

DEM-URANS カップリングアプローチによる Dune 発生・発達過程の再現シミュレーション

北海道大学環境フィールド部門	正会員	○笠原 孟
北海道大学環境フィールド部門	正会員	清水 康行
北海道大学環境フィールド部門	正会員	木村 一郎
北海道大学北方圏環境政策工学部門	正会員	川村 里実

1. 序論

砂河床移動水路においては河床材料特性と水理条件によって時々刻々と河床形態が姿を変える。河床波は水理的抵抗として作用し、水位の上昇やそれに伴う河川の氾濫を引き起こす要因と成りえる。抵抗変化機構の解明と予測手法の確立は、上記の防災的的目的にとどまらず、流送土砂量の推定精度の向上という観点からも重要であり、これまでに数多くの研究が行われてきた。これらの河床形態に関する研究は流砂をフラックスとして捉える Euler 的視点に基づくものと、粒子個々の運動に着目する Lagrange 的視点に基づくものに大別される。Nakagawa and Tujimoto¹⁾ は Einstein 型確率モデルを基に非平衡流砂量式を提案している。この式は解析的モデルゆえに簡潔な記述が導入されており、粒子間の相互作用や砂粒子の輸送距離に対する河床形状の影響は考慮されていない。Euler 的な再現モデルとしては Giri・Shimizu²⁾らが Kimura³⁾らの非線形 $k-\epsilon$ モデルと Nakagawa and Tujimoto による流砂式を用いた数値計算によって Dune の形成から平坦床への遷移、及び再形成といった非定常の現象再現に成功している。Lagrange 的な再現に関しても、後藤らは個別要素法を用いて微小河床凹凸発生機構の再現に成功している。その際、河床凹凸が微小であることから乱れの生じない一様流を仮定して計算を実行しているが、実河川の河床では砂粒子が移動することによって流れに変化が生じ、それが粒子に影響を及ぼすというフィードバックが発生している。本研究の目的は以上の現象を踏まえ、流れを二次元鉛直 URANS モデル、粒子の挙動を個別要素法によって計算し、Dune の発生・発達過程の再現を試みることである。また、形成された Dune 形状や水位・流速分布を既知の知見と比較することによって DEM-URANS カップリングによる Dune 形成数値模擬の精度検討も同時に行う。

2. 計算手法

Dune の背後には浅い断落ちステップと同様の流れが存在する。即ち、Dune 頂上から流れが剥離することにより Dune 背後に渦領域が形成される。それ故、Dune を対象とした液相の計算には剥離を再現することの出来る乱流モデルが欠かせない。このため、本研究では Giri・Shimizu らと同様のフレームワークで計算を行い、時々刻々と変化する河床上の流れを計算した。基礎となるのは Kimura and Hosoda の非線形 $k-\epsilon$ 鉛直二次元乱流解析モデルである。

河床には無数の砂粒子が存在し、常に衝突と反発が繰り返し発生している。粒子濃度が増加し、個々の粒子が多数の接点で近傍の粒子と接触する状態に至ると古典的剛体球モデルは全く機能せず、粒子間の重なりを許容するモデルが必要となる。個別要素法は粒子の重なりの程度に応じて粒子間反発力を与える事によって、粒子間の作用力を決定するモデルである。個々の粒子間作用力は粒子間の接点に弾性スプリング、粘性ダッシュポッド、スライダーという機械的要素を導入してモデル化され、相対変位に応じた反発力が決定される。

3. 計算結果

シミュレーションの結果を図-1 に示す。時間の経過と共に河床に起伏が発生し、自己増幅的にこの起伏が成長してゆく過程が確認できる。さて、程度の差こそあれ河床には粒子の配列偏差に起因する起伏が常に存在する。この起伏が偶発的に規模の大きなものとなると凸部背後に流速の減衰が生ずる。粒子速度と比較して流体速度が相対的に遅い場合には粒子に進行方向と逆向きの抗力が働き、Dune 下流勾配部に存在する粒子の進

キーワード 砂堆 DEM URANS

連絡先 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目北海道大学工学部水工水文学研究室 011-706-6198

行を妨げる。この抵抗により凸部移動が抑制され、そこに掃流砂が打ち付けられることにより微小凹凸が自己増幅すると考えられる。

図は計算シミュレーションの結果得られた河床・水面形状である。Duneの波長は平均水深の約5倍、波高は水深の約0.3倍程度であることが知られている。本研究の計算結果では平均水深が0.1m程度であるから、理想的な波長・波高は0.5m, 0.03mとなっている。それに対してシミュレーションの結果得られた波長・波高はそれぞれ0.4m, 0.03mであり、良好な再現結果を示している。

4. 考察

水面形状は河床形状と逆位相を呈することが知られている。再現結果を見ると、Duneの昇り勾配部では水面が低下し、降り勾配部では水面が上昇していることが確認できる。

Dune 昇り勾配部は漸縮加速流れと同様の性質を持つ。すなわち、Duneの底部から頂部に向かうにつれて圧力が増し、流速が増大する。再現計算の結果を見ると底面付近から頂上付近に至る過程で縮流加速が生じていることが確認できる。それに対してDune 背後には浅い断落ちステップと同様の流れが生じることが知られている。すなわち、Dune 頂上で流線が剥離し、Dune 背後に渦領域を形成する。再現結果では水平方向流速が大きく減衰し、鉛直方向流速が負の値をとることによって剥離の兆候が確認できるが、渦の発生には至っていない。

本研究ではLagrange的に粒子を追跡しつつDuneを再現することに成功した。この計算コードを応用することにより今後Duneに纏わる粒子の挙動を解析することが可能となるだろう。

5. 参考文献

- 1) Nakagawa, H. and Tsujimoto, T.: Sand bed instability due to bed load motion, Proc. ASCE 106, 2029-2051, HY12, 1980
- 2) Giri, S. and Simizu, Y.: Numerical computation of sand dune migration with free surface flow, Water Resources. Research, Vol.42, w10422, doi:10.1029/2005 WR004588, 2006
- 3) Kimura, I. and Hosoda, T.: A non-linear k-ε model with reliability for prediction of flows around bluff bodies, International Journal for Numerical Methods in Fluids, Int. J. Numer. Meth. Fluids 2003; 42:813-837 (DOI:10.1002/flid.540)

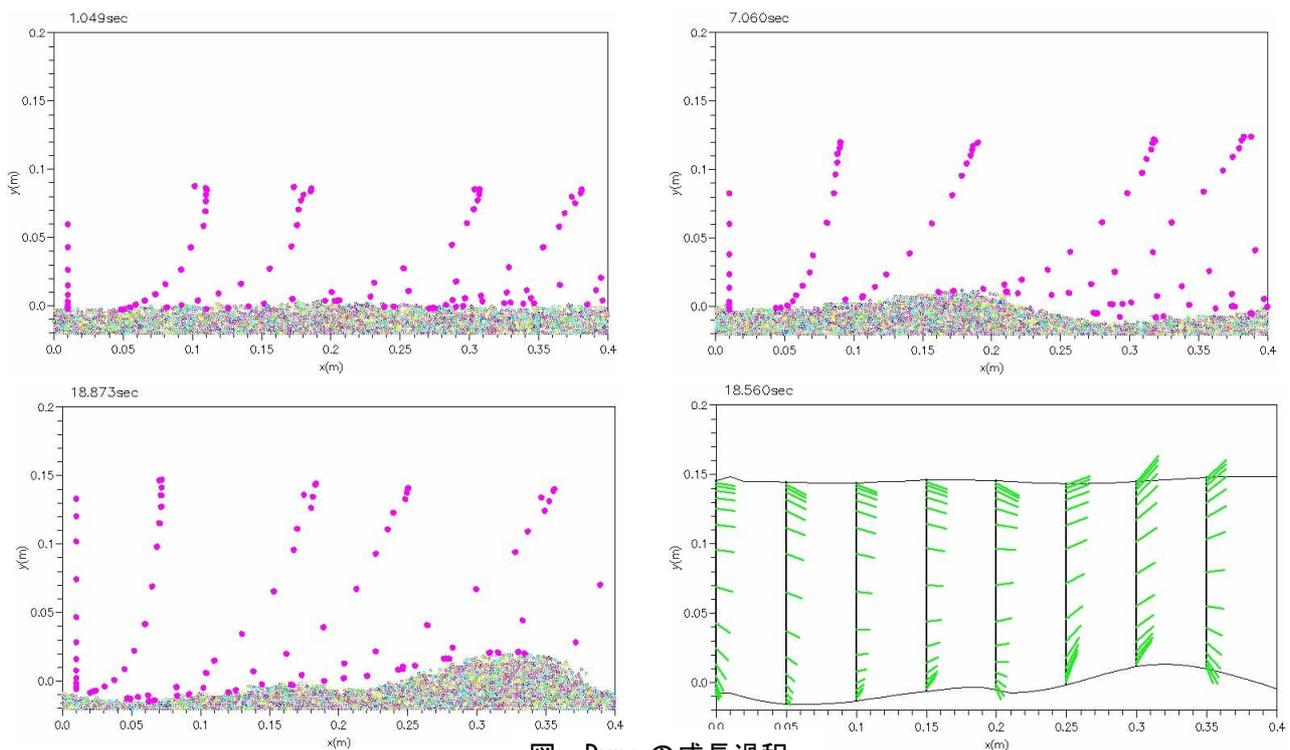


図 Duneの成長過程