

砂州形成流量の発生頻度の増減が河道の不安定性にもたらす影響

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 災害・復興科学研究所 正会員 安田 浩保

1 序論

沖積河川のうち交互砂州が形成される河道では、同一断面での標高差（比高差）の拡大が生じることがある。比高差の拡大は、堆積域での樹林化による河積の縮小や河川生態系の変化、洗掘域での河岸侵食や局所洗掘による橋脚の不安定化など、河道内における様々なりスクを増大させることから、砂州河川の管理上、問題視されている現象の一つである。

河川地形に作用する最も基本的な外力は流量であり、砂州の波高は流量の規模に応じて変動する。実河川に形成される砂州に影響を及ぼす流量として、実務上は平均年最大流量（ $\approx$ 低水路満杯流量）が用いられる¹⁾。しかし、平均年最大流量が砂州の発達に対してどのように作用するかは、河床勾配や河床粒径などの地形条件に依存することが予想され、依然として不明なことが多い。また、砂州の波高は一方向的に増大するだけでなく、流量の値によっては減少することが知られており²⁾、平均年最大流量のみではこのような現象を説明することができない。

砂州が発達するか、もしくは平坦床を維持するかを支配する無次元数は川幅水深比である。したがって、砂州河川の安定性について議論するためには、臨界川幅水深比を上回る流量として定義される砂州形成流量^{3),4)}に着目すればよい。臨界川幅水深比は線形安定解析によって理論的に算出することが可能である。これまでの研究で、模型水路で形成される砂州に対する安定理論の適用性については盛んに議論されてきている。その結果、川幅水深比と無次元掃流力の組み合わせにより砂州の発生・非発生を区分できる⁵⁾ほか、砂州の平衡波高^{6),7)}や線形増幅率⁸⁾も概ね推定可能であることが確かめられている。一方、実河川における砂州波高の推定に安定解析を適用した事例は限られており⁹⁾、安定理論の適用性、つまり砂州形成流量の発生が砂州の比高差を拡大させる方向に作用しているかは不明である。もし、実河川における砂州波高の変遷が、理論的に定義される砂州形成流量により説明できることが確かめられれば、今後の河道計画や維持管理において砂州形成流量が基盤的な指標となり得る。

本研究では、交互砂州が広い領域で形成されている信濃

川中流域の二箇所の水位観測所を対象として、まず砂州形成流量を線形安定解析により定義し、それが河道の比高差にもたらした長期的な影響について調べる。

2 方法

2.1 対象地

自然河川の河道形状や植生の状況、河床材料の粒度分布は複雑多岐にわたる。しかし、本研究の目的は砂州形成流量が河道に及ぼす影響を明らかにすることであるため、条件が最も単純化された線形安定解析⁶⁾を用い、その適用が可能な区間を選定する。この観点から、信濃川中流域において、直線河道かつ砂州上に植生が繁茂していない区間の水位観測所である長岡（信濃川 18.00k）および浦佐（魚野川 21.65k）を対象とした。対象地付近の航空写真をそれぞれ、-1a)、-2a)に示す。長岡はセグメント 2-1、浦佐はセグメント 1 に分類され、同じ砂州河川でも地形条件が異なる。これらの観測所では、水位観測が 40 年以上にわたって実施されてきており、洪水の長期的な傾向を把握するうえで十分な量のデータが蓄積されている。また、河床データは河道の改修履歴を遡りやすい 2000 年以降のものを使用した。

2.2 線形安定解析による砂州形成流量の定義

本研究では各観測所における砂州形成流量を、Colombini *et al.*⁶⁾の方法を参考とした線形安定解析により定義する。具体的には以下の手順により求める。まず、**表-1**に示す河道諸量を入力値として線形安定解析をおこなうと、砂州が形成される臨界川幅水深比が各観測所ごとに一意に決まる。この臨界川幅水深比と低水路幅より、砂州が形成される水深の臨界値が決まるため、Manning 式と連続式により、砂州が形成される臨界流量 Q_c が求められる。また、掃流力が限界値を超えなければ、土砂輸送が生じず砂州が発達し得ない。このため、岩垣式より無次元限界掃流力を求め、Manning 式と連続式より、土砂輸送が生じる限界流量 Q_i を算出した。この Q_i から Q_c の範囲の流量は、理論的には砂州波高の増幅率が正となり、河床が不安定化する領域である。本研究ではこの範囲の流量を砂州形成流量、 Q_c を上回る流量を砂州平滑化流量とよぶ。

ここで、**表-1**中の低水路幅は最新の定期横断測量から

表-1 線形安定解析の入力値.

観測所	低水路幅 (m)	河床勾配 (-)	河床粒径 (mm)	粗度係数 ($m^{-1/3} \cdot s$)
長岡	442.0	1/1250	48.2	0.029
浦佐	91.4	1/297	59.0	0.028

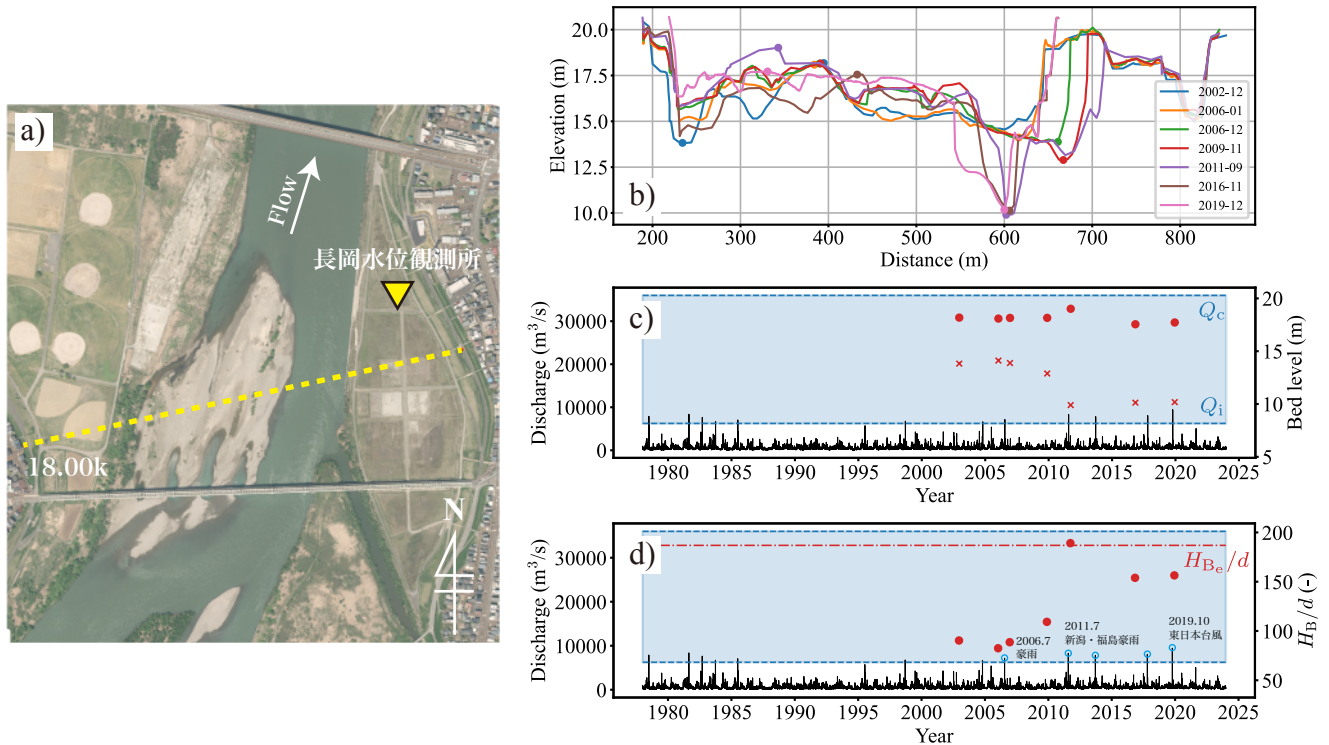


図-1 長岡水位観測所（信濃川）付近の a) 航空写真（2024 年 4 月 26 日に国土地理院が撮影¹¹⁾）。b) 低水路の河道断面形状（信濃川 18.00k）。横軸は右岸向きを正。c) 流量と砂州の最頂部（マル）および最深河床高（バツ）の関係。d) 流量と砂州波高の関係。青の着色範囲が砂州形成流量。一点鎖線は波高の平衡値 H_{Be} 。

得られた値、河床勾配は河川整備計画における計画河床勾配、河床粒径は最新の河床材料調査で得られた表層材料の平均粒径、粗度係数は令和 5 年度信濃川河道計画検討業務の際に使用された低水路の値であり、簡単のため各年代で一定値として与えた。なお、最新の定期横断測量成果から得られた低水路幅および最新の河床材料調査から得られた粒径が、各年代の平均的な値であることを確認している。

3 結果と考察

3.1 長岡

3.1.1 河道の経年変化

図-1b) に信濃川 18.00k の低水路における河床形状の経年変化を示す。この地点では、2006 年 1 月から 2011 年 9 月にかけて約 70 m の河岸侵食が進行した。また、2011 年 9 月時点では 2009 年 11 月と比較して、約 4 m の河床低下が進行している。側岸侵食対策として、国土交通省は 2013 年から 2014 年にかけて右岸に高水敷を造成し、護岸の整備をおこなった。また、高水敷の造成に伴って減少した河積

の確保を図るため、左岸砂州の掘削をおこなった。これらの整備後の断面形状が 2016 年 11 月のものであるが、2019 年 12 月には左岸で再び堆積した。また、河床低下は 2011 年 9 月以降、進行した様子はないが、滞筋の位置が流路中央に移動し、幅が拡大していることがわかる。以上のことから、同地点はこの 17 年間で砂州の比高差が拡大しやすい河道であったといえる。

3.1.2 砂州形成流量に対する河道の応答

図-1c) に流量および砂州の最頂部と最深部の時間変化を、図-1d) に同じ流量と砂州波高の時間変化を示す。砂州の最頂部および最深部は、図-1b) 中に描画した点の値である。また、波高 H_B はそれらの差により求め、表-1 に示す河床粒径 d で無次元化している。流量は、水文水質データベース¹⁰⁾ にて公開されている値を用いた。なお、 Q_c および Q_i は入力値である河道諸量に依存し、河道諸量は年度によって若干ことなることから、砂州形成流量の範囲は実際には数パーセントの幅をもつことに注意されたい。

まず、砂州形成流量の範囲に着目すると、これまでに発

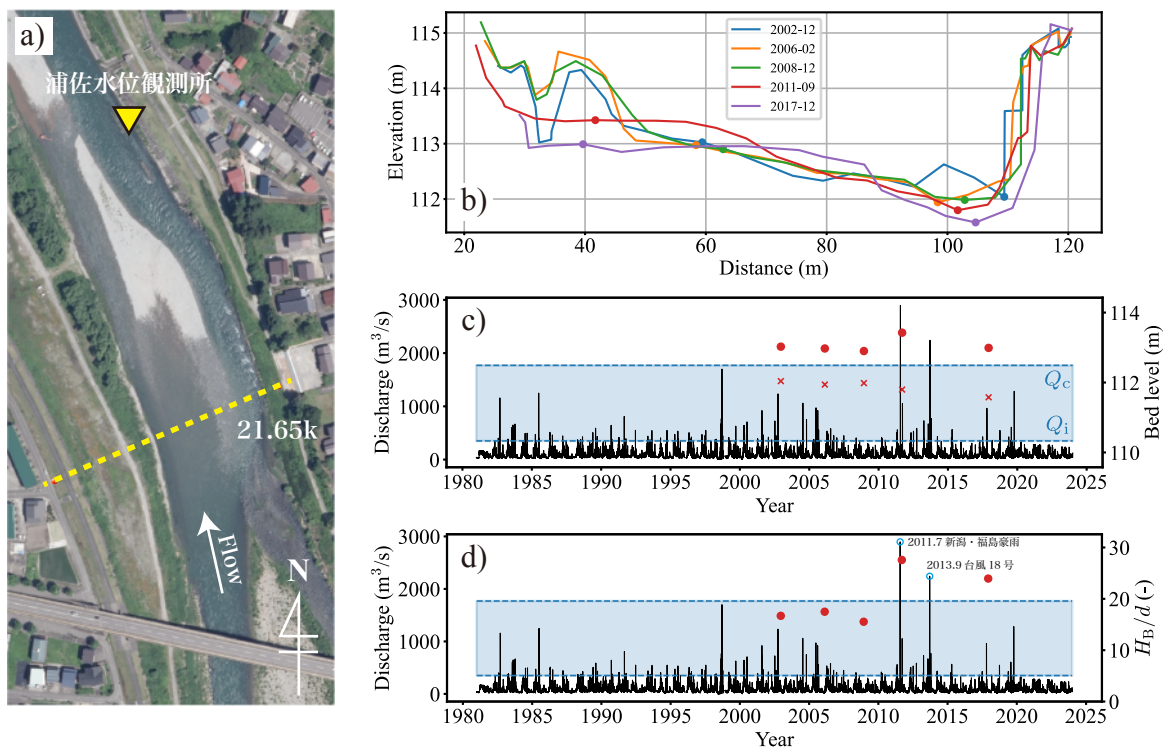


図-2 浦佐水位観測所（魚野川）付近の a) 航空写真（2017 年 7 月 8 日に国土地理院が撮影¹¹⁾）、b) 低水路の河道断面形状（魚野川 21.65k）、横軸は右岸向きを正、c) 流量と砂州の最頂部（マル）および最深河床高（バツ）の関係、d) 流量と砂州波高の関係。青の着色範囲が砂州形成流量。平衡値は $H_{B_e}/d = 70$ 程度となったため記載していない。

生じた洪水のほとんどが Q_i を下回ることがわかる。これは、この区間の低水路幅が比較的大きく、河床勾配も緩いことから、河道全体にわたって土砂輸送が生じる流量の発生頻度が稀であることを示している。また、2011 年新潟・福島豪雨や 2019 年東日本台風などの比較的大きな洪水でさえも Q_c に到達していないことがわかる。これは、河道が満杯となる規模の洪水が生じてても、理論上は、現況の砂州を平坦化する方向には作用し得ないことを示している。

流量と砂州波高の変動の関係について詳細に述べる。まず、2006 年 7 月豪雨による洪水は砂州形成流量に達し、2006 年 1 月から同年 12 月にかけて進行した河岸侵食および比高差の拡大は、これによるものと説明がつく。次に、2006 年 12 月から 2009 年 11 月にかけても河岸侵食が進行し、比高差は拡大の方向へと作用したが、この間に砂州形成流量は発生していない。これは、堆積域の河床形状がほぼ変化していない（図-1b)) ことと、この間に小規模洪水が何度か発生したことから、水衝部のみで土砂輸送が生じそれが累積した結果と解釈できる。 Q_i は等流見合いの計算により河道全体で土砂輸送が生じる流量として算出されるため、河道の一部で土砂輸送が生じる流量は Q_i を下回ることが考えられる。この点は今後の課題である。その後の 2011 年 7 月に発生した新潟・福島豪雨による洪水は砂州形成流量に到達しており、河岸侵食および約 4 m の河床低下が進

行した結果と整合がとれる。新潟・福島豪雨を経験後、三度の砂州形成流量が発生したものの、河床低下はこれ以上進行した様子はない。この要因として、砂州の洗掘深さが平衡値に到達したことが考えられる。たとえば、Ikeda¹²⁾ による砂州波高の推定式によれば、 H_B/d のこの流量範囲の最大値は 187 程度となり（図中の一点鎖線）、2011 年 9 月の波高がこの河道における最大値付近である可能性が高い。このため、2011 年 9 月の位置まで再堆積する可能性はあるが、河床低下は進行しなかったと考えられる。その後、砂州波高の変化としては表れていないが、2016 年 11 月から 2019 年 12 月にかけて生じた堆積域の埋め戻しと水衝部の拡大は、2017 年台風 21 号と 2019 年東日本台風による洪水が砂州形成流量に達したことから説明ができる。

以上のことから、長岡水位観測所付近では、砂州形成流量により河道の比高差の拡大をある程度説明可能であることが示された。これを踏まえ、図-1c), d) の砂州形成流量の発生頻度の長期的な傾向に着目すると、1990 年以降は定性的にみて増加傾向であり、今後も河道掘削を実施したとしても、再堆積や滞筋幅の拡大が進行する可能性がある。

3.2 浦佐

3.2.1 河道の経年変化

図-1b) に魚野川 21.65k の低水路における河床形状の経年変化を示す。2002 年 12 月から 2008 年 12 月にかけては、

水衝部において約 60 cm ほどの洗掘が生じたのみで、断面形状にほとんど変化がない。その後、2011 年 9 月には、交互砂州に特有の堆積と洗掘が顕著にみられる断面形状へと変化した。2017 年 12 月時点では、砂州の位置が全体的に低下していることがわかる。しかし、長岡と比較するとその変動幅は小さく、安定した河道といえる。

3.2.2 砂州形成流量に対する河道の応答

図-2c) に流量および砂州の最頂部と最深部の時間変化を、図-2d) に同じ流量と砂州波高の時間変化を示す。まず、砂州形成流量の範囲に着目すると、長岡とは対照的に、これまでに発生した洪水のほとんどが Q_i を上回り、2011 年新潟・福島豪雨や 2013 年台風 18 号に関しては Q_c をも上回っている。これは、この区間の低水路幅が比較的小さく、河床勾配が急であることから、理論的には河道全体にわたって土砂輸送が生じる流量が頻発し、河道を平滑化する流量も発生し得ることを示唆している。

流量と砂州波高の変動の関係について詳細に述べる。まず、2002 年 12 月から 2006 年 2 月にかけて砂州形成流量が何度か発生しているにもかかわらず、河道の状態に変化はみられなかった。この要因については現段階では不明である。次に、2011 年 9 月の測量前に、新潟・福島豪雨が発生しており、この洪水のピークは Q_c を超過していた。しかし、このときの砂州形成流量の継続時間は約二日半と長期であったことから、砂州平滑化流量による河道の平滑化効果よりも、砂州形成流量の継続時間の長さが砂州の形成に寄与したことが考えられる。その後、2013 年 9 月にはピークが Q_c を上回る台風を経験し、砂州波高はやや縮小した。しかし、この洪水では当然、砂州形成流量も発生していることから、波高の縮小が砂州平滑化流量による影響なのか、その程度を含めて解釈するのは難しい。

3.2.3 線形解析の限界

線形解析では、現在の砂州波高によらず増幅率は一定であると仮定する。しかし、実際の増幅率はそのときの砂州波高によって異なる⁸⁾。そのため、本手法は砂州波高が成長するか否かは判別できるが、具体的な変動量までは推定できない。浦佐のような砂州平滑化流量が比較的容易に発生し得る河道においては、砂州形成流量および砂州平滑化流量のそれぞれの砂州への寄与度に関する議論は困難である。砂州波高を詳細に予測するには、その飽和値を考慮できる弱非線形解析^{6),9)}が有効である。今後は弱非線形解析を実施し、我が国の急峻な勾配をもつ砂州河川に対する安定理論の適用性評価をおこなう。弱非線形解析の実河川への適用性が確認されれば、気候変動下の河川の維持管理におい

て重要となる砂州波高の将来予測⁴⁾や危険箇所の抽出が、数値計算よりも大幅に小さい計算負荷で可能となる。

4 結論

本研究では、信濃川中流域において交互砂州が発達する二地点を対象に、まず、線形安定解析を用いることで臨界川幅水深比に基づく砂州形成流量を算出した。次に、2000 年以降に実施された定期横断測量成果を用いて、砂州形成流量の発生頻度が砂州の比高差にもたらす影響について調べた。その結果、いくつかの課題は残るものの、砂州形成流量により砂州の比高差が拡大する傾向を十分に把握できる可能性があることを示した。また、現在の長岡の河道は、洗掘よりも堆積が進行する性質が強く、砂州形成流量の発生頻度が長期的に増加傾向にある。これは、今後の流下能力の確保のための河道掘削は、この地点の堆積速度を上回る頻度で実施するべきであることを示唆する。

謝辞

本研究で使用した定期縦横断測量成果、河床材料調査結果および粗度係数は、国土交通省北陸地方整備局信濃川河川事務所よりご提供頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 山本 晃一, 沖積河川—構造と動態—, 技報堂出版, 2010.
- 2) Nelson, P., A. and Morgan, J., A.: Flume experiments on flow and sediment supply controls on gravel bedform dynamics, *Geomorphology*, 323, pp. 98–105, 2018.
- 3) Carlin, M., Redolfi, M. and Tubino, M.: The long-term response of alternate bars to the hydrological regime, *Water Resour. Res.*, 57, e2020WR029314, 2021.
- 4) Redolfi, M., Carlin, M., and Tubino, M.: The Impact of climate change on river alternate bars, *Geophys. Res. Lett.*, 50, e2022GL102072, 2023.
- 5) 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, 第 342 号, pp. 87–96, 1984.
- 6) Colombini, M., Seminara, G. and Tubino, M.: Finite-amplitude alternate bars, *J. Fluid Mech.*, 181, pp. 213–232, 1987.
- 7) Redolfi, M., Welber, M., Carlin, M., Tubino, M. and Bertoldi, W.: Morphometric properties of alternate bars and water discharge: a laboratory investigation, *Earth Surf. Dynam.*, 8, 789–808, 2020.
- 8) 関 翔平, 茂木 大知, 安田 浩保: 交互砂州の波高の流量応答とその物理機構, 土木学会論文集特集号 (水工学), 2026 (掲載決定) .
- 9) Bertagni, M. B. and Camporeale, C.: Finite amplitude of free alternate bars with suspended load, *Water Resour. Res.*, 54, pp. 9759–9773, 2018.
- 10) 国土交通省 水文水質データベース, <http://www1.river.go.jp>, 2025 年 9 月 26 日閲覧.
- 11) 国土地理院 地理院地図, <https://maps.gsi.go.jp>, 2025 年 10 月 6 日閲覧.
- 12) Ikeda, S.: Prediction of alternate bar wavelength and height, *J. Hydraul. Eng.*, 110, No. 4, 1984.