

河床波の形成機構における連続性に関する考察

新潟大学院自然科学研究科 学生会員 ○田所 祐輝
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 はじめに

砂礫河川では、砂州・砂堆（反砂堆を含む）・砂漣の3つに識別される河床波が形成される。これらの知見の多くは、砂堆や砂漣といった小規模河床波と、砂州といった中規模河床波とに分断して捉え、それぞれが個別に研究されてきた。このために、表-1のように、各河床波の支配物理量は独立したもので、個別の物理現象として認識されてきた。

近年の河床波の研究の進展は、各河床波の形成が個別の現象であるという前提を覆す方向に推移していると言える。池田は、水路実験により、浅く急な流れでは明瞭な前縁をもつ交互砂州と反砂堆が共存することがあり、深く緩やかになるにつれて流れ流向に直交する峰をもつ2次元的な砂漣が優勢となることを示している^{?)}。これは、河床波の形成が境界条件の連続的な変化に追従して遷移するものであることを示し、河床波毎に支配物理量を独立に設定する従来の離散的な概念においては、その連続的な遷移を記述できないことを示唆する。さらに、Colombini は砂州に類似した三次元形状の砂堆の存在を示唆する理論解²⁾を示し、それを支持する観測結果³⁾も報告されている。これらの知見は、中規模河床波と小規模河床波の間には力学的な連続性が存在することを示唆する。したがって、これまでように規模毎で大別し認識する考え方は、河床波の形成を一連の物理として捉え、且つ連続的な遷移を記述できるものへ改められるべきである。

著者らは、分散関係式を用い、三種の河床波を統一的に識別する手法を構築⁴⁾している。この手法の利点は、三種の河床波の特徴を同一の物理的枠組みのもとで定量的に評価できる点にある。分散関係式の導入は、従来の離散的な区分法では難しかった河床波の形成や遷移の過程について、連続的に記述できるようになったことを意味する。本研究では、著者らの分散関係式を理論的基盤とし、河床波の連続的な遷移について流体力学的な観点から説明することを試みる。

表-1: 既往の河床波分類と分散関係式の対応

河床波	区分	支配物理量	分散関係式
砂州	中規模	川幅水深比	$0.75 \leq \mathcal{T}_x \leq 1$ $h/L \lesssim 0.01$
砂堆	小規模	水深粒径比 摩擦速度	$-0.75 \leq \mathcal{T}_x < 0.75$ $0.01 \lesssim h/L \lesssim 0.1$
砂漣			$-1 \leq \mathcal{T}_x \leq -0.75$ $0.1 \lesssim h/L$

2 解析手法

本研究では、以下に示す分散関係式⁴⁾を用いる。

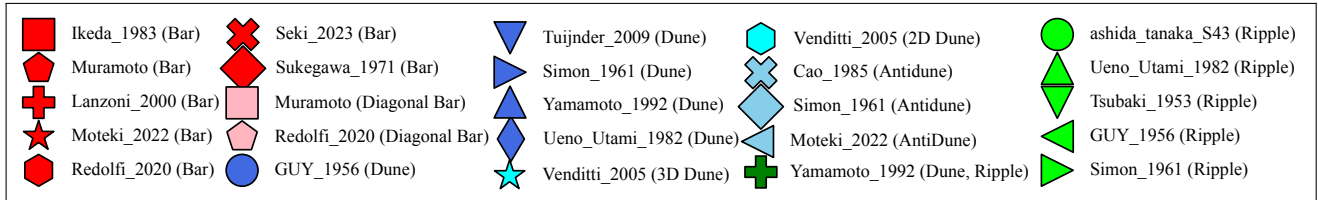
$$\mathcal{T}_x = \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \left(\frac{1}{2\pi h/L} - 1\right) \quad (1)$$

ここで h は平均水深、 L は波長、 x は流れ方向を表す。なお、三種の河床波の存在領域は、表1に示すように、深水域 ($-1 \leq \mathcal{T}_x \leq -0.75$, $h/L \gtrsim 0.1$) に砂漣、遷移域 ($-0.75 < \mathcal{T}_x < 0.75$, $0.01 \lesssim h/L \lesssim 0.1$) に砂堆、浅水域 ($0.75 \leq \mathcal{T}_x \leq 1$, $h/L \lesssim 0.01$) に砂州が位置するとして整理されている。

河床波の形成を連続的な現象として識別できるかを検証するため、砂州・砂堆・砂漣を対象とした既往実験データに加え、中間的な河床波や、複数の河床波が共存する条件の実験データを用いた。 h/L と水理量は、それぞれに記載された河床形状および境界条件から算定した。なお、土砂移動を特徴づける指標として無次元掃流力 τ^* 、流れ場を特徴づける指標としてフルード数 Fr に着目し、次章では、河床波の遷移の過程を考察し、その上で、河床波の形成や遷移に関する主要な物理量の特定を試みる。

3 結果

池田は I_b の減少に伴い、砂州・反砂堆から砂堆、砂漣へと遷移する傾向を示した。図-1aでは、 τ^* の増加 ($= I_b$ の減少) に伴い、砂州・反砂堆の共存から砂堆、砂漣へと対局的に変化する傾向が確認できる。ただし、 $\tau^* \leq 10^0$ の範囲では砂州と砂堆が、 $\tau^* \geq 10^0$ の範囲では砂堆・反砂堆と砂漣が混在しており、明瞭に遷移傾向を示すとは言い難い。これに対し、図-1bで



(a) 無次元掃流力

(b) フルード数

図-1: 分散関係式に基づく河床波の Phase Diagram

は、 Fr の減少 (= I_b の減少) に伴う遷移傾向が記述されることが見て取れる。とりわけ、Colombini ら²⁾ が提示する砂州に類似した三次元形状の砂堆として考えられる菱形砂州が砂州と砂堆の存在域 ($Fr \simeq 0.5$) に位置し、2 次元的な砂漣や砂堆・砂漣共存が砂堆と砂漣の存在域 ($Fr \simeq 0.3$) に位置することは、 Fr は河床波の形成形態における連続的な遷移を支配する物理量であることを示唆する。

次に、図-1b から河床波の形成が力学的な連続性を有するかを検討する。浅水域-遷移域間 ($\mathcal{F}_x \simeq -0.75$, $h/L \simeq 0.01$) に菱形砂州が位置すると確認できる。二・三次元砂堆といった遷移段階の河床波は、遷移域-深水域 ($\mathcal{F}_x \simeq -0.75$, $h/L \simeq 0.01$) を境に位置する。また、砂堆と砂漣が共存する河床波も同様に遷移域-深水域間に位置する。分散関係式に基づく、浅水域-遷移域間に位置する菱形砂州は、鉛直方向流速と河床形状が水面形状に与える影響の優位性が変化し始めることを一要因として形成される連続性を有した河床波であり、遷移域-深水域間に位置する河床波は、河床形状が水面形状に与える影響の有無で生じる遷移的な河床波であると推察できる。これは、河床波の連続的な形態変化が河床波の形成を支える物理的描像の一つであり、分散関係式が示す河床波上の流況の

連続的な変化が支配要因の一つであることを示唆する。

4 おわりに

本研究では、従来、3 つに区分して研究されることが多かった河床波は、必ずしも離散的に存在せず、砂州と砂堆というような隣接して区分される河床波は連続的に遷移する性質を持つことについて流体力学的な説明を試みた。具体的には、分散関係式から得られる $\mathcal{F}_x(h/L)$ と Fr を指標とした二軸図を通し、河床波の形成形態や遷移過程に連続性を有することを示した。この結果は、河床波の形成要因が、粒子の可動性のみならず、流況構造に強く支配されることを示唆する。本稿では砂堆と砂漣の力学的な連続性の要因までは深く議論できていない。今後は、砂漣の支配要因の一つである境界層の流況構造に着目し、両者の形成要因を力学的に検討する予定である。

参考文献

- 1) 池田宏: 実験水路における砂礫堆とその形成条件, 地形学評論, **46**(7), 435–451, 1973.
- 2) M. Colombini, A. Stocchino: Three-dimensional river bed forms, *Journal of Fluid Mechanics*, **695**, 63–80, 2012. doi:10.1017/jfm.2011.556.
- 3) 村本嘉雄, 藤田裕一郎: 中規模河床形態に関する研究, 京大防災研究所年報, **20**(B-2), 243–258, 1977.
- 4) 小関博司, 安田浩保, 水深波長比を用いた河床波の統一的区分とその支配物理量, 土木学会論文集 A2 分冊 (応用力学) 特集号 2021