

交互砂州の発達に伴う流れの応答

新潟大学ビッグデータアクティベーション研究センター ○正会員 茂木 大知
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
新潟大学災害・復興科学研究 正会員 安田 浩保

1 はじめに

河川では、流水と底面の相互作用により河床波と呼ばれる周期的な幾何学形状が自発的に形成される¹⁾。中でも、国内河川の大半に形成される交互砂州は、偏流や側岸侵食の主要因であることから、治水上の大きな課題である。実務では、よく発達した交互砂州への対処として、掘削による平坦床への修正や砂州波高の縮減が実施されるが、その効果は永続せず同様の砂州が形成される。また、交互砂州には発達の限界が存在し、一定の波長や波高において平衡状態となる。つまり、交互砂州は、流水と底面の相互作用の一つの終着といえ、ここに至る物理を解明することにより、現在の対症療法的な治水から根治的な治水への転換が期待できる。

河川の流れは、その水深に対する平面スケールの大きさから、平面二次元で近似される。この時、流れのエネルギーの損失は底面における摩擦が第一次近似となり、大きな摩擦が発生する箇所では大きな掃流力を生じるために大きな流砂量が発生する。流れの視点では、河床が時間的に洗掘や堆積によって変動する場合、その河床形状は流れのエネルギーの損失が大きいため最適な形状への修正力が働いていると見做せる。交互砂州の形成の発端は、平坦床でさえ存在する掃流力の分布が要因²⁾とされ、微小な底面の擾乱を主要因とする河床形状の変化が広い範囲で生じる。その後、交互砂州の形成・発達に伴い、周期的ではあるが掃流力の分布は拡大していくが、最終的に平衡状態へ達するように河床の変化は定性的には落ち着いてゆく。つまり、上記の視点に立った場合、平坦床よりも交互砂州形状の方が流れのエネルギー損失が小さい適した形状である可能性がある。

平坦床と交互砂州上の流れの損失を定量化するには、流水と底面の相互作用を定量化する必要がある。しかし、模型実験でさえ交互砂州の形状と流れの一体的な把握は一般的に困難であり、この相互作用の研究の大きな制約となっていた。著者らは、模型実験における計測装置である Stream Tomography(ST)を開発し⁴⁾、交互砂州の形成過程を非接触で定量化でき、STによる底面形状から数値

表-1 実験及び数値解析条件

条件	流量 [L/s]	河床勾配	τ_*	β	Fr
1	2.2	0.110	0.108	18.3	1.15
2	2.7	0.009	0.106	15.3	1.07

解析を用いることで底面形状に対応する流れも定量化可能である。そこで、本研究では、交互砂州の形成条件における模型実験に基づいて、砂州の形成過程における流れのエネルギー損失の変化を定量化した。

2 模型実験

2.1 実験条件

本研究における模型実験は、長さ 12 m、幅 0.45 m の FRP 製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、表 1 に示す通りの 2 条件とし、黒木・岸³⁾の領域区分図を参考に単列交互砂州の発生領域とした。通水時間は、交互砂州の発達が定性的に平衡となった時点までとし、ST を用いて 1 分間隔で底面形状を測定した。その後、iRIC⁵⁾ の Nays2D を用いて、底面形状を入力した数値解析を実施し、水理量を算定した。

3 交互砂州の形成・発達に伴う流れのエネルギー損失の変化

3.1 エネルギー損失の算定

本章では、交互砂州が形成・発達する平面的な流れのエネルギー損失を見積もるため、前章の実験結果を基に以下の解析を実施した。ここで、上述の通り、砂州上の流れのエネルギー損失は等流近似の 1 次元的な摩擦損失で近似されるため、流線に着目する必要がある。そこで、図-1 に示すように、上流端左岸から右岸に向かってフラックスを積分し、その累計フラックスが 5% から 95% まで 5% 刻みとなる地点を始点とする 19 本の流線を設定した。その後、各時刻のそれぞれの流線を流線方向に等間隔で 50 分割し、それぞれの区分において以下の式でエネルギー勾配 I_e を算定した。

$$I_e = \frac{n^2 V^2}{h^{4/3}} \quad (1)$$

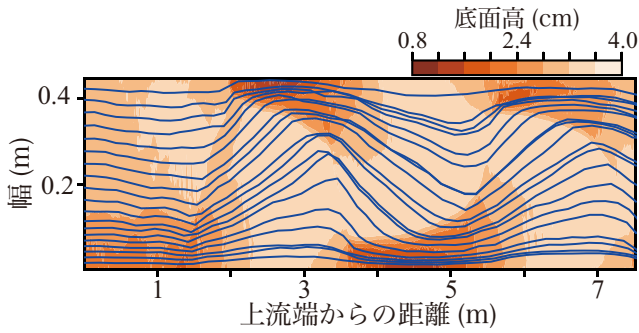


図-1 条件1における40分時点の底面形状と流線

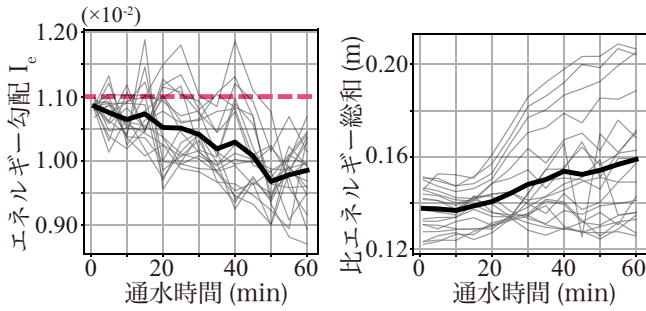


図-2 条件1におけるエネルギー勾配と比エネルギーの総和の時間変化

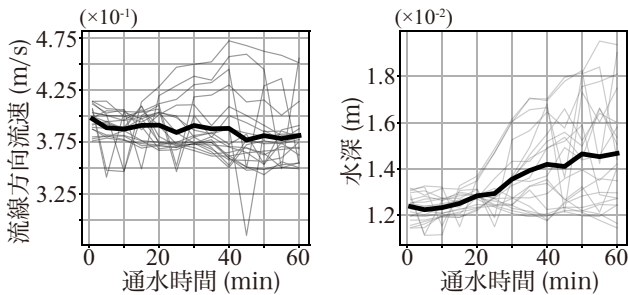


図-3 条件1の各流線上における流線方向流速と水深の平均値の時間変化

ここで、 n は Manning の粗度係数 ($=0.014$), V は流線方向の流速, h は水深である。

3.2 I_e の時間変化

以下の結果は、条件1, 2の双方において結果は同様であったため、条件1を代表して示す。図-2に、流線毎に平均した I_e の時間変化を示した。図中では、薄灰線で各流線における平均値を示し、黒太線で全流線の平均値を示した。また、図中には、参考値として実験の河床勾配 I_b を桃点線で示した。

図中の各流線の平均 I_e は、最初 I_b と同程度であり、通水初期は I_b の $\pm 10\%$ 程度の範囲内で変化していた。その後、交互砂州の形成・発達に伴い、側壁付近の I_e は上昇する一方で、流路中央付近では下降する様子が見られた。側壁付近での I_e の上昇は、交互砂州の発達に伴う前縁部付

近の洗掘の卓越によるものと推測され、時刻によっては I_b を超える値となった。 I_e の平均的なトレンドは、黒太線の全流線平均値で示したように緩やかに下降しており、最終時刻では I_b から 10% 程度小さい値となった。

3.3 交互砂州の形成に伴う流れのエネルギーの増加

前項で示した I_e の時間変化の下降トレンドは、流れの摩擦損失が交互砂州の形成とともに縮減されていることと同義である。エネルギー保存則に基づけば、これに伴って流れのエネルギーが増大する必要がある。この時、図-2に示すように、次式で計算される流線上の比エネルギーの総和が増大していることを確認した。

$$E = \frac{V^2}{2g} + h \quad (2)$$

また、比エネルギーの増加量は、初期に対して 10% 程度であった。

縮減された損失はどのように比エネルギーの増大に反映されるのだろうか。図-3に、条件1における流線方向流速と流線上の水深について、それぞれの平均値の時間変化を示した。図からは、交互砂州の形成・発達に伴い、流速は減少し、水深は増大していることが分かる。このことから、流れの視点における交互砂州の形成は、式-1に示す Manning 式が示す通り、流速と水深が共に損失を減じる方向へと変化する過程だと言える。また、上述した仮説の通り、交互砂州を形成するような河川においては、平坦床よりも交互砂州の方が流れに適した形状であることが示唆された。

4 おわりに

本研究では、平衡状態に近づくにつれて河床変動が抑制される交互砂州の特徴に基づいて、その形成過程の流れのエネルギー損失を定量化した。その結果、交互砂州は、発達するにつれて流れの損失が小さくなり、平坦床に比べて適した形状であることが示唆された。このことは、交互砂州が自発的に形成される原因を説明できる可能性があるため、広範な水理条件を設定し、より詳細に調べる予定である。

参考文献

- 1) Seminara, G., Fluvial sedimentary patterns. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 42(1), 43-66, 2010.
- 2) S. Seki, D. Moteki, H. Yasuda; Novel hypothesis on the occurrence of sandbars, *Phys. Fluids*, 35(10), 2023.
- 3) 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.
- 4) Moteki D., Murai T., Hoshino H., Yasuda H., Muramatsu S. and Hayasaka K.: Capture method for digital twin of formation processes of sand bars, *Phys. Fluids*, 2022.
- 5) 北海道河川財団, <http://i-ric.org>.