

氏 名	HE LULU
学 位 の 種 類	博士 (工学)
学 位 記 番 号	博第 961 号
学位授与の日付	平成 26 年 9 月 3 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当 課程博士
学 位 論 文 題 目	Modeling 3D Numerical Movable Bed based on LBM and its Application to the Analysis of Bed-Load Transport and Tsunami Drifts (3次元LBM数値移動床モデルの開発と掃流砂輸送および津波漂流物解析へのその適用)
論文審査委員	主 査 教 授 喜 岡 渉 教 授 富 永 晃 宏 教 授 張 鋒 准教授 北 野 利 一 教 授 KUANG CUIPING (同济大学)

## 論文内容の要旨

It is important to study the processes of sediment transport in the particle motions of bed-load layer, including rolling, sliding, saltation and the vertical sorting of graded sands. Numerical simulations on the particle motions of bed-load layer, especially on the vertical sorting processes of graded sediments under oscillatory flows are, however, still limited. In order to analyze both uniform-grain-size and mixed-grain-size sediment transport (regular sphere particles) and the behavior of tsunami drifts (particles with irregular shapes), a 3D numerical model of movable bed based on Lattice Boltzmann Method (LBM) is established. The advantages of this model are listed as follows: (1) Free surface condition is included for the simulation of open channel flows, oscillatory flows, progressive waves and tsunami flooding currents. (2) Sub-Grid Smagorinsky (SGS) turbulence model is considered. (3) Both the particle-particle interaction and particle-fluid interaction are effectively simulated by using a link-bounce-back scheme. (4) External forces can be easily added by modifying the virtual particle velocity Distribution Functions (DFs). Drag forces, gravity force, buoyance force and also lubrication forces are considered in the model.

Cases of uniform-grain-size sediments under open channel flows in sheetflow regimes with dif-

ferent Shields parameters are performed. In order to check the feasibility of the present model, the 3D behaviors of the uniform bed-load sediments, including rolling, sliding and saltation are observed, and the typical characteristics of bed-load sediments, i.e. the horizontal particle velocity and the vertical Probability Density Function (P.D.F) of sediments are analyzed. The present simulation predicts well the behavior of each particle in the bed-load layer both in saltation and sheetflow regimes. The simulation results for the horizontal particle velocity and the vertical existing P.D.F of sediment particles agree fairly well with the experimental data from Gotoh et al.

Mixed-grain-size sediments under oscillatory flows (both symmetric sinusoidal flows and progressive cnoidal wave) in sheetflow regimes are conducted. The main influence factors, such as period, Shields parameter, bottom layer thickness, bottom slope, are discussed in the cases of mixed sands under oscillatory flows. The results show that (1) the phenomenon of vertical sorting is more significant with larger Shields parameter; (2) sediments become more motive with the increase of the water particle semi-exursion, due to more momentum obtained from the fluid, and as a result, the armor may break; (3) armoring takes effect earlier when the thickness of sediments increases to double. Besides, the processes of vertical sorting of mixed-grain-size sediments under a realistic progressive wave are performed. The results show that the vertical sorting proceeds until the wave crest passes by and fully develops in a complete period. The concentration centroid of large particles is found higher landward within 2 periods.

The behavior of drift automobiles due to tsunami inundation is studied by modifying this 3D movable bed model for particles with irregular shapes. For the verification of the modified numerical model, laboratory experiments with 80 automobiles colliding against the pillars of tsunami evacuation tower are performed. The simulation results show that the behavior of drift automobiles bypassing the pillars of tsunami evacuation tower is quite similar to the experimental results.

The present model has been successfully used to simulate sediment transport with sphere shapes and drift automobiles with irregular shapes. Based on this, sediments with irregular shape can be simulated in the future. Besides, in the present LBM model, any semi-empirical coefficient is not needed as an input data, but only the cut-off of lubrication approximation, the additional offset in computing fluid fraction, together with the Smagorinsky Constant in turbulent model are required. It can be extended relatively easily to 3D movable bed in large computation domain, as the LBM process involves an algorithm suitable for parallel computation.

## 論文審査結果の要旨

粒子・流体間の相互作用系としてのシートフロー漂砂の数値解析は、従来、固液二相流系の観点から数多く行われているものの、数値解析に複雑かつ膨大な計算を要する等の理由から、固液間や粒子間の2次元相互作用を考慮した研究例にとどまっている。2次元モデルでは全ての粒子が同一面内で接触するために運動の自由度が低下し、粒子運動による抵抗が相対的に増大するため、同一平面外での接触を表現できる3次元モデルによる個々粒子の移動抵抗の評価が現地砂の粒径階間の干渉を適切に評価する上で不可欠である。そこで本研究では、まず固体粒子間空隙における流体の圧縮性を考慮した格子ボルツマン法 (Lattice Boltzmann Method, 以下 LBM) をベースに、流体場の解析に SGS 乱流項と界面セルを加えて、自由表面流下における掃流・浮遊過程の3次元シミュレーションモデルに拡張した、3次元数値移動床を開発した。

自由表面流下における掃流過程への適用性を検討するために、平均流速を数種類変えることにより、シールズ数を 0.01~0.41 の範囲で変化させ、砂粒子群の移動を計算した。掃流層の粒子運動は3次元螺旋形状を描き、シールズ数が大きくなりサルテーション距離が長くなるほど、より2次元軌跡を描くようになることが明らかになった。次いで、各層の移動砂粒子の数密度から鉛直方向の存在確率密度を求めた結果、シールズ数の増加に伴い、ピークの幅は広くなり、底層からピークに向かって急峻な立ち上がり、上層部へ向かって穏やかに減少する非対称性分布となるものの、ピークの位置はシールズ数によらずほぼ固定されている点で実験ともよく一致していることが分かった。

波動場における混合粒径漂砂の分級過程を、3次元 LBM 数値移動床に3粒径階の混合粒径粒子で形成した移動床を設定することによって、その内部構造を流れ場や粒子駆動力の観点から計算力学的に検討した。振動流下のシートフロー状態における鉛直分級は2周期程度で定常に達し、上層は主に大粒径砂、中層は中粒径砂、下層は小粒径砂に階層化するアーマー現象が見られ、シールズ数が大きくなるほど、また砂層厚が小さいほど、鉛直分級は顕在化することが明らかになった。同じシールズ数においては、振動周期が長くなるほど分級化がより速く進み、2周期程度でアーマーが崩壊する現象が見られた。さらに、クノイド波を入射波に用いて、波の非対称度や前傾化に伴う1波長あたりの波動場における混合粒径底質の分級過程について詳しく調べ、3次元数値移動床により従来の混合粒径砂を用いた水理移動床実験結果が再現できることを示した。この LBM モデルにおいては、実験値等を参考に半経験的に決める係数値を基本的に入力値に必要としておらず、数値計算上の2つの閾値を除けば、乱流モデルにおける Smagorinsky 定数  $C$  についてのみである。また、本数値モデルは並列計算にきわめて適したアルゴリズムであるため、中型~大型模型実験規模の3次元数値移動床への拡張も比較的容易である。

津波による漂流物に関する研究において、これまでいくつかの数値モデルが提案されているが、比較的大型の構造物の漂流、例えば複数の自動車の漂流挙動予測には計算時間などの面から適用が困難である。そこで3次元 LBM 数値移動床において、構造物形状で形成した比重の小さい剛体漂流物を想定し、並進3自由度および回転3自由度を考慮した漂流物の複雑な挙動を解析し、80台の自動車が遡上津波により橋脚に衝突する水理模型実験結果と比較して、数値解析結果の妥当性を明らかにした。

以上、本研究では、3次元数値移動床モデルを新たに開発するとともに、その数値計算を通じて流砂・漂砂に関する有用な知見を提供しており、これらの成果は工学的な価値が高く、博士論文に値するものと認められる。