

フラッシュ放流による河床環境改善効果と 放流波形の重要性

EFFECT OF DISCHARGE HYDROGRAPH OF FLUSH RELEASE ON RIVER ENVIRONMENTAL IMPROVEMENT

椿 涼太¹・河原能久²・中土井佑輔³・岩苔和広⁴・吉武央気³

Ryota TSUBAKI, Yoshihisa KAWAHARA, Yusuke NAKADOI,
Yasuhiro IWAKOKE and Hiroki YOSHITAKE

¹ 正会員 博(工) 広島大学大学院助教 工学研究科 (〒 739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

² フェロー会員 工博 広島大学大学院教授 工学研究科 (同上)

³ 学生員 広島大学大学院 工学研究科 (同上)

⁴ 正会員 修(工) 中国電力株式会社 (〒 730-8701 広島市中区小町 4-33)

Owing to regulation of river flow, there have been gradual but drastic changes in the biotic and abiotic environment of rivers. These changes may have led to lowering of the quality of ecosystem services provided by the affected rivers. In this study, a flush discharge release conducted on March 25, 2009 was observed to estimate the impact of the flush discharge on the river environments of an upstream reach of the Jyouge River, which flows through the northern part of Hiroshima, Japan. The river reach assessed in this study is 8 km in length and is located just downstream of the Haiduka dam, which released a maximum flush discharge of 100 m³/s. Water stage hydrographs were recorded at 21 stations using the hygrometers. At two stations, water sampling had been conducted to quantify suspended sediment (SS) and chlorophyll a (chl.a.) Two-dimensional flow simulation was performed to represent the time-dependent flow and material transport processes. Using the observed and simulated results, transport of chl.a, transport distance of chl.a and its relation to the flood duration are discussed.

Key Words: Flush discharge, SS, chl.a, discharge hydrograph, river environment

1. はじめに

人為的な流量制御により引き起こされる流況や土砂動態の変化は、河床の状態に影響を与え、生物生息場としての機能を変化させる^{1,2)}。このような流量制御による影響の中で、河床に生息する藻類の量・質の変化、有機物や微細土砂の堆積、流水中への有機物負荷の増加(自濁作用)、色や臭気を含めた景観の悪化などが問題として認識されている。これらの影響を軽減・解消するための方策として、維持流量の増加³⁾やダムからのフラッシュ放流^{1,4)}が試みられつつある。

広島県北部を源流とし、島根県を通過して日本海の注ぐ一級河川である江の川水系の支川である上下川においても、建設された灰塚ダムによる流量制御の影響と思われる、河川環境の変化が観察されている。すなわち、アユを含む魚類等の食物となる付着藻類の量・質の変化、微細土砂の河床への堆積、沈水植物や糸状性緑藻類の繁茂、河川景観の悪化がみられており、その対策としてフラッシュ放流が企画・実施されており、ダム下流を中心とした河川環境の改善効果が明らかとなりつつある。

本研究では、灰塚ダムにおいて2009年3月に実施されたフラッシュ放流を対象に、現地観測および流れの数値解析を実施してフラッシュ放流の効果の算定を行うこととする。また、フラッシュ放流により、ダムからある程度離れた区間では、有機物や微細土砂等の堆積が問題となっており、この点に関連して、放流波形の及ぼす河床環境改善効果に関する考察を行う。

2. 観測概要

(1) 観測河道区間

本研究では、灰塚ダム下流約1kmから約9km区間を観測対象とした(図-1)。灰塚ダムは中国地方整備局が管理する集水面積217.0km²の多目的ダムであり、治水機能として、ダム地点における洪水流量1150m³/sのうち、750m³/sの洪水調節を行うものである。観測区間の河床勾配は約1/300であり、河床は0.01mから1m程度の礫で構成されているが、礫の間隙や砂州・植生域には砂・シルトの堆積がみられ、また岩盤が露出している部分も存在する。

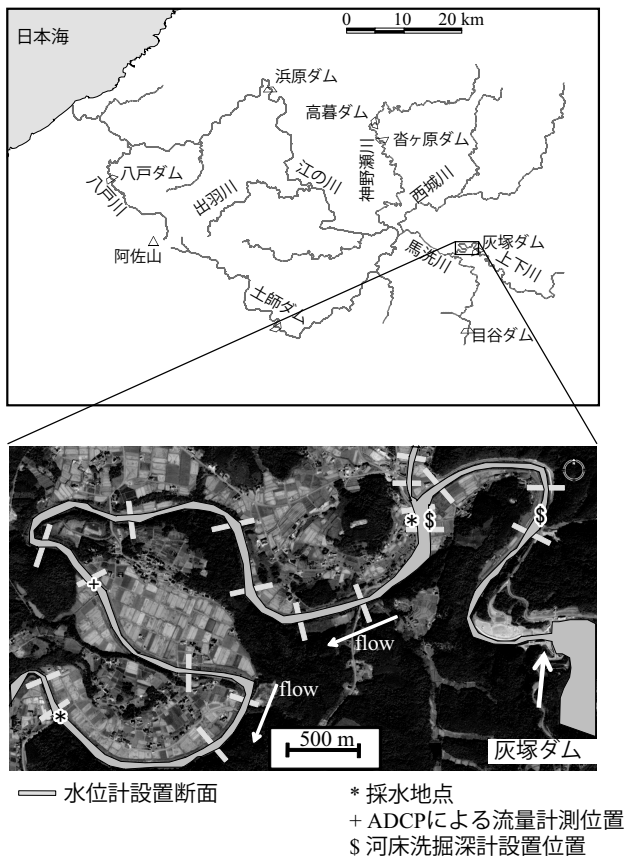


図-1 観測河道区間

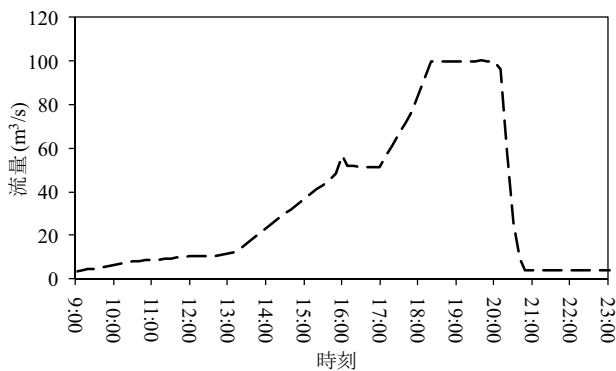


図-2 灰塚ダムからの放流パターン

(2) ダムからの放流

フラッシュ放流は、図-2 に示すような放流パターンで実施された。具体的には、13:00 頃から約 3 時間かけて $55\text{m}^3/\text{s}$ まで放流量が増加し、1 時間程度この流量を保った後に、1.5 時間程度で最大流量である $100\text{m}^3/\text{s}$ まで増加した。約 1.5 時間、この最大流量を保った後に、1 時間程度かけて流量を低下させ平常流量に回復させている。

(3) 計測項目・方法

河床形状を把握するため、観測区間の約 70 断面において横断測量を実施した。また観測区間下流側ではフ

ラッシュ放流前後に、低高度からの航空写真測量を実施し、上流側では堤防上から河道の写真撮影を行い、植生繁茂状況および倒伏状態を記録した。

放流実施中には、20 箇所での圧力式水位計 (S&DL mini model 4800, 応用地質株式会社) による水位ハイドログラフの計測を実施した。また、観測区間の中間地点の堰直上流で、ADCP (Workhorse Monitor, Teledyne RD Instruments) による流量計測⁵⁾、洗掘深計による河床変動計測^{5,6)}を実施した。また、観測区間中の 2 断面 (図-1 中の*印の位置) で、30 分毎の定期採水を実施し、chl.a 濃度 (AAQ1183, 旧アレック電子社製) および SS 量を室内分析により計測した。また、中国地方整備局により、ほぼ同様の地点において放流波形をカバーする 7 時刻において採水がなされ chl.a 濃度およびフェオフィチン濃度が室内分析により計測された。

3. 数値計算

本研究では、放流中に剥離付着藻類の動態を、測定された chl.a 濃度に基づき評価することとする。ここでは、支川合流直後の採水地点 (図-1 の中央付近の*印) での chl.a 濃度実測値を流入境界条件とし、それ以降の区間での放流中の chl.a の移流を数値計算により評価し、下流側の採水地点 (図-1 の左下の*印) での chl.a 濃度実測値と計算値を比較することにより、この区間中での実質的な chl.a の増加量を算定するとともに、剥離された付着藻類と放流波形の関係について論ずることとする。

(1) 基礎式と離散化

ここでは物質輸送を、平面二次元非定常浅水流方程式を用いて評価することとする。すなわち、

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} = S + \nabla D \quad (1)$$

である。ここに、

$$U = (h \ u \ hu \ hv \ hc)^T, \quad (2)$$

$$E = (hu \ hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \ huv \ huc)^T, \quad (3)$$

$$F = (hu \ huv \ hv^2 + \frac{1}{2}gh^2 \ huc)^T, \quad (4)$$

$$S = (0 \ gh(S_{0x} - S_{fx}) - D_x \ gh(S_{0x} - S_{fy}) - D_y \ 0)^T \quad (5)$$

$$D = (0 \ K_u h \nabla u \ K_v h \nabla v \ K_c h \nabla c)^T \quad (6)$$

であり、また h : 水深, u : x 方向流速成分, v : y 方向流速成分, c : 物質濃度, g : 重力加速度, K_u, K_v, K_c : 運動量および物質濃度の拡散係数行列であり、水深平均渦動粘性係数 αhu_* を利用して評価する。ここに α : 係数, u_* : 底面摩擦速度である。また河床勾配は次式で評価する。

$$S_{0x} = -\frac{\partial z}{\partial x}, \ S_{0y} = -\frac{\partial z}{\partial y}. \quad (7)$$

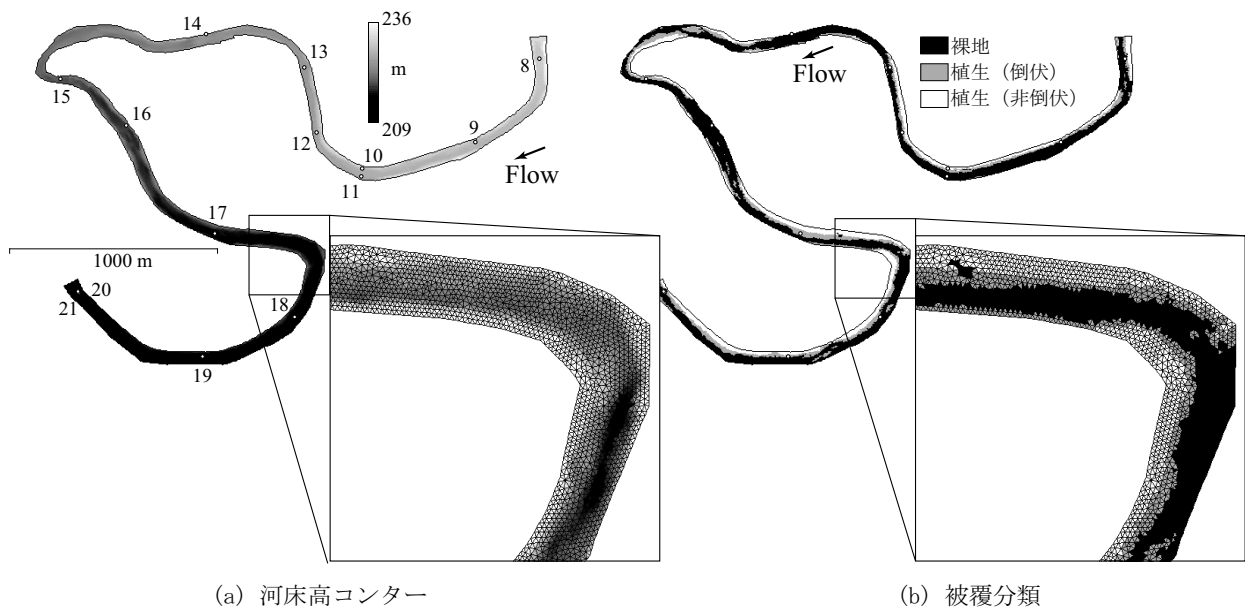


図-3 計算格子（図 (a) 中の白丸および数字は水位計設置位置を示す。）

また，摩擦勾配は，Manning の粗度係数 n を用いて，

$$S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}, S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (8)$$

と評価する． D_x, D_y は植生による抵抗であり，抗力係数 C_d を用いて，

$$D_x = 0.5 C_d \lambda h u \sqrt{u^2 + v^2}, D_y = 0.5 C_d \lambda h v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (9)$$

と評価する．ここに λ : 単位面積に占める遮蔽長さである．

以上の式を，三角形非構造格子を用いた有限体積法により離散化する^{7, 8, 9, 10}．移流・発生消滅項は二次精度 MUSCL 法により，拡散項は二次精度中心差分により評価し，時間進行は Adams-Bashforth 法による二次精度で離散化を行った．計算格子は，延長約 7km の観測区間を一辺の長さが約 6m の 24294 個の三角形により構成される（図-3）．

(2) 計算結果

図-4 に，6 地点での水位の実測値と計算値の比較を行う．同図より各地点で実測値と計算値は誤差 15cm 程度以内であり，実流況を概ね再現している．逕減部（21 時ごろ）では，実測値に比べ計算値は水位低下が急激である．これは，観測区間上流端でダム放流量の時間を調整したものを流入流量として与えており，ダムから計算区間上流端までの間での貯留効果が流入条件に含まれていないことが主な要因と考えられる．この点を除けば，計算値の水位の再現性は高く，数値計算によりフラッシュ放流時の流況が評価されていると判断される．

図-5 に，実測値と計算値による chl.a 濃度の比較を行う．計算では，chl.a 濃度の移流・拡散を評価しているが，河床からの chl.a の巻き上げ・剥離や沈降を評価し

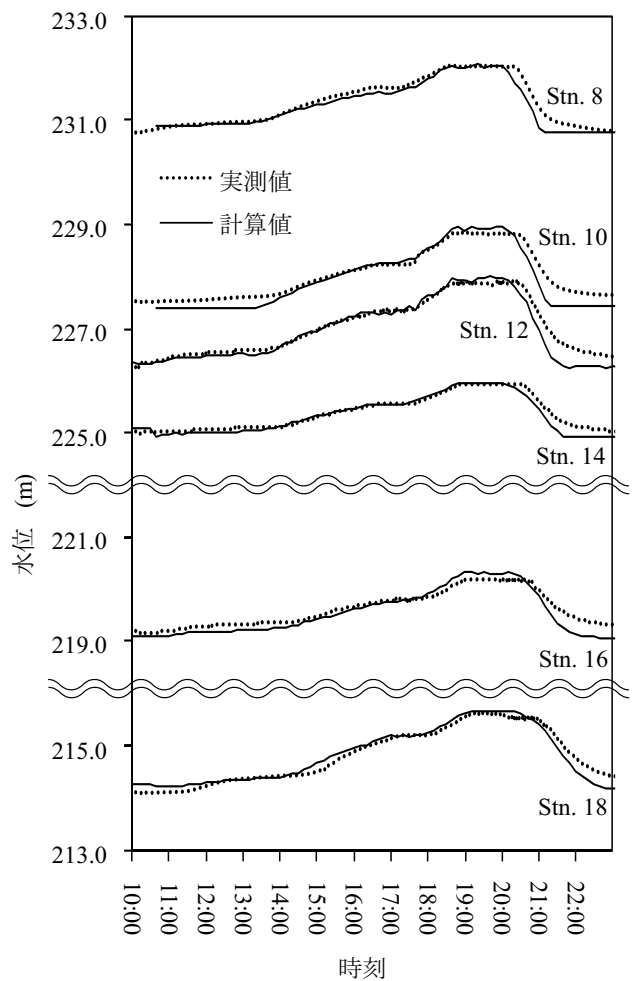


図-4 水位の再現性（stn 番号は図-3a 中の数値に対応する。）

ていない．よって，下流断面での実測値と計算値の差は，観測区間内での河床からの chl.a の巻き上げ・剥離

や沈降による濃度変化分に相当する。まず、図-5 の上半分に示した上流断面について確認すると、この断面の直上で流入境界条件として流量と chl.a 濃度を与えており、chl.a 濃度の計算値と実測値は一致している。chl.a 濃度の変化と断面通過流量の波形を比較すると、通過流量が $40\text{m}^3/\text{s}$ 程度まで上昇した時点で、chl.a 濃度が $30\mu\text{g}/\text{l}$ 程度のピーク値を示しており、河道に堆積した藻類等の巻き上げや剥離が盛んとなることが示唆される。その後、流量が $100\text{m}^3/\text{s}$ に上昇する過程やピーク流量時には、chl.a 濃度は低下傾向を示している。これは、河道内の藻類等がフラッシュされて、巻き上げや剥離が起こらなくなったというよりは、流量の増加による希釈効果が要因となり濃度低下がみられているものと考えられる。この点については、後ほど chl.a の断面通過量を確認しつつ再度議論することとする。

図-5 の下半分に示した下流断面では、chl.a 濃度の計算値と実測値では開きがあり、例えば 16:50 頃にみられる chl.a 濃度のピーク値について、実測値は $85\mu\text{g}/\text{l}$ であるのに対し、計算値は $30\mu\text{g}/\text{l}$ 程度であり、この差が、上流断面から下流断面に流水が通過する間に、河床から負荷された chl.a 濃度に相当する。全体的にみると、計算値に対し実測値は約 3 倍程度の濃度を示しており、大まかにはダムから上流断面までの距離と、上流断面から下流断面までの距離の比と対応している。計算値・実測値ともに 16:50 頃にピークを持つ山形の波形は共通しており、上流断面と同様、流量が $40\text{m}^3/\text{s}$ 程度まで上昇した時期に相当しており、灰塚ダムによるフラッシュ放流を設計する上で、この程度の流量がフラッシュ効果の発現という観点で一つの目安となる流量ではないかと考えられる。

図-5 の上下の図の chl.a 濃度の計算値と流量の波形を見比べると、chl.a 濃度については上流断面の波形が約 1.5 時間経過したのち、下流断面に再現されているのに対し、流量のピーク位置を比べると、上流から下流断面に伝わるのに約 1 時間程度かかっており、濃度の移流に比べ、洪水波形の伝播が速いことが確認できる。このような chl.a 濃度と流量（水位）のピークの伝達速度の関係は、より下流の計測地点での結果（図-6 に下流断面から約 10km 下流の地点での chl.a 濃度と流量を示す）でより顕著に確認することができる。

次に、上下流断面での chl.a 濃度に流量を乗じて chl.a の断面通過量を計算したものを図-7 に示す。chl.a を断面通過量という観点からみると、流量が $40\text{m}^3/\text{s}$ 程度まで上昇した時期に一度目のピークが確認でき、さらに、流量がピークに達し、 $100\text{m}^3/\text{s}$ を維持している段階で chl.a の通過量が二つ目のピークを示す、二山型の分布となっている。洗掘深センサーが、最大流量時点で 15cm 程度の深さの河床洗掘を示したこと⁵⁾、また幾つかの地点に設置した色礫が数メートル程度の狭い範囲で移動していたことから、 $100\text{m}^3/\text{s}$ 程度の流量において、河床の主要な構成材料である直径 15cm 程度の礫が若干移動することが示唆される。逆にそれより小さ

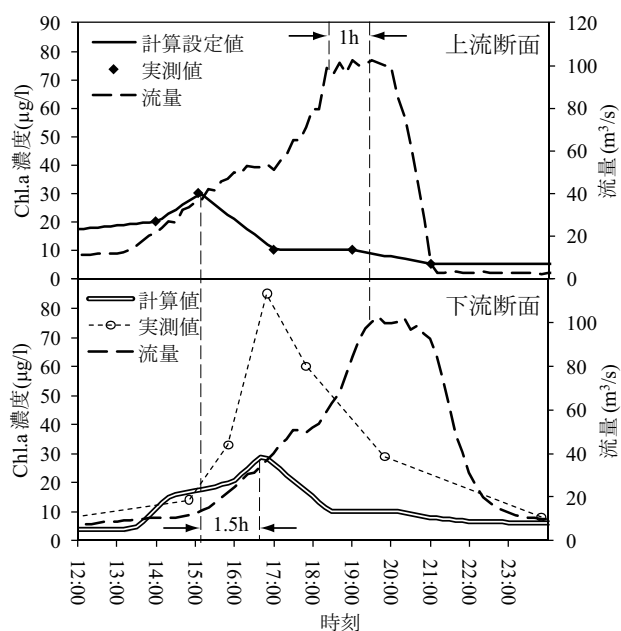


図-5 上流断面と下流断面での chl.a 濃度の比較

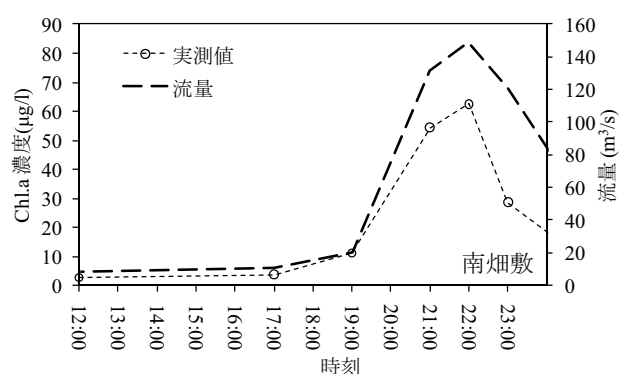


図-6 南畑敷地点（ダムから約 19km 下流）での流量と chl.a 濃度の変化

な流量では微細土砂を除いて河床材料の移動はほとんどないものと思われることから、 $40\text{m}^3/\text{s}$ 程度の流量では、河床材料に付着して生息している藻類はほとんど剥離しておらず、礫表面や、淵等に堆積・沈殿した藻類やデトリタスが巻き上げられているのではないかと推察される。一方、二つ目の chl.a 通過量のピークは河床の礫の移動がみられ、礫の移動に伴い、その間隙に堆積していた、より粒径の小さな土砂も活発に移動したものと考えられ、河床材料の移動に伴い、河床に生息する付着藻類の剥離が促進されたものと予想される。よって、灰塚ダムにおけるフラッシュ放流を設計する上では $100\text{m}^3/\text{s}$ 程度の流量は河床材料の交換や藻類の剥離を狙う上で目安となる流量といえる。

4. 考察

観測および計算結果により、

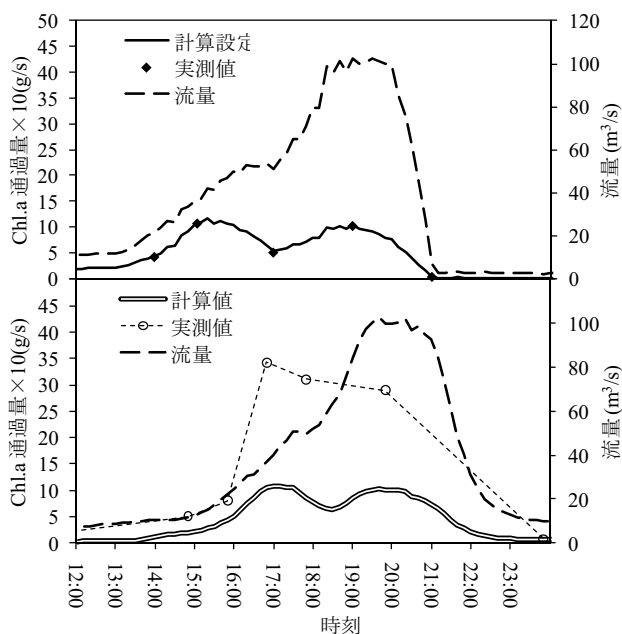


図-7 上流断面と下流断面での chl.a 通過量の比較

1. $40\text{m}^3/\text{s}$ 程度の流量（以下中規模放流）では、河床材料の移動はほとんどなく、河床に堆積・沈殿した藻類やデトリタスが巻き上げられる。
2. $100\text{m}^3/\text{s}$ 程度の流量（以下最大放流）では、河床材料の表層が移動し、藻類の剥離が進行する。
3. 洪水波形（流量変動）の伝播速度に対して、流れによる物質輸送の速度は遅く、流量逡減時には巻き上げや剥離された chl.a 等は河道に取り残される。

ということが示唆された。3. について、数値解析では物質の移動速度を水深平均速度で評価したが、ある程度粒径のある粒子状有機物等は、水深による強い濃度勾配を持ち移動速度がより小さくなることから、洪水波形に対する遅れがより大きくなり、また沈降が速く河道に堆積しやすい。

以上の観点を踏まえ図-8 に、放流波形と流下距離の概念図を示す。太い曲線は、放流流量ハイドログラフを示しており、点線で示した Q_c は、限界流量であり、流量より小さいと掃流力が小さいため輸送物質の堆積が淵等において顕著となる流量である。放流初期に巻き上げられた物質は、矢印 1 に相当する時間スケールの期間中、この時間スケールに比例する距離を流下することができ、その後河床に沈降することとなる。矢印 2 では、大きな流量によって、より多くの有機物等を巻き上げることができるが、残りの継続時間が矢印 1 に比べ短いため流下距離は短くなる。

河床付着汚泥や堆積有機物等の掃流には、中規模の流量である程度継続時間を保った放流パターンを採用することで、一旦巻き上げた有機物や微細土砂等を下流まで流下させることが可能と考えられる（図-8 の矢印 1 の長さを確保する）。一方で、付着藻類の剥離を目

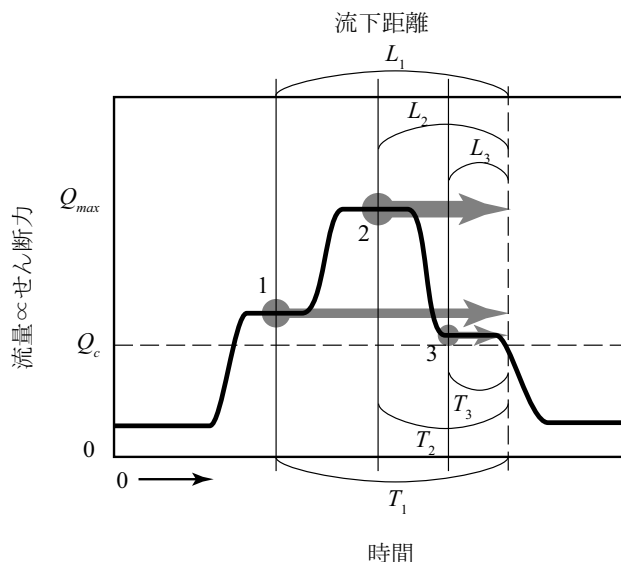


図-8 放流波形と流下距離の概念図

的とした場合、最大放流の継続時間や流量により剥離量を調整できる（矢印 2 の始点部分）が、剥離した藻類等の下流での堆積を防ぐ為には、少なくとも中規模流量程度の放流を、ある程度継続して行う（矢印 2 の長さを確保する）必要がある。

放流の継続時間の大きな目安としては、河床環境改善効果を狙う区間の延長を L 、継続時間を T 、洪水伝播速度を C 、物質輸送速度を U とすると、 $L \approx \frac{C}{1-U/C} T$ と評価できる。2009 年に実施されたフラッシュ放流について評価すると、図-5 より洪水伝播速度を 2.5m/s 程度、物質輸送速度を 1.6m/s 程度と評価でき、ピーク継続時間を 1.5 時間と評価すれば流下距離は 37km 程度となる。ただし、粒径の大きな物質であれば沈降により底面付近を流下することとなり輸送速度は小さくなり、流下距離も短縮される。また数 10km 流下することで、波形の減衰や河道の流下能力の変化により波形ピーク時の掃流力の逡減がみられるものと考えられる。実際には、このような理由により、 37km よりも流下距離はより短くなっているものと推察される。

5. おわりに

本研究では、2009 年 3 月に、広島県・島根県を流れる江の川水系の支川である上下川を対象に河川環境改善を狙って実施された灰塚ダムからのフラッシュ放流を対象に現地観測および流れの数値解析を実施してフラッシュ放流の効果の算定を行い、また放流波形と河床環境改善効果の関連に関する考察を行った。

chl.a の断面通過量について、放流のピーク流量時（最大放流）と、流量増加時（中規模放流）でピークがみられ、それぞれの流量での chl.a の流水への供給機構についての考察を行った。これらの供給機構および、フラッシュ放流の洪水波形の伝播速度と物質輸送の速度

に差に着目して、河道内での藻類・堆積有機物を剥離しつつ、下流での有機物や微細土砂等の堆積を抑制するためのフラッシュ放流の設計に関する考察を行った。

謝辞：中国地方整備局灰塚ダム管理所・浜田健一支所長に本研究の遂行にご協力をいただきました。本研究で用いた観測データの一部を株式会社建設環境研究所にご提供いただきました。現地観測では、株式会社ハイドロシステム開発・疋田真氏ならびに広島大学工学研究科・山本博技術員に技術協力をいただき、また広島大学水工学研究室の学生の協力を得ました。本研究の一部は、広島大学研究助成金ならびに河川整備基金による補助を受けました。

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, 河川技術論文集, Vol. 6, pp. 191–196, 2000.
- 2) 萱場祐一, 皆川朋子, 真田誠至: 河床の生態的健全性を維持するための流量設定手法に関する研究, 平成 20 年度重点プロジェクト研究報告書, 独立行政法人土木研究所, 2009.
- 3) 齊藤正徳, 川口洋一, 矢野真一郎, 井芹寧, 黨秀治郎, 島谷幸宏, 緒方健, 山崎正敏, 清野聡子: 筑後川上流域におけるダム放流量増加が付着藻類に与える影響, 水工学論文集, Vol. 51, pp. 1219–1224, 2007.
- 4) 小部貴宣, 浅見和弘, 大杉泰功, 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, No. 1, pp. 15–34, 2005.
- 5) 中土井祐輔, 椿涼太, 河原能久, 岩苔和広, 吉武央気: 灰塚ダムにおけるフラッシュ放流の現地観測と数値解析, 応用力学論文集 (投稿中), Vol. 13, , 2010.
- 6) 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掘深センサーの開発, 河川技術論文集, Vol. 6, pp. 313–318, 2008.
- 7) 重枝未玲, 秋山壽一郎, 浦勝, 有田由高: 非構造格子を用いた有限体積法に基づく平面 2 次元洪水流数値モデル, 水工学論文集, Vol. 45, pp. 895–900, 2001.
- 8) 椿涼太, 藤田一郎: 非構造格子浅水流数値モデルを用いた側岸凹部流れの水面振動構造の解析, 水工学論文集, Vol. 50, p. 128, 2006.
- 9) Fayssal Benkhaldoun, Imad Elmahi and Mohammed Seaïd: Well-balanced finite volume schemes for pollutant transport by shallow water equations on unstructured meshes, *J. Comput. Phys.*, Vol. 226, pp. 180–203, 2007.
- 10) J. Murillo, P. García-Navarro and J. Burguete: Conservative numerical simulation of multi-component transport in two-dimensional unsteady shallow water flow, *J. Comput. Phys.*, Vol. 228, pp. 5539–5573, 2009.

(2010.4.8 受付)