

付着藻類の構成と衝突粒子径の効果を踏まえた藻類剥離モデルの開発

DEVELOPMENT OF A DETACHMENT MODEL OF ATTACHED ALGAE CONSIDERING EFFECTS OF SEDIMENT DIAMETER AND COMPOSITION OF ATTACHED ALGAE

石尾将大¹・椿 涼太²・河原能久³

Shota ISHIO, Ryota TSUBAKI and Yoshihisa KAWAHARA

¹ 正会員 日本工営株式会社 技術本部 中央研究所 (〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原 2304)

² 正会員 博 (工) 広島大学大学院助教 工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山 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 (同上)

The growth and detachment of attached algae are key processes in riverine ecosystems. Flood impacts are one of the major factors causing drastic changes in the attached algae community. However, the detachment of algae during a flood is a complex phenomenon. In previous study, it was suggested that the detachment ratio was closely correlated with work performed by sediment impinging on the substrate. However, the previous model was not able to account the effect of diameter well. In this study, I intended to create the detachment model that considering effects of both sediment diameter and the composition of attached algae. The experiment of detachment of attached algae and the analysis of sediment transport were conducted to evaluate the model. Finally, the detachment model that considering the difference of sediment diameter and the composition of attached algae was proposed.

Key words : tractive force, sediment impingement, detachment of algae, attached algae

1. 序論

付着藻類は河川生態系の食物連鎖において主要な役割を担っており、付着藻類の量的、質的な変化は、河川生態系に大きな影響を及ぼす。近年、ダムの建設により、その下流域において河床攪乱頻度が減少し、付着藻類の構成種の変化や異常繁茂が発生するなどの変化が生じている。

このような状況を改善するには、出水で起こる河床攪乱による細粒土砂の掃流や付着藻類の更新が必要不可欠であることが分かっている。そのため、いくつかのダムでは、人為的に小規模洪水を起こす「フラッシュ放流」が行われている。

本研究では、出水中の付着藻類の剥離に関して主要な現象と考えられる掃流された細粒土砂の衝突による付着藻類の剥離に着目し、付着藻類剥離量の算定手法の開発を行うこととした。

北村ら¹⁾は、土砂投入によるカワシオグサの強制剥離に関する実験的研究を行い、掃流砂のサルテーション運動による摩擦力による仕事量と剥離速度が関係づけられる

ことを確認している。

具体的には、北村らは、石橋²⁾による滑面水路における投入された砂礫のサルテーション運動による河床への衝撃力の実測・粒子運動解析によって導出された砂礫の衝突時の摩擦力による仕事量の算出式をもとに、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摩擦力による仕事量 W_X ($\text{N m}^{-1} \text{s}^{-1}$) を次式のように算定した。

$$W_X = 5.513 W_{XS} N = 5.513 \mu \frac{1}{\tan \theta} E_S \frac{q_B}{L_S A_3 d^3} \quad (1)$$

$$\left(W_{XS} = \mu \frac{1}{\tan \theta} E_S \quad N = \frac{q_B}{L_S A_3 d^3} \right)$$

ここに、 μ ：砂礫が衝突する対象（ここでは付着藻類）の動摩擦係数、 θ ：砂礫の河床への進入角度、 E_S ：1 個の砂礫粒子が河床に衝突するときの運動エネルギー、 q_B ：単位幅当たりの流砂量、 L_S ：サルテーションの跳躍長、 A_3 ：砂礫の三次元形状係数、 d ：土砂粒子径、 W_{XS} ：土砂粒子 1 つの仕事量、 N ：単位時間・単位面積当たりの土砂粒子の衝突個数である。そして、実験で得た剥離率 p (s^{-1}) と仕事量 W_X にほぼ線形的な関係があることを確認し、剥離率

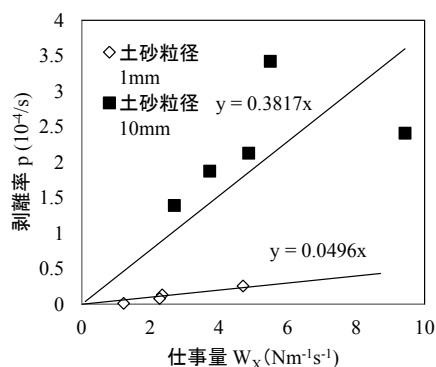


図-1 礫床での投入土砂径の異なる藻類剥離実験による仕事量と剥離率の関係³⁾

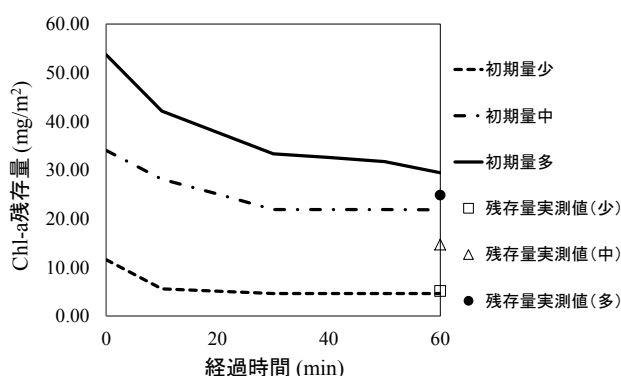


図-2 各サンプルのChl-a 残存量の時間変化

が砂礫の衝突による摩擦力によって説明できることを示した。しかし、同じ仕事量であっても衝突する土砂の粒径が異なると、剥離効率が異なることも示唆されており³⁾、石尾ら⁴⁾が行った礫床における付着藻類剥離実験においても、同じ仕事量でも土砂粒径が1mmと10mmの結果では8倍ほど剥離効率に相違がみられた。(図-1)。この相違は、従来のモデルにおいて、付着藻類量・構成種と衝突土砂粒径の関係がうまく組み込めていないこと、礫床における土砂移動形態の変化を考慮していないことが考えられる。そのため、幅広い粒径が存在する実河川における剥離量の算定手法に適用するには、衝突する土砂粒径や土砂移動形態、藻類量、藻類の構成種と剥離量との関係など、掃流砂と藻類剥離についてさらに検証していく必要がある。

本研究では、付着藻類量・構成種と衝突土砂粒径の関係を検証するために付着藻類の平坦床水路を用いた土砂投入を伴う剥離実験を行い、また、礫床における土砂移動形態の変化を検証するために人工粗度床における土砂移動経路の検証実験を行い、これらの実験の結果を解析することで、土砂粒径による剥離効率ばらつきの要因の解明を行った。そして、これらの解析結果から、より一般性のある新たな付着藻類剥離モデルの導出を試みた。

2. 平坦床水路での付着藻類剥離実験

(1) 実験概要

本実験は、藻類の構成の違い（生物膜の立体構造や構成種の違いを想定）による剥離プロセスの変化を分析することを狙い、衝突条件が単純な平坦床水路に、種構成の異なる藻類を付着させたタイルを設置した。

具体的には、水路幅30cm、勾配0.1の平坦床水路で実験を行い、水路の下流に、藻類が生育したタイルを設置して行った。藻類の育成は、広島県東広島市および呉市を流れる黒瀬川の河床にタイルを設置することで行った。

表-1 各サンプルの剥離率p

サンプル	剥離率 $p (\times 10^{-4}/s)$		
	60分平均	前半30分平均	後半30分平均
少	2.56	5.11	0.00
中	1.23	2.45	0.02
多	1.67	2.65	0.69

藻類の育成は、付着藻類の生育は、2013年9月および11月から開始し、1ヶ月後の10、12月には実験に用いるのに十分な量がタイル上に繁茂した。10月に回収したタイルからは、珪藻綱の *Melosira spp.* および *Navicula spp.*、緑藻綱の *Scenedesmus spp.*、藍藻綱の *Entophysalis* などが確認された。12月にタイルに繁茂した藻類においては、構成種が珪藻綱の多量の *Gomphonema sp.* と、*Navicula spp.* や *Cymbella spp.* が構成種であるタイルと、珪藻綱の *Navicula spp.* と藍藻綱の *Entophysalis* が主な構成種であるタイルが確認された。本実験では、10月にタイル上に繁茂したものを Type-A、12月に繁茂したもので、主な構成種が珪藻綱の *Navicula spp.* や *Cymbella spp.*、および *Gomphonema sp.* であるものを Type-B、主な構成種が珪藻綱の *Navicula spp.* と藍藻綱の *Entophysalis* であるものを Type-C とした。

実験条件は、通水時間を60分に統一し、流量を10, 20, 30 l/s、供給土砂量を0.03, 0.05, $0.10 \times 10^{-3} m^2/s$ 、土砂粒径を1, 10 mm、藻類構成種をA, B, Cと変化させ、計19パターン設定した。付着藻類の残存量の測定は、NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) を、実験サンプルのタイルの画像から、実験開始前と、実験開始から10分おきに6回の計7回測定し、それをChl-a量に変換することによって行った。事前の研究⁴⁾によってNDVIとChl-a量の間には線形的な関係が見られ、それらの関係を用いて、NDVIの値の変化から付着藻類残存率の推定ができることが確認された。そのため、本研究においても同様の方法で付着藻類の剥離率を算出することとした。

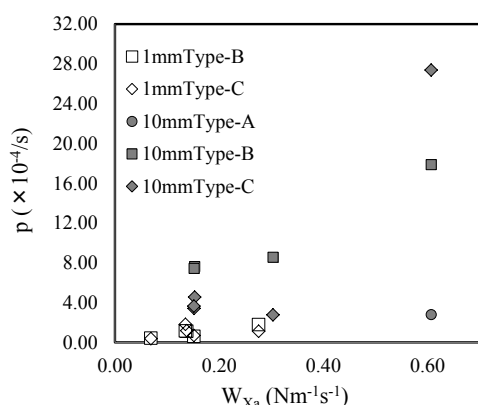


図-3 各 Case の p と W_{xa} の関係

表-2 各 Case の p/W_{xa}

土砂粒径 d ($\times 10^{-3}m$)	藻類構成種 Type	p/W_{xa}
1	B	6.42
	C	5.87
10	A	4.74
	B	31.81
	C	37.16

(2) 実験結果

まず、初期量によって剥離効率に違いが出るかを検証するために、藻類構成種 Type-A のサンプル 3 つを用いて実験を行った。その結果を図-2、表-1 に示す。3 つのサンプルの初期 Chl-a 量は、12, 34, 54 mg/m^2 である。図-2、表-1 から分かるように、初期量が少ない場合を除いて、残存率がほぼ同様に減少した。しかし、Chl-a 残存量が 10~20 mg/m^2 程度になると、剥離の進行がほぼ停止する傾向が見られた。これらの剥離進行がほぼ停止したサンプルから、残存している藻類を採取し、構成種を顕微鏡で判別したところ、珪藻綱がほぼ見られず、ほとんどが藍藻綱の *Entophysalis* であった。*Entophysalis* の 1 体(粒 1 つ)の体長は約 5 μm と、珪藻綱である *Cymbella* が体長約 50 μm であるのに対し非常に小さく、基質表面の土砂粒子(今回のケースでは粒径 10 mm)が接触しない小さな窪みにも繁殖していたと考えられる。これらのことから、初期量が少ない場合、または Chl-a 残存量が 10~20 mg/m^2 程度まで剥離が進行した場合に剥離率 p が小さくなったのは、比較的剥離が容易な珪藻綱が剥離し、前述の要因で比較的剥離が進行しにくい *Entophysalis* が残存することで、剥離速度が変化するためと考えられる。そのため、今実験のように、衝突する土砂粒子に対して体長が非常に小さい藻類が付着している場合、藻類の完全剥離は実現困難であり、また、剥離率 p は、残存量が 20 mg/m^2 程度以上までは一定と考えて良いと考えられるが、残存量が約 10~20 mg/m^2 以下になり、土砂粒子に対して体長が非常に小さい藻類のみが残存している状態になる

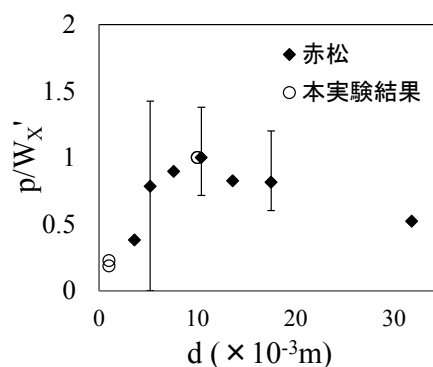


図-4 土砂粒径と p/W_{xa}' の関係

と、剥離率が大幅に低下すると考えられる。

そのため、本実験の結果を整理する際、藍藻綱の *Entophysalis* を構成種に含んでいる Type-A, C の実験結果に剥離限界値 15 mg/m^2 を設定し、剥離率を再算出することで、*Entophysalis* の有無による剥離率のばらつきをある程度除去した。そのようにして整理した全 Case の剥離率と仕事量との関係を図-3、表-2 に示す。図-3、表-2 に示すように、本実験で用いた付着藻類の剥離に関して、粒径 10 mm の土砂のほうが、粒径 1 mm の土砂に比べ 5 倍程度剥離効率が良いという結果が導かれた。しかし、このままでは仕事量の算定式に粒径が考慮されていることに矛盾するため、既往の研究の結果も用いて、従来の付着藻類剥離モデルの問題点について更に検証した。

3. 土砂衝突時の押し込み深さと接触面積を考慮した新たな指標の提案

(1) 既往の研究結果を交えた土砂粒径による剥離効率の違いに関する検証

本実験では、土砂粒径は 1 mm と 10 mm の 2 種類のみなので、その他の粒径の結果も交えて考察するために、赤松ら³⁾が行った平坦床水路を用いた土砂衝突による付着藻類剥離実験の結果から仕事量 W_{xa} と剥離率 p を算出し、本実験結果も交えて、衝突する土砂粒径と剥離効率 p/W_{xa} について考察した。赤松らの実験と本実験では用いられた藻類の構成種が異なるため、その影響を除去するために、粒径ごとの p/W_{xa} の値を粒径 10 mm (赤松の場合 10.4 mm) の p/W_{xa} の値で割ることで、その影響を除去した。その値を剥離効率比 p/W_{xa}' とし、土砂粒径との関係を検証した。その結果を図-4 に示す。

図-4 から分かるように、粒径 1 mm から大きくなるにつれて、剥離効率が上昇し、粒径 10 mm を超えると剥離効率が徐々に下がっていく傾向が確認される。この結果から、現状の仕事量算定式(式(1))において考慮されていない、衝突土砂粒径に関連する現象が存在すると考察した。

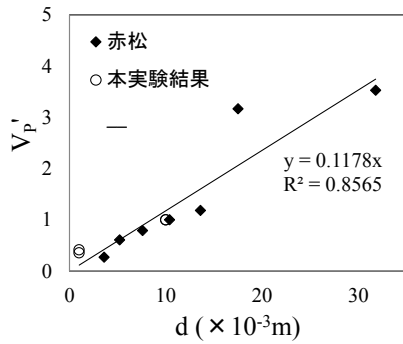


図-5 土砂粒径と V_p' の関係

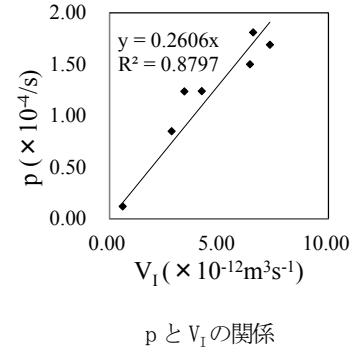
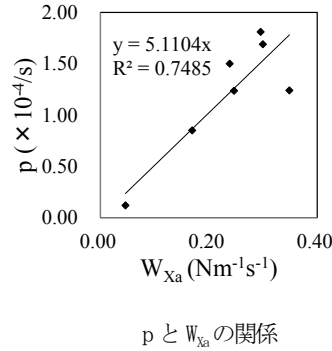


図-6 各実験結果 (赤松ら³⁾の結果)

(2) 土砂衝突時の押し込み深さと土砂粒子の接触面積を考慮した剥離モデルの構築

前節の結果から、現状の仕事量算定式には、粒径の効果をうまく組み込んでいないことが確認された。この原因として、接触時の押し込みによる接触面積（剥離域）の広がりやを考慮していない点、藻類の剥離に必要な力以上の力を土砂粒子 1 つが有している場合に、力の余剰分を仕事量として過大評価している点が推定される。そのため、土砂衝突時の押し込み深さと土砂粒子の接触面積を考慮した、より藻類剥離の実現象に近いモデルを検討した。

従来の剥離モデルは、土砂衝突時に作用する摩擦力による仕事量で説明されており、1 つの土砂粒子の衝突による摩擦力による仕事量は、衝突時間を Δt とすると、押し込み強さ F に摩擦係数 μ を乗じた以下の式で表される。

$$W_{xs} = \frac{1}{2} \mu F u_g \Delta t \quad (2)$$

$$\left(\Delta t = \frac{2.94 x_{\max}}{v_y}, \quad x_{\max} = \left(\frac{5 W^m v_y^2}{4 n_l (d/2)^{1/2} g} \right)^{2/5} \right)$$

ここで、 n_l : 砂礫の物性値 ($7.53 \times 10^9 \text{ N m}^{-2}$)、 $x_{\max}$: 砂礫衝突時の最大押し込み深さである。今回のモデルは、土砂粒子が付着藻類と衝突する際の押し込み深さと接触面積（剥離体積）を考慮し、考案されるものである。土砂が付着藻類に衝突する際の押し込み深さ（洗掘深さ） h は、付着藻類の反発係数や、土砂粒子の持つ運動エネルギー、接触面積（面積が大きいほうが抵抗を受けやすいため）によって決まってくると考えられるが、その算出式を導出し、その解を求めるのは非常に困難であるため、今回は、土砂粒子が河床に衝突する際の押し込み深さ $x_{\max}$ (式(2)) で代用する。この押し込み深さ $h = x_{\max}$ を頂点とした半楕円体の体積 V を、1 つの土砂粒子の衝突によって剥離する体積とみなす。剥離体積 V は、衝突時間や押し込み深さを考慮すると、土砂粒径と土砂衝突時の鉛直及び水平方向の速度の関数となる。これに単位時間、単位面積当

りの土砂粒子の衝突個数 N (式(1)) を乗ずれば、単位時間・単位面積当たりの剥離体積 V_l ($\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$) が求められる。これによって、土砂衝突時の押し込みによる接触面積（剥離域）の広がりやを考慮した。

次に、藻類の剥離に必要な力以上の力を土砂粒子 1 つが有している場合、本モデルの場合では押し込み深さ h が藻類群集の厚みを上回っている場合の、その余剰分の力の影響の除去を試みた。今回は、押し込み深さ h が $x_{\max}$ に比例すると仮定し h を $x_{\max}$ で代用しており、また藻類群集の厚み・反発係数は不明であるため、厳密に押し込み深さが藻類群集の厚みと一致する衝突エネルギー量は算出できない。しかし、前節における考察から、粒径 10 mm 土砂が最も剥離効率が良いと示唆されたため、粒径 10 mm の土砂の押し込み深さが藻類群集の厚みと対応していると仮定した。これより、粒径 10 mm 以上の土砂の剥離体積 V を算出する際に代入する $x_{\max}$ の値を、粒径 10 mm の土砂の $x_{\max}$ と同値とし、余剰分のエネルギーの影響を除去した。

このようにして算出した V_l で剥離率 p を割ったものを V_p (藻類構成種ごとの剥離効率に相当) とし、仕事量の場合と同様に、各粒径の V_p の値を、土砂粒径 10 mm の V_p ($V_{p(10\text{mm})}$) の値で除したものを V_p' とし、 V_p' と土砂粒径 d との関係求めた。その結果を図-5 に示す。図-5 に示すように、土砂粒径 d と V_p' に線形的な関係が見られる。この結果から、 V_l に土砂粒径 d を乗じたものを V_l ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) とし、剥離率 p について以下のように定式化した。

$$p = \alpha V_l \quad (3)$$

ここで、 α は藻類の付着特性に関する係数で、 $\alpha = p/V_l$ が大きいほど、より剥離が容易な付着藻類であるということになる。この V_l を用いて、赤松の結果と本実験結果をまとめた。その結果を図-6, 7, 表-3 に示す。図-6, 7, 表-3 から分かるように、仕事量の場合 (図-3) に比べ、粒径による剥離効率のばらつきが小さくなっていることがわかる。このことから、仕事量と剥離率 p との関係が土砂粒径によってばらつく原因は、接触時の押し込みによる接触面積（剥離域）の広がりやを考慮していないため、

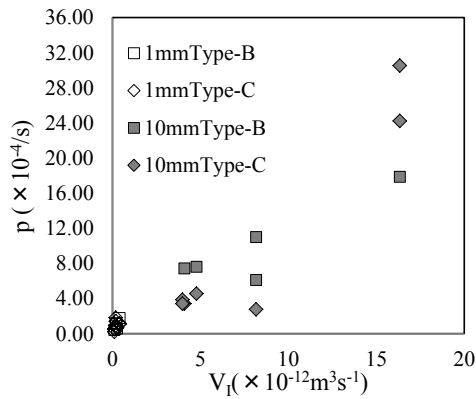


図-7 p と V_I の関係 (本実験結果)

表-3 各 Case の p/V_I

土砂粒径 d ($\times 10^{-3} \text{m}$)	藻類構成種 Type	p/V_I
1	B	3.6
	C	4.45
10	B	1.13
	C	1.46

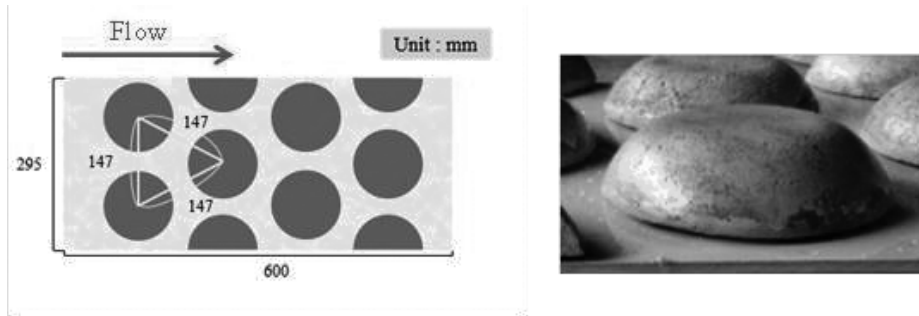


図-8 粗度配置 (図左) と人工粗度 (図右)

藻類の剥離に必要な力以上の力を土砂粒子 1 つが有している場合に、力の余剰分を仕事量として過大評価しているためであることが示唆され、それらの影響を考慮した本モデルのほうがより一般性のある藻類剥離モデルであることが確認された。しかし、本モデルは、土砂衝突時の押し込み深さを Hertz 理論より算出された弾性体に対する押し込み深さ x_{max} で代用しているなど、未成熟な点が多い。またこの点が、推定剥離堆積 V_I ではなく V_I に土砂粒径 d を乗じた V_I と剥離率 p の相関が良いという結果の要因であると考えられるため、この点を解決することが、今後このモデルの汎用性を向上させる上で必須である。

4. 一様粗度床における掃流砂の移動経路の検証実験

(1) 実験概要

実河川において、河床礫の大きさや配置、流量の変化によって、流砂の移動経路が変化し、全体の流砂量のうち付着藻類の剥離に寄与する流砂の割合（以下、有効流砂率）が変化すると考えられる。そのため本章では、水理条件（有効無次元掃流力）と有効流砂率の関係を解明することを目的として、一様粗度床における土砂移動経路測定実験を行った。付着藻類は、より日光を受けやすい礫上面に繁茂することが多いことから、本研究では礫上を通過する流砂の割合を有効土砂率と定義した。実

験は、水路幅 30 cm、勾配 0.1 の平坦床水路を用いた。水路の下流に粗度設置区間を設け、そこにモルタルで作成した半円盤型の模型を千鳥上に配置し、上流から土砂を投入することによって実験を行った。使用した粗度は、直径 12.2 cm、高さは 1.5 cm および 3.0 cm の 2 パターンを用意し、それぞれで実験を行った。また、粗度設置区間以外の水路上に、粒径 4 cm 程度の玉砂利をシリコンで千鳥状に接着することで、底面粗度を調整した。

実験条件は、流量を 10, 20, 25 l/s、粗度高さを 1.5, 3.0 cm と変化させ、計 6 パターン設定した。使用した土砂は粒径 10 mm のみで、供給土砂量は $0.05 \times 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$ 程度に統一して実験を行った。

有効土砂率の測定は、上流側斜め方向から土砂移動状況をハイスピード撮影 (480 fps) し、粗度正面に侵入してきた土砂粒子 100 個程度のうち、粗度上を通過する数（藻類の剥離に起因する土砂の数）と、粗度の脇を通過する数をカウントし、カウントした土砂粒子の総数のうち、粗度上を通過する土砂の割合を算出することによって行った。

また、有効無次元掃流力の算出は、藤田ら⁹⁾が提案したモデル (式(4), (5)) を用いた。礫露出率 δ の算出は、礫露出高 ΔG を粗度高、礫の粒径 d_G を粗度直径として行った。

$$\tau_{*e} = (1 - \delta)\tau_* \quad (4)$$

$$\delta = \Delta G / d_G \quad (5)$$

(2) 実験結果

表-4 各 Case の有効土砂率

流量 Q ($\times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$)	粗度高さ (cm)	有効土砂率 (-)
10	1.5	0.53
20		0.70
25		0.71
10	3.0	0.43
20		0.50
25		0.65

表-4 に各実験 Case の有効土砂率の値を示す。表-4 に示すように、粗度高さ 1.5 cm の場合、3.0 cm の場合のどちらにおいても、流量が大きくなるにつれて有効土砂率が大きくなっていることがわかる。また、同様の流量の場合、粗度高さが 1.5 cm の場合の方が、3.0 cm の場合に比べ有効土砂率が大きくなっていることがわかる。

これらの結果から、掃流力に粗度高さ（礫露出率）の影響を考慮した有効無次元掃流力と限界無次元掃流力の差と、有効土砂率の間に関係があると考え、2つの値の相関を検証した。その結果を図-9 に示す。同図より、有効無次元掃流力と有効土砂率の間に、正の相関は確認できた。しかし、粗度高さによって関係にばらつきがあり、明確な関係性は確認できなかった。これは、粗度による各土砂粒子の跳躍形態のばらつきが大きく、それによって流砂経路が複雑に変化するためと考えられる。そのため、単純に有効無次元掃流力のみで有効土砂率を説明することはできないことが示唆された。

また、本実験では粗度の直径や配置、土砂粒径を統一して行ったが、これらの値を変化させた場合に、本実験と同様の現象が現れるかは未確認であるため、本研究における有効土砂率の立式は断念した。しかし、本実験の結果から、掃流力と粗度高さによって有効土砂率が変化することが示唆されたため、藻類剥離モデルの汎用性を向上させるには、これらの効果を組み込む必要があることが確認された。

5. 結論

本研究では、付着藻類の構成と衝突する土砂の粒径の影響を考慮した藻類剥離モデルの開発を目的として、平坦床水路を用いた付着藻類の剥離実験、一様粗度床における掃流砂の移動経路の検証実験を行った。

平坦床水路を用いた種構成の異なる付着藻類の付着藻類剥離実験結果から、藻類構成種に衝突する土砂に対して体長が非常に小さい *Entophysalis* のような藻類が主な場合、藻類の完全剥離は実現困難であり、Chl-a 残存量が約 $15\sim 20 \text{ mg/m}^2$ で剥離が停滞することが示唆された。

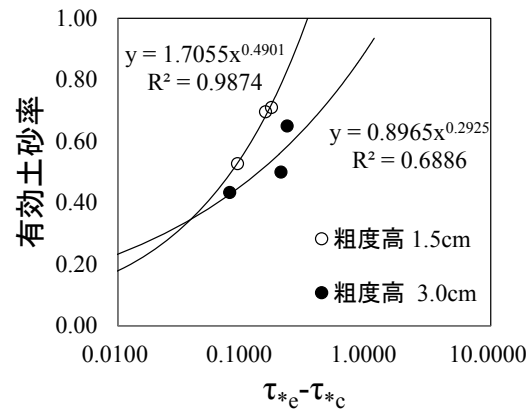


図-9 $\tau_{*e} - \tau_{*c}$ と有効土砂率の関係

また、剥離効率 p/W_{sa} は土砂粒径が 10 mm 程度でピークとなり、それ以上でもそれ以下でも剥離効率が小さくなることが確認された。この原因を、土砂衝突時の押し込み深さと、それによる土砂粒子の接触面積の広がりやを考慮していないことであると推定し、これらの影響を考慮した藻類剥離モデルを開発した。

しかし、なぜ推定剥離体積ではなく、それに土砂粒径を乗じたものと剥離率との相関がよいのかは不明であり、このモデルの汎用性を向上させる上で、この原因の解明が必須である。

また、一様粗度床における掃流砂の移動経路の検証実験の結果から、付着藻類の剥離に起因する土砂の割合（有効土砂率）は、掃流力が上昇するにつれて大きくなることが分かり、この効果を藻類剥離モデルに組み込まなければならないことが示唆された。

しかし、今回の実験では実験ケースが少ないため、粗度配置や土砂粒径をさらに変化させた様々な実験から、有効土砂率とこれらの条件の関係性をさらに検証していく必要がある。

参考文献

- 1) 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, 第6巻, pp.125-130, 2000.
- 2) 石橋毅: ダム排砂設備の流下砂礫による摩耗・損傷に関する水理学的研究, 土木学会論文報告集, 第334号, pp.103-112, 1983.
- 3) 赤松良久, 池田駿介, 浅野誠一郎, 大澤和敏: ダム下流における糸状藻類の強制剥離に関する研究, 土木学会論文集 B, Vol.65, No.4, pp.285-295, 2009.
- 4) 石尾将大, 椿涼太, 河原能久, 中土井佑輔: NDVIを用いた付着藻類剥離量の測定方法の開発と砂礫衝突による剥離効果の定量評価提案, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.69, No.4, I-763-I-768, 2013.
- 5) 藤田正治, 澤田豊明, 水山高久, 木下篤彦: 砂防ダムからの排出土砂の移動とそれが溪流環境に与える影響, 水工学論文集, 第44巻, pp.1215-1220, 2000.

(2014. 4. 3 受付)