

フラッシュ放流における土砂供給が 付着藻類の剥離に与える付加効果の推定

EFFECT OF BED LOAD DISCHARGE ON REMOVAL OF ATTACHED ALGAE DURING FLUSHING FLOW

中土井佑輔¹・椿涼太²・河原能久³・石尾将大⁴
Yusuke NAKADOI, Ryota TSUBAKI, Yoshihisa KAWAHARA and Shota ISHIO

¹正会員 工修 株式会社建設技術研究所 (〒541-0045 大阪市中央区道修町1-6-7 北浜MIDビル)

²正会員 博(工) 広島大学大学院助教 工学研究科社会基盤環境工学専攻
(〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

³フェロー会員 工博 広島大学大学院教授 工学研究科社会基盤環境工学専攻 (同上)

⁴学生会員 広島大学大学院 工学研究科社会基盤環境工学専攻 (同上)

The flushing flow is a small scale flood induced by artificial water release from a reservoir to improve river environments downstream of dams. To increase the effect of the flushing flow and to eliminate a discontinuity of the sediment flow due to the dam, sediment has been supplied in the downstream reach of the dam. This study aims to estimate the effect of sediment supply on the removal of the attached algae during the flushing flow. A experimental channel with a section paved by the gravel with attached algae sampled by the Johge River was been used, and a shear stress acting on the bed materials during the flushing flow was represented. The effects of flow rates of water and sediment on the removal rate of the attached algae were investigated.

Based on the experimental result, we clarified that sediment particle with 10 mm in diameter efficiently removed the attached algae compared with identical sediment flow rate with 1 mm diameter sediment. Finally, we proposed a simple method to design optimal flow rates for water and sediment supply.

Key Words : *flushing flow, sediment supply, removal of attached algae, flume experiment*

1. はじめに

流量や土砂量は、河川環境に大きなインパクトを与える重要な要素である。ダムは治水・利水の観点から必要不可欠なものであるが、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、河川生態系へ大きな影響を及ぼしていることが指摘されている^{1)~3)}。このため、近年、ダム建設により劣化した河川環境を修復する試みであるフラッシュ放流が全国的に実施されている。

一級河川江の川水系の支流である上下川においても春先にフラッシュ放流が実施されており、河床攪乱による付着藻類の剥離と更新を図っている。上下川では、下流河川において粗粒化した河床環境を修復するため、土砂供給を伴うフラッシュ放流の実施が新たに検討されている。ここで、土砂供給を組み合わせたダム放流による効果としては、粗粒化した河床環境(河床材料の粒径分布)を元の自然状態近くまで回復させること⁴⁾や、これに伴

う魚類の産卵場所の増加⁵⁾、さらに付着藻類の剥離に対する助長効果^{6),7)}等が確認されている。上下川においても、土砂供給を組み合わせたフラッシュ放流の実施により、さらなる河床環境の修復効果「付着藻類の剥離」が期待される。土砂供給を伴うフラッシュ放流による付着藻類の剥離効果(土砂供給により生じる効果を指す。以下より付加効果)を事前に評価するためには、掃流砂による付着藻類の剥離現象について実験的に解明する必要があるが、これまでに土砂供給を伴うフラッシュ放流を想定した付着藻類の剥離実験は実施されていない。

そこで本研究では、土砂供給を伴うフラッシュ放流によって、付着藻類の剥離効果が増大することに着目し、この付加効果の推定と付加効果が最適となる土砂供給の方法について検討した。具体的には、上下川で実施されるフラッシュ放流の調査によって、通常のフラッシュ放流による付着藻類の剥離効果を把握すると共に、土砂供給を組み合わせた水路実験を行うことで、土砂供給を伴うフラッシュ放流による付着藻類の剥離効果を解明し、

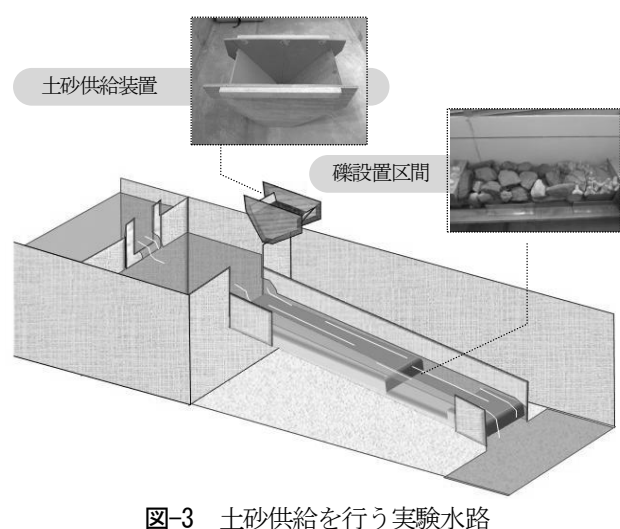
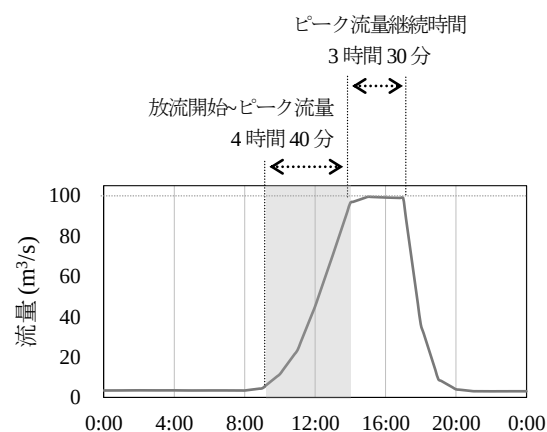
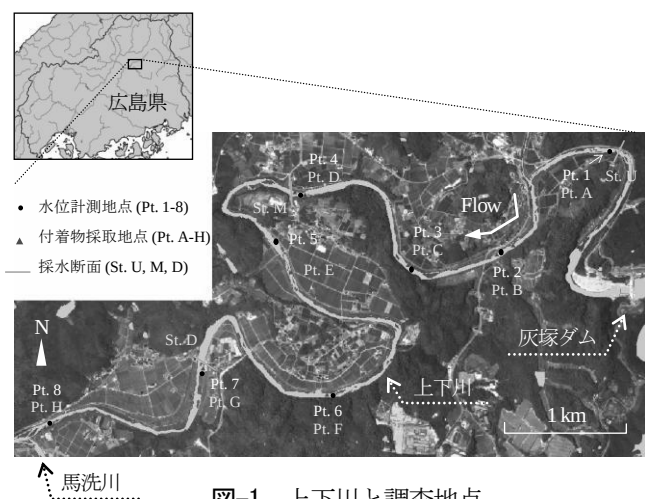


表-1 実験条件と実験日

実験ケース	実験日	通水流量	土砂供給量	土砂粒径
		$\times 10^{-3} (\text{m}^3/\text{s})$	$\times 10^{-4} (\text{m}^2/\text{s})$	(mm)
0	a	5	-	-
	b	10		
	c	20		
1	b1	10	0.52	1
	b2		1.05	
	b3		2.10	
	c	20	2.10	
2	a	5	1.05	10
	b1	10	0.52	
	b2		1.05	
	b3		2.10	
	c	20	1.05	

放流中の土砂供給が付着藻類の剥離に与える付加効果の推定、および期待する付着藻類の剥離効果を実現し得る放流量および土砂の諸元（粒径・供給量）を設計した。

2. 現地調査と水路実験

上下川は、一級河川江の川の支流である。広島県北部の山地を貫流しているため河川の大部分が山地に接しており、図-1に示すように湾曲部や蛇行部を有する複雑な河道形状となっている。また、馬洗川との合流地点から12 km上流に多目的ダムである灰塚ダムがある。河道には、主にヨシ等の草本で構成される植生域が広範囲にわたって繁茂しており、河床は岩盤や、シルトから大礫までの幅広い粒径の自然砂礫で構成されていた。

(1) フラッシュ放流の調査

上下川において、2011年3月23日に実施されたフラッシュ放流を対象に現地調査を行った。フラッシュ放流は

灰塚ダム完成から毎年実施されており、今回調査を行ったフラッシュ放流は第5回目にあたる。図-2にフラッシュ放流の放流量ハイドログラフを示す。

現地調査として、フラッシュ放流中の水位、水質（SSおよびクロロフィルa濃度）の時間変化、河床材料の移動状況を計測し、放流中の流況変化を把握した。ここで、クロロフィルa（以下Chl.a）は水中に存在する藻類量の指標であり、ダムからの放流水に含まれるChl.aの変動が放流中において小さいとすると、フラッシュ放流によるChl.aの変化は河床に繁茂する付着藻類量の変化と言える。また放流前後に、河道内の瀬10地点において河床礫上のChl.a量を計測し、フラッシュ放流による付着藻類の剥離効果を調査した。図-1に調査地点を示す。河床材料の移動状況は、図中のPt. B, D, F, Gの4地点にて調査を行い、放流中の河床攪乱の程度によって変化する付着藻類の剥離効果を把握した。

(2) 土砂供給を行う水路実験

実験水路は、フラッシュ放流中の速い流速を再現する

表-2 フラッシュ放流による付着藻類の剥離率と河床材料の移動状況の関係

Pt	B	D	F	G
付着藻類の剥離率 (%)	53.1	16.5	51.3	55.1
河床礫の移動限界粒径 (cm)	40	なし	20	40
河床の洗掘深さ (cm)	10.5	0	3.5	7

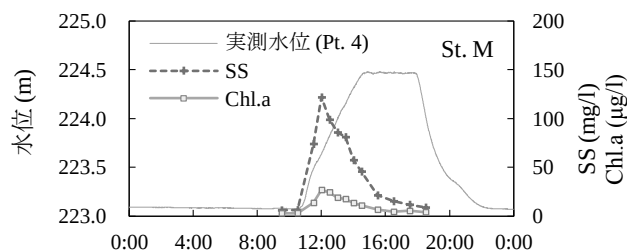


図-4 フラッシュ放流中の水質変化

よう設計した（幅0.3 m, 長さ4.5 m, 勾配10%）。図-3に示すように、土砂供給装置を用いて水路上流から土砂を供給し、礫設置区間に設置した河床礫上の付着藻類を剥離させた。放流中の付着藻類の剥離機構として、河床をサルテーション運動する掃流砂礫の摩耗および衝突による、河床礫（浮き石）に着生した付着藻類の剥離を想定した。河床礫は、付着藻類が十分に着生した粒径15 cm程度の比較的偏平なものを、上下川のPt. G付近から数個採取し、水路床高を調整しながら設置した。

実験条件として通水流量、土砂供給量および供給する土砂粒径を変化させて1時間通水し、水路床せん断応力を算出する水位と、付着藻類の現存量を10分間隔で計測した。表-1に実験条件を記す。実験ケースは、土砂供給の有無および土砂の粒径を分類した3ケースを考え、通水流量にも応じてさらに3ケースに分類した。この実験結果を用いて、付着藻類の剥離に対して最適な、土砂供給を組み合わせたフラッシュ放流の運用方法（放流量、土砂投入量、供給土砂粒径）を検討した。なお、実験中に河床礫の移動は確認されなかった。

3. フラッシュ放流による付着藻類の剥離効果

フラッシュ放流の調査結果を用いて、以下の式より放流による付着藻類の剥離率を算出し、これを通常のフラッシュ放流による付着藻類の剥離効果とした。

$$C_{rate} = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

ここに、 C_0 は放流前の初期Chl.a量、 C_1 は放流後のChl.aの残存量である。各調査地点における、放流による付着藻類の剥離率と河床材料の移動状況を表-2に整理した。表より、Pt. B, F, Gの3地点とPt. Dを比較すると、放流中

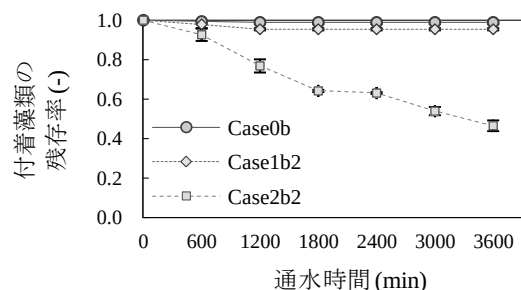


図-5 各実験条件における付着藻類の剥離過程

に藻類の付着基盤が移動（転石）することでその地点における付着藻類の剥離率が増大しており、フラッシュ放流が実施される春先においては、転石が付着藻類の剥離に対して効果的であることが分かった。また、Pt. D付近に繁茂する付着藻類については、掃流砂の影響によってのみ剥離したと言え、転石を伴わないフラッシュ放流による付着藻類の剥離効果は約16.5%であったと評価した。

図-4より、Chl.a濃度は水位上昇期に最大値をとり、ピーク水位以降は減少傾向を示すことから、付着藻類の剥離は主に放流開始からピーク流量までの間（図-2より4時間40分）に発生したと考えられる。

4. 水路実験による付着藻類の剥離効果

(1) 実験結果

各実験条件における付着藻類の付着藻類の剥離過程および剥離率を図-5、図-6示す。図-5の縦軸は、各時刻において計測した付着藻類の現存量を、実験前の初期付着藻類量で除した残存率である。図には、同一通水流量を実験条件とする3ケースを示した。図-5より、付着藻類の残存率の減少が顕著に見られるCase2b2の剥離過程について見ると、付着藻類の残存率は時間と共に減少する傾向を示すことが分かった。

図-6は、縦軸に土砂供給量、横軸に底面せん断応力をとり、円のサイズが付着藻類の剥離率を表すものであり、付着藻類の剥離効果が大きかった実験ケースを視覚的に判断し易くした図である。図より、Case0（流水のみ）、Case1（粒径1 mm程度）による付着藻類の剥離効果はほとんどないことや、土砂供給を行う場合、Case2（粒径10 mm程度）の方が付着藻類の剥離効果が大きいことが確認できた。また、Case2c（図中太枠）においては、フラッシュ放流に比べ通水時間が1時間と短いにも関わらず、藻類剥離率が70%を越えており、Case0, 1と比較すると、付着藻類の剥離に対して、土砂供給による顕著な助長効果を確認することができた。

以上より、本実験の諸元を有するフラッシュ放流による付着藻類の剥離効果の増大を目的とする場合、粒径1 mm程度の土砂供給ではほとんど効果は無く、粒径10

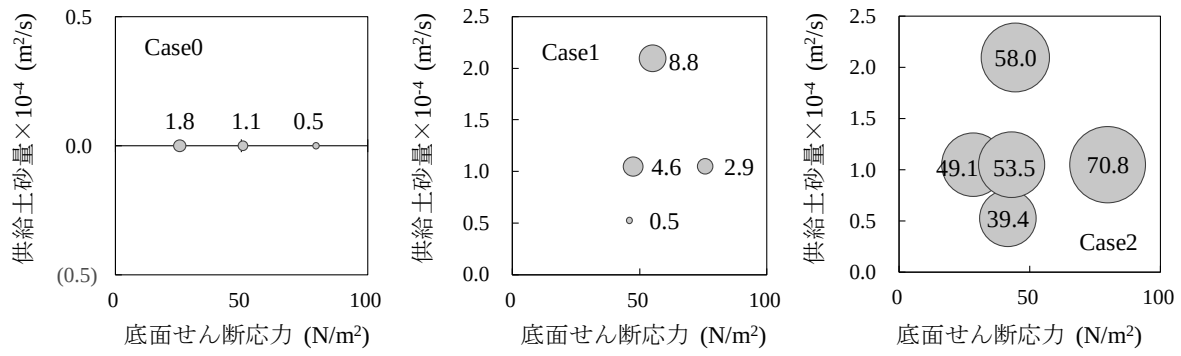


図-6 各実験条件における付着藻類の剥離効果

mm程度の礫であれば付着藻類の剥離を助長する効果が十分に期待できることが確認された。

(2) 既往の研究との対応

本実験結果を妥当性を確認するため、既往の研究によって解明されている、掃流砂の衝突による付着藻類の剥離機構と実験結果との整合性を考察した。

田代⁸⁾や北村ら⁹⁾は、水路実験によって、掃流砂による河床攪乱作用と付着藻類の剥離との関係を考察している。具体的には、付着藻類の現存量は、藻類の剥離特性値に起因し、式(2)のように指数関数的に減少すること、さらに、この剥離特性値と河床に作用する掃流砂の仕事量には式(3)のような線形的な関係があることを確認している。

$$\frac{C}{C_0} = \exp(-pt) \quad (2)$$

$$p = \alpha W_x = \alpha \gamma q_B d^{1/3} u_*^{2/3} \quad (3)$$

ここに、 C は時間 t で剥離した付着藻類の残存量、 C_0 は剥離前の付着藻類の残存量、 p は付着藻類の剥離特性値(1/s)、 W_x は単位時間、単位面積当たりの河床に作用するサルテーション砂礫のなす摩擦力による仕事量($\text{Nm}^{-1}\text{s}^{-1}$)、 α は付着藻類の生長状態に依存する係数(N^{-1}m)、 γ は路床の材料特性に関わる係数(礫床の場合、 $4.94 \times 10^5 \text{ Nm}^{-4}\text{s}^{2/3}$)、 q_B は単位幅当たりの掃流砂量(m^2/s)、 d は掃流砂礫の粒径(m)、 u_* は摩擦速度(m/s)である。上式に、本研究で行った水路実験結果を当てはめ作成した、付着藻類の剥離特性値と掃流砂の仕事量の関係を図-7に示す。ここに、付着藻類の剥離率 P は、通水時間 T を1時間として以下の式(3)を用いて剥離特性値 p に変換した。

$$p = -\frac{1}{T} \ln \left(1 - \frac{P}{100} \right) \quad (4)$$

本実験の通水時間は1時間と短いため、図-5中のCase2b2において、付着藻類の現存量は式(2)に示すように指数関数的に減少する過程は描けなかった。また、

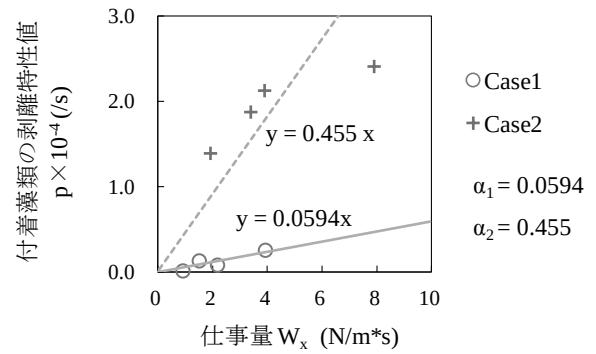


図-7 付着藻類の剥離特性値と仕事量の関係

Case1とCase2では、実験日が異なったことから、付着藻類の生長状態が異なっていたこともあり、共通した α は得られなかった。しかし、フラッシュ放流中の速い流速を再現し得る今回のような実験条件においても、両Case共に既往の研究と同様、付着藻類の剥離特性値と掃流砂の仕事量の間には線形的な関係を示したため、本実験において、掃流砂による付着藻類の剥離機構は式(3)に基づくものであると言える。ここで、図中の傾き α は、付着藻類の剥離効果を的確に推定する上で重要な係数であるが、この評価方法については未だ解明されていないため、多変量解析による評価式の構築が今後期待される。

5. 土砂供給を組み合わせたフラッシュ放流

(1) 期待する藻類剥離効果を満足する土砂供給方法

次に、土砂供給を組み合わせたフラッシュ放流に期待する、付着藻類の剥離効果を実現するような、流量と土砂供給量の組み合わせ(以下よりダム放流の運用指標)を導出した。式(5)に図-7で得た α を代入し、計画する付着藻類の剥離特性値 p を実現する土砂供給量 q_B を、放流量に起因する摩擦速度 u_* の関数で表した。

$$q_B = \frac{1}{\alpha} \times \frac{p}{\gamma d^{1/3} u_*^{2/3}} \quad (5)$$

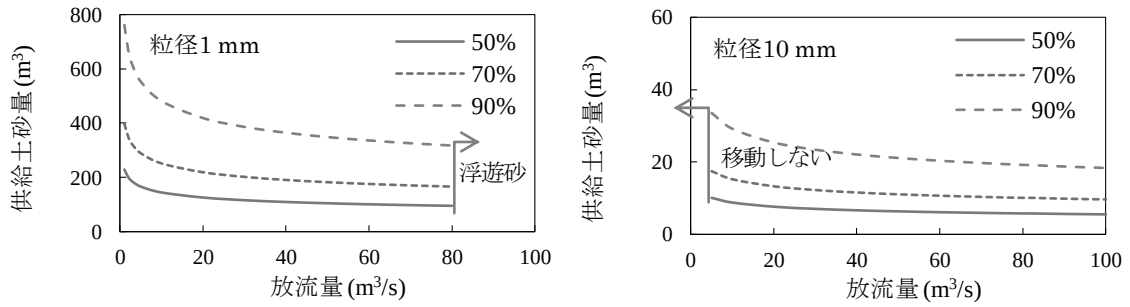


図-8 計画剥離率を満足するダム放流の運用指標

ここに、ピーク流量が1時間であり、ピーク流量継続時間に均一に土砂供給を行うフラッシュ放流（四角い放流波形）を想定した。式(5)において、式中の p は、実現象として期待する付着藻類の剥離率（以下より計画剥離率） P へと換算する式(4)を、 u_* は式(6)に示す放流量 Q の関数へと変換し、それぞれ式(5)に代入して、放流量を変化させたときに計画剥離率を満足する土砂供給量を評価した。

$$u_* = \sqrt{ghI_E} = \sqrt{g \left\{ n^2 \left(\frac{Q}{B} \right)^2 \right\}^{0.3} I_0^{0.7}} \quad (6)$$

ここに、河床の粗度係数 n 、川幅 B 、河床勾配 I_0 は、観測経験に基づき、それぞれ $0.04 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ 、 25 m 、 $1/300$ とした。

以上より、計画剥離率を満足する、ダム運用指標の導出結果を図-8に示す。図中の縦軸は、式(5)で評価した単位幅当たりの土砂供給量に放流時間と川幅を乗じ、実河川において活用し易いよう体積換算したもの（以下より土砂投入量）である。図には、例として、計画剥離率50、70、90%の3パターンを満足するダム放流の運用指標を示した。また、供給された土砂のフラッシュ放流中の挙動は、放流量の大小に依存することを考慮し、運用指標の表示範囲を限定した。これは、放流量が供給土砂の移動限界を越えない程小さい場合、供給した土砂は移動せず、掃流砂として流下しないことや、逆に大き過ぎると、供給土砂の沈降速度を上回る摩擦速度が作用し、浮遊砂として流下するためである。以下の式(7)に、それぞれ移動判定および掃流判定を行う条件式を示す。

$$\tau_* > \tau_{*c} \quad (\text{移動条件}) \quad (7a)$$

$$u_* < w \quad (\text{掃流条件}) \quad (7b)$$

ここに、各粒径の限界掃流力 τ_{*c} は岩垣の実験式¹⁰⁾、沈降速度 w はNewtonの実験式¹¹⁾ $1.82\sqrt{g\gamma d}$ より算定した。

図より、実験結果と同様、同一流量では粒径の大きな土砂の方が、少ない土砂投入量で大きな計画剥離率を満足することが分かる。また、同図より、付着藻類の剥離促進を目的とする場合、放流量よりも供給土砂量を増加させる方が効果的であることが分かり、図-6の実験結果

とは異なる現象となったが、水路実験の誤差によるものなのか、あるいは前述した係数 α の効力によるものなのかは判断できなかった。ここで、図-8の活用方法について少し説明を加える。例えば、ピーク流量 $50 \text{ m}^3/\text{s}$ を1時間継続するフラッシュ放流によって付着藻類を90%剥離させたい場合、供給する土砂粒径が 1 mm であれば、約 400 m^3 、 10 mm であれば約 20 m^3 の供給土砂量が必要となる。これは、式(4)~(6)を用いて厳密に推定することも可能であるが、図からも感覚的に把握することができる。

(2) 土砂供給による藻類剥離の付加効果

本節では、前節で想定した放流よりも複雑な、2011年のフラッシュ放流に土砂供給を組み合わせた場合に付加される付着藻類の剥離効果を式(8)より推定した。

$$E_{\text{algae}} = \frac{C_+^{\text{rate}} - C_{2011}^{\text{rate}}}{C_{2011}^{\text{rate}}} \quad (8)$$

ここに、 C_{2011}^{rate} は2011年のフラッシュ放流による付着藻類の剥離率であり、3章より16.5%であった。一方、 C_+^{rate} は土砂供給を組み合わせたフラッシュ放流による付着藻類の剥離率であり、推定方法は以下の通りである。まず、水路実験より得た α 、2011年のフラッシュ放流中に時間変化する u_* （式(6)）、および河道内に設置した土砂が4時間40分の間（3章より、付着藻類が活発に剥離すると考えられる時間）に均一に河川水中に供給されるとして任意の土砂投入量から算出した q_B を式(3)に代入して、放流中に経時変化する付着藻類の剥離特性値 p を各時刻で評価する。次に、この p を用いて式(2)より付着藻類の残存量を計算していき、放流開始から4時間40分後の残存量 C_1 を式(1)に代入することで、土砂供給を組み合わせたフラッシュ放流の付着藻類の剥離率を算出した。

図-9に、任意の土砂投入量と、その量の土砂供給を2011年のフラッシュ放流に組み合わせた際の、付着藻類の剥離に対する付加効果の関係を示す。理論的に付着藻類の剥離率が100%を越えることはないため、式(8)より $5.0606\dots (= (100 - 16.5)/16.5)$ が付加効果の最大値である。図より、土砂供給による付加効果は土砂投入量と共

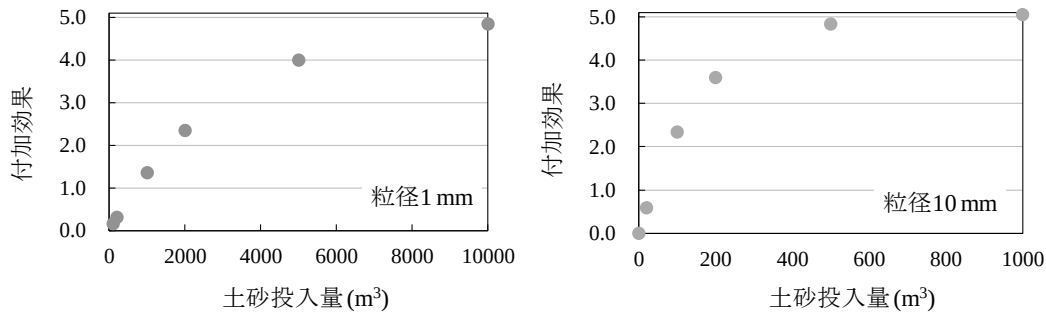


図-9 土砂供給を組み合わせたフラッシュ放流による付着藻類の剥離に対する付加効果

に対数的に増大し、その関係は対数の累乗で表されることを確認した。ここで、本節ではピーク流量100 m³/sを持つ春先のフラッシュ放流を想定しているため、本来は転石による付着藻類の剥離効果の増大も十分考えられる。しかし、図-9では付着藻類の剥離を掃流砂の衝突によってのみ発生すると考えており、付加効果を過小評価していることが示唆される。このため、底生生物による河床の固化作用によって放流中に転石が発生し難い夏季においては、本研究と同様の手順に従うと、土砂供給による付加効果が春先に比べて高精度に推定できると言える。

6. 結論

本研究では、上下川で実施されるフラッシュ放流の現地調査および土砂供給を行う水路実験によって、土砂供給を組み合わせたフラッシュ放流による付着藻類の剥離効果を解明した。以下に、主要な結論・成果を記す。

- ・ フラッシュ放流が実施される春先においては、転石が付着藻類の剥離に対して効果的である
- ・ 土砂供給を伴うフラッシュ放流による付着藻類の剥離効果の増大を目的とする場合、粒径1 mmの土砂ではほとんど効果は無く、粒径10 mmの礫であれば付着藻類の剥離を助長する効果が十分に期待できる
- ・ 放流波形が単純なフラッシュ放流において、計画剥離率を満足するダム運用指標の導出が可能になった
- ・ 非定常の放流波形を持つフラッシュ放流においても、土砂供給を組み合わせた際の付着藻類の剥離に対する付加効果が推定できるようになった

今後は、付着藻類の剥離要因を掃流砂のみに限定せず、転石の影響も加味した、フラッシュ放流中の藻類の剥離機構の解明と放流による剥離効果の推定を行う。

謝辞：本研究の遂行にあたりご協力をいただきました、国交省中国地方整備局灰塚ダム管理所・浜田健一支所
また、三次河川国道事務所の皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 皆川脛子, 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) 江村歓, 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) 独立行政法人水資源機構 下久保ダム管理所：三波石峡への土砂供給試験及びモニタリング調査結果の概要, 2004.
- 5) Cambray, J. A. : The effects on fish spawning and management implications of impoundment water releases in an intermittent South African River, Regulated Rivers, Research and management 6, pp. 39-52, 1991.
- 6) 国土交通省近畿地方整備局 九頭竜川ダム統合管理事務所：河川土砂還元を組み合わせた真名川ダム 弾力的管理試験「フラッシュ放流」, 河川12月号, pp. 71-74, 2005.
- 7) 坂本博文, 中村甚一, 角哲也, 浅見和弘：真名川ダム弾力的管理試験における「フラッシュ放流」の計画と効果の評価手法について, 河川技術論文集, 第12巻, pp. 271-276, 2006.
- 8) 田代喬：ダム下流河道における河床の低撓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, p. 140, 2003.
- 9) 北村忠紀, 加藤万貴, 田代喬, 辻本哲郎：砂利投入による付着藻類カワシオグサの剥離除去に関する実験的研究, 河川技術に関する論文集, Vol. 6, pp. 125-130, 2001.
- 10) 岩垣雄一：限界掃流力に関する基礎的研究 (I) 限界掃流力の流体力学的研究, 土木学会論文集, 41号, pp.1-21, 1946.
- 11) 土木学会：水理公式集 平成11年度, p.387, 1999.

(2012. 4. 5受付)