

波による砂漣の発生・発達過程に関する数値解析

金沢大学大学院 学生会員〇市岡大昌
金沢大学 正会員 榎田真也・由比政年

1.はじめに

ある条件下の波によって海底面に砂漣が形成される。砂漣の凹凸によって生じる渦は砂を巻き込みながら複雑に運動するため、砂漣は沿岸域の漂砂現象に影響を及ぼすとともに、波のエネルギー減衰の一因となる。砂漣に関して工学的・流体力学的観点から様々な知見が蓄積されているものの、その現象は波・砂（底質）・地形の要素間の複雑な相互作用系であるため、未解明な点も多く残されている。波による砂漣の発生・発達過程に関する研究の大部分は物理実験によるもので、3者の相互作用を考慮した数値解析は意外に限られている。そこで本研究では、著者らの数値モデル¹⁾を基礎に改良を加え、波の作用により初期の微小凹凸から平衡状態に達するまでの過程の再現計算を行い、数値解析モデルの適用性や課題を検討した。

2. 数値解析モデル

本研究の数値解析モデルは、流体場を計算するモデルと底質輸送モデル、底面地形モデルによって構成され、これらの連成解析により計算される。流体場の計算は Navier-Stokes 方程式に LES 型乱流モデルを追加した運動方程式を用いる。底質輸送は輸送形態を掃流砂と浮遊砂に分けてモデル化し、掃流砂は Van Rijn の式、浮遊砂は濃度の移流拡散方程式を用いて計算する。底面地形の変動は砂の体積保存の関係から求める。地形変化に合わせて計算格子を再形成して、次の時間ステップの流体・底質輸送の計算を行う。境界条件として、水平・奥行き方向で速度・圧力・底面せん断力については周期境界条件とした。そして底面境界に擾乱のために Vittori ら²⁾に従って微小な流速を与えた。

3.解析条件

解析対象は、波による砂漣の初期の発生過程に関する関口ら³⁾の実験(case-1)および造波水槽を用いて初期平坦地形から砂漣が十分発達し平衡状態に達するまでの著者らの実験(case-2)である。波によって生じた流速変動は岸沖方向の非対称性があったため次式で与えることにした。

$$u_{\infty} = U_1 \cos\left(2\pi \frac{t}{T} - \gamma\right) + U_2 \cos\left(4\pi \frac{t}{T} - 2\gamma\right), \quad \gamma = \cos^{-1}\left(\frac{\sqrt{U_1^2 + 8U_2^2} - U_1}{4U_2}\right)$$

ここで、 t は時間、 T は波の周期、 U_1, U_2 は流速振幅である。実験計測値に合うように解析では表-1に示す条件を与えた。

表-1 解析で用いた流速振幅

| | U_1 (m/s) | U_2 (m/s) | T (s) |
|-----------|-------------|-------------|---------|
| Case-1(a) | 0.14 | 0.04 | 2.5 |
| Case-1(b) | 0.14 | 0.001 | 1.0 |
| Case-2 | 0.14 | 0.08 | 2.5 |

4.解析結果及び考察

(1) 砂漣の初期発達過程(case-1)

実験と同様に窪みのある初期地形に対して振動流を発生させ、砂漣の発生・発達に関して時間変化を解析した。初期条件は静止流体場とし、時間 $t=0$ から振動流を発生させる。(a)は波高 $H=6\text{cm}$ 、周期 $T=2.5$ 秒の

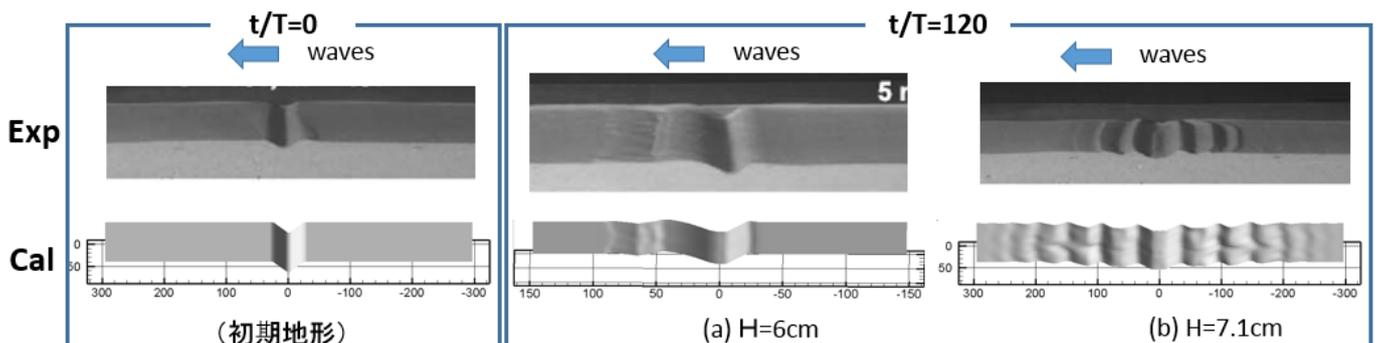


図-1 砂漣の発生過程 (Case-1)

波で、流速変動は岸沖方向の非対称性が強い条件、(b)は $H=7.1\text{cm}$, $T=1$ 秒の波で、流速変動はほぼ対称な条件である。実験結果と数値解析モデルで計算された砂漣の形状との比較図を図-1 に示す。(a)の計算結果では初期窪地の岸方向のみ砂漣の発生が確認できる。実験結果と似た砂漣形成の初期過程が概ね再現できている。(b)の計算結果では、ほぼ対称な振動流によって初期窪地の両側へ発達する砂漣の様子が確認できた。実験結果に比べて計算による地形変化は少し早く進行する傾向を示した。その他の実験条件についての計算結果から、本解析モデルは異なる波の条件で生じる砂漣の初期発達過程の特徴を概ね捉えることができた。

(2) 平衡砂漣の形成(case-2)

実験と同様に底面に砂漣形成のきっかけとなる小さな凸部(高さ数 mm)を与えた砂面上が波によって砂漣が発生し、ほぼ平衡状態になるまでの過程を解析した。実験で観測された 192 波後 ($t/T=192$) の砂漣の形状と本解析モデルで計算された 100 周期後 ($t/T=100$) の地形を図-2 に示す。実験では砂漣頂部の岸側に急斜面をもつ非対称な形状になり、同じ波の条件で十分発達し、ほぼ平衡状態に達した砂漣の平均的な高さ η = 約 1cm, 波長 λ = 約 6cm であった。解析でもほぼ同様な形状の砂漣が再現された。計算領域を x 方向に砂漣の 2 波長分と設定したが、解析結果でも 2 波長分の砂れんが確認できた。なお、解析領域の大きさが形成される砂漣の波長に影響がないことを、領域サイズを変更した計算を実施して確認している。解析による砂漣の大きさは高さ $\eta = 0.8 \sim 1.1\text{cm}$, 波長 $\lambda = 5.6\text{cm}$ であり、概ね実験結果の範囲と合う。

解析による砂漣地形、流速と浮遊砂濃度分布の時間変化を図-3 に示す。砂漣の頂点付近で発生した渦に砂が巻き込まれて、浮遊砂となって移動する様子が実験と同様に計算結果にも確認できた。図-4 に平衡状態の砂漣の高さと波長の比とシールズ数の関係を示す。従来の実験結果に、本研究の結果を追加した。本研究の砂漣地形の波形勾配は従来実験結果の範囲内にあることが確認できた。

5.まとめ

流体・底質輸送・地形の各要素モデルを連成的に組み合わせた 3 次元数値解析モデルによって、波による砂漣の発生・発達過程や平衡状態に達した形状を良好に再現することができた。今後は幅広い波の条件への適用性を確認するとともに、波・流れ共存場での砂漣の発達や漂砂量の評価等を検討していきたい。

参考文献

- 1) 榎田, 由比, 石田: 振動流場における小口径円柱周辺の局所洗掘に関する 3 次元数値解析, 土木学会論文集 B2, Vol.65, No.1, pp.786-790, 2009.
- 2) Vittori, G. and Verzicco, R.: Direct simulation of transition in an oscillatory boundary layer, J. Fluid Mech. Vol. 371, pp.207-232, 1998.
- 3) T. Sekiguchi and T. Sunamura: Effects of bed perturbation and velocity asymmetry on ripple initiation: wave-flume experiments, Coastal Engineering, Vol. 50, pp.231-239, 2004.

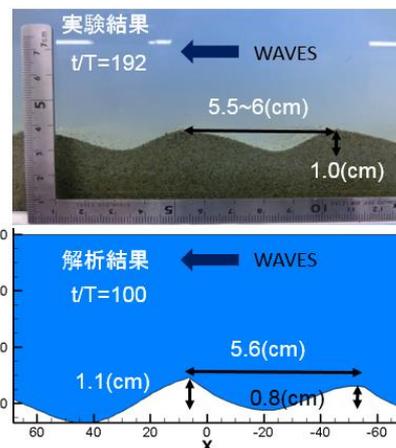


図-2 平衡状態の砂漣形状の比較

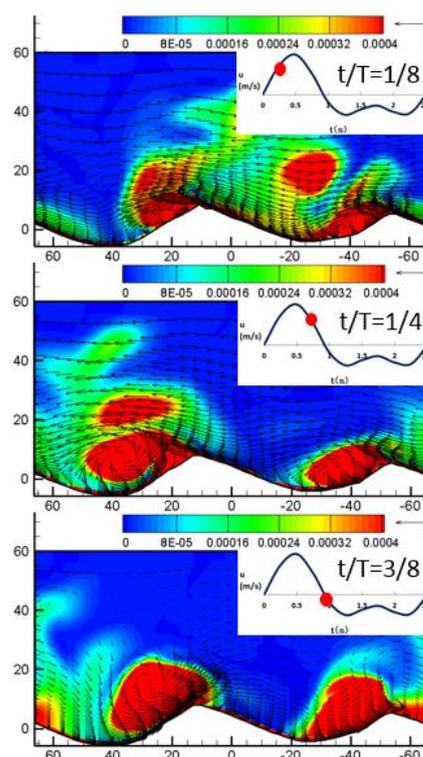


図-3 地形と流速・浮遊砂濃度の分布

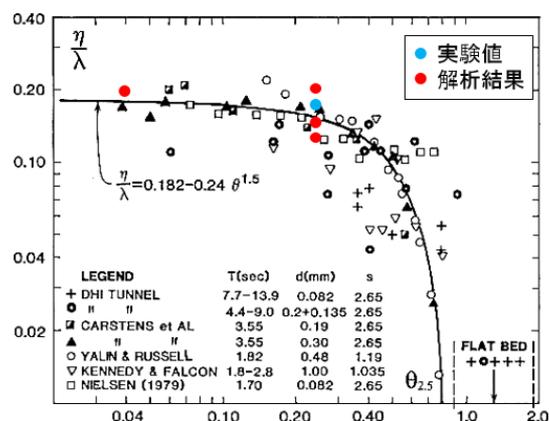


図-4 砂漣の波形勾配とシールズ数の関係