

単列砂州の波長・波高の発達過程の支配変数

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 序論

堤防の決壊や構造物の破壊など、河道内において甚大な被害を及ぼす主要因に砂州の存在が挙げられる。令和元年東日本台風¹⁾では、千曲川左岸 57.5k 付近の堤防が約 70m にわたり決壊したが、この区間は単列砂州による流れの水衝部であった。また、同出水において、上田電鉄別所線千曲川橋梁の左岸側橋台が河岸侵食および河床洗掘により落橋したが、この区間では、出水前後で砂州の位相が反転するほどの大規模な河床変動が生じた。これらの被害は単列砂州の移動とそれによる偏流が大きく影響を及ぼしたと推測できる。

現在の主な砂州の制御方法は、掘削工事である。河道内に発達した砂州を撤去し、河床を平坦に均すことで、河道の直線化や流下能力の復元を図る。一方、掘削工事に取り掛かる際、砂州の形状に基づいた明確な撤去基準は存在しないため、その実施時期の合理的な判断はできない。砂州の撤去基準が存在しない理由の一つに、どのような地形（川幅、河床勾配、河床材料の粒径など）において、どれほどの流量が流下した時に砂州がどれほど発達するかの予測が困難であることが挙げられる。このため、河岸にとって、砂州による危険性が十分に高い状態に達しているにもかかわらず放置されている場合と、砂州による危険性は低いにもかかわらず撤去されている可能性の両方が考えられる。

砂州の危険性は砂州の発達過程と密接に関係しているものと推測でき、上記の課題は、砂州の発達過程の関数形と支配変数を特定し、同過程をモデル化できれば、その解決が期待できる。藤田ら²⁾は模型実験を研究手法とし、砂州の波長と波高の時間変化を記録したところ、水理条件によって平衡値に達するまでの成長曲線が異なることを示した。しかし、支配変数の特定にまでは至っていない。弱非線形安定解析^{3),4)}では、砂州が平衡値に至るまでの成長曲線を描くことが可能だが、模型実験における計測間隔が低頻度であるため、同解析の妥当性は十分に確認されていない。また、数値計算^{5),6)}を手法としても、砂州の成長曲線を描くことができるが、計算ケースごとに妥当性の確認が必要なうえ、砂州の発達過程の支配変数を特定を試みた研究はない。

本研究では、模型実験を手法として砂州の波高の発達過程の関数形と支配変数の特定を試みる。まず、河床形状を時間方向に細かく取得可能な計測手法を用いて、さまざまな水理条件における砂州の波高の時間変化を定量化する。次に、砂州の波高の時間変化を適切に記述する関数形をフィッティングすることにより、その係数を取得し、変数とした流量と水路勾配との相関について調べる。

2 方法

2.1 実験方法

2.1.1 模型水路と初期河床

模型水路には全長が 12 m、水路幅が 45 cm の繊維強化プラスチック製水路を用いた。この水路のうち、上流端から 10 m の区間に平均粒径 0.76 mm の 4 号珪砂を高さ 5 cm で敷き詰めた。この区間の上流端と下流端には、高さ 5 cm、幅 5 cm、長さ 45cm の木板をそれぞれ設置しており、堰の役割を果たしている。通水開始前の底面は、均し板を用いて平坦にした。通水中は給砂は行っていないが、10 m の移動床区間のうち、上流側 2 m を給砂区間とし、下流側 8 m のみを計測対象とすることで、無給砂による影響を低減した。なお、砂州の形成を促進するために上流端左岸には 5 cm 四方のゴム製ブロックを設置した。水路内の給水は揚水ポンプを用いた循環式である。

2.1.2 水理条件

池田⁷⁾によれば、砂州の波長および波高の支配変数は川幅 B 、水深 h_0 、河床勾配 I 、流速 u_0 、重力加速度 g 、粘性係数 μ 、砂の質量密度 ρ_s 、流体の質量密度 ρ 、砂粒子の粒径 d の 9 つである。河床材料が一樣砂で、流れる水の温度は一定と仮定すれば、 g 、 μ 、 ρ_s 、 ρ 、 d は定数となるから、残る変数は B 、 h_0 、 I 、 u_0 の 4 つとなる。これを踏まえ、本研究では、室内水路において比較的实施が容易な水路勾配 I と供給流量 Q を変数とした模型実験を実施した。 I は、1/91、1/111、1/143、1/200 の 4 条件を設定した。 Q は 1.7 L/s、2.2 L/s、2.7 L/s、3.2 L/s の 4 条件を設定し、電磁流量計で値を確認しながら定常となるように与えた。4 種類の水路勾配のそれぞれに対して 4 種類の流量を与え、合計で 16 種類の水理条件を設定した。この際、黒木・岸

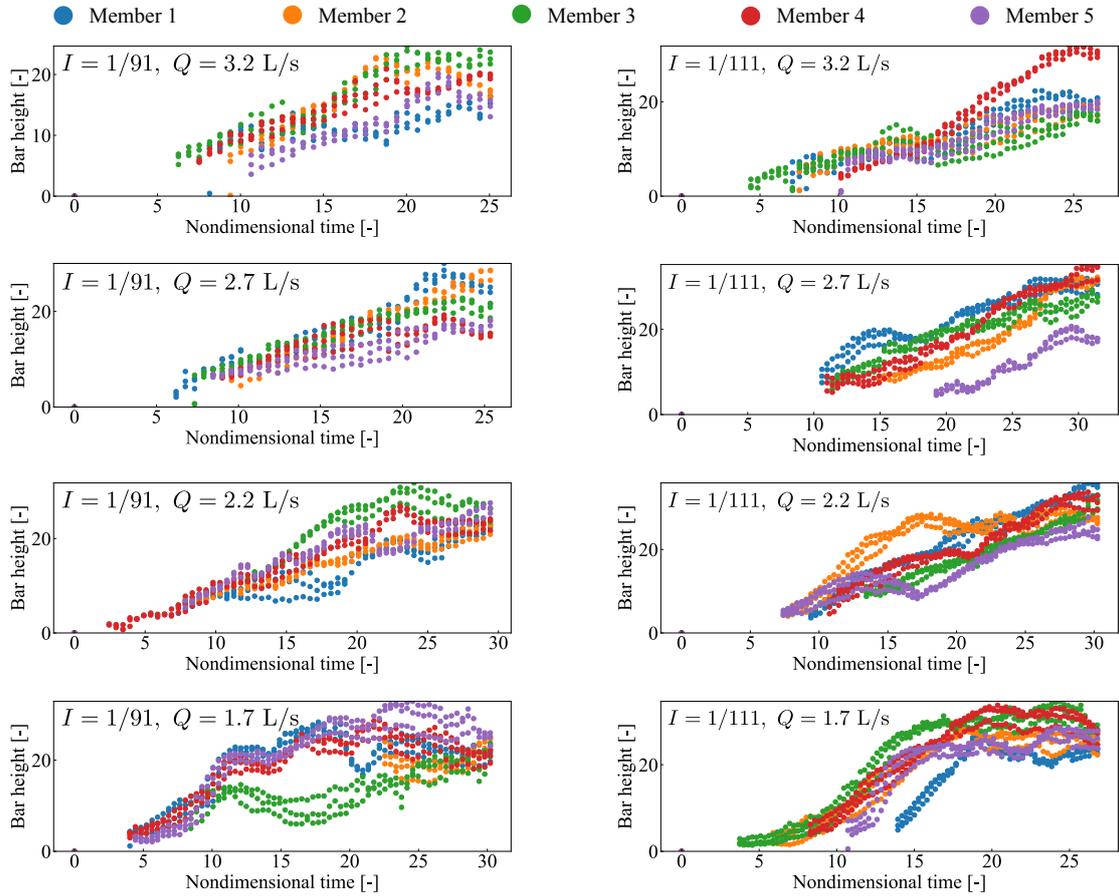


図-1 $I = 91, 1/111$ における砂州の波高の時間変化. 縦軸は粒径で無次元化されている. 横軸は式 (1) によって無次元化されている.

9) の領域区分図を参考に、水理条件を単列砂州の発生領域となるよう設定した。通水時間は、安定解析における時間の無次元化式^{6),8)}を参考とし、以下で示される t^* が概ね 30 となるよう設定した。

$$t^* = t \cdot \frac{q_s}{(1-p)h_0 B/2}. \quad (1)$$

ここで、 t^* は無次元化された時間、 t は時間、 q_s は掃流砂量、 p は空隙率で 0.4 を与えた。

2.1.3 計測方法

河床の時間変化の捕捉には、通水を継続したまま計測が可能な Stream Tomography¹⁰⁾(以後、ST と呼ぶ)を用いた。計測は各条件とも 1 分間隔で行った。実験回数は条件によって異なるが、一条件あたり 5 回以上は行った。本研究ではその単位を Member と呼ぶ。

2.2 単列砂州の波長・波高の機械的な算出方法

本研究では単列砂州の半波長をゼロクロス法によって定義し、その半波長内で波高を算出した。この際、単列砂州の波形がより顕著に現れる左右岸付近の 3 測線を対象とした。また、正確な砂州の波長を抽出するため、砂堆規模の河床波の波長である 10 cm 以下の波をカットするローパスフィルタをかけた。なお、半波長としたのは、条件や時間

帯によっては砂州の一波長が解析対象区間に入りきらないためである。ゼロクロス法によって抽出された半波長の個数は、条件によって異なるが、最終時刻において 1 から 3 個程度である。そこで、最終時刻において、波高の発達が顕著に見られ、かつ時間的に追跡しやすい一つの個体を抽出して波長の時間変化を定量化した。波高はその追跡した個体の 2 測線の差のうち、最大値を採用した。

3 実験結果と相関分析

3.1 砂州波高の時間変化

図-1、図-2 に、前述の方法で算出した単列砂州の波高の時間変化を示す。各条件、5 Member 分を抽出して示す。 t^* が 0 から 5 付近で値が存在しないのは、砂州が未だ形成されていないためである。同図より、砂州波高はどの条件においても概ね平衡値に達していることが確認できる。その関数形も既往研究^{2),3),4),5),6)}と同様に、S 字型曲線を描くことがわかる。水路勾配ごとに着目すると、流量が大きい条件では波高が時間経過とともに線形に発達していくのに対し、流量が小さい条件では、初期の成長率が小さく、途中で急に発達し、平衡に到達するといった S 字型曲線の特徴が強く出ていることが定性的にわかる。一方で、水路勾配による差異はほとんど見られない。

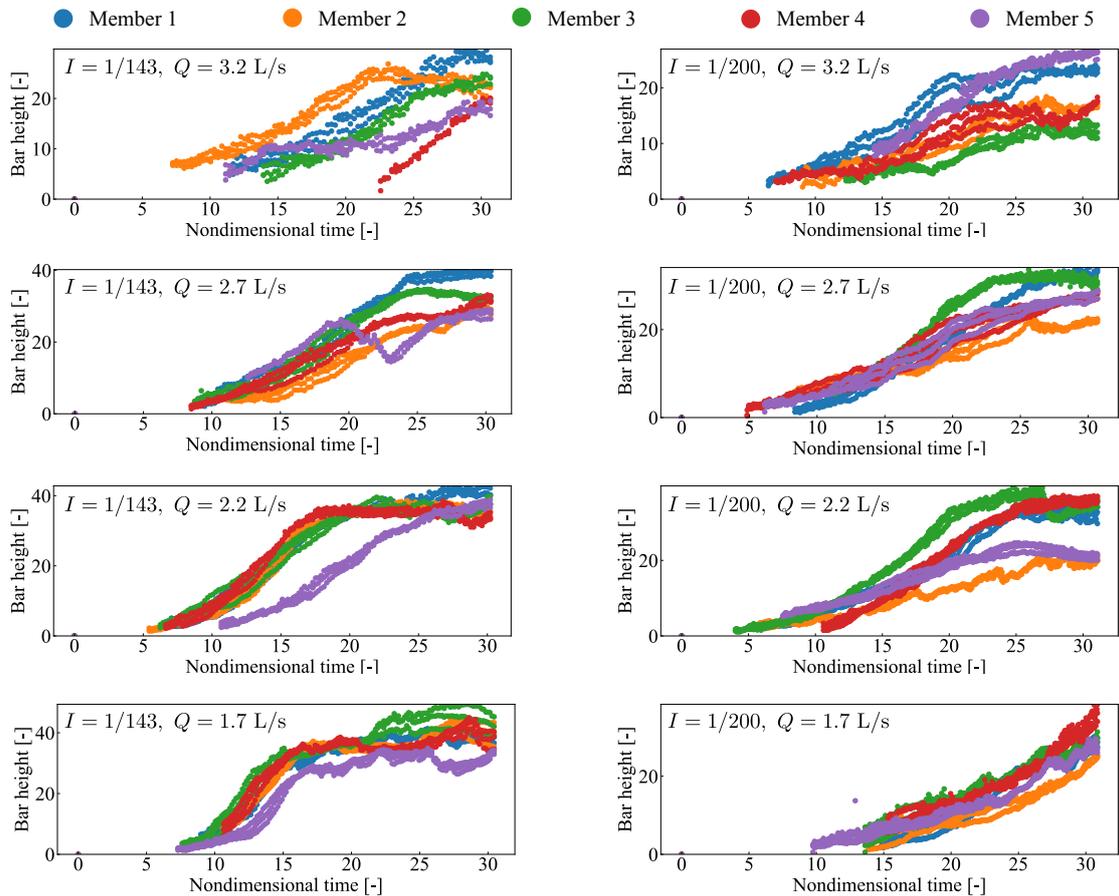


図-2 $I = 1/143, 1/200$ における砂州の波高の時間変化。縦軸は粒径で無次元化されている。横軸は式 (1) によって無次元化されている。

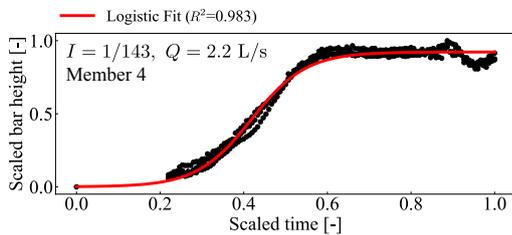


図-3 Logistic 曲線でフィッティングした砂州の波高の時間変化。

3.2 砂州波高の発達過程を記述する関数形

得られた結果の定量的な評価のために、カーブフィッティングを実施して係数を取得し、変数との相関分析を行う。前述のとおり、砂州波高の成長曲線は S 字型曲線を描くが、その代表として、Logistic 曲線と Gompertz 曲線が挙げられる。両者のフィッティング精度を、決定係数 R^2 を指標として比較したところ、ほぼ同様の精度であったが、平均的には 10^{-3} のオーダーで Logistic 曲線の方が高いことを確認した。したがって、本研究では次式で示される Logistic 曲線を採用する。

$$H_B = \frac{L}{1 + e^{-k(t-t_0)}} \quad (2)$$

ここで、 H_B は前述の方法により算出した砂州の波高、 L は平衡値、 k は成長率、 t_0 は関数形の微分値が最大を取る時間

である。同関数の係数は L, k, t_0 である。図-3 に Logistic 曲線でフィッティングした一例を示す。決定係数は、ほとんどのケースで 0.9 を超えていたため、Logistic 曲線は砂州波高の時間変化を適切に記述する関数形といえる。

3.3 流量および水路勾配との相関

図-4 に Logistic 曲線の係数と、本研究において変数とした流量および水路勾配との相関図を示す。なお、各条件において他 Member と比較して明らかに挙動が異なった Member や、得られた係数の仮説検定をした場合に p 値の有意水準 5% を上回る係数などについては除外している。

同図より、流量と成長率 k の相関が最も高いことがわかる。一方、そのほかの係数と変数の相関は全体的に低い。また、Manning 式と連続式から連立して求めた等流水深や等流流速などと比較を行ったが、水深と k に相関はやや見られたものの、そのほかについては特筆すべき相関は見られなかった。

なお、 $I = 1/200, Q = 1.7 \text{ L/s}$ の条件のみ挙動が異なることがわかる。図-2 から確認できるが、同条件は、砂州が形成される時間が比較的遅く、通水終了時刻となっても平衡に達していないようである。これは、同条件における無次元掃流力が最も限界掃流力に近いために時間を要し

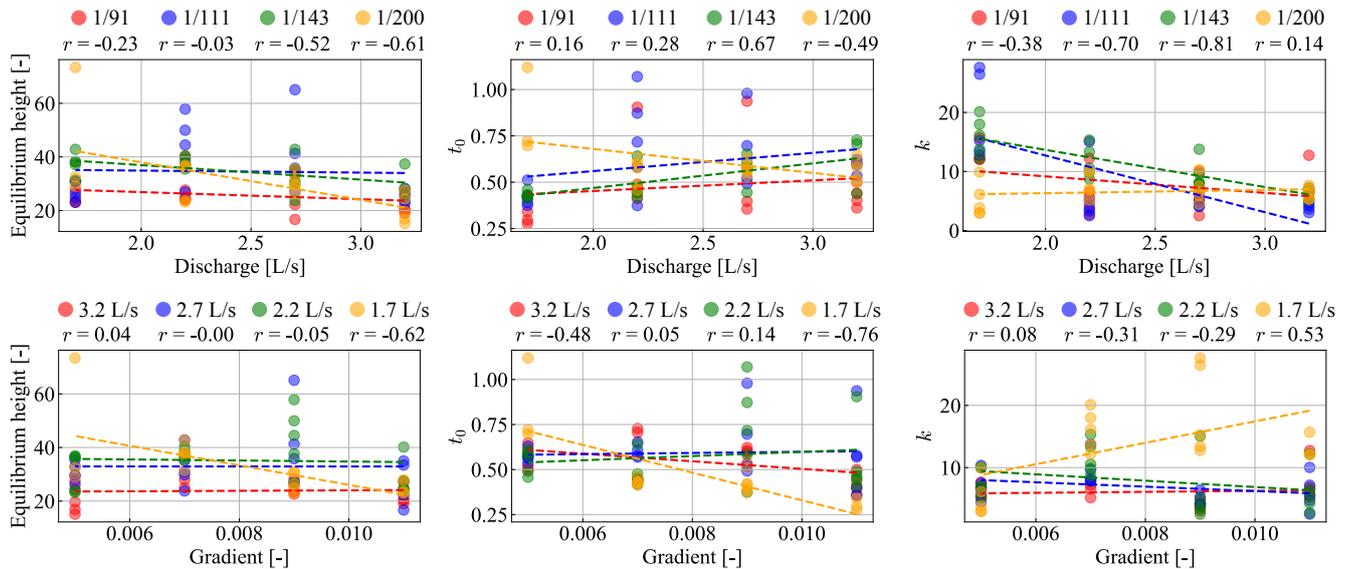


図-4 Logistic 曲線の係数と流量および水路勾配との相関図。各図中の破線は線形回帰した直線で、各図の上部の r は相関係数である。

たとえられる。また、紙面の都合上、省略するが、よく発達した砂州の前縁形状は円弧状となるのに対し、同条件の砂州の前縁形状はかなり乱れていた。この条件を除けば、流量と k の相関はより高くなり、そのほかの係数と変数の相関は概ね低くなる。

3.4 考察

前節の結果より、流量が大きい条件では、Logistic 曲線における成長率が小さいことから、砂州がどのような状態でも、比較的一定の割合で波高が発達することが示唆された。一方、流量が小さい条件では、Logistic 曲線における成長率が大きく、S 字型曲線の特徴が顕著に現れる、すなわち、砂州の状態によって波高の発達速度が異なることが示唆された。これらの結果から、流量が時間的に変化する実河川においては、流量が比較的小さい増水期と減水期で砂州の波高がよく発達し、流量が大きいピーク付近では波高の発達が抑えられる可能性が考えられる。このことは、同じ川幅でも流量が大きくなると、川幅水深比が小さくなり、領域区分図上における砂州の非発生領域に移行する傾向から説明が見込める。

上記のとおり、流量ごとの波高の発達速度を推定できる可能性が示され、その上で現在の砂州が成長曲線のどの段階に位置するかを把握できるようになることが期待でき、これに基づき砂州の撤去基準を確立できる可能性が高い。

4 結論

本研究では、まず流量と水路勾配が変数としたモデル実験を実施し、ST を用いて砂州の波高を時間方向に高密度に取得した。得られた砂州波高の成長曲線に、Logistic 曲線をフィッティングすることで係数を取得し、流量および水

路勾配との相関分析を行った。その結果、Logistic 曲線の成長率と流量の間に、比較的強い負の相関が見られた。

今後は、まず、本研究のモデル実験によって得られた底面のデータを拘束条件とした固定床浅水流解析を実施し、水理量の空間分布および時間変化を算出したうえで、実験結果の考察を加える。また、前述のとおり、川幅と河床材料の粒径も波高の時間変化の支配変数の候補となるため、その確認を移動床浅水流解析により行い、さらに川幅水深比などの無次元数との相関を調べる予定である。

参考文献

- 1) 千曲川堤防調査委員会: 千曲川堤防調査委員会報告書, 2020.
- 2) 藤田 裕一郎, 村本 嘉雄, 堀池 周二: 交互砂州の発達過程に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第 24 号 B-2, pp. 411-431, 1981.
- 3) M. Tubino, R. Repetto and G. Zolezzi: Free bars in rivers, *J. Hydraul. Res.*, Vol. 37, No. 6, 1999.
- 4) M. B. Bertagni, C. Camporeale: Finite amplitude of free alternate bars with suspended load, *Water Resour. Res.*, 54, pp. 9759-9773, 2018.
- 5) A. Defina: Numerical experiments on bar growth, *Water Resour. Res.*, Vol. 39, No. 4, 1092, 2003.
- 6) T. Iwasaki, Y. Shimizu and I. Kimura: Sensitivity of free bar morphology in rivers to secondary flow modeling: Linear stability analysis and numerical simulation, *Advances in Water Resources*, Vol. 92, pp. 57-72, 2016.
- 7) 池田 駿介: 単列交互砂州の波長と波高, 第 27 回水理講演会論文集, pp. 689-695, 1983.
- 8) M. Redolfi: Free alternate bars in rivers: Key physical mechanisms and simple formation criterion, *Water Resour. Res.*, 57, e2021WR030617, 2021.
- 9) 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.
- 10) D. Moteki, T. Murai, T. Hoshino, H. Yasuda, S. Muramatsu and K. Hayasaka: Capture method for digital twin of formation processes of sand bars, *Phys. Fluids*, 34, 034117, 2022.