

砂州の発生条件の特定に向けた底面の卓越波数の定量化

新潟大学大学院自然科学研究科 学生会員 ○関 翔平
新潟大学大学院自然科学研究科 学生会員 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

現在のところ、砂州の発生の機構は未解明である。通水開始時の底面を平坦とし、そのごく初期における変動量がわずかな現象に注目すれば、砂州の発生機構の解明が期待できる。通水開始からごく初期の現象に注目した研究のうち、木下¹⁾や池田²⁾の研究はその代表的な例である。彼らは、模型実験を手法とし、平坦床から砂州が発生する初期の現象について、河床波の発生や変形の過程ごとに通水を停止し、スケッチや写真判読を行った。その結果、通水初期において、斜めに交錯した小段が平坦床から自発的に発生し、底面全体を覆い尽くすことを報告している。しかし、これらの研究において、斜めに交錯する小段に関する物理量や、砂州への遷移の物理機構についての言及はない。

河床波の形状特性を示す物理量は波長と波高であり、これらの時間変化の定量化は、砂州の発生過程の理解にあたり重要となる。河床波の波長と波高は、底面高を入力値とした波数解析を行うことで定量化が可能である。長谷川ら³⁾は、直線流路と蛇行流路のそれぞれに発生する単列砂州の形状に二重フーリエ解析を適用し、両者を比較することで交互砂州の特徴的な成分を明らかにした。また、渡邊ら⁴⁾は、長谷川らの方法を用いて、複列砂州が単列砂州に遷移する過程を定量化した。一方で、これらの解析の対象は砂州のような波高が水深規模に発達した形状に限定され、変動量が小さな通水初期の現象は対象とされていない。

ごく初期の河床波を対象にした解析ができなかった要因の一つに、通水初期の物理量や底面の起伏の変動量が小さく、これらを高密度かつ高い頻度で計測できる手法の未確立が挙げられる。これに対し、Moteki et al.⁵⁾は模型実験における底面と水面を同時かつ高頻度に通水を継続したまま計測できる Stream Tomography(以下、ST)を開発した。STの空間分解能は1 cm²より高く、1分程度の頻度で計測できるため、ごく初期の底面形状を計測してその波数解析ができ、砂州の発生過程の細密な定量化が期待できる。

本研究では、砂州の発生の機構を解明するために以下を実施した。まず、単列砂州が形成される条件を与えた模型実験を行い、平坦床から発生した斜めに交錯する平面波から砂州への連続的な遷移の過程について、空間的に高分解

表-1 模型実験において設定した初期の水力条件

Set	Run	$BI^{0.2}/h_0[-]$	$\tau_*[-]$	$Fr[-]$	$B[m]$
	B-1	19.0	0.0751	1.048	0.45
B	B-2	16.9	0.0751	1.048	0.40
	B-3	14.8	0.0751	1.048	0.35
	D-1	9.90	0.0628	0.807	0.45
D	D-2	8.80	0.0628	0.807	0.40
	D-3	7.70	0.0628	0.807	0.35

能かつ高頻度で計測した。次に、単列砂州の発生過程を対象にした一次元波数解析を行い、川幅やフルード数ごとに卓越する河床波の主要成分を定量化した。

2 模型実験の概要と計測結果

2.1 実験条件

本研究では実験水路に全長12 m、水路幅 B が0.45 mの直線の単矩形断面水路を用いた。上記の水路のうち、10 mを移動床区間とした。その上流端と下流端に高さ5 cmの堰を設置し、平均粒径0.76 mmの4号珪砂を厚さ5 cmで敷き詰め、一様に均した平坦床を初期形状とした。流量は時間で一定とし、その値は流量計で確認した。また、給砂に関しては、砂州の形成に作用する人為的な影響を排除するため、移動床区間の上流側に2 mの侵食区間を設けた。

初期条件は表-1に示す。底面の不安定性は擾乱の波数が川幅の数倍より大きいと発生するとされる⁶⁾。本研究では、等流水深 h_0 は同一としながら、0.45 m、0.40 m、0.35 mの3通りの川幅とするSetを用意した。また、より一般的な検討をするため、フルード数が常射流で異なるSet BとSet Dの2組を用意した。それぞれの具体的な値は、単列砂州発生条件となるように、黒木ら⁷⁾の領域区分図を参考に設定した。川幅は、一つあたり約2 mのFRP製の板を4つ繋ぎ合わせたものを水路に配置することで変化させた。

計測手法にはSTを用いた。各Runの計測は1分間隔で行い、河床変動が平衡状態に達したと目視で判断した時刻で計測を終了した。各Runの実施回数は一回ずつである。

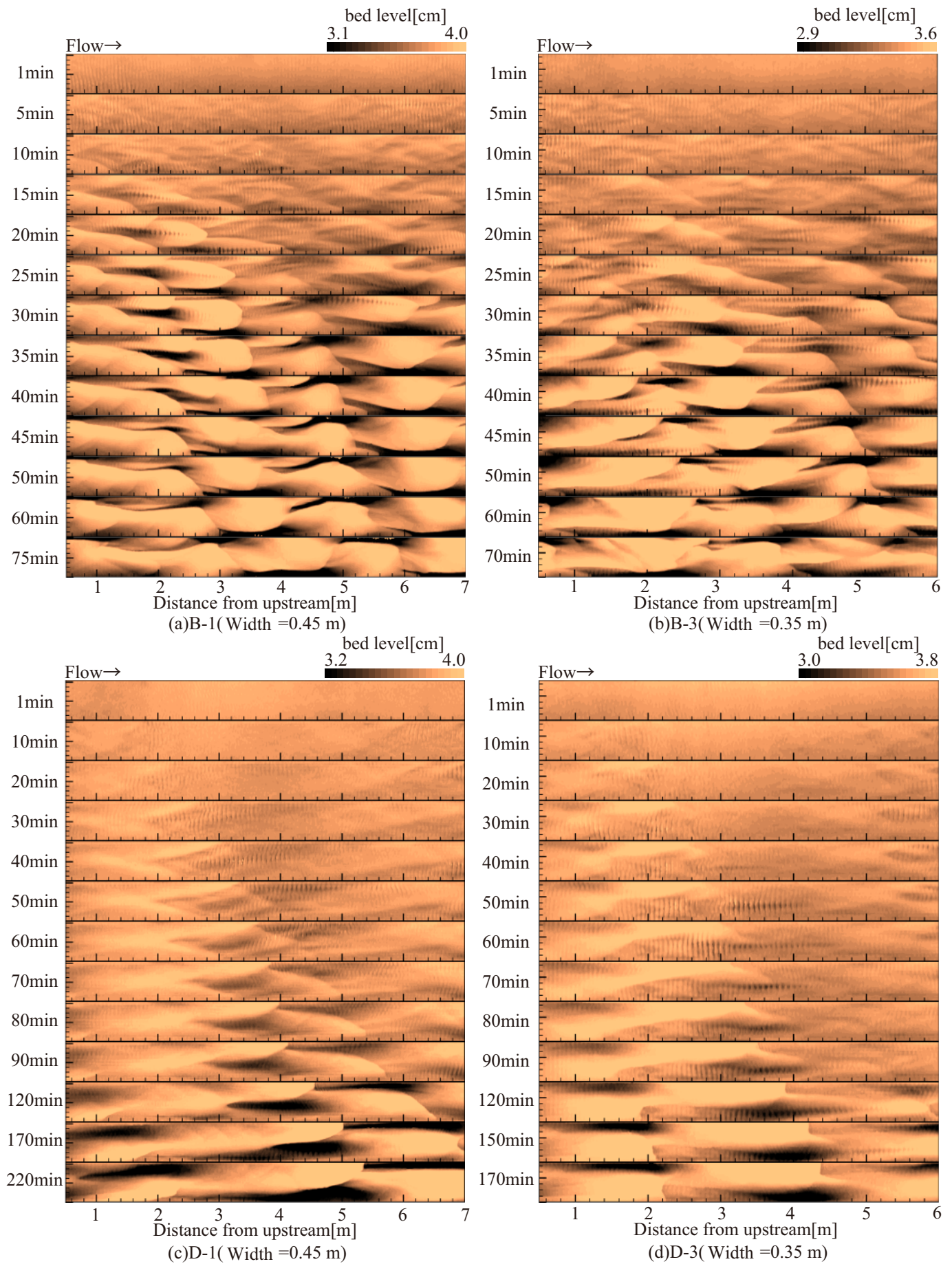


図-1 各 Run における底面高の平面図

2.2 砂州の発生・発達過程の実測

図-1は、各Runにおいて計測された底面高の平面図である。なお、紙面の都合上、平面図の時間間隔は実際の計測の一部のみとし、B-2とD-2の結果は省略した。また、STの測定は水路側壁で制限されるため、各Runの左右岸沿いでの測定結果はそれぞれ1 cmから2 cmずつ除外した。

まず、Set BではB-1、B-3とも、通水開始から15分までに、側壁に向かって斜めに伸びる交錯波が確認できる。斜めの交錯波の波高は砂州に比べて格段に小さく、横断方向に数列に及ぶ。これは、木下¹⁾や池田²⁾の模型実験で観測された交錯波と類似する。また、同時間帯において、水深規模の波長を持つ反砂堆も確認できる。反砂堆は、Inoue et al.⁸⁾による観測結果と同様、砂州の発生・発達に伴い横断方向の列数が減少していった。一方で、斜めの交錯波はその後、互いに重なり合うようにして発達する。B-1の条件では、通水開始から20分頃になると、上流側から波長が1.5 mから2 mの砂州が二列に形成され、次第に単列に移行した。これは、渡邊ら⁴⁾の模型実験で見られた複列砂州のモード減少に近い。通水終了時刻において、単列砂州の波長は3 m程度であった。これに対し、B-3の通水開始から20分頃に着目すると、B-1よりも単列の傾向だった。B-1とB-3の通水開始から20分前後でのモードの違いは、黒木・岸⁷⁾の領域区分図においてB-1はB-3よりも複列砂州の発生条件に近いと考えられる。

Set DではD-1、D-3とも、通水開始から20分頃までに、Set Bと同様、斜めの交錯波と反砂堆の存在が確認できる。Set Bとの明確な違いは、Set Dの3つの斜めの交錯波の横断方向の列数はいずれも一列だったことである。この時点で交錯波の波長は2 m程度であった。これは、列数が一列であることから、準砂州⁹⁾や斜行砂州²⁾などと呼ばれているものに類似する。交錯波は上流から下流に向かって伝播し、次第に波高を増幅し、直線的だった平面形状は弧を描くように張り出し、最終的に単列砂州が形成された。その波長はD-1の場合、5 m程度であった。

上記までの一連の実験結果から共通して言えることは、川幅やフルード数が異なる条件においても、通水初期には必ず河床に川幅規模の波長を持つ交錯波が生じ、過程は違えども、これが徐々に単列砂州へと遷移するという点である。すなわち、初期に生じた斜めの交錯波が砂州の起源の一つであることが示唆される。

3 砂州の発生過程における河床波の形状特性

本章では、単列砂州の発生過程における幾何学形状とその時間変化を後述の方法により定量化する。

3.1 波数解析の手法

本研究では、卓越する河床波の波数と振幅を、各縦断面の底面高を入力値とした次元離散フーリエ変換を行った後、これらの結果の平均値として算出する。河床波の平面形状を定量化するためには二重フーリエ変換を行うことが好ましいが、本研究ではまず一次的な特徴を把握した。なお、STによって得られる底面高の鉛直方向分解能は不明であるが、水面のそれは0.033 cmであるため、これに近いと仮定すると、波数解析によって得られる振幅の妥当性は十分と考えられる。また、対象とした解析区間は、B-1、D-1は縦断方向0.50 mから7.00 m、側壁を設置したB-3、D-3は縦断方向0.50 mから6.00 mとした。

3.2 河床波の主要成分とその時間変化

図-2にRunごとの河床波の卓越波数をSTの時間分解能である1分間隔で示す。振幅は各Setの等流水深で無次元化した。また、それぞれ、図の横軸と縦軸の最大値が異なることに注意されたい。

本研究で行った波数解析においては、図に示すように4つの成分が卓越した。以後、長谷川ら³⁾に倣って縦断方向の波数 $j(j=1, 2, 3, \dots)$ における振幅を α_j と示す。図-1の平面形状と見比べると、それぞれのSetにおける $j=1$ と $j=2$ は、通水終了時刻における単列砂州の縦断形状の規模であると推測される。通水初期に見られた交錯波は波高が小さいため判断がつかかねるが、これも図-1から判断すると、 $j=4$ と同等かこれよりも高波数と推測される。また、本研究では扱わないが、各Runの初期の時刻では反砂堆スケールの波数の卓越を確認している。

まず、Set Bに着目する。B-1の初期では、その差はわずかだが α_4 が最も卓越する。その後、通水開始から20分を過ぎると、急激に α_2 が卓越する。また、B-3の初期では α_3 が最も卓越するが、通水開始から25分を過ぎると、B-1と同様に α_2 が発達し、その後は変動を繰り返すものの、通水後期では α_1 や α_2 の発達が目立つ。一方で、Set Dでは、初期から α_1 と α_2 が卓越し、D-1では途中で両者の大小が前後するものの、これらが α_3 と α_4 を上回ることはなく、そのまま増幅する共通性が見られた。

Set BとSet Dの時間発展を比較するため、波長が大きい α_1 と α_2 、比較的波長が小さい α_3 と α_4 をそれぞれ足し合わせたものを図-3に示す。Set Bの通水初期は両者がほぼ拮抗するものの、通水開始から20分を過ぎると差異が明瞭となる。しかし、B-1では通水終了時刻で再び両者が拮抗した。B-3では途中で値が前後するものの、通水終了時刻では $\alpha_1 + \alpha_2$ が $\alpha_3 + \alpha_4$ よりも大きい。二列の砂州の

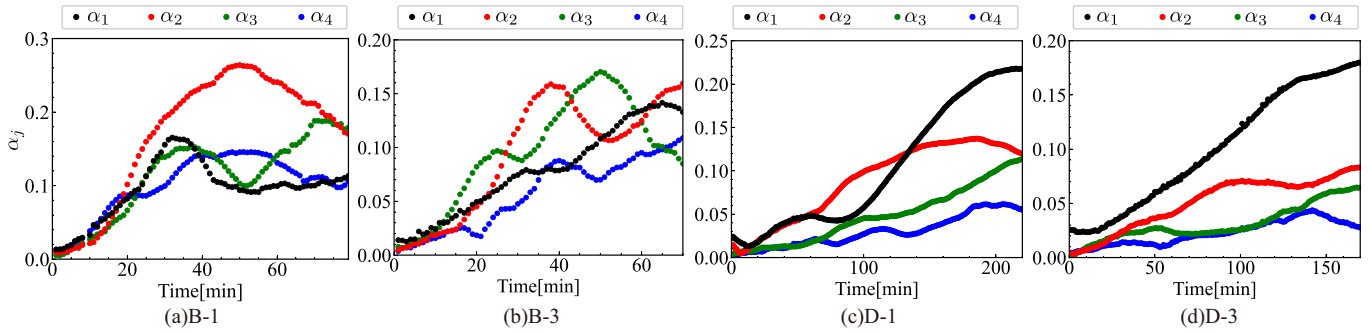


図-2 各 Run における縦断面の底面高の主要成分とその時間変化

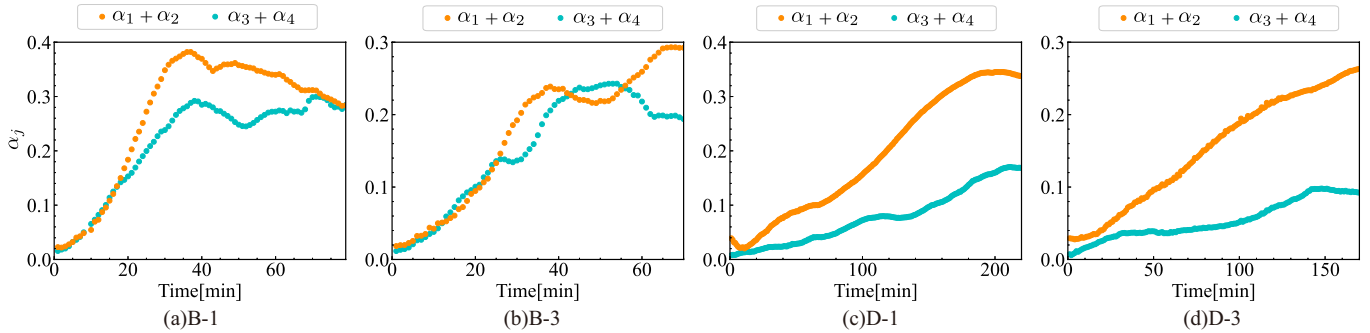


図-3 各 Run における縦断面の底面高の主要成分の和

縦断波数が、 α_3 や α_4 の規模であるとする、B-1 の結果は、モード減少した単列砂州は複列砂州の特徴をある程度保持するという渡邊ら⁴⁾の指摘と一致する。一方、Set D は、通水初期から $\alpha_1 + \alpha_2$ は $\alpha_3 + \alpha_4$ よりも常に大きく、時間経過とともに両者の差異は拡大を続けた。

上記は以下のように総合できる。射流の Set B からは、初期に卓越する成分は川幅によって異なり、砂州の発生と発達過程で各波数の振幅が拮抗しながら増幅する。また、通水終了時刻においては、視覚的には単列砂州と認識される平面形状となるものの、縦断波数は波長の大きい成分 (α_1 と α_2) だけでなく、比較的波長の小さい成分 (α_3 や α_4) が α_1 と α_2 と同等の規模で残留することが分かった。常流の Set D からは、初期からある程度の大きさの縦断波数を持ち、平衡状態に達するまで大きな縦断形状は目立った変化をしないことが分かった。つまり、常流と射流では単列砂州の形成過程が明確に異なることが分かった。また、川幅やフルード数によって初期に卓越する縦断波数は異なるものの、最終的には単列砂州と認識される縦断波数が卓越することが示唆された。

4 おわりに

本研究では、まず、砂州が形成される水理条件を与えた模型実験を実施し、単列砂州の発生過程における底面高を高頻度に細密な計測をした。これらの結果から、川幅やフルード数に依らず、通水初期の底面には必ず斜めの交錯波

が発生することが分かった。次に、次元離散フーリエ変換を行い、河床波の主要成分を1分ごとに定量化した。これらの結果から、初期の河床波の縦断波数は水理条件によって異なるものの、最終的には単列砂州と認識される縦断波数の卓越が分かった。以上から、初期の平坦床から何らかの波数を持つ交錯波などの周期的な起伏さえ発生もしくは存在すれば、その後平衡形状として単列砂州が形成されることが示唆される。今後は、交錯波や砂州の形成機構について土砂輸送の駆動源である水理量に基づく考察を行う。

参考文献

- 1) 木下 良作: 砂礫堆の実験的研究 (1) 砂礫堆の形成条件について, 新砂防, 26, pp.28-34, 1957.
- 2) 池田 宏: 水路における斜め交錯模様と斜行砂州の形成, 水理講演会論文集, 27 巻, pp.709-714, 1983.
- 3) 長谷川 和義, 山岡 勲: 発達した交互砂州の性状に関する実験と解析, 水理講演会論文集, 26 巻, pp.31-38, 1982.
- 4) 渡邊 康玄, 桑村 貴志: 複列砂州のモード減少過程に関する水理実験, 水工学論文集, 第 48 巻, pp.997-1002, 2004.
- 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*, 34, 034117, 2022.
- 6) Callander R. A.: Instability and river channels, *J. Fluid Mech.*, vol.36, pp.465-480, 1969.
- 7) 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.
- 8) Inoue T., Watanabe Y., Iwasaki T., Otsuka J.: Three-dimensional antidunes coexisting with alternate bars, *Earth Surf. Process. Landforms*, 45, 2897-2911, 2020.
- 9) 藤田 裕一郎, 村本 嘉雄: 中規模河床形態の分類と形成条件, 水理講演会論文集, 22 巻, pp.275-282, 1978.