

砂州の物理的性質の捕捉のための空間解像度

新潟大学大学院自然科学研究科 ○学生員 茂木 大知
新潟大学災害・復興科学研究所 正会員 安田 浩保
新潟大学理学部理学科 非会員 早坂 圭司
新潟大学工学部工学科 非会員 村松 正吾

1 はじめに

砂礫河川の底面には、川幅の数倍の波長を持つ砂州が存在している。砂州は偏流の主要因として知られ、蛇行などのマクロ的な河川の形態力学的な性質に関与すると推測される。これまで、その形成機構は、地形学的方法、模型実験、数理解析により研究されてきた。

交互砂州上の流れは、その波長の水深に対するスケール比に基づき、経験的に浅水流を仮定した解析が行われてきた(例えば1),2)。理論解析を通し、砂州の形成を支配する変数の特定などの成果が得られ、その妥当性は実河川と実験の観測により確認されている。近年の河川工学の実務においては、同様の方程式の数値解析を用い、実河川の河床形状の時間発展の予測が一般的に行われるようになり³⁾、治水技術の中核的な技術となった。しかし、これらの解析の基礎となる浅水流の仮定について、その導入の根拠や導入に伴う説明限界は明確になっていない。また、砂州の規模に立脚した浅水流を仮定した解析において、砂州に比べて規模が小さな流体塊同士の質量と運動量の保存則がこれらの解析において両立可能かどうか不明瞭である。

著者らは、近年開発した模型実験における計測装置⁴⁾により、平坦床から形成される砂州上の流れのマクロ的視点における遷移を初めて定量化した⁵⁾。また、浅水流の仮定は、底面の河床波が一定以上に発達した状態で初めて成立することを実証した⁶⁾。これらの成果は、流れと砂州を一体的に捉えることできる十分の広い検査範囲を与えた時のものである。現状では、砂州波長規模より小さい検査範囲を設定した場合、上述したような砂州の性質を捉えられるかは不明である。このことが明らかとなれば、前段落で提起した解析の課題を解決する知見が得られるものと推測される。本研究では、砂州が形成される条件の実験を実施し、砂州波長に比べて小さい規模の検査範囲を設定して範囲毎に砂州に特有のマクロ的な性質が確認できるかを調べた。

2 模型実験

本章では、本研究で実施した模型実験とその結果について述べる。実験の計測データは、対象区間を4通り設定し、

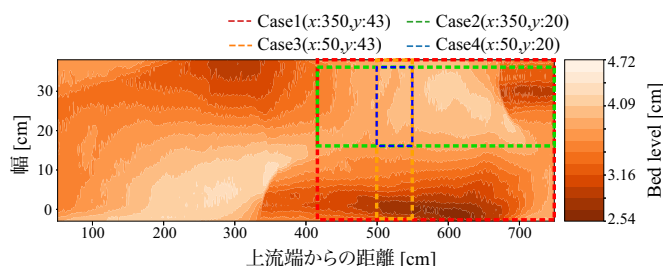


図-1 設定した解析範囲。背景コンター図は最終時刻の底面形状。

その各々の範囲における水面・底面の水深に対する相関係数(水面-水深： r_{wl} ，底面-水深： r_{bl})を算定した。対象区間は図-1に示す通りで、上下流端の影響を受けにくい水路中央付近のデータを用いた。

2.1 実験条件

本研究における模型実験は、12×0.45 m (全長×幅)、勾配1/300の矩形断面水路を用いた。水路床には、平均粒径0.76 mmの珪砂を5 cmの厚さで平坦に敷設した。水理条件は、底面に交互砂州が発達する条件とするため、上流端から供給される流量を3.0 L/sとした。この時、砂州の発生の指標となる川幅水深比²⁾は6.8である。実験は、水面と底面を1分間隔で計測しており、通水時間は十分に発達した交互砂州が底面に確認された420分までとした。

2.2 対象区間ごとの相関係数の偏差

上述した実験の結果、最終時刻において形成された砂州の波長は700 cm程度であったため、これを基準とした検査範囲を設定した。検査範囲は、縦断方向は砂州の半波長とそれより小さい範囲の2パターン(350 cm, 50 cm)とし、横断方向は、計測が困難な壁面付近を除いた水路全幅とその半分(43 cm, 20 cm)とした。

本研究では、まず、実験によって計測された各時刻の水面及び底面の面的な幾何学形状データを利用して、各検査範囲における r_{wl} 、 r_{bl} を算定した。算定の際には、既報⁵⁾の通り、範囲内の面データを一次元ベクトルに整形し、相関係数を算定した。この際、設定した検査範囲の基準算定のため、図-2に示すように全データを使用した相関係数 $r_{wl_{full}}$ 、 $r_{bl_{full}}$ を併せて算定した。これまでに、砂州の発達

過程における r_{wl} , r_{bl} の変化は時間と共に時間変化率は小さくなり、定常となることが知られている。そこで、 r_{wl} , r_{bl} の時間変化率 $\partial r_{wl}/\partial t$, $\partial r_{bl}/\partial t$ を算定し、 $\partial r_{wl_{full}}/\partial t$, $\partial r_{bl_{full}}/\partial t$ との偏差によって各検査範囲のマクロ的な性質を評価した。

図-3 に、各検査範囲における水面・底面の相関係数の変化率の基準からの偏差を示す。図中における偏差は、基準値の時間変化率からの乖離を示す。上段に示す r_{wl} においては、検査範囲の狭さと基準からの乖離に相関が見られる。縦断方向に半波長の Case1,2 では、時間的にその偏差の幅の変化は少ない一方、Case3 では後半、Case4 は前半及び後半で偏差が拡大した。下段の r_{bl} では、通水初期には、全ての Case で一様に基準からの乖離が確認された一方で、Case4 を除いてその偏差は時間と共に縮減して行き、150 分時点以降はほぼ偏差は確認されない。実験中盤から後半で定常となる $r_{bl_{full}}$ に対して偏差がないことは、Case1 から 3 においては r_{bl} が定常に達していることを意味する。実際に、紙面の関係上図面は省略するが、全ての検査範囲において 200 分時点で r_{bl} の値はほぼ同値であった。

縦断方向の検査範囲が狭い Case3 と 4 において、後者の偏差が拡大する時間は、砂州の前縁部が検査範囲を通り過ぎた後の時刻である。この時刻のこの縦断範囲は横断方向の底面高の差が最も大きい箇所である。この時、横断方向の範囲が狭い Case4 では、左岸における砂州の上部のみが対象となり、砂州に特有の横断形状をその検査範囲に含まれなかった。

これらの結果から、砂州の形成過程におけるマクロ的な性質に関して、 r_{wl} は検査範囲の狭さに相関するように偏差が拡大し、 r_{bl} は横断方向の影響が大きくなることが分かった。言い換えると、検査範囲を狭く取るほどに、水面の影響は無視できず、底面の砂州が十分に発達した場合でさえ一定の状態と見做せなくなる。つまり、砂州が存在する河川においてその性質をマクロ的に把握するには、砂州の全体を捉える検査範囲が必要となることが示唆される。

3 おわりに

本研究では、実験データを用い、砂州波長を十分に捉えた場合に得られるマクロ的な性質は、砂州規模以下の検査範囲においても確認できるかを検証した。その結果、検査範囲が狭まるにつれて水面の流れへの影響が大きく異なり、底面においても検査範囲の横断方向を十分に広く設定する必要があることが分かった。

著者らは、最近、砂州上の流れを浅水流とみなすには、一定以上の河床波の発達が必要となることを明らかにした

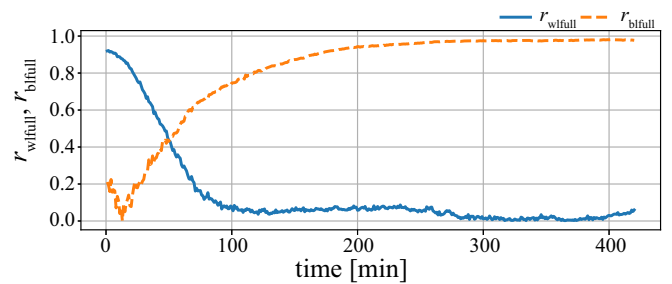


図-2 水面-水深 r_{wl} と底面-水深 r_{bl} の相関係数の時間変化。両者は砂州の形成と共に定常となる⁵⁾。

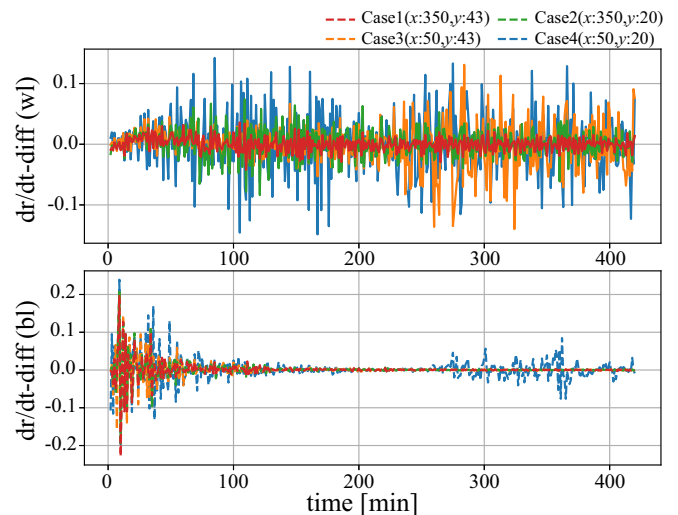


図-3 各検査範囲における r_{wl} と r_{bl} の変化率の基準からの偏差。

6). 本研究により、発達した砂州上の流れにおけるマクロ的な性質は浅水流であっても、ミクロ的には浅水流の仮定が適合しない場合があることが示唆された。しばしば砂州上の流れの数値解析は本研究で設定した検査範囲より狭い範囲で実施される。このため、今後、浅水流仮定の適用限界や限界分解能について解明が必要である。

参考文献

- 1) M. Colombini, G. Seminara and M. Tubino, "Finite-amplitude alternate bars, *J. Fluid Mech.*, 181, 213–232, 1987.
- 2) 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, No. 342, pp.87–96, 1984.
- 3) Shmizu Y. et al., Advances in Computational Morphodynamics Using the International River Interface Cooperative (iRIC) Software, *Earth Surf Process Landf.*, 2020.
- 4) Moteki D. et al., Capture method for digital twin of formation processes of sand bars, *Phys. Fluids*, 2022.
- 5) D. Moteki et al., On the occurrence of sandbars. *Phys. Fluids*, 2023.
- 6) 茂木ら: 浅水流を仮定した数値解析における砂州の発生・発達の物理機構の記述の適正性, 土木学会年次学術講演会概要集, 2023.