

初期に設定する底面形状が自発的な河床波の発生・発達と流れに及ぼす影響

新潟大学大学院自然科学研究科 学生会員 黛 由季
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

河川の水利は、河床勾配や流路幅などの河道の形状が変化する移動床における水利である。また河川の流れの状態は、河道形状の空間的な変化の影響を受け水深と流速が空間分布を持つ不等流となる。このような実河川において流れの状態を把握するには、基本的かつ重要な水理量である水深や流速を把握する必要がある。

水理量の把握は、面的かつ高密度に一体的に測定することが望ましい。実河川と模型実験の両者でそのような計測手法は未確立である。近年になり、移動床の模型実験における水面と底面を同時かつ高分解能に計測できる装置 Stream Tomography(ST)が開発され、通水したまま水深の高分解能な把握が可能となった。しかし、流速の計測手法に関しては未確立である。一般に実務や模型実験の数値計算では、浅水流モデルを用いて水理量が算定されている。しかし、算定された値の妥当性や精度の検証には少なくとも水深か流速のどちらか一方が必要になるものの、これが困難であったため、その計算精度は不明である。

そこで本研究では、高密度な実測値と計算値から流れの状態を把握した。

2 模型実験の概要

2.1 実験条件と計測手法について

本研究では、全長 12 m、流路幅 0.45 m、水路勾配 1/120 の直線単矩形断面水路を用いた。水路全長のうちその中央部分の 8 m を検査区間とし、その上下流端に高さ 5 cm の堰を設置した上で、平均粒径 0.76 mm の 4 号珪砂を厚さ 5 cm で平坦に敷き詰めた。また本実験では、初期底面を均一に均すことに留意し、気泡管水準器により水平、垂直、45 度の 3 本の気泡管を備えたものにより、全区区間の水準を合わせそれを初期底面とした。

水理条件は、明瞭な不等流が等流状態から緩やかに発生・発達することを期待し、黒木・岸¹⁾の中規模河床形態の領域区分図を参考に、交互砂州の発生領域とした。この時の流量は 1.7 L/s、無次元掃流力は 0.077、 $BI_0^{0.2}/h_0$ は 15.0 である。給砂条件は、無給砂で行った。通水時間は、過去の実験²⁾において交互砂州が発達し伝播と形状変化が緩慢

となることが確認された 4 時間まで行った。

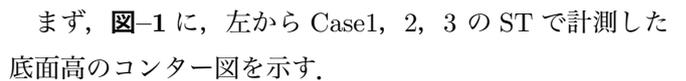
通水中の水面と底面の計測は星野ら³⁾の開発した Stream Tomography (以下、ST) を用いて行った。計測間隔は 10 分間隔で、計測の空間解像度は 2 cm で行った。

以上の実験条件と計測方法において、3 回の再現実験を行い、初期底面の状態を確認しそれぞれの結果に再現性があるかを検証した。

2.2 模型実験の結果

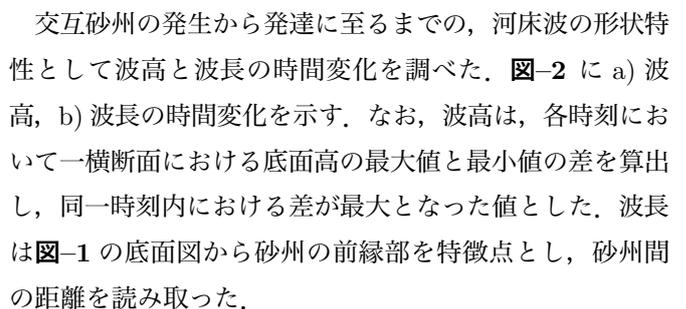
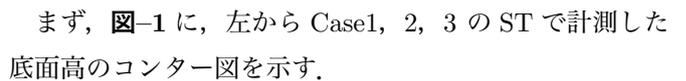
ST により得られた高密度な底面結果と、河床波の形状特性である波高と波長の時間変化を示す。

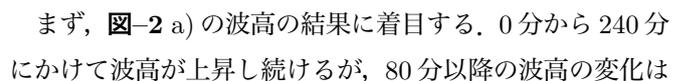
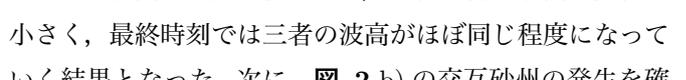
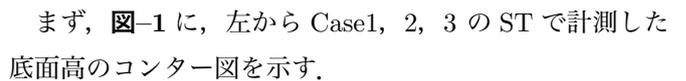
2.2.1 底面高の計測結果

まず、-1 に、左から Case 1, 2, 3 の ST で計測した底面高のカウンター図を示す。

0 分の結果に着目すると、初期底面を水平になるよう留意し設定したものの、右岸側の方が底面高が高くなっており、初期設定における人的誤差の程度が 3 実験ともに粒径単位で確認された。また、120 分以降では交互砂州が発達し、最終時刻の 240 分では上流側で無給砂が要因と推測される洗堀が生じ 120 分よりも堆積と洗堀がより明瞭となった。底面の計測結果からは、3 実験の底面の状態が通水初期と後期で類似していることがわかる。

2.2.2 河床波の形状特性

交互砂州の発生から発達に至るまでの、河床波の形状特性として波高と波長の時間変化を調べた。-2 に a) 波高、b) 波長の時間変化を示す。なお、波高は、各時刻において一横断面における底面高の最大値と最小値の差を算出し、同一時刻内における差が最大となった値とした。波長は-1 の底面図から砂州の前縁部を特徴点とし、砂州間の距離を読み取った。

まず、-2 a) の波高の結果に着目する。0 分から 240 分にかけて波高が上昇し続けるが、80 分以降の波高の変化は小さく、最終時刻では三者の波高がほぼ同じ程度になっていく結果となった。次に、-2 b) の交互砂州の発生を確認できた 30 分以降の波長の時間変化の結果を見る。波長は-1 の底面図から砂州の前縁部を特徴点とし、砂州間の距離を読み取った。ST で砂州の波長が通水初期から大きくなり 140 分以降はほぼ変化がないことがわかる。

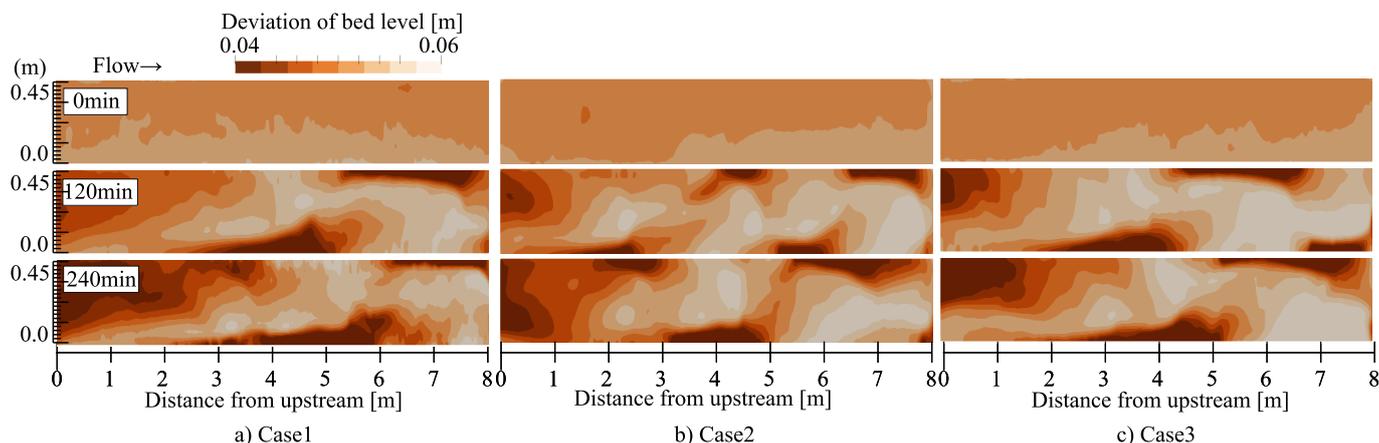


図-1 底面高の平面図

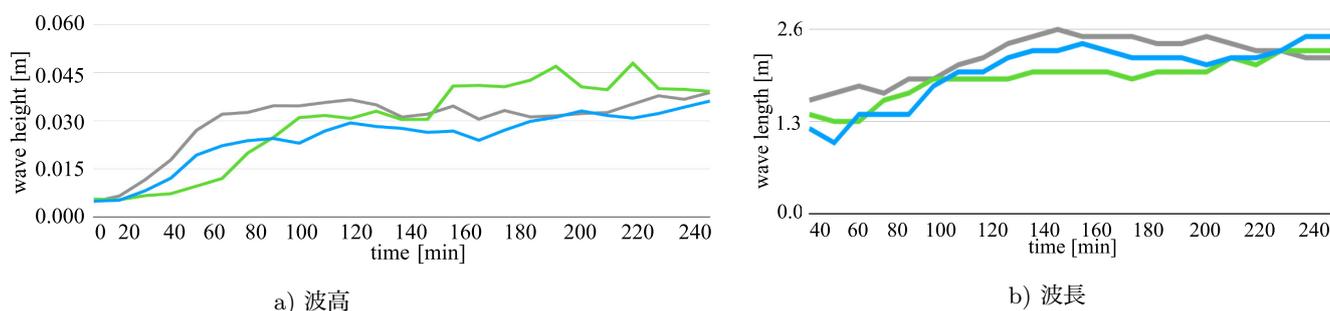


図-2 波高と波長の時間変化

波長と波高の時間変化から3実験の結果を比較した際にほぼ類似した河床波の発達の様子がわかり、再現性のある結果が定性的に示された。

3 水深の計算精度に基づく流れの状態の把握

STを用いた計測によって把握できるのは水面と底面の形状およびその差分である水深のみで、流速は計測できない。また、現状ではSTの空間分解能に対応できる流速計測装置は存在しない。このため、水理計算による推定が現状における現実的な選択肢となる。そこで、本研究ではSTで計測した水深を良好に再現する流速を平面二次元の固定床の水理計算の試行錯誤を繰り返すことで推定した。本章では、この流速を算定する際に得られた計算水深を高密度な実測水深と比較することで、浅水流モデルの適用性を調べ、水深の計算精度に基づき流れの状態を確認する。

3.1 水深の実測値を収束条件にした水理解析手法

水理解析のソルバーには、iRIC⁴⁾に同梱される浅水流方程式を支配方程式としたNays2Dを用い、計算の空間解像度は計測の解像度に合わせ2cmとした。

著者らの研究グループは、数値解析と同等の分解能のSTから得られる、水深の高密度計測値を収束条件とした粗度係数 n (以下、 n)の調整手法を提案している⁵⁾。この手法は、底面の実測値を与えた水理解析を行った後、それぞれ

の計算点において水深の実測値と計算値の偏差が最小となる n を変化させながら計算を繰り返すものである。そのため、河床材料の種類ごとに規定されるとする n の本来の定義からは外れてしまうが、浅水流の水理モデルの構成を満足する水深の計算値を得ることが可能である。本研究においても同様に、水深の実測値と計算値の差が最小となるように、各時刻の水理解析において n を調整した。なお、本研究における n の調整は各時刻の空間で一定値とし、その空間分布は無視した。

3.2 水深の実測値と計算値の偏差

図-??に3実験の水深の偏差の通水初期と最終時刻の結果を平面図に示す。同図中の偏差は、水深の実測値と計算値の差を実測値で除すことで無次元化したものである。青色から緑、赤色にかけて計算精度が低下していることを示す。

まず、通水初期の偏差の平面図を見ると、偏差は3実験ともに全区間で一様に小さい。一方で最終時刻の結果を見ると、3実験ともに初期に比べて偏差が大きな箇所が現れている。ここで3実験の計算精度の低下部分を比較する。Case2, 3は交互砂州の前縁部などの局所的な河床勾配が急なところで低下する傾向があるのに対し、Case1は偏差の大きな箇所が前述の箇所以外にも広範囲に及び計算精度が全域で低下していることがわかった。

前章では波長や波高から一般に再現性が確認される結果

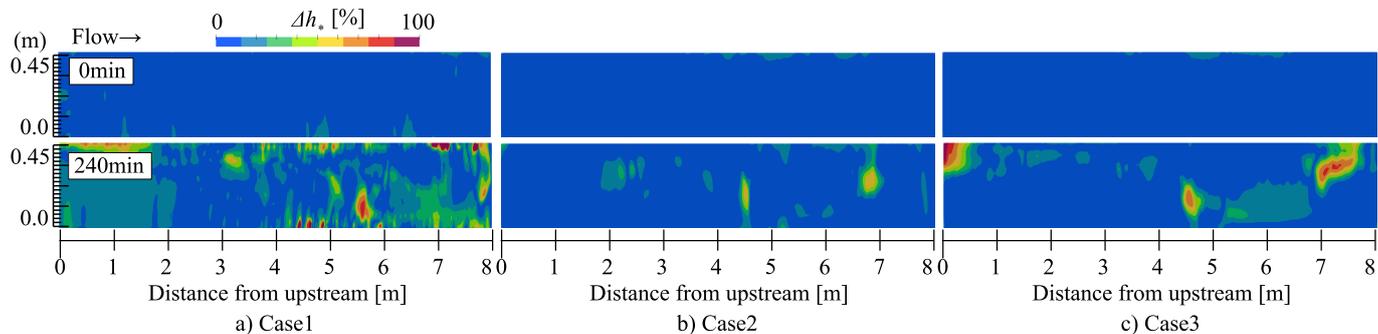


図-3 水深の実測値と計算値の偏差の割合

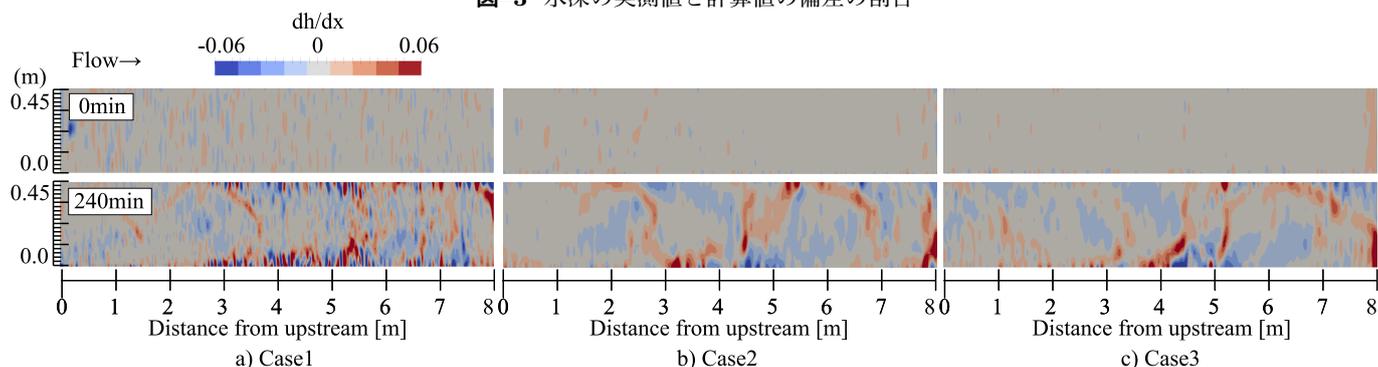


図-4 水深の空間勾配

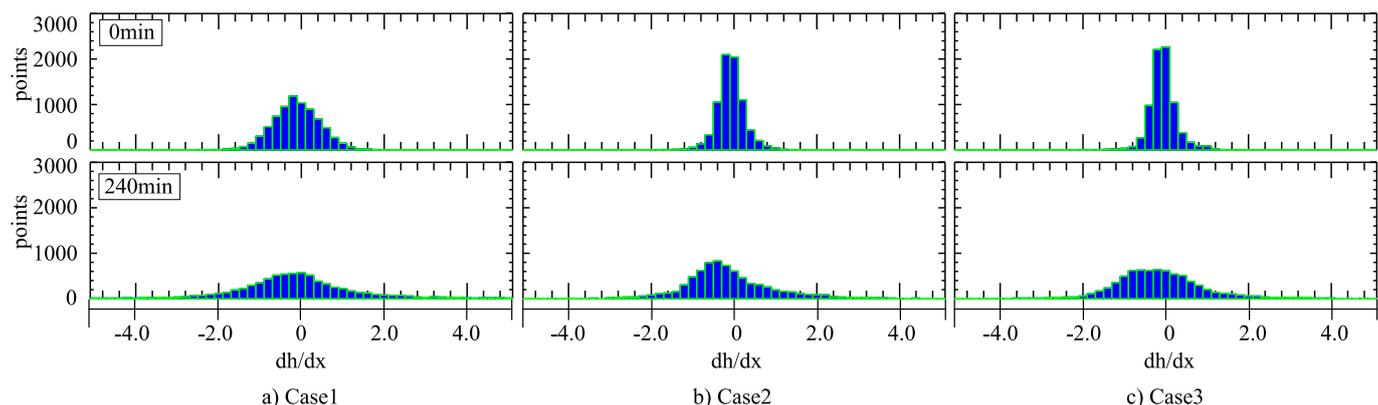


図-5 dh/dx のヒストグラム

が得られたが、水理計算から水理計算による水深の再現精度から、初期では Case 毎に違いが見られなかった。しかし、通水後期になると Case 毎の河床の形状に目立った違いは見られないにもかかわらず、水深の計算精度が異なることがわかった。つまり、初期底面の微小な違いにより、その後に自発的に発達する河床波の形状が、視認できないような微小な規模での違いがあることがわかり、この微小な違いにおける浅水流モデルの適用性が異なることが示唆された。

4 高密度実測に基づく流れの状態の確認

本章では、前章で得られた結果をもとに、実験 Case 毎の流れの状態を確認するため、高密度な水深の実測値に依

拠した検証を行う。

4.1 dh/dx の空間分布

図-4 に通水初期と交互砂州が十分に発達した最終時刻の dh/dx の平面図を示した。

まず、図-4 の 0 分の結果を見ると、Case1 は通水初期の時点で、水深の空間変化が水路全区間でまばらに見られる。一方で Case2, 3 は検査区間で dh/dx がほぼ 0 であり、Case1 よりも水深が一様であることがわかる。

次に 240 分の結果を見ると、初期に比べ dh/dx が大きくなり、Case1 ではその分布に周期性は見られないが、Case 2, 3 は dh/dx の大きな箇所は洗掘域と堆積域の境目などで、交互砂州の存在がわかるような空間分布となっている。

続いて、図-5 に、図-4 の平面図で示した dh/dx の大き

さの空間的割合をヒストグラムにより示し、流れの変化を把握する。

まず、図-5 の 0 分の結果に着目し、3 実験結果を比較すると、Case1 の dh/dx のヒストグラムが Case2, 3 に比べ、ヒストグラムの概形が潰れている。すなわち Case1 は他実験に比べ初期水深のばらつきが大きいことが見てとれ、初期の流れの状態でも Case 毎に差が生じていたことがわかった。

次に 240 分の結果に着目すると、全 case のヒストグラムが初期に比べ潰れており、水深の空間分布が大きくなっていることがわかる。

4.2 dh/dx の分散の時間変化

前節では、ヒストグラムの概形から同時刻における流れの状態について比較したが、その時間変化は対象としていなかった。そのため、本節では、水深の分散を算定することにより、各時刻毎の水深のばらつきを定量化し、比較を行った。図-6 に dh/dx の分散の時間変化を示す。

図-5 の初期における Case 毎のヒストグラムの概形の差は、図-6 の dh/dx の分散の初期の結果を見ると非常に小さいことがわかる。しかし、160 分以降では振る舞いが明確に異なり、Case1 では急激な増大、Case 2, 3 では維持されるという、それぞれの傾向が見られた。Case 2, 3 の結果からは、初期のヒストグラムの概形を似せることで、その後の流れの状態も類似することが示唆された。一方、後期における Case1 の増大の影響は、通水初期のヒストグラムの差に基づくものと推察する。前節のヒストグラムの結果と合わせて考えると、初期の dh/dx のヒストグラムの概形の差は、分散で見るとほぼ差がないにも関わらず、通水後期の分散では大きな差になることがわかった。初期に設定した底面形状が河床波の自発的な発生・発達に影響を及ぼし、そこでの流れに影響を与えることが示唆された。

5 おわりに

本研究では、初期の底面形状のわずかな違いが自発的に発生・発達する河床波やそこでの流れに及ぼす影響を把握するため、同一の条件で 3 回の模型実験を行い、以下の結果を得た。

1. 自発的に発生・発達する河床波の形状は、河床波の幾何学的形状の観点では目立った違いは生じないことがわかった。
2. 一方で、水深の勾配の統計的な観点では、自発的に発生・発達した河床波の形状とそこでの流れの状態に明瞭な違いがあることがわかった。

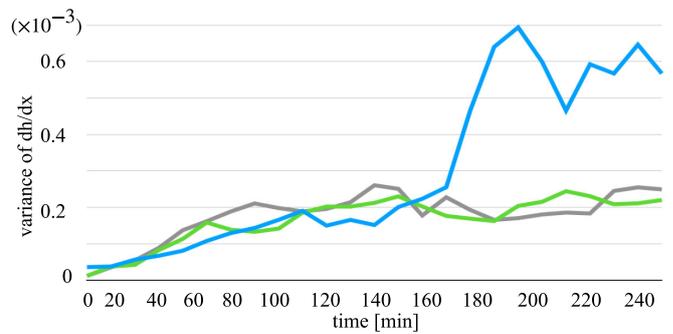


図-6 dh/dx の分散の時間変化

3. つまり、初期の平坦床において視認が難しいほどの底面形状のわずかな違いが、自発的な河床波の発生・発達と流れに無視できない規模で影響を及ぼすことが示唆された。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 石原道秀, 安田浩保, 五十嵐拓実, 交互砂州の流下速度の低下要因について, 土木学会論文集 B2(水工学), Vol.74, No.4, L.1111-L.1116, 2018.
- 3) 星野 剛, 安田 浩保, 倉橋 将幸: 交互砂州の形成機構の解明に向けた水面と底面の同時計測手法の開発, 土木学会論文集 A2 (応用力学), vol.74, 1, pp.63-74, 2018.
- 4) 北海道河川財団, <http://i-ric.org>.
- 5) 齋藤選, 安田浩保, 早坂圭司: 交互砂州上の流れにおける摩擦損失の定量化, 第 36 回土木学会関東支部新潟会研究発表講演会論文集, pp.104-107, 2018