

飛砂と吹雪における粒子輸送の運動シミュレーション

福島工業高等専門学校 都市システム工学科 学生会員 ○塩井 瑛大
 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専攻科 社会環境システム工学コース 学生会員 高木 芽依
 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

風による粒子輸送の現象は自然界においてもたびたび観測される．沿岸部で人々の生活に様々な影響を及ぼす飛砂や冬季積雪地帯で視程障害を引き起こし，交通事故の原因となる吹雪はその代表例であるといえる．これら粒子の空気輸送流の運動形態は風による粒子の軌跡変化，地面での衝突，跳ね返り，そして浮遊へと発展していく．その発展過程においてスプラッシュ過程は重要である．本研究では飛砂，吹雪について統一的な取り扱いができる k-ε 乱流モデルを用いて流れ場を再現し，そこにスプラッシュ過程を取り入れ，粒子輸送の運動シミュレーションを行い，粒子の違いによる流動特性の違いについての考察を行った．

2. 基礎方程式

粒子の水平方向，鉛直方向の運動方程式（ストークスの式）は u_p ， u_f をそれぞれ粒子と流体の水平方向速度， w_p ， w_f をそれぞれ粒子と流体の鉛直方向速度とすると，以下の式で表すことができる．

水平方向の運動方程式

$$m \frac{du_p}{dt} = 3\pi\mu d(u_f - u_p) + V_p \rho_f \frac{du_f}{dt} + \frac{1}{2} V_p \rho_f \left(\frac{du_f}{dt} - \frac{du_p}{dt} \right) \quad (1)$$

鉛直方向の運動方程式

$$m \frac{dw_p}{dt} = 3\pi\mu d(w_f - w_p) + V_p \rho_f \frac{dw_f}{dt} + \frac{1}{2} V_p \rho_f \left(\frac{dw_f}{dt} - \frac{dw_p}{dt} \right) - mg \quad (2)$$

ここで， m は粒子質量， d は粒径， μ は粘性係数， V_p は粒子の体積， ρ_f は流体の密度を表す．

また，(1)式と(2)式の右辺第1項は粘性抗力項，第2項は圧力勾配項，第3項は粒子と流体の相対速度が粒子を加速させる力の項，(2)式の右辺第4項が重力項である．

Nalpanis ら (1993) ¹⁾によれば，粒子の鉛直位置が粒子の直径より十分大きいとき，揚力と乱流によるランダムな力が無視でき，粒子に作用する最も重要な力は空気抵抗と重力である．このとき，抗力係数 C_d を考慮した粒子の運動方程式は次のようになる．

水平方向の運動方程式

$$\frac{du_p}{dt} = -0.75 \frac{\rho_f C_d}{\rho_p d} V_R V_{R1} \quad (5)$$

鉛直方向の運動方程式

$$\frac{dw_p}{dt} = -0.75 \frac{\rho_f C_d}{\rho_p d} V_R V_{R3} - g \quad (6)$$

ここで， C_d は抗力係数， ρ_p は粒子の密度， V_R は固体粒子と空気流体の相対速度， V_{R1} と V_{R3} はそれぞれ水平方向と鉛直方向の相対速度である．

3. 解析対象実験

飛砂の数値解析の比較には久保田ら ²⁾によって求められた実験データを用いた．底部に厚さ 10cm の実験層を有する 1.0×1.0m の断面が確保された幅 1.0m，高さ 1.1m，長さ 20m の吹出型風洞を用いて，粒径 0.15mm の砂粒子を対象に実験が行われた．また，吹雪の数値解析の比較には福島ら ³⁾によって求められた実験データを用いた．底部に 20mm の雪を敷き詰めた幅 1.0m，高さ 1.0m，長さ 14m の低温風洞装置を用いて，測定位置から 10m 上流より毎秒 67cm³の雪を供給して実験が行われた．

4. 解析条件

本研究では，固体粒子浮遊流について統一的な取り扱いができる k-ε 乱流モデルを用いて変動流れ場を再現した．流れ場のスケールおよび風速分布は解析対象実

Keys Words：飛砂，吹雪，乱流モデル，スプラッシュ過程

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

験に準じた分布形を与えた．粒径は Budd (1966) ⁴⁾によって観測されたガンマランダム分布を用い，砂粒子と雪粒子の代表粒径はそれぞれ 0.150mm と 0.148mm とした．解析ケースは密度を空気流体は 1.293 kg/m³，砂粒子は 2650kg/m³，雪粒子は 301 kg/m³を設定し，粒子数は 1000 個，計算時間を 100 秒とした．

5. 解析結果

5-1. 固体粒子の軌跡

図 1 に飛砂，図 2 に吹雪の粒子の軌跡を示す．砂粒子は底面への衝突と反発を繰り返す跳躍運動により輸送され，雪粒子は飛砂と違い，部分的に浮遊運動を起こしていることがわかる．また，粒子の違いによる跳躍高さの違い，流れ場の違いによる流下距離の違いの再現性も確認できた．

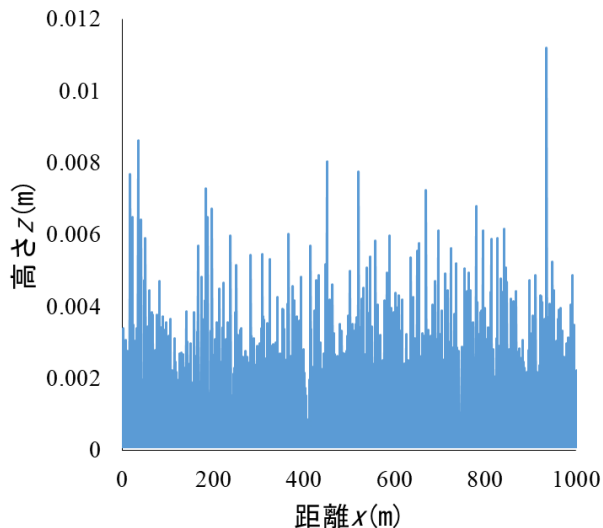


図 1 砂粒子の軌跡 (飛砂)

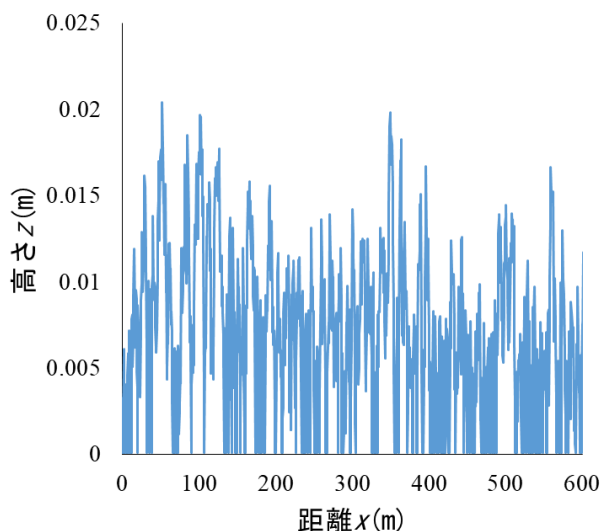


図 2 雪粒子の軌跡 (吹雪)

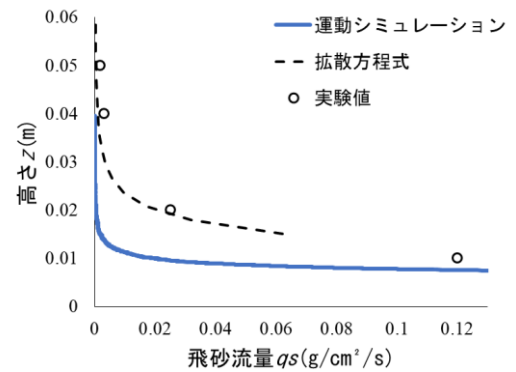


図 3 飛砂流量分布

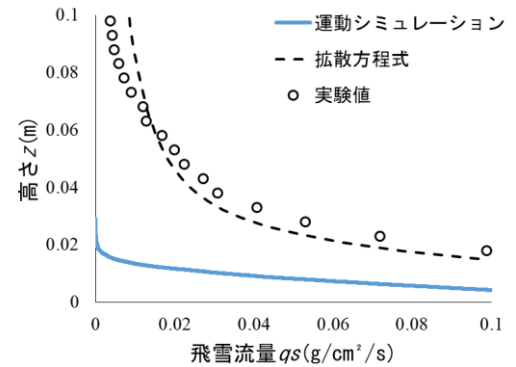


図 4 飛雪流量分布

5-2. 飛砂・飛雪流量分布

図 3 に飛砂流量，図 4 に飛雪流量を実験値ならびに拡散方程式からの解析結果と比較したものを示す．両分布ともに地表面からの高さが高くなるほど飛砂・飛雪流量は小さくなり，底面付近では非常に大きくなるという固気二相流の分布形をよく示す結果となったが，今回の解析結果は飛砂，吹雪ともに全体的に粒子輸送が低い位置で表現される結果となった．

6. まとめ

飛砂，吹雪に関して，粒子輸送の運動シミュレーションを用い，粒子の違いによる流動特性の違いを評価した．軌跡の再現性を確認できたが，全体の輸送量の評価は実験値，他の解析手法よりも低く見積もる傾向となった．今後の課題としてはスプラッシュ過程の導入における粒子の衝突，反発などの評価について精査する必要がある．

参考文献

- 1) Nalpanis, P. et al. : J. Fluid Mech., 251, pp.661-685, 1993
- 2) 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
- 3) 福嶋ら：土木学会論文集, No.656/II-52, pp.113-120, 2000
- 4) Budd, W. F. : Antarctic Res. Ser., 9, pp.59-70, 1966.