

二瀬ダム下流の粗粒化河道における ダム還元土砂の動態評価

EVALUATION OF SUPPLIED-SEDIMENT DYNAMICS ON THE ARMORED BED
IN THE DOWNSTREAM OF FUTASE-DAM RESERVOIR

竹澤祥太¹・田中規夫²・八木澤順治³・本戸卓美⁴
Shota TAKEZAWA Norio TANAKA, Junji YAGISAWA, Takumi HONDO

¹正会員 修(工) 前 埼玉大学大学院 理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

²正会員 工博 埼玉大学大学院教授 理工学研究科・(兼)埼玉大学研究機構レジリエント社会研究センター
(〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

³正会員 博(学) 埼玉大学大学院助教 理工学研究科・(兼)埼玉大学研究機構レジリエント社会研究センター
(〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

⁴前 國土交通省 関東地方整備局 二瀬ダム管理所 (〒369-1901 埼玉県秩父市大滝 3931-1)

For improving river environment, artificial sand supply is recently conducted in downstream of dam reservoirs. However, there are many unknowns regarding how the sediment supply affects the bed material size and its dynamics at a flood event. Therefore, the purpose of this study is to clarify quantitatively the dynamics of artificial supplied sand in armored bed by proposing new model for calculating bed shear stress in the cobble layer. Quasi-three dimensional model has been developed considering the sheltering effect by boulders and decrease of bed shear stress. 2D model and the quasi 3D model are compared at flood events in downstream of the Futase Dam. Dynamics of sedimentation height and the deposited mean diameter were analyzed in the simulation. The quasi 3D model can express well the sedimentation at an inner side of meandering part of the river. The size of deposited material in gravel layer is more than 4cm. The model has a possibility to express the dynamics of supplied sediment motion in armored rivers.

Key Words : dynamics of artificial supplied sand, armored bed, Futase Dam, Quasi-three dimensional model

1. はじめに

ダム下流河道の河床においては、上流からの供給砂礫がダムによって遮断されたことに伴い、河床の粒径が粗粒化するというアーマーリング現象が生じる。粗粒化した河床では、魚類や水生昆虫等のハビタットの消失や底質の固定化による礫付着藻類の異常繁茂といった環境面での悪影響が発生している場合も多い。河床の粗粒化対策として、近年では貯水池の堆砂を活用したダム下流河川への土砂還元実験が実施されている¹⁾。しかし、ダム放流量と還元土砂の応答特性との関係については不明な点が多く、年間に還元すべき土砂量や適切な土砂の粒径の把握が困難な状況にある。還元土砂の動態を定量的に把握するために、いくつかのダム下流河道において河床変動計算による数値解析が行われている^{2) 3)}。土砂還元による変化は長期的に把握する必要がある。多くの場合、平面二次元計算は、計算負荷が大きく長期間の計算には不向きであるため、数値解析には一次元計算が多用されてきた。計算時間のデメリットがあるが、還元土砂の動態予測の精度を向上させる還元土砂の量や質には不可欠であると考え、本研究では流砂量が増大する年最大規模の短期間の出水時に着目し、平面二次元洪水流解析法を適用する。

土砂動態を把握するうえでは、河床の底面に働く底面せん断力を適切に評価する必要がある。しかし、粗粒化した河道では出水が発生しても、表面に存在する巨礫の遮蔽効果により、移動成分である砂礫がほとんど移動しないこともある。従来の底面せん断力評価手法では巨礫により遮蔽された領域の評価が十分でないため、河床勾配や水深等に対して底面せん断力を過大に評価している課題がある。特に、ダム下流河川は急勾配であるため、流砂量を過大に算出してしまう懸念がある。

粗粒化河道ではないが、原・田中⁴⁾は、株状粗度群が配置された開水路流れを鉛直方向に表面層領域と粗度層領域と二層に分け、各層の流速や底面せん断力を算出する数値解析モデルを提案している。このモデルにより、株状粗度群の内部の底面せん断力の低減が表現されている。

そこで、本研究では上記のモデルを改良し、大礫・巨礫群が配置された領域を礫層領域として、平面二次元の枠組みの中で、礫の遮蔽効果を考慮した底面せん断力を算出する新たな数値解析モデル(準三次元モデル)を提案する。そして、ダム下流の粗粒化河道における還元土砂の動態を精度良く評価し、土砂堆積特性を明らかにすることを目的とする。

2. 研究方法

(1) 磯の遮蔽効果を考慮した底面せん断力を算出する準三次元モデル

従来、平面二次元計算では河床に作用する底面せん断力を摩擦速度 u_* を用いて式(1)のように求める場合が多い。

$$\tau = \rho u_*^2 \quad (1)$$

しかし、粗粒化した河道において巨磯の形状抵抗で底面の表面抵抗が大きく減少している場合、磯の遮蔽効果を考慮した底面せん断力 τ_b を求める必要がある。 τ_b は以下に示すように、各領域に作用する応力のつり合い式と連続式を解くことにより算出する。本研究で扱う磯は、山本⁵が定義する粒径区分を参考とし、粒径が 126-4096mm の大磯・巨磯とした。図-1 に、粗粒化河道に作用する応力の模式図を示す。図-1(a) に示すように、表面層領域では 2 つの応力が作用するとし、以下の式が成り立つ。

$$\tau_{w2} = \tau_{as} \quad (2)$$

ここに、 $\tau_{w2}(=\rho g(H-h_{cob})I_e)$ は表面層流体に作用する重力の斜面方向成分 (N/m^2)、 $\tau_{as}(=\rho f_{as-noncob}(u_2-u_1)^2 A_{noncob})$ は境界面に作用するみかけのせん断力 (N/m^2) である。みかけのせん断力とは、開水路流れにおいて相互に作用する 2 つの領域が存在する場合、その領域間で運動量交換が起こることにより作用する力である⁶。ここに、 H :水深(m)、 h_{cob} は大磯・巨磯の高さ(m)、 I_e :エネルギー勾配、 $f_{as-noncob}$:境界混合係数、 u_1 :磯層内平均流速 (m/s)、 u_2 :表面層内平均流速 (m/s)、 A_{noncob} :磯層と表面層の境界面における大磯・巨磯以外の面積割合である。磯層領域では、図-1(b) に示すように、4 つの応力が作用するとし、以下の式が成り立つ。

$$\tau_{w1} + \tau_{as} = \tau_c + \tau_b \quad (3)$$

ここに、 τ_{w1} は磯層内流体に作用する重力の斜面方向成分 (N/m^2)、 τ_c は大磯・巨磯の抗力 ($=0.5\rho u_1^2 C_D S M$) (N/m^2) である。本研究では、 S は大磯・巨磯の投影面積 (m^2)、 M は単位面積に占める大磯・巨磯の密度 (個/ m^2)、 C_D は抗力係数 ($=0.5$) とした。また連続式は、各領域の平均流速のパラメータを用いることにより、以下の式が成り立つ。

$$U \cdot H = u_1 \cdot h_{cob} + u_2 \cdot (H - h_{cob}) \quad (4)$$

ここに、 U は断面平均流速 (m/s) である。平面二次元浅水流モデルに、式(2)、(3)、(4)より未知数 u_1 、 u_2 、 τ_b を算出する方法を組み合わせ、準三次元モデルを構築した。

(2) 対象河道および解析ケース

本研究では、2003 年度から 2010 年度まで土砂還元事業が実施され、近年、土砂還元を再開した二瀬ダム下流河道を選定した。計算領域は、上流端を二瀬ダム放流口(距離標 141K)、下流端を砂防堰堤直上(138K)とし、計算領域

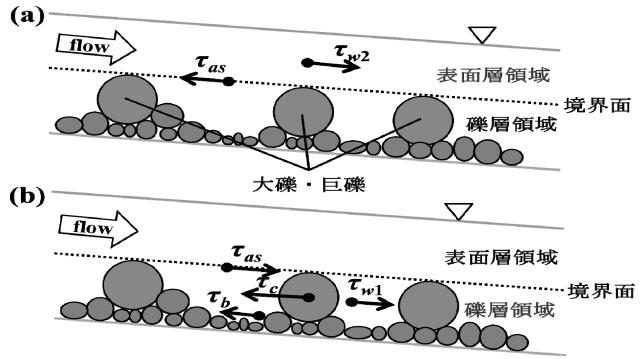


図-1 粗粒化河道の各領域に作用する応力の模式図

(a)表面層領域、(b)磯層領域

表-1 解析ケース一覧

ケース	解析手法	河床変動計算	還元土砂量 [m³/洪水]	解析対象出水
1	平面二次元	無し	0	2008年9月
2	準三次元			
3	平面二次元	有り	700	
4			1530	2006年10月
5	準三次元		700	
6			1530	

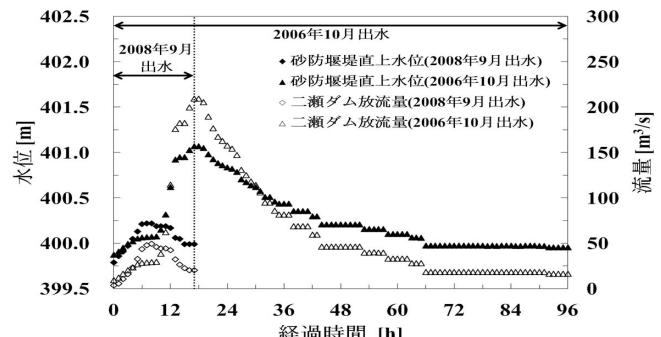


図-2 解析対象出水の水位および流量波形

内にグリッドを作成した。流下方向に 378 個、横断方向に 41 個とし、河道中央のグリッドサイズが約 $5m \times 5m$ となるように作成した。二瀬ダム下流河道における大磯・巨磯に関して、既往調査⁷と 2013 年 5 月に実施した現地調査を基に、大磯・巨磯の磯高さ h_{cob} を計算領域の上流側から 3 区間に 24cm, 17cm, 15cm と設定し、式(4)を用いた。本研究で行った解析ケースを表-1 に、今回解析対象とした出水ハイドロを図-2 に示す。まず、本研究で提案する準三次元モデルの有効性を検証するために、2008 年 9 月中規模出水(ピーク流量約 $50 m^3/s$)を対象とした解析を行った。後に、2006 年 10 月の大規模出水(ピーク流量約 $200 m^3/s$)を対象とし、還元土砂量を変化させた河床変動計算を行った。解析は、平面二次元計算と本研究で提案する準三次元計算を実施し、比較を行った。

(3) 2008 年 9 月出水

本研究で提案する準三次元モデルの有効性を確認するため、2008 年 9 月中旬の小規模出水を対象に、移動限界粒径を用いて検証を行った。移動限界粒径は、以下の岩垣の式⁸を用いた。

$$d_{cri} = u_* / 80.9 \times 10^5 \quad (5)$$

ここに、 d_{cri} は移動限界粒径 (mm)、 u_* は摩擦速度 (m/s) で

ある。摩擦速度は、平面二次元計算のケースでは、

$$u_* = \sqrt{g H I_e} \text{ (平面二次元)} \quad (6)$$

とした。ここに、 τ は平面二次元モデルで算出される底面せん断力 (N/m^2)、 g は重力加速度 (m/s^2)、 I_e はエネルギー勾配である。一方、準三次元計算による摩擦速度は、準三次元モデルから算出された底面せん断力 τ_b を用いて、

$$u_* = \sqrt{\tau_b / \rho} \text{ (準三次元)} \quad (7)$$

とした。ここに、 ρ は流体密度 (kg/m^3) である。式(5)に式(6)、(7)を代入することにより、解析手法に応じた移動限界粒径が得られる。このパラメータと、同時期に実施された着色礫移動実験による礫移動データ⁹⁾を比較して準三次元モデルの有効性を検討した。

(4) 2006 年 10 月出水

2006 年 10 月上旬の年最大規模の出水を対象に、解析手法と還元土砂量を変化させた、計 4 ケースの河床変動計算を行った。還元土砂量は、実際に 2006 年に還元された $5,350 m^3/\text{年}$ をその年の 2 洪水のピーク流量の比より算出した $1530 m^3/\text{洪水}$ と、その約半分の量である $700 m^3/\text{洪水}$ の 2 ケースを設定して、還元土砂量に応じた還元土砂の堆積傾向の違いを把握した。還元土砂は、二瀬貯砂ダムの平均的な粒度分布である 2003 年の堆砂(平均粒径 4 cm, 16% 粒径 0.5 cm, 84% 粒径 8 cm)とした。本研究では還元土砂を上流端給砂量として表現し、還元土砂量に対する 2006 年の総流量の比に 1 時間毎の放流量に乘じることにより、時系列の上流端給砂量を設定した。Tanaka ら¹⁰⁾より、粗粒化河道で供給された土砂は群となり、徐々に下流に進行していくため、本研究における還元土砂は掃流砂のみを扱い計算を行った。河床変動量は全粒径の流砂量の連続性を考慮し、粒径別の流砂の交換を考慮した連続式を用いた。掃流砂量は、流下方向、横断方向のそれぞれの掃流砂量は芦田・道上¹¹⁾の式を基にした、底面せん断力の作用方向を考慮した福岡・山坂¹²⁾の式を用いた。掃流砂量計算の際、平面二次元計算では、式(6)の摩擦速度を用いて、式(1)より算出した。一方、粗粒化した河床を模擬した Tanaka ら¹⁰⁾の実験では、 τ_b がゼロに近い状態であっても、1) 磡間(横断方向)の高流速部から土砂が進行、2) 磡間から礫背後の遮蔽域に安息角で崩れるように堆積、3) 遮蔽域内の堆積高が礫層内の平均流速が生じる高さ付近まで堆積すると次の礫間へ堆積が進行、という過程を繰り返し、ゆっくりと土砂フロントが進行するすことが確認されている。すなわち、礫間の高流速 u_1 と礫の遮蔽影響を受けた低流速 u_* の両方が、土砂フロントの進行に影響を与えていることが示唆された。準三次元モデルにおいて底面せん断力を算出するためには、内田・福岡¹³⁾と同様に、式(7)の u_* のみならず、 u_1 も考慮する必要があると考え、式(8)を用いた。

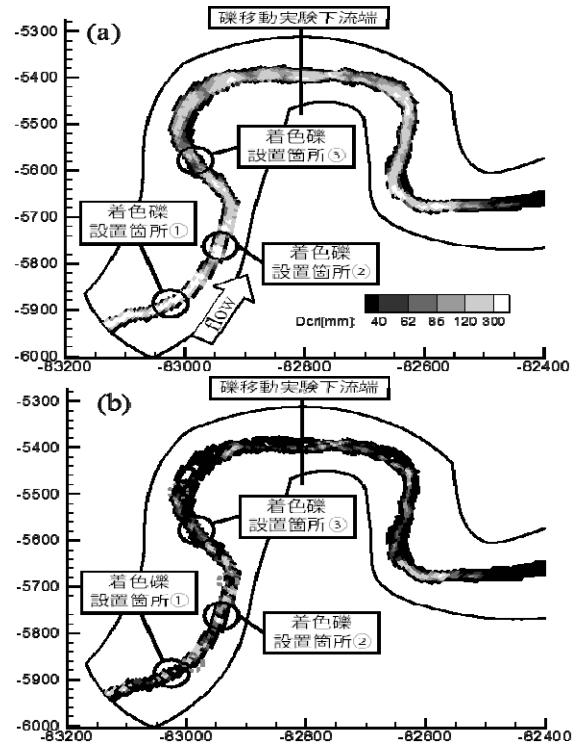


図-3 2008 年 9 月出水の流量ピーク期における移動限界粒径
(a) 平面二次元計算、(b) 準三次元計算(黒丸は移動限界粒径の小さい箇所を示している)

$$\tau_b = \rho u_* u_1 \text{ (準三次元)} \quad (8)$$

本研究の目的である還元土砂の動態を明瞭にするために、下記 3 つの計算条件を本研究では設定した。

- 現地河床は粗粒化したのり石状態であり、河床の骨格となる材料(d_{50} 粒径(約 30cm))は出水時に移動しないことが確認されている。また、粗粒化した河床を想定した実験¹⁰⁾より、礫背後の底面せん断力が激減することも明らかになっていることから、計算過程において河床が初期河床高より低下しないとする。
- 1 より、還元土砂が堆積していないグリッドでは、掃流砂量の計算を行わず、ゼロとする。
- 過剰な洗掘を防止するため、掃流砂量を式(9)により、還元土砂の堆積高に応じた値に補正した。

$$q_{Bi} = \frac{H_{sed} \times 1 \times (1 - \lambda) \times p_i}{\Delta t} \quad (9)$$

ここに、 q_{Bi} : ある粒径群の単位幅当たりの掃流砂量 (m^2/s)、 H_{sed} : 還元土砂の堆積高 (m)、 Δt : 計算時間間隔 (s)、 λ : 河床の空隙率、 p_i : ある粒径群の存在割合、である。

3. 結果および考察

(1) 準三次元モデルの検証

図-3 に流量ピーク期における移動限界粒径のコンター図を示す。礫移動実験⁹⁾が行われた計算領域の上流側を拡大表示している。図-3(a) では、実験範囲のほぼ全域に

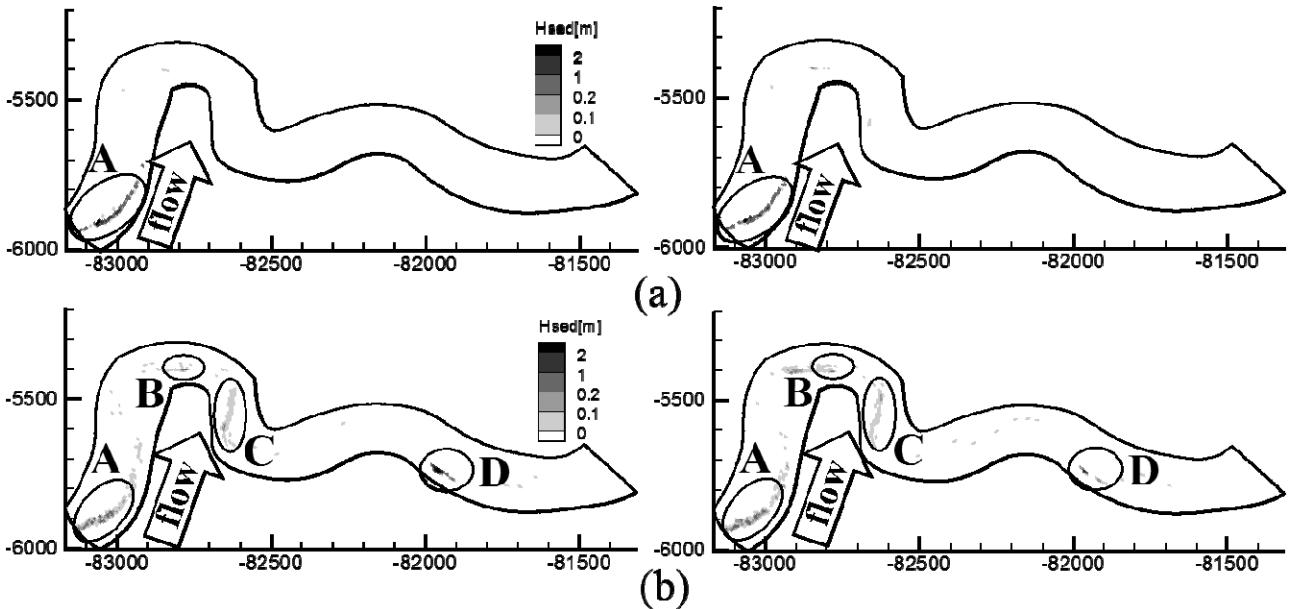


図-5 2006年10月出水後の還元土砂の堆積高 (a)平面二次元計算(左:還元土砂量 700m³/洪水, 右:還元土砂量 1,530m³/洪水),
(b)準三次元計算(左:還元土砂量 700m³/洪水, 右:還元土砂量 1,530m³/洪水)

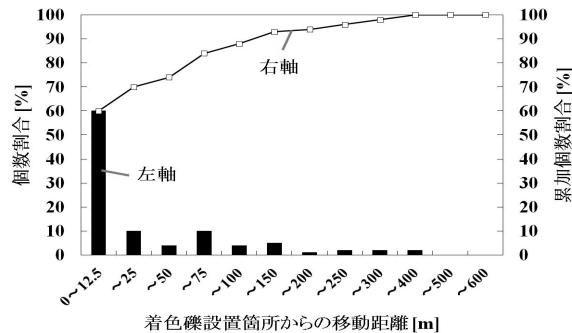


図-4 出水後の着色礫(120-300mm)の移動距離のヒストグラム

120mm以上のグリッドが存在していることが確認できる。一方、図-3(b)では平面二次元計算の結果よりも大幅に減少していることが確認できる。図-4に実験値である対象出水後の着色礫の移動距離を示すと、120-300mmの礫約6割はほとんど移動しなかった。解析結果と実験値を比較すると、平面二次元計算の結果は、値を過大に評価しており、着色礫は実験範囲下流端より下流に流されると考えられる。一方、準三次元計算の結果では、着色礫が設置箇所から流されたとしても図-3(b)の移動限界が120mm未満の値の小さい箇所で停滞すると考えられ、図-4の着色礫の移動距離と整合性が取れている。よって、準三次元モデルを導入したことにより、底面せん断力の低減を表現したこと、実測値をおおむね説明できることから、準三次元モデルは妥当であるといえる。

(2) 河床変動計算

(a) 還元土砂の堆積高

図-5に2006年10月出水後における還元土砂の堆積高のコンター図を示す。平面二次元計算の結果である図-5(a)では、両ケースともに上流端付近の土砂還元地点に土砂群Aを形成した。しかし、土砂群Aの堆積高や堆積

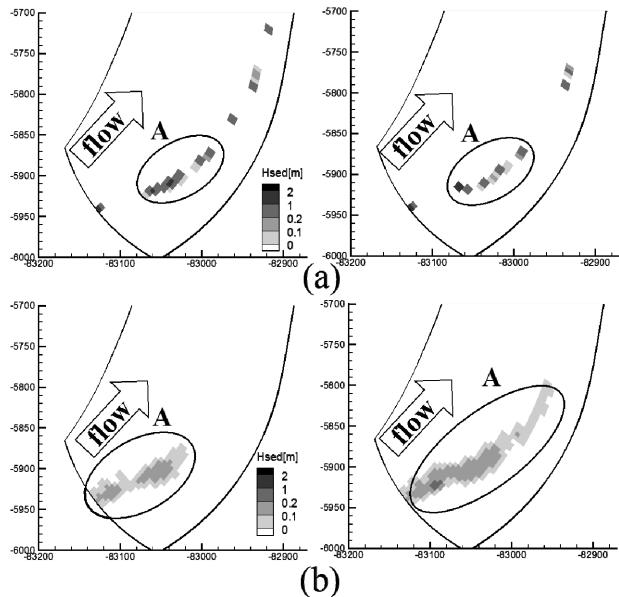


図-6 2006年10月出水の流量ピーク期における18時間後の土砂群の堆積高 (a)平面二次元計算(左:還元土砂量 700m³/洪水, 右:還元土砂量 1,530m³/洪水), (b)準三次元計算(左:還元土砂量 700m³/洪水, 右:還元土砂量 1,530m³/洪水)

範囲は、還元土砂量を変化させても差がみられなかった。一方、準三次元計算の結果である図-5(b)では、土砂群Aから抜け出した土砂が蛇行部側岸に堆積して土砂群B, C, Dを形成した。還元土砂量に応じて土砂群B, C, Dの堆積範囲に差は認められるが、河道全体に堆積している土砂量は、ほぼ等しい結果となった。図-6は、2006年10月出水の流量ピーク期における土砂群Aが堆積した地点を拡大表示した図である。平面二次元計算の結果である図-6(a)では、還元土砂量に応じた大きな特徴は確認できないが、準三次元計算の結果である図-6(b)では、土砂群Aの堆積範囲に差がみられた。準三次元計算において、流量ピーク期までは土砂群Aの堆積範囲に差が生じるが、

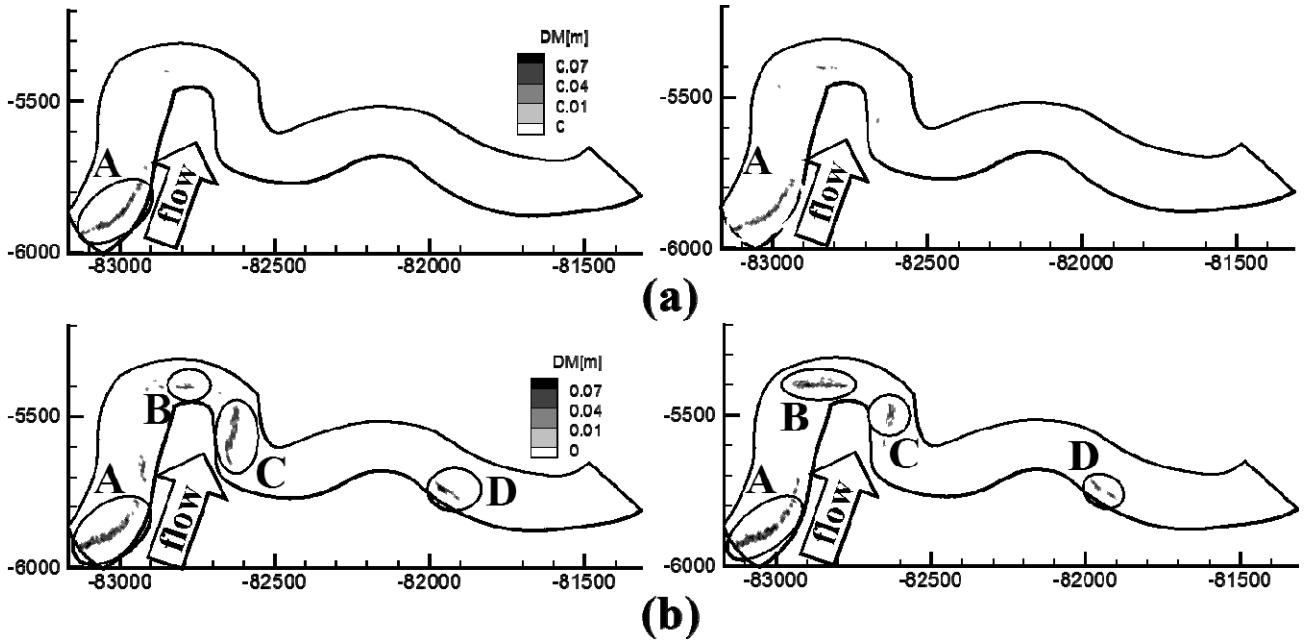


図-7 2006年10月出水後の堆積土砂の平均粒径分布 (a)平面二次元計算(左:還元土砂量 700m³/洪水, 右:還元土砂量 1,530m³/洪水),
(b)準三次元計算(左:還元土砂量 700m³/洪水, 右:還元土砂量 1,530m³/洪水)

出水後にはその堆積範囲は等しくなる結果となった。

(b) 土砂群の平均粒径

図-7に2006年10月出水後における堆積土砂の粒径分布のセンター図を示す。全体の傾向として、7cmを超えるような大粒径の礫の周囲に平均粒径前後の4cm程度の礫が堆積すること、平均粒径よりやや大きい4cm強の礫の前後に4cm弱の礫が堆積することにより、土砂群を構成していることがわかった。さらに、1cm未満のような小さい礫は計算領域には堆積せず、下流端まで流された。以上のことから、二瀬ダム下流の粗粒化した対象河道の空隙を充填させるためには、4cm以上の粒径が適している可能性がある。

(c) 蛇行部側岸の還元土砂の堆積要因 (準三次元計算)

図-8に2006年10月出水の流量ピーク期における還元土砂量 700m³/洪水のケースにおける蛇行部(図-7(b))の土砂群Bに相当)での解析結果を示す。図-8(b)は準三次元計算による摩擦速度のセンター図を示しており、黒点線は土砂群Bの外縁を表す。図-8(a)の平面二次元計算の結果と比較すると、摩擦速度が減少しており、黒点線内の値はほとんど0.1 m/s未満のグリッドで占めていることが確認できる。図-8(c)に準三次元計算による流速ベクトルと堆積土砂の平均粒径を示す。還元土砂は縮流部上流側に多く堆積しており、また内岸の流速ベクトルの向きも内岸方向に向いている箇所もみられる。これは、他の土砂群C, Dでも同様の傾向がみられた。平面二次元計算であったが、摩擦速度を過大に評価しているために、土砂が堆積せず下流端まで流されたと考えられる。よって、準三次元モデルにより、摩擦速度が小さく、流速ベクトル

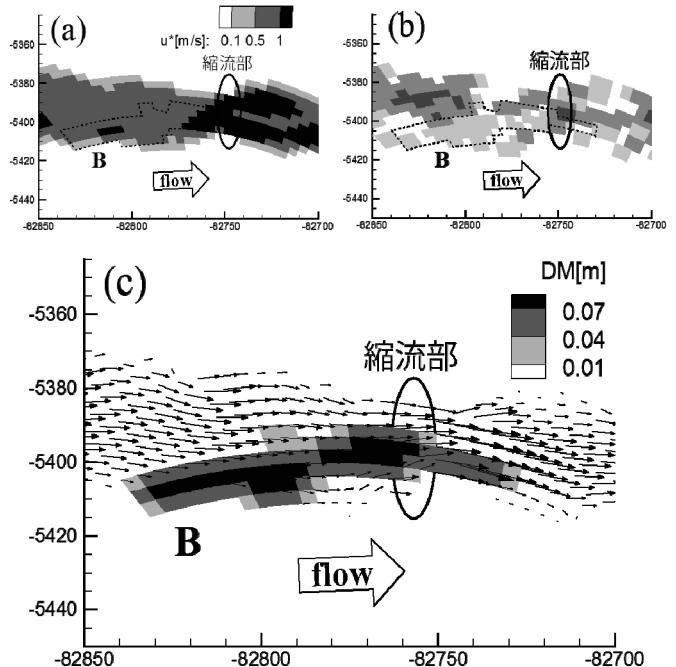


図-8 2006年10月出水(還元土砂量 700m³/洪水)の流量ピーク期における蛇行部側岸の解析結果 (a)平面二次元計算での摩擦速度(黒点線は土砂群Bの外縁), (b)準三次元計算での摩擦速度,

(c) 準三次元計算での還元土砂の平均粒径と流速ベクトル

ルが内岸方向に向いている箇所に土砂は堆積しやすいことがわかる。

(d) 現地での堆積状況

図-9は、出水後の堆積状況の写真である^{14), 15)}。図-9(b), (c), (e)の丸は還元土砂が堆積していることを表わして

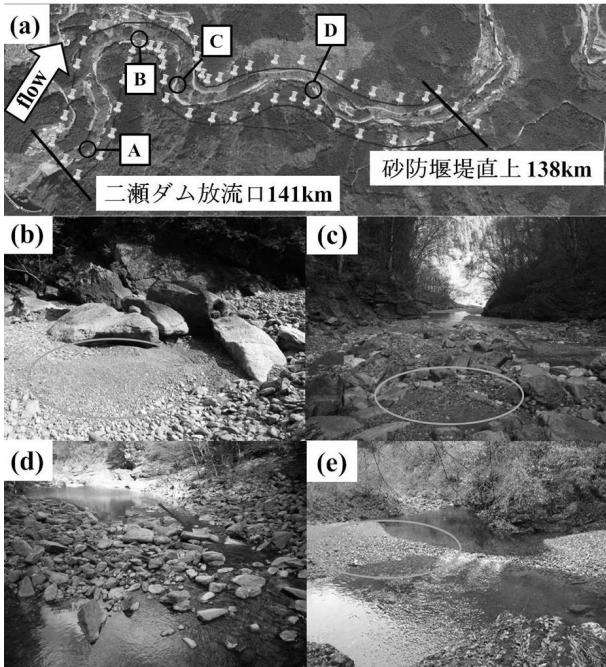


図-9 対象河川の航空写真と出水後の堆積状況の写真

(a)対象河川の航空写真(赤線と黄ピンは計算領域の外縁を表わしている), (b)A 地点における 2009 年 10 月時点での堆積状況, (c)B 地点における 2009 年 12 月時点での堆積状況, (d)C 地点における 2007 年 11 月時点での堆積状況, (e)D 地点における 2006 年 11 月時点での堆積状況

いる。解析結果と、現地の堆積状況が撮影された時期が異なるが、解析によって出水後の還元土砂が堆積した C 地点以外の 3 地点では、現地においても還元土砂が堆積していることが確認された。また、従来の平面二次元計算で堆積状況を表現できなかった B, D の 2 地点では、準三次元計算により堆積状況を表現できた。このことから、本研究で提案する準三次元モデルにより、短期間の計算ではあるが、粗粒化した河道における還元土砂の動態を、従来の平面二次元計算より精度良く表現している可能性がある。

4. 結論

本研究では、礫の遮蔽効果を考慮した底面せん断力の評価手法を提案し、その有効性について検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 本解析範囲の流量規模では、1 回の冬季出水による還元土砂の堆積範囲は還元土砂量に大きく依存しなかった。
- 2) 堆積土砂群を構成する主な材料が投入土砂の平均粒径を超える大規模な粒径であったことから、粗粒化した河床の空隙を充填させるのに適した粒径があると考えられる。
- 3) 短期間の計算ではあるが、粗粒化した河道における土砂堆積特性を明らかにしたことにより、将来的な還元土砂の動態予測ができる可能性を示した。

長期的な動態を明らかにするため、今後も継続的な調査解析を行うことが必要である。

謝辞: 本研究の一部は、水源地環境センター・WEC 応用生態研究助成(2013-03 ; 代表・田中規夫)により実施された。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 山本洋太郎, 木村康文: 三春ダムにおける土砂下流還元の効果について, 河川, 12 月号, pp. 65-70, 2005
- 2) 南修平, 竹林洋史, 藤田正治: 人工的土砂供給に伴う下流河川の物理環境応答特性, 河川技術論文集, 第 15 卷, pp. 465-470, 2009
- 3) 武藤由育, 志字知誠, 山下正浩, 竹林洋史, 湯城豊勝, 鎌田磨人, 赤松良久, 川口洋一, 中田泰輔: 置土された土砂の流下過程の数値解析モデルの構築と実河川における適用, 土木学会論文集 B1, Vol.67, No.4, pp. 817-822, 2011
- 4) 原達章・田中規夫: 群落内流速と底面せん断力変化を考慮した株状草本の流失限界評価に関する研究, 水工学論文集, 第 55 卷, pp. 1417-1422, 2011
- 5) 山本晃一: 構造冲積河川学 - その構造特性と動態, 山海堂, 2004
- 6) 福岡捷二・藤田光一: 複断面河道の抵抗予測と河道計画への応用, 土木学会論文集, 第 411 号/II-12, pp. 63-72, 1989
- 7) 土砂還元による下流河川環境の再生検討業務報告書, 株式会社建設環境研究所, 2009
- 8) 岩垣雄一: 限界掃流力の流体力学的研究, 土木学会論文報告集, 第 41 号, pp. 1-21, 1956
- 9) 二瀬ダム堆砂検討業務報告書, 日本工営株式会社, 2009
- 10) Tanaka, N., Yoshizawa, Y., Habib, S.: Boundary layer development in roughness layer at modeled armored gravel bed stream and the sand movement in the region, E-proceedings of the 36th IAHR World Congress, 2015, The Hague, the Netherlands, 2015(accepted).
- 11) 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, 第 206 号, 土木学会, pp. 59-69, 1972
- 12) 福岡捷二・山坂昌成: 直線流路の交互砂州, 第 27 回水理講演会論文集, pp. 703-708, 1983.
- 13) 内田龍彦, 福岡捷二: 底面流速解法による連続する水没水制群を有する流れと河床変動の解析, 土木学会論文集 B1, Vol.67, No.1, pp. 16-29, 2011.
- 14) 二瀬ダム堆砂検討業務報告書, 日本工営株式会社, 2009.
- 15) 土砂還元による下流河川環境の再生検討業務報告書, 株式会社建設環境研究所, 2008.

(2015. 4. 3受付)