

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
		後藤岳久 (ごとうたかひさ)	中央大学研究開発機構	機構准教授
②研究テーマ	名称	地域：掃流砂と浮遊砂の一体的扱いに基づく新たな浮遊砂の解析法の開発とそれを用いた安定な船底形河道の設計技術に関する研究		
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
		1 9 7 万円	1 9 7 万円	3 9 4 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6年3月31日現在)		
高鉦裕也		中央大学研究開発機構 機構助教		
⑤技術研究開発の目的・目標				
遠賀川では、近年大規模な出水が頻発し、度々最高水位を更新するとともに浸水被害も発生し、河道の流下能力の向上が求められている。そのため、複断面河道の高水敷を緩やかな傾斜で掘削することで河積を増大させた船底形河道への改修が縦断的に行われてきた(図-1、図-2)。船底形河道への改修は、低水路に集中していた流れを高水敷にも分担させるため、低水路河床の安定性にも有効であり、また、船底形河道は、自然河川に見られる河道断面形であり、流量規模の変化に応じて水際位置や冠水頻度が連続的に広がることから、河川環境や河川景観にも優れた河道断面形である。一方で、船底形河道は高水敷を切り下げたため、堤防線形と低水路線形との関係によっては、底面付近の流れが船底化した高水敷に乗り上げることにより、低水路河床から巻き上げられた細粒土砂が高水敷に輸送され、低水路と高水敷の境界付近に堆積し(図-2)、高水敷の樹林化などが懸念されている。 本研究では、まず、洪水時の河道内の3次元流れと乱れ成分を解析し、それにより、低水路を流れている掃流砂が浮遊砂に遷移して高水敷に輸送されるような流砂の3次元運動を解析出来る準三次元洪水流・河床変動解析法を開発する。 そして、低水路と高水敷の境界付近に土砂堆積が生じにくく、かつ、低水路河床も安定で維持・管理のしやすい船底形河道の設計法の確立を目指す。各年度の目標は以下の通りである。 令和4年度の目標： 掃流砂・浮遊砂の一体的評価による流砂の非平衡運動を考慮した準三次元洪水流・河床変動解析法を開発し、遠賀川の船底形河道に改修された赤地地区において、低水路と高水敷の境界付近への細粒土砂の堆積機構を明らかにし、土砂堆積を抑制する低水路線形について検討する。 令和5年度の目標： 浮遊砂の観測結果と比較することで、構築した解析法の妥当性を検証・改良する。改良した本解析法を用いて、前年度実施した赤地地区を再検証するとともに、堤防・低水路線形の異なる知古地区について、細粒土砂の堆積機構とその抑制策について検討する。				



図-1 遠賀川の船底形河道

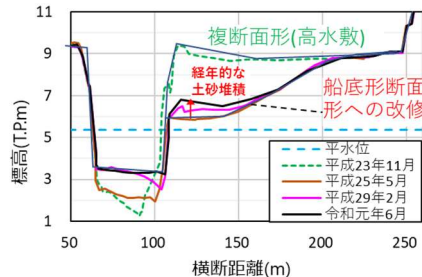


図-2 赤地地区の船底形河道への改修とその後の横断形状の経年変化 (21.4km 地点)



図-1 遠賀川の船底形河道

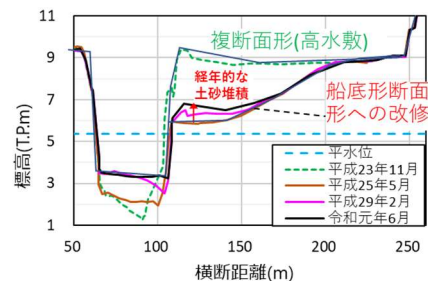


図-2 赤地地区の船底形河道への改修とその後の横断形状の経年変化 (21.4km 地点)

⑥研究成果

1. 掃流砂・浮遊砂の一体的評価による流砂の非平衡運動を考慮した準三次元洪水流・河床変動解析法

一般に、洪水流・河床変動解析では、掃流砂・浮遊砂の流砂運動が平衡状態であると仮定し、掃流砂は平衡流砂量式により評価し、浮遊砂は底面の境界条件に平衡状態の浮遊砂濃度を用いた移流拡散方程式により評価しており、掃流砂と浮遊砂が別々に扱われている。

本研究が対象とする遠賀川の船底形河道区間では、二次流に伴う鉛直方向流速や乱れ的作用により、低水路を移動している掃流砂が浮遊砂に遷移し、低水路と高水敷の境界付近に輸送され、そこに細粒土砂が堆積している。そのため、土砂堆積のしにくい船底形河道の断面形を検討するためには、掃流砂と浮遊砂の挙動を一体的に解析すること出来る洪水流・河床変動解析法が必要である。以下に構築した本解析法を説明する。

(1)洪水流解析法

図-1 は、本解析における洪水流解析法の枠組みと、流速と乱れエネルギーの鉛直分布を示す。本解析法における流れの解析には、水深積分モデルの枠組みで非静水圧の三次元流れを解析出来る準三次元解析法(Q3D-FEBS 法)を用いる。これに加え、浮遊砂の輸送を解析するためには、乱流場の評価が重要であることから、水面と底面、水深積分の乱れエネルギーの輸送方程式を導入し、乱れエネルギーの鉛直分布を解析出来るようにしている。

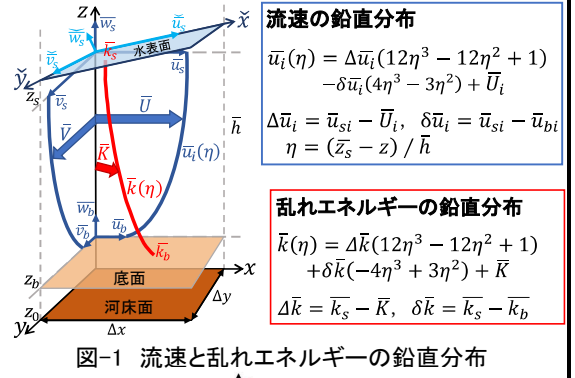


図-1 流速と乱れエネルギーの鉛直分布

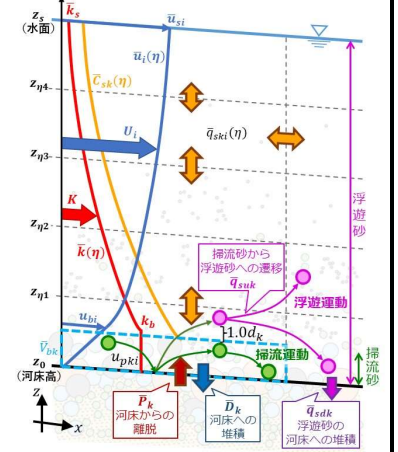


図-2 河床変動解析法の枠組み

(2)掃流砂と浮遊砂の一体的評価に基づく河床変動解析法

図-2 は、本解析における河床変動解析法の枠組みを示す。まず本解析では、掃流砂の運動を粒子が河床底面付近を跳躍運動している状態と定義し、浮遊砂の運動については、砂粒子が鉛直方向流速や流れの乱れ成分の影響を受け、その跳躍距離が極めて長くなっている状態の運動と定義する。

本解析では、流れ的作用によって河床から離脱($\bar{P}_k$:単位面積・時間当たりの河床からの離脱割合)した粒子は、一旦、掃流砂の運動を呈するものとして、式(2)に示す掃流砂の連続式に取り込まれる。ここで、式(1)は河床高の時間変化を表わす河床の連続式である。そして、掃流砂に取り込まれた砂粒子について、後述する跳躍解析に基づき河床へ堆積する割合($\bar{D}_k$:単位面積・時間当たりの掃流砂の河床への堆積割合)や掃流砂から浮遊砂に遷移する割合($\bar{q}_{suk}$:単位面積・時間当たりの掃流砂から浮遊砂への遷移割合)を評価し、これらを掃流砂の連続式に考慮するとともに、掃流砂から浮遊砂に遷移した砂粒子は式(3)に示す浮遊砂の3次元連続式に取り込まれることで、掃流砂と浮遊砂を一体的に解析している。ここで、浮遊砂の沈降量は、式(1)に示すように直接河床に堆積するものとする。ここに、 $\bar{V}_{bk}$:単位面積当たりの掃流砂体積、 $\bar{q}_{sdk}$:単位面積・時間当たりの浮遊砂から河床への堆積割合、 $\bar{c}_{sk}(\eta)$ は各高さの浮遊砂濃度、 A_2 :2次元の形状係数($=\pi/4$)、 A_3 :3次元の形状係数($=\pi/6$)、 k は粒径階、 $i, j=1, 2$ (x, y 方向)、“ $-$ ”は時間平均値、“ $\wedge$ ”は斜面に沿う方向の座標系を表す。

$$\frac{\partial z_0}{\partial t} = \frac{A_2}{A_3} \sum_{k=1}^{kmax} (\bar{D}_k - \bar{P}_k + \bar{q}_{sdk}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{V}_{bk}}{\partial t} + \frac{\partial \hat{q}_{bkj}}{\partial x_j} = (\bar{P}_k - \bar{D}_k - \bar{q}_{suk}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{c}_{sk}(\eta)}{\partial t} + \frac{\partial \bar{q}_{skj}(\eta)}{\partial x_j} = 0, \quad \bar{q}_{skz}(z_b) = \bar{q}_{suk} - \bar{q}_{sdk} \quad (3)$$

式(2)に示す掃流砂の連続式における $\hat{q}_{bki}$ は、河床の斜面に沿う方向の単位幅掃流砂量であり、これは単位面積当たりの流砂体積 $\bar{V}_{bk}$ と河床に沿う方向の砂粒子の平均移動速度 $\hat{u}_{pki}$ の積で表される(式(4))。

$$\hat{q}_{bki} = \bar{V}_{bk} \hat{u}_{pki} \quad (4)$$

砂粒子の斜面に沿う方向の平均速度 $\hat{u}_{pki}$ については、準三次元解析の流れ場を外力条件として、粒子の跳躍運動に関する三次元運動方程式(式(5))により求める。

$$A_3(\rho_s + \rho C_M) d_k^3 \frac{\partial \hat{u}_{pki}}{\partial t} = -A_3(\rho_s - \rho) g_i d_k^3 + 0.5 \rho C_D A_2 d_k^2 (\hat{u}_{bi} - \hat{u}_{pki}) |\hat{\mathbf{u}}_b - \hat{\mathbf{u}}_{pk}| \quad (5)$$

$$\hat{u}_{pki} = \frac{1}{T_{sal}} \int_t^{t+T_{sal}} \hat{u}_{pki} dt, \quad T_{sal} = 10.0(s)$$

ここに、 t : 時間、 $i=1,2,3(x,y,z$ 方向)、 ρ_s : 砂粒子の密度($=2,650\text{kg/m}^3$)、 ρ : 水の密度($\rho=1,000\text{kg/m}^3$)、 d_k : 粒径、 g_z : 重力加速度、 $\hat{u}_{pki}$: 砂粒子の瞬間速度、 $\mathbf{u}_p$: 砂粒子の瞬間速度ベクトル、 $\mathbf{u}_b$: 底面における粒子周辺の流速ベクトル、 C_D : 抗力係数($C_D=0.4$)、 C_M : 付加質量係数($C_M=0.5$)である。また、 T_{sal} は砂粒子の平均速度を求める際に平均化する時間であり本解析では 10 秒としている。

式(3)に示す浮遊砂の 3 次元連続式における $\bar{q}_{ski}(\eta)$ は、各高さにおける単位面積当たりの浮遊砂の輸送フラックスの時間平均値であり、これは、各瞬間の粒子速度 $\hat{u}_{spkj}(\eta)$ と各瞬間の浮遊砂濃度 $C_{sk}(\eta)$ を用いて式(6)のように表される。ここで、 t_{mean} は乱れスケールの時間、 l_d は乱れスケールの長さ、 $k(\eta)$ は各高さの乱れエネルギーである。

$$\bar{q}_{ski}(\eta) = \frac{1}{t_{mean}} \int_t^{t+t_{mean}} \hat{u}_{spkj}(\eta) C_{sk}(\eta) dt, \quad t_{mean} = l_d / \sqrt{k(\eta)}, \quad l_{db} = 0.032 \bar{h} \quad (6)$$

式(6)で用いる粒子の鉛直方向速度の瞬間値 $\hat{w}_{spk}(\eta)$ は、式(7)に示す乱れ成分を考慮した粒子の運動方程式により計算し、 x,y 方向の粒子速度の瞬間値 $\hat{u}_{spk}(\eta)$ 、 $\hat{v}_{spk}(\eta)$ については、流速の瞬間値と同程度であると仮定した。また、浮遊砂濃度の瞬間値 $C_{sk}(\eta)$ は各瞬間の風上側の値を用いることで評価した。これにより、通常用いられる拡散項を用いずに直接浮遊砂の輸送フラックスを計算する。

$$A_3(\rho_s + \rho C_M) d_k^3 \frac{d \hat{u}_{ptki}}{dt} = -A_3(\rho_s - \rho) g_z d_k^3 + 0.5 A_2 C_D \rho d_k^2 (\hat{u}_{bi} + \hat{u}'_{bi} - \hat{u}_{ptki}) |\hat{\mathbf{u}}_b + \hat{\mathbf{u}}'_b - \hat{\mathbf{u}}_{ptk}| \quad (7)$$

ここで、流れの乱れ成分 $\hat{u}'_{bi}$ は、正規分布($N(\sigma, \mu)$ 、 $\sigma^2 = \overline{u'_{bi} u'_{bi}}$ 、 $\mu = \hat{u}_{bi}$)に従うと仮定し、関根らの手法に倣いマルコフ連鎖の考えに基づき正規乱数を用いて与えた。各方向の乱れ強度 $\overline{u'_{bi} u'_{bi}}$ は、瀬川の乱れエネルギーと乱れ強度の関係から与えた。

河床からの砂粒子の離脱割合 $\bar{P}_k$ については、修正長田・福岡と同様に離脱判定粒子に作用する流体力を準三次元解析から求め、これが固定粒子を乗り越えるまでの時間 $\bar{T}_{pk}$ を計算し求める。河床への堆積割合 $\bar{D}_k$ の評価については、準三次元解析の流れ場の条件下で砂粒子の跳躍解析を行い、粒子が停止するまでの時間 $\bar{T}_{dk}$ を計算し、 $\bar{D}_k = \bar{V}_{bk} / \bar{T}_{dk}$ より単位面積・時間当たりの堆積割合を求める。

掃流砂から浮遊砂への遷移割合 $\bar{q}_{suk}$ は、式(7)に示す流れの乱れ成分を考慮した粒子の跳躍解析を行い、この際、掃流砂の跳躍解析の最大跳躍高さよりも粒径の 1.0 倍以上高くなれば、その粒子は浮遊砂に遷移したと判定し、その個数割合を算定している(式(8))。ここで、掃流砂から浮遊砂への遷移の判定基準については、熱海らの数値実験結果を用いて検討した。

$$\bar{q}_{suk} = \frac{N_{suk}}{N_{max} \bar{T}_{suk}} \bar{V}_{bk} \quad (8)$$

ここで、 N_{suk} : 掃流砂から浮遊砂へ遷移した粒子の個数、 N_{max} : 試行回数($N_{max} = 100$)、 $\bar{T}_{suk}$: 粒子が浮遊砂に遷移するまでの時間である。単位面積・時間当たりの浮遊砂から河床への堆積割合 $\bar{q}_{sdk}$ は、粒子の沈降速度 w_{fk} と三次元浮遊砂解析における最下層の浮遊砂濃度 $\bar{C}(\eta_1)$ の積で表す(式(9))。

$$\bar{q}_{sdk} = \bar{C}(\eta_1) w_{fk} \quad (9)$$

2. 浮遊砂濃度の観測された令和 5 年 7 月洪水による本解析法の比較検証と改良

(1) 浮遊砂濃度の観測結果とその本解析法への反映

令和 5 年では、遠賀川河川事務所において、図-3 に示す日の出橋(18.7km)、勘六橋(19.8km)で浮遊砂濃度を観測して頂いた。浮遊砂濃度の観測はバケツ採水により行われ、採水箇所は各測線の左岸・中央・右岸の 3 地点で水表面から約 50~60cm 下で採水した。観測された浮遊砂濃度の無次元表記では、いずれの地点も 10^{-4} のオーダーであり、採水された浮遊砂の平均粒径は概ね $20 \mu\text{m}$ のシルト成分であった。この粒径に対する沈降速度は $0.035(\text{cm/s})$ であり、ほぼ Wash Load 成分と考えられる。このことから、観測された浮遊砂濃

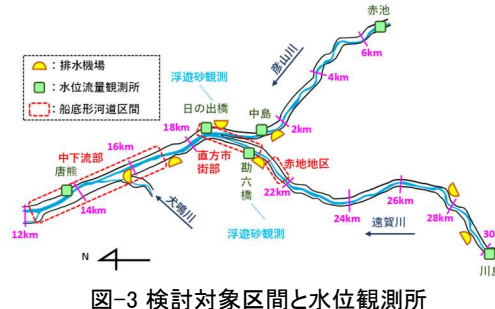


図-3 検討対象区間と水位観測所

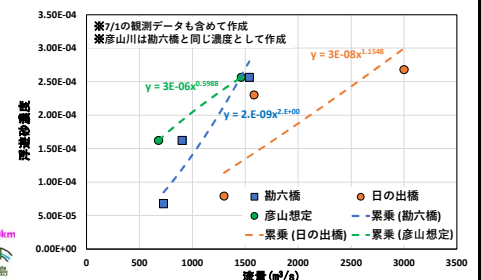


図-4 観測値に基づく流量-浮遊砂濃度関係式



図-5 水面形時系列の観測結果と解析結果(R5.7 洪水)

度を用いて流量-浮遊砂濃度関係式(Q-Cs 式)を作成し(図-4),これを本浮遊砂解析の上流端境界条件に用いることとした。

(2) 浮遊砂濃度の観測結果を反映させた本解析法の令和5年7月洪水での検証

図-3には令和5年7月洪水の洪水観測体制と解析範囲を示しており,上流端は川島・赤池,下流端は唐熊である。洪水流解析の解析上下流端の境界条件にはそれぞれ観測水位時系列を与え,途中に合流する庄内川の流量時系列は合成合理式により与えた。流砂に関する境界条件については,上流端で掃流砂および粒径 0.2mm 以上の浮遊砂は平衡条件を与え,粒径 20 μ m のシルト成分は,2.(1)で示した流量-浮遊砂濃度式(Q-Cs 式)を与えた。粗度係数は低水路 0.029(m^{1/3}/s),高水敷 0.04(m^{1/3}/s)とした。解析に用いた河床材料については,低水路の実測河床材料と高水敷際の堆積土砂の実測値に基づき設定した。解析の初期地形には,R4.11 測量データを用いた。

図-5,図-6は水面形時系列及び流量ハイドログラフ(日の出橋)の観測結果と解析結果の比較を示す。解析結果は観測水面形時系列をほぼ再現し,実測の浮子観測流量を説明している。表-1は日の出橋における洪水ピーク付近(R5/7/10 9:40)の浮遊砂濃度の観測結果を示し,図-7は日の出橋(18.7km)における同時刻における浮遊砂の解析結果を示し,図-8は上流端からシルト成分を流入させていない場合の同地点・同時刻の浮遊砂濃度の解析結果を示しており,解析結果は上流端からシルト成分を観測値から作成した Q-Cs 式に基づいて流入させることにより,実測の浮遊砂濃度を説明していることが分かる。

3. 遠賀川赤地地区における高水敷と低水路の境界付近の細粒土砂の堆積機構とその是正策の検討～平成30年7月洪水を対象として～

本章では,2章で検証・改良した解析法を用い,遠賀川赤地地区における低水路と高水敷の境界付近の細粒土砂の堆積機構とその是正策について再検討する。

(1) 赤地地区における高水敷と低水路の境界付近の細粒土砂の堆積機構

本検討では,船底形河道への改修後の河道において,観測史上最大の洪水であった平成30年7月洪水を対象洪水

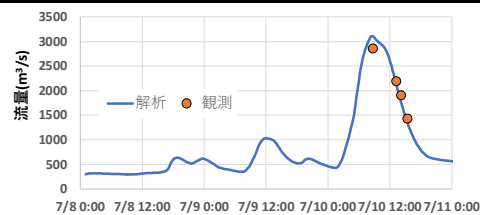


図-6 流量ハイドログラフの観測と解析結果(日の出橋, 18.7km, R5.7 洪水)

表-1 浮遊砂濃度の観測結果(日の出橋, 7/10 9:40)

左岸	中央	右岸
2.6E-04	2.7E-04	4.2E-04

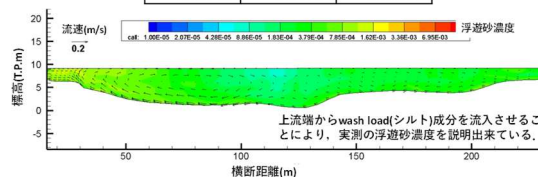


図-7 浮遊砂濃度の解析結果(日の出橋, 7/10 9:40),上流からのシルト成分の供給あり(改良法)

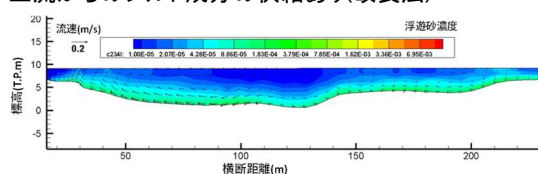


図-8 浮遊砂濃度の解析結果(日の出橋, 7/10 9:40),上流からのシルト成分の供給なし(昨年度法)

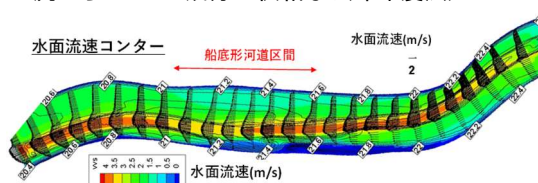


図-9 H30.7 洪水ピーク時の水面流速場

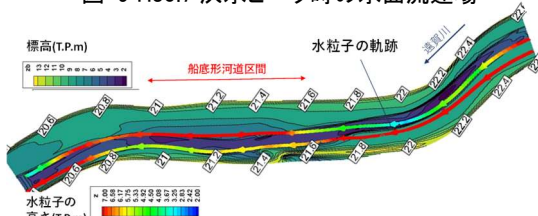


図-10 H30.7 洪水ピーク時の3次元流況

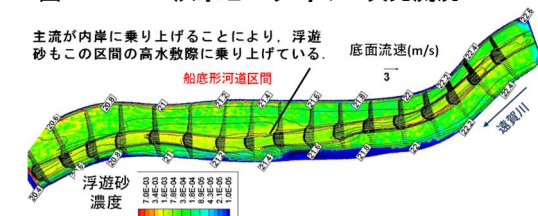


図-11 H30.7 洪水ピーク時の底面流速ベクトルと底面付近の浮遊砂濃度分布

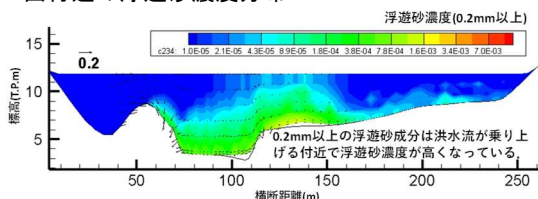


図-12 21.4kmにおけるH30.7洪水ピーク時の二次流分布と浮遊砂濃度分布(0.2mm 以上)

とした。解析範囲および河床材料、流れと土砂に関する境界条件は2章と同様である。初期河床形状については、H29年の定期横断測量を用い、船底形河道の緩傾斜の高水敷形状については、河道改修時の設計図を用いて作成した。

平成30年7月洪水における水面形時系列および流量ハイドログラフの観測結果と解析結果の比較は、紙面の制約のため図面を省略するが、解析結果は観測水面形時系列、観測流量ハイドログラフを説明している。図-9は洪水ピーク時における水面流速ベクトルと水面流速のコンター図を示し、図-10は洪水ピーク時における水粒子の軌跡を3次元的に描いた図である。流積線の色が水粒子の高さを示す。これらの図より洪水ピーク付近では、右岸高水敷を切り下げて船底形河道に改修した21.4km付近右岸側において、主流が右岸高水敷上に乗上げる複断面的蛇行流れに近い流れを呈していることが分かる。図-11は洪水ピーク時における底面流速ベクトルと底面付近の浮遊砂濃度分布を示す。図より、洪水流の主流が乗上げる21.4km付近において、浮遊砂も船底形河道に改修された右岸高水敷上に輸送されていることが分かる。

図-12は、21.4kmにおける洪水ピーク時の二次流分布と浮遊砂濃度(粒径0.2mm以上)を示す。細砂土砂は、21.4km地点の低水路の右岸際で主流が高水敷に乗上げるため、低水路と高水敷の境界付近で強い鉛直流速が生じ、これに伴い低水路の浮遊砂が船底形河道に改修された高水敷に輸送され、土砂堆積を生じさせている。図-13は洪水前後の河床変動高の実測値と解析結果のコンターを示し、解析結果は、主流が乗上げる21.4km右岸付近における低水路と高水敷の境界付近の実測の土砂堆積を説明している。

(2) 高水敷と低水路の境界付近の細粒土砂の堆積を抑制するための河道形状の検討

本検討では、3.(1)で明らかとなった船底形河道への改修区間における低水路と高水敷の境界付近への細粒土砂の堆積機構を踏まえ、その細粒土砂の堆積を抑制するための河道縦横断面形について検討する。

現況河道では、21.4km～22km付近において、低水路幅がその上流に比べてやや狭くなっており、また、21.4km右岸側の低水路が張り出しており、低水路線形が適切でない。そこで本研究では、21.4km～22km付近において低水路を左岸側に広げること、高水敷に乗上げる流れの流向の緩和、流速の低減を図り、右岸側については、複断面河道から船底形河道へ緩やかに接続するように低水路線形・高水敷の形状を是正することを検討する。図-14は現況河道と是正河道の河床高コンターを示す。

上記の是正を実施した場合の河道に対して、3.(1)と同様に、観測史上最大の平成30年7月洪水を通水し、高水敷への細粒土砂の堆積をどの程度抑制できるかを検討した。

図-15は是正河道における洪水ピーク時の底面流速ベクトルと底面付近の浮遊砂濃度コンターを示す。是正河道では、図-11に示した現況河道に比べて右岸側の低水路と高水敷の境界付近の流速が低減し、洪水の主流の右岸高水敷への

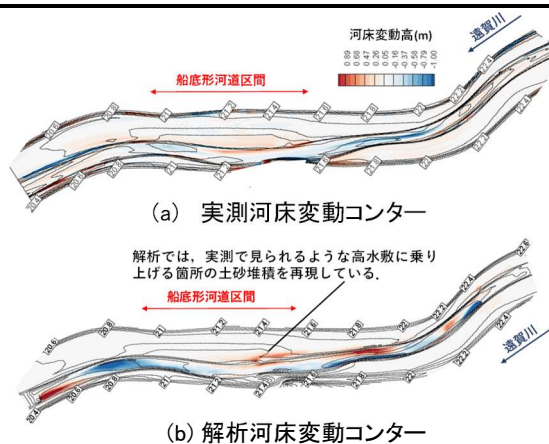


図-13 H30.7洪水前後の河床変動高の実測値と解析結果の比較

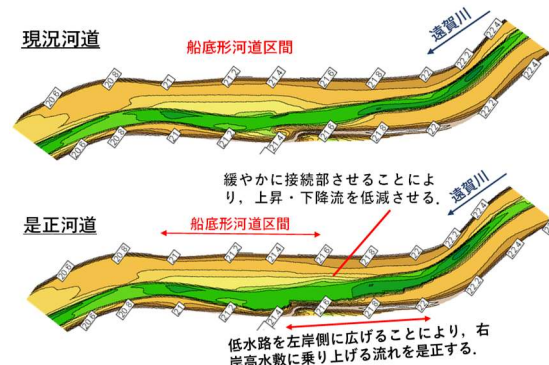


図-14 現況河道と是正河道の河床高コンター

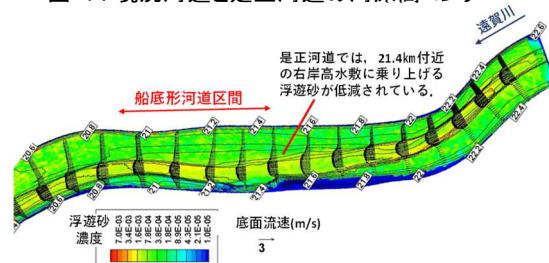


図-15 是正河道における洪水ピーク時の浮遊砂濃度コンターの比較

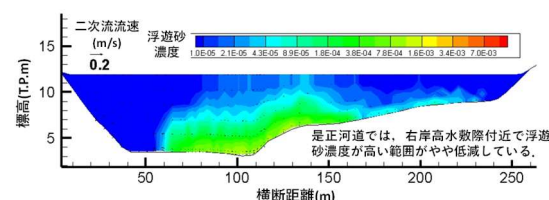


図-16 是正河道における洪水ピーク時の鉛直流速・二次流分布

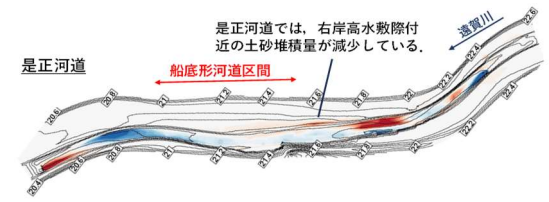


図-17 是正河道の洪水前後の河床変動高コンター

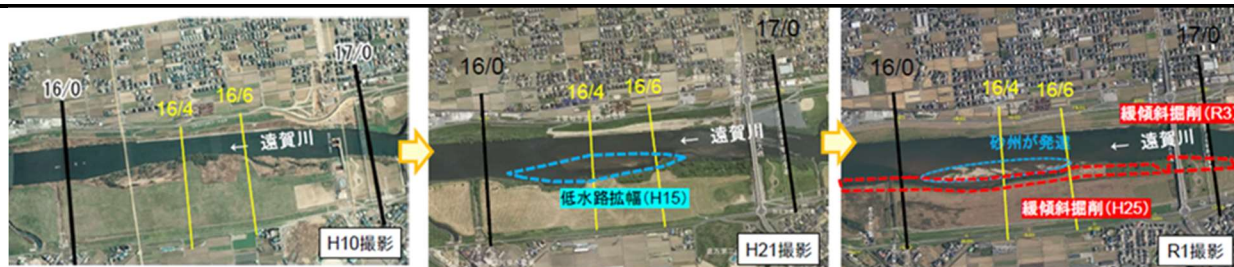


図-18 知古地区の経年変化と河道改修

乗り上げが緩和され、右岸側の低水路と高水敷の境界付近の底面浮遊砂濃度が小さくなっていることが確認出来る。図-16 は是正河道における 21.4km 地点の洪水ピーク時の二次流分布と浮遊砂濃度分布を示す。是正河道では、二次流や高水敷際周辺での鉛直方向流速が現況河道より小さくなっているため、高水敷上に乗り上げる浮遊砂も少なくなっている。図-17 は是正河道における洪水前後の河床変動高の解析結果を示し、是正河道では浮遊砂の乗り上げが減少していることから、21.4km 右岸高水敷の土砂堆積量も減少していることが分かる。

4. 低水路拡幅後に中州が形成・発達している知古地区の土砂堆積機構とその是正策の検討

本章では、平成 15 年の低水路拡幅後において、中州が形成・発達し、樹林化が進行している知古地区(16.0~16.4km 付近)について、構築した洪水流・河床変動解析法により、洪水時の流れと土砂移動、中州の形成・発達機構を明らかにし、土砂堆積を抑制するための河道是正策を検討する。

(1) 知古地区の河道形状の経年変化と過去の河道改修

図-18 は遠賀川の知古地区の航空写真の経年変化を示す。平成 15 年以前は、16.2~16.6km の低水路幅が狭く流下能力に課題があったため、平成 15 年に 16.2~16.6km の区間で左岸高水敷を掘削し、低水路幅拡幅が実施された。その際、16.6km の拡幅幅が 16.2km、16.4km と比べて小さかったため、16.2km、16.4km 付近で低水路幅が流下方向に漸拡していることにより、左岸側の低水路に土砂が堆積し、中州が形成されている。その後、平成 25 年に 16.0~16.6km の区間で、令和 3 年に 16.8km 地点で高水敷の緩傾斜掘削が実施されたことにより、16.4km 地点の左岸低水路の中州は近年比較的安定してきている。一方、16.2km の左岸低水路の中州は徐々に発達してきている。

(2) 遠賀川知古地区の洪水時の 3 次元的な流れと土砂移動状況と中州の形成・発達

本検討では、構築した洪水流・河床変動解析法により、洪水時の 3 次元的な流れと土砂移動状況を明らかにし、中州の形成・発達機構を把握する。知古地区については、令和 3 年度の高水敷緩傾斜化(船底河道化)後に大規模洪水が発生していないことから、最新測量結果(令和 4 年測量)に対して、観測史上最大の平成 30 年 7 月洪水波形を通水し、その際の流れ場や土砂移動、河床変動について考察する。解析の境

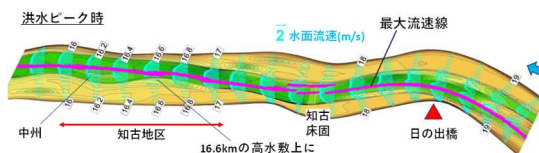


図-19 現況河道における知古地区付近の水面流速分布(洪水ピーク時)

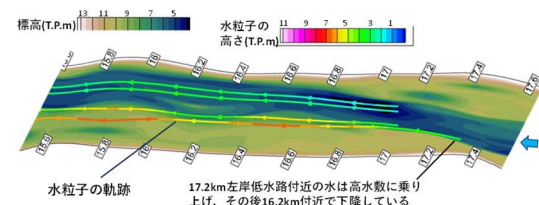


図-20 現況河道における洪水ピーク時の知古地区付近の 3 次元流況

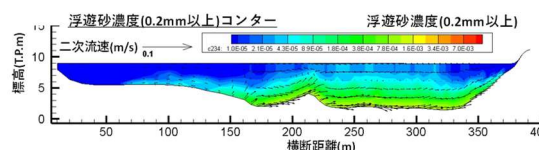


図-21 現況河道における洪水ピーク時の二次流分布・浮遊砂濃度分布(0.2mm 以上)のコンター図

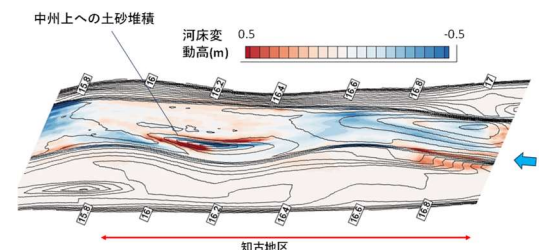


図-22 現況河道における知古地区の洪水前後の河床変動高

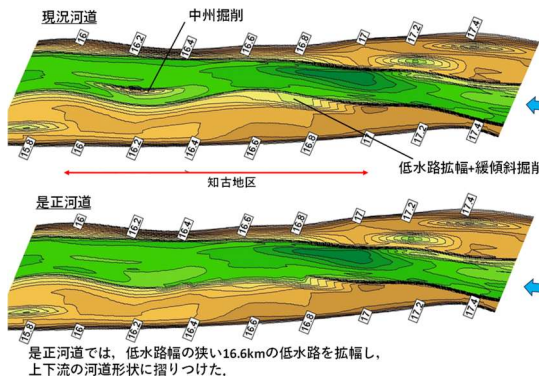


図-23 現況河道と是正河道の河道地形コンター

界条件・河床材料・初期河床は3章と同様である。

図-19 は知古地区周辺の洪水ピーク時の水面流速ベクトルとその最大流速線を示す。知古地区の上下流は堤防線形・低水路線形が緩やかに蛇行していることから、16.2km~16.4km では、洪水ピーク付近では、内岸側(左岸側)に最大流速線が寄り、複断面的蛇行流れに近い流れを呈していることが分かる。図-20 は知古地区周辺の洪水ピーク時の3次元流況として、水粒子の軌跡を示す。図より、17.2km 左岸低水路付近を流れていた水粒子は、16.6km 付近の左岸高水敷に乗り上げ、その後 16.2km 付近で下降し低水路に流入していることが分かる。

図-21 は同地点における二次流と浮遊砂濃度分布(粒径 0.2mm 以上)を示す。解析結果より、中州のある地点では、中州を境に二つの渦が形成されており、中州の左側で土砂を巻き上げるような鉛直方向流速が生じている。これにより、図-22 の洪水前後の河床変動高コンターに示すように、中州の左側で土砂堆積が生じている。

(3) 知古地区の土砂堆積を抑制するための河道是正案

本節では、知古地区の 16.2~16.4km 左岸付近の土砂堆積を抑制するための河道是正策について検討する。4.(2)の検討結果より、知古地区は堤防線形と低水路線形の関係から、大規模洪水時には洪水流の主流が走る内岸側に位置している。このため、低水路幅がやや狭くなっている 16.6km 左岸付近で鉛直流速を伴いながら洪水流が高水敷に乗り上げ、その後、低水路幅が広がる 16.4 km 付近で下降流を伴いながら低水路に流入している。この結果、洪水流が高水敷に乗り上げる 16.6km 左岸高水敷際付近や、下降流の生じる 16.2~16.4km 付近で土砂堆積が生じていた。このため、是正河道では低水路幅の狭くなっている 16.6km 付近の低水路を拡幅し、その上下流の高水敷形状を緩傾斜(船底形河道)で連続的に変化するように摺りつけた。また、是正河道では、16.2~6.4km の中州は掘削するようにした。図-23 は現況河道と是正河道の河道形状のコンター図を示す。

図-24 は現況河道と是正河道における洪水ピーク時の知古地区付近の3次元流況の比較を示す。是正後の河道では、16.6km の低水路幅を拡幅し、断面間が連続的に変化するように摺りつけることにより、洪水流の高水敷への乗り上げおよび、その後の 16.2km 付近の下降流が緩和されていることが分かる。図-25 は是正河道における同地点の二次流と浮遊砂濃度分布(粒径 0.2mm 以上)を示す。解析結果より、是正河道では中州を掘削することにより、現況河道で見られた中州を境に形成されていた二つの渦が無くなり一つの渦となっている。図-26 は現況河道と是正河道における洪水前後の河床変動の比較を示しており、上記のような河道是正を行い、二次流や鉛直方向の流速を低減させることにより、是正河道では中州が形成されている 16.2~16.4km の土砂堆積が現況河道と比べて緩和されることが分かった。

5. まとめ

本研究で開発した掃流砂と浮遊砂を一体的に扱う非静水圧準三次元洪水流・河床変動解析法は、低水路から高水敷への流れと土砂の輸送など、3次元的な流れに伴う細粒土砂の挙動が解析可能であり、構築した高精度な洪水流・河床変動解析法は土砂堆積を抑制し安定な船底形河道の縦横断面形の検討に有効であることを示した。本研究では、赤地地区や知古地区のように、洪水ピーク時に複断面的蛇行流れ又はそれに近い流れとなり、主流が高水敷に乗り上げる付近では、低水路から高水敷に向かう二次流・鉛直流速がなるべく小さくなるように緩やかな低水路線形を有する河道縦横断面形を設計することが重要であることを示した。

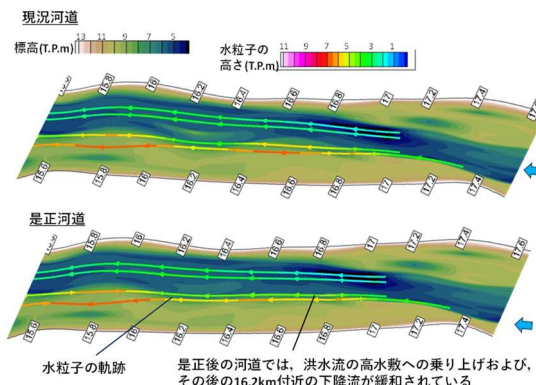


図-24 現況河道と是正河道における知古地区付近の3次元流況の比較

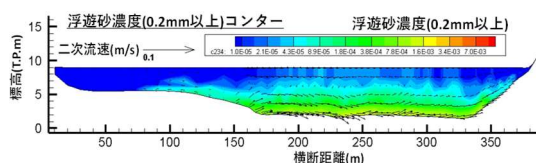


図-25 是正河道における洪水ピーク時の二次流分布・浮遊砂濃度分布(0.2mm 以上)のコンター図

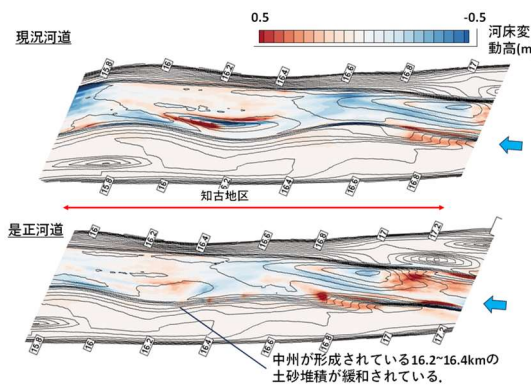


図-26 現況河道と是正河道における洪水前後の河床変動の比較

⑦研究成果の発表状況・予定

- ・ これまでに発表した代表的な論文
長谷部夏希，山口広喜，後藤岳久，福岡捷二：船底形河道における低水路と高水敷の境界付近での細粒土砂の堆積機構―安定な船底形河道の設計に向けた検討―，河川技術論文集，第 27 巻，pp.463-468，2021.6.

⑧研究成果の社会への情報発信

- ・ 本研究の成果は，下記URLの中央大学福岡ユニットのHPで公開し，常に情報発信する。
(URL：<https://sfuku.r.chuo-u.ac.jp/top/>)
- ・ 河川流域技術研究会（中央大学研究開発機構主催，来場人数：40人程度）において，国土交通省の水資源国土保全局等の技術職員，国土技術政策総合研究所等の研究職員および大学の研究者の方々に対して成果を発表する。
- ・ 中央大学理工学研究所・研究開発機構研究発表会／大学院理工学研究科RA研究発表会において，学内・学外研究者および一般向けに成果を発表する。
- ・ 研究室の公開イベント(中央大学の学園祭(開催日：11/4(土)，11/5(日))，来室人数：100人程度，オープンキャンパス(開催日：7/30(土)，7/31(日))，来室人数：100人程度)において，一般および一般学生向けに研究成果の情報を発信している。

⑨表彰、受賞歴

無し

⑩技術研究開発の今後の課題・展望等

本研究では、掃流砂と浮遊砂のそれぞれについて運動方程式と連続式を解析することにより、両者の非平衡運動を一体的に評価することの出来る準三次元洪水流・河床変動解析法を開発している。これにより、船底形河道に改修された遠賀川において、洪水時の主流・二次流を伴う三次元的な流れや乱れの作用により、低水路を移動している掃流砂が浮遊砂に遷移し、低水路と高水敷の境界付近に輸送され、そこに細粒土砂が堆積する機構を明らかにした。この解析結果を踏まえ、低水路と高水敷の境界付近の土砂堆積の顕著であった赤地地区や中州への土砂堆積が顕著であった知古地区について、船底形河道において土砂堆積を抑制する低水路線形・河道断面形の是正策を示した。このことから、構築した解析法は、高水敷への細粒土砂の堆積を抑制するための河道形状の検討に有効なツールとなり得ることが分かった。

本研究の成果より、洪水ピーク時に複断面的蛇行流れ又はそれに近い流れが生じ、主流が高水敷に乗り上げるような箇所付近では、強い二次流や鉛直流速が生じ、これが高水敷や中州への土砂堆積を生じさせていた。このことから、様々な河道に対して、二次流や鉛直流速がなるべく小さくなるような船底形河道の河道縦横断面形の設計技術を確立ことが今後検討すべき課題と考えている。

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

我が国の河川の断面形において、一般的に採用されている複断面河道に対して、遠賀川で実施されているように高水敷を緩傾斜化して切り下げた船底形河道は、洪水の流下能力を向上させるとともに、水際付近の横断形状が連続的に変化することから、治水と河川環境の調和、河川景観の向上にとって有効な断面形であるとされている。

しかし、複断面河道の高水敷を切り下げて緩傾斜化した場合、低水路と高水敷の境界付近に細粒土砂が堆積し易いことや、その堆積箇所への樹木の進入・樹林化の進行などが懸念されており、土砂堆積を抑制できるような船底形河道の設計技術が求められている。

これに対して本研究では、洪水中の三次元流れとそれに伴う浮遊砂・掃流砂を一体的に扱うことにより、改修河道に対する洪水時の3次元的な土砂の挙動を解析することで、細粒土砂の堆積を抑制する船底形河道の横断形状、低水路線形、直線的な区間と蛇行区間の接続区間での船底形断面形の緩和の仕方等、安定な船底形河道の設計に対する有効な情報を提供している。

参考文献

- ・ 笹木拓真，宮原幸嗣，福岡捷二：複断面から船底形河道への改修による洪水流況及び低水路河床高の変化，河川技術論文集，第20巻，pp.277-282，2014.
- ・ 後藤勝洋，後藤岳久，瀬尾敬介，福岡捷二：大規模洪水による高水敷化した砂州河岸の洗掘に伴う船底形断面形の形成，河川技術論文集，第29巻，pp.329-334，2023.