

4. 動的光切断法を用いた河床波形成過程における水位・河床位の計測

星野 剛^{1*}・安田 浩保¹・利根川 明弘²

¹新潟大学 災害・復興科学研究所 (〒950-2181 新潟市西区五十嵐2の町 8050)

²新潟大学大学院 自然科学研究科 (〒950-2181 新潟市西区五十嵐2の町 8050)

*E-mail: hoshino@gs.niigata-u.ac.jp

本研究は、著者らの開発した水位および河床位の計測手法である動的光切断法の河床波形成時における適用性を調べたものである。本研究では小規模河床波、中規模河床波形成時における計測手法の妥当性を調べるために3つの水理条件を設定し、計測を実施した。その結果、本計測手法は各種河床波形成時の計測手法として妥当であることが確認された。本計測手法は水位および河床位の面的な情報を時空間で高密度に計測可能であることから、河床波の物理機構の詳細を把握するために有用となることが見込まれる。

Key Words: *moving optical cutting method, sandwaves, sand dunes, sand bars, water surface measurement, bed surface measurement*

1. はじめに

河床波は流水とそれにより流送される土砂の相互作用により形成され、通水の継続とともに形状が変化したり、上下流への移動を生じたりする強い波動性を有する非定常現象である。また、水理条件の違いにより形成される河床形態は異なり、時には砂堆や反砂堆が形成されて水面および河床面に高周波の起伏が卓越することさえある。河床波上の流れの力学的特徴としては水流と河床波とが互いに影響を及ぼし合う関係にあり、河床波の力学機構は水面と河床面の運動の相互作用を考慮した上で議論されるべきである。これらの特徴を踏まえると河床波の物理的機構の解明には時空間的に高密度な物理量の把握が必要不可欠といえる。

移動床水理の理解のために水路実験がこれまでに数多く行われ、現象の理解に多大な貢献を果たしている。実験における計測項目は水位や河床位といったスカラー量、流速や流砂量といったベクトル量に大別される。このうち水位や河床位の計測手法に着目すると、現在までに最も広く用いられている計測手法は所定の時間に通水を停止した後に河床位を種々の方法で計測し、停水前後で水位を計測する手法、例えば¹⁾²⁾³⁾である。これらの計測手法は河床波の発達過程や平衡形態の把握に大きく貢献したものの、計測時に停水を要するため時間的に連続な計測が困難であったり、水位と河床位を同時に計測できないことから移動床流れにおける非定常性や水流と河床波の相互作用の影響を十分に把握することができない。停水を伴わずに時々刻々の河床

位を計測する手法として澤井⁴⁾は光反射式のサーボ河床計による計測手法を開発しているものの、点的な計測であることから高密度かつ大領域の面的データの取得は容易ではない。また、計測に際して水と計測機器との接触を要することから流水への影響も予想される。

このような時空間的に連続かつ高密度な計測情報の不足は移動床水理の物理機構の理解を妨げるばかりか、数値解析モデルの検証を十分に行えない現状をも招いている。数値解析においては流れの支配方程式や数多く存在する流砂量式の中から適切な式を選択することが現象の再現において重要となる。しかしながら、解析結果の検証材料の不足を理由に流水と流砂のいずれの支配方程式の選定基準も確立されていない。信頼性の高い数値解析の実現のために時空間的に高密度な計測情報が求められている。

近年では光学的手法と画像解析とを組み合わせた計測手法が提案され始めている。三戸部ら⁵⁾はパターン光を用いた画像解析により、時々刻々の水位を面的に非接触で計測する手法を開発している。著者らはレーザーシートを用いた光切断法により、水位のみならず河床位をも時空間的に連続に計測する手法⁶⁾を開発している。

本研究では著者らの開発した計測手法を河床波が形成される移動床水理実験へ適用し、小規模河床波と中規模河床波の計測における有効性を検証するとともに計測された水位および河床位の時空間的な特徴について議論する。

2. 計測手法と実験条件

(1) 計測装置の概要

計測装置は図-1に示すように水路から所定の高さにシート状のレーザー光を照射するレーザーヘッドを設置し、左右岸にデジタルカメラをそれぞれ配置する。水路上部に設置したレーザーヘッドから河床面方向にシート状の光を照射し、水面および河床面での光の反射を左右岸のカメラにより撮影する。レーザーヘッドは水路横断方向に繰り返しの軸運動を可能とする機械に取り付け、短時間で計測領域全体をレーザー光により照射可能とした。

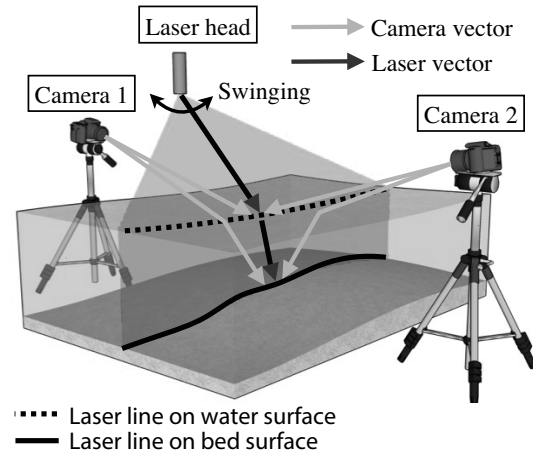


図-1 光切断法による水位、河床位計測概念図

(2) 計測手順

a) 事前準備

水位および河床位はカメラの視線とレーザー光を3次元ベクトルとみなし、幾何学的な数値処理により算出する。カメラの視線ベクトルは撮影された画像のピクセル番号と対応しており、あらかじめ両者の対応関係を作成しておく。また、レーザー光ベクトルはレーザーヘッドの角度ごとに異なるため、同様に両者の対応関係をあらかじめ作成しておく。

b) 水位の計測

時々刻々の水面での光の反射を左右岸のカメラにより撮影し、画像中の水面位置のピクセル番号を画素情報から識別する。事前に作成してあるピクセル番号とカメラの視線ベクトルの対応関係を用いることで、図-1中に灰色の矢印で示すカメラの視線ベクトルを算出する。また、レーザーヘッドの角度とレーザー光のベクトルとの対応関係に基づき、図中に黒色の矢印で示すレーザー光ベクトルも算出する。求められたカメラの視線ベクトルおよびレーザー光ベクトルを用いて三角測量を実行し、水位の三次元座標を取得する。これらの数値処理をレーザー光の移動とともに時々刻々行うことで、左岸から右岸までの高密度の水位情報を取得する。

c) 河床位の計測

水位の計測と同様に時々刻々の河床面での発光箇所を画素情報から識別し、カメラの視線ベクトルを算出する。ただし、河床位の算出に関しては水面における光の屈折を考慮する必要がある。水位と水面勾配が既知でなければ算出できない。このため前述の手法により得られた水位および水面勾配の高密度情報を用いて、レーザー光ベクトルおよびカメラの視線ベクトルの水面との交点および水面での屈折ベクトルをそれぞれ算出し、両屈折ベクトルの交点を算出することで河床位の3次元情報を取得する。なお、計測手法および幾何学処理の詳細は別報⁶⁾を参照されたい。

表-1 水理条件

case	Q (l/s)	Fr	Bl^2/h	τ_*
1	2.0	0.863	5.814	0.084
2	3.0	0.899	4.559	0.107
3	4.0	0.925	3.836	0.127

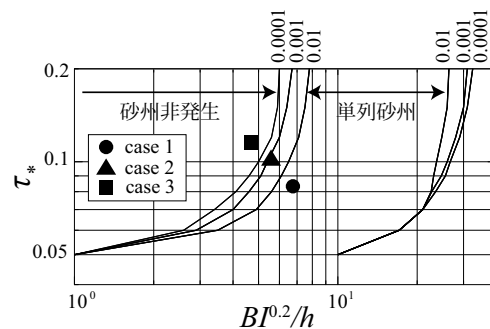


図-2 河床形態の領域区分図上の本実験条件

d) 計測手法の仕様及び設定

レーザー光源は波長 532 nm の YAG レーザーを用い、レーザーヘッドの軸運動は機械制御により毎秒 8.7 度で往復するように設定した。レーザーヘッドは水路床から垂直方向に 180 cm の高さに設置しており、水路床においては 34.5 cm/s の速度で横断方向に照射光が移動する。本研究で用いた全幅が 30 cm の水路であれば 1 秒で水路の左岸から右岸までレーザー光は横断できる。計測のための画像は 60 fps の動画撮影により取得し、画像の解像度は 1280×720 pixels、シャッタースピードは 1/250 s とした。実験に用いる水にはフルオロセインナトリウムを混入し、緑色に着色し、水中でのレーザー光の発光を明瞭にした。

e) 実験手法の特徴及び精度

本計測手法はレーザーヘッドを高速に繰り返運動させることで非接触で水位および河床位の時空間的な計測を可能とする。縦断方向の計測間隔は撮影された

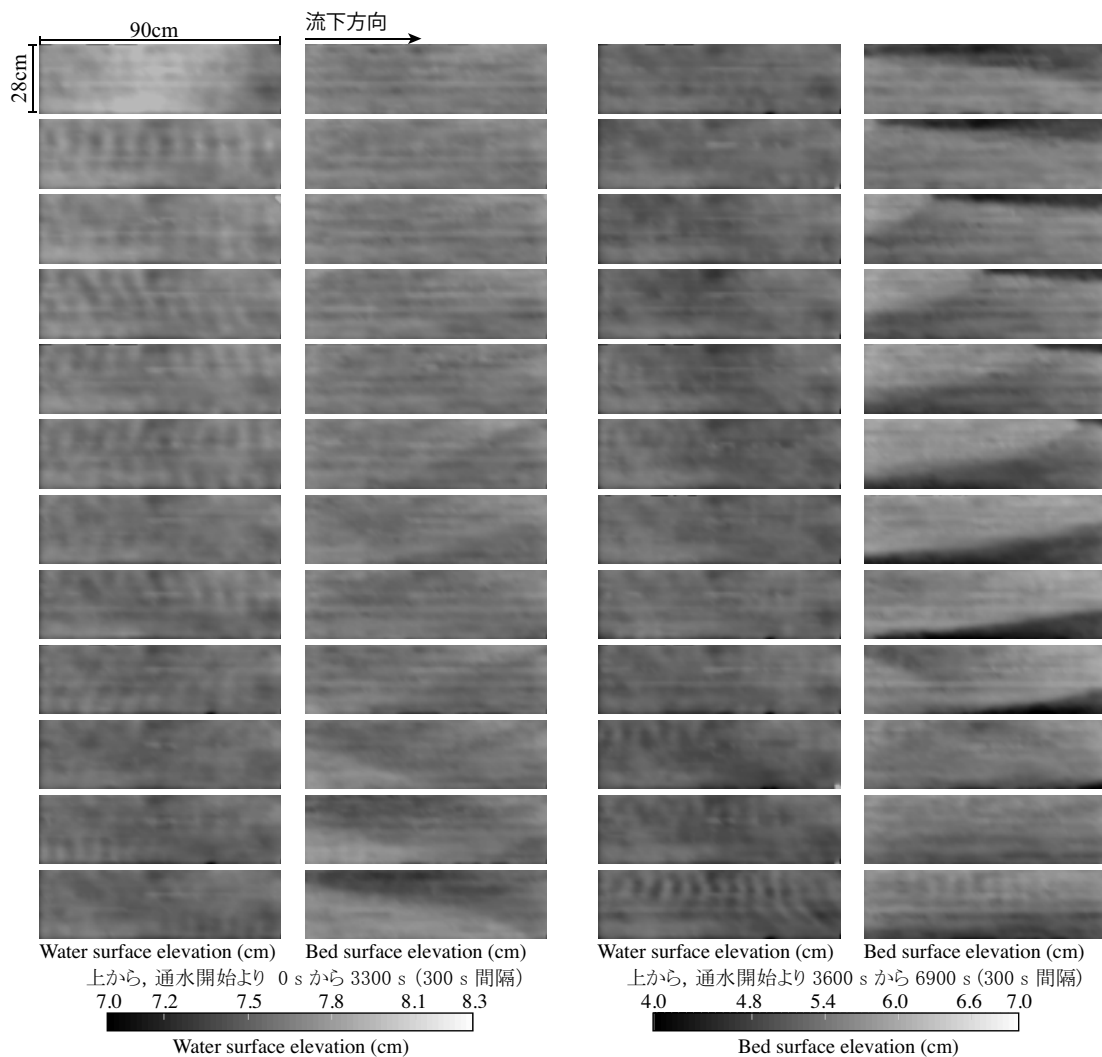


図-3 水位、河床位の計測結果 (case1)

画像のピクセル数に応じて決定され、横断方向の計測間隔は撮影時の fps およびレーザーヘッドの軸運動速度に応じて決定される。ピクセル数および fps は大きくなるほど、軸運動速度は小さくなるほど計測結果が密となる。本研究で用いた機器の仕様および設定では水位、河床位ともに縦横断方向に概ね 0.5 cm 間隔で計測される設定である。画像解析ではレーザーシートが水路横断方向に一往復する時間を同一の時刻とみなす。このため時間的な計測間隔は軸運動速度および水路幅によって決定され、軸運動速度は大きいほど、水路幅は小さいほど時間的に密な計測を可能とする。

計測精度は固定床流れにおいて別報⁶⁾で確認しており、計測誤差は最大で数 mm 程度であることを把握している。ただし、誤差の大きさは現象の非定常性の強さや機器の設定に応じて変わってくるものと考えられ、非定常現象を対象とした計測精度の定量化は今後の課題である。

(3) 実験条件

実験には全長 10 m、全幅 0.3 m、水路床勾配 1/180 の矩形断面の水路を用い、水路床全体に平均粒径 0.76 mm の 4 号硅砂を敷いた。小規模河床波、中規模河床波の両者に対する計測手法の適用性を検討するため、3 つの異なる規模の流量を通水する実験を実施した。各水理条件は表-1 に示す。これらの水理条件は黒木・岸の河床形態の領域区分⁷⁾上では、図-2 に示すようになり、異なる河床形態の形成が予想される。通水時間はいずれも 7200 s とし、計測領域は水路中心部の縦断長 90 cm、横断長 28 cm の範囲とした。

3. 計測結果

case1, case2, case3 の水位と河床位の計測結果を 300 s 間隔でそれぞれ、図-3, 図-4, 図-5 に示す。どの条件とも実験で確認された定性的性質を再現しており、本計測手法の小規模河床波、中規模河床波、それぞれの

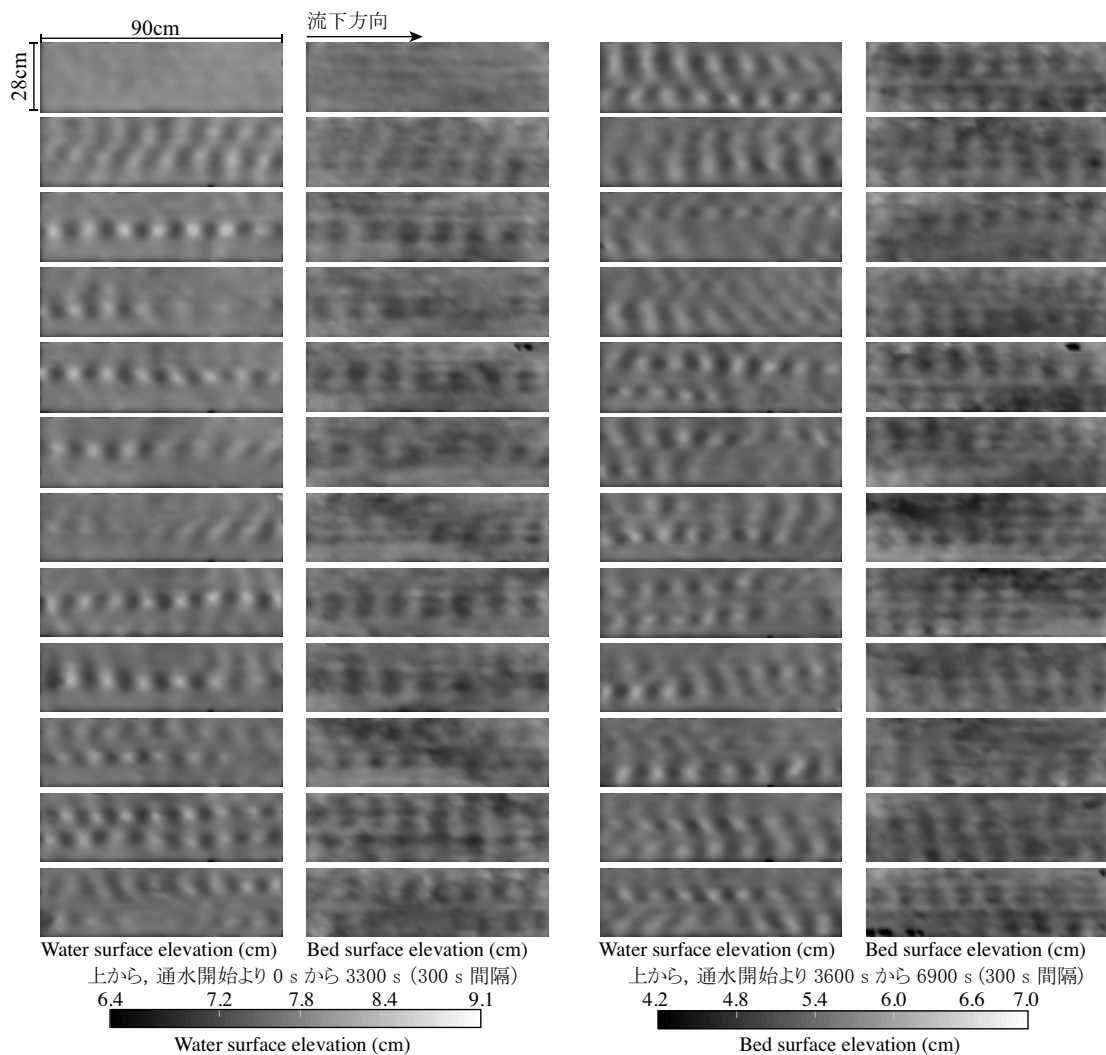


図-4 水位、河床位の計測結果 (case2)

形成時における有効性が確認された。以下では得られた結果より河床波の物理機構について考察する。

(1) case1(流量 2 l/s)

通水開始から 200 s までは水面および河床面に明瞭な起伏は生じない。通水開始から 300 s 経過後には水面で波長 10 cm、波高 0.3 cm 程度の起伏が生じ、1800 s 経過後には河床面には砂州と考えられる波長 240 cm、波高 0.5 cm 程度の起伏が左岸側に形成された。通水末期には左右岸に交互に形成された河床の起伏が時間の経過とともに流下する様子が計測され、典型的な交互砂州の形成が確認された。水面と河床面との応答関係に着目すると本実験条件では、それぞれ波長が異なる水面波および河床波の形成が確認された。また、複数の時刻の計測結果を用いることで、砂州の波速が 0.06cm/s 程度であることが把握された。

(2) case2(流量 3 l/s)

水位および河床位の計測結果より、通水初期には case1 と同様に高波数の水面の起伏が形成されるものの、case1

とは異なり河床の起伏と応答するように水面も起伏を呈する。水面波と河床波が同位相となっていることから反砂堆が形成されていたものと考えられる。また、通水末期においては交互砂州とみられる河床波が case1 と同様に形成されるものの通水開始 2700 s や 5400 s で顕著なように水面や河床位には反砂堆と思われる河床形態も共存していることがわかる。水面波高及び河床面波高はそれぞれ、1.8 cm、1.2 cm 程度であった。

(3) case3(流量 4 l/s)

通水開始より 300 s で水面と河床面の両者に周期的な起伏が卓越した。それらの水面と河床面の周期起伏は位相が概ね揃っていることから case2 と同様に反砂堆だと判断できる。通水末期においても反砂堆は依然として卓越し、その水面波高は最大で 2 cm 程度、河床面波高は最大で 1.5 cm 程度であった。これは既往の反砂堆の河床波高は水面波高の 2/3 から 1/2 となるという知見⁸⁾と一致している。また、反砂堆が卓越する箇所は流心に留まらず、時間の経過に伴い横断方向に移動す

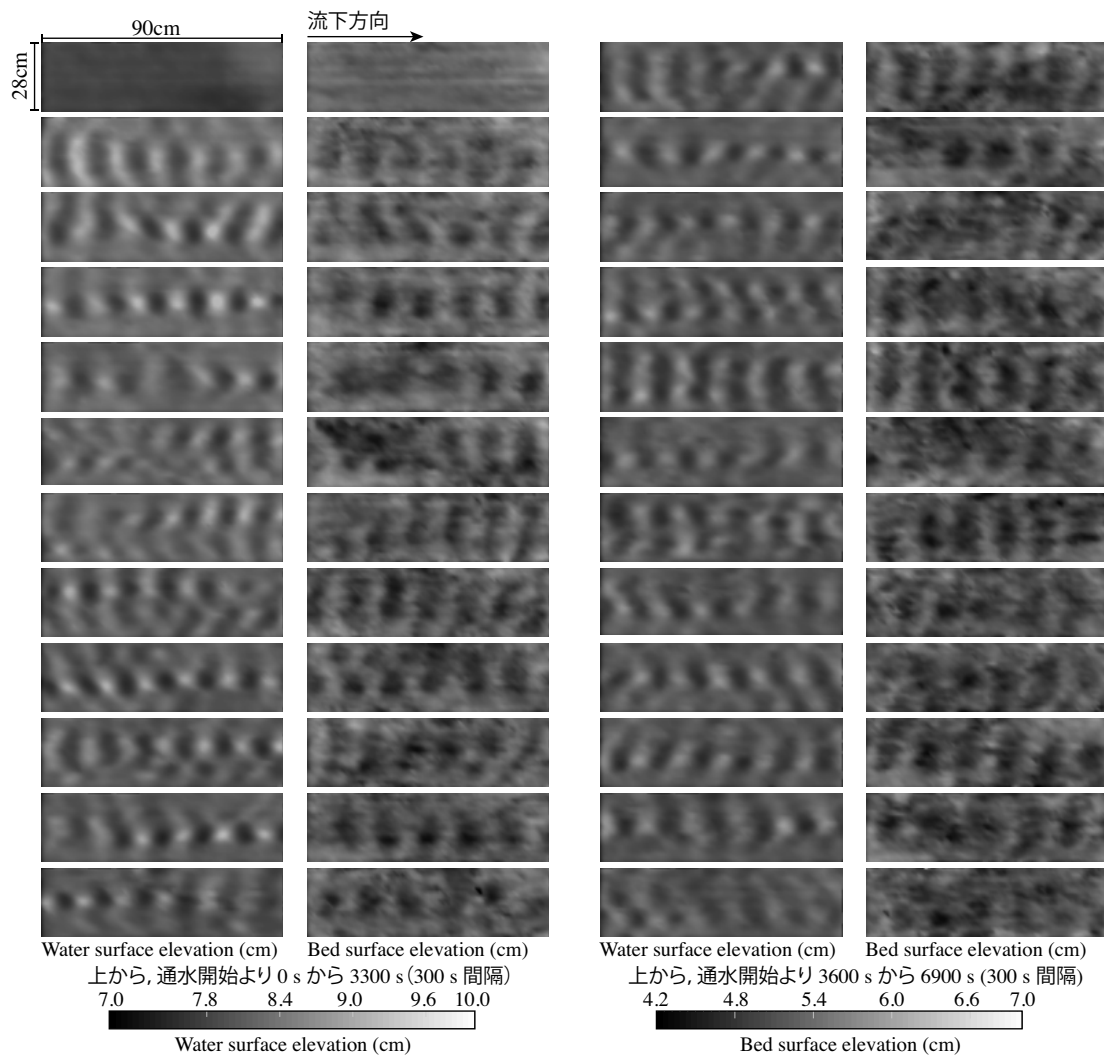


図-5 水位、河床位の計測結果 (case3)

るほか、その波高も一定とならず、本実験条件では強い不安定性を生じさせることが確認された。

4. おわりに

動的な光切断法により、通水を停止することなく小規模河床波、中規模河床波の形成時における水位、河床位を時空間的に高密度で取得可能なことを示した。本計測手法は河床面と水面との応答関係や両者の時空間的な変動を把握可能であることから、河床波の物理機構の解明に大きく寄与するものと考えられる。

謝辞: 本研究は科研費基盤研究 (A)(代表者 山田正)、科研費若手研究 (A)(代表者 安田浩保)、佐々木環境技術振興財団試験研究費 (代表者 星野剛) からの支援を受けて実施されている。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 藤田裕一郎, 村本嘉雄, 堀池周二: 交互砂州の発達過程に関する研究, 京都大学防災研究所年報. B, 24, B-2, pp.411-431, 1981.

- 2) 長谷川和義: 沖積蛇行の平面および河床形状と流れに関する水理学的研究, 北海道大学学位論文, 1983.
- 3) 渡邊康玄, 桑村貴志: 複列砂州のモード減少課程に関する水理実験, 水工学論文集, 第 48 巻, pp.997-1002, 2004.
- 4) 澤井健二: 非定常流による蛇行水路の河床変動に関する実験的研究, 京都大学防災研究所年報. B, 35, B-2, pp.365-371, 1992.
- 5) 三戸部佑太, 大島香織, 渡部靖憲: 面的波浪水面形状計測法の開発と碎波への適用, 土木学会論文集 B2(海岸工学) Vol.66, No.1, pp.086-090, 2010.
- 6) 星野剛, 安田浩保: レーザーシートを用いた水位・河床位の時空間連続計測手法の開発, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 70, pp.I 841-I 850, 2014.
- 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, 第 342 号, pp.87-96, 1984.
- 8) 河村三郎: 土砂水理学 1, 森北出版株式会社, 1982.