

新たな雪粒子の境界条件を用いた吹雪流の数値解析

長岡工業高等専門学校

加藤 秀幸

長岡工業高等専門学校 正会員

衛藤 俊彦

1. はじめに

吹雪は風の流れによって、雪粒子が浮遊される現象である。気体である空気と固体である雪粒子が混合して流れることから、吹雪は典型的な固気二層流である。また吹雪は雪崩の発生要因の一つとも考えられ、その流動特性を知ることには固気二層流の基本的な流動特性を把握することにつながり、同様の固気二層流である雪崩の発生・発達といった流動機構の解明に期待ができる。吹雪流の流動解析では、雪粒子の沈降・巻き上げ条件を考慮する必要がある。既往研究¹⁾では雪粒子の巻き上げを、雪の連行係数の概念を導入することで考慮された吹雪流の解析が行われている。また衛藤ら²⁾は、巻き上げ無しの粒子サーマルに沈降フラックスを導入した OpenFOAM を用いた流動解析を行い実験結果と良い一致を得ており、この沈降フラックスは吹雪流の解析では取り入れられていない。

そのため本研究では、吹雪流について既往の実験を対象として、OpenFOAM を用いた流動解析を行い、結果の比較により解析モデルの妥当性の検証を行う。加えて雪粒子について沈降フラックスを加えた新たな境界条件を導入し、その効果を調べた。

2. 解析モデル

解析には OpenFOAM の twoLiquidMixingFoam を採用した。また雪粒子の底面からの巻き上げ及び底面への沈降堆積を考慮するため、それぞれの効果を表す項を付加した雪粒子の拡散方程式を導入した。これは底面において以下のように表される。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(u-w_s)c}{\partial x_i} = D_m \frac{\partial^2 c}{\partial x_i^2} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{v_t}{S_c} \frac{\partial c}{\partial x_i} \right) + W_s E_s - D \quad (1)$$

$$D = \alpha W_s C_b \quad (2)$$

E_s は雪の連行係数、 D は沈降粒子濃度フラックス、 α は底面への堆積率を規定するパラメータ、 C_b は底面近傍での粒子濃度である。係数 E_s 、 α について変化させ解析を行い、モデルの妥当性を調べた。

3. 解析方法

本モデルの妥当性を検証するために、福島県が行った科学技術庁防災科学技術研究所新庄雪氷防災研究所の雪氷防災実験棟にある低温風洞を用いて行われた実験結果と比較を行う。風洞は幅 100cm、高さ 100cm の正方形断面を有する全長 14m の装置で、風洞の底面には厚さ 20mm の雪を敷き詰め、設定風速 10m/s、12m/s の下で実験は行われた。室温 -15°C、湿度 25~50%、敷き詰めた雪の密度は 0.46g/cm³、平均粒径は 0.22mm と 0.24mm であった。同様の条件で OpenFOAM を用いて解析を行い得られた結果から風速分布と吹雪量の分布をグラフ化し実験結果との比較を行った。風速分布は設定風速 10m/s と 12m/s で行った実験値と計算値が最も一致するよう風速の調整を行った。吹雪量は吹雪の重量濃度と風速の積で定義される。すなわち、雪粒子の体積濃度を C としたとき、 $\rho_s C U$ で定義される。 ρ_s は雪粒子の密度、 U は風速である。吹雪量について、実験値と計算値が一致するよう E_s のパラメータ調整を行った。式(2)の係数 α は沈降フラックス無しである $\alpha=0$ と、有りである 1 の 2 ケースとした。計算に用いた条件を表 1 にまとめて示す。

4. 解析結果

図 1 は設定風速 10m/s、12m/s の場合の計算値と実験値を比較したものである。図 1 の風速分布のグラフではどちらも底面付近は概ね再現出来ているが、高さが 200mm 以降では実験値と計

表 1 解析条件

風速 U (m/s)	雪粒子密度 ρ_s (kg/m ³)	底面の相当粗度 K _s (mm)	雪粒子の沈降速度 W _s (m/s)
9.4	460	6.33	0.445459
11.3			0.5135438

風速 U (m/s)	E _s のパラメータ	沈降粒子濃度 フラックス係数 α	雪粒子の 粒径 D _s (mm)
9.4	0.0003	0	0.215
	0.0009	1	
11.3	0.0005	0	0.239
	0.0014	1	

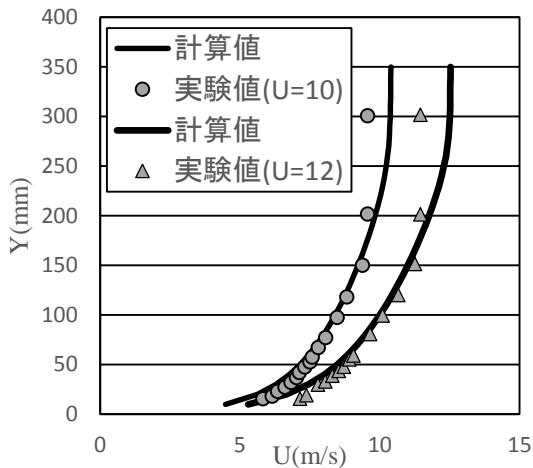


図 1 風速分布

算値で差が見られた. 図 2, 3 の設定風速 10m/s の吹雪量分布は, $\alpha=0$ の場合では E_s パラメータを 0.0003 とすることにより良く再現が出来る. 一方 $\alpha=1$ の場合では, E_s パラメータを 0.0003 から 0.0009 にすることでよく再現することが出来た. 図 4, 5 の設定風速 12m/s の吹雪量分布は, $\alpha=0$ の場合は E_s パラメータを 0.0005 に, $\alpha=1$ の場合は E_s パラメータを 0.0005 から 0.0014 にすることで, 両方とも良く再現することが出来た.

5. 結論

粒子の沈降に関わるパラメータは $\alpha=0$, $\alpha=1$ の両方で解析結果は実験結果を良く表しており, 本解析モデルの妥当性を示すことができた. また沈降フラックスを導入した $\alpha=1$ のケースにおいて妥当な結果が得られたことで, 巻き上げの無い条件における吹雪流の解析が期待できる. これについては今後, 他の条件での実験結果との比較を通して検証していく必要がある.

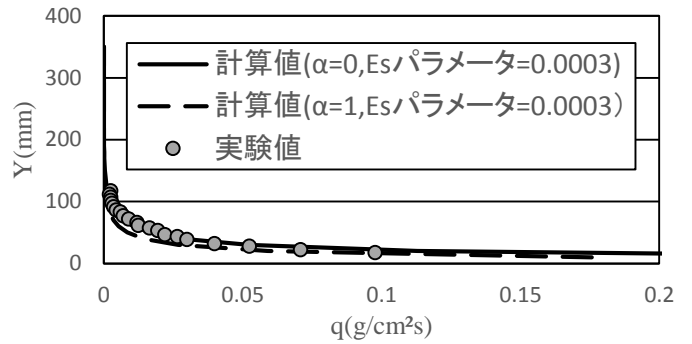


図 2 吹雪量分布(U=10m/s)

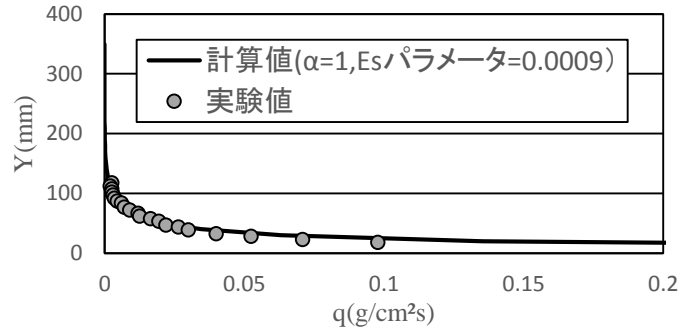


図 3 吹雪量分布(U=10m/s)

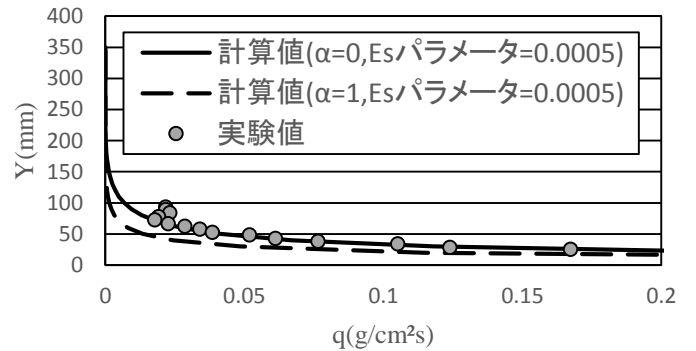


図 4 吹雪量分布(U=12m/s)

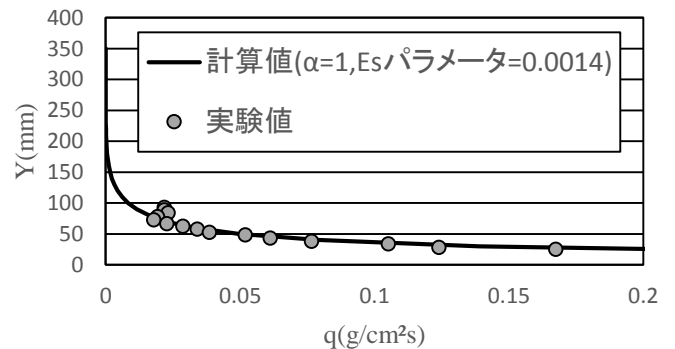


図 5 吹雪量分布(U=12m/s)

参考文献:

- 1) 福嶋ら, 非ブーシネスク k-ε 乱流モデルによる吹雪の流動解析, 雪氷, 61 巻, 1999.
- 2) 衛藤ら, OpenFOAM による DynamicSGS モデルを用いた傾斜壁面粒子サーマルの数値解析, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vo173, No.2, 2017.