

**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		准教授	
②研究テーマ	名称	物部川河口部における洪水流による礫州の破壊機構と河口閉塞対策に関する研究				
	政策領域	[分野] 地域課題分野 (河川)		融合技術		
		[公募課題]				
③研究経費 (単位: 万円)	平成30年度	令和元年度	令和 年度	総合計		
※端数切り捨て。	140	351		491		
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・役職 (※令和2年3月31日現在)					
立山 政樹	株式会社 建設技術研究所					
岡田 将治	高知工業高等専門学校・准教授					
⑤研究の目的・目標	(申請書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。)					
<p>物部川は急流河川であり、石礫で構成される大きな州が河口を閉塞し、支川の排水不良や回遊魚の遡上・降河の障害などの問題が生じている。大洪水が起きない限り礫州は破壊せず、掘削により河口部の開口幅を維持している。このため、河口閉塞の発生頻度低減に効果的な掘削方法の検討が求められている。本研究の目的は、物部川河口部における洪水流による礫州の破壊機構を解明し、河口閉塞の発生頻度低減に効果的な礫州の掘削方法を検討することである。</p> <p>本研究は2年間で行う。観測水面形時系列データの得られた平成26年洪水および研究期間内に発生した洪水を対象として、詳細な観測データに基づき、洪水流による礫州の開口機構と波浪による再形成過程を説明可能な数値解析法を構築し、実測データの分析と構築した解析モデルに基づく数値シミュレーションから効果的な河口閉塞対策について検討することを目標とする。</p>						

## ⑥研究成果

### 1. 2カ年の研究内容

本研究は2年間で行った。河口礫州の斜面勾配は急であり、洪水流による開口部の拡大を解析するためには、急勾配斜面上の流れと石礫の運動を適切に解析する必要がある。研究代表者は、平面二次元解析の枠組みにおいて河道内の三次元流れと非静水圧分布を解析可能な非静水圧準三次元解析法（Q3D-FEBS）を開発している<sup>1)</sup>。



(a) 平成30年6月13日 (b) 平成30年7月18日

図-1 平成30年7月洪水前後の物部川河口部の衛星画像

1年目は、Q3D-FEBSと共同研究者（立山政樹）の開発した急勾配斜面上の流砂運動の解析法<sup>2)</sup>を組み合わせ、平成26年8月洪水を対象に洪水流による河口礫州開口部の拡大機構について検討した。その結果、Q3D-FEBSは観測流量ハイドログラフ、観測水面形の時間変化、河口礫州の開口幅について、平面二次元解析に比べて再現性が向上することを示した。しかし河岸侵食や開口幅については、実測を十分に説明できず、河川の中下流域で検討されてきた従来の平衡流砂量式や崩落モデルでは、現象を十分に説明できない可能性を示した（様式E-8 ⑦研究成果の発表状況, 1）。また、物部川の観測史上二番目に大きい洪水となった平成30年7月洪水では、図-1に示すように河口礫州の開口部が大きく拡大し、河口域では小規模な砂嘴状の堆積地形が形成された。平成30年7月洪水時に河口部の水面形観測を実施するとともに、共同研究者（岡田将治）により洪水前後の河口礫州の詳細な地形測量が実施された。

2年目は、初年度の課題を解決するために、石礫の非平衡運動や河床表層の状態に応じた石礫の移動限界を評価可能な長田・福岡の河床変動解析法<sup>3)</sup>（以下、石礫モデルと呼ぶ）を修正し、Q3D-FEBSと組み合わせた新しい解析法を構築した。そして、平成30年7月洪水を対象として、解析法の適用性を検証するとともに、河口礫州の開口と変形機構について考察した。さらに、河口礫州の開口機構と波浪による河口礫州の再形成過程を考慮し、物部川における効果的な河口閉塞対策について検討し、その効果を数値シミュレーションから確認した。

### 2. 研究成果

#### (1) 物部川河口礫州の開口機構の解析法の構築

石礫モデルは、式(1)、式(2)に示す流砂の連続式と粒子の運動方程式を基礎方程式とする。

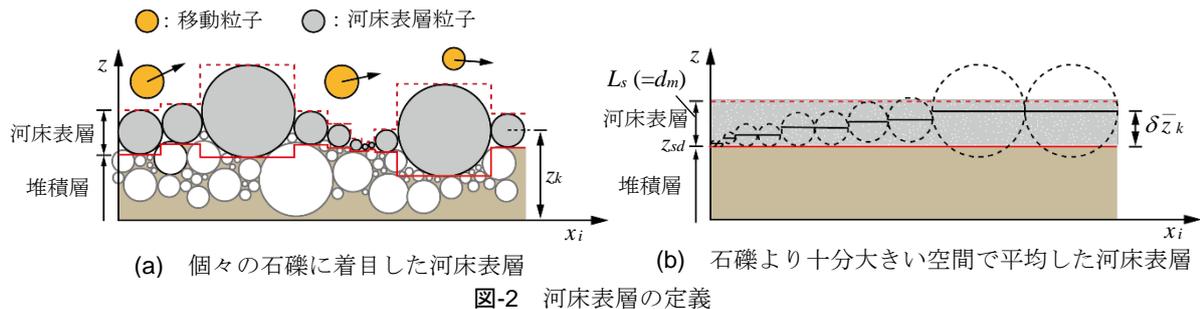
$$\frac{\partial V_k}{\partial t} + \frac{\partial q_{bk,xi}}{\partial x_i} = P_k - D_k, \quad P_k = \varepsilon_p \frac{p_k}{\alpha_2 d_k^2} \left( \frac{\alpha_3 d_k^3}{T_{pk}} \right), \quad D_k = \frac{V_k}{T_{dk}} \quad (1)$$

ここに、 $i=1, 2$  ( $x_1=x, x_2=y$ )、 $V_k$ : 粒径  $d_k$  の単位面積あたりの流砂体積、 $q_{bk,xi} (= \bar{u}_{pk,xi} V_k)$ : 粒径  $d_k$  の  $x_i$  方向の単位幅流砂量、 $\bar{u}_{pk,xi}$ : 粒径  $d_k$  の  $x_i$  方向の平均移動速度、 $P_k$ : 単位面積・単位時間あたりに河床表層から離脱する粒径  $d_k$  の土砂量(粒径  $d_k$  の離脱率)、 $D_k$ : 単位面積・単位時間あたりに河床表層に堆積する粒径  $d_k$  の土砂量(粒径  $d_k$  の堆積率)、 $\alpha_2, \alpha_3$ : 球の形状係数( $=\pi/4, \pi/6$ )、 $T_{pk}$ : 粒径  $d_k$  が河床表層から離脱するのに要する時間、 $T_{dk}$ : 粒径  $d_k$  の平均移動時間である。 $T_{pk}$  と  $T_{dk}$  の計算方法は、長田・福岡<sup>3)</sup>を参照されたい。また、本研究では $\varepsilon_p=0.018$ としている。

$$(\rho_s + \rho C_m) \alpha_3 d_k^3 \frac{du_{pk,xi}}{dt} = -\alpha_3 d_k^3 \left( \rho g \frac{\partial z_s}{\partial x_i} + \frac{\partial p'_b}{\partial x_i} \right) \rho_s \alpha_3 d_k^3 g_{xi} + \frac{\rho C_D \alpha_2 d_k^2}{2} u_{rk,xi} \sqrt{u_{rk,xi}^2} \quad (2)$$

ここに、 $i, j=1, 2, 3$  ( $x_1=x, x_2=y, x_3=z$ )、 $g_{xi}$ : 重力ベクトル(0, 0,  $g$ )、 $g$ : 重力加速度、 $\rho$ : 水の密度、 $\rho_s$ : 砂の密度、 $u_{pk,xi}$ : 粒径  $d_k$  の  $x_i$  方向の移動速度、 $u_{rk,xi} (= u_{f,xi} - u_{pk,xi})$ : 水と粒径  $d_k$  の  $x_i$  方向の相対速度、 $p'_b$ : 底面の非静水圧、 $u_*$ : 摩擦速度、 $z_{sd}$ : 砂面高、 $d_r$ : 代表粒径、 $\kappa$ : カルマン乗数( $=0.41$ )、 $C_m$ : 仮想質量係数( $=0.5$ )、 $C_D$ : 抗力係数( $=0.4$ )である。 $\bar{u}_{pk,xi}$  は、河床の縦横断勾配を考慮して平均粒径を敷き詰めた模擬河床を作成し、式(2)を用いた Saltation 解析を行うことで算定する。また、式(2)に含まれる圧力勾配等は Q3D-FEBS から求める。

## ⑥研究成果 (つづき)



石礫モデルは、河床表面層粒子の高さ分布を求めることで、河床表面層の凹凸分布に応じた石礫の移動限界等を評価する点に特徴がある。具体的に、河床表面層の凹凸分布は、各粒径の河床表面層粒子の平均高さを中心とした正規分布で与える。従来の石礫モデルでは、各粒径の河床表面層粒子の平均高さの計算法に曖昧さを残していたため、本研究はこの点を修正した。図-2(a)に示す河床表面層粒子の頂部と底部に接する赤の点線と実線に囲まれた領域を河床表面層と定義する。河床表面層を石礫より十分大きい空間  $\Delta x \Delta y$  で平均 (空間平均) すると図-2(b)になる。本研究では、図-2(b)の河床表面層より下層を堆積層、河床表面層と堆積層の境界面を砂面高  $z_{sd}$  と定義する。そして、河床表面層厚さと空隙率の時間変化を無視することで導かれる次式より各粒径の河床表面層粒子の平均高さを計算する。

$$\frac{\partial \delta \bar{z}_k}{\partial t} = -\frac{\delta \bar{z}_k}{p_k} \frac{\partial p_k}{\partial t} - \frac{\alpha_2 (P_k - D_k)}{\alpha_3 p_k} \frac{\partial z_{sd}}{\partial t} \quad (3)$$

ここで、 $\delta \bar{z}_k$ : 砂面高を基準とした各粒径の河床表面層粒子の高さ、 $p_k$ : 河床表面層における粒径  $d_k$  の割合である。砂面高の変化、河床表面層における粒径割合の変化は、それぞれ次式から計算される。

$$\frac{\partial z_{sd}}{\partial t} = -\frac{\alpha_2}{\alpha_3} \sum_{k_{max}} (P_k - D_k) \quad (4)$$

$$\frac{\partial p_k}{\partial t} = -\frac{1}{L_s} \frac{\alpha_2}{\alpha_3} (P_k - D_k) - \frac{p_k|_{z_{sd}}}{L_s} \frac{\partial z_{sd}}{\partial t}, \frac{\partial z_{sd}}{\partial t} \geq 0 \quad p_k|_{z_{sd}} = p_k \quad \frac{\partial z_{sd}}{\partial t} < 0 \quad p_k|_{z_{sd}} = p_{k0} \quad (5)$$

ここで、 $p_{k0}$ : 堆積層における粒径  $d_k$  の割合である。修正 Egiazaroff 式<sup>4)</sup>に代表される従来の混合粒径の限界掃流力の算定法では、一様粒径の場合に比べて、粒径比  $d_k/d_m$  が大きい粒径ほど動き易く、粒径比  $d_k/d_m$  が小さい粒径ほど動きにくくすることで混合粒径の移動限界を表現している。しかし、粒径比  $d_k/d_m$  のみでは、河床表面層の状態に応じて変化する石礫の移動限界を適切に表せないものと考えられる。本手法では、河床表面層における各粒径の平均高さ  $\delta \bar{z}_k$  を式(3)から求めることで、粒径比  $d_k/d_m$  に加え、河床表面層の高い位置にある粒径 ( $\delta \bar{z}_k/L_s \rightarrow 1$ ) ほど動き易く、低い位置にある粒径 ( $\delta \bar{z}_k/L_s \rightarrow 0$ ) ほど動きにくくなることを考慮して各粒径の移動限界を算定できる。詳しくは、(様式 E-8 ⑦研究成果の発表状況, 3)) を参照されたい。

### (2) 平成30年7月洪水による物部川河口礫州の開口と変形機構

図-3は、物部川の平面図と水位観測地点を示す。平成30年7月洪水時には、●の地点において洪水時の水位観測が行われた。図-4は、深淵観測所(3.65km)の観測流量ハイドログラフ(H-Q換算値)、高知港の潮位と戸原観測所の有義波高である。洪水終了後の7月13日~18日の間には、河口礫州の詳細な測量が実施されている。対象区間は、6.0km~河口から約800mの沖合までとした。上下流端の境界条件には深淵(3.65km)の水位ハイドログラフと高知港の潮位ハイドログラフを与えて計算を行った。河床変動解析では図-5に示す粒度分布を使用した。

図-6は、本解析法と従来法による深淵(3.65km)の流量ハイドログラフと水面形の解析結果と実測値の比較である。従来法では、各粒径の限界掃流力の計算に修正Egiazaroff式、掃流砂の計算には平衡流砂量式である芦田・道上式<sup>4)</sup>を用いている。0.4kmより上流区間では、両解析法ともに解析水面形は観測水面形を良好に説明できている。これに対し、河口礫州の影響を受ける0.4kmより下流区間では、本解析法と従来法の解析水面形に明白な違いが見られる。図-7は、河口部における洪水後の観測地形コンターと本解析法と従来法による洪水後の解析地形コンターの比較である。図-6(b)の緑と赤の実線で示す従来法の解析水面形に着目する。0.0km~0.4km区間で水面形が交差するのが分かる。

## ⑥研究成果 (つづき)

これは、図-7(c)に示すように、従来法では開口幅が実測に比べかなり狭く計算され、洪水ピークの前に洪水流が河口礫州の中央部を越流し、その上流河道の水位が低下したためである。従来法に比べて、図-7(b)の本解析法は、河口礫州の開口幅や河口域での礫州形状の再現性が高いことが分かる。図-7(a)の実測に比べて、本解析法は河口域での礫州の高さが低く、沖合方向に伸びた形状になっている。平成30年7月洪水から河口礫州の測量期間までに高波浪が生じていることから(図-4)、今後、波浪の影響も考慮しさらなる検討が必要である。

図-8は、本解析法による洪水ピーク付近の-0.1kmと-0.2km断面の流速分布を示す。開口部では縦断的に流れが加速され、河口礫州の上流側では開口部に向かう流れにより、強い二次流構造が形成される(図-8(a))。図-9は、本解析法の解析結果から、●を出発地点として石礫粒子(2mm, 100mm)の軌跡を調べたものである。大粒径粒子ほど斜面勾配の影響を強く受けることが分かる。河口礫州上の大粒径粒子の運動は、流砂の非平衡性を高め開口幅の拡大を促進する(点線黒丸Iの付近)。また、河口域では大粒径粒子が礫州に沿って輸送される傾向に

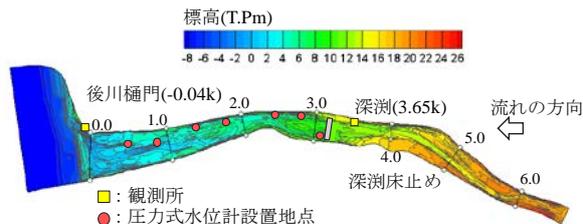


図-3 物部川の平面図と水位観測地点

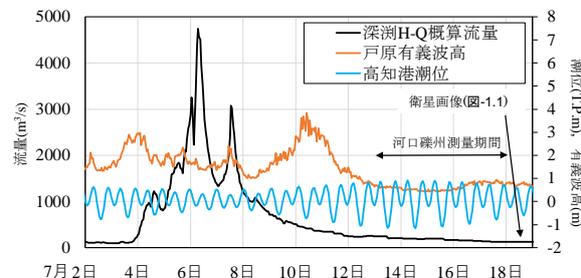


図-4 平成30年7月洪水の深淵(3.65km)の観測流量ハイドログラフ、高知港の潮位、戸原観測所の有義波高

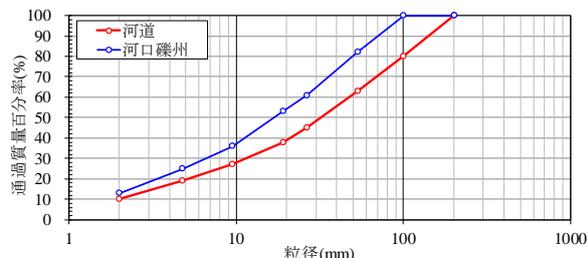
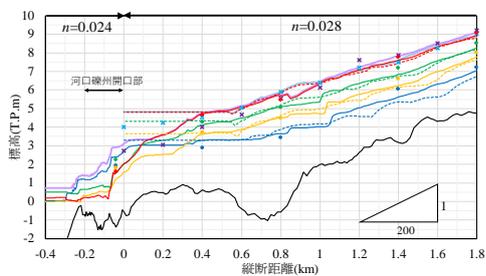
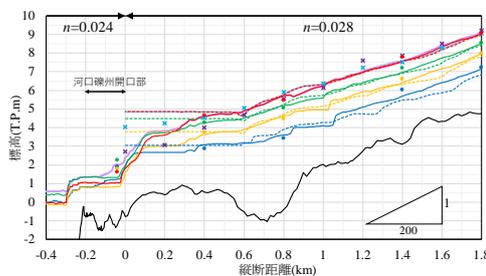


図-5 解析に用いた粒度分布

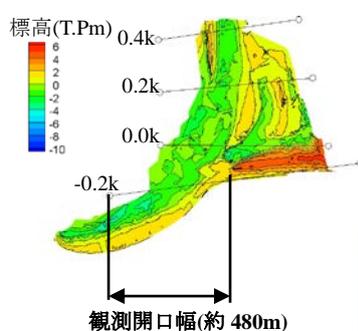


(a) 本解析法

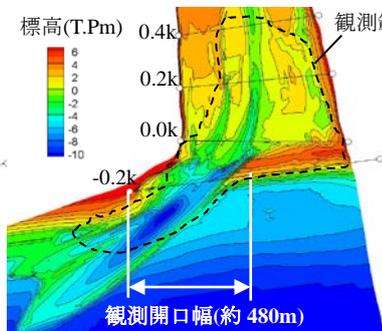


(b) 従来法

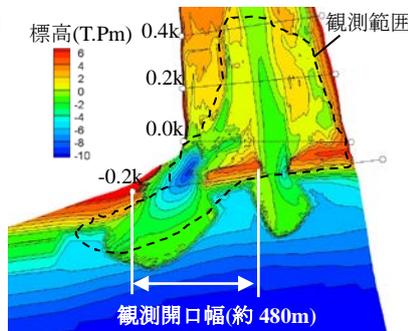
図-6 平成30年7月洪水の増水期における観測水面形と解析水面形の比較



(a) 観測結果



(b) 本解析法



(c) 従来法

図-7 平成30年7月洪水後の物部川河口部の観測地形コンターと解析地形コンターの比較

## ⑥研究成果 (つづき)

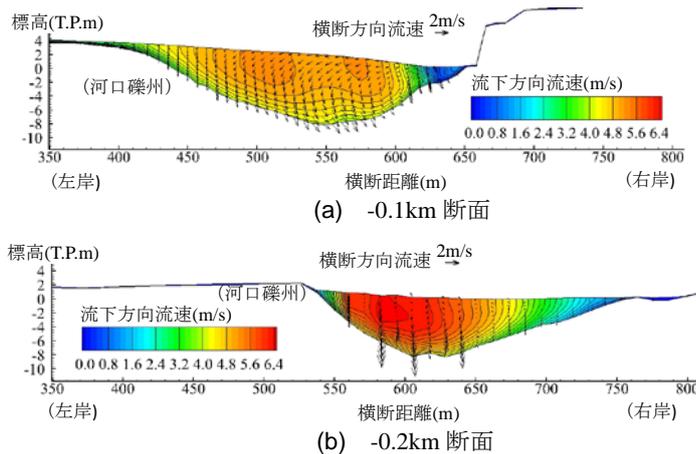


図-8 本解析法による平成30年7月洪水ピーク時の-0.1km断面と-0.2km断面の流速分布

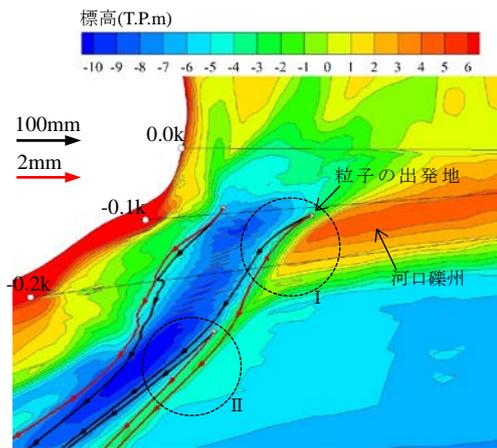


図-9 本解析法による平成30年7月洪水ピーク時の河口礫州開口部の石礫の軌跡

あり、砂嘴状の礫州形状の形成に大きく影響したものと考えられる(点線黒丸IIの付近)。これらの結果は、洪水流による物部川河口礫州の開口と変形機構を説明するには、砂礫河川を対象とした従来の平衡流砂量式や崩落土砂の堆積過程が考慮されない崩落モデルでは不十分であり、石礫の非平衡運動を適切に評価する必要性を示している。

### (3) 河口閉塞対策の検討

長期的な視点で見れば、河口テラスを発達させることが、波浪を減衰させ、河口閉塞の発生頻度を低減させるために有効と考えられる。このためには、河口礫州の開口部を安定させる必要がある。洪水流による河岸および堤防の侵食防止の観点からは、開口部を河道中央部に維持することが望ましい。しかし、3.(2)から推察されるように、開口部に集中する洪水流は側方侵食を引き起こすため、開口部を河道中央部に維持することは容易でない。

このため、河口礫州上流に発達した右岸側の砂州を洪水流により侵食されないように保護することで、河岸・堤防侵食の発生リスクを低減するとともに、開口部位置を現在の右岸側に固定し、河口テラスの発達を促すことで、河口閉塞の発生頻度低減に繋がるものと考えた。このような考察のもと、河口礫州上流側の砂州を保護した場合の効果について、平成30年7月洪水を対象とした数値シミュレーションから検討した。

図-10は、本解析法による平成30年7月洪水後の解析河床高と図中の紫の範囲の河床高が初期の高さよりも下がらないものとして解析を行った場合の洪水後の解析河床高の差を示したものである。河口礫州上流の砂州を保護(対策あり)することで、保護しない場合(対策なし)より河口礫州開口部の左岸側が侵食される傾向にあり、開口部を河道中央に寄せる効果が確認出来る。一方、砂州を保護した場合はその前面が洗掘傾向にあり、0.2km付近では保護しない場合に比べ解析上は2m程度洗掘が生じる結果となり、この点を考慮して具体の施工方法を検討する必要がある。

### 参考文献

- 1) 竹村吉晴, 福岡捷二: 波状跳水・完全跳水及びその減勢区間における境界面(水面・底面)上の流れの方程式を用いた非静水圧準三次元解析(Q3D-FEBS), 土木学会論文集B1(水工学), Vol.75, No.1, pp.61-80, 2019.
- 2) 立山政樹, 福岡捷二, 石川俊之: 大規模洪水による河口砂州の開口機構に関する研究, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.74, No.4, pp.I\_715-I\_720, 2018.
- 3) 長田健吾, 福岡捷二: 石礫河川の河床変動機構と表層石礫の凹凸分布に着目した二次元河床変動解析法, 土木学会論文集B1, Vol.68, pp.1-20, 2012.
- 4) 芦田和男, 道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, Vol.206, pp.59-69, 1972.

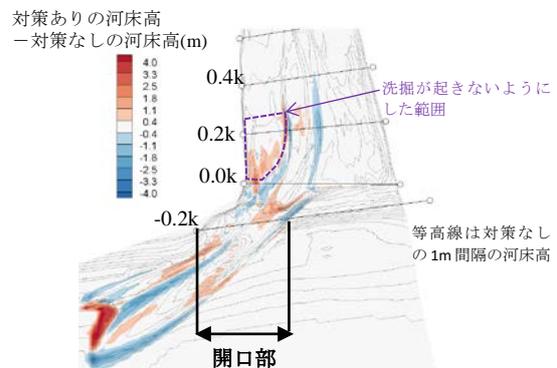


図-10 対策ありと対策なしの平成30年7月洪水後の河床高の差

### ⑦研究成果の発表状況

- ① 立山政樹, 久保宜之, バック シー ハイ, 竹村吉晴, 福岡捷二: 平成26年8月洪水による物部川河口砂州フラッシュの解析と開口機構, 令和元年度土木学会全国大会第74回年次学術講演会, II-214, 2019.
- ② Yoshiharu, T. & Fukuoka, S.: Non-equilibrium bed variation analysis in stony-bed rivers considering changes in the bed surface structure: application to enlargement mechanism of the Monobe River mouth due to floods, Proceedings of the 22nd IAHR-APD Congress 2020, Sapporo, Japan (in press).
- ③ 竹村吉晴, 久保宜之, 岡田将治, 福岡捷二: 洪水流による物部川河口礫州の開口と変形機構に関する研究, 河川技術論文集, 第26巻, 2020 (掲載予定) .

### ⑧研究成果の社会への情報発信

本研究成果は, 研究代表者の所属する研究室のHPにて公開している.  
(<http://c-faculty.chuo-u.ac.jp/~sfuku/sfuku/>)

## ⑨表彰、受領歴

特になし

## ⑩研究の今後の課題・展望等

本技術開発では、洪水流による物部川河口礫州の開口機構を説明するために、長田・福岡により開発された石礫河川の河床変動解析法を修正し、研究代表者らの開発した非静水圧準三次元解析法（Q3D-FEBS）と組み合わせた新しい解析法を提案した（本解析法）。本解析法を平成30年7月洪水に適用し、実測に比べて河口礫州の開口幅が若干小さいものの、従来の洪水流・河床変動解析法に比べて河口礫州の開口幅や変形後の礫州形状を良好に説明出来ることを明らかにした。さらに、物部川における河口閉塞対策として、河口礫州上流に発達した右岸側の砂州が洪水流によって侵食されないように保護することで、河岸侵食の発生リスクを低減するとともに、開口部位置を右岸側に固定し河口テラスの発達を促すことで、河口閉塞の発生頻度低減に繋がることを期待されることを考察し、平成30年7月洪水を外力条件とした数値シミュレーションからその効果を検討した。

一方、本技術開発では、河口礫州の開口状況等の影響が顕著に現れる0.4kmより下流区間では、水位情報が不足しており十分に検証が行えなかった。また、河口礫州の回復は高波浪時の短期間で生じることを衛星画像の分析から明らかにしたが、これを説明するには流れの三次元性を考慮しながら波の位相を直接計算し、石礫の移動を評価する必要があるものと考えられ、問題の難しさから研究期間内での遂行が困難であった。今後、本技術開発で提案した対策の効果をモニタリングしながら、0.4kmより下流区間での水位観体制を整備し、本解析法を波浪の影響も考慮したものに拡張していくことで、より効果的な河口閉塞対策について検討が行えるものと考えている。

## ⑪研究成果の河川砂防行政への反映

物部川における河口礫州の開口幅の拡大や礫州形状の変形には、複雑な三次元流れや石礫の非平衡運動が重要な役割を持ち、砂礫河川を対象とした平衡流砂量式や崩落土砂の堆積過程を考慮できない崩落モデルでは、現象を十分に説明出来なかった。本技術開発で提案した解析法および現象解明に必要な観測体制等の知見は、物部川のように石礫を主材料とする河口砂州の開口機構や対策の効果について、従来よりも信頼度の高い検討を可能とし、河口部の適切な管理に寄与するものである。また、本解析法は、従来法に比べて河口礫州の側方侵食を高精度に計算可能なことから、予測の難しい石礫河川における堤防・河岸侵食の発生個所や被災規模の推定精度向上に貢献するものと期待される。