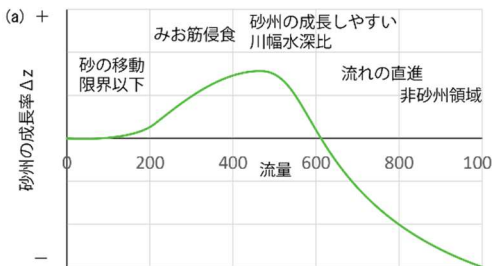
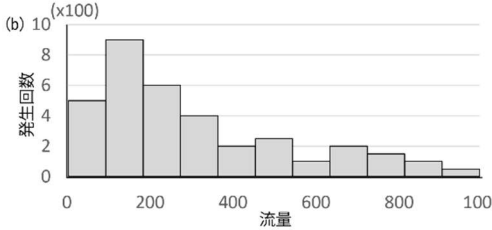
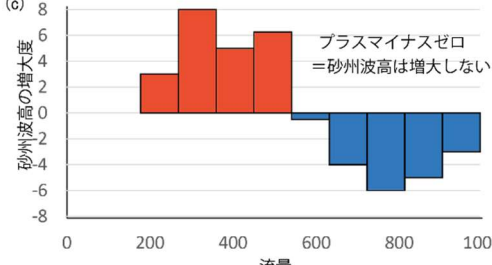


河川砂防技術研究開発【成果概要】

①研究代表者		氏 名（ふりがな）	所 属	役 職
		井上 卓也	広島大学	准教授
① 研究テーマ	名称	気候変動後の流量発生分布を考慮した砂州の波高増大・固定化リスクの評価手法の提案		
③研究経費（単位：万円） ※端数切り捨て。		令和 4年度	令和 5年度	合 計
		199 万円	399 万円	599 万円
④研究者氏名（研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。）				
氏 名		所属機関・役職（※令和 4 年3月31日現在）		
岩崎 理樹		北海道大学 准教授		
河原 能久		広島大学 名誉教授		
鳩野 美佐子		広島大学 助教		
大石 哲也		寒地土木研究所 主任研究員		
平松 裕基		寒地土木研究所 研究員		
⑤技術研究開発の目的・目標				
（背景）洪水時に形成された砂州が攪乱を受けず放置されると、やがて草木が繁茂し始める。その後、植生による土砂移動の阻害、浮遊砂の堆積、濤筋の固定・低下に伴い砂州の波高が増加すると、陸域と水域の境界はより明瞭になる。近年、この陸域と水域の分離する「二極化」が様々な問題を引き起こしている。 （目的）二極化をもたらす河川管理上の課題として、生物多様性の減少、樹木繁茂による流下能力の低下、河岸被災の増加などが挙げられる。これらへの対策を考える場合、「将来的に砂州波高が増大するか」の予測が重要となる。中小規模の洪水が何年も続けば、濤筋は低下し、砂州上に浮遊砂が堆積し、砂州の波高増大・固定化に繋がる。一方、大規模洪水が発生すれば、砂州は攪乱され波高は減少する。つまり、<u>砂州波高が増大するか否かの予測には、流量パターンの設定が重要となる</u>。しかし、数千年分のアンサンブル予測データを用い河床変動計算を行うことは、計算負荷を考えると現実的ではない。 そこで本研究は、流量規模ごとの砂州波高の成長率をあらかじめ算出し、これと将来の流量の発生分布を掛け合わせることで、<u>将来的な砂州波高の増大を判定する新たな評価方法を提案</u>する。これによって砂州波高増大などを効果的に抑制することや、対策が必要な区間を抽出することに繋がる。				
(a) +  砂州の成長率 Δz 流量 (b) (x100)  発生回数 流量 (c)  砂州波高の増大度 流量 プラスマイナスゼロ = 砂州波高は増大しない				
図 本研究で提案する評価手法のイメージ				
達成目標 1 流量と砂州波高成長率の関係の解明：流量と砂州波高の関係性について、理論、数値解析、実験を用いて分析し、砂州波高の変化を簡易的に算出する手法を提案する。				
達成目標 2 忠別川における現在及び将来の砂州増大度の算定：大量アンサンブル気候変動予測データd4PDFをもとにした流量ハイドロを用いて、現在気候及び将来気候の砂州波高変化を予測する。				
達成目標 3 対策効果の評価：ダムの有無、低水路幅を変更した場合の砂州波高の変化を上述の手法で予測し、対策効果を分析する。				

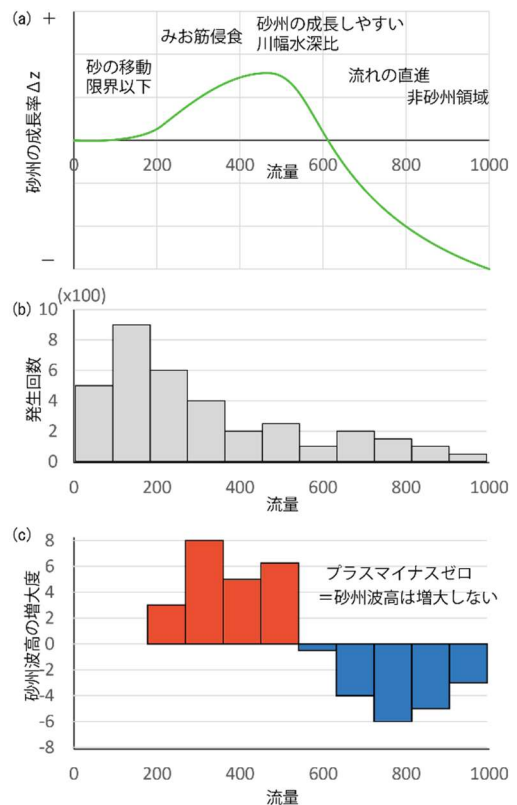


図 本研究で提案する評価手法のイメージ

⑥研究成果

1. 理論的検討：気候変動やダム建設による流量特性変化が砂州波高に与える影響について

砂州波高成長率を理論的に求めるために砂州の線形・非線形安定解析による検討を実施した。既往の理論的検討 (Colombini et al., 1987, JFM) より、川幅水深比がある臨界値以上となる条件において砂州は発生し、その条件下においてはある流量 Q に対して一つの平衡振幅を持つことがわかっている。この時、砂州振幅成長率 Ω は以下のランダウ方程式により求めることができる。

$$\Omega = \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} = \Omega_0 \left[1 - \left(\frac{A}{A_{eq}} \right)^2 \right] \quad (1.1)$$

ここに、 Ω_0 ：線形砂州成長率、 A ：対象とする砂州の振幅、 A_{eq} ：砂州の平衡振幅である。上式より、対象とする砂州振幅が小さい場合、砂州振幅の成長率は線形的な成長率と同じになるが、砂州振幅が平衡値に近づくにつれて（すなわち、 $A \rightarrow A_{eq}$ ）、振幅成長率はゼロに近づく。この考え方を利用して現地における砂州波高の増減を議論するためには、対象とする流量毎に平衡振幅 $A_{eq}(Q)$ を求めておき、それに対して現在の砂州振幅 A を入力すれば、現況砂州の流量に応じた砂州成長率を求めることができる。なお、ここで定義する振幅はサイン関数の振幅であり、最終的な砂州波高は非線形解析による波の重ね合わせにより得られる砂州形状から計算される。

砂州の線形増幅率、平衡波高を理論的に求めるためには、流れと流砂モデルに対して線形・弱非線形安定解析を行う必要がある。ここでは、Carlin et al. (2021, WRR) が開発したモデルを援用することで、忠別川条件における振幅成長率が流量毎にどの程度となるか検討した。対象区間は忠別川 KP6 (大正橋) 付近とし、平均的な河道諸量 (川幅 60 m, 粒径 55 mm, 河床勾配 1/200) を用いた。粗度については、Manning-Strickler 式を用いて粒径より推定した値を用いている。流砂形態は掃流砂のみ考え、流砂量式として Meyer-Peter and Muller 式を修正した Wong and Parker 式を用いた。また、解析における砂州のモードは交互砂州を対象とした。流量は d4PDF の現在気候、2℃上昇気候、4℃上昇気候のアンサンブル雨量データを用い、北海道開発局がダム有り無しとして整理した流量データを用いた。

ダムなしの流量を比較することで、温度条件の変化による流量の変化を把握する。温度上昇とともに再起年数 2 年の流量 Q_2 が増大していることは、発生するイベントが大規模化していることを示している。一方で、最大流量 Q_{max} の大小関係は温度に依存しているといえない。特に、2℃上昇条件では大きな流量を持つイベントが発生しなかったことが確認できる。次にダムありの流量をみると、すべての温度上昇条件において、 Q_2 は低下している。一方、 Q_{max} のカット率については差があり、現在気候の最大流量はピーク前の降雨によりダムが満杯になっているためカットが殆どできていない。

平衡波高を算出するための流量確率密度関数と砂州波高成長率を図-1 に示す。図-2 よりわかるようにダムの影響の有無による結果を比較すると、すべての温度条件においてダムあり条件の方が平衡波高は高くなる。温度上昇による結果を比較すると、ダムなし条件では温度が上昇するほど平衡波高が小さくなる。一方で、ダムあり条件では 2℃上昇が 0℃上昇より高い平衡波高を得た。これは 0℃上昇の最大イベントでダムによる流量ピークカットが十分にされていない影響と考えられる。

以上のことから、ダム放流量の増加により砂州波高を減少させられる可能性を示すことが出来た。

表-1 各ケースの条件まとめ

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
ダム	なし	なし	なし	あり	あり	あり
温度上昇 (℃)	0	2	4	0	2	4
Q_2 [m³/s]	164	180	209	143	153	172
Q_{max} [m³/s]	1833	1255	2010	1822	782	1392

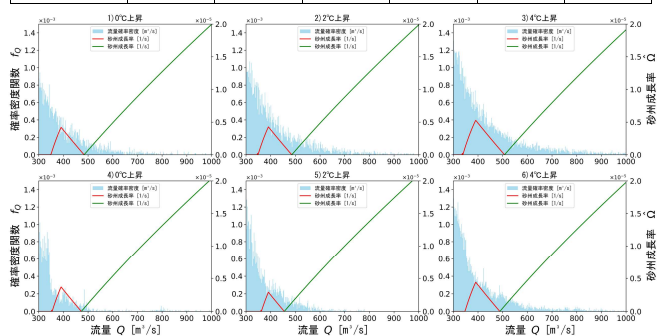


図-1 流量確率密度関数と砂州波高成長率

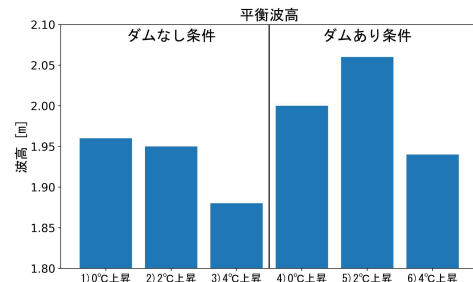


図-2 算出した平衡波高

2. 数値計算的検討

理論的検討により、気候変動及びダムの有無による砂州波高の変化を把握することができた。しかし、理論的検討では高水敷の影響が考慮できていない。そこで、高水敷を考慮した数値解析で同様の検討を行い、低水路幅の変化が砂州波高に与える影響を分析した。

(1) 計算条件

数値計算モデルには、平面二次元河床変動計算モデル iRIC Nays2DH を採用した。計算水路は忠別川の KP6 付近を模擬した延長 5000m の直線水路であり、格子サイズは縦 5 m×横 5 m とした。河床勾配は 1/200、河床材料は 55 mm の均一粒径とし、上下流端の境界条件は周期境界条件とした。粗度は計画粗度 0.034 とし、流砂量式は芦田・道上の式を用いた。水路幅は、低水路 40m に左右高水敷を 70m 加えたケース、低水路 60m に左右高水敷を 60m 加えたケース、低水路 80m に左右高水敷を 50m 加えたケースの 3 ケースとした。複断面ケースの河岸高は 2.5 m とし、河岸勾配は 1/2 とした。初期河床は低水路も高水敷も平坦河床とし、河床変動は低水路のみ許容した。また、低水路には粒径スケールのランダムな微小擾乱を与えた。流量は 100, 150, 200, 300, 400, 500, 750, 1000, 1200, 1500, 1800, 2200 m³/s の 12 ケース、低水路 40m では流量 550 m³/s を追加した 13 ケースとし、平衡砂州波高に達するまでの 200 時間の計算を行った。

(2) 平衡砂州波高

図-3 に示すように、低水路幅の増加に伴い平衡砂州波高の最大値をとる流量が大きくなる。また、川幅 40m では流量 750m³/s 以上、川幅 60m では流量 2200m³/s 以上で砂州波高が 0 になっている。これは非砂州領域に入るためである。なお、川幅 80m では 2200m³/s でも非砂州領域に入らない。高水敷がある場合、750m³/s 以上で高水敷に水が冠水し、水深の増加が抑制される。この結果、短断面に比べ流量増加による平衡波高の減少と非砂州領域への遷移が発生しづらくなる。

現況低水路幅程度である 80m において平衡砂州波高の最大値は 3.5～4.0m である。忠別川当該区間における、ALB データによる実測波高は 4.8m であることから、数値解析最大値との差 1m 程度が植生による流砂トラップ及び河道平面形状の影響と考えられる。

(3) 波高成長率と波高推定式の算出

数値解析検討において、波高の簡易推定は以下の式を用いて行う。

$$H_b^{t+\Delta t} = H_b^t + GH_{be}\Delta t \quad (2.1)$$

ここで、 H_{be} は現時刻 t の砂州波高、 $H_b^{t+\Delta t}$ は Δt 秒後の砂州波高、 G は無次元砂州波高の成長率である。砂州波高成長率 G は式(1.1)と同様に以下の式で与える。

$$G = G_0 \left[1 - \left(\frac{H_b}{H_{be}} \right)^2 \right] \quad (2.2)$$

ここで、 G_0 は砂州成長率を表すモデル係数である。 G_0 は数値解析結果に推定式がフィットするように試行錯誤的に求める。図-4 に示すように、川幅の増加に伴い成長率係数の値が大きくなる。これは川幅水深比が増加することにより砂州の成長速度が大きくなるためと考えられる。

(4) 数値解析と本評価手法の比較

図-5 に示すのが、本評価手法を用いた現在気候及び 4 度上昇ダムなしシナリオの流量データにおける砂州波高変動予測の結果である。これによると低水路幅 40m では現在気候にくらべ+4 度シナリオでは砂州のフラッシュ回数が大きく増加する。低水路幅 60m では、現在気候より+4 度シナリ

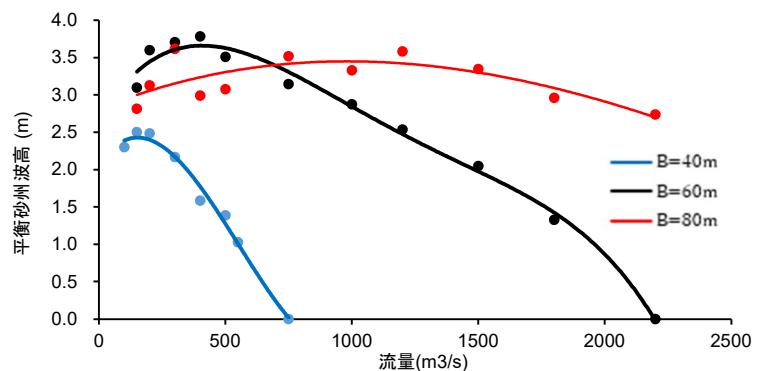


図-3 流量・低水路幅と平衡砂州波高の関係

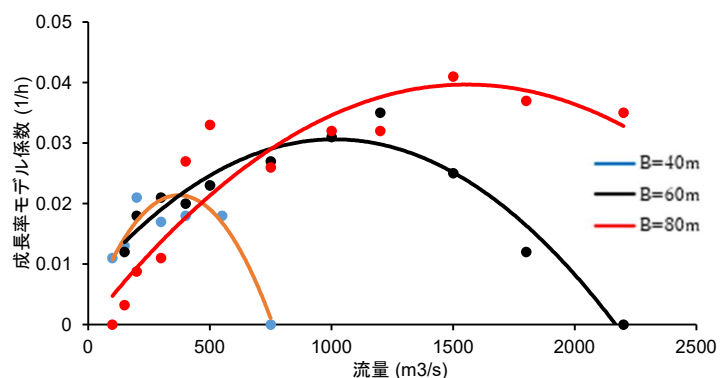


図-4 流量・低水路幅と砂州成長率係数の関係

オでは砂州のフラッシュ回数は増えるが、3.5m を超える高い砂州波高の期間が多い。現況幅程度である低水路幅 80m では現在気候、+4 度シナリオともにフラッシュは発生しない。このように本評価手法を用いることで、大量の流量データに対する砂州波高変動予測を少ない計算コストで行うことができる。

現在気候において、10 年に一度の洪水における砂州波高変動高は、幅 80m で 1cm、幅 60m で 1.9cm、幅 80m で 18 cm であるのに対し、4 度上昇シナリオでは幅 80m で 2.5cm、幅 60m で 5cm、幅 80m で 45 cm の砂州高変動が期待できる。

次に、砂州変動高に対する樹木のフラッシュ率を用いるために永多らが提案したヤナギの消長モデルにおいて、低水路内におけるヤナギの繁茂率と洪水時の砂州変動高の関係を調査した。永多らのモデルは北海道内のヤナギの調査から、樹齢、根の長さ、樹木の密度の関係を調査し、平面 2 次元河床変動計算と合わせて、根の長さ以上の河床変動があった範囲の樹木が流出し、平水流量時に水没していない範囲でヤナギが成長するとしている。このモデルに、上述の忠別川の河道条件と様々な流量ハイドロを与え、得られた砂州変動高と洪水後の樹木繁茂率を分析した（図-6）。

図-6 に示すように洪水時の砂州波高変動がほぼ 0 の場合、低水路内の 50~60% が樹木に覆われる。これは現在の忠別川の樹木存在率と概ね一致している。一方、低水路の内の砂州波高変動高が 50cm を超えると洪水後に低水路内の樹木はほぼ流出する。これは砂州全体において、河床変動高が根の深さを超えるためである。なお、図中の点線は対数近似曲線である。これを 4 度上昇時の砂州波高変動高と照らし合わせると、40m 幅であれば 10 年 1 度に約 90%、60m 幅であれば約 38%、80m 幅であれば約 22%の樹木流出が期待できる。既往文献調査によると樹木が浮遊砂のトラップに大きく寄与し始めるのは成木（樹高 5m 以上、樹齢約 10 年）と考えられる。

以上のことから、砂州波高増大及び樹林化の抑制には低水路幅を 40m にするのが効果的であるが、現在 80m の低水路幅を 40m にすると、上下流の土砂供給バランスが崩れ、河床低下が進行するおそれがある。まずは低水路幅を 60m とし、モニタリングを実施するのが実務的と考える。

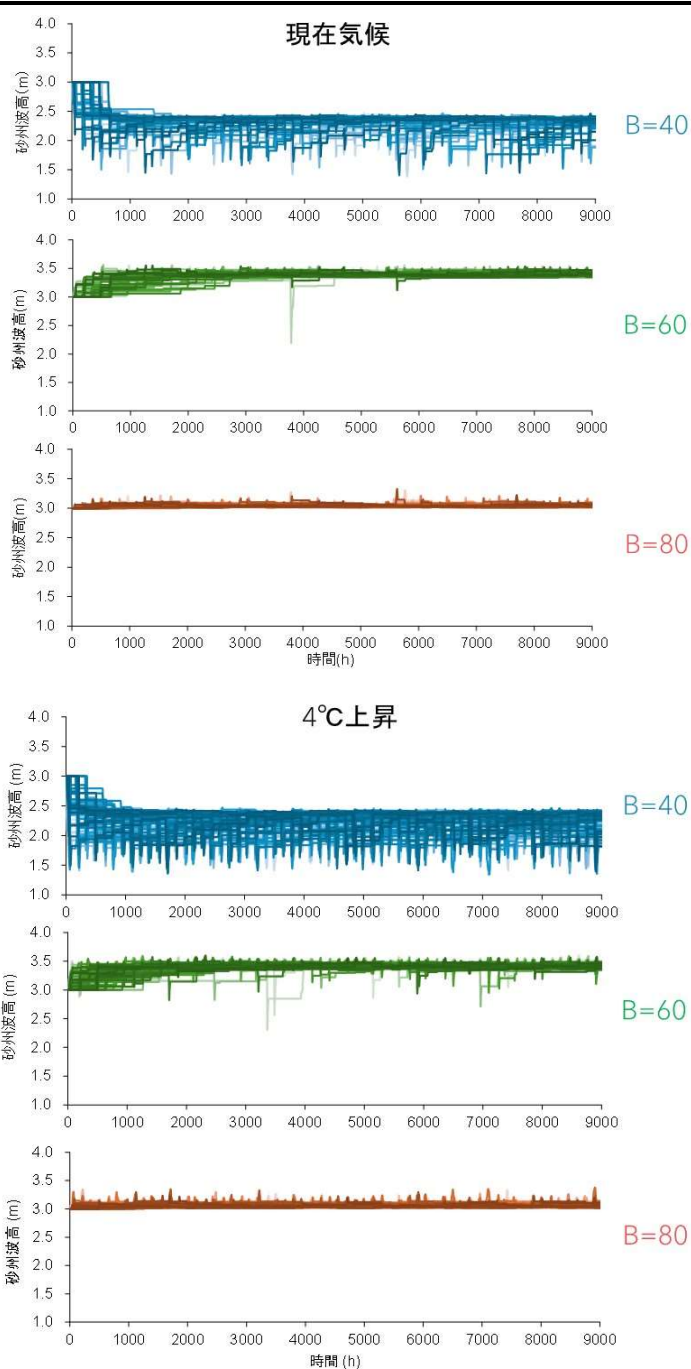


図-5 気候変動シナリオ、低水路幅別の砂州波高の時間変化

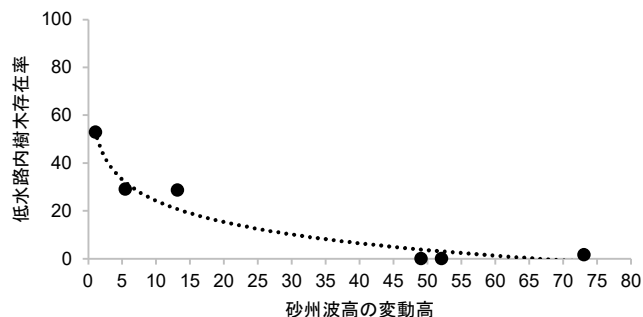


図-6 砂州波高の変動高と洪水後の樹木存在率の関係

3. 実験的検討

忠別川は全川の低水護岸が整備されているわけではなく、自然河岸の箇所も残されている。河岸侵食は、前述の理論解析では考慮できず、数値解析でも正確な再現が難しい現象である。そこで移動床実験により砂州波高の変化について分析を行った。

3. 1 実験概要

実験には、移動床区間の長さが 40 m、幅 0.90 m、勾配 1/200 の開水路を用いた。水路内には、粒径が 0.77 mm の東北硅砂 4 号を敷き詰めた。初期河床は図-7 に示すように、高水敷と低水路を設け、低水路内には初期状態で砂州形状を作成した。

表-2 は実験条件を示したものであり、流量は 2000~4000 cm³/s の 3 パターン、初期の砂州波高は 1.5~4.5 cm の 3 パターンの計 9 ケースの実験を行った。なお、各実験条件の設定は、実河川（土砂供給の減少による滞筋低下と樹林化などにより二極化が進行した区間）の 1/150 程度の縮尺を参考に設定した。通水は、侵食位置が水路側壁に到達するまで継続した。通水終了後には、3D スキャナ（STONEX 社製）を用いて河床高を計測した。

3. 2 結果と考察

3D スキャナにより計測された地形計測データを用いて、通水後の砂州波高を算出した。図-8a はケース毎の砂州波高を示したものである。この図を見ると、砂州波高は流量及び初期砂州波高の違いの影響をほとんど受けていないことがわかる。このように、実験を通じて得られた傾向は、数値解析や理論的検討によるものと異なる。

この主たる要因は、実験では河岸侵食が生じるといった条件に設定しているためと推察している。これを検証するため、通水終了直前の平均的な水面幅を調べてみると、流量が 2000、3000、4000 cm³/s のそれぞれで 63、64、68 cm 程度であった。このように、流量を大きな条件に設定しても、河岸が侵食されるにつれて水面幅が大きくなったことによって、低水路内の掃流力が数値解析等比べて大きくならなかったものと考えられる。また河岸侵食によって発生した土砂の供給が砂州の形成・発達に影響を与えた可能性もある。

数値解析的検討と同様に、砂州波高の変化量を通水時間で除した値を波高成長率と定義し、この値を縦軸に、流量を横軸にとって結果を整理したのが図-8b である。なお、図中のエラーバーは各ケースに対して、砂州毎に算出した波高成長率の標準偏差を示したものである。通水時間（侵食位置が側壁に到達するまでの時間）は、流量が大きいほど、あるいは初期砂州波高が大きいほど基本的には長くなる傾向にある。そのため、通水後の砂州波高はほとんど同じであっても、流量によって波高成長率は異なる。このように、単位時間当たりの波高成長率を見ると、ある流量で極大値をもち、その流量を超えると成長率は小さくなっていく傾向にあり、この点では数値解析と同様の結果が得られたことになる。また、上流端から土砂が供給されてこない条件下で実験を実施すると、砂州波高は若干大きくなる結果が得られた。

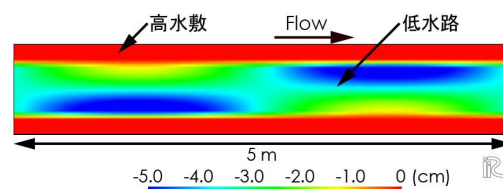


図-7 初期河床の設定（平面図）

表-2 実験条件

Case	流量 (cm ³ /s)	初期波高 (cm)	河岸高 (cm)	等流水深 (cm)	平均摩擦 速度(cm/s)
1	2000	1.5	3.5	1.3	2.6
2		3			
3		4.5			
4	3000	1.5		1.7	2.9
5		3			
6		4.5			
7	4000	1.5		2.0	3.2
8		3			
9		4.5			

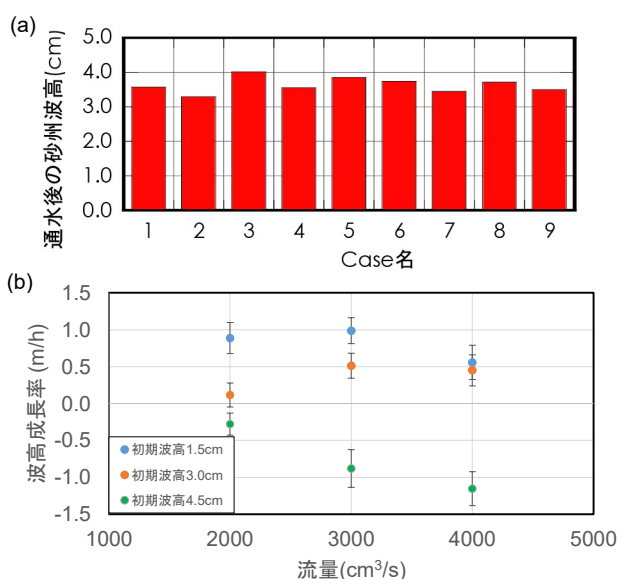


図-8 砂州波高変化：(a) 通水後の砂州波高，(b) 成長率

⑦研究成果の発表状況・予定

(本技術研究開発の成果について、論文や学会への投稿等又はその予定があれば記入して下さい。)(以下記入例)

- ・ これまでに発表した代表的な論文
 - ・ 著書(教科書、学会抄録、講演要旨は除く)
 - ・ 国際会議、学会等における発表状況
 - ・ 主要雑誌・新聞等への研究成果発表
 - ・ 学術誌へ投稿中の論文(掲載が決定しているものに限る)
 - ・ 研究成果としての事業化、製品化などの普及状況
 - ・ 企業とのタイアップ状況
 - ・ 特許など、知的財産権の取得状況
 - ・ 研究成果による受賞、表彰等
1. 井上卓也, サムナー圭希, 平松裕基, 山口里実: 縦断的・時間的に河道の勾配が変化する場における流路変動の影響, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.78, No.2, 2022.
 2. 平松裕基, 井上卓也, 山口里実: 砂州波高と流量の違いが河岸侵食に与える影響に関する実験, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.78, No.2, 2022.
 3. 阿部孝章, 井上卓也, 平松裕基, 大串弘哉, 濱木道大, 戸村翔: 河道諸条件を考慮した河岸侵食幅の推定手法, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.78, No.2, 2022.
 4. Sumner, T., Mishra, J., Inoue, T., & Shimizu, Y.: Numerical study of the interaction between wet-dry weathering and bedload induced abrasion. Water Resources Research, 58, e2021WR030952, 2022.
 5. 井上卓也, 岩崎理樹, 平松裕基, 尾関敏久, 佐々木俊一, 富野龍朗, 木戸理歩: 交互砂州の成長率に関する考察と波高推定手法の構築, 土木学会論文集 80 (16), 23-16050, 2023.
 6. Tatsuro Tomino, Takuya Inoue, Tamaki Sumner: Risk assessment method for bar height increase considering flow distribution, 13th Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics (RCEM), 2023.

⑧研究成果の社会への情報発信

(ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。)

特になし

⑨表彰、受賞歴

特になし

⑩技術研究開発の今後の課題・展望等

研究初年度は達成目標①である「流量と砂州波高成長率の関係の解明」について、理論解析・数値解析を用いて進めた。研究を進める中で、砂州波高成長率は、流量だけでなく、その洪水が発生する前に形成されていた砂州の波高（初期砂州波高）にも強く依存することが明らかとなった。このことは、二極化のような平時の砂州の固定化・樹林化が、洪水時の河床変動や流下能力に影響を与えることを裏付けるものであり、平時の河道管理の重要性を改めて示した。

研究2年目は、初年度に算定した砂州波高成長率と、将来気候における流量発生頻度を掛け合わせて、「忠別川における将来の砂州増大度の算定」を実施した。また、研究費増額分として、本年度の検討で明らかとなった平時の河道管理・ダムの流量管理の重要性を掘り下げ、河川管理者が現在想定している対策案（例えば、低水路幅変更案、ダム放流案）に基づき、波高成長率の関係や流量の発生分布の再分析を行った。検討の結果、ダム放流の増量を行うことにより、平衡砂州波高の減少が期待できることを理論解析より明らかとした。また、低水路幅を現況の 80m から 60m、40m と縮小することにより、砂州波高の低下及び洪水時の樹木流出がより期待できることを明らかにした。

ただし、ダム放流については、定められた洪水調節機能があり、忠別川だけでなく、合流する石狩川本川への影響も考慮する必要がある。低水路幅の変更は、土砂供給のバランスを変え、河床低下を招く可能性がある。以上のことから、今後更なる検討が必要と考えられる。

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

本研究では、これまでに4回にわたり、旭川開発建設部と打合せを実施している。2022年11月に旭川で実施した合同調査とその後の打合せにおいて、旭川開発建設部が管理する忠別川の調査観測データを有効活用して砂州成長率を分析し、ダム建設前後の流量発生頻度の変化について分析すると将来的な事業展開を考える上で有効ではないか、という議論にいたった。

そこで、貸与頂いたALB測量データと数値計算の砂州波高を比較し、モデル精度の確認を行った。また、建設前後の流量発生頻度を整理し、流量一波高成長率の関係図と照らし合わせた。この結果、ダム建設後は砂州が成長しやすい流量の発生頻度が増加していることが確認され、将来的な河道管理や流量管理により、二極化を抑制できる可能性が示された。

また、忠別川では質的河道整備の一環として、低水路幅を現況の 80m から 60m へ縮小する事業を実施している。本研究の川幅を変更した場合の砂州波高解析によると、川幅の縮小により砂州のフラッシュと樹木の流出の期待度が増加することが判明した。