

灰塚ダム下流域におけるフラッシュ放流の現地観測と数値解析

Field Observation and Numerical Simulation of Flush Discharge from Haizuka Dam

中土井佑輔*・椿涼太**・河原能久***・岩苔和広****・吉武央気****

Yusuke Nakadoi, Ryota Tsubaki, Yoshihisa Kawahara, Yasuhiro Iwakoke and Hiroki Yoshitake

* 学生会員 広島大学工学部第四類 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

** 正会員 博(工) 広島大学大学院助教 工学研究科 (同上)

*** フェロー会員 工博 広島大学大学院教授 工学研究科 (同上)

**** 学生会員 広島大学大学院 工学研究科 (同上)

Regulation of river flow by dam construction has caused a lot of changes in the river ecosystem. Recently, flush discharge, an artificially small flood by reservoir operation, has been executed widely to improve the river environment in the downstream of the dam. But the phenomena induced by the flush discharge in the river channel are not understood well because the detailed measurement has not been carried out. This study aims at clarifying the changing process in the environment of the Jouge River during flush discharge from Haizuka dam. Detailed field observation and 2-D numerical simulation have performed to gain in-depth understanding of such phenomena as sediment transport and detachment of the algae attached to riverbed materials.

Key Words: flush discharge, field observation, 2-D numerical simulation, detachment of attached algae, sediment transport

1. 序論

河川における季節的な出水等による流量の変動は、河床攪乱や河床に溜まった有機物の掃流を促し、平常時の本川と死水域やワンドとの連続性を高める等、河川環境の生態系形成維持に大きく関与している¹⁾。しかし、ダムが建設された場合、その下流域において、流量の平滑化や河床の攪乱頻度の減少、土砂供給量の減少を引き起こし、河道内植生や付着藻類の大量繁茂、河床材料の粗粒化により河川生態系へ影響を及ぼすことが指摘されている^{2)~4)}。すなわち、従来の河川流量の管理手法のように、河川において渇水時に流水の機能を損なわない正常流量を維持するだけでなく、365日毎日の河川流量管理、さらには河川流量の変動の管理の必要性が認識されるようになってきた⁵⁾。

そこで、近年では劣化したダム下流の河川環境を修復する試みとして、人為的に小洪水を発生させるフラッシュ放流が全国的に実施されるようになってきた。フラッシュ放流に期待される効果としては、河床に溜まったデトリタスや目詰まりした細粒土砂の掃流、河床礫に付着した藻類を含む付着物の剥離と掃流、平常時の本川と死水域やワンドとの連続性の発生、浮遊す

る藻類等の掃流等が挙げられ、ダム等の人為的影響の緩和効果が期待されている。

広島県の三次市に位置する灰塚ダムにおいても、付着藻類を活性化させ、アユの餌資源としての良好な生息環境を創ることを目的にフラッシュ放流を実施し、付着藻類の剥離、更新を促している。灰塚ダムモニタリング委員会⁶⁾は、灰塚ダムにおいて平成19年度に実施されたフラッシュ放流を対象に現地観測を行い、フラッシュ放流による付着藻類の剥離、更新の効果を確認している。しかし、灰塚ダムにおいてフラッシュ放流は比較的新しい取り組みであり、フラッシュ放流時に河道内で生ずる現象の多くは不明であるという現状にある。また、近年では多くの研究者^{7)~9)}がフラッシュ放流に関する調査、研究を行っているが、多くの場合フラッシュ放流前後の現地観測よりダム下流河川に対するフラッシュ放流の効果を評価しており、フラッシュ放流中の河道環境の変化に関する検討は少ない。

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、現地観測を行うとともに数値解析を行い、フラッシュ放流時の流況の変化や河床材料の移動、付着藻類の剥離等の河道環境の短期的な変化を明らかにする。具体的には、灰塚ダ

ムの下流域での現地観測において、流量、水位、河床洗掘深、クロロフィル a (以下、Chl-a) , SS の計測、河川測量、河床の粒径調査、フラッシュ放流前後の河道内の空中写真撮影を行う。次に、河川測量から3次元の地形データ、空中写真から河道内の植生分布データを取得し、2次元不定流解析で使用する解析メッシュを作成するとともに、流量と水位の観測データから数値解析の上流端と下流端の境界条件を得る。また、解析結果と観測結果を比較し解析モデルの検証を行うとともに、フラッシュ放流による河道環境の変化を解明し、フラッシュ放流の効果を評価する。

2. 現地観測

2.1 観測概要

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、水位上昇量 $22\text{cm}/30\text{min}$ のフラッシュ放流 (図-2) を対象に現地観測を行った。灰塚ダムの下流約 8km の区間 (上下川) を観測区間とし、ダム下流の約 2km 地点で支川が合流する。上下川は湾曲部を有する複雑な河道形状であり、取水堰が多く存在している。また、高水敷上には草本や樹木等の植生域が広範囲にわたって繁茂しており、河床は岩盤と約 1~100cm の礫で構成されている。

上下川での現地観測により、フラッシュ放流時の流量、水位、河床洗掘深、Chl-a、SS、の時間変化を計測した。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月中旬に河川測量および河床の粒径調査を行った。

2.2 観測手法

(1) 計測

流量は、図-3 に示す ADCP (Workhorse ADCP, Teledyne RD Instruments 社) を、河道を横断させて計測した。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 ではフラッシュ放流時の流量の時間変化を計測した。St.4 ではフラッシュ放流前に 3 分間隔で計 3 回、St.14 ではフラッシュ放流時に 30 分間隔で毎回 3 回計測を行い、それぞれ計測値に変動が少ないことを確認して計測値とした。

水位は、圧力式水位計と大気圧計 (S&DL mini model 4800, 応用地質株式会社) を用いて 1 分間隔で計測した。水位計で絶対圧水頭および水温を、大気圧計で大気圧水頭および気温を計測し、取得した絶対圧および大気圧から水位換算を行った (図-4)。水位の計測断

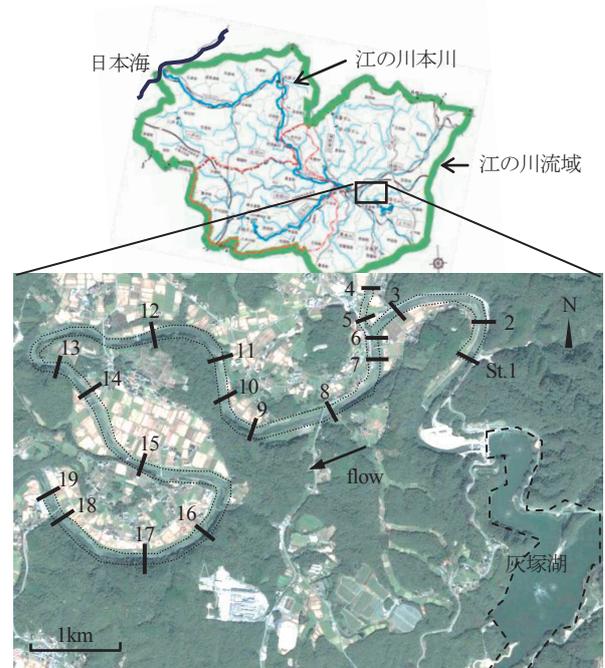


図-1 灰塚ダムの位置

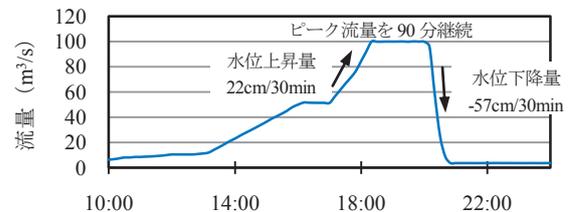


図-2 放流量ハイドログラフ



図-3 ADCP を用いた流量計測

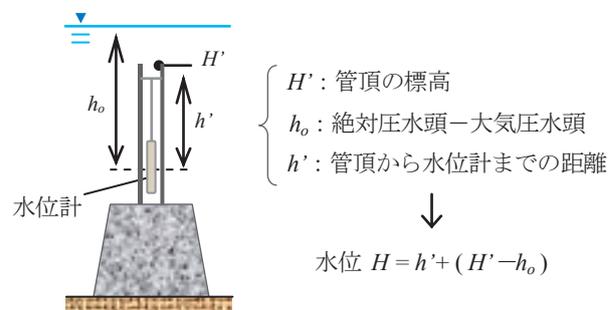


図-4 水位換算の方法

面は St.1~St.19 であり、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立ち入りやすい天端側の水域に設置した。

また、観測区間内において大気圧は同一と考え、St.7に大気圧計を設置した。

河床洗掘深は、洗掘深計¹⁰⁾が示す電圧を1分間隔で計測し把握した。洗掘深計は、図-5(a)に示すように、内部に抵抗器を固定した直径7.8cm、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、底部のデータログでブロック中を流れる電圧を記録する装置である。これを、図-5(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。流量増加に伴う河床攪乱により上段のブロック(抵抗器)が流失すると電圧が急激に低下するため、その時刻を約5cmの河床洗掘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。また、洗掘深計の周辺には色礫を設置し、視覚的に河床攪乱や洗掘、埋め戻しを判断できるように考慮した。

Chl-a, SSは、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。計測断面は、St.6, 18であり、両断面とも左岸、中央、右岸の3地点から採水した。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色素であり、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藻類(付着藻類)量を把握した。

(2) 測量, 調査

5月中旬に河川測量として、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3次元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(Nikon-Trimble 5800)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。粒径調査は、低水路内の左岸側, 中央, 右岸側において、河床礫が確認できる高さから水中カメラで河床表層を撮影し、表層の礫を取り除いて再度撮影した。このとき、河床礫の粒径を把握できるように、撮影領域内にスタッフを入れて撮影した。

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、植生による流れの抵抗力の発生範囲、水位上昇による水域の拡大範囲を明確にした。

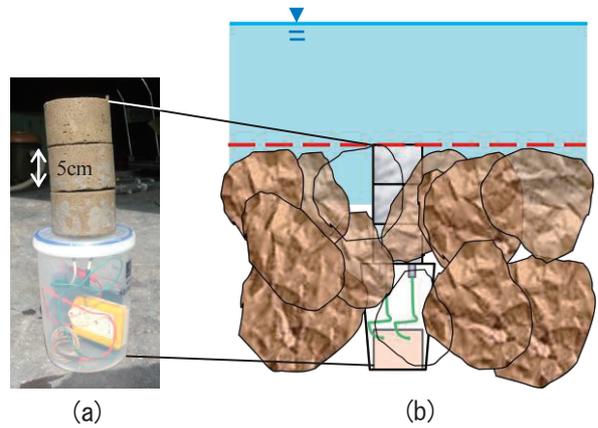


図-5 洗掘深計の設置

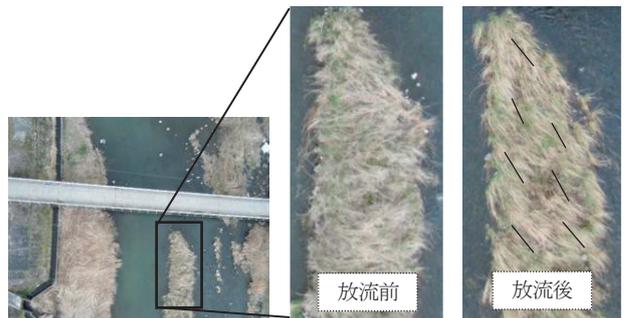


図-6 空中写真を用いた植生の倒伏判定

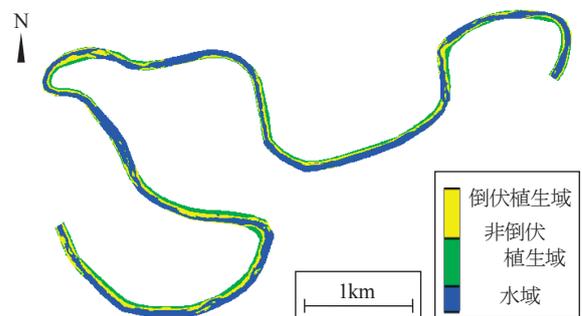


図-7 植生分布(観測結果)

2.3 解析メッシュ

河川測量、空中写真から3次元の地形データの情報を有する、一般座標系表示の解析メッシュを作成した。ここに、3次元の地形データは、測量値を用いて河床地形の補間精度が良好なOrdinary Kriging¹¹⁾により内挿補間して作成した。また、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は、図-6に示す空中写真と、フラッシュ放流時に流況変化の把握のため天端から撮影した写真を用いて作成した。図-7に、空中写真をもとに作成した観測区間内の植生分布を示す。なお、支川に関しては流入流量が本川平常時に対して1割未満と小さく、フラッシュ放流時の河道環境に影響を及ぼさないと考え解析区間から除外した。

3. 数値解析

3.1 基礎方程式

流れの基礎方程式は、水深平均された一般座標系表示の連続式と運動量方程式を用いた¹²⁾。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り繁茂しているため、運動量方程式に植生の抵抗力項を導入した¹³⁾。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{Uh}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{Vh}{J} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{UQ^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{VQ^\xi}{J} \right) \\ & - \frac{M}{J} \left(U \frac{\partial \xi_x}{\partial \xi} + V \frac{\partial \xi_x}{\partial \eta} \right) - \frac{N}{J} \left(U \frac{\partial \xi_y}{\partial \xi} + V \frac{\partial \xi_y}{\partial \eta} \right) \\ & = -gh \left(\frac{\xi_x^2 + \xi_y^2}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + \frac{\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \eta} \right) \\ & - \frac{\tau_b^\xi}{\rho J} - \frac{F_d^\xi}{\rho J} + \frac{\xi_x^2}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-\overline{u'^2}h) + \frac{\xi_x \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-\overline{u'^2}h) \\ & + \frac{\xi_y^2}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-\overline{v'^2}h) + \frac{\xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-\overline{v'^2}h) \\ & + \frac{\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-\overline{u'v'}h) + \frac{2\xi_x \eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-\overline{u'v'}h) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q^\eta}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{UQ^\eta}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{VQ^\eta}{J} \right) \\ & - \frac{M}{J} \left(U \frac{\partial \eta_x}{\partial \xi} + V \frac{\partial \eta_x}{\partial \eta} \right) - \frac{N}{J} \left(U \frac{\partial \eta_y}{\partial \xi} + V \frac{\partial \eta_y}{\partial \eta} \right) \\ & = -gh \left(\frac{\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + \frac{\eta_x^2 + \eta_y^2}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \eta} \right) \\ & - \frac{\tau_b^\eta}{\rho J} - \frac{F_d^\eta}{\rho J} + \frac{\xi_x \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-\overline{u'^2}h) + \frac{\eta_x^2}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-\overline{u'^2}h) \\ & + \frac{\xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-\overline{v'^2}h) + \frac{\eta_y^2}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-\overline{v'^2}h) \\ & + \frac{\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-\overline{u'v'}h) + \frac{2\eta_x \eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-\overline{u'v'}h) \end{aligned}$$

ここに、 J : 座標変換のヤコビアン、 $\xi_x, \xi_y, \eta_x, \eta_y$: 変換のメトリックス、 h : 水深、 U, V : 水深平均流速の反変成分、 Q^ξ, Q^η : 流量フラックスの反変成分、 τ_b^ξ, τ_b^η : 底面せん断応力の反変成分、 F_d^ξ, F_d^η : 植生による抵抗力の反変成分、 z_s : 水位、 $-\overline{u'^2}, -\overline{v'^2}, -\overline{u'v'}$: 水深平均レイノルズ応力である。

$$\begin{aligned} J &= 1/(x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi) \\ \xi_x &= J y_\eta, \quad \xi_y = -J y_\xi, \quad \eta_x = -J x_\eta, \quad \eta_y = J x_\xi \\ U &= \xi_x u + \xi_y v, \quad V = \eta_x u + \eta_y v \\ Q^\xi &= \xi_x M + \xi_y N, \quad Q^\eta = \eta_x M + \eta_y N \\ \tau_b^\xi &= \xi_x \tau_{bx} + \xi_y \tau_{by}, \quad \tau_b^\eta = \eta_x \tau_{bx} + \eta_y \tau_{by} \\ F_d^\xi &= \xi_x F_{dx} + \xi_y F_{dy}, \quad F_d^\eta = \eta_x F_{dx} + \eta_y F_{dy} \end{aligned} \quad (3)$$

なお、底面せん断応力、植生の抵抗力、水深平均レイノルズ応力は以下の式より算出した。

$$\begin{aligned} \tau_{bi} &= \frac{\rho g n^2 u_i \sqrt{u_j u_j}}{h^{1/3}} \\ F_{di} &= \frac{1}{2} \rho C_d N_a A u_i \sqrt{u_j u_j} \end{aligned} \quad (4)$$

$$-\overline{u'_i u'_j} = D_h \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij}$$

ここに、 n : Manning の粗度係数、 C_d : 植生の抗力係数、 N_a : 単位面積当たりに繁茂する植生の本数(現地での写真撮影から全植生域で 100 本/m²と評価した)、 A : 投影面積、 δ_{ij} : 単位行列である。また、渦動粘性係数 D_h 、水深平均乱れエネルギー k は以下の式より算出した¹⁴⁾。

$$\begin{aligned} D_h &= a h u_*^2, \quad k = 2.07 u_*^2 \\ u_* &= \sqrt{\tau_0 / \rho}, \quad \tau_0 = \sqrt{\tau_{bx}^2 + \tau_{by}^2} \end{aligned} \quad (5)$$

3.2 離散化手法

離散化手法として有限体積法、変数配置にスタッガード格子を用い、移流項の離散化には一次精度の風上差分、時間積分には Adams-Bashforth 法を用いた。ここで、図-8(a)~(c)に、基礎方程式から h, Q^ξ, Q^η を計算する際の、有限体積法における積分領域を示す。図中の D, U, L, R, A は積分領域における下流側、上流側、左岸側、右岸側、平均(代表)の値を示す。また、同図(d)に、レイノルズ応力の計算を計算する際の D, U, L, R, A の位置について示す。

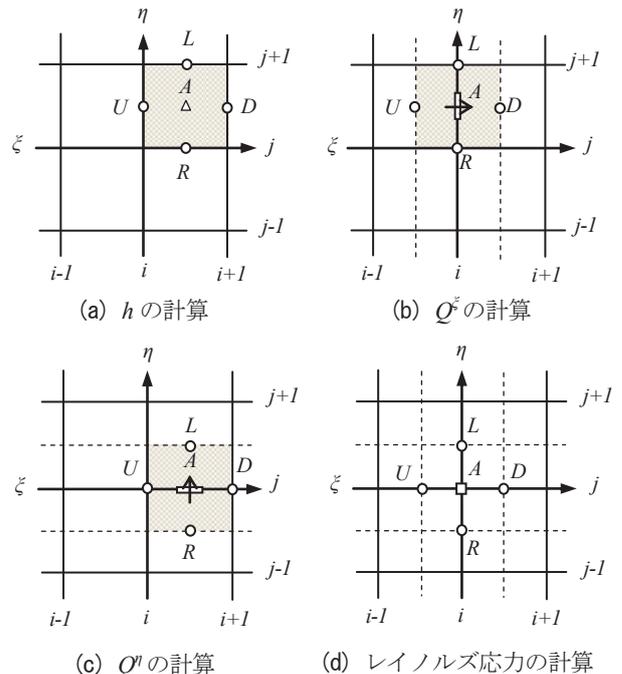


図-8 未知量の配置

3.3 計算条件

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イドログラフを与えた。ダム直下流にある減水池の影響は無視している。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^z 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 の間で次式より決定した。

$$\sum_{j=1}^{NY} (Q^z / J) = Q_{in} \quad (6)$$

ここに、 Q_{in} : 上流端からの流入流量、 NY : 横断方向の格子点数である。

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別途計算して与えた。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) で与えることとする。このとき、各断面における水位の横断勾配は 0 とする。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^z の初期条件は、上述の上流端の Q^z 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。なお、計算格子数は流下方向に 1044 点、横断方向に 30 点である。

マンニングの粗度係数は、図-7 に従い、水域では 0.028 (粒径 10cm の礫が河道内水域に一樣に分布するとして Manning・ストリクラーの式より算出)、植生域では 0.019 (粒径 1cm)、水域と植生域の境界では 0.025 (粒径 5cm) とした。

3.4 植生の倒伏

式 (4) で表わされる植生の抵抗は、抗力係数 C_d および投影面積 A で評価する。抗力係数は適当に 1.0 とし、投影面積は以下の式より算出した。

$$A = \alpha_v \times d \times h' \quad (7)$$

ここに、 α_v : 植生の倒伏に応じて変化させる係数 (= 倒伏した植生高 h'_v / 倒伏前の植生高 h_v)、 d : 植生の直径、 h' : 水深、植生高、倒伏した植生高のうち水位と植生分布に応じて変化する値である。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-9(a)~(c)を想定し、 h' と α_v を変化させた。また、植生による抵抗力は図-7 に示す植生域でのみ計算し、非倒伏植生域では図-9の(a),(b)を、倒伏植生域では(a),(c)を対象とした。数値解析においては、図-7の倒伏植生域において、水位上昇により水深が植生高よ

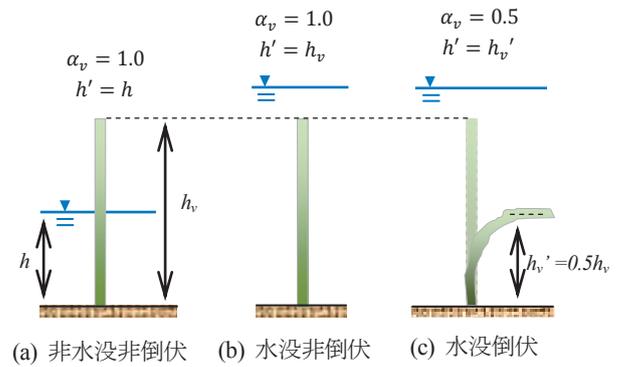


図-9 水位上昇に伴う h' と α_v の変化

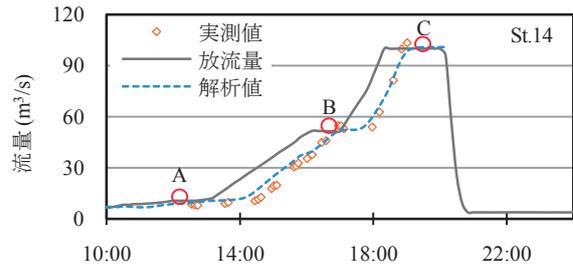


図-10 流量ハイドログラフの比較

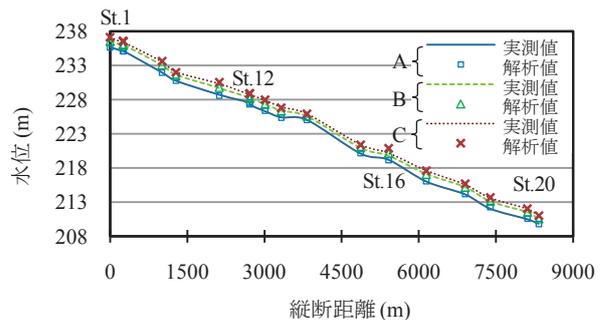


図-11 水位縦断分布の比較

り大きくなる時刻をもって倒伏したと判断した。

4. 結果と考察

4.1 フラッシュ放流時の流れの再現性

(1) 流量比較

図-10に、St.14における流量ハイドログラフの実測値と解析値の比較を示す。19:00以降の実測値は、ADCPによる流量観測が不可能だったため取得していない。図より、実測値と解析値は概ね一致していること、さらに、ダムからの放流量ハイドログラフをほとんど変形させずに St.14 に伝播していることがわかる。そのため、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。

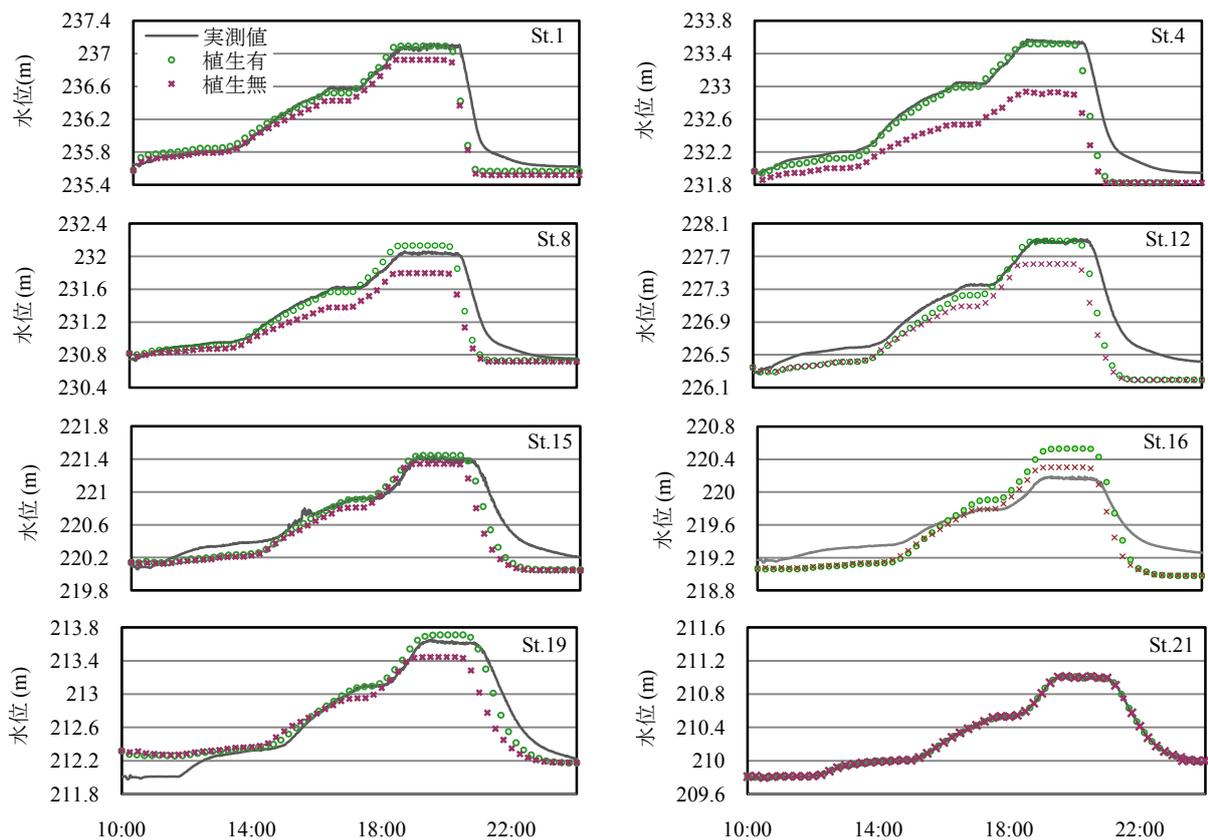


図-12 水位ハイドログラフの比較

(2) 水位比較

図-11に、図-10中のA～Cの時刻における水位縦断分布の実測値と解析値を示し、フラッシュ放流時の水位の再現性を評価する。A～Cは、初期流量、流量停滞期、ピーク流量時において流量が準定常状態にある時刻から選定した。図より、St.16については水位上昇に伴い実測値との誤差が大きくなるのがわかるが、全体的には解析値と実測値は概ね一致している。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、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、各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図-12に示す。

図-12では水位ハイドログラフについて実測値と解析値を比較している。同図には参考のため、植生の抵抗力を考慮しない場合の解析結果を併記している。図より、植生の抵抗力を考慮すると河道内植生が流水の疎通能力を低下させるため水位上昇量が大きいことがわかる。また、全断面においてピーク水位から定常状態に至るまで、解析水位は実測値よりも逋減が早いことがわかる。この原因として、実現象として一度倒伏した倒伏植生域の水深が植生高以下となった場合、実際の植生は一定時間倒伏状態を維持する（植生密度が増加する）のに対し、解析上では直立状態として評価されるため植生の抵抗力が小さくなり、実河川におけ

る水位下降期よりも疎通能力が高くな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や倒伏状態を的確に評価することが重要であることが確認された。なお、St.21については実績値と解析値が一致しており、下流端の境界条件が適切に与えられていることを示している。

(3) 植生域の倒伏範囲と流向の比較

図-13に、数値解析において植生の倒伏が発生した箇所を示し、図-7と比較することで植生の倒伏範囲の再現性と、植生の抵抗力の評価方法の妥当性を検討する。倒伏範囲は、図-7の倒伏植生域においてピーク流量時の水深と植生高の関係から判定した。図より、解析結果としての植生分布は、フラッシュ放流による植生域の倒伏範囲が河道内の植生域に対して非常に少なく、倒伏範囲の再現性は低いことが確認できる。また、植生の抵抗を考慮しない場合の倒伏範囲も同様の結果を示したことから、倒伏範囲の再現性に関しては植生の抵抗力の評価方法に起因するだけでなく、河床高の再現性が低いこと等が原因であると考えられる。

次に、植生域内の流れ、および植生による河道の疎通能力の低下に関する再現性を評価するため、フラッシュ放流後の空中写真をもとに判定した中洲(図-13のArea_{中洲})に繁茂する植生の倒伏方向と、解析結果とし

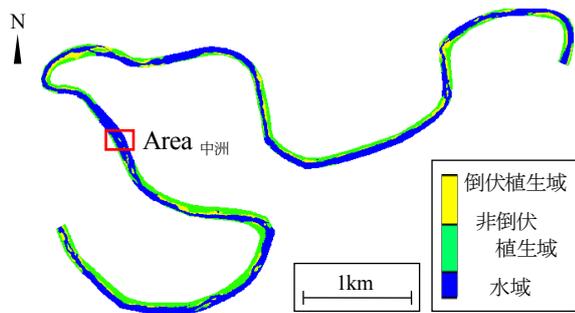


図-13 ピーク流量時の植生分布(解析結果)

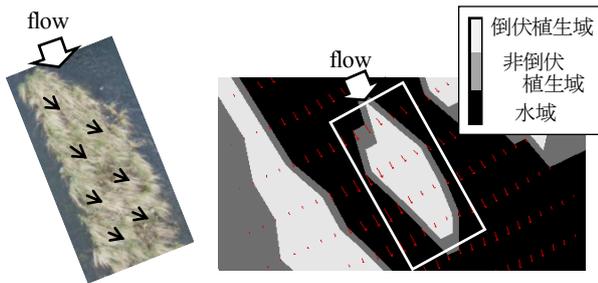


図-14 植生域における流向の比較

て同中洲において確実に倒伏していたと考えられるピーク流量時の流向(流速ベクトル)の比較を図-14に示す。図より、植生の倒伏方向は流れ方向から若干傾いているが、植生域内の河床高の差によるものと考えられる。また、植生の倒伏方向と流速ベクトルが同一方向を示さないが、解析においては植生密度、および植生高を一樣に設定し、植生の抵抗力を評価したためと考えられる。しかし、解析結果において植生域内の流速は水域に比べて小さく、植生による河道の疎通能力が低下することが確認できる。図-12に示すように、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ため、現地観測により植生の密度、高さ、直径等の計測を行うとともに倒伏条件や植生の抵抗力の評価方法を見直す必要があることが示唆された。

4.2 河床材料の移動

(1) 河床材料の構成

粒径調査より、上流、中流域において河床は岩盤と粒径10~20cmの礫で構成されること、支川との合流部においては大小様々な粒径の礫が分布していること、さらに中流域からは流下距離に伴い河床材料の粒径が小さくなる傾向があることを確認した。また、河床写真をもとに判断した各断面における河床表層礫の平均粒径は、St.1は岩盤、St.6は5cm、St.10の下流は7.5cm、St.14の下流は2cm、St.18の上流2.5cmであった。

(2) 土砂移動の評価

図-15に、St.6において洗掘深計より計測した電圧と、洗掘深計の設置地点において式(8)より算出した

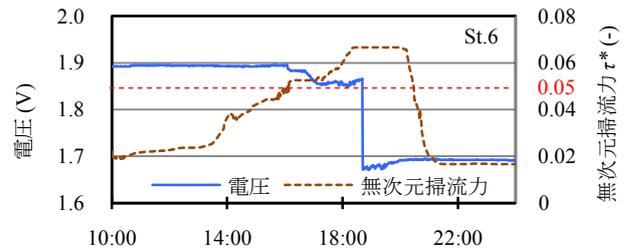


図-15 電圧と無次元掃流力の時間変化

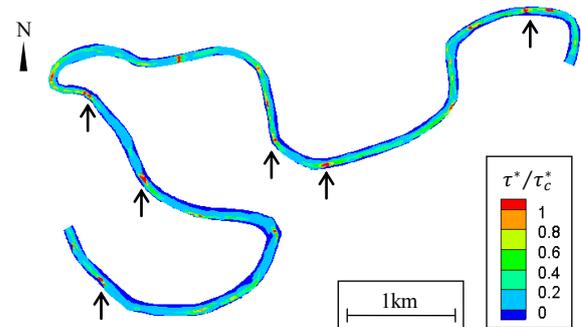


図-16 τ^*/τ_c^* の平面分布

無次元掃流力の時間変化の比較を示す。

$$\tau^* = \frac{\tau_0}{\rho \gamma D} \quad (8)$$

ここに、 γ : 砂礫の水中比重、 D : 河床礫の粒径である。粒径調査より、St.6における河床礫の代表粒径は5cmであると確認したため、 $D=5\text{cm}$ とした τ^* が限界掃流力0.05以上(岩垣の式¹⁵⁾)であることを土砂移動の発生条件とする。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が示唆される。また、土砂移動の発生から約150分後に電圧が急減(ブロックが1個流失)しているため、St.6においては河床材料が150分以上移動状態にあることで約5cmの河床洗掘が発生すると言える。1個目のブロックの流失後は電圧が変化しないが、これは、100分後に τ^* が0.05以下となるため、約5cmの河床洗掘条件を満足せず、2個目のブロックは流失しなかったことを示す。また、洗掘深計の周辺に設置した色礫は、粒径約5cmのものまで流失していることを確認した。一方、St.1~St.2間において洗掘深計より計測した電圧は急減せず、色礫についても長距離の流失は確認できなかったため、この地点における河床洗掘は5cm未満であったと言える。これは、植生域では植生の抵抗力により水域に比べ流速が小さく、これに伴い河床の掃流力も低下することに起因すると考えられる。

次に、図-16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^* の平面分布を示し、土砂移動の発生位置について定性的に評価した。粒径調

査を行った断面において河床材料の構成を評価すると、観測区間では全区間において河床礫の断面平均粒径が10cm以下であり、設定粒径を10cmとして無次元掃流力を過小評価することで、確実に土砂移動が発生する地点を判定した。図より、周囲に比べて河床高が高く、水深の低下と流速の増加が生ずる箇所（図中の矢印）や、湾曲部の外岸側において τ^*/τ_c^* は1.0を超過しているため土砂移動が発生し、それ以外の水域において τ^*/τ_c^* は1.0未満であるため土砂移動は発生しないことがわかる。そのため、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、図-15, 16に示す観測、解析結果からも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-17に、St.6, 18におけるChl-a, SSの計測結果、同断面で計測した水位ハイドログラフを示す。図より、SSはSt.18の方が全体的に大きい値を示しており、河道内では流下とともに高濃度になることがわかる。一方、Chl-aについては両断面で同程度の値を示すことから、流下距離に依存する濃度変化は小さいと言える。また、両断面においてChl-a, SSに相関はなく、Chl-aについては水位変動に依存しないことがわかる。

ここでは、「Chl-a, SSの濃度×Chl-a, SSの計測時刻に対応する流量」をもって各断面を通過した瞬間の質量（以下、断面通過量）を算出し、フラッシュ放流時の河道環境の変化を把握した。ここで、計測時刻に対応する流量とは、Chl-a, SSの計測時刻に断面を通過するダムからの放流量を意味し、ダム直下から各断面までのピーク水位の遅れ時間分だけ放流量ハイドログラフをずらすことで算出した。図-18に、St.6, 18におけるChl-a, SSの断面通過量を示す。図より、St.18におけるChl-a, SSの断面通過量はともにSt.6より大きい。また、断面通過量は水位変動に依存し、水位の上昇期には増加、停滞期には減少している。これは、水位の上昇期においては、付着藻類の剥離や河床攪乱、植生域への浸水等により水中にChl-a, SSが供給されるためと考えられる。一方、水位の停滞期には、流量や流速の安定により付着藻類の剥離条件、河床攪乱の条件は更新されないため、水中にChl-a, SSは供給されず断面通過量は減少したものと考えられる。St.18におけるChl-a, SSの波形はSt.6のもと異なるが、水位変動に依存するChl-a, SSの特徴により19:00以降は増加し、断面通過量の波形は2度増加する形となるため、St.6と類似した波形となることが推測される。

次に、図-19に河道内のChl-a, SSの収支を示す。ここに、各断面を通過する物質の全通過量は、ダム直

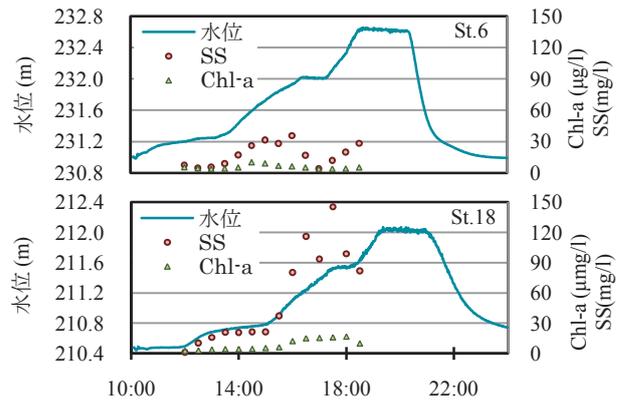


図-17 Chl-a, SSの計測結果

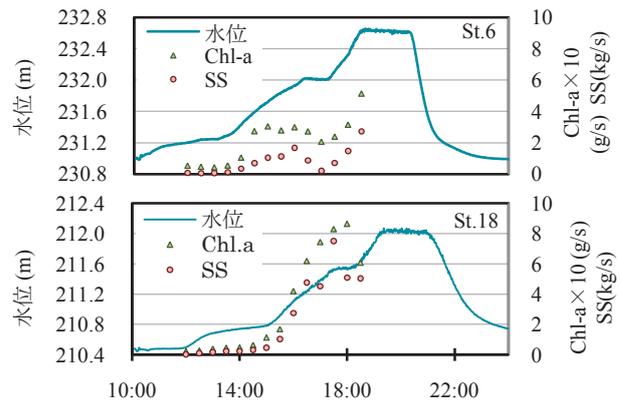


図-18 Chl-a, SSの断面通過量

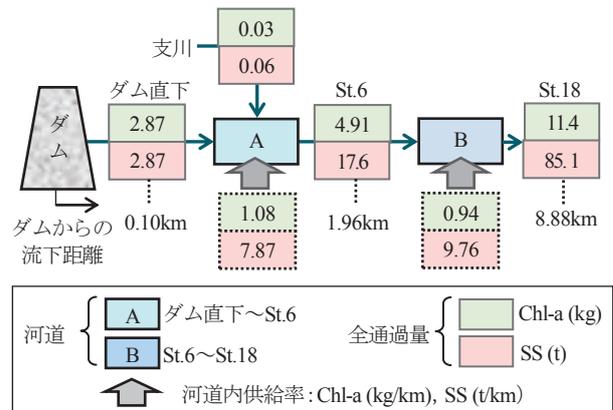


図-19 Chl-a, SSの収支構造

下、St.6については12:00~18:30の、St.18については13:30~20:00(12:00~18:30にSt.6を通過したChl-a, SSがSt.18を完全に通過すると考えられる

時刻)の断面通過量を積分(台形近似)して算出した。ダム直下～St.18におけるChl-a, SSの供給量(各断面の全通過量の差)を断面間の流下距離で除した供給率を図中に示すと、Chl-aについては区間Aにおける供給率の方が高いことがわかる。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 の平面分布および各区間の τ_0 の平均値(=水域における τ_0 の合計/水域の格子点数)を図-20に示すと、付着藻類の剥離や河床攪乱等の要因となる τ_0 の平均値は上流区間において大きいことがわかる。そのため、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推測される。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、灰塚ダム下流域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、フラッシュ放流による流況の変化や河床材料の移動、付着藻類の剥離状況を検討した。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に再現性には改善の余地が残っている。
- 2) 河道内に繁茂する植生は、フラッシュ放流時の流れに対して大きな影響を及ぼす。
- 3) 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、周囲に比べて河床高が高く、水深の低下と流速の増加が生ずる地点や、湾曲部の外岸側においては、今回の出水においても土砂移動が発生する。
- 4) 支川との合流部下流地点においては、河床材料が150分以上移動状態にあることで約5cmの河床洗掘が発生し、その周辺では粒径約5cmの河床礫まで移動、流失する。
- 5) Chl-a, SSともに水流への供給量は水位の上昇期には増加、停滞期には減少する。
- 6) 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。

今後は、数値解析によるフラッシュ放流時の流れの再現性を高めるため、現地観測を行い植生の密度、高

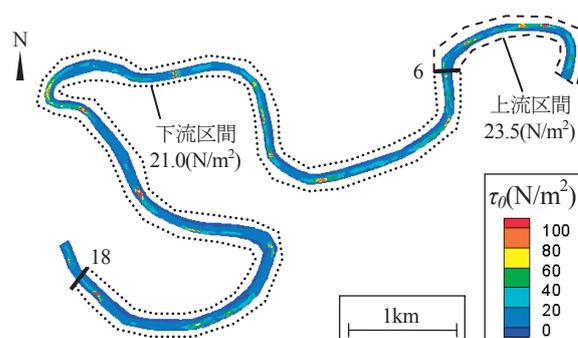


図-20 τ_0 の平面分布

さ、直径等の計測を行うとともに倒伏条件を設定し、植生の抵抗力の評価方法を精緻化する。また、フラッシュ放流による付着藻類の剥離効果を定量的に評価するため、付着藻類の剥離条件の定式化、付着藻類の剥離、輸送過程の解明を行う。

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) 江村歆, 玉井信行, 松崎浩憲: 生態的なフラッシュ流量に関する考察と貯水池の連結操作による流況の改善について, 環境システム研究, Vol.25, pp.415-420, 1997.
- 3) 安田実, 清水康生, 竹本隆之: 流量変動が河川環境の維持形成に果たす役割に関する研究, 環境システム研究, Vol.25, pp.77-84, 1998.
- 4) 田代喬: ダム下流河道における河床の低攪乱化に着目した水域生態系評価に関する研究, 名古屋大学大学院博士論文, 2003.
- 5) 建設省河川局河川環境課: 正常流量の手引き(案), 1999.
- 6) 灰塚ダムモニタリング委員会: 灰塚ダムモニタリング調査最終報告書(案), 国土交通省, 中国地方整備局, 灰塚ダム管理支所, 2009.
- 7) 大杉奉功, 尾澤卓思, 小笠原智宏, 角哲也: フラッシュ放流による河川掃流効果に関する検討, 河川技術に関する論文集, 第6巻, pp.185-190, 2000.
- 8) 岡村政彦: 真名川ダムにおけるフラッシュ放流と河川環境再生の取り組みについて, 特集・河川技術, pp.25-29, 2009.3.

- 9) 小部貴宣, 浅見和弘, 大杉奉功, 浦上将人, 伊藤尚敬 : 三春ダムにおけるフラッシュ放流によるダム下流河川の環境改善について, 応用生態工学, Vol.8(1), pp.15-34, 2005.
- 10) 河原能久, 内田龍彦, 吉田晋, 木村成弘 : 急流礫床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.
- 11) Venkatesh Merwade : Effect of spatial trends on interpolation of river bathymetry , Journal of Hydrology , vol.371, pp.169-181, 2009.
- 12) 長田信寿 : 一般曲線座標系を用いた平面 2 次元非定常流れの数値計算, 水工学における計算機利用の講演会講義集, 土木学会, pp45-72, 1999.
- 13) Weiming Wu : Computational River Dynamics, Taylor & Francis Group, London, UK, pp.375-377, 2008.
- 14) Nezu,I.and Nakagawa,H. : Turbulence in open channel flows, IAHR Monograph, Balkema, Rotterdam, pp.53-56, 1993.
- 15) 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.

(2010 年 3 月 9 日 受付)