

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
	竹村吉晴 (たけむらよしはる)	中央大学研究開発機構	機構准教授
②研究テーマ	名称	石礫河川における三次元局所流と非平衡流砂運動を考慮した河岸・堤防の侵食解析手法の開発	
③研究経費 (単位: 万円) ※端数切り捨て。	令和2年度	令和3年度	合計
	965万円	974万円	1939万円

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3年3月31日現在)
後藤 岳久	中央大学研究開発機構 機構准教授
後藤 勝洋	中央大学研究開発機構 専任研究員

⑤技術研究開発の目的・目標 (様式河指-2、河指-3に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。)

流水の侵食力が大きい石礫河川(扇状地河川)では、豪雨時における侵食破堤の危険性の評価が重要な課題となっている。侵食破堤の発生には、雨の降り方や本・支川上流域からの土砂供給量、砂州の移動・変形、河岸・堤防の土質構造等の様々な要因が関係し、その評価は容易ではない。

数値解析から洪水外力に応じた河岸・堤防侵食の発生個所や浸食幅、河岸・堤防際の流れや洗掘深を提示することは、その基本情報となり、その精度向上は重要な課題の一つである。河岸侵食の拡大や河岸侵食に伴う水衝部位置の変化などを予測するためには、石礫から細砂までの幅広い粒度分布からなる扇状地河川において、相互に影響を及ぼし合う砂州の移動・変形と河岸侵食を適切に評価出来るかが本質的に重要な課題となる。

本技術開発の目的・目標は、以下の通りである。

- ① 非静水圧準三次元解析法 Q3D-FEBS (竹村・福岡, 2019) と、石礫河川の流砂運動の素過程を取り込んだ非平衡流砂モデル (長田・福岡, 2012) を組み合わせるとともに、サクシオンによる河岸の安定機構と崩落土砂の堆積過程を考慮した石礫河川の河岸・堤防侵食の解析手法を構築する。
- ② 常願寺川現地実験と安倍川平成26年洪水を対象として、本解析法による石礫河川の河岸侵食プロセスおよび砂州の移動・変形に対する有効性を明らかにする。
- ③ 釜無川令和元年洪水による河岸侵食・堤防護岸被災の実態分析を行い、本解析手法を用いた河岸・堤防侵食の被災リスク評価に向けた課題を整理する。

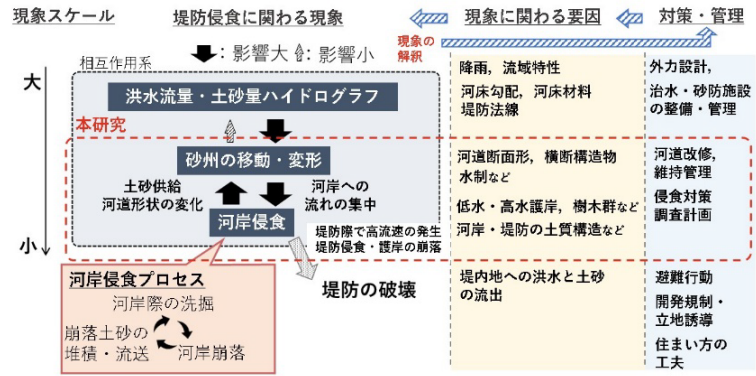


図 本技術開発の背景

⑥研究成果

石礫河川の河岸・堤防侵食の解析手法の構築

扇状地河川は、石礫から細砂までの幅広い粒度分布で構成されるため、砂礫を対象とした従来の流砂量式では土砂移動を適切に説明出来ないものと考えられる。また、**図-1**は常願寺川現地実験の通水後の河岸である。扇状地河川の自然堆積河岸は、主に石礫で構成されるが、その空隙には細砂が密に入り込んでおり、サクシオンや植生が根を張るなどの理由から、河岸上部は切り立つことが多い。この影響を受け、洪水時には河岸際の洗掘、河岸崩落の発生、流水による堆積土砂の輸送という一連のプロセスを繰り返しながら、間欠的に河岸侵食が拡大することになる。

本解析手法では、非静水圧準三次元解析法(Q3D-FEBS²⁾)と長田・福岡の平面二次元河床変動解析法(修正長田・福岡モデル³⁾)をベースとし、河道内の三次元流れと石礫の非平衡運動、掃流砂から浮遊砂への遷移過程までを一體的に扱える河床変動解析法を構築した(図-2)。さらに、

式(1)に示す不飽和度のせん断強度式⁴⁾から河岸の自立高さの評価式を導き(式(2))、自立高さを考慮した河岸の安定解析を行うとともに、崩落土砂の移動を連続体として解析することにより、間欠的な河岸崩落の発生と崩落土砂の堆積過程(河岸侵食のプロセス)を解析可能とした。

$$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi_b \quad (1), \quad z_c = \frac{4(c' + H_B\gamma_w\tan\phi_b)\tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2}\right)}{2\gamma_w\tan\phi_b\tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2}\right) + \gamma_t} \quad (2)$$

ここで、 c' :粘着力、 σ :全応力、 u_a :空気の間隙水圧、 u_w :水の間隙水圧、 ϕ' :内部摩擦角、 ϕ_b :サクシオンによるせん断強度の増加を表すパラメータ、 z_c :河岸の自立高さである。

具体的には、**図-3**に示すようにQ3D-FEBSと非平衡性を考慮した掃流砂・浮遊砂の一体解析から河床変動解析を実施する。一定の時間が経過後、それぞれの計算格子でサクシオンの影響を考慮した河岸の安定解析を行う。**ステップ1**に示すように、河岸崩落が発生すると判定された河岸計算格子の土砂のうち、隣接する水域の河床高より高い部分にある土砂を崩落土砂とする。そして、崩落土砂を連続体と捉えて、連続式と運動方程式に基づいて堆積土砂が河床に堆積するまでの過程を解析する(**ステップ2**)。水域の各計算格子に堆積した崩落土砂の厚さと粒度分布を考慮し、河床高と河床の粒度分布を更新する(**ステップ3**)。そして河床変動解析を再開する。この手順を繰り返すことで、間欠的な河岸崩落の発生を考慮しながら、扇状地河川における洪水時の砂州の移動・変形、河岸侵食を算定する。



図-1 2006年常願寺川現地実験の通水後の河岸

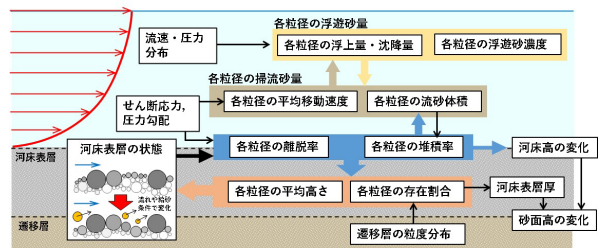


図-2 非平衡性を考慮した掃流砂・浮遊砂の一体解析

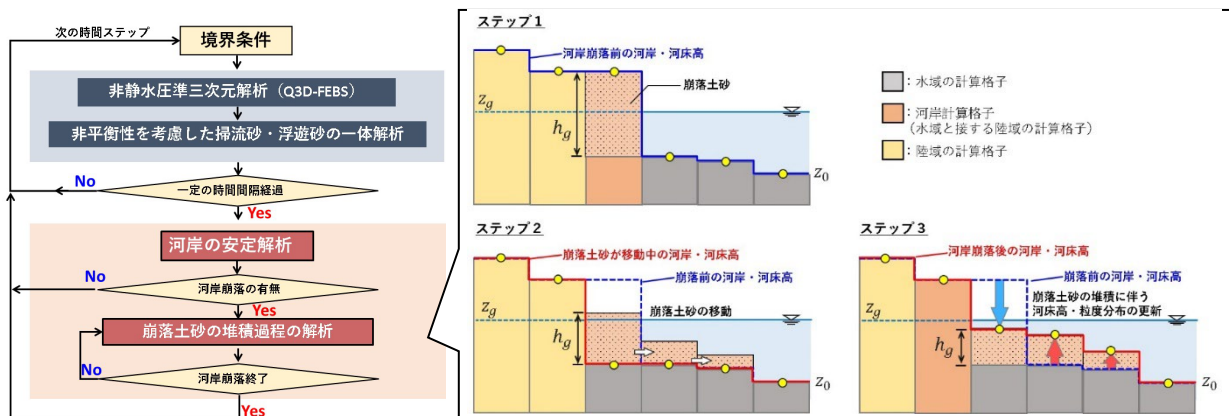


図-3 本解析法の枠組み

常願寺川現地実験への適用

図-4 は、常願寺川現地実験水路の平面形状と観測地点を示す。上流側の蛇行部は自然河岸となっており、下流側の蛇行部の外岸には護岸が設置されている。実験では、最大で $15\text{m}^3/\text{s}$ 程度の流量が通水され、河岸侵食の発生により通水前後で断面形状が大きく変化した(図-5)。

上下流端の境界条件に、図-4 の W22 と W01 地点の観測水位ハイドログラフを与え、図-6 に示す通水後に計測された河床の粒度分布を単純平均した赤色の粒度分布を河床と河岸に一樣に与えて解析を実施した。図-7 と図-8 は、実測と解析での流量ハイドログラフと各時間の水面形の比較である。解析は実測の水面形および流量ハイドログラフを良好に説明できていることが確認できる。図-9 では、本解析手法と安息角モデル(河岸の勾配が安息角よりも急にならないように、地盤高を修正する方法)を用いた場合の河岸崩落の発生地点と時間をコンター表示したものである。両解析法では、河岸侵食のプロセスが大きく異なることが分かる。

図-10 には、W15 地点における実測の通水前後の横断形状と本解析法、安息角モデルによる解析横断面形状を比較している。本解析法は実測の横断面形状をほぼ説明出来ていることが分かる。これに対し、安息角モデルを用いた場合は、流量 $10\text{m}^3/\text{s}$ を通水した段階で河岸が大きく侵食されており、実測を説明出来ていない。図中には、流量 $10\text{m}^3/\text{s}$ 、 $15\text{m}^3/\text{s}$

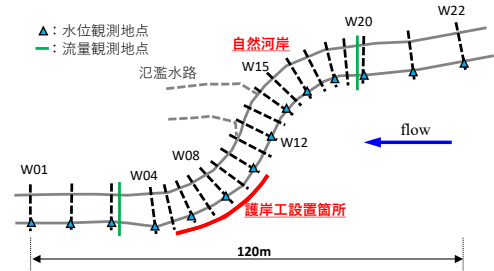


図-4 実験水路の平面形と観測地点

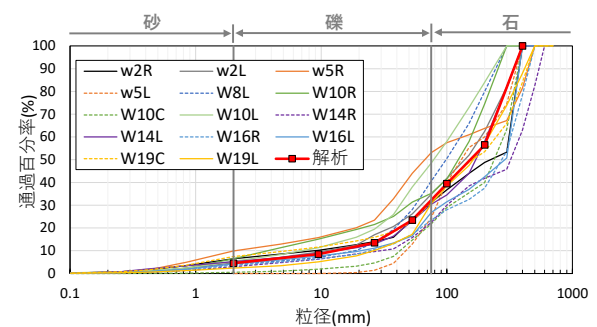


図-6 通水後の粒度分布(ふるい分け試験)



図-5 通水前後での河道の様子

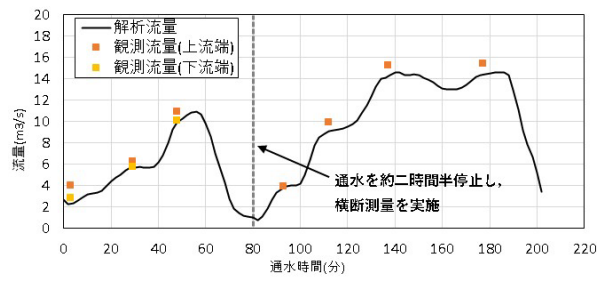


図-7 実測と解析の流量ハイドログラフの比較

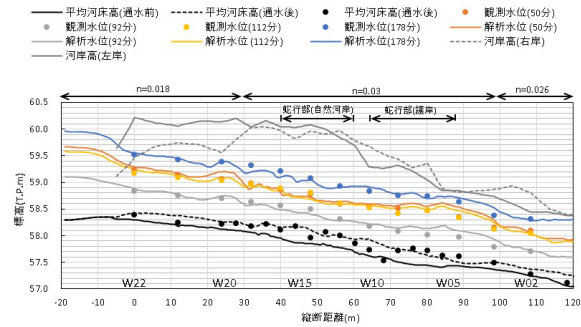


図-8 実測と解析の水面形の比較

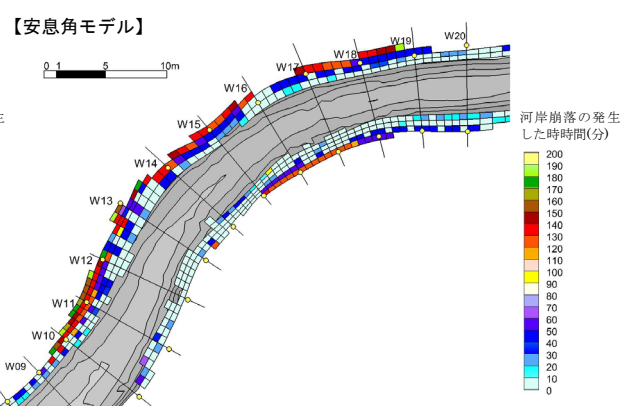
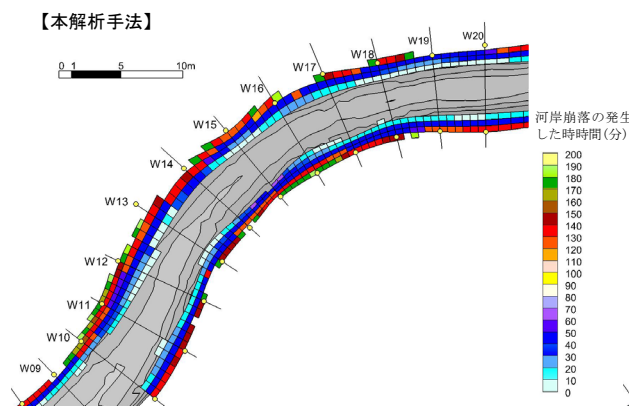


図-9 本解析手法と安息角モデルによる河岸崩落の発生地点と発生時間の比較

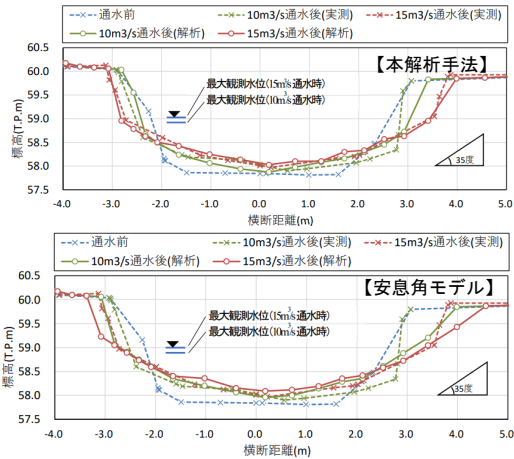


図-10 本解析法と安息角モデルによる解析横断面形状の比較 (W15 地点)

通水時の観測水位を示している。本解析法では、水面と河岸の高さに差がある程、サクシヨンの影響（自立高さが高くなること）により、河岸崩落が発生しにくくなる。従来の安息角モデルは、このような機構が考慮されないため、河岸侵食を過大に評価する傾向がある。

安倍川平成 26 年 7 月洪水への適用

図-11 は、安倍川の流域図である。対象区間は、安倍川本川の 25.0km～0.0km，支川藁科川の 10.0km～合流点，支川安倍中川内川の 5.0km～合流点の区間とした。中下流区間では網状流路が形成されており、河床は石から砂までの幅広い粒度分布で構成される。

図-12 は 8.5km～6.75km 区間を対象として、本解析法と従来法による河床変動解析の結果を比較している。従来法とは流れの解析に平面二次元解析、掃流砂の解析に平衡流砂量式を用いた方法である。図-12(a)と(b)は、同区間における洪水前後の航空写真である。図-13(c)と(d)では、各断面内の河床高を洪水前の平均河床高からの相対高さとして表現した。図中の黒の点線は洪水前、黒の実線は洪水後の相対高さがゼロの等高線を表しており、黒の点線と黒の実線を比較することで砂州の移動状況を掴むことが出来る。図-12(a)と(b)から、洪水前後で 8.5km～8.0km にかけて右岸側から左岸側に流路が形成されている。図-12(c)と(d)に示すように、本解析法と従来法ともにこの傾向を説明できている。一方、従来法は 8.0km から下流区間において、本解析法に比べて、全体的に砂州（赤色の部分）が間延びしており、本解析法では 7.25km～7.0km の右岸側で深掘れが生じ対岸に向かう滞筋が見えるのに対し、従来法では 7.0km から右岸に沿う滞筋が形成され、深掘れは 6.75km より下流に現れている。

図-13 に 7.75km～6.5km 区間における本解析法と従来法

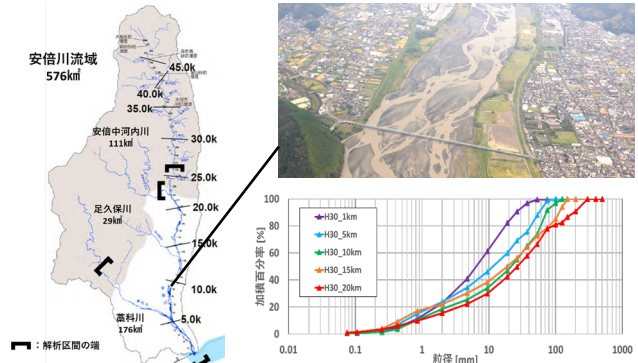


図-11 安倍川の流域図と河床材料分布

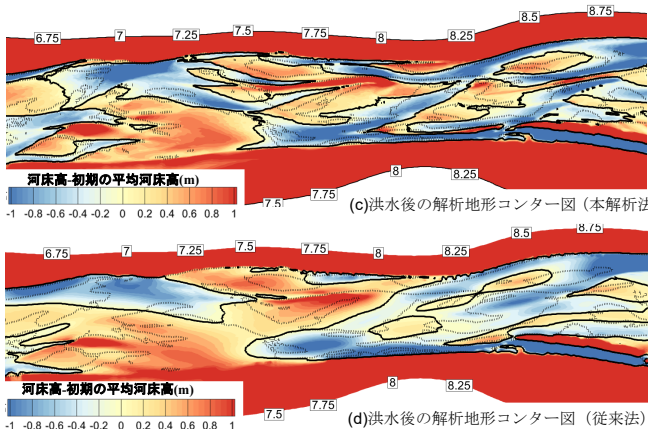
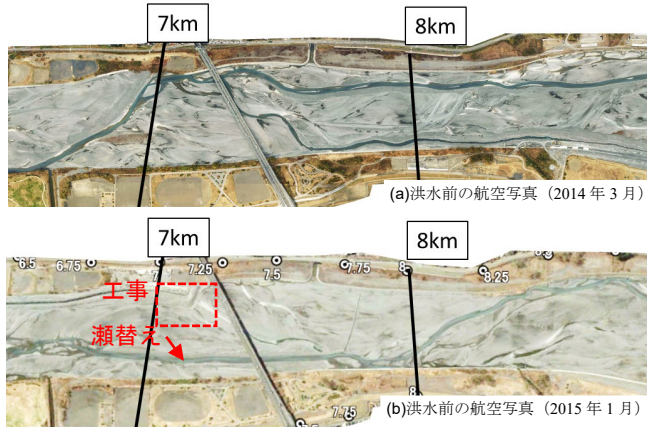


図-12 本解析法と従来法による洪水後の解析地形の比較

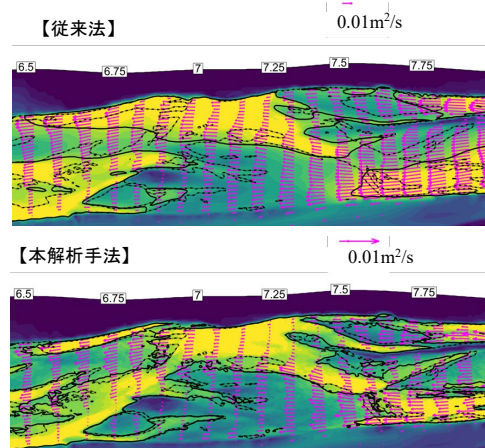


図-13 本解析法と従来法による洪水ピーク時の掃流砂量ベクトルの比較

による洪水ピーク時の掃流砂量ベクトルの比較を示す。従来法は本解析法に比べて掃流砂量が大きくなっている。また本解析法では地盤の高いところを避けるように掃流砂が発生する傾向があるのに対し、従来法は砂州上でも掃流砂量があまり落ちず、その結果、**図-12(d)**に示したように砂州が間延びした形状になった。河床の起伏が大きく、幅広い粒度分布からなる扇状地河川の網状流路では、流れの三次元性や流砂の非平衡性が砂州の移動・変形に与える影響を無視出来ないものと考えられる。

釜無川令和元年洪水による河岸侵食・堤防護岸被災の実態分析

釜無川では、令和元年の台風19号に伴う洪水(平均年最大流量程度)により、多地点で河岸侵食が発生し、11.8km地点と22.5km地点では堤防護岸が被災した。**図-14**に20~25km区間を例として、河岸侵食・堤防護岸被災の分析結果を示す。**図-14(a)**と**図-14(b)**は、各断面の河床高を低水路平均河床高との相対値で表示し、洪水前後の地形変化を比較している。値が正の箇所は低水路平均河床高よりも河床高が高く、値が負の箇所は低水路平均河床高よりも河床高が低いことを示す。**図-14(c)**は、痕跡水位と左右岸の河岸高の関係を示しており、河岸侵食の発生した区間の河岸高を太く、色を濃く表示している。**図-14(d)~(e)**は、高水敷幅と侵食幅および低水路の河床変動高をそれぞれ示している。

図-14(a)に示すように22.1km~22.6km右岸は、洪水前から水衝部となっており、河岸が侵食され堤防護岸まで達した。**図-14(a)**と**(b)**を比較すると河岸侵食の発生した場所では砂州が発達しており、それが河岸侵食を助長することで大規模な河岸侵食を生じさせた様子が読み取れる。さらにその影響は対岸に及び、21.6km~22.2kmの左岸側でも大きな侵食が生じている。一方、その上流に位置する22.8km~23.2km右岸は、河岸は侵食されたものの侵食幅は小さい(**図-14(d)**)。**図-14(c)**に示すように、大規模な河岸侵食の発生した22.1km~22.6km右岸と21.6km~22.2km左岸の河岸高は痕跡水位と同程度の高さが、それよりも低い。これに対し、侵食量の小さい22.8km~23.2km右岸の河岸高は痕跡水位より1m以上高い。

上述の分析を釜無川の10km~25kmまで実施した結果、大規模な河岸侵食の発生した箇所は河岸高が痕跡水位に対して低く、河岸高の高い場所では河岸侵食量が小さい傾向が見られた。これは本解析手法のように河岸の高さが河岸侵食に与える影響を考慮することの重要性を示すものである。一方で、**図-14(f)**に示すように、対象区間(10km~25km)では縦断的に河床高が上昇傾向にあり、土砂生産量の大きい本川上流域や御代川等の支川群からの土砂供給が砂州の移動・変形を介し、河岸侵食に大きく関係しているものと考えられる。特に大規模洪水時における河岸・堤防侵食個所の予測においては、本・支川上流域からの土砂供給量の評価方法について、十分に検討を行わなければならない。

参考文献

- 1) 諏訪ら, 水工学論文集, 35巻, pp.263-268, 1991.
- 2) 竹村ら, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.75, No.1, pp.61-80, 2019.
- 3) 竹村ら, 河川技術論文集, 26巻, pp.669-674, 2020.
- 4) Fredlund et al., Canadian Geotechnical Journal, Vol. 15, No. 3, 1978.

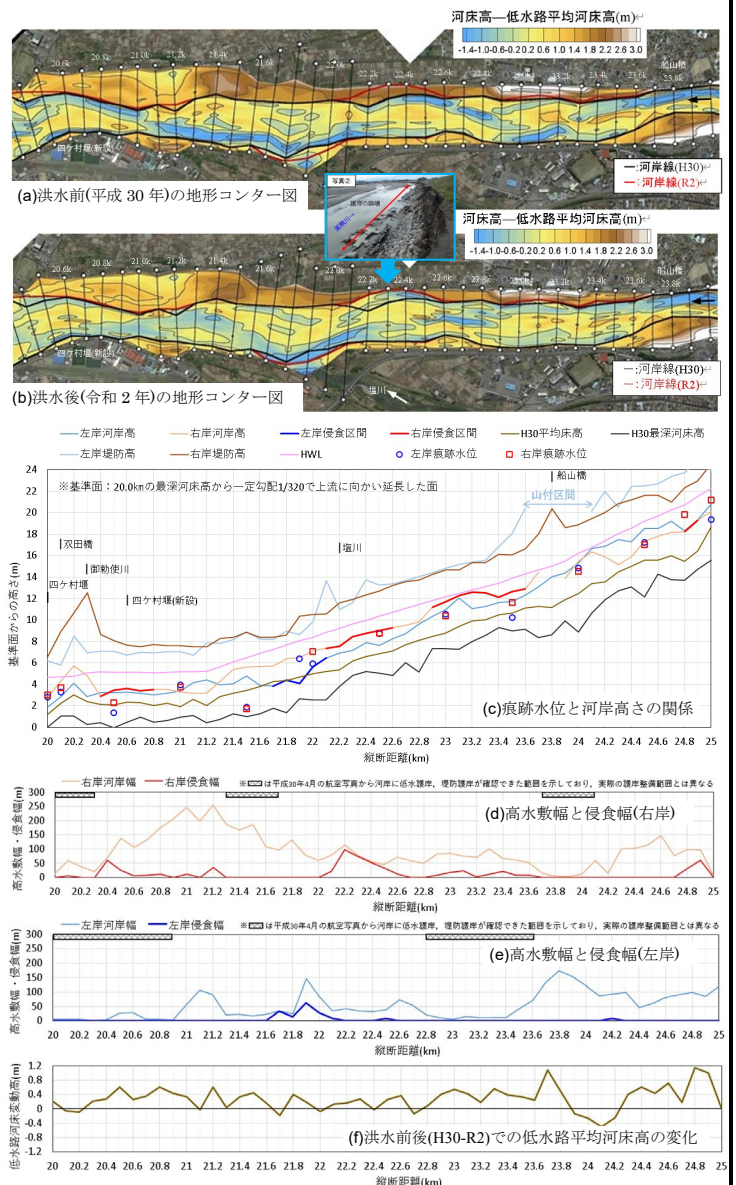


図-14 20~25km区間での河岸侵食・堤防護岸被災の分析結果

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

- ・ 竹村吉晴, 福岡捷二: 扇状地河川の河岸侵食プロセスの解析法と常願寺川現地実験への適用, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.77, No.2, pp.I_799-I_804, 2021.12.
- ・ 森本有祐, 竹村吉晴, 福岡捷二, 立松明憲: 安倍川洪水における掃流砂と浮遊砂の非平衡運動による網状流路の発達, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.77, No.2, pp.I_757-I_762, 2021.12.
- ・ 竹村吉晴, 福岡捷二: 扇状地河川における河岸侵食プロセスに関する研究, 第9回河川堤防技術シンポジウム, pp.79-82, 2021.12.

国際会議、学会等における発表状況

- ・ 森本有祐, 竹村吉晴, 相川隆生, 福岡捷二: 石礫河川安倍川における河床変動解析, 土木学会第48回関東支部技術研究発表会, II-49, 2021.3.
- ・ 竹村吉晴, 福岡捷二: 自立高さを考慮した河岸侵食プロセスの解析法と常願寺川現地実験への適用, 土木学会第76回年次学術講演会公演概要集, II-36, 2021.9.
- ・ 森本有祐, 福岡捷二, 君塚麻衣: 石礫河川安倍川における洪水時の土砂移動と河床変動, 土木学会第76回年次学術講演会公演概要集, II-38, 2021.9.
- ・ 森本有祐, 福岡捷二, 竹村吉晴: 安部川網状流路の洪水流河床変動解析法に関する研究, 土木学会第49回関東支部技術研究発表会講演概要集, II-6, 2022.3.

研究成果による受賞、表彰等

- ・ 竹村吉晴: 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会優秀講演者
受賞題目「自立高さを考慮した河岸侵食プロセスの解析法と常願寺川現地実験への適用」

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。)

⑦で示した本技術開発に関する論文および受賞等については、研究代表者の所属する研究室のHPにて公開している (<https://sfuku.r.chuo-u.ac.jp/top/sfuku/>)。また、本研究成果は所属研究室と国土交通省が共催している河川・流域技術研究会、所属研究室主催の水理研究会で情報発信した。開催日とテーマ、参加人数はそれぞれ以下の通りである。

- ・ 2021.4.22 第156回 河川・流域技術研究会, 「扇状地河川の流水による河岸侵食プロセスに関する研究」, 参加者 (25名程度)
- ・ 2022. 1.13 第149回水理研究会, 「石礫河川安倍川における洪水流河床変動の関する研究」, 参加者 (30名程度)

⑨表彰、受賞歴

(単なる研究成果発表は⑧⑨に記載して下さい。大臣賞、学会等の技術開発賞、優秀賞等を記入下さい。)

竹村吉晴：令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会優秀講演者

受賞題目「自立高さを考慮した河岸侵食プロセスの解析法と常願寺川現地実験への適用」

⑩技術研究開発の今後の課題・展望等

(研究目的の進捗状況・達成状況や得られた研究成果を踏まえ、技術研究開発の更なる発展や河川政策の質の向上への貢献等に向けた、技術研究開発の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

本技術開発では、豪雨時に河岸・堤防侵食の危険性の高い石礫河川（扇状地河川）を対象として、河道内の三次元流れと流砂の非平衡性を考慮した掃流砂・浮遊砂の一体解析から河床変動を求めるとともに、サクシオンにより河岸が安定する機構と崩落土砂が川底に堆積する力学過程を解析に取り込むことで石礫河川の河岸・堤防の侵食解析手法を構築した。

本解析手法では、急勾配な扇状地河川の河岸は、シルト等の粘着性材料の堆積層は薄く、河岸は主に石礫で構成され、その空隙に細砂やシルトが密に存在しサクシオンによる見かけ上の粘着力が発生することが、河岸の安定に支配的との考えに立っている。本技術開発では、常願寺川現地実験を対象に検証を行ったものの、このような考えや提案した自立高さの評価式の妥当性・適用限界等について、現地河川への適用と現地調査から検証する必要がある。

また、本・支川上流域からの土砂供給は、砂州の移動・変形を介して河岸・堤防侵食に大きく影響する。特に浮遊砂は移動距離が長く、豪雨時に本・支川から供給される浮遊砂量を観測し、数値解析と合わせてその推定方法を検討することは、今後の重要な課題と考えている。

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

(本技術研究開発で得られた研究成果の実務への反映等、河川政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

多地点で河岸侵食と堤防護岸の被災が発生した釜無川令和元年洪水の実態分析から、大規模な河岸侵食の発生した場所は水面に対して河岸高が低く、河岸高が高い場所では河岸侵食量が小さい傾向が確認できた。本解析手法では、水面に対して河岸が高い程、サクシオンの影響により河岸崩落が発生しにくくなる機構が考慮されるため、このような現象を従来よりも適切に取り扱うことが出来る。

また、安倍川平成26年洪水を対象に示したように、粒径や外力条件に物理的な制約が生じる実験水路の網状流路とは異なり、扇状地河川の網状流路では石礫から砂までの幅広い粒度分布と時間・空間的に大きく変化する洪水流の作用から、流れの三次元性や流砂の非平衡性が砂州の移動・変形に与える影響を無視できないものと考えられる。本解析手法は、河道内の三次元流れと流砂の非平衡性を考慮した掃流砂・浮遊砂の一体解析から、河岸・堤防侵食の要因となる網状流路における砂州の移動・変形に伴う、水衝部位置の変化等を従来よりも高精度に予測可能になるものと期待出来る。

さらに河岸・堤防侵食の予測精度向上には、解析法だけではなく河床材料や河岸の調査にも課題がある。本解析手法は、流砂運動や河岸侵食の計算を出来得る限り曖昧な仮定を用いないで構築している。実洪水への適用結果から河床材料や河岸（自立高さ等）に対してどのような調査が必要か検討し、これをフィードバックすることで河岸堤防の侵食箇所・侵食幅等の予測精度向上に繋がるものと期待出来る。