

3次元流体解析モデルを用いた砂堆上流れ解析

○京都大学大学院 学生員 寺田 恒喜
京都大学大学院 正会員 音田 慎一郎

1. はじめに

砂堆の形成過程とそれに伴う流れの抵抗を予測することは河川工学上重要であると考えられる。しかし、砂堆の形成過程を RANS 等の計算負荷の小さい数値モデルで予測した 3次元数値解析モデルは少ない。本研究では、砂堆の形成過程を予測できる数値解析モデルの構築を最終目標とし、その第1ステップとして砂堆上の流れ解析について検討した。既往の実験結果¹⁾と比較することでモデルの妥当性を検証した。

2. 数値解析モデル

(1) 流体解析モデル

本研究では、水面変動と河床近傍の流れを精度よく予測するため、水面捕獲法に密度関数法を、また、計算格子において水域、砂堆の境界を容易に表現できるポーラスメディア法を適用した 3次元流体解析モデル²⁾を用いる。基礎式は以下のとおりである。

$$\frac{\partial(1-c)\Phi}{\partial t} + \frac{\partial(1-c)u_j\Phi}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(1-c)u_i}{\partial t} + \frac{\partial(1-c)u_i u_j}{\partial x_j} = (1-c)g_i$$

$$-\frac{(1-c)}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \{ -(1-c) \overline{u_i u_j} \} \quad (2)$$

$$+ \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (1-c) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right\}$$

$$\rho = \Phi \rho_{liq} + (1-\Phi) \rho_{gas} \quad (3)$$

$$\mu = \Phi \mu_{liq} + (1-\Phi) \mu_{gas}$$

ここに、 t : 時間, x_i : デカルト座標系, u_i : 流速ベクトルの方向成分, Φ : 密度関数, c : 固相の体積濃度, u_i' : 乱れ速度ベクトル, p : 圧力, ρ : 流体の密度, ρ_{liq} : 液相の密度, ρ_{gas} : 気相の密度, ν : 動粘性係数, μ : 流体の粘性係数, μ_{liq} : 液相の粘性係数, μ_{gas} : 気相の粘性係数, g_i : 重力加速度ベクトルである。乱流

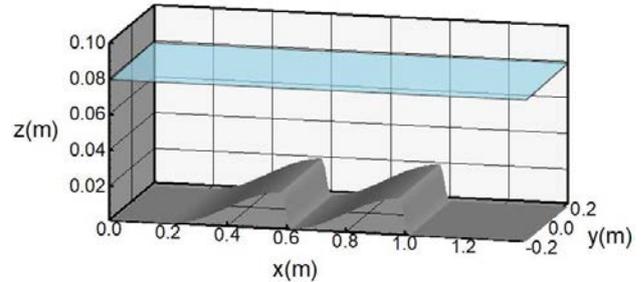


図-1 計算領域の概念図

表-1 計算格子

	格子幅 (m)	格子数
x 方向	0.01	140
y 方向	0.04	10
z 方向	0.002	50

モデルには非線形 $k-\varepsilon$ モデルを用いる。

(2) 数値解析法

本解析の計算手法について説明する。基礎式の離散化には有限体積法を適用し、完全スタガード格子を用いる。運動方程式の移流項の離散化には QUICK スキームを、 Φ の移流方程式の離散化には TVD-MUSCL 法を用いた。また、速度場の数値拡散による気液界面のぼやけを防ぐため、 Φ については体積補正を行った。 k 及び ε 方程式の移流項の離散化には Hybrid 法を適用する。固定壁面及び砂堆近傍の境界条件には壁関数法を用い、せん断応力と乱流特性量を求めた。

3. 砂堆上流れの解析

3次元流体解析モデルを Kadota & Nezu が行った実験¹⁾に適用する。実験での水路幅は 0.4 m, 水深は 0.08 m, 流量は 80 l/s, 砂堆の波長は 0.4 m, 波高 h_s は 0.02 m である。本解析の計算領域全体の概念図を図-1に、計算格子を表-1に示す。境界条件として上流端で定常流量を与え、時間間隔を 0.0002 sec として $t = 200$ sec まで計算を行った。クレスト下流側の

キーワード 砂堆, 3次元数値解析, 密度関数法

連絡先 〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂 C1-3 TEL075-383-3269

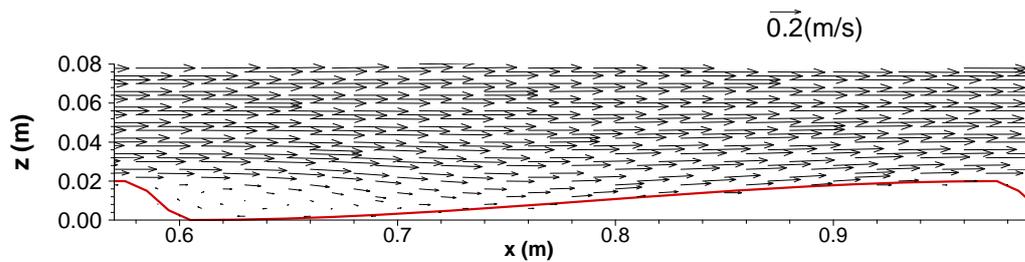


図-2 流況図

$x=0.61\text{ m}$, $x=0.77\text{ m}$ 地点 (以降それぞれ A, B 断面) における流速分布, 乱れ強さ, レイノルズ応力の鉛直分布について比較する.

計算結果として横断方向水路中央断面での流況図を図-2に, 平均流速, 乱れ強度, レイノルズ応力の実験結果との比較をそれぞれ図-3, 図-4, 図-5に示す. 左図が A 断面の結果であり, 右図が B 断面での結果を示している.

流況図から実験結果と同様にクレスト背後において剥離渦が発生していることがわかる. また, 流速分布等の比較を見ると, クレスト下流部の A 地点では実験結果と概ね一致していることがわかる. 一方, B 地点での比較をみると, 流下するにしたがって乱れ強さ, レイノルズ応力が徐々に減少していく傾向は確認できるが, 定量的には再現できていない. しかし, LES を用いた同様の実験の再現計算³⁾では, x 方向と z 方向の格子幅を細かいもので 0.4 mm と設定しており, 比較的粗い格子幅を適用した本研究の結果としては十分良好な結果が得られたものと考えられる.

4. まとめ

本研究では RANS を用いたデカルト座標系の 3 次元流体解析モデルを用いて砂碓上の流れ解析を行い, 実験結果を概ね再現できることを示した. 今後, 流砂モデルを導入し, 砂碓の形成過程に関する数値解析について検討したい.

参考文献

- 1) Kadota, A. and Nezu, I: Three-dimensional structure of space-time correlation on coherent vortices generated behind dune crest, *Journal of Hydraulic Research*, Vol.37, No.1, pp.59-80, 1999.
- 2) Onda, S., Hosoda, T., Jacimovic, N. and Kimura, I.: Numerical modelling of simultaneous overtopping and seepage flows with application to dike breaching,

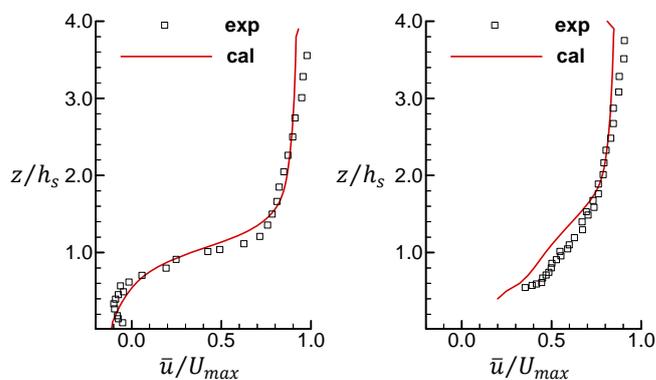


図-3 流速分布の比較

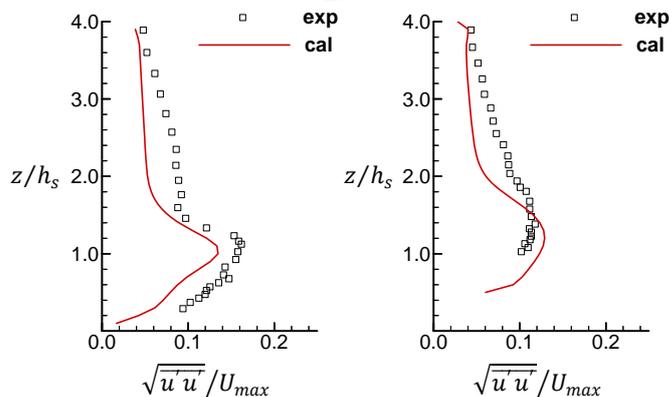


図-4 乱れ強度分布の比較

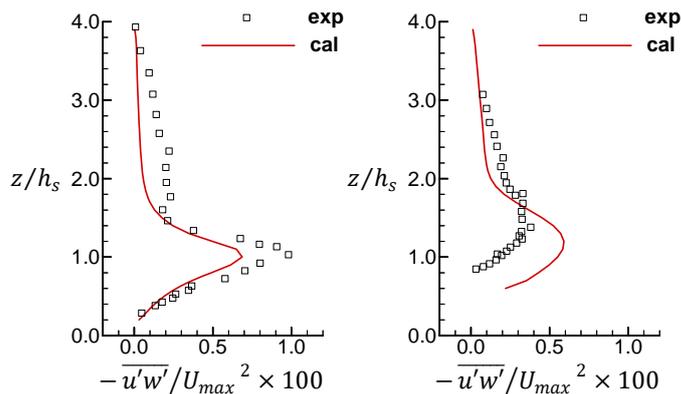


図-5 レイノルズ応力分布の比較

Journal of Hydraulic Research, Vol.57, No.1, pp.13-25, 2019.

- 3) Grigoriadis D. G. E., Balaras E. and Dimas A. A.: Large-eddy simulations of unidirectional water flow over dunes, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 114, Issue F2, 2009.