 吹雪境界層を対象とした風洞実験 実験は(独)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を用いて実施した。詳細は文献 2 を参照されたい。図 1 に風洞実験の概略を示す。ふるいにかけた雪粒子(loose snow)を風洞内に敷き詰めることによって、発達過程の saltation 層を作り出した。loose snow の始まる位置を  $x = 0.0$  [m] とし、 $x = 1.0$ 、 $3.0$ 、

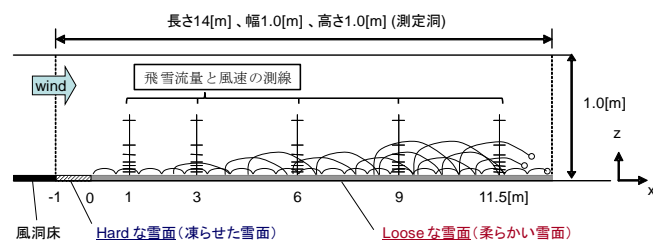


図 1 風洞実験の概略

表 1 雪粒子の影響を組み込んだ  $k$ - $\varepsilon$  モデル

[運動方程式]

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu_t \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} \right) - F_i \quad (1)$$

[ $k$  の輸送方程式]

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \varepsilon + F_k \quad (2)$$

[ $\varepsilon$  の輸送方程式]

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \varepsilon) + F_\varepsilon \quad (3)$$

$$P_k = \left( \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} \quad (4) \quad \nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

表 2 雪粒子の影響を表現する付加項

$$F_i = \frac{1}{2} \times C_f \times \frac{A}{V} \times (1 - R_p) \langle u_i \rangle \sqrt{\langle u_j \rangle^2} \quad (6)$$

$$F_k = (1 - R_p) \langle u_i \rangle F_i \quad (7)$$

$$F_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{k} \times C_{pe} \times F_k \quad (8) \quad A = \frac{3 \langle \Phi \rangle V}{2 D \rho_p} \quad (9)$$

表 3 解析条件

解析領域	14(x) × 1.0(z) [m]
メッシュ分割	137(x) × 3(y) × 57(z)
流入境界条件	$\langle u \rangle$ : 実験値を補間して利用した。 $\langle v \rangle = \langle w \rangle = 0$ とした。 $k$ : 実験値を補間して利用した。 $\varepsilon$ : 局所平衡の過程 ( $P_k = \varepsilon$ ) より与えた。
移流項スキーム	全輸送方程式に QUICK を使用した。
地表面境界条件	$z_0$ 型の対数則を用いた。 ( $z_0 = 1.5 \times 10^{-6}$ [m])

表 4 解析ケース

	設定風速 <sup>(注2)</sup> [m/s]	$R_p$	$C_{pe}$	備考
Case0	7.0			付加項なし
Case1	7.0	0.85	1.0	
Case2	7.0	0.90	1.0	
Case3	7.0	0.95	1.0	
Case4	7.0	0.90	2.0	
Case5	7.0	0.90	3.0	

6.0、9.0、11.5[m] の 5 測定線上において、鉛直方向に 9 点、計 45 点で風速・飛雪流量を測定した。最も風下側の  $x = 11.5$  m では、境界層、saltation 層はともにほぼ平衡状態に達していた<sup>2)</sup>。

3. 粒子の影響を表現する付加項の概要 移動物体の Canopy モデル<sup>3)</sup>の概念を援用することで、 $k$ - $\varepsilon$  モデルの支配方程式に、飛雪空間密度に応じた付加項を施し、雪粒子が流れ場へ及ぼす影響を表現した。それぞれの方程式を表 1 に、雪粒子の影響を表現する付加項を表 2 に示す。なお、記号については次項の記号表を参照されたい。

本研究では、近似的に雪粒子の平均移動速度を平均風速の  $R_p$  ( $0 < R_p < 1$ ) 倍であると仮定した。ここで、本来、抗力係数  $C_f$  や雪粒子の平均移動速度と風速の比  $R_p$  は、各々詳細な実験より別途決定されるものであるが、実現象において雪粒子の粒径や形状のバラつきを考慮した上で、平均的な値を決定することは難しい。そこで、本研究ではまず初歩的な検討として、雪粒子を単一粒径の球と仮定し、これに対応する抗力係数を決定した。続いて、前節で述べた吹雪風洞実験を対象として 2 次元の流体計算を行い、パラメトリックスタディにより流速に対する粒子の速度の比を表す  $R_p$  を同定し、(8)式に含まれるモデル係数  $C_{pe}$  の最適値を推定した。代表面積を与える(9)式に含まれる粒径  $D$  は  $D = 1.0 \times 10^{-4}$  [m] とし、抗力係数  $C_f$  は  $C_f = 4.0$  とした<sup>注1)</sup>。

## 4. パラメトリックスタディによるモデル係数の同定

4.1 パラメトリックスタディの概要 解析条件を表 3 に示す。粒子が流れ場に及ぼす影響を分析するためには、実験結果と解析結果の飛雪空間密度が等しい必要がある。 $R_p$  と  $C_{pe}$  の流れ場への影響をより正確に分析するために、本研究では飛雪空間密度については輸送計算を行わず、解析領域内に実験値を補間して求めた分布を固定し、流れ場が定常状態になるまで計算を行った。

$R_p$  を 0.25~1.00 に、 $C_{pe}$  を 0.0~3.0 に段階的に変化させて解析を行い、はじめに流速に対する粒子の速度の比を表す  $R_p$  のおよそその値を同定し、その値を用いて  $C_{pe}$  が流れ場に与え

Modeling of snowdrift in non-equilibrium flowfields

(Part 11) Development of submodel expressing effects of snow particles on flowfield

Tsubasa Okaze et al.

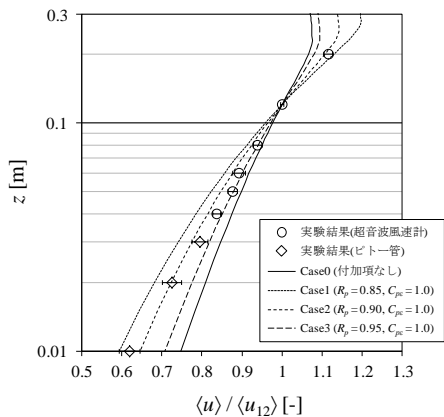


図2  $R_p$ を変化させたときの  
平均風速の鉛直分布

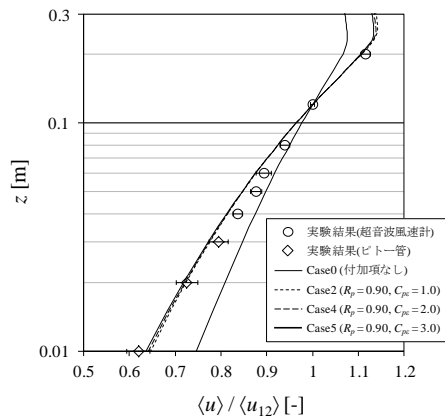


図3  $C_{pe}$ を変化させたときの  
平均風速の鉛直分布

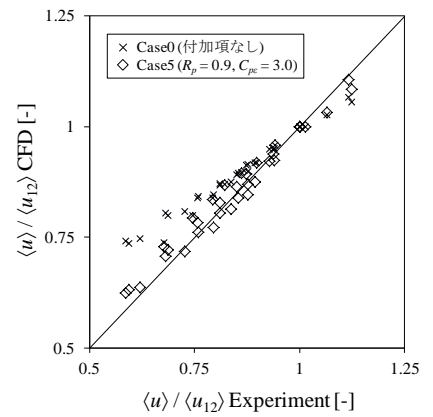


図4 実験結果と解析結果の比較

る影響を分析した。本稿で示す解析ケースを表4に示す。

**4.2 解析結果** 風速は基準高さ  $z_{12}$  ( $= 0.12[\text{m}]$ )における風速  $\langle u_{12} \rangle$ で基準化した<sup>注3)</sup>。図2に  $C_{pe} = 1.0$ で固定し、 $R_p$ を変更したときの  $x = 11.5[\text{m}]$ における平均風速の鉛直分布を示す。 $x = 11.5[\text{m}]$ では吹雪は十分に発達していた。 $R_p$ の減少とともに雪粒子が流れ場に及ぼす抗力が大きくなり、雪面付近の風速は減少した。実験結果と比較すると  $R_p = 0.90$ のものがよく対応している。 $R_p = 0.90$ は、雪粒子が平均的に流速の90%の速度で移動していることを意味する。

図3に  $R_p = 0.90$ で固定し、 $C_{pe}$ を変更したときの  $x = 11.5[\text{m}]$ における風速の鉛直分布を示す。雪面付近で少し変化は見られるものの、 $C_{pe}$ の変化に伴う風速の変化は小さい<sup>注4)</sup>。これは、雪粒子による直接的な乱れの生成( $F_k$ の影響)に比べ、雪粒子の影響で雪面付近の平均風速が減少することによる、速度勾配の増加に伴う乱れの生成( $P_k$ の影響)の方が大きいことを示しており、筆者らの風洞実験結果<sup>2)</sup>とも一致する。

図4に全測定点における実験結果と解析結果( $R_p = 0.90$ 、 $C_{pe} = 3.0$ )の比較を示す。粒子の影響を表現する付加項を導入したことにより全体の傾向としても、実験値をよく再現することができた。

## 5. 結論

- 1) 雪粒子が流れ場へ及ぼす影響を表現する付加項を、移動物体の Canopy モデルを参考に定式化した。
- 2) 吹雪風洞実験を対象とした解析を行い、 $R_p$  及び  $C_{pe}$  の流れ場への影響を分析した。
- 3) その結果、 $C_f = 4.0$  に対応する  $R_p$  の最適値として、 $R_p = 0.90$  を得た。また、 $C_{pe} = 1.0 \sim 3.0$  においては、 $C_{pe}$  の変化が風速に与える影響は小さいことを確認した。

### [謝辞]

本実験を実施するにあたり、(独)防災科学技術研究所雪氷防災研究センター新庄支所の佐藤 威 博士、根本 征樹 博士及びスタッフの方々からは多大な協力を得た。また、本研究の一部は、日本学術振興会 特別研究員奨励費(22・4770/大風)の助成を受けた。ここに記

して深甚なる謝意を表します。

### [注]

注 1) 粒径を  $1.0 \times 10^{-4}[\text{m}]$ 、粒子の相対速度を  $1 \sim 2[\text{m/s}]$  とすると、(10)式より粒子レイノルズ数が  $10$  程度となる。その値を(11)式に示す Schiller and Naumann の実験式<sup>文4)</sup>に代入すると  $C_f \approx 4.0$  が得られるため、今回はその値を用いた。

$$\text{Re}_p = \frac{D \cdot u_p}{\nu} \quad (10)$$

$$C_f(\text{Re}_p) = \frac{24}{\text{Re}_p} (1 + 0.15 \text{Re}_p^{0.687}) \quad (11)$$

注 2) 設定風速とは、流入面( $x = 0.0[\text{m}]$ )における境界層高さより上空の風速のことである。

注 3) 風洞の特性等から、数値解析と実験結果の境界層高さを一致させるのは難しい。最も高い測定点( $z = 0.20[\text{m}]$ )は、上流において実験結果は境界層の外、解析結果は境界層の中に位置し、そこでの風速を用いて基準化した風速では結果の比較が困難である。したがって、実験結果と解析結果の双方において境界層の中だと思われる、上から2番目の測定点( $z = 0.12[\text{m}]$ )の風速で基準化した。

注 4) 本研究では、雪粒子の抗力係数  $C_f$  を、雪粒子を球として与えているが、実際には表面に凹凸があり、この値より小さいと推定される。 $C_f$  が本研究より小さかった場合、本解析で与えた抗力と等しい抗力を実現するには  $R_p$  がより小さい必要がある。すると、 $F_k$  に含まれる係数  $(1 - R_p)$  は大きくなり  $F_k$  の影響もより大きくなるため  $C_{pe}$  の変化に伴う流れ場への影響も大きくなる可能性がある。

### [記号]

$\langle f \rangle$ : 変数  $f$  のアンサンブル平均値(実験の場合、時間平均値)

$f'$ : 変数  $f$  の変動成分

$x, y, z$ : 空間座標の3成分

( $x$ : 主流方向、 $y$ : 主流直行水平方向、 $z$ : 鉛直方向) [m]

$u, v, w$ : 風速の3成分

( $u$ : 主流方向、 $v$ : 主流直行水平方向、 $w$ : 鉛直方向) [m/s]

$u_p$ : 粒子の相対速度 [m/s]  $\tau_p$ : 粒子の緩和時間 [s]

$\tau_K$ : コルモゴロフの時間スケール [s]

$\rho_p$ : 粒子の密度 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]  $\rho_f$ : 流体の密度 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$\varepsilon$ : 粘性消散率 [ $\text{m}^2/\text{s}^3$ ]  $\nu$ : 動粘性係数 [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$\Phi_p$ : 粒子体積率 [-]  $\Phi$ : 飛雪空間密度 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$C_f$ : 抗力係数 [-]  $C_{pe}$ : モデル係数 [-]

$R_p$ : 流速に対する粒子の速度の比 [-]

$A$ : 検査体積中に存在する雪粒子の断面積の合計 [ $\text{m}^2$ ]

$D$ : 粒径 [m]  $M$ : 検査体積中の粒子の個数 [個]

$V_p$ : 粒子1個の体積 [ $\text{m}^3/\text{個}$ ]  $V$ : 検査体積 [ $\text{m}^3$ ]

### [参考文献]

- 1) 大風翼、持田灯、富永禎秀、伊藤優、吉野博: 風工学シンポジウム論文集 Vol.21, pp101-106, 2010.12
- 2) Tsubasa OKAZE, Akashi MOCHIDA, Yoshihide TOMINAGA, Masaki NEMOTO, Takeshi SATO, Yasutomo SASAKI, Kazusato ICHINOHE: J. Wind Eng. Indus. Aerodyn., 2012 (in press)
- 3) 田畑佑一、持田灯、今野尚子、菊池文、丸山敬、萩島理、谷本潤: 日本建築学会環境系論文集、第76巻、第667号、pp831-837、2011.9
- 4) 日本混相流学会: 混相流ハンドブック、朝倉書店、2004

\*1 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)

\*2 東北大学大学院 工学研究科 大学院生・博士課程前期

\*3 東北大学大学院 工学研究科 教授・工博

\*4 新潟工科大学工学部建築学科 教授・博士(工学)

JSPS Research fellow, Graduate School of Eng., Tohoku Univ., Dr. Eng.

Graduate Student, School of Eng., Tohoku Univ.

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

Prof., School of Eng., Niigata Inst. of Technol., Dr. Eng.