

OpenFOAM を用いた飛砂の再現性の検討

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
 福島工業高等専門学校 建設環境工学科 非会員 尾崎 貴英
 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

海岸で発生する飛砂は、海浜に隣接する道路・公園・居住地などに侵入し、人々の生活環境・経済活動に多大な被害を及ぼしている。これらの被害を軽減するためにも飛砂の流動特性を適切に評価し、海岸砂防構造物の設計指針などに資することは重要である。

近年、土木工学の分野でも流体の流動解析ツールとして OpenFOAM が注目され始めている。OpenFOAM は固気二相流を含む様々な混相流の流動現象に対応できるソルバを有しており、オープンソースであるため、カスタマイズ性も高い。

そこで本研究では OpenFOAM が有する B.G.M.Van Wachem¹⁾による動力学モデルをベースとして、飛砂の流動現象に対応できるよう改良し、既往の風洞実験との比較を行い、その再現性について、検討を行った。

2. 数値解析モデル

飛砂の流動解析に対し、OpenFOAM のソルバの中から、twoPhaseEulerFoam を採用した。このモデルはオイラー・グラニュラーモデル（流体－固体粒子）であり、B.G.M.Van Wachem による動力学モデルを取り入れている。支配方程式を以下に示す²⁾。

連続の式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \mathbf{u}_g) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \mathbf{u}_s) = 0 \quad (2)$$

ここで α_g , α_s はそれぞれ気体、固体の体積分率で $\alpha_g + \alpha_s = 1$ である。 ρ_g , ρ_s はそれぞれ気体、固体の密度、 $\mathbf{u}_g$, $\mathbf{u}_s$ はそれぞれ気体、固体の速度である。

運動方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g \mathbf{u}_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \mathbf{u}_g \mathbf{u}_g) = -\alpha_g \nabla p + \nabla \cdot (\alpha_g \boldsymbol{\tau}_g) - \beta(\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_s) + \alpha_g \rho_g \mathbf{g} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \mathbf{u}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \mathbf{u}_s \mathbf{u}_s) = -\alpha_s \nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_s - \nabla p_s + \beta(\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_s) + \alpha_s \rho_s \mathbf{g} \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\tau}_g = \mu_g [\nabla \mathbf{u}_g + \nabla (\mathbf{u}_g)^T] - \frac{2}{3} \mu_g \nabla \cdot \mathbf{u}_g \mathbf{I} \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\tau}_s = \mu_s [\nabla \mathbf{u}_s + \nabla (\mathbf{u}_s)^T] + \left(\lambda_s - \frac{2}{3} \mu_s \right) \nabla \cdot \mathbf{u}_s \mathbf{I} \quad (6)$$

ここで β は相間の運動量交換係数、 $\mathbf{g}$ は重力加速度である。 p は全相共通の圧力である。

解析手法としては有限体積法に基づいて離散化し、SIMPLE 法と PISO 法を組み合わせた PIMPLE 法を用いた。

3. 解析対象実験

本解析モデルの妥当性の検証のために、久保田ら³⁾が行った飛砂の風洞実験データを用いた。この実験は幅 1.0m、高さ 1.1m、長さ 20.0m の吹出型風洞を用いて、風速分布と飛砂量鉛直分布が測定されている。また、実験に用いられた砂は鹿島海岸の砂でふるい分けされ、粒度が揃えられた砂である。今回の解析では粒径が 0.15mm と 0.25mm の実験データを用いた。

4. 解析条件

本解析では三次元の領域を対象とし、流下方向を x 軸、それと直交する高さ方向を y 軸、奥行き方向を z 軸とした。格子間隔は x 軸 10cm、y 軸 1cm、z 軸 20cm とし、時間間隔は 0.002s とした。また、気相では標準 k-ε 乱流モデルを採用している。

Keys Words : 飛砂, OpenFOAM, 動力学モデル, 数値解析

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

表-1 に解析条件を示す。

表-1 解析条件

case	1	2
風速 u (m/s)	17.43	15.50
乱流運動エネルギー k (m^2/s^2)	3.33	3.33
分子粘性散逸率 ε (m^2/s^3)	50	50
砂の粒径 d (mm)	0.15	0.25
砂の体積率 α (%)	0.0016	0.0010

5. 数値解析結果

図-1, 図-2 に各 case の 10 秒後の風速分布 $u(\text{m/s})$ を示す。今回の解析は 3 次元で行っているが、モデルの検証のため、風洞実験の観測地点である風上から 15m 地点における風洞中心部での比較を行った。解析結果は平板上の乱流境界層の特徴を表す結果となったが、実験結果と比較すると底面から離れるにしたがって、値がやや小さめに出る傾向が見られた。

図-3, 図-4 に各 case の飛砂量分布 $q(\text{g}/\text{cm}^2/\text{s})$ を示す。検証断面は風速分布と同様である。飛砂量分布の実験値との一致は良好であり、周囲流体の密度に比べて固体粒子の密度が大きいため、飛砂量が底面から急激に減少する特徴を捉えている。

6. まとめ

本研究では、OpenFOAM をベースとして、動力学モデルを用いた飛砂の流動解析を行った。風洞実験との比較をすることで OpenFOAM を用いた本モデルが固気二相流の代表的な例である飛砂の流動特性を概ね再現できることが確認できた。

今後の課題としては、現地観測での再現性を検証することなどが挙げられる。

参考文献

- 1) B.G.M. van Wachem : Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, Amsterdam, 2000
- 2) 春日悠：固気混相流モデル(2018.6.28), http://penguinitis.g1.xrea.com/study/note/kinetic_theory_granular_flow.pdf, 最終閲覧 2019.3.19
- 3) 久保田ら：平成 18 年度土木学会海岸工学論文集 No.53, pp.431-435, 2006

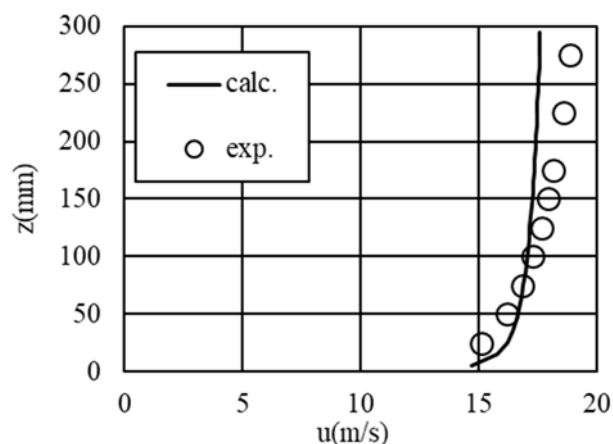


図-1 風速分布(case1)

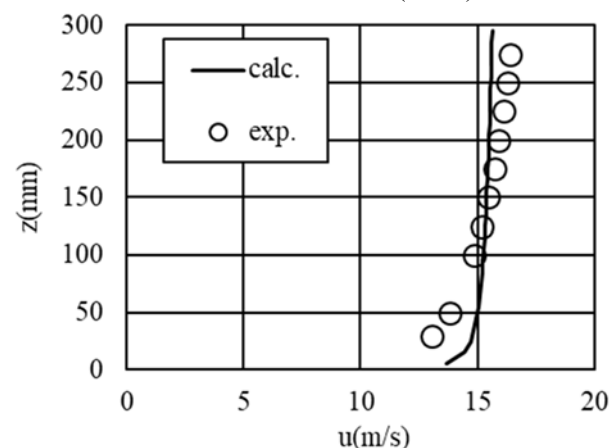


図-2 風速分布(case2)

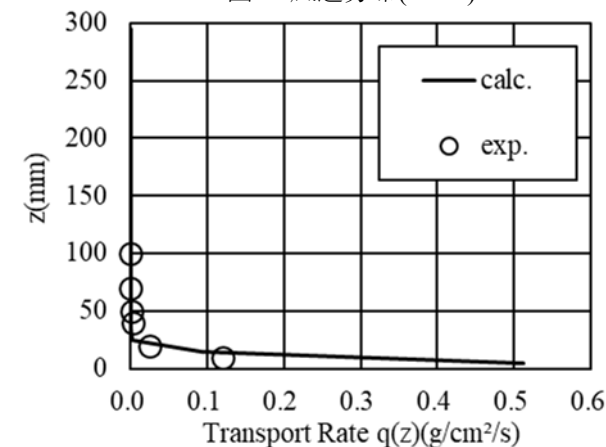


図-3 飛砂量分布(case1)

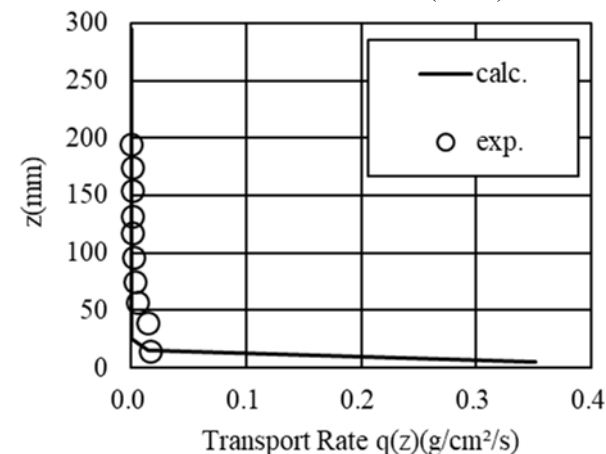


図-4 飛砂量分布(case2)