

背水の影響区間における 河床波の発達過程に関する水理実験

伊波 友生¹・久加 朋子²・山口 里実¹・吉川 泰弘³

¹ 正会員 (国研) 土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)

E-mail: inami-y@ceri.go.jp (Corresponding Author)

E-mail: kawamura-s@ceri.go.jp

² 正会員 富山県立大学准教授 環境・社会基盤工学科 (〒939-0398 富山県射水市黒河 5180)

E-mail: kyuka@pu-toyama.ac.jp

³ 正会員 北見工業大学准教授 地域未来デザイン工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

E-mail: yoshi@mail.kitami-it.ac.jp

下流端水位が異なる場における小規模河床波の発達状況とその影響で生じる水位縦断形状の把握を目的に、水理実験を実施した。ならびに、ブルーレーザを用いて非接触で水面形と水面下の河床計測を試み、移動床実験におけるその有用性も議論した。実験の結果、せき上げのケースでは水路全区間で河床波が発達し維持され、それに伴い水位が上昇した。一方、低下背水のケースではある区間において急速な河床波の発達が見られたことから、流れが加速する状況下において河床波の発達が促進される条件が存在する可能性が示された。

Key Words: sand waves, back water, blue laser, flume experiment

1. はじめに

近年、大河川に合流する支川において越水氾濫等が多発している。本川では整備・強化が進んでいるため従来よりも高い水位に耐えることができるようになっている。その一方で、支川は整備が必ずしも十分とは言えず、本川の高水位がバックウォーターとなり支川の水位を上昇させる状況下で、合流点や支川部での氾濫が発生していると推察される。支川が潜在的に有するリスクは本川の水位変動に起因する。したがって、合流部の接続方法の違いに応じた支川での水位上昇量を算定することは防災の観点から喫緊の課題である。

出水時の水位は流量規模に加え、小規模河床波の発達状況に影響を受けることが従来知られている¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。小規模河床波が発達する場では、流れに対する抵抗が大きくなり、水位の上昇が生じる¹⁾²⁾³⁾。河床波を伴う流れでは、抵抗は、河床の砂粒子に働く有効掃流力と河床波形状による形状抵抗に分けて考えられる¹⁾²⁾。全抵抗に相当する全せん断力は、河床波の発生が無ければ有効掃流力に等しくなり、河床波の発達による水位上昇に伴い増大する¹⁾²⁾³⁾。一方、河床波の発達により形状抵抗が増大すると、全せん断力が増大するのに対し、砂礫の輸送に

有効な成分である有効掃流力は低下する³⁾。これは、多くの研究では縦断方向に一樣に河床波が発生することを対象としており、この場合、流下方向に一樣に平均的に水位が上昇して流速が低下するためである³⁾。

本研究で対象としている背水の影響を受ける区間では、下流端水位の影響により水面勾配が大きく変化するため、水理条件が縦断的に大きく異なる。この区間で河床波が発生し水位が上昇すると、その影響でも水面勾配が変化し、水理条件が変化する。つまり、背水区間の水位縦断形状においては、下流端水位と河床波発生による水位上昇の双方の影響が複雑に作用していると考えられる。著者ら⁵⁾は不等流計算に岸・黒木²⁾の抵抗則を適用することによって生じ得る水位縦断形状の検討を実施している。しかしながら、計算は固定床としており、また、比較した実験でも縦断方向に何点かを計測した結果しか得られておらず、背水区間における河床波の発達と水位上昇の関係を物理的に検討できていない。また、例えば、せき上げ背水の条件下では、平均流速が流下方向に減速することになり、低下背水の条件下では加速することになる。このような減速または加速が生じる条件下で河床波の発達特性や抵抗の現れ方が異なる可能性がある。著者らが知る限りでは、このような現象に着目した例はない。そ

表-1 実験条件

	流量	粒径	河床勾配	敷厚	水路長	水路幅	通水時間	下流端水位
ケース 1	30.0L/s	0.515 mm	1/500	0.15 m	27.0m	0.5m	240分	0.12 m (せき上げ)
ケース 2	30.0L/s	0.515 mm	1/500	0.15 m	27.0m	0.5m	240分	0.072 m (低下背水)

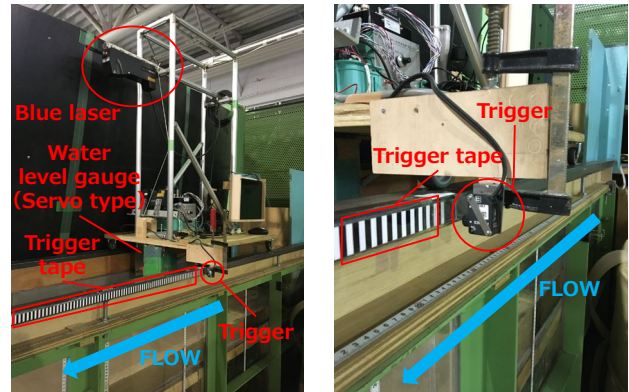
ここで、本研究では、下流端水位を合流点での水位とみなして、下流端水位が異なる場における河床波の発達特性と縦断的な水位特性を把握するために、背水の影響区間における水理実験を実施した。

実験では、河床を面的かつ縦断方向に長い延長を計測することが必要となる。近年は、実河川や大型実験であればマルチビームによる音響測深と ADCP による計測を組み合わせた方法⁷⁾が適用されるようになり、室内実験水路においては水面と河床を非接触で計測する動的光切断法^{8,9)}などが提案されている。しかし、室内実験のような水深のスケールが小規模な場合、音響測深のように水中に機材を入れる必要がある計測方法では計測中に河床が乱されることが懸念されるため、非接触の計測方法が望ましい。また、小規模河床形態に分類される河床波の発達状況を計測するにあたっては、できる限り縦断方向に高解像度で計測できる方法が望ましい。更に本研究では背水区間における縦断的な変化を対象としているため、縦断方向に長い延長を効率的に計測できる方法が望ましい。そこで著者らはブルーレーザを用いた非接触で水面下の面的な河床計測を試行した。一度の測定で横断方向に最大で 700 mm 幅の河床高を計測できるブルーレーザのセンサーを滑車付きの架台に取り付け、流下方向に移動させながら連続的に河床を計測することで、縦断方向に長い延長における非接触かつ面的な河床計測を行った。河床波の波高や波長を捉えるために、流下方向に自動的に 10mm 間隔で計測値が出力されるように設定した。本機器は水面および水中の河床面を同時に計測できるとされている計器であり、通水中の河床形状の時間変化を断続的かつ効率的に把握する手法となり得ることが期待されるものの、移動床実験への適用実績の報告がなく、その適用性については不明であった。計測を試みたところ、後述するように、移動床状況下では通水中の計測に課題があることがわかったため、本実験では、一時的に通水を停止して河床形状を計測することとした。この時、通水中の形状が維持されるように水路内に湛水したままの状態ブルーレーザによる計測を実施することによって、通水中と同様の河床形状を計測することとした。

本研究は、実験で背水の影響区間における河床波の縦断的な発達過程を観測することによって、下流端水位に応じた河床波の発達特性を明らかにすることを目的とす



図-1 実験水路 (x [下流端からの距離]=17.3m~21.3m)



(a) ブルーレーザとサーボ式水位計を設置した架台

(b) トリガーとトリガーテープ

図-2 ブルーレーザ計測およびサーボ式水位計測の構成

る。また、本実験での計測方法を説明するにあたり、先述したブルーレーザを用いた河床計測の試行の結果についても報告する。

2. 実験概要

(1) 移動床実験

実験条件を表-1 に示す。両ケース共通して、流量 : 30 L/s、粒径 : 0.515 mm、河床勾配 : 1/500、初期河床の敷厚 : 0.15 m である。実験は長さ 34 m (そのうち移動床区間 27.0 m)、幅 0.5 m の兩岸ともにアクリル製側壁を有する水路にて実施した (図-1)。実験条件は水面形がせき上げ背水となるケース 1 と低下背水となるケース 2 を実施した。下流端の水位を一定に保つために観音開き式のゲートを下流端に設置した。事前にゲート開度とそれによって得られる下流端の水位との関係をキャリブレーションし、ゲート開度を決定した。なお、ケース 1 とケース 2 は常流であり、ケース 2 の下流端の水深は限界水深となる。

通水はいずれのケースも 4 時間実施した。通水開始時は、十分な湿潤状態から開始するために湛水 (0.3 L/s) を行い、水路の上流の水位が安定した後に実験を開始した。

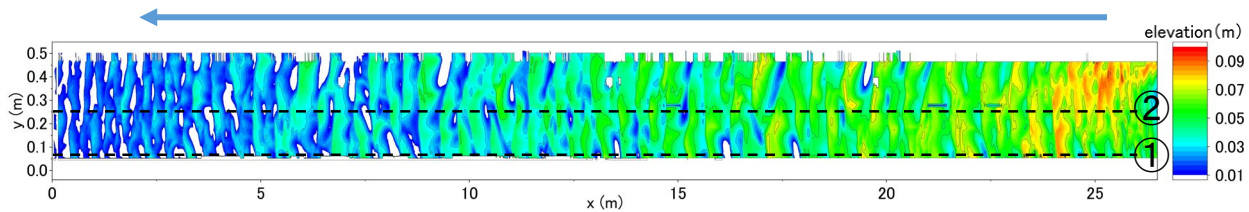


図-3 河床高 ケース 1 せき上げ 30分後

通水停止時は、通水中の河床形状が維持されるように湛水を行った。この時、細心の注意をはらいながら水路上流側のバルブ（流量調整用）と水路下流側の排水バルブ（排水量調整用）を調整することによって、できる限り河床形状を維持するように努めた。また、通水終了後の水路からの排水は、河床形状を維持するために長時間かけて少しずつ排水を行った。

水路上流端では、通水中、なるべく動的平衡条件となるように給砂を行った。具体的には、上流端には初期河床と同じ高さで固定床の堰を設置しており、その直下流側の河床高の状況を目視で確認しながら顕著な洗掘や堆積が生じないように給砂を実施した。

計測方法については、後述するように、ブルーレーザ計測を試行したうえで決定した。また、実験水路左岸側面の水位と河床高をおよそ1m間隔で通水中30分ごとにアクリル壁の外側から目視で計測した。

(2) ブルーレーザを用いた河床計測の試行

ブルーレーザ変位計（Keyence 製 超高精細インラインプロファイル測定器 LJ-X8900）をレーザ光線が鉛直下向きに照射するように滑車付きの架台に取り付けた（図-2 (a)）。水路側面には白黒各5mm間隔のトリガータープを張った（図-2 (b)）。架台を流下方向に移動させるとトリガーがトリガータープを読み取り、トリガータープが白から黒に切り替わった時にレーザが照射され計測を実行する。河床横断方向に線的な河床計測を流下方向に10mm間隔で連続して実施し、それらを結合させることで、3次元河床データの作成を試みた。なお、横断方向の測点数は2640点である。

本実験を実施する前に、ケース2と同じ水理条件で予備実験を実施した。予備実験から、通水中におけるブルーレーザ変位計での河床計測は困難であることが分かった。用いたブルーレーザ変位計は受信した反射波のうち強いもの2つのデータをそれぞれ出力する仕様となっており、静水下であれば、河床位置と水面位置が計測されることになる。この時、河床位置の計測値は水面での光の屈折の影響を受けることになる。そのため、水面が変動する通水中は水面変動の影響で河床位置の計測値が乱れる可能性については懸念していたところであるが、予

想以上に計測値が乱れる結果となった。これは、本実験の通水中においては砂堆のクレストから浮遊砂が生じていることを確認しており、浮遊砂層で反射したものを計測したためと考えられる。したがって、本実験では、通水中に一時的に通水を停止して河床形状を計測することとした。この時、前述のように河床を崩さないようにに湛水し、静水下でブルーレーザを照射することで河床を面的に計測した。ブルーレーザを用いた河床計測は通水30分後（静水中）、60分後（静水中）、240分後（静水中）、240分後（空气中（排水後））の合計4回実施した。

(3) ブルーレーザを用いた水面形計測の試行

ブルーレーザ変位計が取り付けられた架台を通水中に流下方向に移動させることで、通水中における面的な水面形の計測を試みた。この時、架台にはサーボ式水位計（KENEK 製本体部 NS-10IN型、検出部 NST-10型）も取り付けた。本来、サーボ式水位計は定点で水位を断続的に計測することを想定している機器であるが、架台とともに流下方向に移動させることで、水路中央の1側線の水面形を計測した。また、本研究ではブルーレーザ変位計と計測タイミングを同期するように改造することで水面形の同時計測を可能とした。

3. ブルーレーザ計測の試行

(1) ブルーレーザ河床計測における屈折の補正方法

静水状態でのブルーレーザによる河床計測では水面で屈折が生じるため、静水中で計測した河床高の値を実際の河床高（空气中で計測した時の河床高）に補正する必要がある。前述の予備実験において、通水終了後の湛水した状態で河床を崩さないように水位を上昇させ、計5パターンの水位（ $h = 0.07 \text{ m}$, 0.09 m , 0.11 m , 0.13 m , 0.145 m ）に対して静水下での河床計測を行った。ここで、水位および河床高の原点は、水路下流端（ $x = 0 \text{ m}$ ）における初期河床高としている。また、地形を乱さないように水路内の水を長時間かけて少量ずつ排水した後に再度地形計測を実施し、ここでは排水後の計測値を実際の河床高として水面における屈折補正を検討した。水路中央

の縦断線における計測値について、水位に応じた静水下での計測値と実際の河床高との相関関係を得た。この相関関係から各水位に応じた勾配と切片を取得し、それぞれに対し回帰分析を行うことで、補正式の勾配と切片を水位の関数の形で得た。以上より、式(1)のように補正式を作成した。式(1)より得られた補正值と実際の河床高との相関係数は0.999となることを確認している。

$$GL_{dry} = (-1.059 \cdot 10^{-4} \cdot h + 1.435) \cdot GL_{water} + (-2.656 \cdot 10^{-1} \cdot h - 69.191) \quad (1)$$

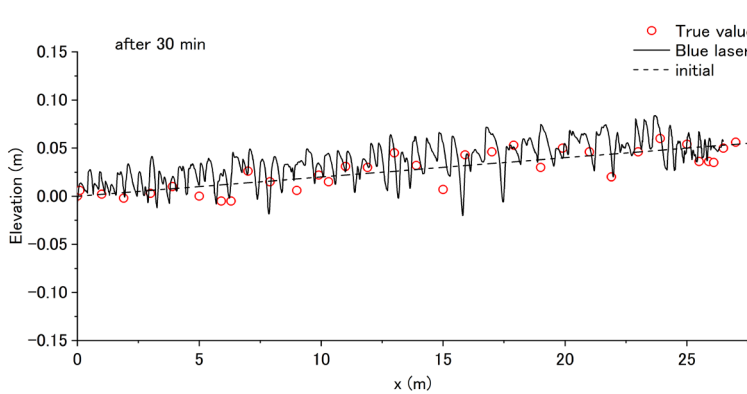
この時、 GL_{dry} ：実際の河床高（空气中で計測した時の河床高）（mm）、 h ：水位（mm）、 GL_{water} ：静水中で計測

した時の河床高（mm）である。

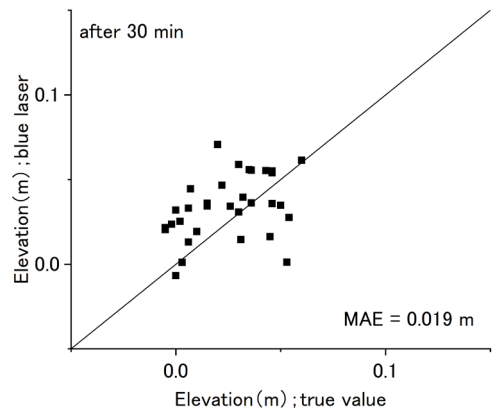
式(1)を用いて補正した河床高の例を図-3に示す。河床波は3次的に形成されており、横断方向に一様でないことが分かる。そこで、次節以降の検討において、水路左岸側面の値として図-3中の破線①上の値を、水路中央の値として図-3中の破線②上の値を用いる。

(2) 河床計測における通水停止の影響

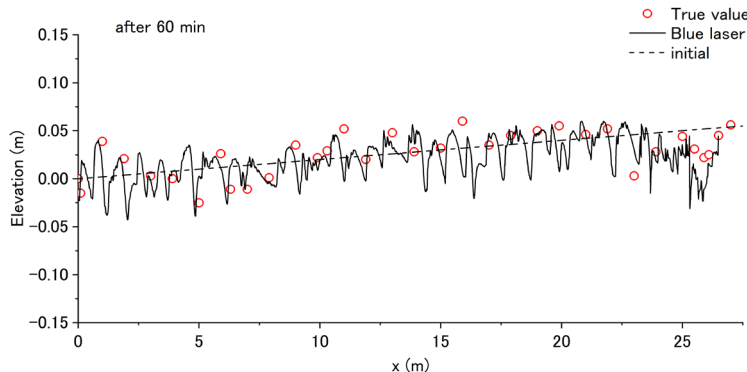
前述のとおり、河床計測時は通水中の形状をなるべく乱さないように停水させた。ここで、ケース1において通水中の目視計測から得られた河床高を真値とし、停水



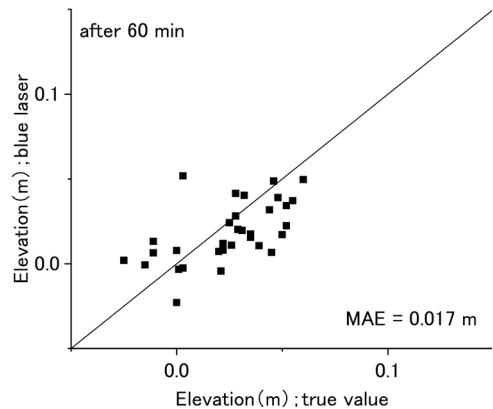
(a) 河床縦断図



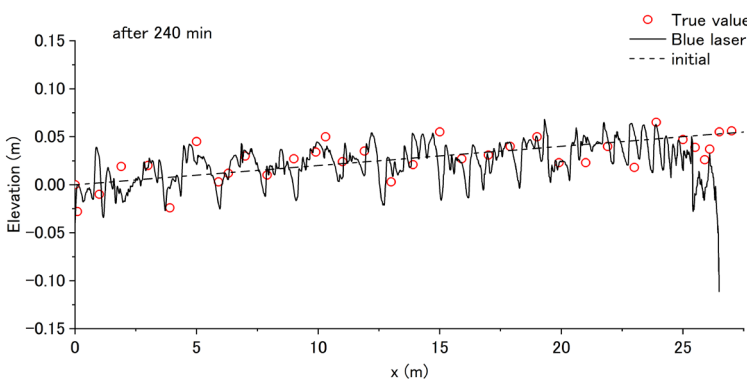
(d) 目視計測とブルーレーザ計測の誤差



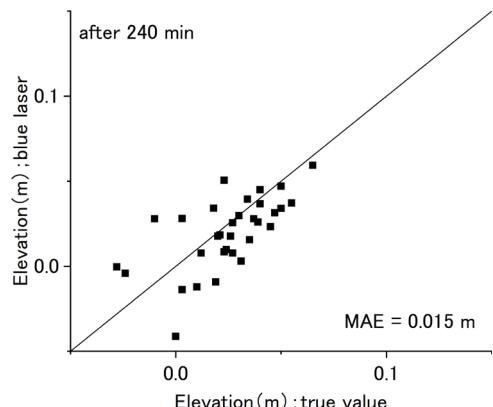
(b) 河床縦断図



(e) 目視計測とブルーレーザ計測の誤差

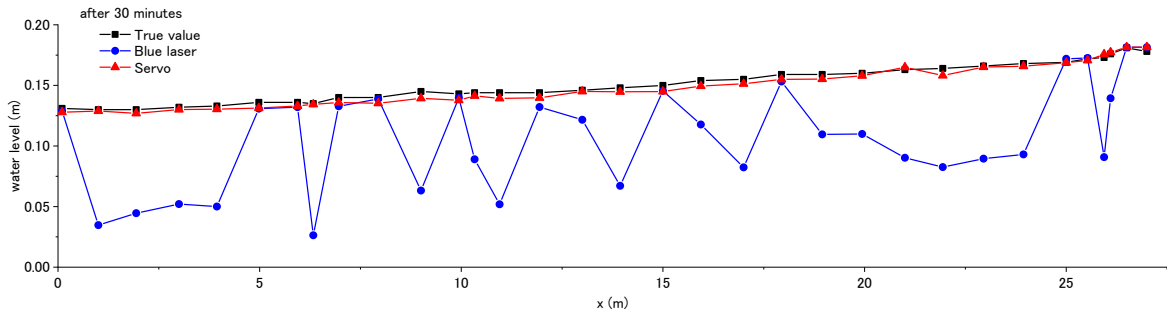


(c) 河床縦断図

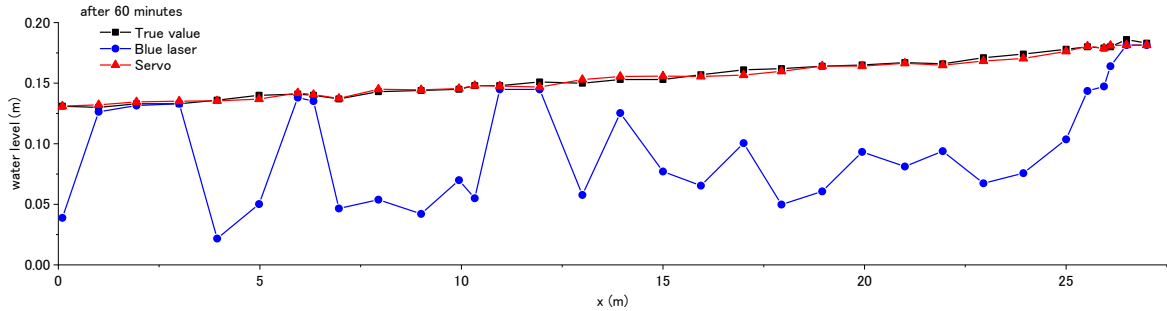


(f) 目視計測とブルーレーザ計測の誤差

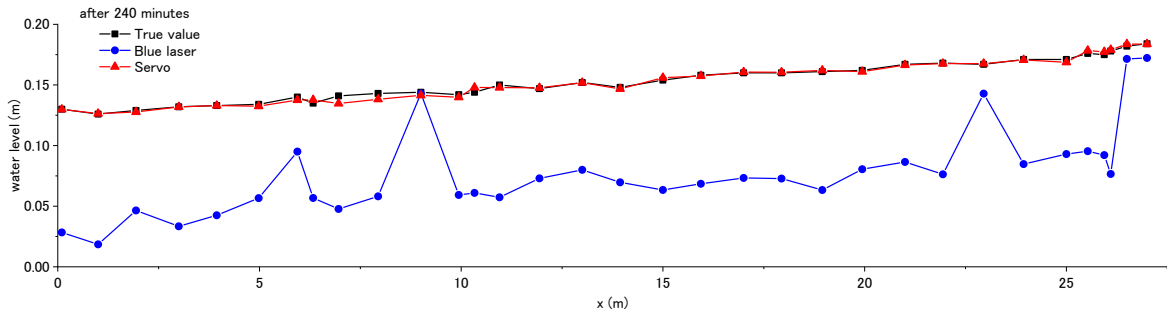
図-4 目視計測から得られた河床高とブルーレーザ計測から得られた河床高の比較（ケース1）



(a)30分後



(b)60分後



(c)240分後

図5 目視計測，ブルーレーザ計測，サーボ式水位計から得られた水面形の比較（ケース1）

後にブルーレーザで計測した河床高との比較を示す。本節での比較は、目視計測から得られた水路左岸側面における河床高とブルーレーザ計測から得られた水路左岸側面における河床高を用いたものである。

図4 (a)～(c)にケース1における通水30分後，通水60分後，通水240分後における通水中の目視計測から得られた水路左岸側面における河床高（図中の True value）と停水後のブルーレーザ計測から得られた水路左岸側面における河床高（図中の Blue laser）を示す。ブルーレーザは河床の全体的な傾向のみならず河床波スケールの起伏や，河床波スケール以下の起伏まで密に計測できることが分かる。目視計測と比較すると，河床高の傾向は概ね捉えていることが分かる。

図4 (d)～(f)に目視計測とブルーレーザ計測の平均絶対誤差 MAE を示す。ここで，MAE は以下の式より求めて

いる。

$$MAE = \frac{\sum |(Blue\ laser\ (m)) - (True\ value\ (m))|}{(データの総数 = 34)} \quad (2)$$

MAE は，30分後において 0.019m，60分後において 0.017m，240分後において 0.015m であり，後述する河床波の平均波高よりは小さい値となつてはいるが，平均波高に近い誤差スケールとなっている。前節で検討した静水下での計測において，ここまで大きい誤差が計測によって生じることは考えにくく，目視計測から完全に停水するまでの間に河床波が流下するなどして河床が若干変化していると考えられる。しかし，例えば，通水30分後の河床波の形状特性に着目すると，停水前に水路左岸側面から撮影した画像（8台のカメラを用いて全延長を撮影）を用いて抽出した砂堆の平均波長は 0.45m，平均波高は

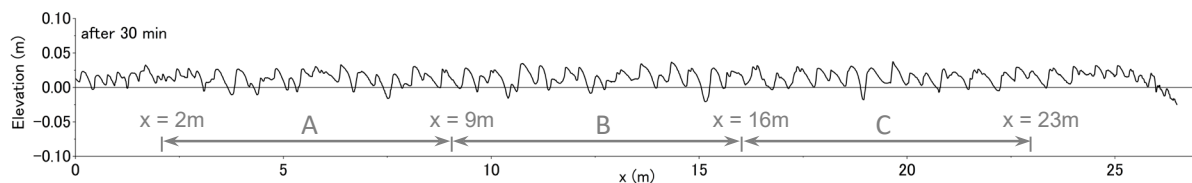
0.034 m であり、ブルーレーザ計測値から得られた水路左岸側面の縦断線上の河床形状から抽出した砂堆の平均波長は 0.44m、平均波高は 0.038m とほぼ一致している。このことから、停水による影響を完全には排除できないものの、本実験では河床波の波長や波高を乱すことなく停水が実施できていると判断した。

(3) 水面形計測の試行

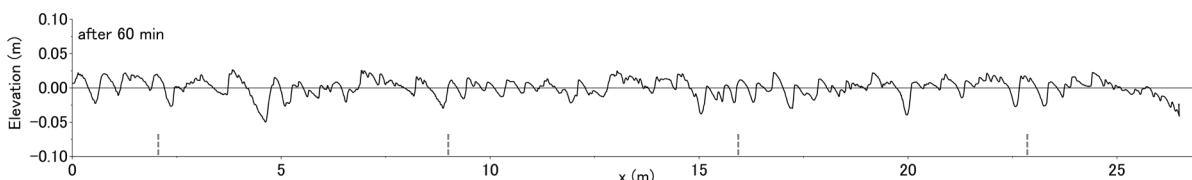
目視計測から得られた水面形を真値とし、ブルーレー

ザを用いた水面形計測とサーボ式水位計を用いた水面形計測の精度を検証した。図-5(a)~(c)にケース 1 の通水 30 分後、通水 60 分後、通水 240 分後における目視計測から得られた水路左岸側面における水面形、ブルーレーザ計測から得られた水路左岸側面における水面形、サーボ式水位計から得られた水路中央における水面形を示す。

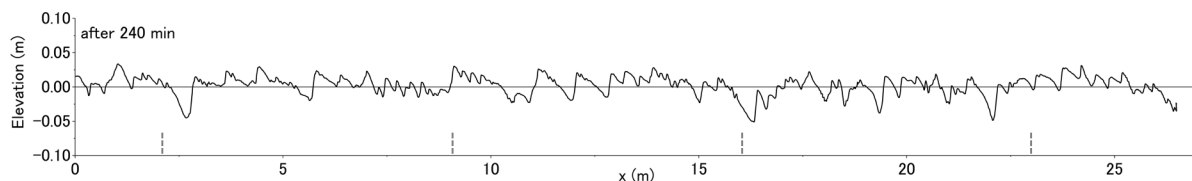
サーボ式水位計で得られた水位は目視計測から得られた水位と縦断的にほぼ一致した。したがって、架台に取り付けたサーボ式水位計をトリガーと同期させつつ移動



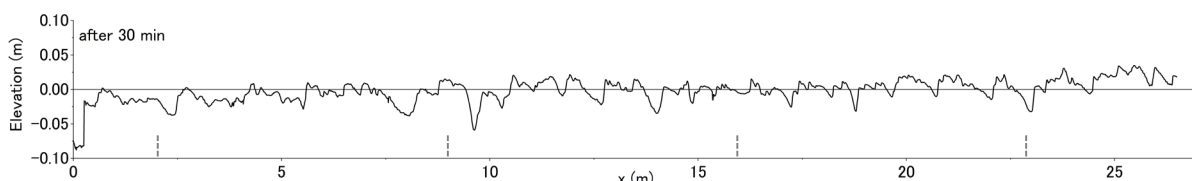
(a) ケース 1 せき上げ 30分後



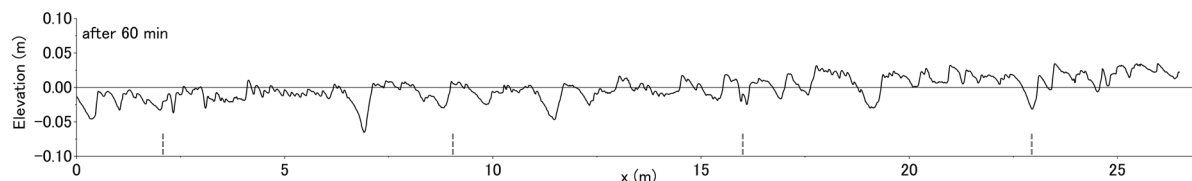
(b) ケース 1 せき上げ 60分後



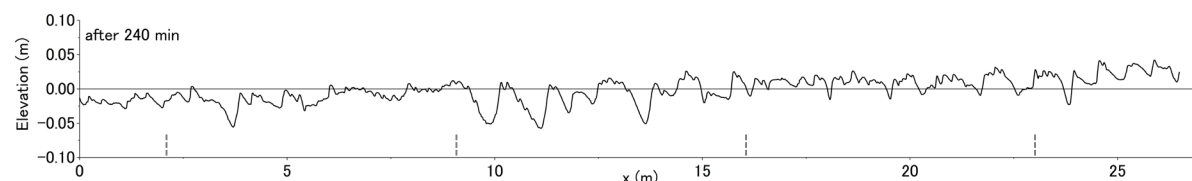
(c) ケース 1 せき上げ 240分後



(d) ケース 2 低下背水 30分後



(e) ケース 2 低下背水 60分後



(f) ケース 2 低下背水 240分後

図-6 初期河床を基準とする河床縦断形 (ブルーレーザ)

させることで、1 側線の水面形を通水中に精度よく計測できることが分かった。一方で、ブルーレーザで得られた水位は目視計測から得られた水位とよく一致するものと大きく外れるものに分かれた。2 章 2 節で先述したように、通水中においては砂堆のクレストから浮遊砂が生じており、水面を透過したレーザが浮遊砂層や河床面で反射したためと考えられる。

4. 河床波の時空間的な発達

(1) ケース 1 せき上げ

ケース 1 における初期河床を基準とする河床縦断形を 図-6 (a)~(c) に示す。ここで初期河床を基準とする河床縦断形とは各時間における水路中央での河床高から初期の河床高を引いた値である。ケース 1 においては水路全域で河床波が形成され、通水 30 分後には平均波長 0.48 m、平均波高 0.030 m、通水 60 分後には平均波長 0.66 m、平均波高 0.038 m、通水 240 分後には平均波長 0.61 m、平均波高 0.035 m であり、時間とともに河床波が発達し、維持されることがわかる。また、 図-6 中に示したように $x=2\text{m}\sim 23\text{m}$ の延長を 3 つに区分し、各区分における河床波の平均波高と平均波長の時間変化を 図-7 (a) に示す。また、 図-8 (a) にケース 1 の各時間における水路中央での河床高縦断形状と水位縦断形状を示す。図には初期水位と初期河床高を黒実線で示している。なお、初期水位は不等流計算から得られた水面形とした。 図-8 (a) の初期水位をみると、下流端水位を堰上げている影響が上流側の C 区分にも及んでおり、区分 B、A と下流ほどその影響は大きくなり、下流ほど流速が低下することになる。 図-7 (a) をみると、通水 30 分後は A-C 区分全体において

平均波長が約 0.5m、平均波高が 0.03m となっている。その後、波長が全体的に増大している。60 分後には、B および C 区分で平均波長は 0.6m と若干増加し、下流側 A 区分では平均波長は約 0.8m まで比較的大きく増大している。240 分後には、A 区分で波長が減少し、A-C 区分において平均波長が約 0.5~0.6m となり全体的に同程度の値となっている。波高についても、60 分後に A 区分で平均波高が 0.05m 近くまで比較的大きく増大したものの、240 分後には A-C 区分において平均波高が約 0.3~0.4m となり全体的に同程度の値となっている。このように下流側の A 区分で波高と波長の値が時間的に比較的大きく変動しているものの、240 分後には、どの区分でも同じような波高と波長の河床波が形成されていることがわかる。

河床波のスケールは水深スケールに支配されることが知られており、波長は水深の約 5 倍になると言われている¹⁰⁾。また、波高と波長の比で表される波形勾配について従来提案されている推定式¹¹⁾に本実験条件下を適用すると、最大波形勾配 (波高/波長) は 0.049 となり、波長が水深の約 5 倍とすると、波高は水深の約 0.25 倍になることが推定される。本実験のような背水区分では、場所によって水深が異なるためこの水深を基準とすればよいか明確ではないが、例えば $x=10\text{m}$ 地点での初期水深 0.109m を基準とすると、 図-7 (a) に示される波高は水深の約 3 割、波長は水深の約 5~6 倍で推移しており上記の従来の知見に符号する。

図-8 (a) の河床高縦断形状と水位縦断形状において、先に示した区分 C の最上流端である $x=23.0\text{m}$ 地点における水位上昇に着目すると、初期水位 0.145 m に対し、30 分後の水位は 0.165 m (初期の水深の 19.1% 上昇)、60 分後の水位は 0.168m (初期の水深の 22.2% 上昇)、

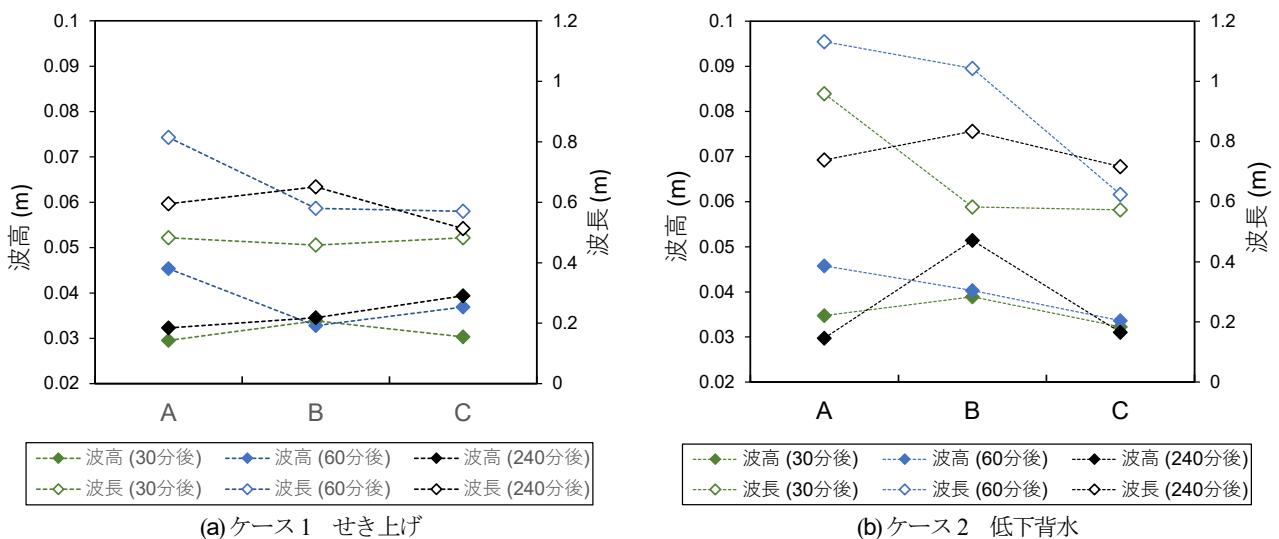
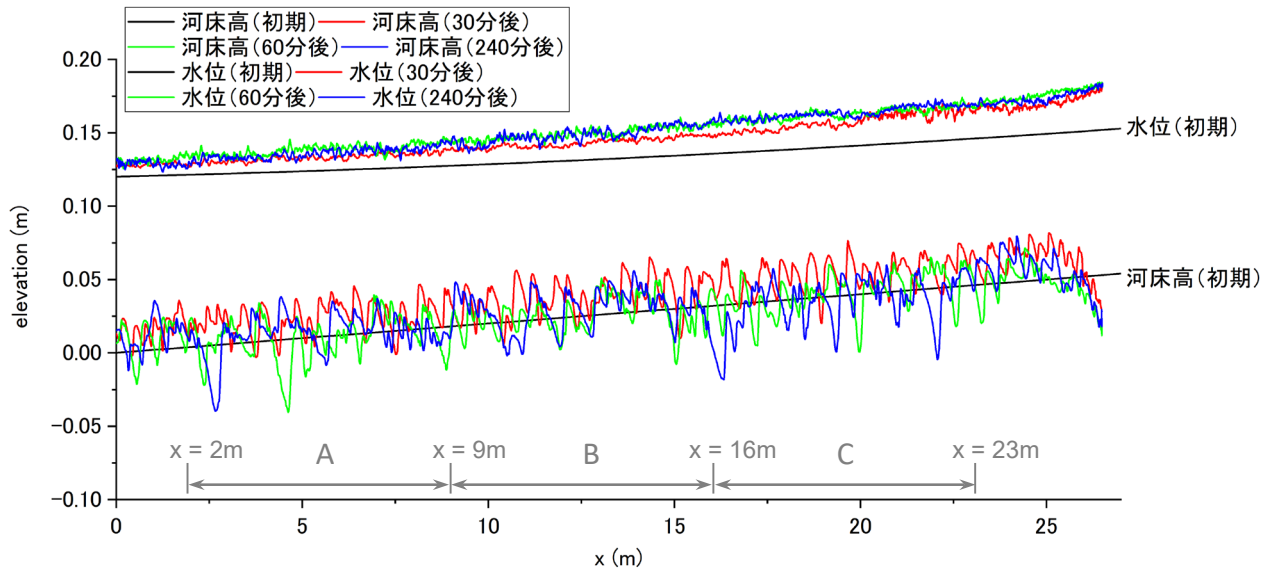
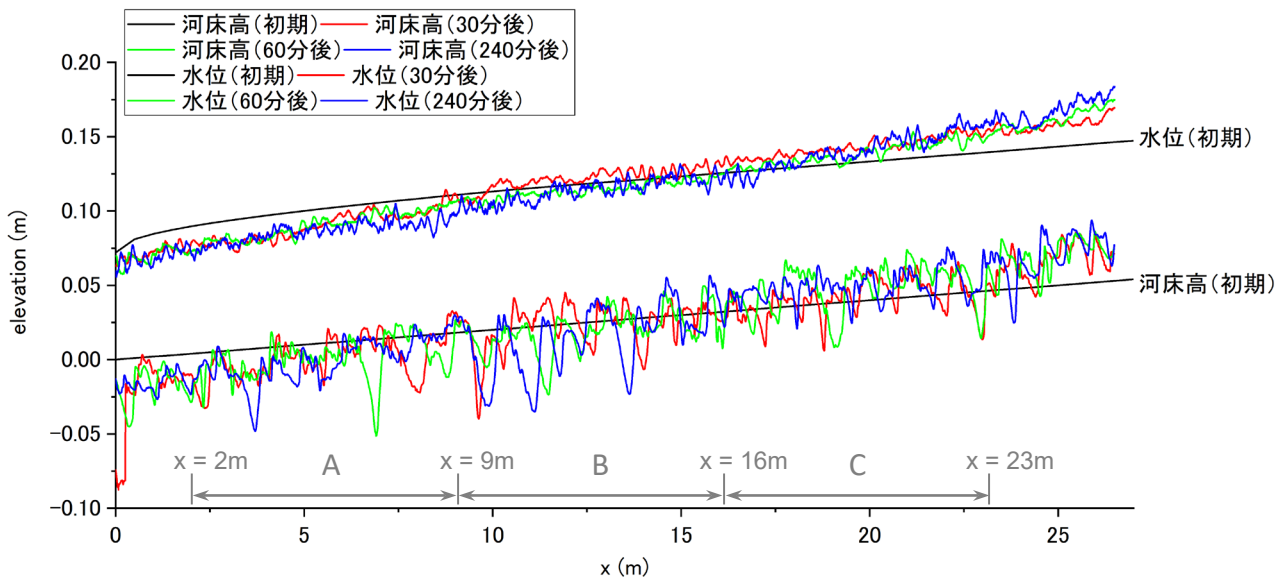


図-7 各区分における河床波の波高と波長の時間変化



(a) ケース 1 せき上げ



(b) ケース 2 低下背水

図-8 河床高（ブルーレーザ）と水位（サーボ式水位計）の時間変化

240 分後の水位は 0.170 m（初期の水深の 24.10 %上昇）であり、河床波の発達に伴い水位も上昇傾向にあることがわかる。また、水路の上流側でより水位が上昇していることがわかる。これは、水路内は河床波の発達により水位が上昇するのに対して下流端では水位が規定されているためである。上流側での河床波の発達に伴い水位が上昇することで、水面勾配が増加し、通水初期におけるせき上げ排水の影響が解消されていく傾向にあることが分かる。これより、水路のどの区間でも同じような波高と波長の河床波が形成されたと推察される。

図-8の計測値を用いて、無次元せん断力 τ^* と無次元

有効掃流力 τ^* を次式²⁾に従って算出した（図-9(a））。

$$\tau_* = \frac{RI}{sd} \quad (3a)$$

$$\frac{v}{u_*} = 7.66 \left(\frac{R}{k_s} \right)^{1/6} \left(\frac{\tau_*'}{\tau_*} \right)^{2/3} \quad (3b)$$

ここで、 R は径深、 I はエネルギー勾配、 s は砂の水中比重、 d は粒径、 v は平均流速、 u_* は摩擦速度、 k_s は平坦河床における粗度高さであり、 $k_s=2d$ とした。この時、計測値（水位と河床高）を縦断方向に 1m 間隔平均化した値を用いて、水面勾配と速度水頭からエネルギー勾配を求めてせん断力と有効掃流力の算定に適用している。

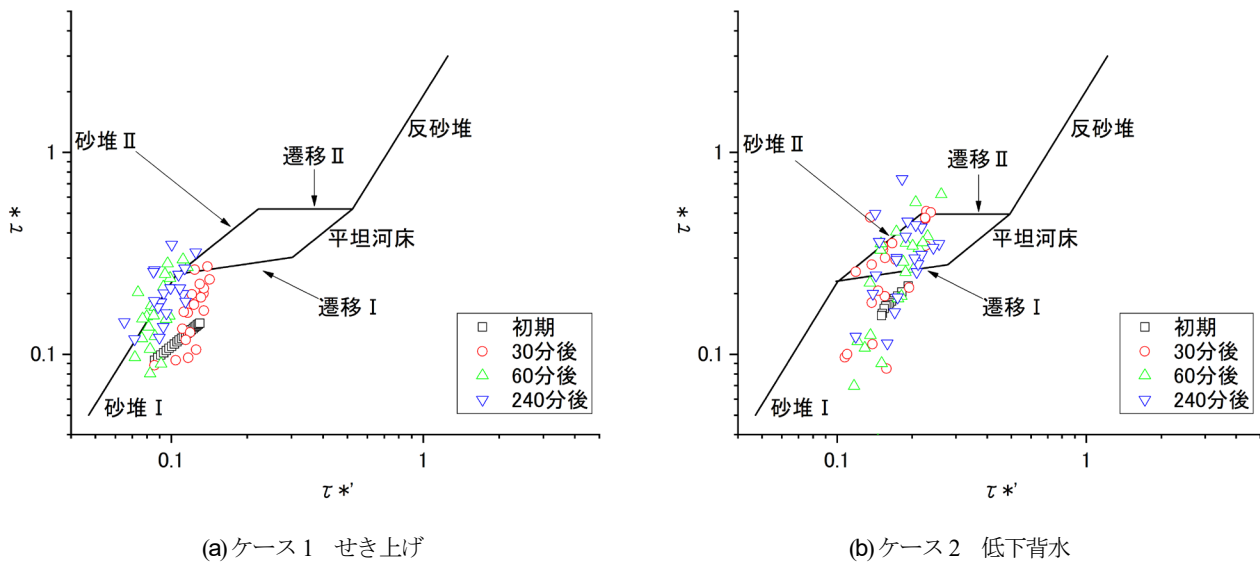


図-9 河床剪断力 τ^* と粒子剪断力 τ^*_{2} との関係²⁾

ここでは平坦河床における粗度高さを $2d$ としているが、図-9 をみると無次元全せん断力が無次元有効掃流力よりも小さいデータが散見され、平坦河床における粗度高さがもう少し小さい可能性がある。しかし、下流側の水位が高い影響を受けて水位が決まるような場（水面勾配が非常に小さくなるような場合）の全せん断力は著しく低下することもあり、本実験では局所的にそのような場がある可能性もあるため、実験データから平坦河床における粗度高さを同定することは難しく、ここで用いた粗度高さの値についてはまだ精査する余地がある点には留意すべきと考えている。しかし、仮に平坦河床における粗度高さを $2d$ から d へ小さくすると、無次元有効掃流力 τ^* の値は約 0.8 倍となるが、図-9 に示される以下の傾向には大きな影響はないと考えている。

図-9 (a) をみると、通水 30 分後において、全せん断力が有効掃流力と比較的一致する領域から、河床波の領域へ近づいているのがわかる。また、通水 60 分後以降は、全体的に砂堆 I の線周辺にプロットされている。従って、ケース 1 でみられた河床波は砂堆 I に分類され、その抵抗則に従っていることから、確認された水位上昇はこの河床波の発達によるものであったことがわかる。

(2) ケース 2 低下背水

ケース 2 における初期河床を基準とする河床縦断形を図-6(d)~(f) に示す。通水 30 分後には平均波長 0.69 m、平均波高 0.035 m、通水 60 分後には平均波長 0.78 m、平均波高 0.037 m、通水 240 分後には平均波長 0.803 m、平均波高 0.036 m であった。図-7 (b) に各区分における河床波の平均波高と平均波長の時間変化を示す。また、図-8 (b) にケース 2 の各時間における水路中央での河床高縦断形

状と水位縦断形状を示す。図には初期水位と初期河床高を黒実線で示している。なお、初期水位は不等流計算から得られた水面形とした。図-8 (b) の初期水位をみると、 $x = 10\text{m}$ より下流の範囲で低下背水の影響が現れることになる。つまり、A 区間は初期水位における低下背水区間に該当し、B 区間は主に背水区間直上流に位置することになる。図-7 (b) をみると、平均波長が全体的にケース 1 よりも大きくなっており、特に下流側の区間で波長が大きくなっている傾向がわかる。波高をみると、A および C 区間では平均波高がケース 1 と同程度となっているのに対して、B 区間では平均波高がケース 1 と比べて大きくなっていることがわかる。 $x = 10\text{m}$ 地点での初期水深 0.093 m と比べると、波高は全区間の平均値であれば水深の約 3 割となるが、B 区間の通水 240 分後の平均波高は水深の 5.6 割にもおよび、水深に対して非常に大きな河床波形状が発達していたことがわかる。波長については特に A 区間において平均値が水深の約 9~10 倍と比較的大きくなっているのがわかる。また、ケース 1 では水路全体に同じような波高と波長の河床波が形成されていたが、ケース 2 では、B 区間で非常に大きな波高がみられる一方で C 区間では波高も波長も比較的小さいというように縦断的な特徴が地点によって異なっていることがわかる。

図-8 (b) に示した河床高縦断形状と水位縦断形状において、先に示した区間 C の最上流端である $x = 23.0\text{m}$ 地点における水位上昇に着目すると、初期水位 0.093 m に対し、30 分後の水位は 0.150 m（初期の水深の 11.4% 上昇）、60 分後の水位は 0.146 m（初期の水深の 6.9% 上昇）、240 分後の水位は 0.156 m（初期の水深の 17.6% 上昇）である。図-8 (b) をみると、ケース 1 と同様に水路の

上流側でより水位が上昇しており、水面勾配が初期よりも大きくなっている。ケース 1 ではせき上げの影響が打ち消される方向に働いたが、ケース 2 では低下背水の影響が助長されることになる。

図-8(b)に示したケース2の計測値を用いて算出した無次元全せん断力 τ^* と無次元有効掃流力 τ^* を図-9(b)に示す。せき上げのケース 1 と比較すると、ケース 1 では通水 30 分後はまだ初期値に近い値になっていたのに対して、ケース 2 では通水 30 分後に既に砂堆Ⅱに分類される河床波の発達を確認でき、比較的急速に河床波が発達し河床波による水位上昇が生じていたことが示された。また、全体的に有効掃流力が大きい方向にシフトしており、多くの区間が砂堆河床Ⅱと遷移河床Ⅰの領域にプロットされている。したがって、ケース 2 においては砂堆Ⅱと遷移河床が現れる状況が混在していたことがわかる。図-7(b)において下流側の A 区間で波長が長くなったり、通水 240 分後に波高が小さくなったのは、遷移河床が現れていたためと考えられる。

以上から、ケース 2 において次のような河床波発達特性が明らかとなった。初期水位において低下背水区間 (A) では遷移河床が現れやすい。これに対して、直上流側の区間 (B) では比較的急速に河床波が発達し、通水 240 分後にはこの区間の平均波高が水深の 5.6 割となるような大きな河床波が形成された。このことから、低下背水へ向かう流況下において河床波の発達が促進されることが示された。

流下方向に一樣に河床波が発達して一樣に水位が上昇するような状況であれば、河床波の発達に伴って形状抵抗が増大して流速が低下するため、有効掃流力が低下することになる。つまり、河床波が発達すると河床を移動する土砂量は減少することになる。これに対して、本ケースのように下流側の水位が低く規定されている場合、その上流側の区間 (B 区間) においては、河床波の抵抗で水位が上昇すると水面勾配がより大きくなる。このため、河床波が発達しても、流速や有効掃流力がケース 1 よりも大きく維持され、河床を移動する土砂量は減少せずに活発な土砂移動の状況が維持される。このことが河床波の発達を促進させる要因の一つではないかと考えられる。また、この B 区間は、低下背水に向かって平均流速が流下方向に加速していく箇所であり、本実験結果は、平均流速が加速していく流況下において河床波の発達が促進される現象があることを示すものである。平均流速が加速または減速する過程における河床波の発達について、その物理的機構の解明は今後の課題である。

5. 結論

本研究は下流端水位の異なる場での小規模河床波の発

達状況とその影響で起こり得る水位縦断形状の特性を把握することを目的とする水理実験を実施した。

通水中の河床形状を断続的に把握するために、ブルーレーザを用いて非接触で水中の河床計測を実施したが、通水中は浮遊砂等の影響で河床形状の観測が難しかったため、一時的に停水して河床形状を計測した。この時、通水中の河床形状を維持するために、湛水した状態のまま計測を実施することによって、河床形状の時間変化を観測することができた。

下流端水位が高く通水開始時の水面形がせき上げしているケースでは、通水中は水路全区間において河床波が発達した。この時、河床波の形状抵抗に伴い水路内の水位が上昇することによって水面勾配が大きくなり、せき上げの水面形状が解消される傾向がみられた。

一方で、下流端水位が低く通水開始時の水面形が低下背水のケースでは、水面形が低下背水となる直上流の区間において急速に河床波が発達し、河床波の波高も大きく発達する現象が見られた。このことから、低下背水へ向かう流況下、つまり、平均流速が加速していく流況下において河床波の発達が促進される現象が示された。

参考文献

- 1) Engelund, F.: Hydraulic Resistance of Alluvial Streams, *Journal of the Hydraulics Division*, Vol. 92, Issue 2, pp. 315-326, 1966.
- 2) 岸力, 黒木幹男: 移動床流における河床形状と流体抵抗 (I), 北海道大学工学部研究報告, 第 67 号, pp.1-23, 1973.
- 3) Giri, S., Shimizu, Y.: Numerical computation of sand dune migration with freesurface flow, *Water Resources Research*, Vol. 42, W10422, 2006.
- 4) 岡村誠司, 福岡捷二: 利根川河口区間における河床波の形成・発達・消滅過程と洪水時の河床波抵抗の評価, *土木学会論文集 B1 (水工学)*, 69(2), 83-100, 2013.
- 5) 吉川泰弘, 渡邊康玄: 1 次元不定流混合粒径河床変動計算におけるマンシングの粗度係数と交換層厚の検討, *寒地土木研究所月報*, No.662, 2008.
- 6) 伊波友生, 吉川泰弘, 山口里実, 五十嵐晃之: 本川の水位変動を考慮した支川の小規模河床波の発達と水位上昇に関する研究-小規模河床波の発達に対する下流端水位の影響-, 第 27 卷, pp.487-492, 2021.
- 7) 橘田隆史, 萬矢敦啓, 小関博司, 吉川世里子, 岡田将治, 工藤俊: 流況河床高同時観測システムの構築と観測から得られた河床波の挙動, *土木学会論文集 B1 (水工学)*, 73(4), I_535-I_540, 2017.
- 8) 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)*, 70.2: I_841-I_850, 2014.
- 9) 星野剛, 安田浩保, 利根川明弘: 動的な光切断法を用いた河床波形成過程における水面・水底面の幾何学形状の計測, *土木学会論文集 B1 (水工学)*, 2016, 72.4: I_883-I_888, 2016.
- 10) Yalin, M.S., "Geological Properties of Sand Waves," *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol.90, No.HY5.,

- 11) Yalin, M.S. and Karahan, E.: Steepness of sedimentary dunes, Jour. Hydraulics Division, ASCE, Vol.105,

(Received June 18, 2021)
(Accepted November 30, 2021)

FLUME EXPERIMENTS TO STUDY THE DEVELOPMENT PROCESS OF SAND WAVES IN THE BACKWATER SECTION

Yu INAMI, Tomoko KYUKA, Satomi YAMAGUCHI and Yasuhiro YOSHIKAWA

Flume experiments were carried out to understand the development of sand waves in response to the downstream water level and the characteristics of the longitudinal profile of the water level that may be affected by the sand waves. In addition, no-contact measurement of the riverbed below the water surface was carried out using a blue laser, and its usefulness in movable bed experiments was discussed. In the case of rise in water level, the sand waves developed in the entire channel section and the water level rose accordingly. In the case of low backwater, the riverbed waves developed and the water level rose in the same way, but there was a section downstream of the channel where the riverbed flattened without the formation of sand waves because the water level rose in the upstream section, thereby, contributing to a larger water surface gradient.