

模型実験と数値解析の砂州の発生・発達 of 物理的過程の相違について

新潟大学大学院自然科学研究科 学生会員 ○住谷 翼
新潟大学大学院自然科学研究科 学生会員 関 翔平
新潟大学 BDA 研究センター 正会員 茂木 大知
新潟大学災害・復興科学研究所 正会員 安田 浩保

1 はじめに

細砂や礫で構成される河川の底面には、周期的な起伏形状が形成される。主に中流域に位置する河川には、中規模河床波である砂州が発生・発達する。一定規模以上の砂州は、流れに影響を与え蛇行を発生させ、洪水時の越流の助長や堤防侵食、河川構造物の破壊を引き起こす。そのため、砂州の発生・非発生やその動態の把握は重要である。

これまで、砂州の動態の把握を目的として再現計算が多く実施されており、さまざまなモデルが開発されている。その一つである iRIC は、初期条件を揃えることで、実験において確認される平衡時の砂州の波長・波高を再現可能とされる¹⁾。しかし、砂州が平衡状態に至るまでの過程を含めた再現性の確認は、十分に行われていない。

砂州の波動的な性質に着目し、砂州の幾何学形状の流下を記述する移流拡散方程式²⁾が導出されている。式中における移流速度と拡散係数によって、移流と拡散の比を示す Péclet 数 (Pe) を算出できる。砂州において、移流は流れによる河床の前進、拡散は河床を均す効果を示し、 Pe を用いると数値解析の再現性を物理的観点から検討できる。

本研究では、模型実験と数値解析の砂州の発生・発達の物理的な過程の違いを把握することを目的とし、砂州の発生条件を与えた模型実験と、これと同じ条件を与えた iRIC の移動床解析を実施した。その上で、数値解析の砂州の再現性を把握するため、両者の Pe を比較した。

2 模型実験の概要と解析手法

2.1 実験条件

実験条件を表-1 に示す。表中の B は水路幅、 I は水路勾配、 h_0 は等流水深、 τ_* は無次元掃流力、 Fr はフルード数を示す。供給流量 Q はどちらも 3.0 L/sec を定常で与えた。無次元限界掃流力 τ_{*c} は岩垣の式³⁾を用いて算定したところ、0.034 であった。初期条件は黒木ら⁴⁾の砂州の領域区分図を参考として砂州の発生条件とした。

実験は、全長 12 m、幅 0.45 m の直線矩形断面水路を用いた。また、実験水路のうち移動床区間を約 10 m とし、平均粒径 0.76 mm の 4 号珪砂を厚さ 5 cm で敷き詰め、初

表-1: 模型実験において設定した初期の水利条件

条件	$BI^{0.2}/h_0[-]$	$I[-]$	$h_0[m]$	$\tau_*[-]$	$Fr[-]$
1	8.3	1/200	0.019	0.075	0.83
2	6.8	1/300	0.021	0.056	0.69

期形状は均し板により平坦床とした。給砂による影響をなくすため、移動床区間における上流側 2m を侵食部として設定し、無給砂により実験を行った。実験は、再現性の確認のため 3 回ずつ通水を行った。実験における水面位と底面位は、Stream Tomography (ST)⁵⁾を用いて 1 分間隔で計測した。この時の空間分解能は $1 \times 1 \text{ cm}^2$ とした。

2.2 数値解析

移動床解析には iRICNays2DH を用い、計算格子は 3 cm とした。解析条件は実験条件と同様とし、初期底面に粒径規模の擾乱をランダムで与えた。また、下流端条件として等流水深を与え、周期境界条件を設定した。

2.3 解析手法

Pe の定量化には、Ishihara and Yasuda²⁾によって導出された砂州スケールの底面位に関する移流拡散方程式を用いる。紙面の都合上ここでは導出や関連式については割愛する。同式中において M_x は河床波の縦断方向移流速度、 D は拡散係数を示し、 Pe の x 成分は以下のように表される。

$$Pe_x = \frac{M_x L}{D} \quad (1)$$

L は代表長さであり、今回は B とした。 Pe_y は M_x の代わりに横断方向移流速度 M_y を用いることで算出できる。同式より、 Pe が小さいほど拡散が卓越し、大きいほど移流が卓越することがわかる。

模型実験の Pe の算出に用いる水深と流速は、計測された底面を与えた平面二次元の浅水流解析により求めた。 Q は実験条件と同様に 3.0 L/sec を定常で与えた。

3 実験・数値解析における底面形状

図-1 に、条件 1 における実験・数値解析の底面図を示す。条件 1 の模型実験においては、まず $t = 25$ で波長が川幅規模であり、対岸に向う交錯模様を確認された。その

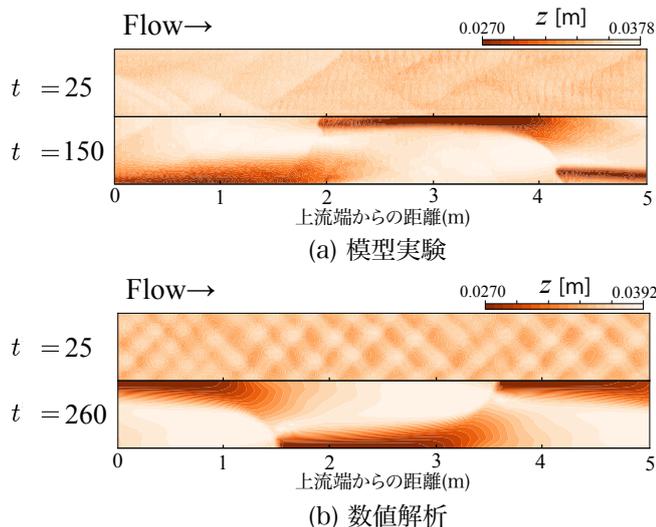


図-1: 実験・数値解析における底面の平面図

後, $t = 50$ で単列砂州が発生し, 以後時間とともに波長・波高を発達させ $t = 150$ で平衡状態となった.

数値解析においても, まず, 模型実験同様 $t = 25$ で波長が川幅の半分程度の交錯模様が形成された. この模様は $t = 180$ まで確認され, その後, 砂州が発生・発達し, $t = 260$ で平衡状態となった. 数値解析と模型実験を比べると, 波長及び波高は両者で同規模となったが, 数値解析の方が交錯模様から砂州の発生に至るまでに多くの時間を要した.

条件2でも, 砂州が平衡状態に至るまでの時間に違いがあるものの, 実験・数値解析それぞれで傾向は同様であり, 以下条件1に基づき議論を進める.

4 Pe の時間変化

Pe の時間変化を, 各時刻ごとに水路全体の平均を取り, その推移によって確認する. 実験・数値解析における Pe のプロットを図-2に示す. プロットは実験を赤系, 数値解析を青系とし, また実験・解析でマーカーを変えている. 図は横軸に Pe_x , 縦軸に Pe_y をとり, Pe_y では絶対値とした. また, 実験における Pe を Pe_{exp} , 数値解析における Pe を Pe_{cal} とする.

実験では $Pe_{x,exp}$ はあまり変化せず, $Pe_{y,exp}$ は通水の全時間を通じて増加していた. 一方, Pe_{cal} の挙動は大きく異なっていた. 底面形状と合わせて変化を確認する. 交錯模様が発生した $t = 25$ まで $Pe_{x,cal}$ は増加, $Pe_{y,cal}$ は減少し, 交錯模様が継続する $t = 20 \sim 180$ で $Pe_{x,cal}$ は高止まり, $Pe_{y,cal}$ は下げ止まっていた. その後, 砂州が発生・発達するにつれて $Pe_{x,cal}$ が減少, $Pe_{y,cal}$ が増加している. また, 全解析時間を通して Pe_{cal} は Pe_{exp} と比べ大きい傾向にあった.

砂州の発生から平衡に至る Pe の挙動は, 実験・数値解析

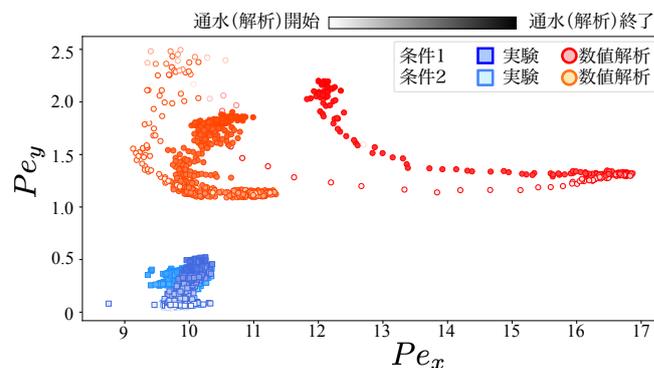


図-2: 実験・数値解析における Pe_x と Pe_y の時間変化

ともに横断方向への移流の増大を示し, おおよその傾向としては一致している. 実験と数値解析で特に異なるのは, 交錯模様の段階である. 実験では交錯模様が追いつきながら砂州が発生し, このとき $Pe_{y,exp}$ は増加している. 一方, 数値解析では交錯模様が長期に維持され, その後砂州が発生する. Pe_{cal} の挙動としても, $Pe_{x,cal}$ は増加, $Pe_{y,cal}$ は減少し, 結果として流下方向への移流が強く, 交錯模様を維持する方向に現象が向かっている. この段階における強い移流は実験では確認されないものである. これらのことは, 模型実験と数値解析の砂州の発生・発達の物理的な過程は異なるものであることを示唆する.

5 終わりに

本研究では, Pe を指標として模型実験と数値解析の砂州の発生・発達の物理的な過程の違いを調べた. その結果, 模型実験と数値解析とで一致していたのは砂州の発達段階における Pe_y の拡大のみであることが分かった. 砂州現象を扱うことを目的とした場合, 数値解析を用いることで初期の水理条件に対してどのような河床波が発達するかの把握は可能とされる. 一方で, 数値解析における砂州の発生の過程では流下方向への移流が大きいなど, 模型実験と異なる物理的な過程を記述している可能性がある.

参考文献

- 1) Y. Shimizu et al., Advances in computational morphodynamics using the International River Interface Cooperative (iRIC) software, *Earth Surf. Process. Landf.*, vol.45, pp.11-37, 2019.
- 2) Ishihara M., Yasuda H., On the Migrating Speed of Free Alternate Bars, *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, vol.127, Issue 10, e2021JF006485, 2022.
- 3) 岩垣 雄一, 限界掃流力に関する基礎的研究, 土木学会論文集 41 号, pp.1-21, 1956.
- 4) 黒木 幹男, 岸 力, 中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究, 土木学会論文報告集 342 号, pp.87-96, 1984.
- 5) Moteki D., Murai T., Hoshino T., Yasuda H., Muramatsu S., Hayasaka K., Capture method for digital twin of formation processes of sand bars, *Phys. Fluids*, vol.34, 034117, 2022.