

OpenFOAM を用いたラグランジュ型モデルの 吹雪の運動形態の再現性について

福島工業高等専門学校 産業技術システム工学専攻 社会環境システム工学コース 学生会員 ○山形 夏輝
 福島工業高等専門学校 都市システム工学科 正会員 菊地 卓郎
 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科 正会員 衛藤 俊彦
 東京建設コンサルタント 河川計画部 正会員 大澤 範一

1. はじめに

自然界では吹雪や飛砂といった固体粒子が周囲流体によって輸送される固体粒子浮遊流と呼ばれる現象がたびたび観測され、様々な自然災害を引き起こしている。そのため、これらの流動特性を適切に評価することは、防災、減災の観点から重要視されており、設計指針などに資するには3次元解析が必要不可欠である。そこで、吹雪の流動特性を把握する有効な手法としてコンピュータを用いた数値シミュレーションがある。吹雪の数値モデルは計算負荷の問題もあり、オイラー型モデルが先に発達したが、近年では各種ラグランジュ型モデルも提案されている。また、流体シミュレーションソフトウェアも様々存在し、その中でもオープンソースである OpenFOAM はその活用に注目が集まっている¹⁾。そこで本研究では OpenFOAM に実装されたソルバの中でラグランジュ型のひとつである多相粒子内法(MPPIC 法)を用いた吹雪の流動特性の再現性を評価すべく、雪粒子の密度の違いによる運動形態の変化に関する数値解析を行った。

2. 数値解析モデル

OpenFOAM ソルバの MPPIC (多相粒子内)法を採用し、数値解析を行った。MPPIC 法は、粒子追跡法の1つであり、非定常/粒子体積率の効果を考慮した連続相内での1つの運動パーセルの連成された輸送/粒子間相互作用を計算せずに衝突を表現するためにセル内多相粒子を使用する手法である。粒子割合が多い流れ場において、安定に計算可能かつ計算コストが低いことが特徴として挙げられる。

また、MPPIC 法は粒子1つ1つを追跡するラグランジュ法の中の1つであるため、粒子の運動形態を把握することが可能である。

3. 解析条件

OpenFOAM ソルバの MPPICFoam を基に、吹雪に適したモデルの変更を行った。気相においては標準 $k-\epsilon$ 乱流モデルを使用し、粒子相では MPPIC 法を適用し解析を行った。また、流れの支配方程式である連続の式およびナビエ・ストークス式を有限体積法に基づいて離散化した。計算は3次元で行い、奥行き方向を x 軸、高さ方向を y 軸、流下方向を z 軸とし、それぞれの空間領域を $x=1\text{m}$, $y=0.5\text{m}$, $z=14\text{m}$ とした。格子分割数は $x:50$, $y:25$, $z:700$ とすることでメッシュアスペクト比を $1:1:1$ とした。境界条件については、底面および上面に non-Slip(壁面摩擦を考慮)条件を、両壁面については symmetry(3次元対称)条件で指定した。粒子投入設定は、代表粒子の質量が、元の粒子の質量の何個分に当たるのか(有効粒子)を設定し解析するパーセル近似を用いた。解析モデルは図-1、解析条件は表-1 に示すとおりである。

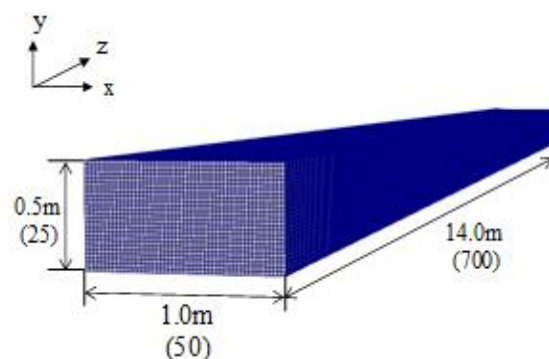


図-1 解析モデル

KeyWords : 吹雪, ラグランジュ型, MPPIC 法, 運動形態

連絡先 : 〒970-8034 福島県いわき市平上荒川字長尾 30 福島工業高等専門学校 都市システム工学科 TEL0246-46-0834

表-1 解析条件

	caae1	caae2
初期風速(m/s)	9.300	9.300
乱流運動エネルギー $k(m^2/s^2)$	2.686	2.686
分子粘性逸散率 $\varepsilon(m^2/s^3)$	5.696	5.696
粒子密度(kg/m^3)	100	300
粒径(mm)	0.148	0.148
代表粒径(mm)	0.148	0.148
有効粒子数(pcs)	1.000	1.000
粒子数(pcs)	33503	33503
流体密度(kg/m^3)	1.200	1.200
動粘性係数($10^{-5}m^2/s$)	1.568	1.568
計算間隔(s)	0.002	0.002
可視化間隔(s)	0.01	0.01
総計算時間(s)	3.00	3.00

4. 解析結果および考察

図-2 に、 $u_0=9.30m/s$ 、 $t=1.0s$ における風速分布を示す。本モデルによる吹雪の数値解析結果との比較には、菊地・福嶋ら²⁾によって観測された風洞装置による実験結果と拡散方程式により求めた数値解析結果を用いて行った。風速分布の比較諸量は、流下方向から 10m 流下した場所に位置する xy 断面で行い、高さについては $y=0$ の底面から 0.02m 刻みで 0.3m までの風速を抽出した。風速分布の解析結果から、今回使用した MPPIC モデルにおいても乱流の傾向を捉えることができたが、底面付近においては十分な精度が得られず実験値との乖離がみられた。

図-3 と図-4 に、case1 と case2 の $t=1.0s$ における粒子分布を示す。xz 平面に敷き詰めた粒子が、流体によって y 方向にどの程度発達しているのか $z=10m$ 地点における xy 断面で可視化した。また、最下層の格子を境界面と定義したため、0.039m 地点を底面としている。図-3 と図-4 から、密度が小さいほど粒子の舞い上がりが活発になることが表現されていた。具体的には、粒子密度が小さいほど流体による影響を受け、転がり、跳躍、浮遊いずれの運動形態においても活発であったが、粒子密度が大きくなるほど転がりや跳躍による運動形態の割合が大きくなり、底面から高さ 0.1m 付近に粒子分布が集中することが確認できた。

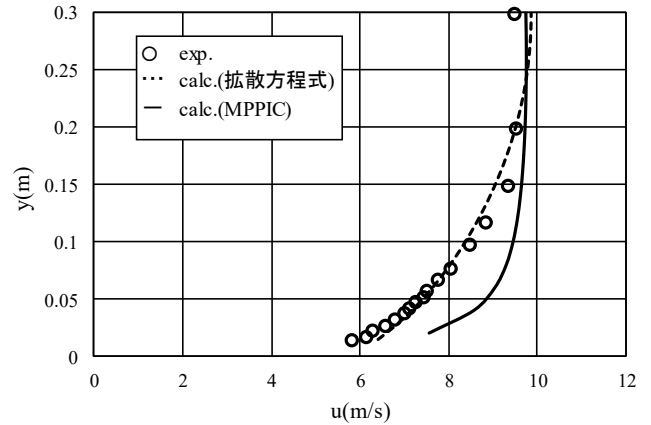
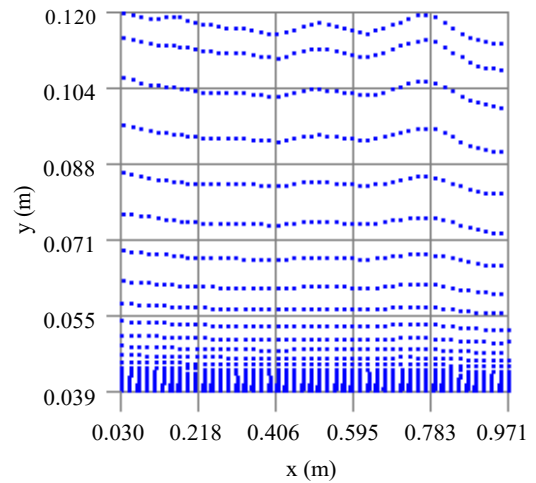
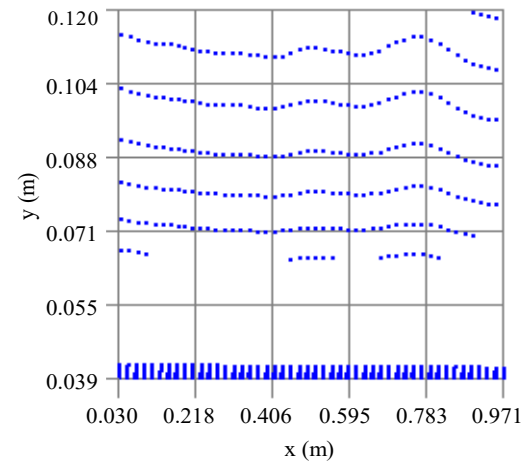


図-2 風速分布


図-3 case1 における粒子分布($z=10m$)

図-4 case2 における粒子分布($z=10m$)

参考文献

- 1) 春日悠，今野雅：OpenFOAM による熱移動と流れの数値解析，pp.1-20，2016
- 2) 菊地ら：乱流拡散方程式を用いた固体粒子浮遊流の底面条件に関する検討，No.21，pp.177-184，2007