

浅水流を仮定した数値解析における砂州の発生・発達の
物理機構の記述の適正性

新潟大学大学院自然科学研究科
新潟大学災害・復興科学研究所
新潟大学理学部理学科
新潟大学工学部工学科

学生会員
正会員
非会員
非会員

○茂木 大知
安田 浩保
早坂圭司
村松正吾

1. はじめに

国内河川の大半の底面において形成される砂州の存在は、偏流による河岸侵食や越流、植生の繁茂等の工学上の問題に深く関わり、その形成機構の解明が待望される。砂州の形成や発生・発達機構は、しばしば浅水流を仮定した数理解析が行われ、理論解析（例えば1),2)）や数値解析（例えば3),4)）によってその機構解明が進んできた。理論解析では、これまでに、砂州の発生に関する支配変数の特定や、与条件下における波長や波速、波高の推定が可能である。また、Redolfi⁵⁾は理論解析において、砂州の形成による水面の変形を無視する仮定を導入すると、水深の変化が底面の変化によって定まり、砂州の形成過程を簡易に説明可能であるとした。数値解析は、現在主流の研究手法であり、理論解析が説明不可能な砂州の動体や、流路の複雑な平面形状などの強制条件の影響の把握に用いられる。また、実河川の実測データを用い、その底面形状の時間発展の推測にも用いられる（例えば4)）。これらの解析では、砂州の基本的な物理機構が浅水流で記述可能なことを仮定している。これらの解析の結果は、模型実験（例えば6),7)）などと整合され、砂州の幾何学形状の周期性を背景とした波高や波長などの形状特徴量との比較により、妥当性が検証されている。一方で、実際に砂州上の流れがどの程度浅水流で記述可能であるかや、時時刻々と変化を続ける現象の中の各段階における解析結果の妥当性についての検証は十分でない。また、決定論的な解析による非線型方程式の時間発展は、その初期値鋭敏性のために非周期的な挙動⁸⁾となり、予測困難な問題である。そのため、現段階では砂州の発生・発達機構を対象とした数値解析の予測可能性は不明である。

理論解析や数値解析の検証に利用される、既往の実河川観測・実験では、概ね底面の時間・空間の変化に着目するものが多い（例えば6)）。その駆動力である流水の形状である水深や水面形は、その計測の困難さから境界条件として注意を払うにとどまるようである。また、同様に、平坦から砂州が発生するまでの初期に関する観測・計測事例も非常に少ない。一方で、近年、著者ら⁹⁾はStream Tomography(以後、ST)を開発し、模型実験における水面と底面を非接触で同時に計測可能とした。STの分解能は、時間は1分間隔、空間は1 cm 間隔と、当分野で初めての観測ビッグデータの取得が可能であり、データに基づく機構解明や既往解析との妥当性検証が期待される。著者らは、近年、STによって平坦床から砂州が発生・発達する過程を計測し、その解析によって線形安定性解析が推定する波数の妥当性が高いことを実証した

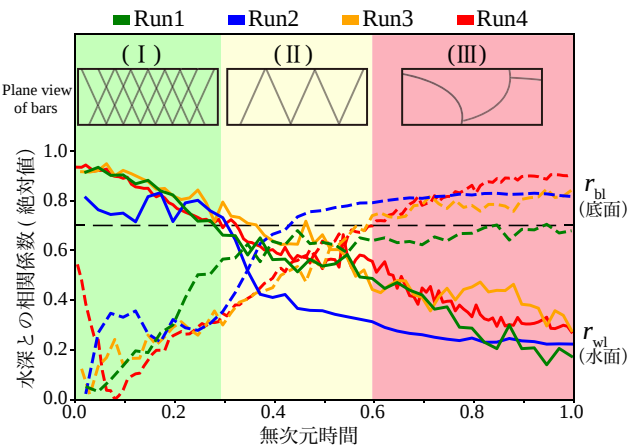


図-1 Phase Diagram(PD)¹⁰⁾，実験条件は原著論文を参照。

表-1 実験及び数値解析条件					
Run	slope	τ_*	h_0 [m]	β	Fr
4	0.0050	0.067	0.017	13.30	0.81

10). また、同論文内において、水深の空間分布と水面・底面のそれぞれの幾何学形状の相関関係 (以後、それぞれ r_{wl} , r_{bl}) を算定し、図-1 に示す Phase diagram(以後、PD) に整理した。PD は、水深の空間分布に対して水面と底面の幾何学形状のどちらが支配的な影響を及ぼしているかを簡潔に示し、統一的に砂州の形成段階を3段階に区分する。藤田・村本⁶⁾が砂州の幾何学形状によって形成過程を区分した同様に、PD上の各区分ごとに支配物理の機構が異なることが推測される。浅水流の近似は「鉛直方向の流速を無視可能かつ静水圧近似」であるから、水深を底面の砂州の幾何学形状が決定しているPhase3のみが浅水流により記述できるものと推測できる。また、この時、水面の幾何学形状は水深に対してほぼ影響しないため、前述のRedolfiの仮定も成立する。他方に、砂州が発生するような条件の開水路における通水初期(Phase1)には水面波の卓越がよく観察されるが、水深が水面形状によって決定される流れにおいては鉛直方向の流速を無視できないため、この段階では浅水流近似が成立しないことが示唆される。上述のように、PDによって砂州が発生・発達する物理に特有な機構を新たな手段により定量化したことで、前述した数値解析によって再現される物理機構の妥当性の検証も可能となった。

本研究では、数値解析における物理機構の記述の適正性についての検証を行うため、同条件において模型実験と数値解析の双方を実施した。その後、模型実験と数値解析の双方において、水深と水面・底面の相関係数を算定し、PD上においてその再現性を検証した。

Key Words: 模型実験, 数値解析, 浅水流, *iRIC*, 相関係数
〒950-2181 新潟市西区五十嵐2の町 8050 TEL 025-262-7053

2. 模型実験および移動床数値解析

本研究の目的を達成するには、模型実験と数値解析を同じ水理条件で行う必要がある。そこで、水理条件を、著者らの既報¹⁰⁾におけるRun4に設定した。この条件は、上流端堰上に5 cm 立方のブロックを設置した強制砂州条件だが、自由砂州と強制砂州の両者の形成過程の違いは時間スケールのみである^{10),11)}。設定した条件は、表-1 に示す通りである。なお、紙面の都合により、模型実験結果のデータは原著論文を参照されたい。

(1) 数値解析

数値解析においては、初期河床に底面材料の平均粒径0.76 mm と同規模の乱数擾乱を与え、解析開始から10分間は固定床とした後に移動床解析を行なった。解析において、上流端には堰は設置しておらず、自由砂州条件である。数値解析のソルバーには、iRIC⁴⁾のNays2Dを用い、計算格子サイズは1 cm、計算時間間隔は0.005 sec とし、計算時間は4時間までとした。また、下流端境界条件は等流水深で与え、周期境界条件を設定した。紙面の都合により割愛するが、数値解析の結果、底面には模型実験に比べて波長が短い砂州が形成された。これは解析時間が不足しているためだと推測されるが、砂州の発生機構を対象とする本研究では問題とはならない。

(2) Phase diagram による砂州形成機構の検証

図-2 に、模型実験及び数値解析結果のそれぞれにおいて算定した r_{wl} と r_{bl} を示す。図中の、横軸に示す時間は、実験と解析の結果を比較するため、通水・解析の総時間で無次元化している。赤色で示す実験値は、5回分の実験結果を薄色とし、その平均値を濃色で示した。

図-2 からは、模型実験と数値解析の相関係数の時間変化が大きく異なることが分かる。数値解析の r_{wl} に関しては、実験同様に時間と共に相関が低下していく様子が見られた。これは、数値解析の解析時間が不足している可能性を考えると、妥当な結果である。その一方で、数値解析の r_{bl} は、ほぼ1.0から変動せず、模型実験のように無相関から相関が卓越するような遷移とはならなかった。実験結果における r_{bl} の水平線への漸近は、Phase3のみで観察され、浅水流に特有の漸変する水面が算定されているためと考えられる。数値解析において浅水流を仮定する、あるいは、流れのモデルに浅水流を選択することは、Redolfiの水面の変形を無視する仮定を意図せずに内包し、水深と底面の関係が一意に規定され、実際の砂州の発達の過程とは異なる物理機構が計算されていると考えるのが妥当である。

前節までの結果から、砂州の形成初期(Phase1)や中期(Phase2)における数値解析は実現象と全く異なる現象を記述していることが示された。特に、初期から中期における水面と底面の関係が実現象と乖離しており、浅水流を仮定した解析を用いて砂州発生の物理機構を説明することは困難であると推測される。また、形成後期(Phase3)においても、数値解析は模型実験の完全な再現とは言えない。著者らは¹²⁾、数値解析を用いた砂州の形成に伴う不確実性の存在を指摘している。このことを勘案すると、実務等における底面形状の時間発展につ

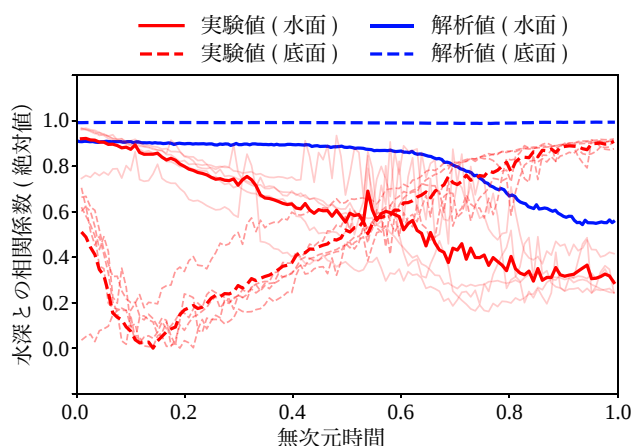


図-2 模型実験と数値解析の Phase Diagram

いてはアンサンブル解析等を用いた不確実性の定量化が不可欠であろう。

3. おわりに

本研究は、模型実験から得られた砂州の発生・発達の過程の時間的に連続した観測ビッグデータを用い、頻用される浅水流を仮定した数値解析が砂州の発生・発達の物理機構をどれほど適正に記述しているかを調べた。その結果、砂州の形成初期から中期は浅水流解析では記述できず、後期に関しても解析結果の解釈に注意が必要であることが示された。ただし、本研究では、数値解析の解析結果がどれほどの信頼性を有するかの検証には至っておらず、今後、観測データに基づき、頻用される数値解析の信頼性についての正確な評価が必要である。

参考文献

- 1) M. Colombini et al., Finite-amplitude alternate bars, *J. Fluid Mech.* 181, 213–232, 1987.
- 2) 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.
- 3) Y. Shimizu and T. Itakura, Calculation of bed variation in alluvial channels, *J. Hydraul. Eng.* 115, 367–384, 1989.
- 4) Y. Shimizu et al.:Advances in Computational Morphodynamics Using the International River Interface Co-operative (iRIC) Software, *Earth Surf Process Landf.* 45, 2019.
- 5) M. Redolfi, “Free alternate bars in rivers: Key physical mechanisms and simple formation criterion,” *Water Resour. Res.* 57, e2021WR030617, 2021.
- 6) Y. Fujita and Y. Muramoto, “Studies on the process of development of alternate bars,” *Bull. Disaster Prev. Res. Inst.* 35(3), 55–86, 1985.
- 7) 池田 宏:水路における斜め交錯模様と斜行砂州の形成, 第27 回水理講演会論文集, pp.709–714, 1983.
- 8) E. N. Lorentz:Deterministic Nonperiodic Flow, *J.Atom.Sci.*40,130. 1963.
- 9) D. Moteki et al.:Capture method for digital twin of formation processes of sand bars, *Phys. Fluids*, 34, 034117, 2022.
- 10) D. Moteki et al.:On the occurrence of sandbars, *Phys. Fluids*, 35, 016608, 2022.
- 11) A. Crosato et al.: “Experimental and numerical evidence for intrinsic nonmigrating bars in alluvial channels,” *Water Resour. Res.* 47, W03511, 2011.
- 12) 茂木ら: 数値解析による河床波の形成・発達過程における不確実性について, 土木学会年次学術講演会概要集, 2022.