

フラッシュ放流の観測と2次元不定流解析

広島大学大学院	学生会員	○中土井佑輔
広島大学大学院	学生会員	吉武央氣
広島大学大学院	学生会員	岩苔和広
広島大学大学院	フェロー会員	河原能久
広島大学大学院	正会員	椿 涼太

1. 序論

河川における季節的な出水等の流況変動は、河川生態系や河川の自浄作用の維持に関与しており、河床攪乱や河床に溜まった有機物の掃流を促し、平常時の本川と止水域やワンドとの連続性を高める等、河川環境に大きな役割を果たしている¹⁾。しかし、ダムが建設された場合、その下流域において、流量の平滑化や土砂供給量の減少を引き起こし、河川生態系に影響を及ぼすことがわかってきた。そこで、近年ダム下流の河川環境を改善する試みとして、人為的に小洪水を発生させるフラッシュ放流が実施されるようになってきた。広島県の三次市に位置する灰塚ダムにおいても、鮎の稚魚の放流前に、河床に付着した藻類の剥離、更新等を目的にフラッシュ放流が実施されている。しかし、フラッシュ放流による河床攪乱や付着藻類の剥離等の効果に関する調査は少なく、河道内で生ずる実現象の多くは不明であるという現状にある。

本研究では、フラッシュ放流の実態を明らかにすることを目的として、灰塚ダムの下流域において現地観測を実施するとともに、2次元不定流解析を行い、フラッシュ放流時の流れの特徴や河床材料の移動、付着藻類の剥離状況を把握する。

2. 現地観測

灰塚ダムは、図-1 に示すように、一級河川江の川の支流である上下川の上流に位置する多目的ダムである。本研究では、灰塚ダムにおいて平成21年3月25日に実施されたピーク流量 $100\text{m}^3/\text{s}$ 、ピーク流量継続時間90分のフラッシュ放流（図-2）を対象に現地観測を行った。観測区間は灰塚ダムの下流約8kmの区間、計測項目は流量、水位、Chl-a、SS、河床洗掘深であった。さらに、フラッシュ放流の前日と翌日に河道内の空中写真撮影、5月中旬に河川測量、河床の粒径調査を行った。

流量はADCPを用いて計測した。計測断面は図-1 に示す St.4、14 であり、St.4 では平常時の支川からの流入流量を、St.14 で

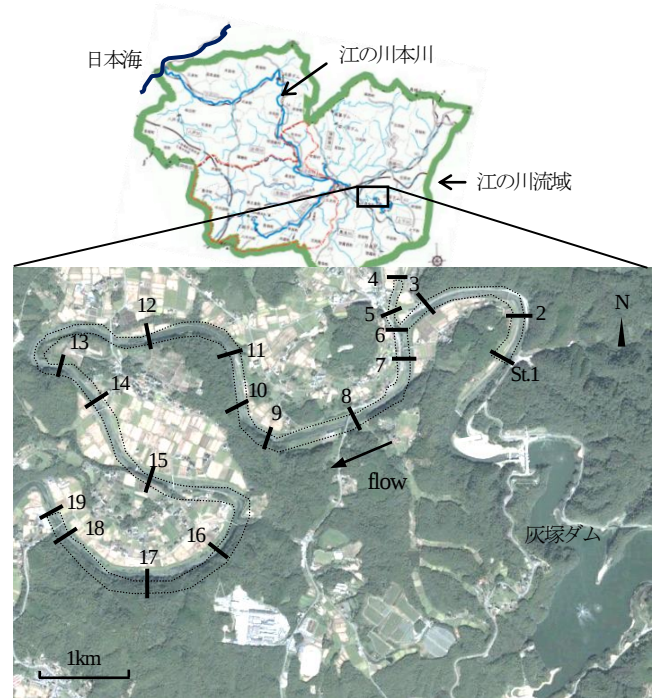


図-1 灰塚ダムの位置

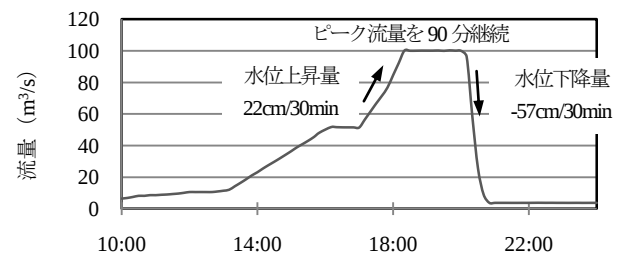


図-2 放流量ハイドログラフ

はフラッシュ放流時の流量の時間変化を計測した。水位は圧力式水位計と大気圧計を用いて1分間隔で計測した。計測断面は St.1～19 であり、St.2、9 では兩岸に水位計を設置した。St.2 では左岸側、St.9 では右岸側の植生域に設置し、その他の水位計は河道内に入りやすい天端側の水域を設置場所とした。河床洗掘深は、洗掘深計²⁾が示す電圧を1分間隔で計測した。洗掘深計は、図-3 (a) に示すように、内部に抵抗器を固定した高さ5.0cmの円柱状のコンクリート製ブロックを3段重ねて電極でつなぎ、ブロックを流れる電圧を底部のデータロガーで記録する装置である。これを、図-3 (b) に示すように上段

のブロック上面が河床面と一致するように設置した。河床洗堀により上段のブロックが流失すると電圧が急減するため、その時刻を約5cmの河床洗堀が発生した時刻と見なすことができる。計測断面は、St.1～St.2間、St.6であり、それぞれ左岸側の植生域、左岸側の水域を設置場所とした。Chl-a、SSは計測断面をSt.6、18として、フラッシュ放流時に採水ボトル(500ml)を用いて表層水を30分間隔で採水し、Chl-aは多項目水質計、SSは吸引濾過により分析を行った。また、フラッシュ放流前に、ダムと支川からのChl-a、SSの流入量を計測するため、St.4、ダムにおいても採水、分析を行った。なお、Chl-aは藻類全般が含有する葉緑素であり、水中に存在する藻類の量の指標となる。そのため、Chl-aの時間変化を計測することでフラッシュ放流により河道内に供給された(剥離した)付着藻類の量を把握した。

5月中旬には河川測量として、河道の横断測量、天端の測量、橋脚、堰の測量を行い、観測区間の地形データを得た。測量は、トータルステーションとRTK-GPSを用いて全70断面で行った。また、同時期に観測区間内の河床材料の構成を把握するため、水中カメラとスタッフを用いて粒径調査を行った。調査断面は、図-1に示す全19断面のうち、比較的水深の浅いSt.1、6、10の下流、14の下流、18の上流とした。さらに、フラッシュ放流の前日と翌日に、ラジコン飛行機を河川上空に飛行させ空中写真の撮影を行った。この空中写真を用いて、観測区間内の植生分布、およびフラッシュ放流による植生の倒伏範囲を判定し、河道内の植生分布を作成することで植生による流れの抵抗力の発生範囲を明確にした。

3. 数値解析

流れの基礎方程式には、一般座標系表示に変換した2次元浅水流方程式を用いた³⁾。また、本観測区間の河道内には主に草本から構成される植生域が広範囲にわたって繁茂していたため、基礎方程式に以下に示す植生の抵抗力項を導入した⁴⁾。

$$N_a \frac{\vec{F}_d}{\rho} = \frac{1}{2} N_a C_d A \vec{u} |\vec{u}| \quad (1)$$

ここに、 $\vec{F}_d$:植生の抵抗力、 N_a :植生密度、 ρ :水の密度、 C_d :抗力係数、 A :投影面積、 $\vec{u}$:流速である。

離散化手法として有限体積法、変数配置にスタグガード格子を用い、移流項の離散化には風上差分、時間積分にはAdams-Bashforth法を用いた。

境界条件として、上流端(St.1)に図-2に示す放流量ハイドログラフを、下流端にSt.19にて計測した水位ハ

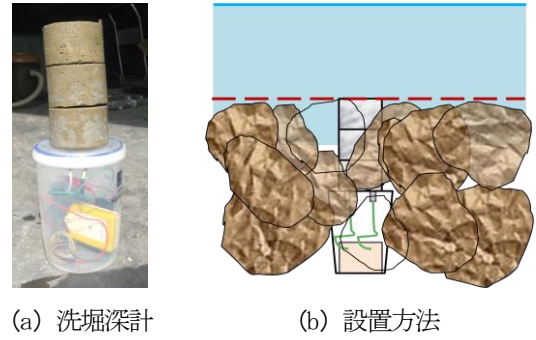


図-3 洗堀深計の設置方法

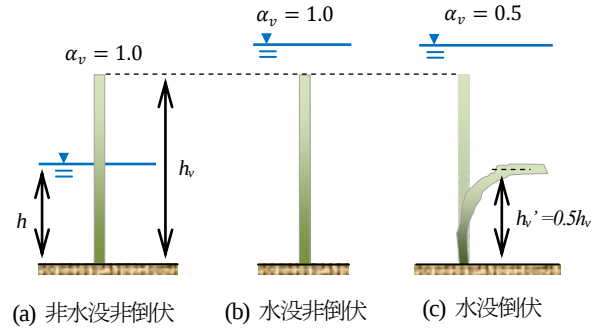


図-4 水位上昇に伴う h' と α_v の変化

イドログラフを与えた。上流端における流下方向の流量フラックスの反変成分 Q^x の横断分布は、水深に応じて(Manning則より $h^{5/3}$ に比例させて)与えることとし、その比例定数は0～1の間で以下の式より決定した。

$$\sum_{j=1}^{NY} (Q^x / J) = Q_{in} \quad (2)$$

ここに、 Q_{in} :上流端からの流入流量である。また、初期条件としては上流端および下流端で与える設定流量、設定水位のもとで収束した定常解を用いた。定常解の初期条件は、下流端において全断面で水深が生じるように新たに設定した水位を与え、設定水位を用いて上流方向に一定勾配(河床勾配)で与えることとし、各断面における水位の横断勾配は0とした。初期水深は、このようにして決定された水位から河床高を減じて求めた。 Q^x の初期条件は、上述の上流端の Q^x の算出方法と同様である。すなわち、各断面での流量が設定流量(式(5))になるように与え、その横断分布は水深に応じて与える。 Q^y については、全ての定義点で0とする。

さらに、式(1)で表わされる植生の抵抗力中の抗力係数 C_d は適当に1.0とし、投影面積 A は以下の式より算出した。

$$A = \alpha_v \times D \times h' \quad (3)$$

ここに、 α_v :植生の倒伏に応じて変化させる係数である。投影面積は、水位に応じて変化するため、本解析モデルにおいては図-4の(a)～(c)を想定し、 h' と α_v を変化させた。

4. 結果と考察

4.1 フラッシュ放流時の流れの再現性

図-5に、St.14における流量ハイドログラフの実測値(ADCPによる計測流量)と解析値の比較を示す。図より、両値は概ね一致しており、さらに、ダムからの放流量ハイドログラフが波形を変形させずにSt.14に伝播しているため、本解析モデルはフラッシュ放流による流量変化を良好に再現していると言える。解析値のピーク流量は実測値に比べて比較的小さいが、これは、流量計測の誤差や、解析では支川からの流入流量を考慮していなかったことに起因すると考えられる。

次に、初期流量、流量停滞期、ピーク流量時の流量が準定常状態にあるA～Cにおいて水位縦断分布の実測値と解析値の比較から、両値は概ね一致していることを確認した。しかし、これは縦断方向の標高差に対して水深の上昇量が小さいことに起因し、標高に大きく依存した結果であるため、水位縦断分布よりフラッシュ放流時の流れの再現性を評価することは困難である。

そこで、図-6に各水位計測地点における水位ハイドログラフの実測値と解析値の比較を示す。同図には、水位増加による植生の倒伏に伴う植生密度の増加の有無を考慮した2つの解析結果を併記した。実現象としては、植生が倒伏により植生密度が増加することが推測されるが、図より、この現象を考慮すると水位上昇量が大きくなることがわかる。これは、分布密度の増加が河道の疎通能力を低下させ、上流から流下する水を滞留させるためである。また、全断面において水位の解析値はピーク水位から定常状態に至るまで急激に低下し、上流端で与えた流量ハイドログラフに大きく依存した形状となっている。この原因として、現地観測において植生の密度・高さ・直径および倒伏条件が不正確であったことが挙げられる。数値解析の結果、河道内植生はフラッシュ放流時の流れに大きな影響を及ぼすこと、したがって、植生の抵抗力の評価方法が重要であることが確認された。

4.2 河床材料の移動

図-7に、St.6において洗掘深計より計測した電圧と、解析結果として洗掘深計の設置地点における無次元掃流力の時間変化の比較を示す。粒径調査より、St.6における河床礫の代表粒径が5cmであることを確認したため、 D を5cmとした τ^* が限界掃流力0.05以上(岩垣の実験式⁵⁾)であることを土砂移動の発生条件とすることができる。図より、 τ^* が0.05以上となる時刻において電圧が不安定に減少していることから、土砂移動の発生に起因しブロックの接触不良が発生したこと

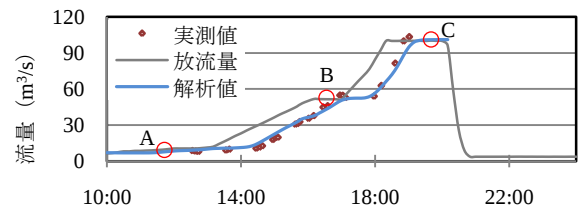


図-5 流量ハイドログラフの比較

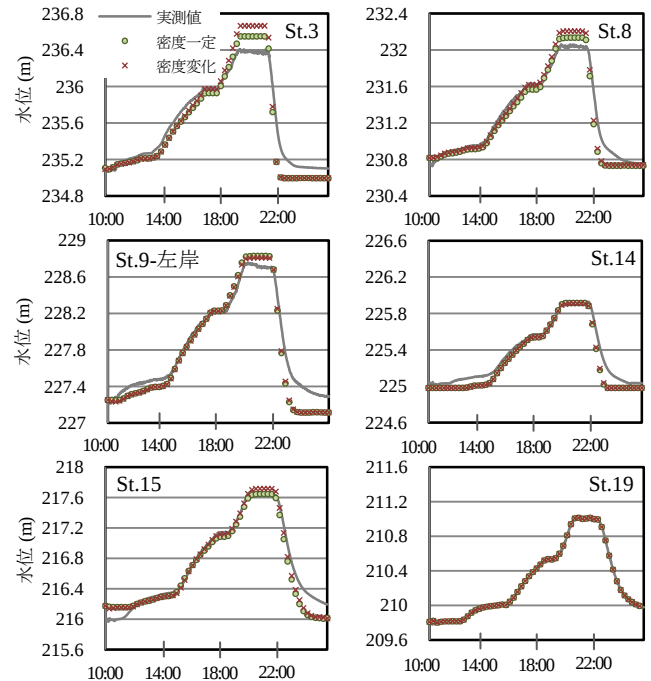


図-6 流量ハイドログラフの比較

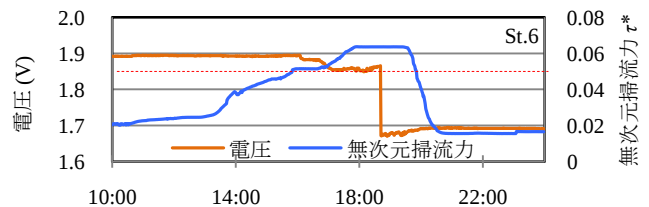


図-7 電圧と無次元掃流力の時間変化

が示唆される。また、18:40頃に電圧が急減しているため、St.6においてはこの時刻に最上部のブロックが流失したことがわかる。なお、土砂移動の発生条件は16:00頃には満たしているが、この時刻付近で電圧は急減しないことから、St.6において土砂移動の発生に伴う洗掘と埋め戻しの発生が示唆される。以上より、今回のフラッシュ放流において、St.6では洗掘と埋め戻しを繰り返し、河床材料が170分以上移動状態にあることで最上部のブロックが流失(約5cmの河床洗掘が発生)することを確認した。一方、St.1～2間に設置した洗掘深計の電圧は急減せずブロックは流失しなかったため、この地点における河床洗掘は5cm未満であったと言える。

次に、観測区間内の河床材料が10cmの単一粒径で構成さ

れるとした場合のピーク流量時の無次元掃流力と限界掃流力の比 τ^*/τ_c^* の平面分布を解析結果として、土砂移動の発生位置について定性的に評価した。淵から平瀬あるいは早瀬に変化する地点や、湾曲部の外岸側において τ^*/τ_c^* は 1.0 を超過していることが確認できたため、この地点では土砂移動が発生すると言える。このため、ピーク流量時に観測区間内で土砂移動が発生した地点は非常に少なく、観測、解析結果から今回のフラッシュ放流は河床変動が僅かな小規模の出水であることを確認した。

4.3 付着藻類の剥離

図-8 に河道内の Chl-a の収支を示す。ここに、各断面を通る Chl-a の全質量は、観測結果として得た Chl-a の時間変化を質量換算（濃度×流量）し、台形近似により積分することで算出した。図-8 よりダム直下～St.18における Chl-a の河道内供給量を断面間の流下距離で除した河道内供給率を算出すると、Chl-a については区間 A における供給率の方が高いことを確認した。ここで、解析結果としてピーク流量時の底面せん断応力 τ_0 の平面分布を図-9 に示すと、付着藻類の剥離および河床攪乱等起因する τ_0 は上流区間において大きいことがわかる。このため、観測、解析結果より、付着藻類の剥離は上流区間において活発に行われたと言える。これは、上流区間で供給された Chl-a が区間 B で沈降、あるいは流下過程で河道内植生に捕捉される等、St.18 に到達するまでに河道内でトラップされたためと考えられる。一方、SS については区間 B における供給率の方が高く、Chl-a の結果とは異なることを確認した。これは、観測区間内で河床材料の構成が異なることに依存し、岩盤で構成される上流区間においては河床攪乱による SS の増加が抑制されたためと考えられる。

5. 結論

本研究では、灰塚ダムにおけるフラッシュ放流の実態を明らかにすることを目的として、現地観測、数値解析を行い、流況の変化や河床材料の移動、付着藻類の剥離状況を評価した。本研究より得られた知見を以下に記す。

- 1) 本解析モデルは、フラッシュ放流時の流量ハイドログラフを良好に再現するが、水位ハイドログラフは上流端で与えた境界条件に大きく依存すること、水位下降期において水位変動の再現性が低いことを確認した。
- 2) 今回のフラッシュ放流は河床変動が僅かな小規模出水であったが、淵から平瀬あるいは早瀬に変化する地点や、湾曲部の外岸側においては、今回の出水においても土砂

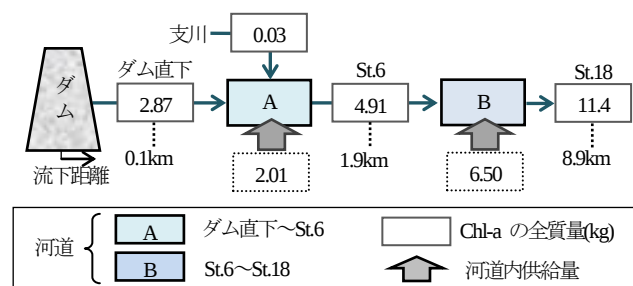


図-8 Chl-a, SS の収支構造

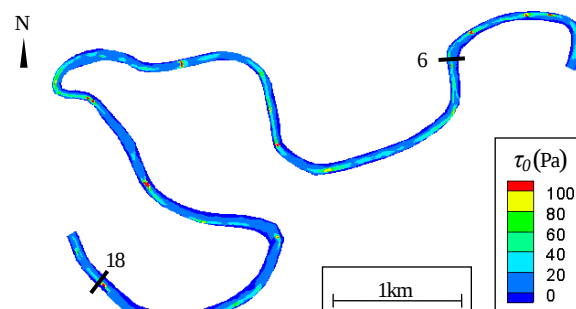


図-9 τ_0 の平面分布

移動が発生する。

- 3) 支川との合流部下流地点においては、16:00 頃から土砂移動に伴う洗堀と埋め戻しを繰り返し、河床材料が 170 分以上移動状態にあることで約 5cm の河床洗堀が発生する。
- 4) フラッシュ放流による付着藻類の供給率は上流区間、SS の供給率は下流区間において高い。

謝辞

国交省中国地方整備局灰塚ダム支所長の浜田健一氏にはフラッシュ放流に関する計測データの提供と現地観測への協力に関して感謝いたします。

参考文献

- 1) 皆川朋子, 清水高男, 島谷幸宏: 流量変動が生物に及ぼす影響に関する実験的検討, 河川技術に関する論文集, 第 6 巻, pp.191-196, 2000.
- 2) 河原能久, 内田龍彦, 吉田晋, 木村成弘: 急流礫河川における洗堀深センサーの開発, 河川技術論文集, Vol.14, pp.313-318, 2008.
- 3) 土木学会: 水理公式集 例題プログラム集, 2001.
- 4) Weiming Wu: Computational River Dynamics, Taylor & Francis Group, London, UK, 2008.
- 5) 岩垣雄一: 限界掃流力に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 41 号, pp.1-21, 1946.