

フラッシュ放流によるダム下流の河床付着性藻類の強制剥離に関する研究

FORCED DETACHMENT OF ATTACHED ALGAE IN DOWNSTREAM REACH OF DAM BY ARTIFICIAL FOOD

赤松良久¹・井上麻衣²・池田駿介³

Yoshihisa AKAMATSU, Mai INOUE and Syunsuke IKEDA

¹正会員 博士(工学) 琉球大学 准教授 工学部環境建設工学科(〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原一番地)

²非会員 学士 東京工業大学 土木・環境工学科(〒226-8502 東京都目黒区大岡山2-12-1)

³フェロー会員 工博 東京工業大学大学院 教授 理工学研究科(〒226-8502 東京都目黒区大岡山2-12-1)

Laboratory experiment on relation between bed load and algal detachment revealed that bed load with the diameter of 5-15mm is most effective to remove attached algae. A prediction model of detachment of the attached algae, which consists of flow equation and the relation between tractive force and algal detachment, was constructed and applied to a riverine section in about 1 km downstream reach from Miyagase dam, Kanagawa, Japan, where serious proliferation of filamentous algae occurs. The result shows that the artificial flood with the smaller discharge, compared with the present flush discharge, is enough to remove the attached algae when the bed load with the diameter of 10.4mm was supplied with sufficient.

Key Words : Attached algae, artificial flood, bed load, detachment, numerical simulation

1. はじめに

治水・利水の観点からダムは我々の生活に必要不可欠であるが、近年、ダム下流河川では物質輸送や流量変動が平滑化し、細粒土砂の堆積、糸状藻類の異常繁茂、魚類の生息環境悪化などの様々な環境問題が生じている。これらの解決策の一つとしてフラッシュ放流が全国各地のダムで行われている。また、河床の固定化を促進させる異常繁茂した付着藻類の除去のため 置き砂を伴うフラッシュ放流も実施されているが、それらは試験的なものが多く、科学的知見に基づいて適切に行われたものではない。フラッシュ放流の在り方に関する研究^{1), 2)}は行われているものの、土砂・礫の投入を伴うフラッシュ放流に関する研究はほとんど行われていない。

本研究では、フラッシュ放流に期待される効果のうち砂礫の投入による付着性藻類の剥離更新効果に焦点を当て、最適なフラッシュ放流形態を明らかにすることを目的とし、河床付着性藻類の強制剥離に関する室内実験お

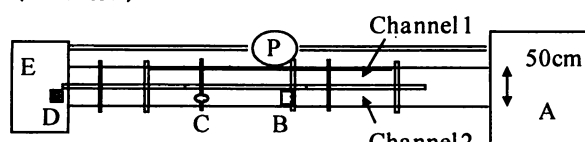
よび実河川を対象とした数値シミュレーションを行った。

2. 藻類剥離実験

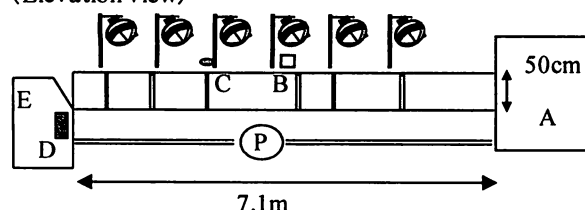
(1) 実験方法

図-1に実験に用いた水路の平面図および立面図を示す。水路はアクリル板によって仕切られる二つの水路から構成され、それぞれの水路は上流端水槽、下流端水槽を共有している。水路1は現地から採取した藻類の付着した礫の保存に使用し、水路2は土砂による藻類の剥離実験に使用する。藻類の光合成活動に必要な光を与えるため、水路に500Wの白熱灯(RF110V450WH, (株)松下電器)を6個設置し(図-1)、昼夜の別は自動タイマーによって制御し、1日当たりのランプ点灯時間は5:00~21:00の16時間とした。白熱灯が水路床に与える照度は3000lux~4000luxであった。また、水温は水路内の水を循環して冷却するクーラー装置((株)海遊工房)を用いて25℃前後の恒温状態に保った。

(Plan view)



(Elevation view)



A: Upstream tank
B: Sediment supply
C: Digital video
D: Sediment trap
E: Down stream tank
P: Pump

図-1 実験水路

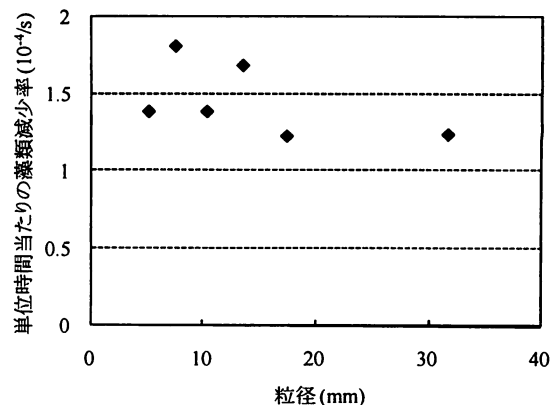


図-2 単位時間あたりの藻類減少率と粒径の関係 (CaseA)

剥離実験では神奈川県相模川水系中津川の宮ヶ瀬ダムの1.2km下流から採取した礫（糸状体を形成する緑藻のアオミドロ属 *Spirogyra sp.* が異常繁茂した状態）を下流端から2.6～3mの部分に設置した。設置後、設置箇所から約1m上流から土砂を一定の割合で供給し、水路下流端で土砂を捕捉した。土砂供給は水路上方からの画像撮影を10分ごとに行い、付着藻類がほぼ完全に剥離したと確認されるまで継続した。また、剥離実験開始前と糸状藻類の付着面積の減少が収束した実験終了後に糸状藻類を剥ぎ取り（採取面積：礫の形状にあわせて適宜）、単位面積当たりの藻類の強熱減量を計測した。

表-1に粒径を変化させた場合（CaseA）および流れの状態を変化させた場合（CaseB）の実験条件を示す（CaseA-3とCaseB-1は同一の実験である）。

(2) 実験結果 (CaseA)

流れの状態を一定として、粒径が5.2mm, 7.6mm, 10.4mm, 13.6mm, 17.5mm, 31.8mmの6種類のケースについて検討した。表-2に実験から得られた各ケースの初期藻類量 M_0 、収束藻類量 M_f 、残存率 $R_s (=M_f/M_0 \times 100)$ 、継続時間 T および単位時間当たりの藻類減少率 $P (= (M_0 - M_f)/M_0/T)$ を示す。5-15mm程度の粒径の礫の方が15mm以上の粒径より減少率が高いことがわかる。また、粒径が5.2mmより小さい場合($d=3.6\text{mm}$)には付着藻類の剥離に十分な衝撃力がなく付着藻類の剥離はほとんど見られなかった。これらの結果から、5-15mm程度の粒径の礫が藻類の剥離に有効であることがわかる。

表-1 実験条件

	CaseA-1	CaseA-2	CaseA-3	CaseA-4	CaseA-5	CaseA-6	CaseB-1	CaseB-2
粒径 d (mm)	5.2	7.6	10.4	13.6	17.5	31.8	10.4	10.4
流量 Q (m^3/s)	16.8	16.4	16.8	16.4	16.8	16.8	16.8	23.9
河床勾配 I	0.013	0.013	0.013	0.015	0.013	0.013	0.013	1.58
水深 h (m)	0.071	0.071	0.071	0.055	0.071	0.071	0.071	0.078
摩擦速度 u^* (m/s)	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.092
無次元掃流力 τ^*	0.06	0.043	0.03	0.023	0.02	0.01	0.03	0.05

表-2 各ケースの初期藻類量、収束付類量、残存率、継続時間および単位時間当たりの藻類減少率 (CaseA)

	CaseA-1 ($d=5.2\text{mm}$)	CaseA-2 ($d=7.6\text{mm}$)	CaseA-3 ($d=10.4\text{mm}$)	CaseA-4 ($d=13.6\text{mm}$)	CaseA-5 ($d=17.5\text{mm}$)	CaseA-6 ($d=31.8\text{mm}$)
初期藻類量 M_0 (mg/cm^2)	4.5	4.9	4	5.7	8.6	4.7
収束藻類量 M_f (mg/cm^2)	0	0.1	0	0.5	1	0.5
残存率 R_s (%)	0.0	2.0	0.0	8.8	11.6	10.6
継続時間 T (min)	120	90	120	90	120	120
時間減少率 P ($10^{-4}/\text{s}$)	1.39	1.81	1.39	1.69	1.23	1.24

表-3 各ケースの初期藻類量, 収束藻類量, 残存率, 継続時間および単位時間当たりの藻類減少率 (CaseB)

	CaseB-1	CaseB-2
	($\tau^*=0.03$)	($\tau^*=0.05$)
初期藻類量 M_0 (mg/cm ²)	4	6
収束藻類量 M_f (mg/cm ²)	0	0
残存率 R_s (%)	0.0	0.0
継続時間 T (min)	120	90
時間減少率 P (10 ⁻⁴ /s)	1.39	1.85

(3) 実験結果 (CaseB)

10.4mmの粒径の礫を用いて流れの状態を変化させたケースについて検討した。表-3に実験から得られた各ケースの初期付着藻類量 M_0 , 収束付着藻類量 M_f , 残存率 $R_s (=M_f/M_0 \times 100)$, 継続時間 T および単位時間当たりの付着藻類減少率 $P (= (M_0 - M_f)/M_0/T)$ を示す。実験において流量を徐々に増加させたところ, 無次元掃流力が0.02を超えるまでは礫の移動が確認できず藻類の減少率がゼロであった。その結果を加えて, 図-3に単位時間あたりの藻類の減少率と無次元掃流力の関係を示す。無次元掃流力が増加するに従って, 単位時間当たりの藻類の減少率も大きくなることがわかる。

3. 数値シミュレーションモデル

平面二次元非定常の流れモデルと実験から得られた藻類の剥離と無次元掃流力の関係を用いて礫投入を伴うフラッシュ放流による付着藻類の剥離予測モデルを構築した。

(1) 流れの基礎方程式

流れの基礎式は, 一般座標系で記述された水深平均のレイノルズ方程式を用いた³⁾。

・連続式

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

・運動方程式

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

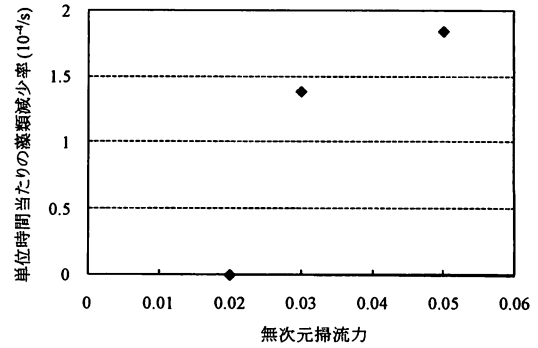


図-3 単位時間あたりの藻類減少率と無次元掃流力の関係 (CaseB)

$$\begin{aligned} & + \frac{\xi_x \eta_y + \xi_y \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{u'v'h} \right) + \frac{2\xi_x \xi_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{u'v'h} \right) \\ & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q^\eta}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{UQ^\eta}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{VQ^\eta}{J} \right) - \\ & \frac{M}{J} \left(U \frac{\partial \eta_x}{\partial \xi} + V \frac{\partial \eta_x}{\partial \eta} \right) - \frac{N}{J} \left(U \frac{\partial \eta_y}{\partial \xi} + V \frac{\partial \eta_y}{\partial \eta} \right) \\ & = -gh \left(\frac{\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + \frac{\eta_x^2 + \eta_y^2}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \eta} \right) \\ & - \frac{\tau_b^\eta}{\rho J} + \frac{\xi_x \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{u'^2} h \right) + \frac{\eta_x^2}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{u'^2} h \right) \\ & + \frac{\xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{v'^2} h \right) + \frac{\eta_y^2}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{v'^2} h \right) \\ & + \frac{\xi_x \eta_y + \xi_y \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{u'v'h} \right) + \frac{2\eta_x \eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{u'v'h} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで, h : 水深, $(\xi_x, \eta_x, \xi_y, \eta_y)$: 変換のマトリックス, J : 座標変換のヤコビアン, M, N : デカルト座標系の流量フラックス, u, v : デカルト座標系の水深平均流速ベクトル, U, V : 流速ベクトルの反変成分, τ_b^ξ, τ_b^η : 底面せん断力の反変成分である。

レイノルズ応力項に関しては, それぞれ以下の式で与えることとし,

$$\begin{aligned} -\overline{u'^2} &= 2D_h \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{2}{3}k \\ -\overline{u'v'} &= D_h \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ -\overline{v'^2} &= 2D_h \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{2}{3}k \end{aligned} \quad (4)$$

渦動粘性係数 D_h は水深と摩擦速度により与え, 時間水深平均乱れエネルギー k に関しては, Nezu and Nakagawa⁴⁾により得られている等流状態の粗面開水路乱流の乱れエネルギーの鉛直分布を水深積分した以下の式で与えるこ

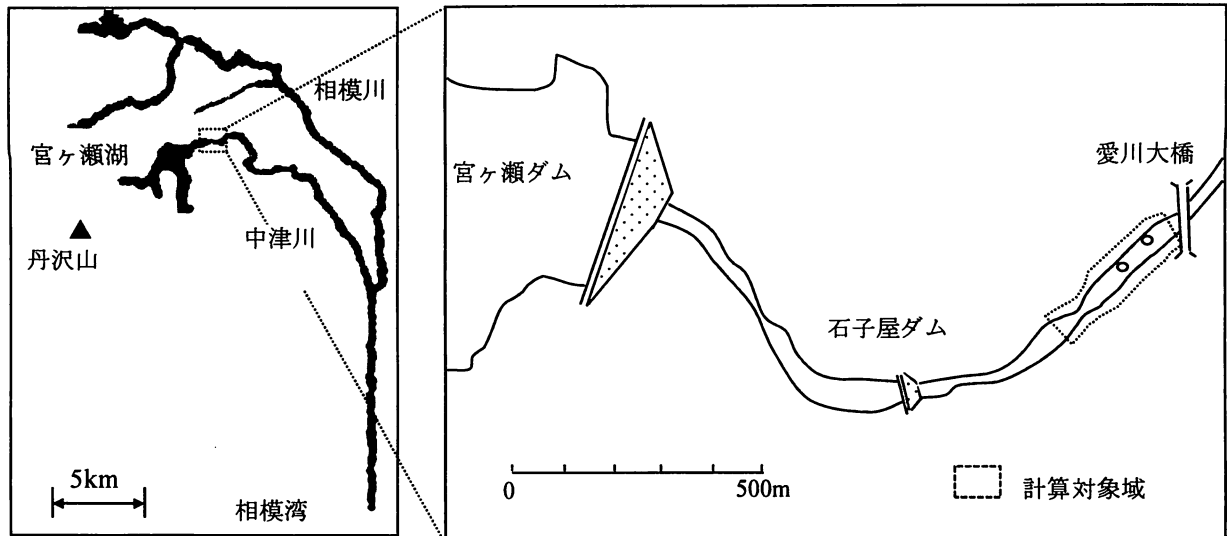


図-4 計算対象域

ととする。

$$\begin{aligned} D_h &= \alpha h u^* \\ k &= 2.07 u^{*2} \end{aligned} \quad (5)$$

ここに u^* : 摩擦速度で, $u^* = \sqrt{\tau_b / \rho}$ であり, 渦動粘性係数に関する係数 α は0.3とした。

(2) 藻類の剥離と無次元掃流力の関係

田代⁵⁾によって示された理論的な無次元掃流力と藻類減少率の関係を参考に実験で得られた結果(図-3)を対数近似し, 粒径10.4mmの礫に対する単位時間あたりの藻類減少率と無次元掃流力に関する次の関係式を得た。

$$\begin{aligned} P &= 0 & (\tau^* < 0.02) \\ P &= 2.03 \ln(\tau^*) + 8.1 & (\tau^* \geq 0.02) \end{aligned} \quad (6)$$

本式を用いて流れ場の計算結果から得られる無次元掃流力から藻類の減少率を算定した。

4. 数値シミュレーションによる実河川でのフ

ラッシュ放流形態の検討

(1) 計算条件

流れに関する境界条件は, 上流端では観測値より与えられるダムからの放流量をマニング則に従って横断方向の水深の5/3乗に比例するよう配分し, 下流端では観測で得られた水位を与えた。初期条件として, 河道中央部の水位は計算下流端の水位を計算区間の平均河床勾配に沿って上流方向に延長して与え, 横断方向には各横断面内の河道中央部の水位と等しく与えた。初期流量フラックスの流下方向成分については, 各横断面内において計算初期の流入流量をマニング則に従って水深の5/3乗に

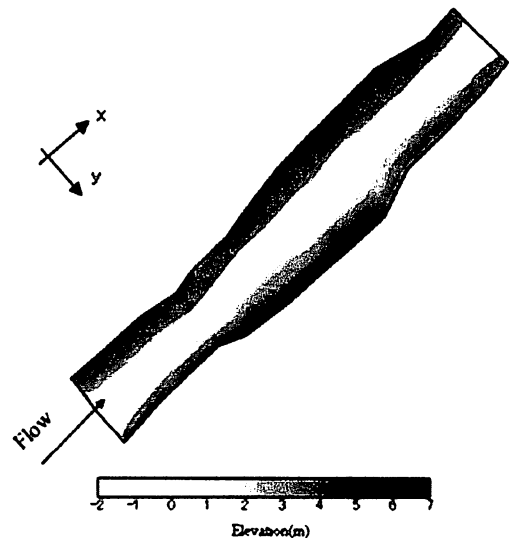


図-5 計算対象域の地形コンター

比例するよう配分し, 流量フラックスの横断方向成分はゼロとした。また, 初期条件として河道内全域において藻類が飽和状態で存在し, フラッシュ放流時には十分な粒径10.4mmの礫の供給があると仮定した。

計算は神奈川県宮ヶ瀬ダム下流の愛川大橋から約380m上流の段落ち部から愛川大橋までを対象として行った(図-4)。図-5に計算対象域の地形コンターを示す。

(2) 計算結果

2005年10月に宮ヶ瀬ダムにおいて行われたフラッシュ放流に対して, 十分な粒径10.4mmの礫の供給があると仮定した際の河床付着性藻類の剥離状況について検討した。実際に行われたフラッシュ放流では礫供給は無く, 河床の固定化が進んでいたため, 現地観測から得られた下流域の愛川大橋上流地点における藻類の除去率は23%

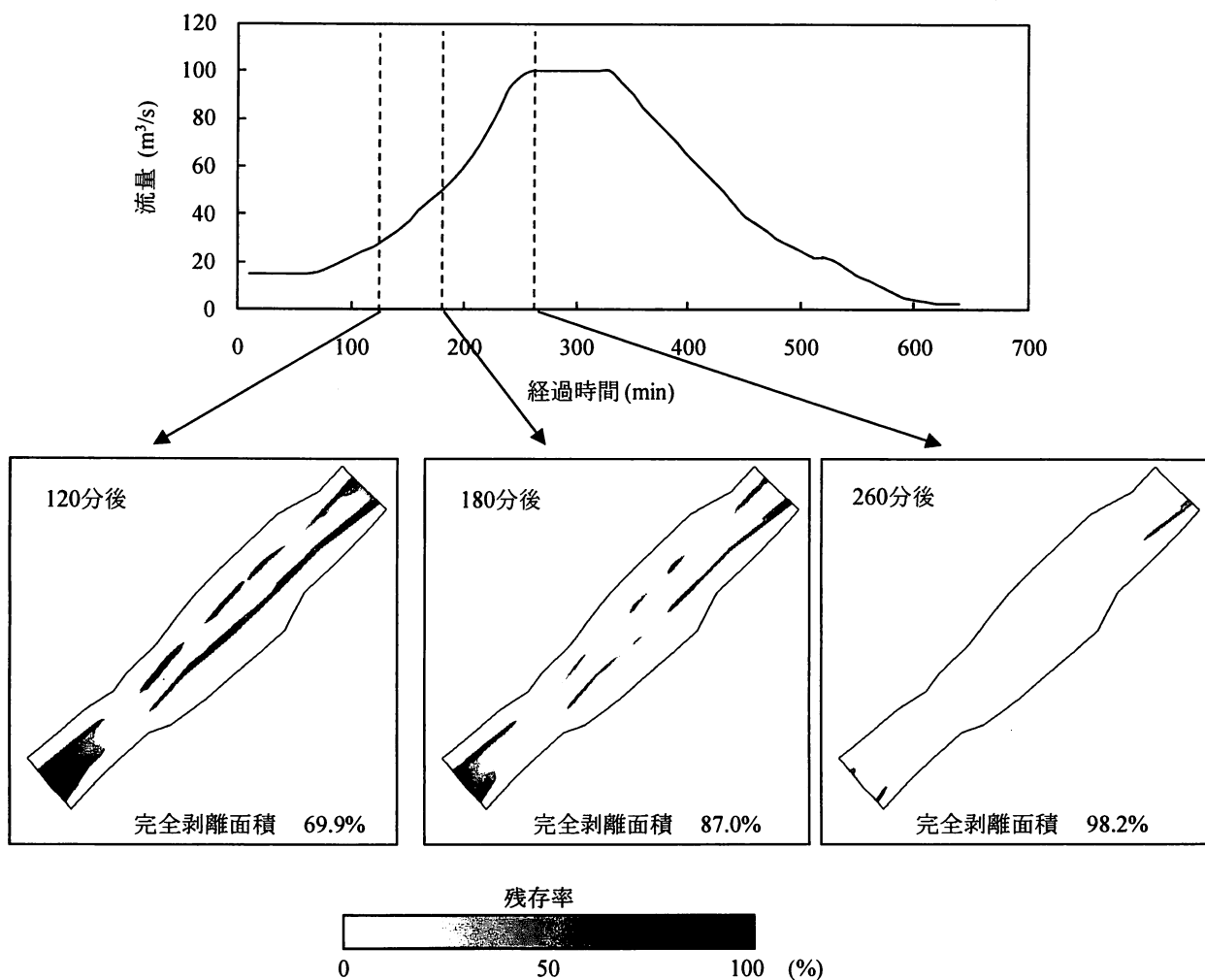


図-6 現行のフラッシュ放流（最大流量100[m³/s]、放流継続時間640分）で礫供給が行われた場合の経過時間120、180、260分後の藻類残存率の空間分布および初期の藻類繁茂面積に対する藻類が完全に剥離した面積の割合

であった⁹⁾。図-6に計算から得られた現行のフラッシュ放流（最大流量100[m³/s]、放流継続時間640分）で礫供給が行われた場合の経過時間120、180、260分後の藻類残存率の空間分布および初期の藻類繁茂面積に対する藻類が完全に剥離した面積の割合を示す。最大流量に達した直後の260分後には付着藻類が全域でほぼ完全に剥離している。本計算によって現行のフラッシュ放流に礫供給を行うことによってダム下流の藻類を完全に除去可能であることがわかる。

また、図-7に計算から得られた現行のフラッシュ放流に比べて規模の小さいフラッシュ放流（最大放流量40[m³/s]、放流継続時間430分）で礫供給が行われた場合の経過時間120、180、220分後の藻類の残存率を示す。計算対象域全体の面積に対する藻類が完全に剥離した面積の割合も示す。最大流量時の220分後には河岸近くの藻類は残存しているもの約90%の藻類が完全に剥離しており、礫供給を伴うフラッシュ放流では現行のフラッシュ放流に比べて規模の小さいフラッシュ放流においても藻類の十分な剥離が期待できるところがわかる。した

がって、河床付着性藻類の剥離更新効果に限定した場合、現在実施されている年に一回程度の大規模なフラッシュ放流を行うより、小規模な礫供給を伴うフラッシュ放流を複数回行うことが河床付着性藻類の異常繁茂を防ぐのに有効であると考えられる。

5. 結論

本研究では5-15mm程度の粒径の礫が河床付着性藻類の剥離に有効であることが明らかになった。また、礫供給を伴うフラッシュ放流では従来のフラッシュ放流より規模の小さい放流で河床付着性藻類を強制剥離し、ダム下流の河川環境の改善を図れることがわかった。河床付着性藻類は剥離後も2、3週間程度で完全に回復することから、年に一回程度大規模なフラッシュ放流を行うよりも礫供給を伴う小規模のフラッシュ放流を高頻度で行う方が有効であることが示唆された。

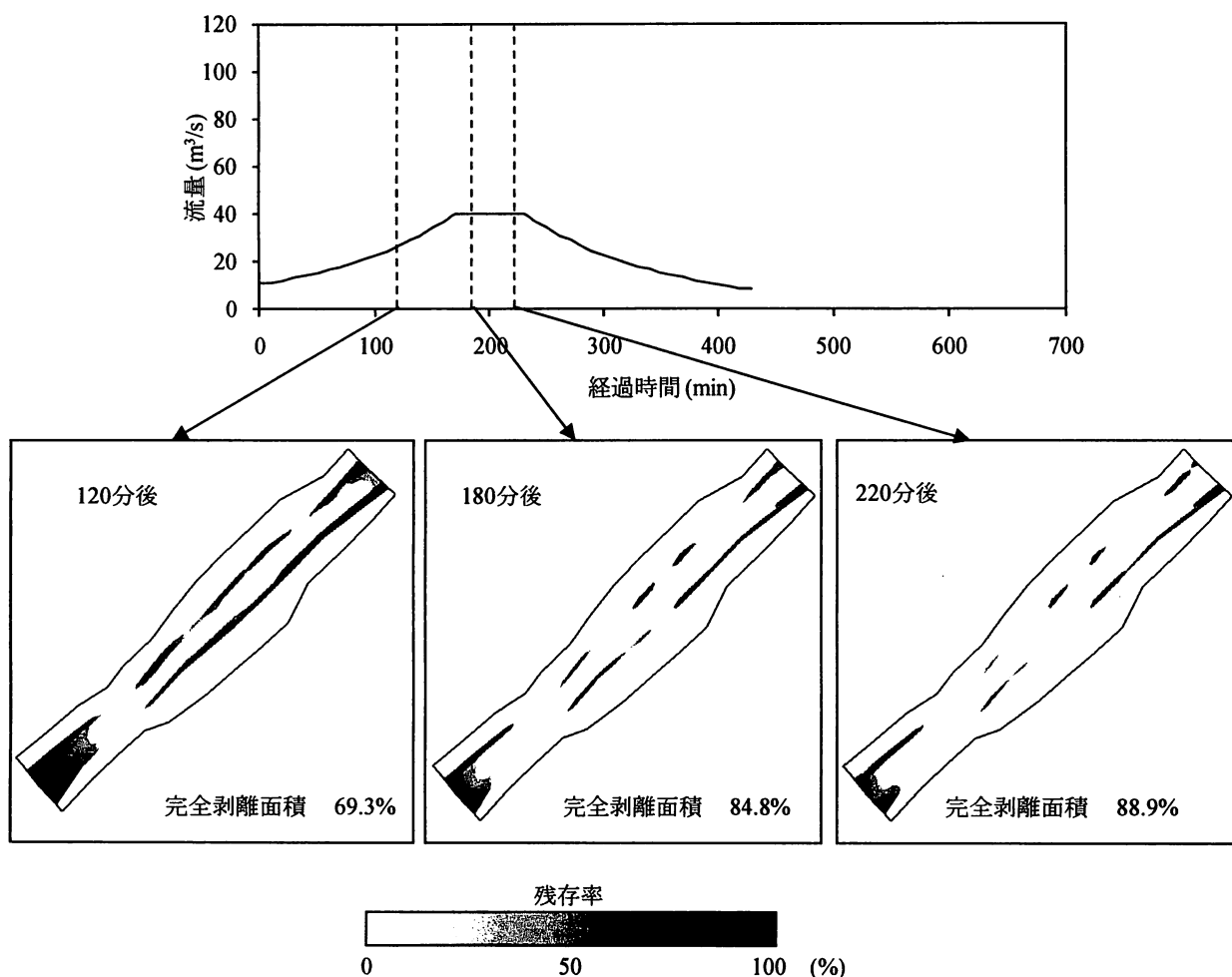


図-7 規模の小さいフラッシュ放流（最大放流量 $40[\text{m}^3/\text{s}]$ ，放流継続時間 430 分）で礫供給が行われた場合の経過時間 120, 180, 220 分後の藻類残存率の空間分布および初期の藻類繁茂面積に対する藻類が完全に剥離した面積の割合

謝辞：本研究は文部科学省科学研究費補助金萌芽研究（課題番号：17656157，研究代表者：池田駿介）の補助を受けた。

参考文献

- 1) 角哲也，塚原千明，柏井条介：ダムによる河川流況の変化とフラッシュ放流に関する考察，ダム技術，No.143，1998.
- 2) 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，vol.6，pp.185-190，2000.
- 3) 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，pp.45-72，1999.
- 4) Nezu, I. and Nakagawa, H.: *Turbulence in open-channel flows*, IAHR Monograph, Balkema, Rotterdam, pp.53-56, 1993.
- 5) 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，2003.
- 6) 赤松良久，池田駿介：ダム下流において異常繁茂した糸状藻類の強制剥離に関する研究，応用生態工学会第10回研究発表会講演集，pp.25-28，2006.

(2008. 4. 3受付)