

# ダム下流の河床付着藻類の剥離・更新機構に関する調査・研究

## 要旨

### 1. 序論

#### 1.1 研究の背景

#### 1.2 既往の研究

#### 1.3 本研究の目的

### 2. 礫河床における掃流砂による糸状藻類の強制剥離に関する水路実験

#### 2.1 水路実験の目的

#### 2.2 水路実験の概要

#### 2.3 素焼きタイル河床における糸状藻類の強制剥離実験

#### 2.4 礫河床における糸状藻類の強制剥離実験

### 3. ダム下流の礫河床におけるフラッシュ放流の観測

#### 3.1 観測の目的

#### 3.2 観測の概要

#### 3.3 ダムからのフラッシュ放流に関する観測結果

#### 3.4 地点B(愛川大橋)におけるダムからのフラッシュ放流に関する観測結果

### 4. 掃流砂の衝突による糸状藻類の剥離モデルの構築

#### 4.1 剥離モデル構築の目的

#### 4.2 掃流砂の衝突による摩擦応力と糸状藻類の強熱減量の減少率との関係

#### 4.3 礫河床における摩擦応力と減少率の関係の定式化

#### 4.4 観測地点における剥離モデルの適用と評価

### 5. 剥離モデルを適用したフラッシュ放流時の土砂投入量の解析

#### 5.1 解析の目的

#### 5.2 解析条件

#### 5.3 剥離モデルによる土砂投入量の推定

#### 5.4 土砂投入量の推定値と他のダム下流における土砂投入事例との比較

### 6. 結論および今後の課題

#### 6.1 結論

#### 6.2 今後の課題

## 参考文献

## 要旨

洪水調整としての治水、および生活用水としての利水などの目的を持つダムが河川上流に建設されることで、河川の縦断方向の連続性が遮断される。これにより、ダム下流において、水質や流砂量が変化し、結果として河川の生態系に影響を及ぼす。このようなダム下流河川における水辺環境や生態系の現状の把握と保全の手法として、ダム下流の礫河床を有する河川に人為的に土砂を供給して、河川を生育場とする生態系の回復への試みが検討されている。そこで、本研究では、ダムからのフラッシュ放流に伴う掃流砂の動態を把握し、河川生態系の生産者である付着藻類、特に糸状藻類の強制的な剥離に必要な掃流砂の粒径とその量を定量的に評価することを目的とした。具体的には、水路実験、現地観測を実施し、掃流砂の衝突による糸状藻類の剥離モデルの構築と土砂投入量の解析を実施した。本研究にて得られた知見を以下に示す。

河川から採取した礫を河床材料として、投入する土砂の粒径、流量、水理条件を系統的に変えた土砂投入実験を実施した。礫に繁茂していた藻類は糸状体の緑藻類アオミドロ属のみであった。掃流砂の衝突による糸状藻類の減少率ならびに時間減少率の最大値を得たケースは、投入した土砂の粒径が10.4mmを用いた場合の時であった。また、水路実験の結果から、掃流砂の衝突による摩擦によってなされる摩擦応力を定式化し、これと糸状藻類の減少率とを関連付けた剥離モデル構築した。

ダム下流の礫河床において、ダムからのフラッシュ放流に伴う掃流砂の粒径やその量と、それによる河床付着藻類の減少量の調査を実施した現地観測を実施した。剥離モデルを本観測地に適用し、全ての糸状藻類の剥離に必要な混合砂礫の掃流砂の粒径や量を試算した。その結果、単一粒径の土砂を投入する場合、追加掃流砂量としての土砂投入量は1739m<sup>3</sup>と推定され、混合粒径(1.5mm~64mm, 中央粒径10.4mm)の土砂を投入する場合、投入量は1130m<sup>3</sup>と推定された。

## 1. 序論

### 1.1 研究の背景

河川において治水や利水を目的としたダムや堰などの人工構造物により、流況の平滑化や流送土砂量の減少により河床の粗粒化が生じている。これは河床攪乱頻度の減少につながり、糸状藻類の繁茂が河川生態系の生産者である付着藻類の生育環境を変化させている。さらに、水域内の食物連鎖上位へとつながる河川生態系への悪影響が懸念される。水域内の生物相の生育環境の回復を目的とし、糸状藻類の剥離を行うことが重要な課題である。

このような社会的背景を受けて、糸状藻類の強制的な剥離に関する研究が近年行われつつある。それに加え、ダム下流の河川環境の保全、改善を目的としてフラッシュ放流が行われている。これは、流水の掃流力によって藻類の剥離を期待するものであるが、糸状藻類は流水のみによって除去することは困難であり、流砂が河床上を移動し衝突することによる剥離を期待する必要がある。

## 1.2 既往の研究

ダム下流の礫河床を有する河川においては、生態系の現状を把握すると同時に、それらの生息環境である水理条件や流砂形態、河床形状などの要因もまた明らかにする必要がある。生態系の現状把握の手段の一つとして、河川生態系の食物連鎖の生産者である付着藻類に着目し、それに影響する要因を明らかにすることで、生態系の回復を試みる研究が行われている。

田代ら<sup>1)</sup>や辻本ら<sup>2)</sup>は愛知県の矢作川中流域で調査を行い、攪乱頻度が低下し、粗粒化した河床では、礫のみが露出した形状となり、そのようなダム下流の粗粒化した河床では、藻類の種が遷移し、糸状体を形成する藻類が異常繁茂すると報告している。内田<sup>3)</sup>はアユ(*Plecoglossus altivelis*)の胃の内容物から、アユは緑藻類アオミドロ属(*Spirogyra sp.*)や緑藻類シオグサ属(*Cladophora sp.*)などの糸状緑藻類を消化できないことを確認している。

そこで、糸状藻類の強制的な剥離に関する研究が行われ始めており、糸状藻類の異常繁茂のメカニズムや制御方法に関する研究が以下のように試みられている。

### 1.2.1 実験水路を用いた研究

河床付着藻類の剥離に関する研究は、ダム下流の礫河床を有する河川や室内水路において行われている。箱石ら<sup>4)</sup>は人工基盤を河床に設置し、流水の掃流力の増加による付着藻類の剥離過程について考察している。この考察から、河床付着藻類の剥離には、流砂の藻類への衝突が有効であるとしている。Honer.R.R. et al.<sup>5)</sup>は水路実験を実施し、浮遊砂が付着藻類に与える影響について考察している。この考察より、浮遊砂は付着藻類の剥離に影響を及ぼさないことが指摘されている。北村ら<sup>6)</sup>は流砂の形態を掃流砂とし、水路を用いた砂礫投入実験を行い、砂礫の衝突による総仕事量に藻類の剥離量を関連付けている。山本ら<sup>7)</sup>は砂礫の仕事量に起因する粒子の移動速度を数値シミュレーションにより解析し、付着藻類の剥離過程を表現した。田代ら<sup>8), 9)</sup>は掃流砂礫による剥離効果を組み込んだ付着藻類の繁茂動態モデルを構築した。これにより、掃流砂による糸状藻類の強制的な剥離過程が定式化、定量化された。しかしながら、これらの研究において、用いた砂礫の粒径が2種類であったため、剥離に有効な粒径やその量に関しては不明である。そのため、投入する土砂の粒径および量、それに対する水理条件を系統的に変化させた土砂投入実験を実施する必要がある。

### 1.2.2 実河川における調査、研究

ダム下流の礫河床を有する河川における生態系の回復の取り組みが実施され始めている。大杉ら<sup>10)</sup>は、平成13年度に実施されたダム弾力的管理試験の結果を報告している。それによると、活用効果が確認されたダムでは、水面浮遊物や河床の微細粒子などを掃流することができたと評価した。その一方で、ダム間で比較できる評価方法の検討を課題とした。それを受けて、現在では、多数のダムで調査・研究がなされており、田中ら<sup>11)</sup>は、広島県の帝釈川ダム下流で生態系に着目した調査を行い、生息環境改善のためのフラッシュ放流手法を提案した。また、大杉ら<sup>12)</sup>は栃木県の川俣ダム下流における砂礫河床に着目し、土砂動態を実測することで、河床攪乱のための手法を提案している。そして、辻本ら<sup>13)</sup>は三重県の比奈知ダムにおいて、一時的にダムに湛水し、その後フラッシュ放流を実施することによる河床の回復手法を提案している。さらに、田中<sup>14)-17)</sup>は、矢作川において砂利投入実験を実施した。しかし、投入する砂利の粒径および量に対する糸状藻類の剥離量の明確な関係は得られていない。一方、坂本ら<sup>18)</sup>は福井県の真名川ダムにおいて、その下流に土砂を置きフラッシュ放流とともに下流に供給し、

土砂を河床に還元した調査を報告している。

以上のフラッシュ放流と糸状藻類の研究事例は、試行錯誤的な段階にあり、糸状藻類の剥離更新に必要な土砂の粒径や量を定量化することはできていない。そのため、投入すべき土砂の粒径および量を河川地形、放流量、河床材料、そして藻類の繁茂形態などの情報から合理的に決定する手法を開発する必要がある。

### 1.3 本研究の目的

このような背景から、本研究では、掃流砂の粒径や量と糸状藻類の減少量との関係を定式化し、糸状藻類の剥離に必要な掃流砂の粒径とその量を定量的に評価することを目的とした。具体的には以下に挙げる目標のもとで研究を遂行した。

#### (1) 掃流砂による糸状藻類の強制剥離に関する水路実験（第2章）

掃流砂の衝突による糸状藻類の剥離過程を把握するために水路実験を行う。河床材料を平坦床の素焼きタイルと河川から採取した礫の2種類とし、投入する土砂の粒径および投入量、水理条件を系統的に変えた土砂投入実験を実施する。そして、糸状藻類の剥離のための最適な掃流砂の粒径や量について検討を行う。

#### (2) ダム下流の礫河床におけるフラッシュ放流の観測（第3章）

ダム下流の礫河床において、ダムからのフラッシュ放流に伴う掃流砂の粒径やその量と、それによる河床付着藻類の減少量の調査を実施した現地観測を実施する。

#### (3) 掃流砂の衝突による糸状藻類の剥離モデルの構築（第4章）

掃流砂の衝突による摩擦応力を定式化し、これと糸状藻類の減少率とを関連付けた剥離モデル構築する。糸状藻類の減少率を算定するために、掃流砂の粒径とその量、および摩擦速度を用いて定式化する。

#### (4) 剥離モデルを適用したフラッシュ放流時の土砂投入量の解析（第5章）

礫河床を河床材料とした掃流砂の衝突による糸状藻類の剥離モデルを適用し、フラッシュ放流と土砂投入による糸状藻類の剥離に必要な掃流砂の粒径とその量を推定する。また、フラッシュ放流に土砂投入を組み合わせた事例と、剥離モデルを用いて推定した投入土砂の粒径および量を比較する。

## 2. 掃流砂による糸状藻類の強制剥離に関する水路実験

### 2.1 水路実験の目的

本章では、土砂投入による糸状藻類の強制剥離に関して実施した水路実験について述べる。河床材料を平坦床の素焼きタイルと河川から採取した礫の2種類とし、各河床材料に対して、投入土砂の流砂形態を掃流砂とし、その粒径や量、さらに水理条件(流速、流量)を系統的に変え実施する。投入した土砂の衝突による糸状藻類の剥離過程を明らかにし、投入土砂の粒径やその量と糸状藻類の剥離量との関係の検討を行うことを目的とする。

## 2.2 水路実験の概要

### 2.2.1 実験に用いた水路

実験水路は写真 2-1 に示すような、アクリル板によって仕切られた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。実験水路の諸元は、水路長 7.1m、幅 20cm および 30cm のポンプ式循環・可変勾配開水路である。

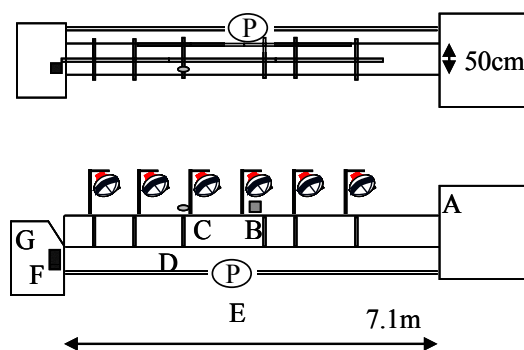
### 2.2.2 実験方法

実験水路内のアクリル板によって仕切られた幅 20cm の水路に、藻類が付着した素焼きタイルと河川から採取した礫の 2 種類の河床材料を配置した。そして、図 2-1 に示すようにその水路の上流側から、土砂を投入して強制的に藻類を剥離させる実験を行った。投入された土砂の動態をビデオで撮影し、また、その土砂の衝突による河床材料に付着した藻類の剥離の様子をデジタルカメラで撮影し記録した。

河床材料に付着する藻類を剥ぎ取り、生物顕微鏡(アズワン(株))の接眼レンズにデジタルカメラを取り付けて藻類を撮影した。画像から、百科事典等を参考にし、単細胞・群体型藻類と糸状型藻類を区別した。また、罫線が入った特別なスライドガラス(カウンティングチェンバー)を用いてそれらの割合を把握した。藻類量の指標として強熱減量を用いる。強熱減量は、乾燥炉((株)YAMATO)に試料を入れ、110°C で 2~3 時間乾燥させた後、デシケータで冷却しそれを電子天秤((株)島津製作所)で定量し、さらに、それをマッフル炉((株)YAMATO)に入れ 600°C で 2 時間加熱し、デシケータで冷却後の試料を電子天秤で定量し、乾燥重量との差を強熱減量として求めた。



写真2-1. 本実験に用いた水路



- |              |           |
|--------------|-----------|
| A: 上流端水槽     | E: 循環用ポンプ |
| B: 土砂投入位置    | F: 土砂捕捉用網 |
| C: デジタルカメラ撮影 | G: 下流端水槽  |
| D: ビデオ撮影     |           |

図2-1. 実験水路の平面図(上)と立面図(下)

## 2.3 素焼きタイル河床における糸状藻類の強制剥離実験

### 2.3.1 糸状藻類の培養条件および方法

#### (a) 糸状藻類の採集

本実験で対象とする糸状藻類を、2005年8月に神奈川県相模川水系中津川の宮ヶ瀬ダム下流域で採取した。対象区間で河床にある礫表面に付着する藻類をブラシで剥ぎ取った。この試料を2分割し、一方

の試料は 10%ホルマリン溶液で固定し、生物顕微鏡で種の同定を行った。他方は培養するため何も加えずに、40L の河川水とともに実験水路内に混入し、1000L の水道水を加え水路内に循環させた。

#### (b) 糸状藻類の培養条件

素焼きタイル河床として一辺 20cm、厚み 1.5cm の素焼きタイルを用い、アクリル板で仕切られた両方の水路床に配置した。この素焼きタイル上に糸状藻類を培養した。

末木ら<sup>19)</sup>は水路での藻類の培養は使用する素焼きタイル河床や、水理条件等によって藻類の定着状態が大きく異なると指摘している。そこで、戸田ら<sup>20)</sup>が室内水路で藻類を培養した実験条件から、以下のように藻類培養条件を定めて糸状藻類の培養を行った。

藻類培養に用いた培地は、西澤ら<sup>21)</sup>がまとめた淡水藻類の培養に用いられる培地のうちのひとつの改変デトマー培地である。培養中は、1 週間間隔で水路内の栄養塩濃度、溶存態窒素三態( $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N)と溶存態リン酸態リン( $\text{PO}_4^{3-}$ -P)を測定し、基準値を下回っていたら、培地を添加し濃度を調整した。各項目の基準値は  $\text{NO}_3^-$ -N : 0.23ppm,  $\text{NO}_2^-$ -N : 0.006ppm,  $\text{NH}_4^+$ -N : 0.16ppm,  $\text{PO}_4^{3-}$ -P : 0.066ppm である。なお、各項目の基準値は、糸状藻類採取時(2005 年 7 月)の河川から採水した試水の各栄養塩濃度である。

照度に関しては、人工照明で藻類の培養を行った。光源として水路に 500W の白熱灯(RF110V450WH、松下電器(株))を 6 個設置し、昼夜の別はタイマー(アズワン(株))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。それ以外は暗条件とした。照度の測定にはデジタル照度計((株)カスタム製)を用いた。白熱灯が水路床に与える照度は 3000lux~4000lux であった。

水温に関しては、野崎ら<sup>22)</sup>が行った実験結果をもとに水温調節を行った。培養期間が 8 月~9 月であったため、水温の管理は、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°C 前後とした。

#### (c) 糸状藻類の培養過程

培養中は付着藻類の生育過程を記録するために、水路上方からデジタルカメラにより撮影した。素焼きタイルの表面に対し付着した藻類が不均一に繁茂した際、または藻類が多層に繁茂した際は、表面の藻類を全て剥ぎ取り再繁茂させた。

培養開始後、約 2 週間程度で素焼きタイル一面に藻類が繁茂し、厚みは 3~5mm 程度であった。その藻類を生物顕微鏡で観察した。珪藻ではアステリオネラ属(*Asterionella formosa* : 写真 2-2)やオビケイソウ属(*Fragilaria sp.*)が観察され、両者とも非糸状かつ単体であり、細胞長は約 20 $\mu\text{m}$  であった。緑藻では

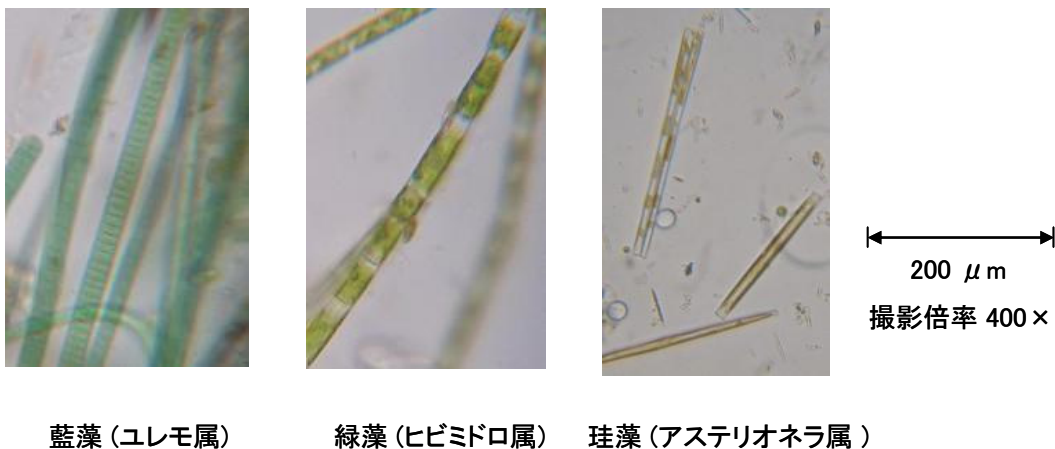


写真2-2. 水路で培養した藻類 (培養開始2週間後)

糸状のヒビミドロ属(*Urothrix sp.* : 写真 2-2)を確認した。細胞幅は約  $10\mu\text{m}$ 、細胞長は長いもので  $5\text{cm}$  あり、群体を形成していた。また、藍藻では、ユレモ属(*Oscillatoria sp.* : 写真 2-2)を確認した。これも糸状かつ群体を形成していた、ヒビミドロ属とユレモ属の全藻類に対する構成比はほぼ 9 割であった。

### 2.3.2 土砂投入による糸状藻類の剥離実験の条件および方法

#### (a) 素焼きタイルの設置

幅  $20\text{cm}$  の水路内に藻類が繁茂した素焼きタイルを一枚設置し、その上下流に何も付着していないタイルを敷きつめた。素焼きタイル間にできた隙間はゴム板で埋め、土砂が流れ込むことを防いだ。

#### (b) 糸状藻類の剥離実験条件

箱石ら<sup>4)</sup>によれば、掃流力の増加に伴い、実験開始 5 分で付着藻類の剥離が認められることから、本実験では、4 ケース全てにおいて各水理条件(摩擦速度、流量、河床勾配)の下で、実験開始前に流水の掃流力のみを 30 分間継続して与えた。その時間で素焼きタイル表面の藻類がほとんど剥離しなかったことから、流水の掃流力のみでは剥離されなかったと判断した。その素焼きタイルの付着藻類を初期状態として各ケースで用いることとし、写真 2-3 に示すように素焼きタイルの端の  $2.5\text{cm}\times 20\text{cm}$  の面積の糸状藻類を剥ぎ取り、強熱減量を測定し、単位面積当たりの藻類量  $m_0$  とした。

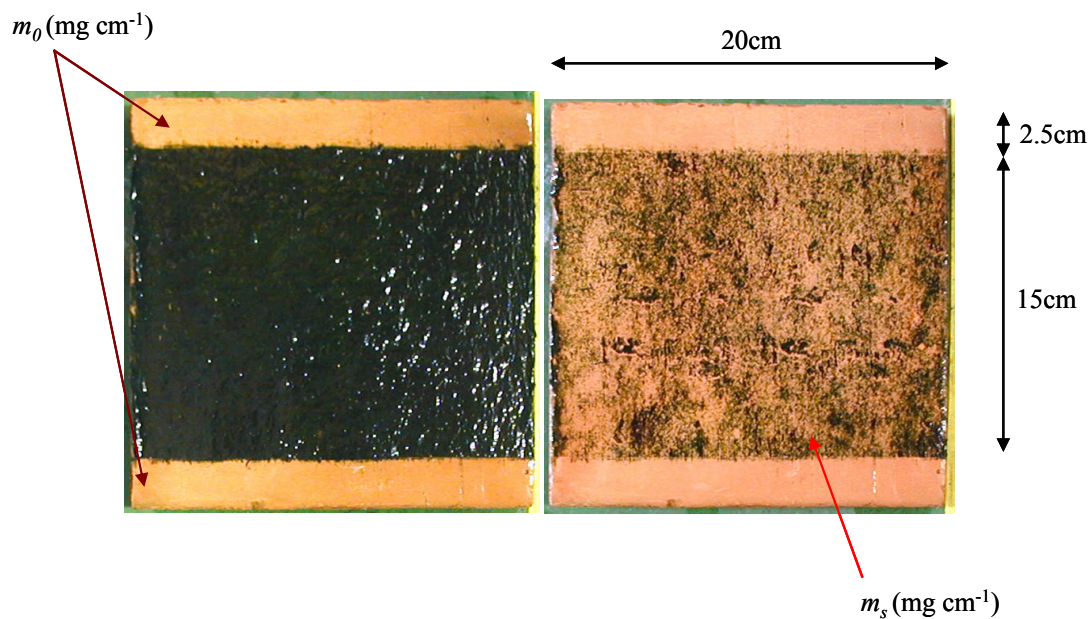


写真2-3. 土砂投入実験前後の素焼きタイル表面の糸状藻類の付着の様子。  
実験ケース3( $d_f=10.4\text{mm}$ ,  $\tau_* = 0.03$ ). 左:実験前, 右:実験後

#### (c) 投入土砂の粒径と土砂動態

本実験の実験条件を表 2-1 に示す。表中の記号は、 $Q$  : 流量( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ )、 $U$  : 断面平均流速( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )、 $h$  : 断面平均水深( $\text{m}$ )、 $u_*$  : 摩擦速度( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )、 $\tau_0$  : 底面せん断力( $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ )、 $I$  : 河床勾配、 $d_i$  : 投入砂礫の代表粒径( $\text{m}$ )、 $\tau_*$  : 無次元掃流力、そして  $q_{Bi}$  : 単位時間・単位幅当たりの掃流砂量( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ )である。供給する土砂は川砂利( $2.65\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )を使用した。各ケースの粒径区分は、ケース 1 :  $2.4\text{mm}\sim 4.8\text{mm}$ 、ケース 2 :  $4.8\text{mm}\sim 5.6\text{mm}$ 、ケース 3 :  $9.6\text{mm}\sim 11.2\text{mm}$ 、およびケース 4 :  $16\text{mm}\sim 19\text{mm}$  とした。

ここで、単一粒径に作用する無次元限界掃流力は shields<sup>23)</sup>による式(2-1)で与えられる。

$$\tau_{*ci} = \frac{u_{*ci}^2}{s \cdot g \cdot d_i} = \phi \left( \frac{u_{*ci} d_i}{\nu} \right) \cong 0.03 \sim 0.05 \quad (2-1)$$

ここで、 $s$ ：土粒子の水中比重(=1.65)、 $u_{*ci}$ ：粒径別の限界摩擦速度( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )、 $\nu$ ：動粘性係数( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ )である。本実験においては、各ケースにおいて無次元掃流力を  $\tau_{*}=0.03$  と設定した。

土砂の投入位置は藻類付着タイル設置箇所から 1m 上流とし、定量カップを用いて、一定の割合で供給した。水路下流端で土砂を捕捉した。掃流砂の土砂動態を記録するために藻類付着タイル側部からデジタルビデオカメラで撮影した。

デジタルビデオカメラで側面から撮影した画像から、図 2-2 に示すサルテーション運動する掃流砂の水路床と平行方向の流下速度  $u_g$ 、水路床と垂直方向の落下速度  $v_y$ 、および、サルテーション運動する掃流砂の跳躍距離  $L_s$  を実測した。各ケース、10 個のサンプルを抽出し、各値の平均値と標準偏差を図 2-3 に示す。また、各平均値を表 2-2 に示す。図 2-3 より、代表粒径を大きくしていくと、流下速度  $u_g$ 、落下速度  $v_y$ 、および、跳躍距離  $L_s$  の各値はそれに準じて増加することが示されている。

表2-1. 素焼きタイルを用いた糸状藻類の実験条件

	培養	剥離			
	20cm 水路	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
$Q$ ( $10^{-3} \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ )	7.3	7.2	7.6	15.8	22.0
$U$ ( $\text{ms}^{-1}$ )	1.05	0.88	1.01	1.18	1.46
$h$ (m)	0.035	0.041	0.038	0.067	0.076
$u_*$ ( $\text{ms}^{-1}$ )	0.057	0.051	0.052	0.071	0.092
$\tau_0$ ( $\text{Nm}^{-2}$ )	3.3	1.8	2.7	5.1	8.4
$I$	0.013	0.010	0.010	0.013	0.020
$d_i$ (mm)	-	3.6	5.2	10.4	17.5
$\tau_*$	-	0.03	0.03	0.03	0.03
$q_{Bi}$ ( $10^{-5} \text{ m}^3\text{s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ )	-	0.79	1.22	2.34	2.44

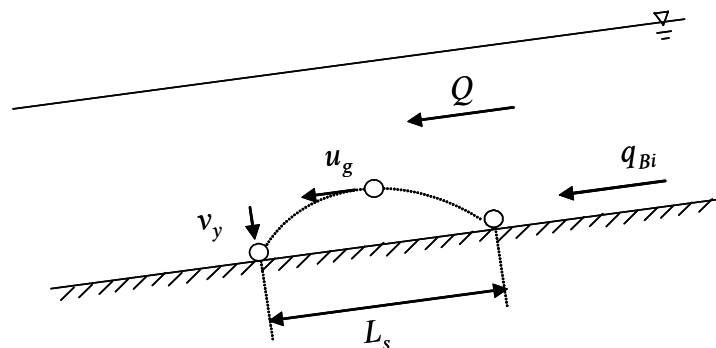


図2-2. サルテーション砂礫の運動モデル



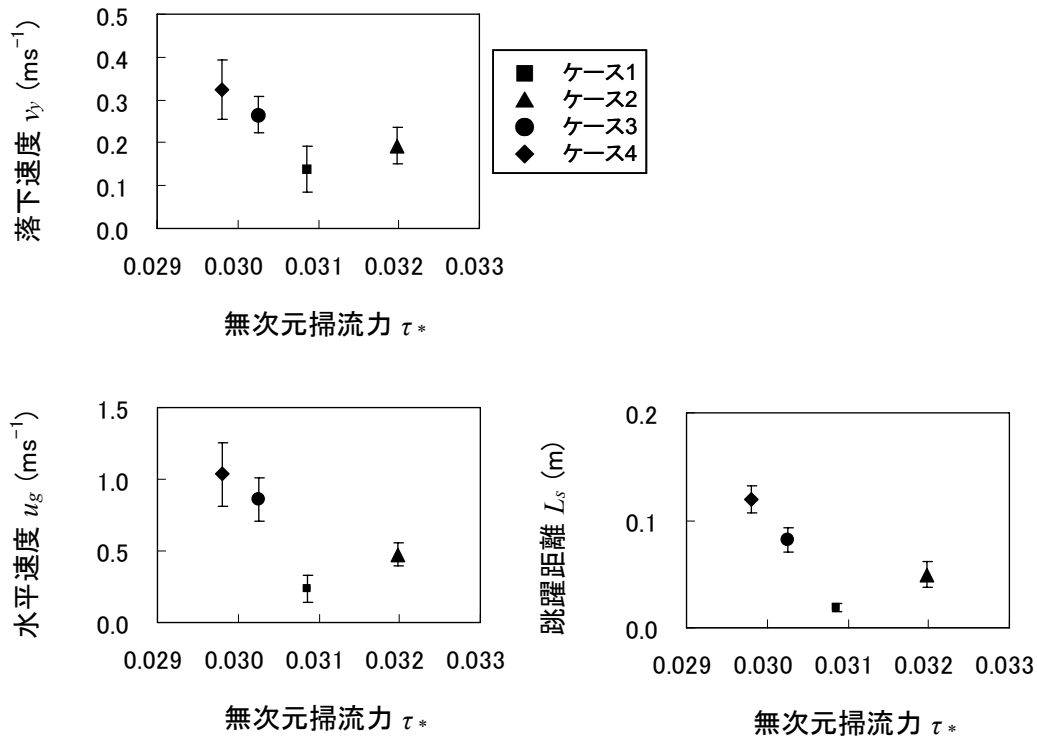


図2-3. デジタルカメラで撮影した画像から実測した掃流砂の落下速度、水平速度および跳躍距離

表2-2. 掃流砂のサルテーション運動の実測値と剥離寄与率

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
落下速度 $v_y$ ( $\text{ms}^{-1}$ )	0.14	0.19	0.26	0.32
水平速度 $u_g$ ( $\text{ms}^{-1}$ )	0.24	0.47	0.71	1.03
跳躍距離 $L_s$ (m)	0.02	0.05	0.08	0.12
剥離寄与率 $\alpha_s$	1.00	0.88	0.92	0.98

#### (d) 糸状藻類の剥離過程

糸状藻類の剥離状況を観察するために、藻類付着タイル設置箇所鉛直上方からデジタルカメラを用いて一定時間間隔で撮影を行った。実験終了は、河床材料の表面積( $\Delta L \times B$ )に対する糸状藻類の付着面積の減少が収束したときとした。その素焼きタイルの糸状藻類を収束状態として各ケースで用いることとし、写真 2-3 に示すように素焼きタイルの表面積( $\Delta L \times B$ )の  $15\text{cm} \times 20\text{cm}$  の面積の糸状藻類を剥ぎ取り、強熱減量を測定し、単位面積当たりの藻類量  $m_s$  とし、その値を表 2-3 に示す。

### 2.3.3 糸状藻類の剥離過程に関する結果および考察

#### (a) 画像解析

剥離過程を知るために糸状藻類の付着面積の時系列変化を定量化する。そのために、鉛直上方からデジタルカメラを用いて一定時間間隔で撮影された画像を解析した。以下にその手順を写真 2-4 とともに示す。写真は、ある経過時間における藻類の付着面積(緑色)を示している。まず、素焼きタイルの表面

積( $\Delta L \times B$ )の全画素数を求める。次に、糸状藻類の付着面積  $a_j$  の画素数を求める。

表2-3. 実験前後における藻類量と減少率, 時間減少率

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
初期藻類量 $m_0$ (mg·cm <sup>-2</sup> )	7.2	6.9	4.8	5.2
収束藻類量 $m_s$ (mg·cm <sup>-2</sup> )	6.3	1.1	0.3	0.8
減少率 $p_i$	0.13	0.84	0.94	0.85
継続時間 $t_s$ (min)	170	200	120	120
時間減少率 $p_{si}$ (10 <sup>-4</sup> s <sup>-1</sup> )	0.1	0.7	1.3	1.2

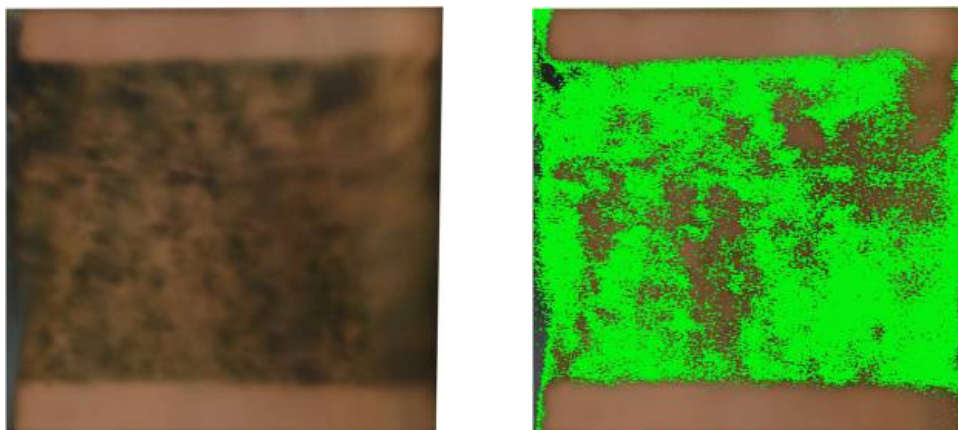


写真2-4. 画像解析による糸状藻類付着面積の算定

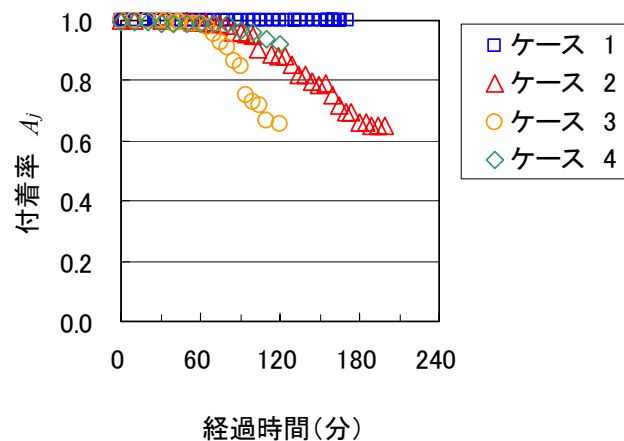


図2-4. 素焼きタイルを用いた付着率  $A_j$  の時間変化

(b) 付着率の時間変化

画像解析より求めた、糸状藻類の付着面積  $a_j$  から付着率  $A_j$  を式(2-2)で定義する。

$$A_j = \frac{a_j(t_j)}{\Delta L \cdot B} \quad (2-2)$$

ここに、添え字  $j(=0,1,2,\dots,s)$  は時間を表す。  $a_j$  はある経過時間  $t_j$  における糸状藻類の付着面積を示し、  $t_0$  は土砂投入開始時刻( $t_0=0$ )、  $a_0$  は土砂投入前の値を示す。付着率の時間変化を図 2-4 に示す。図より、

以下のことが言える。ケース 1(無次元掃流力( $\tau^*=0.03$ )、代表粒径 3.6mm)は実験を通じて剥離が生じなかった。その他のケースにおいては、土砂投入開始から 1 時間までは、付着率は変化していない。これは糸状藻類に着目すると、サルテーション砂礫の衝撃により、根こそぎ剥がされるということではなく、むしろその上部から徐々に切り取られるという剥離過程を示している。実験終了時の付着率が最も低かったケースは、ケース 2(無次元掃流力( $\tau^*=0.03$ )、代表粒径 5.2mm)とケース 3(無次元掃流力( $\tau^*=0.03$ )、代表粒径 10.4mm)の 0.65 であった。

### (c) 剥離寄与率の定義

図 2-4 から、糸状藻類の付着率  $A_j$  の時間変化率である剥離寄与率  $\alpha_s$  を式(2-3)で与える。

$$\alpha_s = \frac{1}{2t_s} \sum_{j=0}^{j=s+1} (A_j + A_{j-1}) (t_j - t_{j-1}) \quad (2-3)$$

ここに、 $t_s$  は各ケースにおいて付着面積の減少が収束したときの経過時間である。各ケースにおける  $\alpha_s$  の値を表 2-2 に示す。この値は、掃流砂が糸状藻類の付着した河床に衝突した際、どの程度の割合で糸状藻類の付着面積に衝突するかを示している。このことから、素焼きタイルに付着した糸状藻類に対しては、掃流砂の少なくとも 88%が、付着した糸状藻類の剥離に寄与していることが示唆される。

### (d) 減少率と時間減少率の定義

単位面積当たりの糸状藻類の強熱減量によって求めた藻類量の初期状態から収束状態の減少量を、初期状態の量で無次元化した値を、減少率  $p_i$  として定義する。また減少率の変化率を、時間減少率  $p_{si}(1 \cdot s^{-1})$  と定義する。それぞれの式を式(2-4)に示す。

$$p_{si} = \frac{p_i}{t_s} = \frac{(m_0 - m_s)}{m_0 \cdot t_s} \quad (2-4)$$

ここに、 $t_s$  は各ケースにおいて付着面積の減少が収束したときの経過時間である。各ケースにおける減少率  $p_i$ 、時間減少率  $p_{si}(1 \cdot s^{-1})$  と経過時間  $t_s$  の値を表 2-2 に示す。表 2-2 より、減少率、時間減少率の両者の最大値はケース 3(無次元掃流力( $\tau^*=0.03$ )、代表粒径 10.4mm)であった。従って、素焼きタイルに付着した糸状藻類に対しては、掃流砂の粒径は 10.4mm、その流砂量は  $2.34 \times 10^{-5} m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$ 、そして、摩擦速度は  $7.1 cm \cdot s^{-1}$  の条件において、減少率と時間減少率の値が最も高いことが示された。

## 2.4 礫河床における糸状藻類の強制剥離実験

### 2.4.1 礫の採集と設置方法

#### (a) 礫の採集と保存方法

本実験で対象とする糸状藻類が付着した礫を、2005 年 11 月 18 日に神奈川県相模川水系中津川の宮ヶ瀬ダム下流域の愛川大橋付近で採集した。採取した地点は写真 2-5 のような早瀬の区間であった。礫表面は、写真 2-6 のように礫全面に糸状藻類が繁茂していた。付着していた藻類の全てが写真 2-7 のような、糸状体を形成する緑藻のアオミドロ属(*Spirogyra sp.*)であった。礫の保存方法は、写真 2-8 のように、エアープンプを取り付けた水槽内に、採水した河川水とともに保管した。

#### (b) 礫の設置方法

河床に設置した礫の表面に投入した土砂が衝突し、衝突した土砂が流下するようにするために水路床の底上げをした。幅 19.5cm、高さ 13cm、長さ 40cm のコンクリートブロックを下流端から 2.7m~3m と 4.4m~4.6m の区間を開け、上流端から下流端まで敷きつめた。

河川から採取した礫によって、糸状藻類の繁茂形態やその付着面積が異なっていた。そのため、採取

した各々の礫において、剥離実験で用いる面と同様の繁茂形態の箇所を選定し、その礫面積の糸状藻類を剥ぎ取り、強熱重量を測定し、単位面積当たりの藻類量  $m_0$  とした。剥ぎ取り箇所は写真 2-9 に示すように設置したときに小礫で埋もれる箇所とした。それを初期状態として各ケースで用いることとした。糸状藻類剥ぎ取り後、礫を入れ込み、隙間を 3~5cm の小礫で埋めて固定した。



写真2-5. 糸状藻類の付着した礫を採取した地点

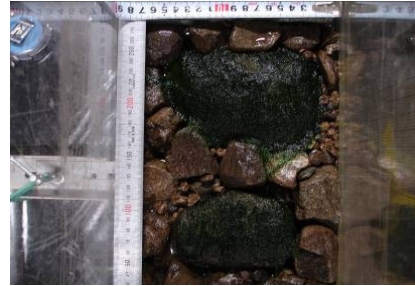


写真2-6. 水路に設置した河川から採取した礫表面

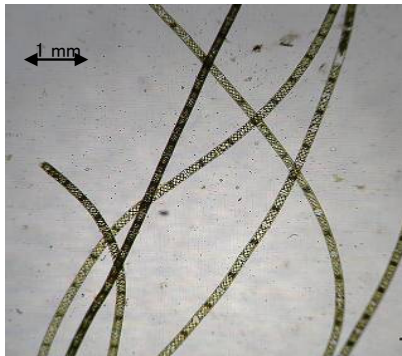


写真2-7. 礫に付着していた緑藻類アオミドロ属



写真2-8. エアーポンプを取り付けた水槽による礫の保存



写真2-9. コンクリートブロックの間に河川から採取した礫を設置した水路 (下流から2.7m~3.0m)

## 2.4.2 土砂投入による糸状藻類の剥離実験の条件および方法

### (a) 糸状藻類の剥離実験条件

河川から採取した礫を河床に固定した後、各水理条件(摩擦速度、流量、河床勾配)の下で、実験開始前に流水の掃流力のみを 30 分間継続して与えた。そして、流水を止め、水路鉛直上方から、デジタル

カメラで撮影し、それを初期の付着面積とした。

(b) 投入土砂の粒径と土砂動態

本実験の実験条件を表 2-4 に示す。表中の記号は表 2-1 と同じである。供給する土砂、ケース I ～ケース IV の 4 個の粒径区分を用いた。各粒径区分の平均粒径を代表粒径とした。各ケースに対する無次元掃流力を変え、土砂投入実験を実施した。各ケースの粒径区分は、ケース I は 4.8mm～5.6mm、ケース II は 9.6mm～11.2mm、ケース III は 16mm～19mm、および、ケース IV は 26.5mm～37mm とした。

土砂の投入位置は下流端から 6m 上流とし、水路下流端で土砂を捕捉した。掃流砂の土砂動態を記録するために藻類付着タイル側部からデジタルビデオカメラで撮影した。

デジタルビデオカメラで側面から撮影した画像から、図 2-2 に示したサルテーション砂礫の水路床と平行方向の流下速度  $u_g$ 、サルテーション砂礫の水路床と垂直方向の落下速度  $v_y$ 、および、サルテーション砂礫の跳躍距離  $L_s$  を実測した。各ケース、10 個のサンプルを抽出し、各値の平均値と標準偏差を図 2-5 に示す。また、各平均値を表 2-5 に示す。図 2-5 より、代表粒径に着目すると、無次元掃流力を大きくしていくと、落下速度  $v_y$ 、および、跳躍距離  $L_s$  の各値はそれに準じて増加することが示されている。このことから、礫河床上における掃流砂の動態は無次元掃流力と結び付けられることが示唆される。

表2-4. 礫を用いた糸状藻類の実験条件

	ケース I-1	ケース I-2	ケース II-1	ケース II-2	ケース III-1	ケース III-2	ケース IV-1
$Q$ ( $10^{-3} \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ )	6.8	16.8	16.8	23.9	16.8	23.9	16.8
$U$ ( $\text{ms}^{-1}$ )	1.00	1.22	1.22	1.58	1.22	1.58	1.22
$h$ (m)	0.035	0.071	0.071	0.078	0.071	0.078	0.071
$u_*$ ( $\text{ms}^{-1}$ )	0.052	0.072	0.072	0.092	0.072	0.092	0.072
$\tau_0$ ( $\text{Nm}^{-2}$ )	2.7	5.2	5.2	8.5	5.2	8.5	5.2
$I$	0.010	0.013	0.013	0.020	0.013	0.02	0.013
$d_i$ (mm)	5.2	5.2	10.4	10.4	17.5	17.5	31.8
$\tau_*$	0.03	0.06	0.03	0.05	0.02	0.03	0.01
$q_{Bi}$ ( $10^{-5} \text{ m}^3\text{s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ )	2.45	7.57	7.25	7.53	5.81	7.25	7.53

表2-5. 掃流砂のサルテーション運動の実測値と剥離寄与率

	ケース I-1	ケース I-2	ケース II-1	ケース II-2	ケース III-1	ケース III-2	ケース IV-1
落下速度 $v_y$ ( $\text{ms}^{-1}$ )	0	0.31	0.36	0.29	0.28	0.42	0.32
水平速度 $u_g$ ( $\text{ms}^{-1}$ )	0	0.99	0.90	1.02	0.81	1.13	0.75
跳躍距離 $L_s$ (m)	0	0.12	0.12	0.16	0.11	0.21	0.11
剥離寄与率 $\alpha_s$	0	0.27	0.45	0.56	0.44	0.27	0.19

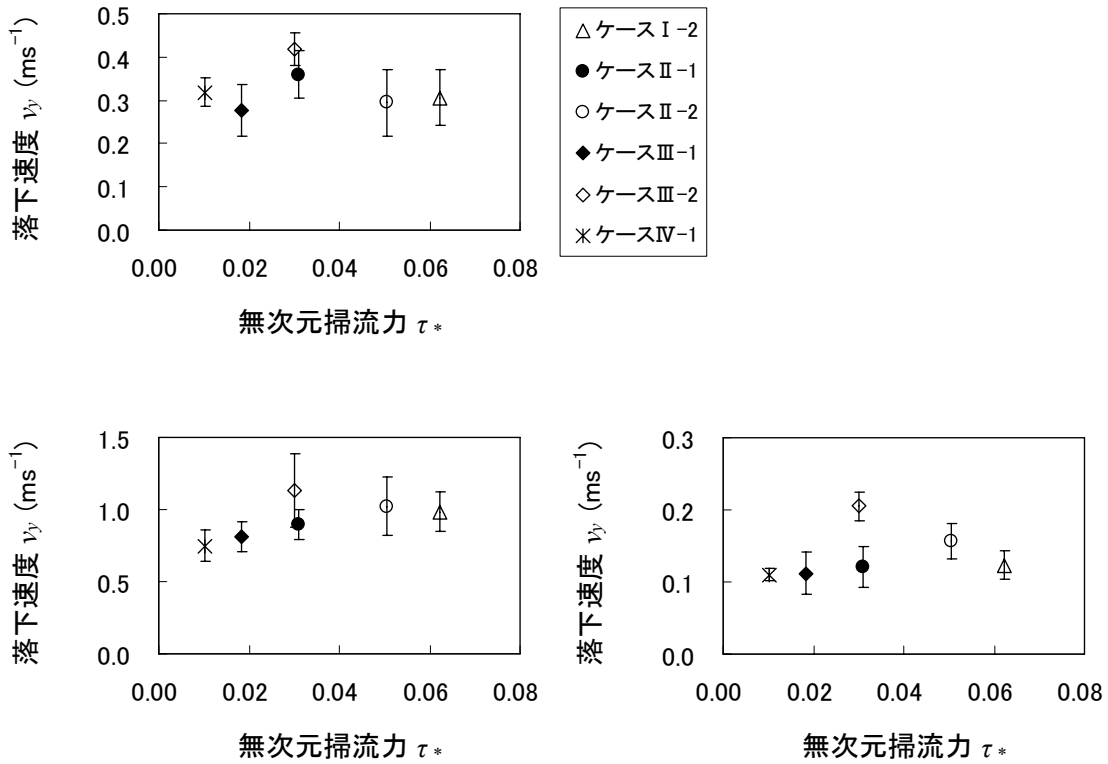


図2-5. デジタルカメラで撮影した画像から実測した掃流砂の落下速度，水平速度および跳躍距離

(c) 実験終了時の藻類量の算定

実験終了は、河床材料の表面積( $AL \times B$ )に対する糸状藻類の付着面積の減少が収束したときとした。その礫表面の糸状藻類を収束状態として各ケースで用いることとし、写真2-10に示すように表面積( $AL \times B$ )の糸状藻類を剥ぎ取り、強熱重量を測定し、単位面積当たりの藻類量  $m_s$  とし、その値を表2-6に示す。

$m_0$  ( $\text{mg cm}^{-1}$ )



$m_s$  ( $\text{mg cm}^{-1}$ )

写真2-10. 土砂投入実験前後の素焼きタイル表面の糸状藻類の付着の様子。実験ケースII-2( $d_f=10.4\text{mm}$ ,  $\tau_*=0.05$ )。左:実験前, 右:実験後

表2-6. 実験前後における藻類量と減少率, 時間減少率

	ケース I-1	ケース I-2	ケース II-1	ケース II-2	ケース III-1	ケース III-2	ケース IV-1
初期藻類量 $m_0$ (mg·cm <sup>-2</sup> )	3.7	4.5	4.0	6.0	8.6	3.0	4.7
収束藻類量 $m_s$ (mg·cm <sup>-2</sup> )	3.7	0	0	0	1.0	0.9	0.5
減少率 $p_i$	0	0.99	1.00	1.00	0.88	0.71	0.90
継続時間 $t_s$ (min)	120	120	120	90	120	90	120
時間減少率 $p_{si}$ (10 <sup>-4</sup> s <sup>-1</sup> )	0	1.4	1.4	1.9	1.2	1.3	1.3

### 2.4.3 糸状藻類の剥離過程に関する結果および考察

#### (a) 減少率と時間減少率

表2-6より、減少率、時間減少率の両者の最大値はケースII-2(無次元掃流力( $\tau_*=0.05$ )、代表粒径10.4mm)であった。従って、河川から採取した礫に付着した糸状藻類に対しては、掃流砂の粒径は10.4mm、その流砂量は $7.53 \times 10^{-5} \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 、そして、摩擦速度は $9.2 \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ の条件において、減少率と時間減少率の値が最も高いことが示された。

#### (b) 剥離率の定義

デジタルカメラを用いて一定時間間隔で撮影された画像を解析した結果から、式(2-3)で定義した剥離寄与率 $\alpha_s$ を求め、表2-5に示した。式(2-2)で定義した付着率 $A_j$ と、各ケースの初期付着率 $A_0$ で無次元化した値とその時間変化から、剥離率 $P_{Aj}$ を式(2-5)で定義する。

$$P_{Aj} = 1 - \frac{A_j}{A_0} \quad (2-5)$$

ここに、 $A_j$ は経過時間 $t_j$ における付着率である。 $A_0$ は初期の付着率である。次に、付着率と剥離率の時間変化を以下の3つの場合に分けて考察する。

##### i) 無次元掃流力を一定とした場合

投入する土砂の粒径を5.2mm、10.4mmと17.5mmとし、各々に対する無次元掃流力を0.03と一定にしたケースについて図2-6に示す。この図から以下のことが言える。

ケースI-1(5.2mm)は、サルテーション砂礫が礫に繁茂する糸状藻類に絡まってしまい、その剥離に寄与しなかった。このことから、この粒径以下の砂礫の衝突による剥離が生じないことが推測される。ケースII-1(10.4mm)とケースIII-2(17.5mm)を比較すると、単位時間・単位幅当たりの掃流砂量 $q_{Bi}$ が少なく、粒径が小さいケースII-1が実験開始30分までは、剥離率の時間変化が最も大きかった。その後は、ケースIII-2が最も大きい剥離率となった。これより、剥離過程には土砂の粒径の大きさの効果が起因していることが示された。

##### ii) 流速、流量を一定とした場合

投入する土砂の粒径10.4mmに対する無次元掃流力を0.03とし、その際の摩擦速度 $7.2 \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ を一定とした条件の下において、投入する土砂の粒径を5.2mm、10.4mm、17.5mmと31.8mmに変えたケースについて図2-7に示す。この図から以下のことがいえる。

実験開始 30 分までは、ケース II-1(10.4mm)とケース IV-1(31.8mm)の剥離率が同値で、かつ最も早く剥離が生じた。その後も実験を通じてほぼ同様の剥離過程を示した。また、両者の掃流砂量  $q_{Bi}$  を比較すると、ケース IV-1 の方が少ない量であった。このことから、サルテーション砂礫の礫への衝突による糸状藻類の剥離に寄与するパラメータは、投入土砂の粒径と掃流砂量であることが示された。実験開始 30 分後から実験終了までは、ケース I -2(5.2mm)が最も多く剥離が生じた結果となった。掃流砂量  $q_{Bi}$  がほぼ等しい 5.2mm、10.4mm と 17.5mm のケースを比較すると、最終的な剥離率の値は 5.2mm、10.4mm、17.5mm の順で大きくなる。つまり、無次元掃流力が剥離過程に寄与することが示された。

iii) 無次元掃流力を変化させた場合

投入する土砂の粒径を 5.2mm、10.4mm とし、各々の無次元掃流力を変えたケースについて図 2-8 に示す。この図から以下のことがいえる。

ケース I (5.2mm)に着目すると、ケース I -1( $\tau_*=0.03$ )においては、サルテーション砂礫が糸状藻類に絡まってしまいその剥離に寄与しなかった。無次元掃流力を増加させた、ケース I -2( $\tau_*=0.06$ )においては、実験開始 30 分後の時点で、剥離率が 0.5 を超える値となった。ケース II (10.4mm)に着目すると、実験を通じて、ケース II -1( $\tau_*=0.03$ )の剥離率の方が、ケース II -2( $\tau_*=0.05$ )のそれより大きな値となった。これにより、粒径、掃流砂量を一定とし、無次元掃流力を増加させると最終的な剥離率が增大することがわかる。つまり、剥離に寄与する砂礫に作用する無次元掃流力の大きさはサルテーション砂礫の粒径により異なることが示唆される。

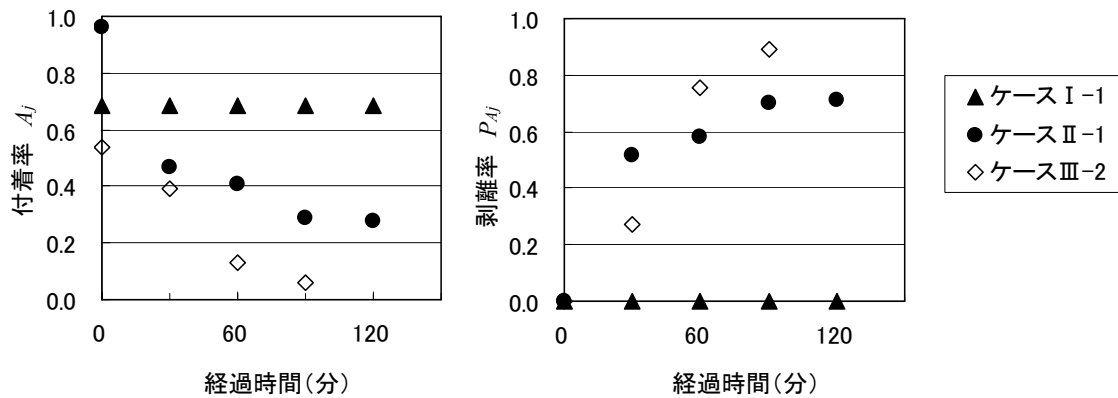


図2-6. 付着率  $A_j$  と剥離率  $P_{A_j}$  の時間変化(無次元掃流力 ( $\tau_*=0.03$ )を一定とした場合)

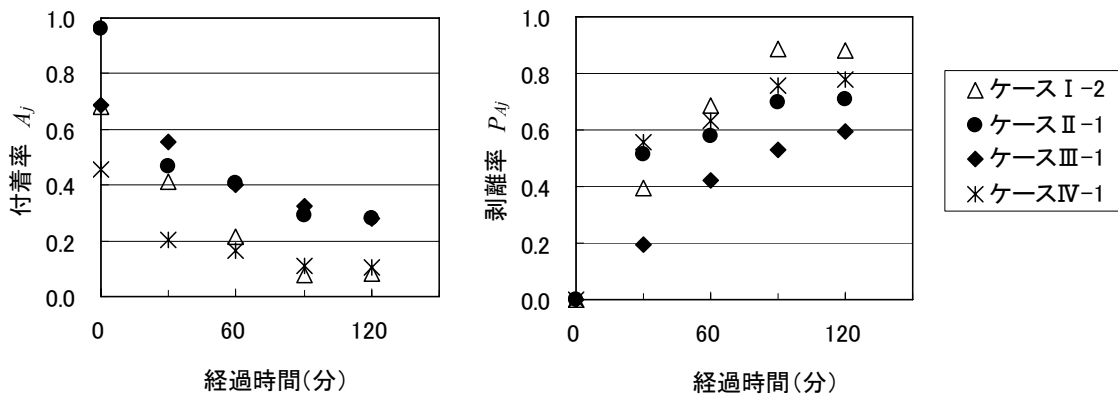


図2-7. 付着率  $A_j$  と剥離率  $P_{A_j}$  の時間変化(流速, 流量を一定とした場合)



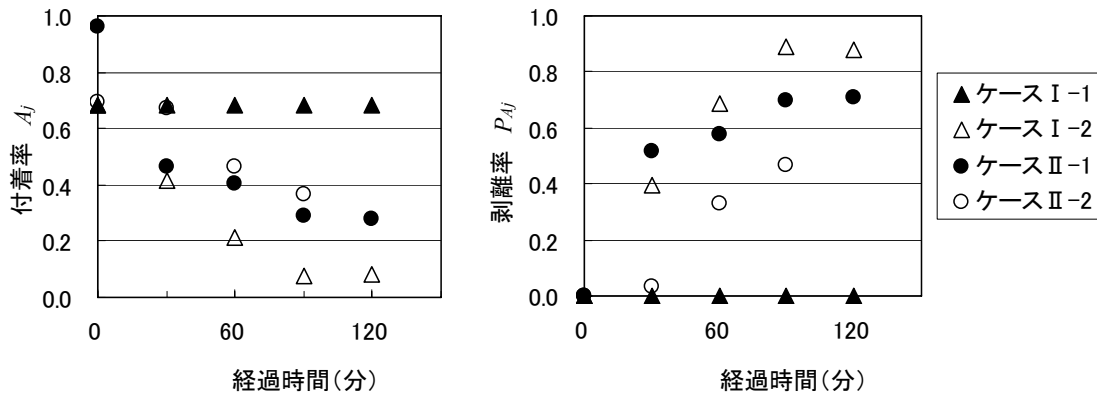


図2-8. 付着率 $A_j$ のと剥離率 $P_{A_j}$ の時間変化(無次元掃流力を変化させた場合)

### 3. ダム下流の礫河床におけるフラッシュ放流の観測

#### 3.1 観測の目的

本章では、神奈川県相模川水系中津川に位置する宮ヶ瀬ダム下流の礫河床において、ダムからのフラッシュ放流に伴う掃流砂の粒径やその量と、それによる河床付着藻類の減少量の調査を実施した現地観測について述べる。その手段として、フラッシュ放流前後での水理条件や流砂形態、河床形態の調査を行い、河床の砂礫によって構成される掃流砂の粒径やその量と付着藻類の減少量を把握することを目的とする。そして、ダム下流の礫河床河川における、掃流砂の粒径やその量と糸状藻類の減少量との関係の検討を行うことを目的とする。

#### 3.2 観測の概要

##### 3.2.1 観測地の概要

図3-1に示す中津川は神奈川県北西部に位置する丹沢山(標高1567m)に水源を發し、神奈川県愛川町、清川村、津久井町にまたがる宮ヶ瀬湖に流れ、宮ヶ瀬ダムを経由し相模川に合流し相模湾に注ぐ、流路延長32.8kmの一級河川である。

平成17年10月15日の宮ヶ瀬ダムにおいて実施されたフラッシュ放流の観測を行った。観測地点は写真3-1に示すダム放流口から2.0km下流の愛川大橋付近より上流側とした。愛川大橋の上流約400mのところ落差工が設置されており、橋から上流に約300mの区間の左岸側に堤防があり、右岸側は植生域となっていた。地点Aの河床の状態を写真3-2に示す。写真はフラッシュ放流の10日前の10月6日に撮影されたものである。写真に示されたように、この地点の河床には全幅(=25.3m)に渡って糸状緑藻類のアオミドロ属が繁茂していた。

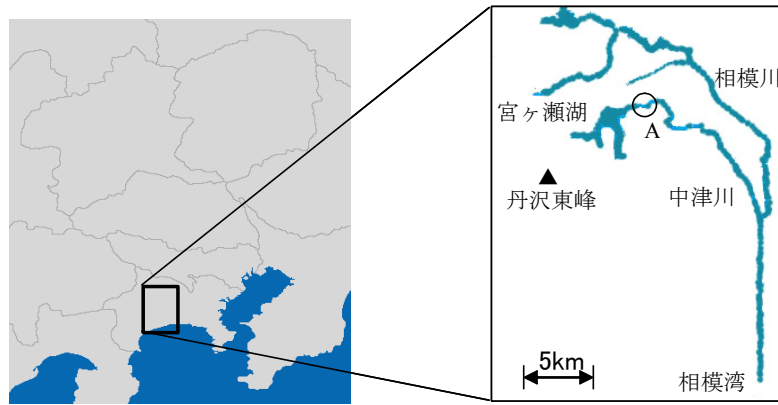


図3-1. 神奈川県相模川水系中津川の概要



写真3-1. 愛川大橋から撮影した対象地点と対象地点周辺の地形図



写真3-2. 地点A（愛川大橋）における糸状藻類アオミドロ属が繁茂した河床（撮影日：平成17年10月6日）

### 3.2.2 観測装置と測定方法

#### (a)フラッシュ放流前，放流後調査

放流前後において河床地形、河床構成材料や礫に付着している付着藻類の繁茂状態の調査を行った。河床地形は、レーザーレベル((株)ソキア)とレーザー距離計((株)ライカジオシステムズ)を用いて測量した。河床構成材料に関しては、河床に杭を打ちそれぞれをロープで巻き 60cm 四方のコドラートを設定し、その中の表層の礫を全て採取した。また、付着藻類の調査においては、設定したコドラート中の礫

に付着している藻類を歯ブラシで剥ぎ取り、10%ホルマリン溶液で固定し、実験室に持ち帰り強熱減量を測定した。藻類種の同定は、生物顕微鏡(アズワン(株))の接眼レンズにデジタルカメラを取り付けて藻類を撮影した。画像から、百科事典等を参考に、単細胞・群体型藻類と糸状型藻類を区別した。また、罅線が入った特別なスライドガラス(カウンティングチェンバー)を用いて、糸状体と非糸状体の割合を把握した。これらの値を放流の前後で比較した。強熱減量は、乾燥炉((株)YAMATO)に試料を入れ、110°Cで2~3時間乾燥させた後、デシケータで冷却しそれを電子天秤((株)島津製作所)で定量し、さらに、それをマッフル炉((株)YAMATO)に入れ600°Cで2時間加熱し、デシケータで冷却後の試料を電子天秤で定量し、乾燥重量との差を強熱減量として求めた。また放流中の土砂の移動を確認するために、石に色を付け河床に設置し、放流後に移動の有無を観測した。

#### (b)フラッシュ放流中調査

放流前に測量した横断形状内の滯筋部に観測機材を設置し、流速、水深、濁度の連続測定を行った。観測機材は流速を計測する Compact-EM((株)アレック電子)、圧力計測による水深計 Diver((株)大起理科工業)、濁度を計測する Compact-CLW((株)アレック電子)を使用した。流速の測定間隔は1分であり、設置位置での最大流速を得た。Diver の測定間隔は1分、Compact-CLW のそれは2分とし、それぞれ Compact-EM と同様に河床に打ち付けたパイプに括り付けて計測した。また、土砂動態の把握のため、掃流砂トラップ箱(幅60cm×40cm×深さ30cm)を河床に埋めた。

### 3.3 ダムからのフラッシュ放流に関する観測結果

#### 3.3.1 観測地点における地形、河床材料、流況

地点 A(愛川大橋)付近の地形図と測量した結果を高低図に表したものを図 3-2 に示す。高さを示す凡例は、青色が低く赤に近づくにつれ高くなることを示している。測量は、枠で囲まれた流下距離に150m、川幅の全幅25.3mについて実施した。図 3-2 の右上の高低図から、下流域に向かって緩やかな上り勾配が確認できる。トラップ箱を設置した箇所は図 3-2 の右上の点線で囲まれた箇所に設置した。この測量の結果、観測した箇所は流下方向および横断方向に3次的に勾配が変わる複雑な地形であることがわかった。

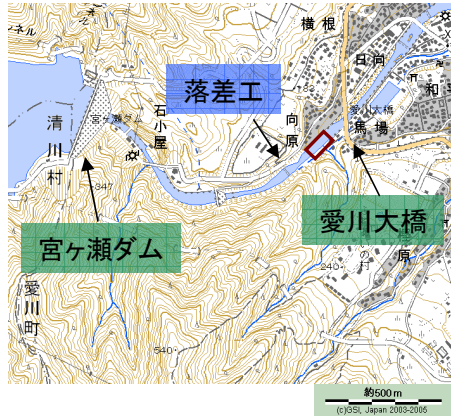
図 3-3 に放流前の河床構成材料の粒径加積曲線を示す。この図より、平均粒径は107mmであった。

観測された水深と流速をダムからのハイドログラフとともに図 3-4 に示す。フラッシュ放流の最大放流量は $100\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ であり、その継続時間は、1時間40分であった。流速は最大で $2.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ であった。

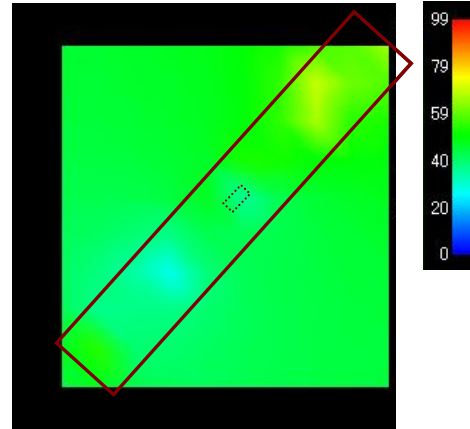
#### 3.3.2 河床せん断力と移動限界粒径

放流による移動限界粒径を観測するために、写真 3-3 に示すように粒径別に色を付けた石を河床に設置した。設置した箇所を図 3-5 に示す。色を付けた石は、粒径5cm~29cmまでを5cm毎、5種類に区分した。粒径区分25cm~29cmの石をトラップ箱から30cm下流に設置した。粒径区分20cm~24cmの石は粒径区分25cm~29cmの30cm下流に設置した。以下同様に粒径の大きい順に上流側から下流に向かって30cm間隔で河床に設置した。

色を付けた石の設置個数、移動した個数、および移動距離を表 4-1 に示す。粒径区分5cm~9cmの石は、12個中8個の移動が確認でき、その最大移動距離は、17.1mであった。他の4個のうち3個は設置した場所から移動せず、もう1個は見つけることができなかった。粒径区分10cm~14cmの石は、12個中3個の移動が確認でき、その最大移動距離は、2.7mであった。他の9個の石は、設置した場所から移



地点A(愛川大橋)付近の地形図



地形図内の枠で囲まれた箇所の高図  
点線で囲まれた箇所にトラップ箱を設置

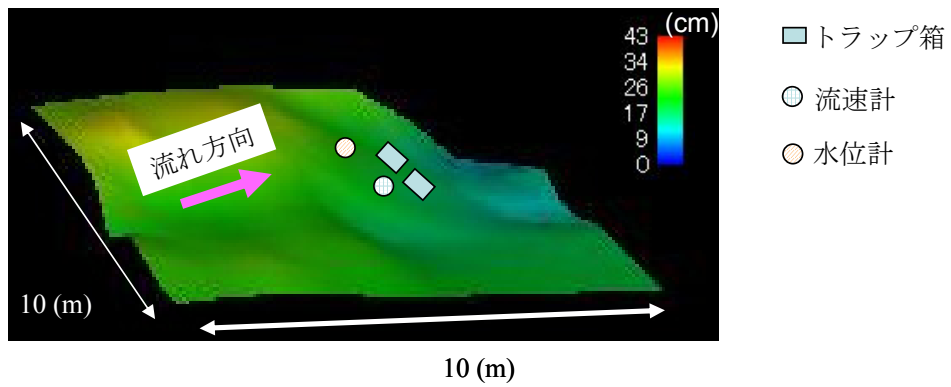


図3-2. 地点A(愛川大橋)における、トラップ箱、流速計、および水位計の設置場所のコンター図

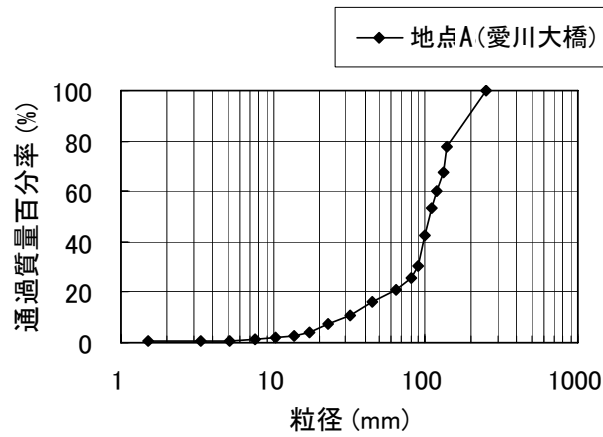


図3-3. 地点A(愛川大橋)における粒径加積曲線

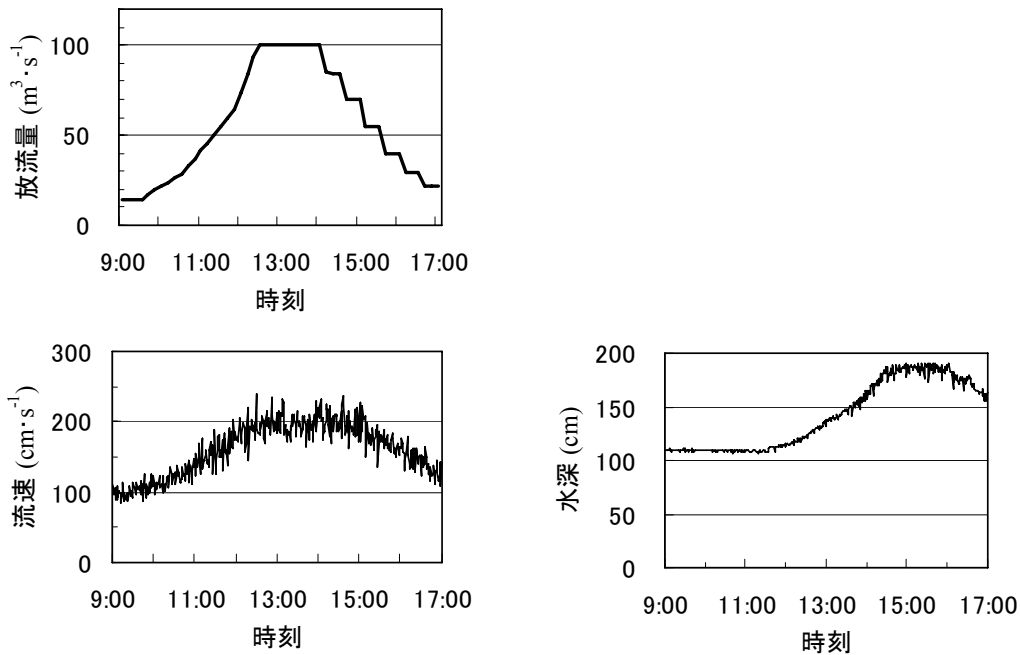


図3-4. 平成17年10月15日のダムからの hidro グラフと地点A(愛川大橋)における流速と水深

動しなかった。粒径 15cm 以上の色付き石は、各粒径区分で 1 個のみ移動が確認された。これらは転動、および滑動しており、その移動距離はわずか 10cm であった。この結果より、地点 A(愛川大橋)において、放流によって、粒径が 15cm 以下までの土砂は河床上を流下し、粒径が 15cm 以上となると、河床上を転動および滑動することが明らかとなった。

次に、河川の掃流力の算定を行う。Chow<sup>28)</sup>によると Manning の粗度係数は Chezy の公式を用いて式(3-1)で与えられる。

$$n = 0.0342k_s^{1/6} \quad (3-1)$$

ここに、 $k_s$  は相当粗度である。吉川ら<sup>29)</sup>によると、この相当粗度は混合砂礫の河床において式(3-2)で与えられる。

$$k_s = 2.5d_m \quad (3-2)$$

河床形状によるエネルギー勾配  $i_e$  は、Chow<sup>28)</sup>によると式(3-3)で与えられる。

$$i_e = \frac{n^2 \cdot v^2}{2.22 \cdot R^{4/3}} \quad (3-3)$$

ここに、 $v$  は流速( $m \cdot s^{-1}$ )で、 $R$  は径深(m)である。これより、摩擦速度  $u_*(m \cdot s^{-1})$  は式(3-4)で与えられる。

$$u_* = \sqrt{gRi_e} \quad (3-4)$$

ここで、径深とエネルギー勾配は観測データより算定する。移動限界粒径は、岩垣<sup>30)</sup>の式(3-5)より求める。

$$u_{*c}^2 = 80.9d \quad (3-5)$$

式(3-5)を用いて、地点 A(愛川大橋)における、掃流力と移動限界粒径を表 3-2 にまとめた。表中の移動限界粒径の実測値は色付き石の移動した粒径の最大値である。この表により、放流によって河床の掃流力が増加し、移動限界粒径の計算値 47.1cm と算定された。これと実測値を比較すると、地点 A(愛川

大橋)の河床材料は移動しうる粒径によって構成されていることが示された。この結果、地点 A(愛川大橋)の河床構成材料については、掃流される石礫の粒径は 15cm 以下であり、それ以上の粒径の石礫は転動および滑動する移動形態をすることが明らかになった。



写真3-3. トラップ箱、色付けした石、および藻類付き礫の設置状況

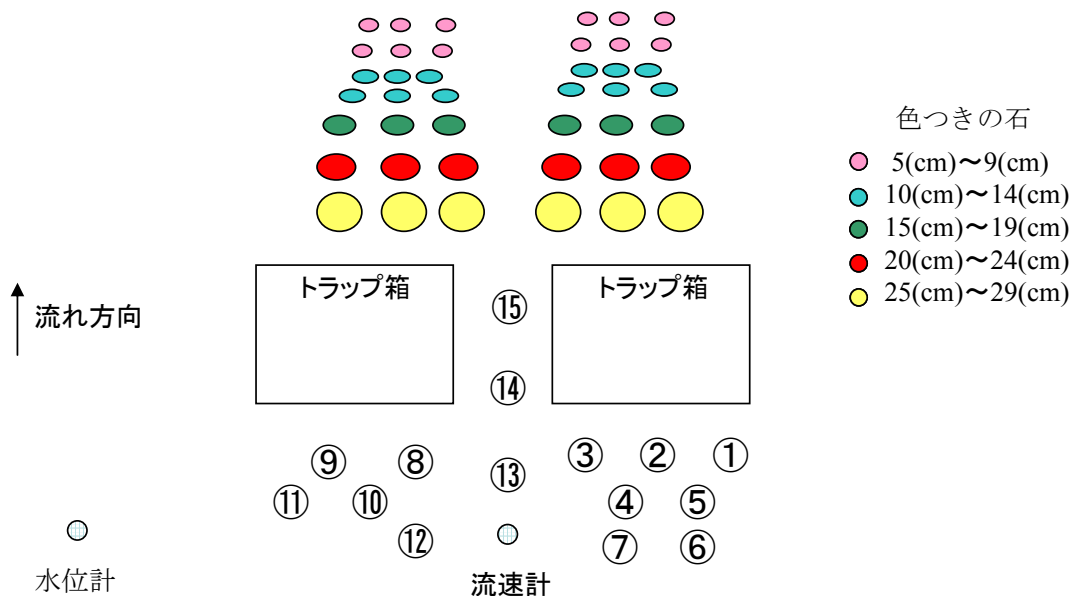


図3-5. 地点A(愛川大橋)に設置した礫の配置図

表3-1. 色つきの石の設置個数, 移動した個数, および移動した距離

設置した石の粒径	設置した個数	移動した個数	移動した距離, (括弧内は粒径を示す)
5cm~9cm	12	8	1.2m(8cm), 2.0m(5cm), 3.6m(7cm), 4.2m(6cm), 4.5m(7cm), 7.0m(9cm), 11.3m(5cm),17.1m(7cm)
10cm~14cm	12	3	0.3m(12cm), 0.4m(11cm), 2.7m(10cm)
15cm~19cm	6	1	0.1m
20cm~24cm	6	1	0.1m
25cm~29cm	6	1	0.1m

表3-2. 河床せん断力の算定と移動限界粒径

		地点A (愛川大橋)
実測値	ピーク時水深(m)	1.91
	河床せん断力(N・m <sup>-2</sup> )	381
	限界粒径(cm)	30
計算値	限界粒径(cm)	47.1

### 3.3.3 採砂した流砂

写真 3-3 に示すように放流前にトラップ箱を河床に埋めた。トラップ箱(幅 60cm)はその上面が河床とほぼ同じ高さになるように河床に埋めた。トラップ箱は 2 個設置し掃流砂を捕捉した。その掃流砂を単位幅当たりの掃流砂量に換算した値を表 3-3 に示す。右岸側のトラップ箱で捕捉した掃流砂の粒径は 12cm の一個であった。これは、色を付けた石の移動距離を示した表 3-1 と比較すると、粒径 12cm の石はわずか 0.3m の移動であり、その粒径の大小の石の移動距離と比較しても最大で 3m 程度の移動距離であった。従って、捕捉した粒径 12cm の掃流砂においても、その箱の直上流の 2m~3m 程度を流下したことが考えられる。一方、捕捉した粒径 1.5mm~64mm の掃流砂は、色を付けた石の移動距離の結果より、最大で 20m 程度を流下したと考えられる。

左右のトラップ箱で採砂した掃流砂の量を比較すると、設置箇所によってばらつきのある結果となった。これは、トラップ箱の設置状況や設置箇所の周辺地形に深く関係していると考えられる。このことや前述の色を付けた石の移動距離の考察より、より多くの土砂を捕捉した右側のトラップ箱の採砂量の方が実状に近いと判断し、この区間全域の単位幅当たりの掃流砂量として議論を進めることとする。

表3-3. 観測地点A(愛川大橋)において河床に設置したトラップ箱で捕捉した掃流砂量

代表粒径 $d_i$ (mm)	左岸側 掃流砂量 ( $10^{-4}\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$ )	右岸側 掃流砂量 ( $10^{-4}\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$ )	代表粒径 $d_i$ (mm)	左岸側 掃流砂量 ( $10^{-4}\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$ )	右岸側 掃流砂量 ( $10^{-4}\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$ )
1.5	0.53	0.40	17.5	0.40	3.56
3.4	0.92	0.82	22.8	0.03	10.4
5.2	0.15	0.26	31.8	0.60	12.8
7.6	0.52	0.96	45.0	-	5.74
10.4	0.18	0.50	64.0	-	3.56
13.6	0.54	2.70	120	-	21.9

掃流砂量の合計値 ( $10^{-4}\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$ )	
左岸側	右岸側
3.9	63.6

### 3.3.4 河床付着藻類の強熱減量の減少率

放流前のトラップ箱設置箇所の上流は写真3-2に示したように、河床の礫の表面に糸状緑藻類のアオミドロ属が付着していた。これは地点Aにおける付着藻類の優占種であった。写真3-3に示したように、放流前に河床より、粒径25cmから30cmの礫を採取し、その表面をあらかじめ作成した5cm×5cmのコドラートを用いて、その枠内の藻類を剥ぎ取り、これを放流前の繁茂状態とした。同様に合計15個の礫に関して行い礫を河床に配置した。

放流後は、ひとつの礫から2箇所の5cm×5cmの部分の剥ぎ取り、その平均を放流後の繁茂状態とした。剥ぎ取る際は、固定した際に剥がされた箇所を除き、礫表面の中央部分を剥ぎ取り、掃流砂の衝突のみによる藻類量として剥ぎ取った。なお、放流後は1個の礫が流されてしまい、4つの礫については人為的な影響により藻類が剥がれた為、残りの合計10個の礫に関して剥ぎ取りを行った。写真3-4は、放流前後の剥ぎ取り後の写真である。

放流前後の藻類の強熱減量を測定し、合計10個の礫の付着藻類の強熱減量の平均値と標準偏差を図3-6に示す。この図が示すように、放流前後において単位面積当たりの強熱減量の減少量は2.4mg・



放流前



放流後

写真3-4. トラップボックスの上流側に設置した礫の写真



cm<sup>2</sup>であり、減少率は0.23であった。また、付着率に関しては、放流前は礫表面の全面に糸状藻類が繁茂しており、付着率の値は1.0であった。放流後の付着率の値は画像解析を行った結果0.96であった。

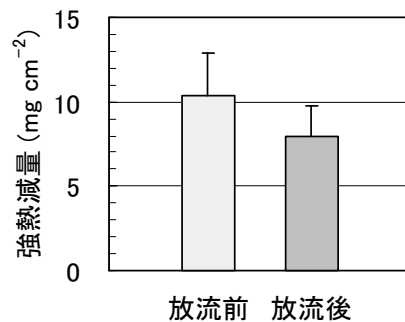


図3-6. 放流前後での強熱減量(平均値, 標準偏差)の比較

## 4. 掃流砂の衝突による糸状藻類の剥離モデルの構築

### 4.1 剥離モデル構築の目的

本章では、跳躍運動(サルテーション運動)する掃流砂の衝突による摩擦によってなされる仕事率の算定を行い、その値を用いて摩擦応力を定式化し、これと糸状藻類の減少率とを関連付けた剥離モデル構築について述べる。この剥離モデルにより、礫河床における掃流砂の粒径およびその量と、糸状藻類の減少率との関係を明らかにし、糸状藻類の剥離過程について検討することを目的とする。

### 4.2 掃流砂の衝突による摩擦応力と糸状藻類の強熱減量の減少率との関係

サルテーション運動する掃流砂の砂礫が、糸状藻類の付着した河床に衝突し、その際に河床に対して鉛直方向に働く力に比例した摩擦力が河床に作用する。この摩擦力による仕事量が糸状藻類の剥離に寄与すると考えられる。そこで、掃流砂が河床材料に衝突する際、サルテーション運動をする掃流砂の運動エネルギーに着目し、その摩擦力による仕事量を算定し、糸状藻類の剥離に寄与する仕事率を定式化する。

石橋<sup>24)</sup>は、滑面水路において、流量およびサルテーション運動する掃流砂の粒径を系統的に変えて、水路床に作用する衝撃力を実測した。さらに、平面と球の弾性衝突理論に基づいた解析から、水路床に作用するサルテーション運動する掃流砂の総運動エネルギーから総仕事量を考案した。

サルテーション運動する掃流砂が河床材料の流下方向の長さ  $\Delta L(\text{m})$ を流下し、衝突したときの平均衝撃力の摩擦による総仕事率  $W_{si}(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ は式(4-1)で求められる。

$$W_{si} = w_s \cdot n_{si} \cdot B = 3.675 \cdot \mu_s \cdot \left( \frac{u_g}{v_y} \right) \cdot \left( \frac{f_i}{\beta_i} \right)^{5/3} \cdot \frac{\Delta L \cdot B}{L_s} \cdot \frac{q_{Bi}}{A_s d_i^3} \quad (4-1)$$

ここで、添え字  $i$  は代表粒径  $d_i$  における各々の値を示す。 $\mu_s$  : 動摩擦係数(=0.3)、 $u_g$  : 流下速度( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )、 $v_y$  : 落下速度( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )、 $f_i$  : 衝撃力(N)、 $\beta_i$  : 砂礫の性質を表す係数( $\text{N}^{2/5}\cdot\text{m}^{-3/5}$ )、 $\Delta L \times B$  : 河床材料の表面積( $\text{m}^2$ )、 $L_s$  : 跳躍距離(m)、 $q_{Bi}$  : 単位時間・単位幅当たりの掃流砂量( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ )、 $A_3 d_i^3$  : 粒子一個の体積( $\text{m}^3$ )である。

総仕事率  $W_{si}(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$  は、サルテーション運動する掃流砂が河床材料に与える仕事率であることが示された。その総仕事率による糸状藻類の剥離に着目した場合、掃流砂の衝突により河床材料に付着する糸状藻類の面積が減少すると、総仕事率の全ては、その剥離には寄与しないことが考えられる。従って、式(3-1)で定義された総仕事率  $W_{si}(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$  の一部が、糸状藻類の剥離に寄与する仕事率となる。

そこで、剥離寄与率  $\alpha_s$  を用いて、石橋<sup>24)</sup>が推定した総仕事率を定義する式(4-1)から、実質的に糸状藻類の剥離に寄与した掃流砂の衝突によりなされる仕事率  $W_i(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$  を式(4-2)で与える。

$$W_i = \alpha_s \cdot W_{si} = \alpha_s \cdot 3.675 \cdot \mu_s \cdot \left( \frac{u_g}{v_y} \right) \cdot \left( \frac{f_i}{\beta_i} \right)^{5/3} \cdot \Delta L \cdot B \cdot \frac{d_i}{L_s} \cdot \frac{q_{Bi}}{A_s d_i^4} \quad (4-2)$$

糸状藻類の時間減少率  $p_{si}(\text{s}^{-1})$  は式(2-3)で定義した。ここで、掃流砂が糸状藻類の付着する河床材料に弾性衝突することが考察される。つまり、この時間減少率は、サルテーション運動する掃流砂が一回衝突したときの平均衝撃力の摩擦による仕事率に対して線形性を持つことがわかる。従って、仕事率  $W_i(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$  と時間減少率  $p_{si}(\text{s}^{-1})$  の関係を式(4-3)で与える式で定式化する。

$$p_{si} = \lambda W_i \quad (4-3)$$

掃流砂の衝突によりなされる仕事率  $W_i$  とそれによる糸状藻類の時間減少率  $p_{si}$  を関係付けるパラメータ  $\lambda$  は、最小二乗法により決定される。藻類は、付着する基盤の材質や河川中の栄養塩濃度、日射量などの生育環境の条件によって種や量などの繁茂状態が異なる。その藻類の種や量によって時間減少率は特徴付けられる。従って、パラメータ  $\lambda$  は藻類の種と量の特性値である。

サルテーション運動する掃流砂のなす応力と糸状藻類の減少量の関係について定式化する。投入された土砂は、サルテーション運動をしながら糸状藻類が付着した河床に衝突する。それに起因する摩擦によってなされる仕事率  $W_i(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$  の積算値が、藻類の代表粒径  $d_i$  の減少率  $p_i$  と関連付けられる。このことから、糸状藻類の剥離に寄与する摩擦応力  $F_i(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$  を式(4-4)で定義する。

$$F_i = \frac{W_i}{q_{Bi} B} = \alpha_s \cdot 3.675 \cdot \mu_s \cdot \left( \frac{u_g}{v_y} \right) \cdot \left( \frac{f_i}{\beta_i} \right)^{5/3} \cdot \Delta L \cdot \frac{d_i}{L_s} \cdot \frac{1}{A_s d_i^4} \quad (4-4)$$

ここで、この摩擦応力と糸状藻類の減少率の関係は、ある摩擦応力において減少率が最大値に達すると、それ以上の摩擦応力は糸状藻類の減少率に寄与しない。つまり、非線形性を持つことがわかる。従って、摩擦応力  $F_i(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$  と減少率の関係を非線形関数で近似し、式(4-5)のロジスティック関数を用いて定式化する。

$$p_i = \frac{p_{i\max}}{1 + \exp(b - r \times F_i)} \quad (4-5)$$

摩擦応力  $F_i(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$  と減少率の関係を与えるロジスティック関数のパラメータ  $b$ 、 $r$  は、非線形最小二乗法により決定される。また、 $p_{i\max}$  は各河床材料における代表粒径  $d_i$  の減少率  $p_i$  の最大値である。摩擦応力  $F_i(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$  は、サルテーション運動する掃流砂と河床材料の表面の間で生じる。また、そこに繁茂する藻類の種によって、代表粒径  $d_i$  の減少率  $p_i$  は特徴付けられる。従って、パラメータ  $b$  は藻類の生育基盤である河床材料の特性値、パラメータ  $r$  は藻類種の特性値である。

投入された土砂は河床に働く掃流力  $\rho u_*^2$  を受け、跳躍しながら流下する。つまり、サルテーション運動する砂礫の実測した流下速度  $u_g$ 、落下速度  $v_y$  と跳躍距離  $L_s$  を無次元掃流力  $\tau_*$  と関連づけることとする。そこで、サルテーション運動する掃流砂の流下速度  $u_g$  と落下速度  $v_y$  の比、砂礫の衝撃力  $f_i$  と仮想重量  $w''$  の比、砂礫の跳躍距離  $L_s$  と粒径  $d_i$  の比のそれぞれを、無次元掃流力のべき乗関数で近似し、式(4-6)で与える式で定式化する。

$$\frac{u_g}{v_y} = \gamma_1 \tau_*^{\varepsilon_1}, \quad \frac{f_i}{w''} = \gamma_2 \tau_*^{\varepsilon_2}, \quad \frac{L_s}{d_i} = \gamma_3 \tau_*^{\varepsilon_3} \quad (4-6)$$

$$\tau_* = \frac{u_*^2}{sgd_i}$$

ここで、 $w''$  は礫の仮想重量<sup>24)</sup>(N)で、流体中の衝突時に排除した流体の質量が付加され、 $w'' = w + 0.8w_0$  である。 $w$  は礫の重量(N)、 $w_0$  は礫と同体積の水の重量(N)、 $u_*$  : 摩擦速度( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )、 $s$  : 土粒子の水中比重(=1.65)である。各々の比と無次元掃流力の関係を与えるパラメータ  $\gamma_j$ 、 $\varepsilon_j$  ( $j=1,2,3$ )は、最小二乗法により決定される。

### 4.3 礫河床における摩擦応力と減少率の関係の定式化

#### 4.3.1 実験で得たパラメータと無次元掃流力の関係の定式化

河床材料に河川から採取した礫を用いた場合の、サルテーション運動する掃流砂の流下速度  $u_g$  と落下速度  $v_y$  の比、砂礫の衝撃力  $f_i$  と仮想重量  $w''$  の比、砂礫の跳躍距離  $L_s$  と粒径  $d_i$  の比のそれぞれと、無次元掃流力との関係を式(4-6)により求め、それらの関係を式(4-7)に示す。ここでは、サルテーション運動していなかったケース I-1 を除いて定式化した。

$$\frac{u_g}{v_y} = 5.4\tau_*^{0.2}, \quad \frac{f_i}{w''} = 2.3 \times 10^4 \tau_*^{0.9}, \quad \frac{L_s}{d_i} = 3.6 \times 10^2 \tau_*^{1.0} \quad (4-7)$$

#### 4.3.2 仕事率と時間減少率の関係の定式化の結果および考察

式(4-7)に示した値を仕事率  $W_i(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$  の式に代入し、最小二乗法によりパラメータ  $\lambda$  を決定し、時間減少率  $p_{si}(\text{s}^{-1})$  との関係を示し、これをサルテーション運動する掃流砂の衝突による糸状藻類の剥離に関する剥離モデルとする。

$$W_i = 4.4 \times 10^2 \alpha_s u_*^{1.4} q_{Bi} d_i^{-0.03} \quad (4-8)$$

$$p_{si} = 0.30 \cdot W_i$$

ここで、 $\alpha_s$  : 剥離寄与率、 $u_*$  : 摩擦速度( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )、 $q_{Bi}$  : 単位時間・単位幅当たりの掃流砂量( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ )、 $d_i$  : 砂礫の粒径であり実験における代表粒径である。式(4-8)に示される仕事率  $W_i(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$  と時間減少率  $p_{si}(\text{s}^{-1})$  の値を表 4-1 に示す。表より、摩擦応力  $F_i(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$  の値と底面せん断力  $\tau_0(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$  の値を比較すると、全ケースにおいて、前者が後者より 3~6 倍大きいことが示された。

河床材料として用いた礫上を流下する掃流砂の衝突による糸状藻類への仕事率は、流砂量  $q_{Bi}$  に比例し、摩擦速度  $u_*$  に対する増加関数、砂礫の粒径  $d_i$  に依存しないことがわかる。この関係式から、摩擦速度  $u_*$  の値が設定された場合において、仕事率を増加させたい場合、投入する砂礫の流砂量を増やすことが効果的であることが言える。また、パラメータ  $\lambda$  に関して、礫に繁茂した藻類は糸状体の緑藻類アオミドロ属のみであり、その特性値として 0.30 と求められた。

仕事率  $W_i(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$  と時間減少率  $p_{si}(\text{s}^{-1})$  の関係を図 4-1 に示す。この図から、仕事率と時間減少率の相関係数は 0.80 であり、両者の間には線形関係が認められる。本実験において、粒径 10.4mm を用いたケース II-2 の仕事率の値、 $7.4\times 10^{-4}\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  において、時間減少率が最大値となった。

表4-1. サルテーション砂礫による摩擦応力と糸状藻類の減少率

	ケース I-1	ケース I-2	ケース II-1	ケース II-2	ケース III-1	ケース III-2	ケース IV-1
$d_i$ (mm)	5.2	5.2	10.4	10.4	17.5	17.5	31.8
$\tau_0$ (Nm <sup>-2</sup> )	2.7	5.2	5.2	8.5	5.2	8.5	5.2
減少率 $p_i$	0	0.99	1.00	1.00	0.88	0.71	0.90
時間減少率 $p_{si}(\text{10}^{-4}\text{s}^{-1})$	0	1.4	1.4	1.9	1.2	1.3	1.3
仕事率 $W_i(\text{10}^{-4}\text{Nms}^{-1})$	0	3.5	3.4	7.4	3.4	5.2	2.0
摩擦応力 $F_i(\text{Nm}^{-2})$	0	23.4	23.3	50.7	22.7	34.6	16.8

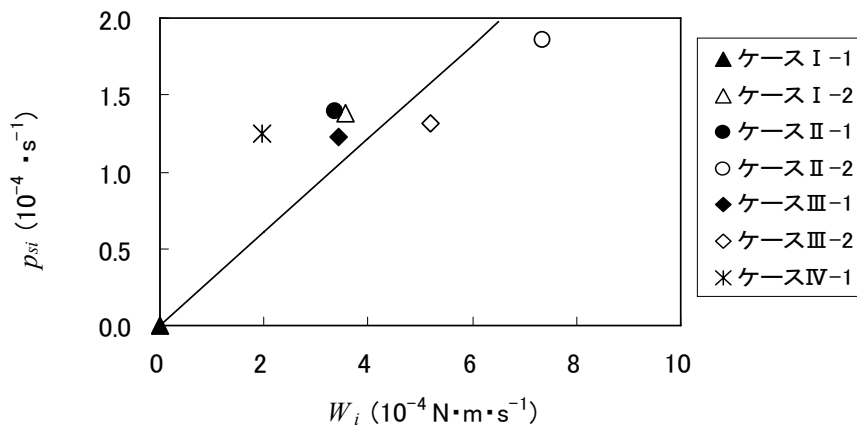


図4-1. 仕事率  $W_i$  ( $\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) と時間減少率  $p_{si}$  ( $\text{s}^{-1}$ ) の関係

#### 4.3.3 摩擦応力と減少率の関係の定式化の結果および考察

式(4-7)で示した値を摩擦応力  $F_i(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$  の式に代入し、最小二乗法によってパラメータ  $b$  と  $r$  を決定した減少率  $p_i$  との関係を表(4-9)に示す。

$$F_i = 2.2 \times 10^3 \alpha_s u_*^{1.4} d_i^{-0.03}$$

$$p_i = \frac{1.0}{1 + \exp(3.6 - 0.34 \times F_i)} \quad (4-9)$$

この式に示される摩擦応力  $F_i(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$  と減少率  $p_i$  の値を表 4-1 に示した。

摩擦応力  $F_i(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$  と減少率  $p_i$  の関係を図 4-2 に示す。この図から、摩擦応力と減少率の相関係数は 0.89 であり、礫の河床材料の特性値  $b$  は 3.6、緑藻類アオミドロ属の種の特性値  $r$  は 0.34 と求められた。摩擦応力が  $23.3\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$  (ケース II-1) において減少率が最大値に達し、ケース III-2 において減少率  $p_i$  は 0.71 と低下した。また、時間減少率  $p_{si}(\text{s}^{-1})$  が最大値を示したケース II-2 の摩擦応力は、減少率が最大値に

達したその2.2倍であった。つまり、ケースII-2の摩擦応力の約半分は、糸状藻類の剥離に寄与していないことがわかる。以上から、河床材料に礫を用いた場合、それに繁茂する糸状藻類の剥離に対して適切な粒径と投入量は、摩擦応力が  $23.3\text{Nm}^{-2}$  となるように設定されるべきである。

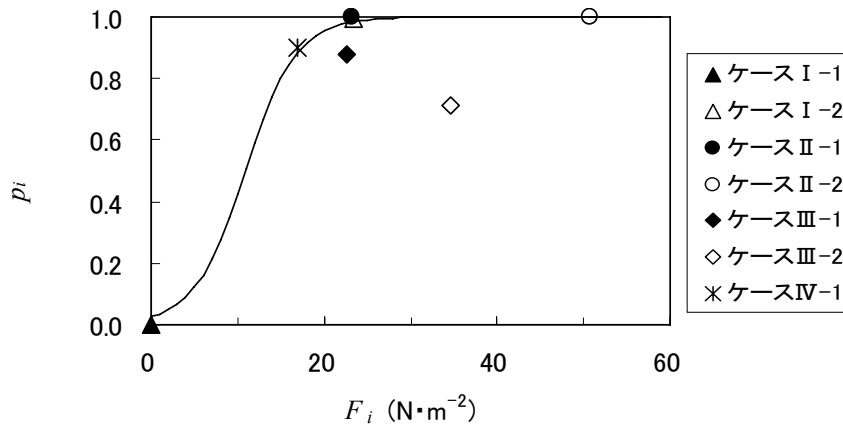


図4-2. 摩擦応力  $F_i$  ( $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ ) と減少率  $p_i$  の関係

#### 4.4 観測地点における剥離モデルの適用と評価

##### 4.4.1 観測地点 A(愛川大橋)における掃流砂量の推定

河床材料として用いた礫上を流下する掃流砂の衝突による糸状藻類への仕事率は、式(4-8)より、流砂量  $q_{Bi}$  に比例し、摩擦速度  $u_*$  の増加関数、砂礫の粒径  $d_i$  に依存しないことが示された。そこで、仕事率  $W_i(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$  と時間減少率  $p_{s,i}(1\cdot\text{s}^{-1})$  との関係を表した式(4-8)を用いて、地点 A(愛川大橋)における糸状藻類の減少率を推定する。

地点 A(愛川大橋)において観測したダムからの放流量と観測した摩擦速度は図 3-4 に示された。地点 A において、トラップ箱を用いて捕捉した掃流砂のうち、粒径が 64mm 以下の土砂に関して、粒径別の掃流砂量の推定を行う。

掃流砂量は芦田・道上<sup>35)</sup>による式(4-10)で推定する。

$$\frac{q_{Bi}}{\sqrt{sgd_i^3}} = i_b 17 \tau_{*ei}^{3/2} \left( 1 - \frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*i}} \right) \left( 1 - \frac{u_{*ci}}{u_*} \right) \quad (4-10)$$

ここに、 $d_i$  は砂礫の粒径(m)、 $q_{Bi}$  は粒径別の単位時間・単位幅当たりの掃流砂量( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ )、 $s$  は土粒子の水中比重(=1.65)、 $i_b$  は砂礫  $d_i$  が河床に占める割合、 $\tau_{*ei}$  は粒径別の無次元有効掃流力、 $\tau_{*ci}$  は粒径別の無次元限界掃流力、 $\tau_{*i}$  は粒径別の無次元掃流力、 $u_{*ci}$  は粒径別の限界摩擦速度( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )、 $u_*$  は摩擦速度( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )である。粒径別の無次元掃流力を式(4-11)、式(4-12)で与える。

$$\frac{d_i}{d_m} > 0.4: \quad \frac{\tau_{ci}}{\tau_{cm}} = \left\{ \frac{\log_{10} 19}{\log_{10} 19(d_i/d_m)} \right\}^2 \cdot \left( \frac{d_i}{d_m} \right) \quad (4-11)$$

$$\frac{d_i}{d_m} \leq 0.4: \quad \frac{\tau_{ci}}{\tau_{cm}} = 0.85 \quad (4-12)$$

ここに、 $\tau_{ci} = \rho u_{*ci}^2$ 、 $\tau_{cm} = \rho u_{*cm}^2$  である。また、 $d_m$  は河床砂礫の平均粒径(m)である。河床砂礫の平均粒径に対する限界摩擦速度を式(4-13)で与える。

$$\frac{\tau_{cm}}{sgd_m} = 0.05 \quad (4-13)$$

$u_{*e}=u_*$ として掃流砂量を算定した結果を表 4-2 に示す。これより、粒径別に掃流砂量の実測値と推定値を比較すると、推定値が約 1000 倍多く推定されている。桑村ら<sup>29)</sup>は、河床粒径が一様で、採砂された掃流砂の粒径と河床の粒径が等しい場合において掃流砂の実測値と推定値を比較した。その結果、掃流砂量の推定値は実測値に比べ  $10^1\sim 10^3$  多く計算されたと報告されている。その原因として、実際の河川の河床の粒径範囲の広い混合粒径で構成されており、粗粒の遮蔽効果も大きく、理論上は移動可能な粒径であっても河床に束縛されていることなどを挙げている。従って、地点 A(愛川大橋)における掃流砂量の推定に関しても同様の原因が挙げられることから、推定値のほうが  $10^3$  程度多く推定されたのではないかと考えられる。一方、トラップ箱で実測した掃流砂量は、トラップ箱による土砂移動の阻害や空間的ばらつきなどを考慮すると、実際の掃流砂量を表すものでは必ずしもない。これらのことから、実測値と推定値に大きな差が生じたと考えられる。

表4-2. 掃流砂量の推定値と観測地点A(愛川大橋)においてトラップ箱で捕捉した掃流砂量の比較

代表粒径 $d_i$ (mm)	実測した 掃流砂量 ( $10^{-4}\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$ )	推定した 掃流砂量 $Q_{Bi}$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$ )	代表粒径 $d_i$ (mm)	実測した 掃流砂量 ( $10^{-4}\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$ )	推定した 掃流砂量 $Q_{Bi}$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$ )
1.5	0.40	0.08	17.5	3.56	0.21
3.4	0.82	0.11	22.8	10.4	0.71
5.2	0.26	0.03	31.8	12.8	0.85
7.6	0.96	0.11	45.0	5.74	1.12
10.4	0.50	0.07	64.0	3.56	0.97
13.6	2.70	0.22			

掃流砂量の合計値 ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$ )	
実測値	推定値
$4.2 \times 10^{-3}$	4.5

#### 4.4.2 観測地点 A(愛川大橋)における減少率の推定

ここでは、前項で述べた掃流砂量を用いて観測地点とした地点 A(愛川大橋)における糸状藻類の減少率を推定する。掃流砂量として、前項で示した式(4-10)による推定値を用いることとする。

河床材料として、河川から採取してきた糸状緑藻類アオミドロ属が繁茂した礫を用いた土砂投入実験の結果より、摩擦応力  $F_i$  が  $23.3\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$  の値を超えると、その余剰分は糸状緑藻類アオミドロ属の剥離に寄与しないことを考慮する必要がある。そこで、粒径別の摩擦速度  $u_*$  の上限値を  $u_{*b}$  とし式(4-14)で与える。

$$u_{*b} = \left( \frac{23.3}{2.2 \times 10^3 \alpha_s d_i^{-0.03}} \right)^{\frac{1}{1.4}} \quad (4-14)$$

この値を超える摩擦速度  $u_*$  においては、 $u_*$  を  $u_{*b}$  で置き換え、式(4-8)に示した仕事率  $W_i$ 、および時間減少率  $p_{si}(1 \cdot s^{-1})$  を算定する。

掃流砂の粒径区分 1.5mm~64mm による粒径別の減少率  $p_i$  は、式(4-15)において、粒径別の時間減少率  $p_{si}(1 \cdot s^{-1})$  を放流継続時間  $t_s (=36000\text{sec})$  で積算し求める。

$$p_i = \sum_{t=t_0}^{t=t_s} p_{si} \quad (4-15)$$

さらに、粒径別の減少率  $p_i$  を粒径区分 1.5mm~64mm において足し合わせて、糸状緑藻類アオミドロ属の減少率  $p$  を式(4-16)において推定する。

$$p = \sum_{i=1}^{i=n_s} p_i \quad (4-16)$$

ここで、添え字  $i$  は代表粒径  $d_i$  における各々の値を示す。地点 A(愛川大橋)において、式(4-16)の掃流砂の砂礫の個数  $n_s$  は、粒径区分 1.5mm~64mm の 11 個となる。式(4-16)を用いて推定した掃流砂の粒径別の減少率およびその合計値を表 4-3 に示す。表より、推定した掃流砂量に対する減少率は 0.11 となった。一方、観測によって算定された糸状藻類の減少率は 0.23 であった。従って、式(4-16)を用いて算定した地点 A(愛川大橋)における減少率  $p$  は、実際の減少率と比較して 2 倍程度、過小評価する結果となった。このような結果となった要因として、河床における掃流砂の跳躍運動の動態が、水路と河川では異なり、それに対応する藻類の剥離過程も異なったことが考えられる。実河川における河床形状は、水路実験のような平坦河床ではなく、水路実験の場合と比較して跳躍距離は短くなるので、砂礫の衝突頻度は増大し、その結果、減少率も本推定値より増大することが予想される。しかしながら、現段階のモデルでは、平坦河床のみを想定しているため、平坦河床ではない場所への適用を考慮した改良が今後、必要である。

表4-3. 掃流砂量の推定値と糸状藻類の減少率

代表粒径 $d_i$ (mm)	推定した 掃流砂量 $Q_{Bi}$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$ )	減少率 $p_i$	代表粒径 $d_i$ (mm)	推定した 掃流砂量 $Q_{Bi}$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$ )	減少率 $p_i$
1.5	0.08	0.002	17.5	0.21	0.005
3.4	0.11	0.003	22.8	0.71	0.017
5.2	0.03	0.001	31.8	0.85	0.020
7.6	0.11	0.003	45	1.12	0.026
10.4	0.07	0.002	64	0.97	0.023
13.6	0.22	0.005	合計値		
			推定した 掃流砂量 $Q_{Bi}$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$ )		減少率 $p$
			4.5		0.11

## 5. 剥離モデルを適用したフラッシュ放流時の土砂投入量の解析

### 5.1 解析の目的

本章では、掃流砂の衝突とそれによる糸状藻類の減少率とを関連付けた剥離モデルをフラッシュ放流時のダム下流の礫河床に適用し、糸状藻類の剥離に必要な混合砂礫の掃流砂の粒径や量を解析した結果について述べる。剥離モデルと現地観測で得たデータをもとに、礫河床に付着する全ての糸状藻類の剥離に必要な追加掃流砂量としての土砂の粒径と投入量を推定することを試みる。これは、糸状藻類の剥離を目的とした置き砂と捉えることができる。

さらに、他のダム下流の河川で実施された、フラッシュ放流に土砂投入を組み合わせた事例と、剥離モデルを用いて推定した投入土砂の粒径および量を比較し評価する。

### 5.2 解析条件

剥離寄与率  $\alpha_s$  の値を式(5-2)で与える。

$$\alpha_s = \frac{1}{2t_s} \sum_{j=0}^{j=s+1} (A_j + A_{j-1})(t_j - t_{j-1}) \cong \frac{A_0 + A_s}{2t_s} \cong \frac{1 + A_s/A_0}{2} \quad (5-2)$$

ここに、添え字  $j(=0,1,2,\dots,s)$  は時間を表す。 $A_j$  は付着率であり、ある経過時間  $t_j$  における糸状藻類の付着面積  $a_j$  より算定される。 $t_0$  は放流開始( $t_0=0$ )、 $t_s$  は放流終了時( $t_s=36000\text{sec}$ )を示す。剥離モデルによる土砂投入量の推定においては 0.50 と設定する。

### 5.3 剥離モデルによる土砂投入量の推定

#### 5.3.1 単一粒径の土砂による投入量の推定結果

礫河床に付着するアオミドロ属の減少率を 1.0 に設定する。観測地点 A(愛川大橋)において、計測された減少率 0.23 から、残りの 0.77 を得るために必要な単一粒径による土砂投入量  $q_{Ri}(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$  を式(5-3)によって推定する。

$$0.77 = \sum_{t=t_0}^{t=t_s} 0.30 \times 4.4 \times 10^2 \times 0.5 \times u_*^{1.4} q_{Ri} d_i^{-0.03} \quad (5-3)$$

投入土砂量推定は芦田・道上式<sup>28)</sup>を用いる。単一粒径の投入土砂の粒径は、地点 A(愛川大橋)において、捕捉した掃流砂のうち、粒径が 64mm 以下の土砂に関して掃流砂量の推定を行う。

粒径別に推定した単位幅当たりの投入量  $Q_{Ri}(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1})$  の推定値を表 5-1 に示す。剥離モデルにより、掃流砂の衝突による糸状藻類の減少率は、掃流砂の粒径に依存しないため、粒径別の投入量  $Q_{Ri}(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1})$  においてほとんど差は無いことが示された。

最も少ない投入量である粒径 1.5mm~5.2mm に対する粒径別の投入量  $Q_{Ri}(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1})$  の値  $32.74\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$  となり、この値を河川全幅(=25.3m)に対して換算すると、投入量は  $828\text{m}^3$  と推定された。前章で述べたように、糸状藻類の減少率の推定値(0.11)は実測値(0.23)の 50%程度だったので、ここで得られた投入量を約 2.1 倍する必要がある。従って、観測地点 A(愛川大橋)において、土砂投入をしないフラッシュ放



流で得られた減少率の 23%以外の糸状藻類 77%を減少させるためには、単一粒径の土砂を投入した場合、投入量は 1739m<sup>3</sup>が必要であると推定される。

表5-1. 掃流砂量の推定値と投入量の推定値の比較

代表粒径 $d_i$ (mm)	推定した 掃流砂量 $Q_{Bi}$ (m <sup>3</sup> ・m <sup>-1</sup> )	減少率 $p_i$	代表粒径 $d_i$ (mm)	推定した 投入量 $Q_{Ri}$ (m <sup>3</sup> ・m <sup>-1</sup> )	減少率 $p_i$
1.5	0.08	0.002	1.5	32.74	0.77
3.4	0.11	0.003	3.4	32.74	0.77
5.2	0.03	0.001	5.2	32.74	0.77
7.6	0.11	0.003	7.6	32.76	0.77
10.4	0.07	0.002	10.4	32.76	0.77
13.6	0.22	0.005	13.6	32.76	0.77
17.5	0.21	0.005	17.5	32.76	0.77
22.8	0.71	0.017	22.8	32.78	0.77
31.8	0.85	0.020	31.8	32.78	0.77
45	1.12	0.026	45	32.80	0.77
64	0.97	0.023	64	32.80	0.77

合計値

推定した 掃流砂量 $Q_{Bi}$ (m <sup>3</sup> ・m <sup>-1</sup> )	減少率 $p$
4.5	0.11

5.3.2 混合粒径の土砂による投入量の推定結果

単一粒径による土砂投入量の推定と同様に、混合粒径の土砂投入に必要な投入量は式(5-4)を用いて推定される。

$$0.77 = \sum_{t=t_0}^{t=t_s} \sum_{i=1}^{i=11} 0.30 \times 4.4 \times 10^2 \times 0.5 \times u_*^{1.4} q_{ri} d_i^{-0.03} \quad (5-4)$$

ここで、 $q_{ri}$ は粒径  $d_i$ の単位時間・単位幅当たりの投入量(m<sup>3</sup>・s<sup>-1</sup>・m<sup>-1</sup>)である。

推定する投入量に対する粒径区分を単一土砂の投入土砂の粒径区分と同様の、1.5mm～64mm と設定し、その中央粒径が 10.4mm となるように粒径別占有比を式(5-5)で定義する、粒径  $d_i$ 以下の粒径別占有比の累積値を用いて与える。

$$r = \frac{1}{1 + \exp(5.6 - 5.5 \cdot \log(d_i))} \times 100 \quad (\%) \quad (5-5)$$

ここで、礫を河床材料として用いた掃流砂による糸状藻類の強制剥離に関する水路実験より、粒径 10.4mm において糸状藻類の減少率の時間変化率が高かった。そこで、中央粒径を 10.4mm と設定した。

表5-2. 掃流砂量の推定値と投入量の推定値の比較

代表粒径 $d_i$ (mm)	推定した 掃流砂量 $Q_{Bi}$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$ )	減少率 $p_i$	代表粒径 $d_i$ (mm)	推定した 投入量 $Q_{Ri}$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$ )	減少率 $p_i$
1.5	0.08	0.002	1.5	0.20	0.007
3.4	0.11	0.003	3.4	1.17	0.043
5.2	0.03	0.001	5.2	2.05	0.075
7.6	0.11	0.003	7.6	3.47	0.126
10.4	0.07	0.002	10.4	3.87	0.141
13.6	0.22	0.005	13.6	3.35	0.122
17.5	0.21	0.005	17.5	2.61	0.095
22.8	0.71	0.017	22.8	1.95	0.071
31.8	0.85	0.020	31.8	1.46	0.053
45	1.12	0.026	45	0.75	0.027
64	0.97	0.023	64	0.35	0.013

合計値

推定した 掃流砂量 $Q_{Bi}$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$ )	減少率 $p$
4.5	0.11

合計値

推定した 掃流砂量 $Q_{Bi}$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$ )	減少率 $p$
21.25	0.77

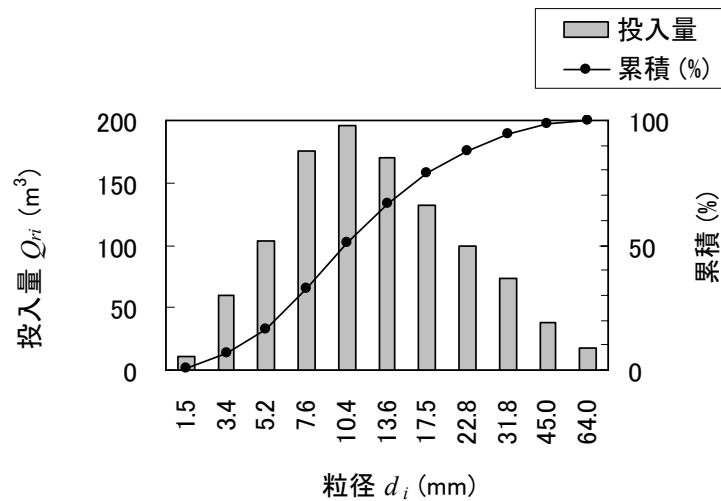


図5-1. 混合粒径による投入土砂の粒度分布

粒径別に推定した単位幅当たりの投入量  $Q_{Ri}$  ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$ ) を表 5-2 に示す。この結果より、混合粒径 1.5mm ~64mm の全投入量は  $21.25 \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$  と推定された。この値を河川全幅(=25.3m)に対して換算すると、追加

すべき掃流砂量は  $538\text{m}^3$  と推定された。前章で述べたように、糸状藻類の減少率の推定値(0.11)は実測値(0.23)の 50%程度だったので、ここで得られた投入量を約 2.1 倍する必要がある。従って、観測地点 A(愛川大橋)において、土砂投入をしないフラッシュ放流で得られた減少率の 23%以外の糸状藻類 77%を減少させるためには、中央粒径  $10.4\text{mm}$  および粒径区分  $1.5\text{mm}\sim 64\text{mm}$  の混合粒径の土砂を投入した場合、投入量は  $1130\text{m}^3$  が必要であると推定される。混合砂礫の投入量を粒径別に図 5-1 に示す。

観測地点 A(愛川大橋)から下流  $10\text{km}$  の地点において、平成 10 年 3 月に神奈川県相模川総合整備事務所が実際に置き砂による土砂投入<sup>30)</sup>を実施した。その際の  $2050\text{m}^3$  の土砂が投入された。この先行事例と推定投入量を比較すると、 $1130\text{m}^3$  は実現可能な投入量であることが言える。

#### 5.4 土砂投入量の推定値と他のダム下流における土砂投入事例との比較

国土交通省近畿地方整備局が管理する真名川ダム下流(福井県九頭竜川水系真名川)において土砂還元を組み合わせたダム弾力的管理試験<sup>18)</sup>が平成 16 年 11 月 15 日に実施された。投入土砂の粒度分布および粒径別投入量を図 5-2 に示す。図より、投入土砂の中央粒径は  $10.0\text{mm}$  であり、粒径区分は  $0.1\text{mm}\sim 40.0\text{mm}$  の全投入量は  $220\text{m}^3$  であった。投入地点はダム下流約  $5.5\text{km}$  の地点であり、投入土砂は側岸に設置された。フラッシュ放流はピーク放流量  $50\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 、ピーク継続時間 3 時間にて実施された。土砂設置箇所の上流において、付着藻類の調査が実施された。

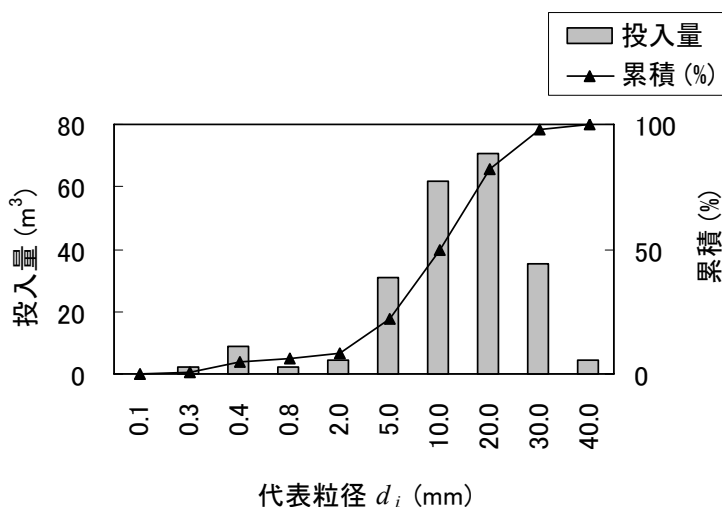


図5-2. 投入土砂の粒度分布(真名川における事例)

河床の礫を 10 個採取し、各礫の表面に付着する藻類に対し、 $10\text{cm}\times 10\text{cm}$  の区画を剥ぎ取り後、河床に再び設置し、放流後にも同様に剥ぎ取りその減少量が調査された。付着藻類種に関する記述はされていない。放流前後における付着藻類の乾燥重量、強熱残量および強熱減量の重量減少率を表 5-3 に示した。表 5-3 より、投入土砂の有無と付着藻類の重量減少率を比較する。乾燥重量の重量減少率は、土砂を投入することで 22%減少している。一方で、強熱減量の重量減少率は、土砂を投入することでわずか 4%しか減少していない。これと、図 5-2 の粒度分布を有する土砂投入量  $220\text{m}^3$  を比較すると、投入された土砂は河床に攪乱を与えたが、付着藻類を減少させるには至らなかったことが示唆される。この結果を本研究で推定した中央粒径  $10.4\text{mm}$  を有する図 5-1 の粒度分布を持ち、その混合粒径の土砂による投入量  $1130\text{m}^3$  と推定された値と比較すると、真名川ダム下流において土砂投入量を増加させることで更

なる付着藻類の剥離が期待される。そこで、真名川ダムの放流量と土砂投入地点の下流の観測データを用いて、付着藻類種が糸状藻類である前提で、投入土砂量を推定し、実際に投入された量  $220\text{m}^3$  と比較する。

また、表 5-4 より、土砂投入地点より上流の減少率は 0.24 であった。そこで、残りの全ての付着藻類を剥離させるために必要な土砂投入量を式(5-6)を用いて算定し、土砂投入によって投入する土砂を混合粒径とする単位幅当たりの投入量  $Q_i(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1})$  を推定する。

$$0.76 = \sum_{t=t_0}^{t=t_s} \sum_{i=1}^{i=10} 0.30 \times 4.4 \times 10^2 \times 0.5 \times u_*^{1.4} q_{ri} d_i^{-0.03} \quad (5-6)$$

ここで、 $q_{ri}$  は粒径  $d_i$  の単位時間・単位幅当たりの投入量 ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ) である。この式において、摩擦速度  $u_*$  を図 5-3 に示す土砂投入地点の下流の水位データを用いて算出する。

粒径別に推定した単位幅当たりの投入量  $Q_{ri}(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1})$  の推定値を河川全幅 (=20m) に対して換算した値を図 5-4 に示す。この結果より、中央粒径 10.0mm に対する投入量の値は  $411\text{m}^3$  と推定された。また、混合粒径 0.1mm~40.0mm の全投入量は  $1098\text{m}^3$  と推定された。つまり、投入土砂による河床の付着藻類の減少率に着目すると、 $220\text{m}^3$  の投入量でわずか 4% しか減少していなかった藻類を、投入量を 5 倍の  $1098\text{m}^3$  にすることで、残りの全ての付着藻類量の 76% を減少可能であると推定された。従って、中央粒径 10.0mm、粒度区分 0.1mm~40.0mm を持つ土砂を投入することで、真名川ダム下流の礫河床を有する河床の付着藻類を全て剥離させるために必要な混合砂礫によって構成される掃流砂の量は  $1098\text{m}^3$  である。

表5-3. 真名川ダム下流の土砂投入地点上下流における付着藻類の減少率の比較

		土砂投入地点 より上流側		土砂投入地点 より下流側	
		放流前	放流後	放流前	放流後
乾燥重量	平均 ( $\text{mgcm}^{-2}$ )	8.9	6.1	10.7	5.0
	標準偏差 ( $\text{mgcm}^{-2}$ )	2.5	3.5	4.4	2.8
	重量減少率	0.31		0.53	
強熱残量	平均 ( $\text{mgcm}^{-2}$ )	7.0	4.7	8.9	3.7
	標準偏差 ( $\text{mgcm}^{-2}$ )	2.2	3.0	3.8	2.3
	重量減少率	0.33		0.58	
強熱減量	平均 ( $\text{mgcm}^{-2}$ )	1.9	1.4	1.8	1.3
	標準偏差 ( $\text{mgcm}^{-2}$ )	0.7	0.9	0.7	0.7
	重量減少率	0.24		0.28	

$$\text{重量減少率} = \frac{(\text{放流前の平均値}) - (\text{放流後の平均値})}{\text{放流前の平均値}}$$

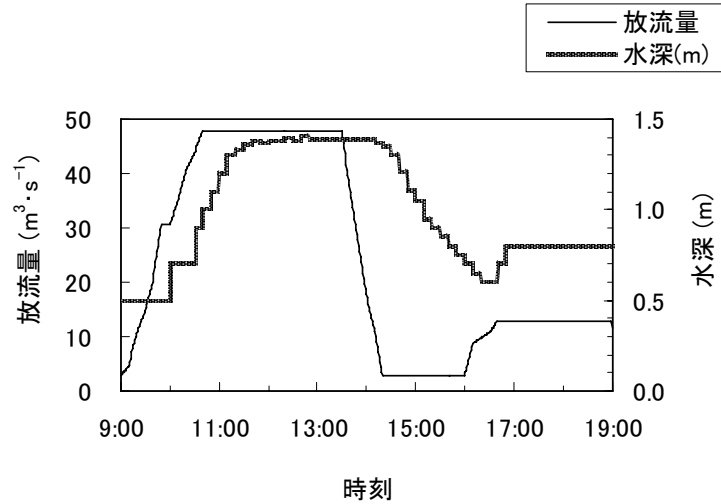


図5-3. 真名川ダムからの放流量と土砂投入地点下流の水深

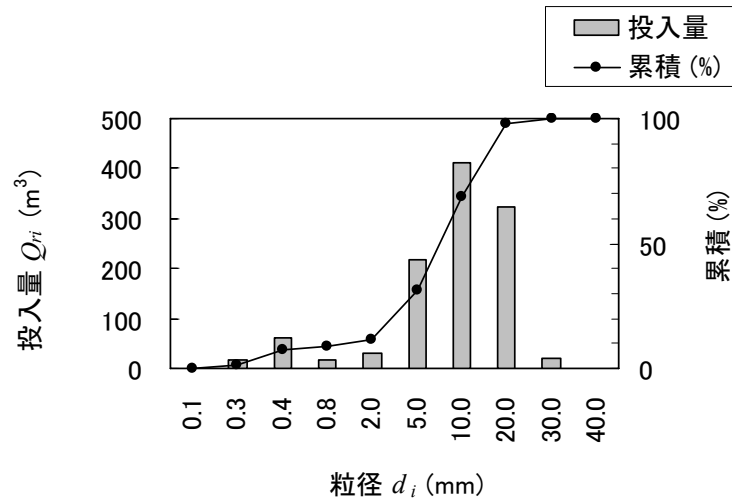


図5-4. 真名川における投入土砂の粒度分布の推定値

## 6. 結論および今後の課題

### 6.1 結論

河川の上流に治水や利水などを目的としてダムが建設されることにより、河川の縦断方向の流れや生物の移動の連続性が遮断される。そのダムにより、河川内の土砂の輸送形態も変化し、上流域で出水とともに運ばれた土砂はダムによってその流れが遮断される。一方、その下流において流況の平滑化や流送土砂量が減少し、結果として河道が安定化し、河床の粗粒化が顕著となる。これによって、河川の生態系に悪影響を及ぼし、特に、食物連鎖の生産者である河床の付着藻類の種や量に変質している。つま

り、河床が粗粒化した礫河床において、糸状体を形成する藻類が優占種となる。

本研究は、この糸状藻類をダムからのフラッシュ放流による増水時に流送される掃流砂の衝突によって剥離させることに着眼し、掃流砂の衝突による糸状藻類の剥離に必要な掃流砂の粒径とその量を定量的に評価することを目的とした。具体的には、水路実験、現地観測を実施し、剥離モデルの構築と土砂投入量の解析を実施した。以下に本研究にて得られた知見を示す。

- ・ 礫河床における掃流砂による糸状藻類の強制剥離に関する水路実験

水路実験は、河床材料を河川から採取した礫とし、土砂の粒径を系統的に変えた土砂投入実験を実施した。河川から採取した礫に繁茂していた藻類は糸状体の緑藻類アオミドロ属のみであった。その礫河床において、掃流砂の衝突による糸状藻類の減少率ならびに時間減少率の最大値を得たケースは、投入した土砂の粒径が 10.4mm であった。

- ・ ダム下流の礫河床におけるフラッシュ放流の観測

現地観測は、神奈川県相模川水系中津川に位置する宮ヶ瀬ダム下流の礫河床において、ダムからのフラッシュ放流に伴う掃流砂の粒径やその量と、それによる河床付着藻類の減少量の調査を実施した。放流口から 2.0km 下流の愛川大橋においては、糸状体の緑藻類が繁茂していた。放流に伴う、混合粒径 1.5mm~120mm の単位幅当たりの掃流砂量は  $6.4 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$  であり、フラッシュ前後の河床に付着した糸状藻類の強熱減量の減少率は 0.23 となった。

- ・ 掃流砂の衝突による糸状藻類の剥離モデルの構築

剥離モデルは、水路実験から得たサルテーション運動する掃流砂の衝突による摩擦によってなされる仕事率を定式化し、これと糸状藻類の時間減少率とを関連付けて構築した。両者の関係を結びつける糸状緑藻類の種と量の特性値  $\lambda$  は、河床材料に礫河床を用いた場合、0.30 となった。また、糸状藻類の時間減少率は、粒径別の単位時間・単位幅当たりの掃流砂量に比例し、摩擦速度の増加関数そして粒径の減少関数で示された。本モデルをフラッシュ放流の観測値を用いて検証した結果、糸状藻類の減少率の推定値(0.11)は実測値(0.23)の 50%程度だった。

- ・ 剥離モデルを適用したフラッシュ放流時の土砂投入量の解析

剥離モデルをフラッシュ放流時のダム下流の礫河床に適用し、全ての糸状藻類の剥離に必要な混合砂礫の掃流砂の粒径や量を試算した。その結果、単一粒径(1.5mm、3.4mm、5.2mm)の土砂を投入する場合、追加掃流砂量としての土砂投入量は  $1739 \text{ m}^3$  と推定され、混合粒径(1.5mm~64mm、中央粒径 10.4mm)の土砂を投入する場合、投入量は  $1130 \text{ m}^3$  と推定された。

## 6.2 今後の課題

本研究では、掃流砂の粒径や量と糸状藻類の減少量との関係を定式化し、糸状藻類の剥離に必要な掃流砂の粒径とその量を定量的に評価した。投入した土砂による河床形態や付着藻類の繁茂状態に関する継続調査(フォローアップ調査)、およびフラッシュ放流のピーク流量や継続時間などの手法の確立を含め、以下にダム下流の河床付着藻類の剥離・更新機構に関する研究の今後の課題を示す。

- ・ 土砂投入後のフォローアップ調査

推定した投入すべき土砂の粒度分布やその投入量を、実際にフラッシュ放流の実施時期に合わせて投入し、それによる影響を継続的に調査する必要がある。そして、推定した投入土砂の粒度分布や量に関して評価することが求められる。

・土砂投入に関する解析条件の設定

本研究においては、糸状緑藻類アオミドロ属のすべて剥離に必要な、追加すべき掃流砂量である投入土砂の粒径とその量を定量化したが、掃流砂は、流れに伴うものであることから、流れ場の解析や土砂輸送の解析、ならびに地形変化を考慮したうえで、土砂投入量を定量化し、今回の数値と比較する必要がある。

・土砂投入手法とフラッシュ放流計画の提案

糸状藻類の繁茂状態の広範囲の把握し、土砂の投入場所、搬入方法、および、投入する土砂の供給元などを明らかにする必要がある。そして、ダム下流の礫河床を有する河川における、変質した河床の付着藻類の生育場の改善、すなわち河川生態系の回復に資するフラッシュ放流計画の提案を行う必要がある。

## 参考文献

- 1) 田代喬, 辻本哲郎: 河床状態の変化に着目した矢作川中流域における河道動態とそれに伴う生息場の変質—底生魚・底生動物の分布と大型糸状藻類の繁茂に関する分析—, 矢作川研究, No.7, pp.9-24, 2003.
- 2) 辻本哲郎, 北村忠紀, 加藤万貴, 田代喬: 低攪乱礫床における大型糸状藻類繁茂のシナリオ, 河川技術論文集, 第8巻, pp.67-72, 2002.
- 3) 内田朝子: 矢作川中流域におけるアユの消化管内容物, 矢作川研究, No.6, pp.5-20, 2002.
- 4) 箱石憲昭, 塚原千明: 水流による藻類の剥離に関する実験的研究, ダム技術, No.173, pp.32-41, 2001.
- 5) Honer.R.R., Welch.E.B., Seely.M.R. and Jacoby. J.M.: Responses of periphyton to changes in current velocity, suspended sediment and phosphorus concentration, Freshwater Biology No.24, pp.215-232, 1990.
- 6) 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, 2000.
- 7) 山本亮介, 松梨史郎, 下垣久: 移動粒子を伴う流れの付着藻類剥離効果, 水工学論文集, 第47巻, pp.1069-1074, 2003.
- 8) 田代喬, 渡邊慎多郎, 辻本哲郎: 掃流砂礫による付着藻類の剥離効果算定に基づいた河床攪乱作用の評価について, 水工学論文集, 第47巻, pp.1063-1068, 2003.
- 9) 田代喬, 加賀真介, 辻本哲郎: 個体群動態モデルの生息場評価手法への導入に関する基礎的研究, 水工学論文集, 第47巻, pp.1105-1110, 2003.
- 10) 大杉奉功, 浦上将人: ダムの弾力的管理による下流河道環境改善手法, 水源地環境技術研究所所報, 調査研究1-9, pp.68-77, 2002.
- 11) 田中則和, 浦上将人, 宮川勇二: 生物の生息環境改善に資するフラッシュ放流計画手法, 河川技術論文集, 第9巻, pp.103-108, 2003.
- 12) 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.
- 13) 辻本哲郎, 増田健一, 寺本敦子, 田代喬: 試験湛水時のダム下流河道の生息環境の変質とその復元のためのフラッシュの効果の評価, 河川技術に関する論文集, Vol.5, pp.81-86, 1999.
- 14) 田中蕃: 砂利投入による河床構造回復の試みとその効果, 矢作川研究, No.1, pp.175-202, 1997.

- 15) 田中蕃：砂利投入による河床構造回復の試みとその効果，矢作川研究，No.2，pp.191-223，1998.
- 16) 田中蕃：砂利投入による河床構造回復の試みとその効果，矢作川研究，No.3，pp.203-246，1999.
- 17) 田中蕃：砂利投入による河床構造回復の試みとその効果Ⅳ，矢作川研究，No.4，pp.135-141，2000.
- 18) 坂本博文，谷崎保，角哲也：河川土砂還元を組み合わせた真名川ダム弾力管理試験「フラッシュ放流」，河川技術に関する論文集，Vol.11，pp.273-278，2005.
- 19) 末木幸子，浅枝隆，藤野毅：底付近の境界層が付着藻類の生長に及ぼす影響についての実験的研究，水環境学会誌，第24巻，第6号，pp.376-381，2001.
- 20) 戸田祐嗣，赤松良久，池田駿介：平坦河床上の藻類の増殖と剥離に関する研究，水工学論文集，第45巻，pp.1111-1115，2001.
- 21) 西澤一俊，千原光雄：藻類研究法，共立出版株式会社，1979.
- 22) 野崎健太郎：矢作川中流域から採集された糸状藻類 *Cladophora glomerata* の光合成活性と水温との関係（予報），矢作川研究，No.8，pp.85-88，2004.
- 23) 土木学会編：水理公式集，土木学会，平成11年度版，pp.220-234，1999.
- 24) 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巻，pp.103-112，1983.
- 25) 沢本正樹，石谷邦治：壁面に衝突する球の仮想質量，土木学会年次学術講演会講演集 第2部，第25巻，pp.315-316，1970.
- 26) 国土交通省国土地理院：地図閲覧サービス，<http://watchizu.gsi.go.jp/>.
- 27) 福岡捷二，馬場淳，河野二夫，吉川秀夫：大粒径砂礫の掃流砂量に関する研究，水理講演会論文集，第19巻，pp.1-6，1975.
- 28) 芦田和男，道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第206号，pp.59-69，1972.
- 29) 桑村貴志，財津知亨，市川嘉輝，斉藤大作，若林英樹，原田輝雄：石狩川における流砂の計測—流砂系モニタリングのために—，砂防学会誌，Vol.54，No.5，pp.86-91，2002.
- 30) 国土交通省京浜河川事務所：相模川川づくりのための土砂環境整備検討会，第2回資料，pp.1-47，2005.