

京都大学工学研究科 正会員 後藤仁志
 京都大学工学研究科 正会員 酒井哲郎
 京都大学大学院 学生員 〇原田英治

1. はじめに

流砂・漂砂・飛砂の力学機構を数値力学的観点から解明するには、流体・粒子間干渉と粒子間相互干渉の2つの機構を適切にモデル化することが不可欠である。比較的希薄な砂粒子濃度から高濃度への遷移状態にかけては、流体・粒子間干渉が支配的で、近似的には、粒子間干渉は無視できるが、高濃度状態では、流体・粒子間および粒子間干渉がともに重要となる。これまで飛砂の範疇では、固気二相流モデルを用いて saltation が支配的な比較的希薄濃度の領域での砂粒子運動を解析した研究はあったが、砂粒子が高濃度に存在する状態での粒子間相互作用を併せて考慮した研究はなかった。本研究では、流体・粒子間および粒子間相互の干渉の両者を、固気二相流モデルと個別要素法を融合してモデル化し、流速分布、Reynolds 応力分布などの流れ場の構造と、粒子の移動速度分布、濃度分布などの粒子群の運動特性の両面に着目して、飛砂層での砂粒子流送機構について考察する。

2. モデルの概要

本研究では、飛砂現象を Euler-Lagrange coupling による固気混相流モデルと個別要素法を用いて飛砂層における砂粒子レベルの微細な運動力学過程をモデル化する。流れ場の模擬には、砂粒子混入による負の生成項を含む $k-\epsilon$ 乱流モデルを用いて、粒子系の運動モデルには、多体粒子運動が追跡できるように粒子間の相互作用力を弾性スプリングと粘性ダッシュボットを用いて計算して個々の粒子の並進・回転の運動方程式を解く個別要素法を用いてシミュレーションをした。個別要素法を用いて計算することにより、飛砂層での砂粒子の一連の運動形態であるシートフローに代表される集合流動状態から掃流運動に代表される saltation、浮遊に至るまでの砂粒子運動の再現を試みた。

3. 主要な計算結果

計算条件は、全体の高さ80.0cmの領域に粒径 $d = 0.03\text{cm}$ の均一粒子約1000個から成る深さ約4.0cmの堆積層を設け、計算領域の高さ76.0cmに設定して粒子の運動を計算した。また、飛砂層での砂粒子の流動過程との比較のため、図-1に示すように saltation 粒子だけと考えた流れ場と多孔質層での流れ場の計算結果を比較検討した。

図-2に Reynolds 応力分布の計算結果の一例を示す。本研究で対象とした移動床上の粒子混入流れは、saltation を含む固定床上流れと多孔質層上の流れの両方の特性を有する場である。このことは、Reynolds 応力分布特性に端的に現れている。まず、高濃度砂粒子が存在する下層の部分は、多孔質層と同様に直線変化を呈する。このことは、砂粒子濃度が增大するにつれて砂粒子が相互の運動を拘束し、運動の範囲、移動速度はともに小さくなって、個々の粒子が完全に固定された多孔質層の状態に近くなることを示唆している。次に中間層・上層に注目すると、多孔質層上の流れは、上層で直線分布した後、直線部から欠損を示している。ここで見られる Reynolds 応力の欠損傾向は、saltation 層が積み重なった多重構造を有している

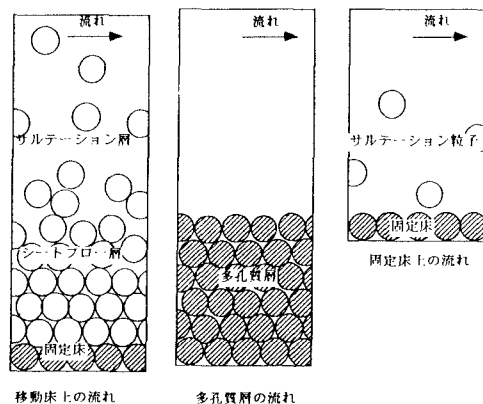


図-1 計算領域

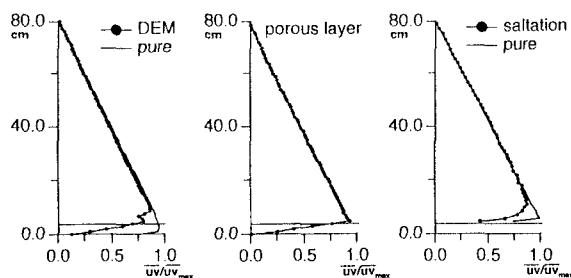


図-2 Reynolds 応力

Hitoshi GOTOH, Tetsuo SAKAI, & Eiji HARADA

め、複雑な分布を呈したものと考えられ、移動床上の流れが、多孔質層上の流れと固定床上のsaltation粒子を含む流れの構造を折衷した状態と類似した流れ場の構造を示すことが明らかになった。

図-3は、砂粒子運動が完全発達状態に達した時点での砂粒子平均移動速度分布について示したものである。saltationモデルに比べ、DEMモデルでは、下層から上層に向かって低速度領域がある程度の範囲まで続き、ある高さで急に速度が大きく変化している。saltationモデルでの粒子速度の分布（図-3の右の図）は、粒子間衝突による粒子間相互作用を考慮していないためや、砂層の堆積層が存在しないために、徐々に速度が下層から上層に向かって増加する傾向を示すと考えられる。

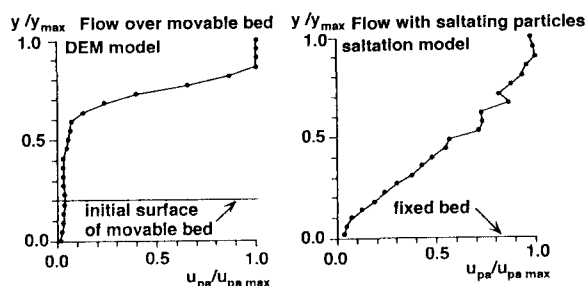


図-3 粒子水平速度

砂粒子運動を視覚的に捉えるには、運動の瞬間像が好都合であるが、図-4は、その一例である。図示するには粒子数が非常に多く非常に小さい粒径のため、実際の個々の粒子の粒径を引き延ばして表示している。下層から上層に向けての粒子間距離の増大、上層に大きく跳躍する少数粒子の存在など、粒子群の運動特徴が読みとれる。

鉛直方向の運動量混合に果たす砂粒子運動の役割についてより明確にするには、粒子の運動軌跡を精査する必要がある。図-5には、砂粒子の運動軌跡を示す。最上方を運動する粒子は、衝突反発を鉛直方向の高さ 10 cm 付近で他の粒子と繰り返しながら、鉛直方向に大きく跳躍する軌跡を描き、また水平方向への移動も大きいことを示している様子がわかる。この粒子は、いったん鉛直方向の高さ 15 cm 付近に飛行すると長い間落下せず、浮遊状態を示していると考えられる。上層部の粒子から中間層部の粒子にかけては最上方の粒子の運動に比べてだんだんと粒子速度が遅くなってくる。また衝突・反発による粒子の運動の幅も徐々に小さくなる傾向が示されている。ここでは、粒子が他の粒子との衝突・反発による影響で、上下方向にギザギザに運動する軌跡を描く様子が示されており、saltation（小跳躍）示しているものと考えられる。下層部の粒子は、粒子密度が増してくるため粒子同士が密に接し、それぞれの粒子の運動を拘束するため流下方向、鉛直方向にも変位の小さい軌跡がみられ、シートフロー状の流動形態の出現を裏付けている。

図-4、図-5より一連の飛砂層での砂粒子運動、つまりシートフローに代表される集合流動状態から、saltation に代表される掃流状態に至るまでの鉛直方向の多重構造が、本シミュレーションにより一貫して再現されたと考えられる。

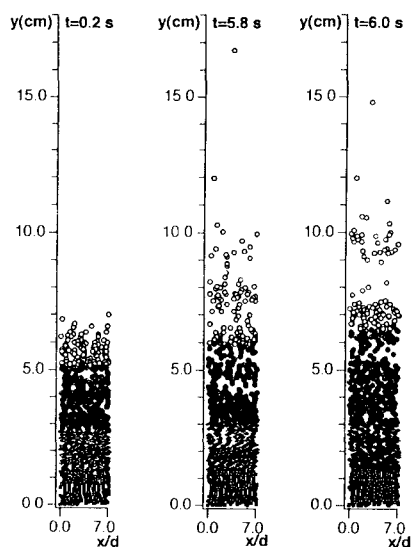


図-4 スナップショット

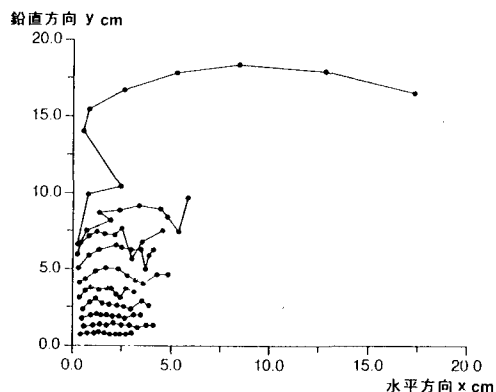


図-5 粒子軌跡