

河床の大礫に付着したコケの剥離に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON REMOVAL OF AQUATIC MOSES ATTACHED ON COBBLE

椿 涼太¹・飯嶋 洋樹²・戸田祐嗣³・田代 喬⁴

Ryota TSUBAKI, Hiroki IIJIMA, Yuji TODA and Takashi TASHIRO

¹ 正会員 名古屋大学大学院准教授 工学研究科（〒464-8603 名古屋市千種区不老町）

² 非会員 名古屋大学大学院 工学研究科（〒464-8603 名古屋市千種区不老町）

³ 正会員 名古屋大学大学院教授 工学研究科（〒464-8603 名古屋市千種区不老町）

⁴ 正会員 名古屋大学特任教授 減災連携研究センター（〒464-8601 名古屋市千種区不老町）

The growth of aquatic mosses attached to cobbles composes bed material in riffles was confirmed in a river in Japan. Covering bed material with aquatic mosses reduces the biomass of attached algae that is a source of energy for commercial fish. This study focuses on how much and how the aquatic mosses keep their coverage on the river bed in riffles after suffering flood disturbances. Resistance to disturbances due to high-speed water flow and sediment impingement on mosses and the rolling of the cobble attached with mosses was investigated by a laboratory experiment. We observed that intermediate disturbance seems to remove silt in the biofilm but the biomass of mosses had tend to be maintained. Based on visual inspection of moss cover following the experiment, we found that the remaining moss consists of short fresh stems. The relationship between the rate of moss detachment and work due to sediment impingement has investigated and the existence of the optimal work per sediment impingement has been clarified.

Key Words: Aquatic moss, gravel-bed river, riffle, moss detachment, flood disturbance

1. はじめに

礫河川の瀬で水没している大礫の表面にコケ（蘚類, Bryophyta: Musci）が繁茂していることがあり¹⁾、同じく礫表面を生息場とする付着藻類と競合する場合もみられる²⁾。コケ（蘚類）は、付着藻類と比べると大型で、葉・茎・仮根などで構成された植物体の構造をもっている。

アユの餌として、瀬の礫表面に付着した藻類が重要といわれており（例えば³⁾）、コケが繁茂することで付着藻類の繁茂が阻害され、結果としてアユの成長を妨げることが危惧される¹⁾。図-1に示すのは、瀬の河床にみられた藻類とコケに覆われた大礫の写真である。アユの食み跡は付着藻類の部分に集中しており、アユが付着藻類を選択的に摂餌していると判断できる。アユに限らず、水生動物のエネルギー源として、付着藻類はよく利用されているため、コケの繁茂域が拡大しているとすれば、河川生態への影響も想定され、河川環境管理上の懸念材料となっている。コケそのものを主要なエネルギー源とする水生動物は多くないと考えられ

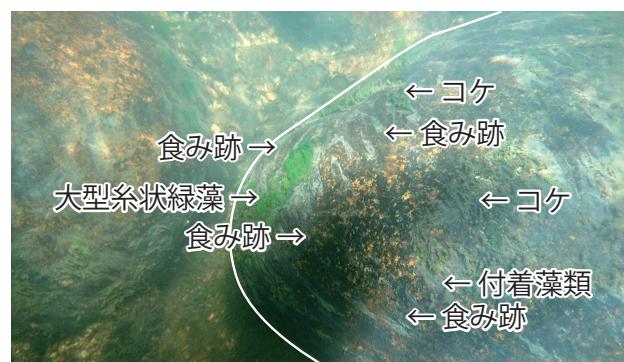


図-1 大型糸状緑藻類・付着藻類・コケが混在した河床の写真（食み跡は付着藻類の部分に見られる。白線は礫の輪郭を示す補助線である）

ているが⁴⁾、コケの比較的大きな植物体で覆われた複雑で立体的な構造は、付着藻類や水生昆虫などの生息場としての役割も果たすようであり、例えば攪乱により上下がひっくり返った大礫に付着したコケにより、水

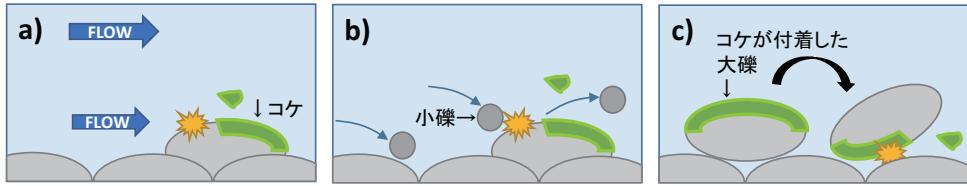


図-2 本研究で想定した出水攪乱中に生じるコケの剥離プロセスの種類 (a 高速流の衝突, b 小礫の衝突, c 大礫の転動)

生昆虫の生息密度が上昇するとの報告もある⁵⁾.

コケは付着藻類に比べると大きな構造をもっていることもあり、生活史が比較的長く¹⁾、攪乱からの回復速度も遅い。例えば、Englund⁵⁾によりスウェーデンの渓流での河床礫を上下反転させた実験では、14ヶ月後も、強熱減量が攪乱前の7割程度にとどまっていることが報告されている。白金ら¹⁾により矢作川中流の河床礫でコケ(ニブハタケナガゴケ *Ectropothecium obtusulum*)を剥離した後の回復過程の調査では、剥ぎ取りの4ヶ月後に、剥ぎ取っていない区画と同程度に被度が回復していたと報告している。いずれにしても、種構成が変化する場合もあるが3週間程度でバイオマスが回復する付着藻類^{6,7)}と比べると、コケの攪乱からのバイオマス回復は遅いといえるだろう。

水生コケは攪乱からの回復が遅く、コケの繁茂域では、付着藻類など他の生物より高い被度やバイオマス量が確認されている。このことから、河道の中で長期間にわたってコケが成長できる、移動しにくい大きめで安定した河床材料を成長基盤としている。バイオマスを保っていると考察されている⁵⁾。また、流況・あるいは場としては、瀬やステップなどの流水環境下で選択的にコケが多いことも報告されている(例えば^{1,8)}。河床材料の移動頻度の低下をもたらすアーマー化や、出水攪乱の規模や頻度を低下させる河川流の人為的管理が、コケの増加に影響している可能性も指摘されている^{1,4)}。

以上のように、コケの繁茂は河川環境管理上の懸念材料になっているものの、コケの繁茂状況に、コケが付着した大礫周辺の水流や土砂移動がどのように影響を与えるかについては、そのプロセスの検討や定量的な理解はほとんどなされていない。本研究では、コケを剥離させる可能性がある出水攪乱中に生じるプロセスとして、(1)高速流の衝突、(2)小礫の衝突、(3)コケが付着した大礫の転動、という3種類を想定して(図-2)、コケの剥離効果を室内実験により確認することとした。

2. 実験方法

本研究では、大礫に付着したニブハタケナガゴケを対象とするが、このコケは、付着藻類に比べ大型で、しっかりした植物体をもち、平水時でも流速が4 m/s程度で強い乱流が生じる瀬で成長している。したがって、コ

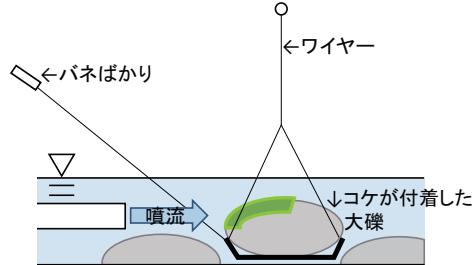


図-3 高速流衝突の実験装置の概要(スペースの関係でバネばかりの角度を斜めに示しているが、実験では水平に近い5度程で牽引している)

ケを剥離させる攪乱強度も、付着藻類に関する既往研究(例えば^{9,10)})に比べて強いことが想定されたので、開水路にくらべ大きな攪乱強度を発生させやすく攪乱条件を制御・一定化もしやすい噴流をつかって、高速流と小礫の衝突を再現することとした。

(1) 高速流の衝突実験

図-3に、高速流衝突実験の装置の概要を示す。ポンプで駆動した噴流に当たる位置に、コケが付着した大礫を水中にワイヤーで垂直にぶら下げて浮かせ、この大礫が流下しないように上流向きにひっぱるワイヤーにバネばかりを取り付けて、大礫に作用する流体力を算定した。洪水中の底面せん断応力に相当する流体力が生じるように、噴流の強度や向きを調整した。洪水中の底面せん断応力は、コケを採取した河道区間の平均年最大流量を念頭に、水深5m、勾配1/500として $\tau = 98 \text{ N m}^{-2}$ と見積もり、礫の長さを0.15mとみなし、面積を 0.018 m^2 と算定して、流体力は $98 \times 0.018 = 1.7 \text{ N}$ 程度と見積もった。15分で一度剥離状況を確認・分析し、30分で実験終了とした。

(2) 小礫の衝突実験

噴流を生じさせる管路の上流部にベンチュリー管式の狭窄部を設け、その区間の上部に吸い込み口をつくり、そこから小礫を供給し、噴流に乗せてコケに衝突させた(図-4)。小礫の代表径 D が5, 10, 15 mmの大きさの碎石を用いた。小礫の供給速度は $0.02 \sim 0.05 \text{ kg s}^{-1}$ 程度とした。衝突流の代表流速 U は $0.5, 1, 1.5, 2 \text{ m s}^{-1}$ とし、電磁流速計で流速を確認しながら噴流の流量

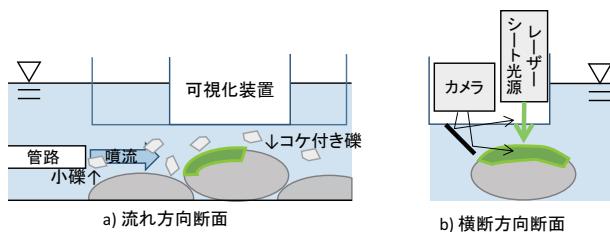


図-4 小礫衝突の実験装置の概要

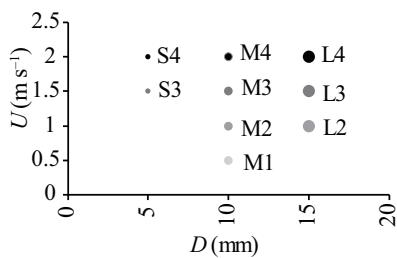


図-5 小礫衝突実験のケース

を設定した。レーザーシート光源を利用した可視化計測により小礫の衝突角度・速度を実測し、衝突個数は一粒子の平均質量と投入質量から算定した。小礫の衝突速度は、代表流速の95~99%であることを確認した。図-5に、実施したケースの D と U の関係をプロットして示す。

(3) 大礫の転動実験

コケの付着基盤の転動による剥離については、小川ら¹¹⁾の方法にならい、大礫を瓦状になるように配置して水没させ、その上で、コケが付着した大礫を手で一定距離、 0.1 m s^{-1} 程度の速度で転動させた。剥離箇所が分散するよう、移動の経路や回転方向はランダムになるように大礫を転動させた。

(4) コケの剥離状況の観察と定量化

各種搅乱によるコケ剥離の影響は、被度・バイオマス・組織構造・種構成など、様々な側面におよぶ。河床をどの程度コケが覆っているかという観点では被度が適する¹⁾が、本研究での検討対象であるコケは直立茎の他に仮根（匍匐茎）もある立体的な繁茂形態をとり、厚さや密度といった被度の変化のみではとらえられない変化も起きる。このような場合には、バイオマスの変化も併せて確認することが有効である。バイオマスの計測手法として、剥ぎ取りによる採取があり、直接質量計測したり、様々な温度での乾燥や燃焼による質量変化を確認したり、生物・化学的な分析などにも利用することができる。ただし、試料を剥ぎ取ってしまうため、同一サンプル・計測箇所で、搅乱によるバイオマスの変化をとらえることができない。コケは立体的な繁茂形態をとり、またまばらに生えることも多



図-6 実験中の NDVI および可視光画像の撮影状況（左）と撮影された可視光画像の例（右）

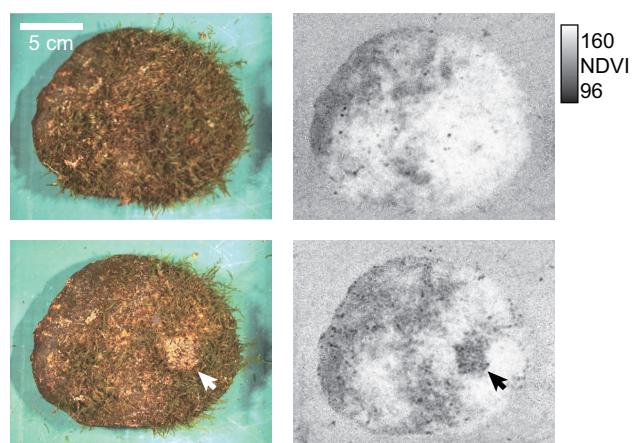


図-7 大礫の転動実験前（上段）および実験中（下段）に記録された可視光画像（左）および NDVI 画像（右）（画像は見やすいようにレベル調整して示している）

いので、一つの礫であってもバイオマスの粗密があり、礫毎の繁茂状態の違いも少なくない。

以上のような状況を踏まえ、本研究では、礫の一部のみを剥ぎ取り、バイオマス（面積当たりの乾燥重量および強熱減量）を測定した。また、実験中に、コケが付着した大礫（サンプル）表面の NDVI (Normalized difference vegetation index) 分布を確認し、コケの被度を観察するとともに、NDVI 値を部分的な剥ぎ取りにより計測したバイオマスと関連付けることで、サンプル毎に、剥ぎ取りを行わなかった部分も含めて、NDVI を介してバイオマスを算定した¹²⁾。バイオマスは大礫表面の一定面積から剥ぎ取ったバイオフィルムを 120°C で 24 時間乾燥させて、乾燥重量を記録し、その後 400°C で 4 時間熱して、常温に戻した後に質量を計測し、乾燥重量から質量の減少量として強熱減量 (Ash free dry mass: AFDM, g m^{-2}) を算定した。コケと付着藻類は混生しているためバイオマスには両方が含まれる。コケが付着した大礫を採取するさいには、コケが優占したものを選択的に採取した。

NDVI 算出には小形 NDVI カメラ Survey3N OCN (Mapir, Inc) を用いた。このカメラでは近赤外（波長 808 nm）、オレンジ（615 nm）、シアン（490 nm）のバ

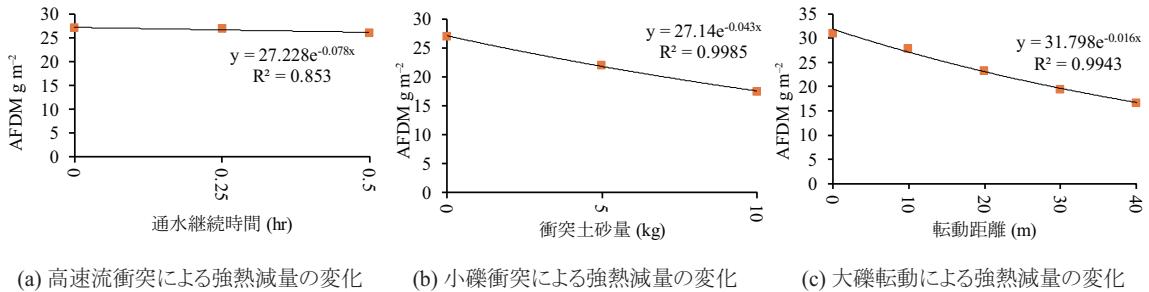


図-8 各種搅乱による強熱減量 (AFDM) の変化

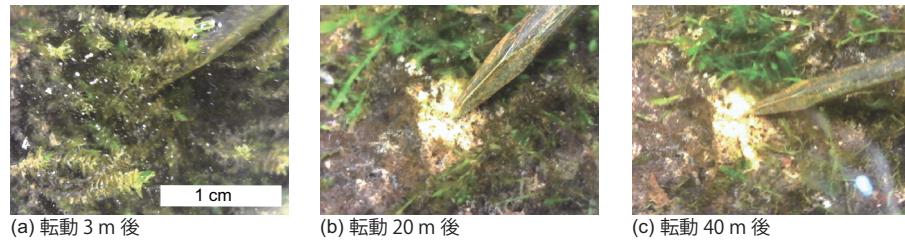


図-9 大礫の転動実験中の、大礫表面の定点のクローズアップ（写真中で定位置を示すために金属針を写しこんでいる）

ンドが取得できる。NDVI カメラの画像の空間分解能はそれほど細かくなく、コケの細かな付着状況を観察できないため、NDVI カメラでの撮影と合わせて一眼レフカメラ α7II (ソニー(株)) による高解像度の可視光画像も取得した。これらの撮影に際しては、図-6 に示すように、容器に大礫を設置して、コケが水面下に収まるよう注水し、礫の近くに黒、25%、50%、75%グレーのキャリブレーションターゲットを 4 つ配置し、ターゲットも含めた撮影を行った。カメラはほぼ垂直になるように設置して、左右からハロゲンランプを 30 度程度の角度で照射して、明るさを確保するとともに光源の反射を防いだ。図-7 に、大礫の転動実験前と 20 m 転動させた時点での撮影された可視光画像と NDVI 画像を示している。図の下に矢印で示したのは、バイオマス算定のために剥ぎ取った $3 \times 3\text{cm}^2$ のパッチである。

コケの繁茂・剥離状況の確認のために、USB デジタル顕微鏡 PC-230 ((株)ビクセン) により、浅く水没させたコケの表面を撮影した。

3. 実験結果

(1) それぞれの搅乱に対するコケのバイオマス変化の傾向

図-8 に示すのは、それぞれの搅乱実験で確認されたコケのバイオマス変化の例である。まず、高速流衝突の効果を図-8(a)で確認すると、洪水流を想定した条件として設定した高速流にコケを暴露したが、通水 30 分後も 4%程度の減少にとどまり、この程度の条件ではコケの剥離はほとんど生じないことが確認できた。

図-8(b) に、直径 10 mm の小礫を 10 kg コケに向けて衝突させた際の強熱減量の変化を示す。実験後には 35%程度の強熱減量の低下が確認され、小礫の衝突は、コケの剥離に一定の効果があることが示唆される。可視化計測による算定した小礫の衝突速度は、2.4 m/s である。

図-8(c) に、コケの付着した大礫を水路上で転動させた際の強熱減量の変化を示している。実験後には 43%程度、強熱減量が低下している。コケの剥離は、土砂衝突と異なり、全面的に密度が低下するような剥離が生じていた。図-9 には、その様子の顕微鏡写真を示している。

(2) 搅乱の仕事とバイオマス変化の関係

図-8 に添えた近似曲線で確認できるように、それぞれの搅乱の累積に応じて指数関数的にバイオマスが減少している。同様の傾向は付着藻類の剥離でも確認されている。土砂衝突による付着藻類の剥離については、土砂衝突により発生する摩擦による仕事と関連付けた検討により、剥離量を説明している^{9,10)}。その既往研究では、まず、一定の搅乱を与えた場合の剥離について、初期バイオマスを M_0 、時間 t が経過した後のバイオマスを M_n とすると、

$$\ln \frac{M_n}{M_0} = -pt \quad (1)$$

と評価する。ここで、 p : 単位時間あたりの剥離速度 (s^{-1}) であり、図-8 中の近似曲線式の x にかかる係数に対応する。この剥離速度が、小礫がコケに衝突し、摩擦により生じる単位時間・単位面積当たりの仕事量 (以

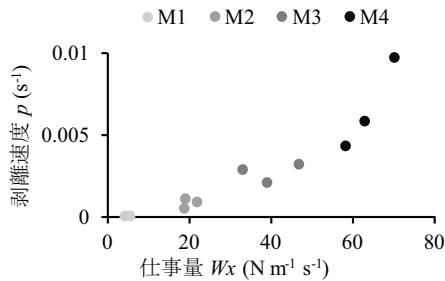


図-10 粒径 10 mm で衝突速度が異なるケースの摩擦仕事量 W_x と剥離速度 p の関係

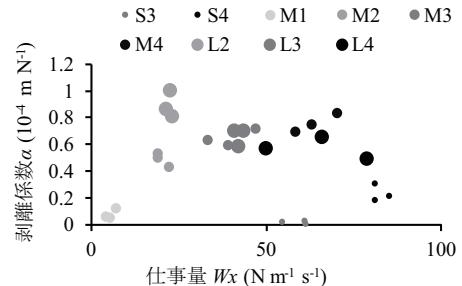


図-11 衝突速度と粒径が異なるケースの摩擦仕事量 W_x と剥離係数 α の関係

下、仕事量と称す) W_x ($N m^{-1} s^{-1}$) を用いて,

$$p = \alpha W_x \quad (2)$$

として対応づけられ、剥離係数 α ($m N^{-1}$) が一定値とみなせると提案され⁹⁾、それ以降の研究でも基本的にそのように取り扱われてきた^{10, 13)}。土砂衝突により生じる摩擦による仕事量 W_x ($N m^{-1} s^{-1}$) は、

$$W_x = 5.513 \mu \frac{1}{\tan \theta} E_s N_s \quad (3)$$

と算定される^{9, 10)}。ここで θ : 小礫の衝突角度、 E_s : 衝突する 1 粒子の運動エネルギー、 N_s : 単位時間・単位面積あたりに衝突する小礫の個数である。付着藻類に関する既往研究では、式(3)中の係数を、摩擦速度、衝突礫の代表粒径、単位幅流砂量を用いて評価するが、本研究では衝突する小礫の衝突角度・速度・個数を実測することで、図-3 中の係数を直接算定する。

(3) 本研究の小礫衝突ケースでのコケ剥離速度の分析

図-10 に、粒径 10 mm で衝突速度が異なるケースの摩擦仕事量 W_x と剥離速度 p の関係を確認する。このプロットの原点を通る直線の傾きが式(2)の α に相当する。実験での衝突土砂の供給速度（時間あたりの投入量）には若干のばらつきがあり、供給速度の大小は、 W_x と p の大小に影響を与えるが、土砂の供給速度というよりは衝突速度の違いの剥離速度への影響をここでは検討したい。そこで、供給速度の違いが影響を与えないように、プロットに際しては、 0.02 kg s^{-1} とみなして計算している（縦軸・横軸とも s^{-1} の次元を含むので傾き α は変わらない）。図を見ると、それぞれのケースの結果が直線に乗っているように見えるが、 W_x が大きくなる（衝突速度が速くなる）に従い、傾き α が大きくなっているように思われる。そこで、 W_x と α の関係に一定の傾向がみられるかを、粒径を変えたケースも含めて図-11 で確認することとする。

図-11 より、ケース毎に剥離係数 α のばらつきが大きく、仕事量 W_x とのはっきりした対応関係は確認できない。コケの剥離がほとんど生じなかつたため、剥離量の算定精度が低い S3 のデータ（グラフの中央下の 3 点）

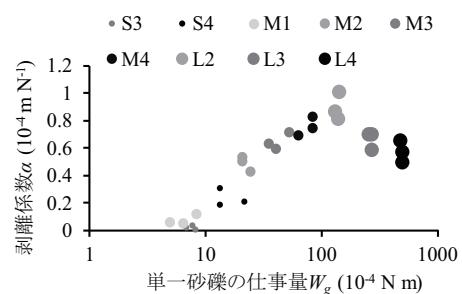


図-12 単一粒子の衝突による摩擦仕事量 W_g と剥離係数 α の関係

を例外的とみなすと、上に凸の形状をもっているようにも見える。既往研究^{12, 13)}では、粒径が 10 mm 程度の小礫が付着藻類の剥離の効率が高い (α が大きい) と報告されており、仕事量 W_x は、衝突粒子の粒径が増加すると、大きくなる傾向があるため、既往研究で確認された剥離に最適な条件が、図-11 での上に凸の分布となって表れている可能性がある。なお、ここで示している仕事量 W_x は、正確には単位時間あたりの量であり、土砂供給速度が変わると W_x の大きさも変化するため、土砂供給速度（単位幅土砂流量）が大きく変化する条件では、図-11 の分布形が変化する。

仕事量 W_x のかわりに、单一粒子の衝突による摩擦仕事量を横軸にとったものを図-12 に示す（横軸は対数で示している）。单一粒子の仕事量 W_g と剥離係数 α の関係は、 $W_g = 150 \times 10^{-4} \text{ N m}$ 程度で極大値をもつ分布形となっている。図-5 に示すように、粒径と衝突流速を系統的に変化させたケースの結果が、図-12 では一つの分布形に沿っている。このことから、剥離係数 α の大きさを、单一粒子の仕事量 W_g により、普遍的に説明できるかもしれない。 W_g が小さい場合は、衝突のエネルギーが小さく土砂衝突によりコケを破損できず、剥離係数 α が小さくなり、 W_g が大きすぎる場合には、衝突のエネルギーや摩擦の仕事がコケだけでなく付着基盤の大礫そのものに作用する割合が大きくなり、効率が低下してコケの剥離係数 α が遞減したと考えられる。

図-13 に、横軸に衝突粒子の粒径 D をとって、剥離

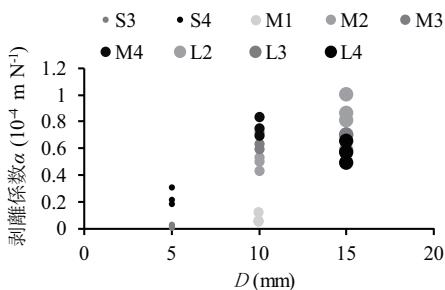


図-13 衝突粒子の粒径 D と剥離係数 α の関係

係数 α の変化を確認する。 D が大きくなるにつれて、 α が大きくなる傾向は確認できるが、ばらつきは大きい。

以上の検討をまとめると、小礫衝突によるコケの剥離量を評価する際に、単一粒子の摩擦仕事量 W_g を見積もり、図-12により剥離係数 α を算定し、式(2)により剥離速度 p を見積もって、図-1により剥離量を計算するのが良いと思われる。本研究ではコケの剥離を取り扱ったが、搅乱に対する応答については、図-8で確認したように、付着藻類と同様に指數関数型で評価できることから、付着藻類についても、単一粒子の摩擦仕事量 W_g により剥離係数 α を見積もることで、より普遍性のある剥離量の算出が可能となるかもしれない。コケや付着藻類の剥離もねらった土砂還元を設計する際に、単一粒子の摩擦仕事量 W_g に着目して、河道に還元する土砂の粒径分布や場合によってはダム放流の流量を設計することで、効率的なコケや付着藻類の剥離を実現できるかもしれない。

本研究で算出されたコケの剥離係数 α は $1 \times 10^{-4} \text{ m N}^{-1}$ 程度であったが、付着藻類では $10 \sim 100 \times 10^{-4} \text{ m N}^{-1}$ 程度の値が報告されており^{9, 12, 13)}、総じてコケは付着藻類よりも小礫衝突による剥離に耐性をもっていると判断できる。

4. おわりに

本研究では、大礫に付着したコケに、洪水を想定した搅乱を与えて生じる剥離について室内実験により分析した。コケ剥離を起こす搅乱プロセスとして、(1) 高速水流衝突、(2) 小礫衝突、(3) コケが付着した大礫の転動の3種類を検討した。平均年最大程度の流況を想定した高速水流の衝突では、ほとんどコケの剥離が起きないことが確認された。小礫の衝突、および大礫の転動では、搅乱強度(継続時間や転動距離)に応じたコケの剥離が確認され、小礫衝突については、継続時間だけでなく小礫の粒径・衝突速度・衝突量について検討を加え、単一粒子の摩擦仕事量 W_g に着目することで、剥離量を評価できることが示唆された。

そもそも水生コケは、安定した河床材料に生育する

傾向があり⁵⁾、定期的な大礫の転動は期待しにくい。また小礫衝突でのコケの剥離速度は付着藻類に比べ 1~10%程度と遅く、実効的にコケの剥離を起こすためには、かなり強い搅乱が必要となることが示唆された。

謝辞:本研究の実施に際し、矢作川研究所、中部電力による地形や水理条件に関する情報提供を受けた。宮本雅也氏には現地調査・室内実験・データ解析で協力を得た。本研究の一部は、JSPS 科研費 JP17K06574, JP17K06575, 河川財団・河川基金助成事業による補助を受けた。

参考文献

- 1) 白金晶子, 内田朝子, 山本敏哉: 矢作川の河床改善実験におけるアユの生息場環境の回復－実験の概要と物理環境・蘇類について－. 矢作川研究, Vol. 23, pp. 35–39, 2019.
- 2) 内田朝子: 矢作川の水中に生えるコケ. 矢作川研究所 Rio, Vol. 204, p. 6, 2017.
- 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, Vol. 6, pp. 5–20, 2002.
- 4) Englund, G., Jonsson, B.-G., and Malmqvist, B.: Effects of flow regulation on bryophytes in north swedish rivers. *Biological Conservation*, Vol. 79, No. 1, pp. 79–86, 1997.
- 5) Englund, G.: Effects of disturbance on stream moss and invertebrate community structure. *Journal of the North American Benthological Society*, Vol. 10, No. 2, pp. 143–153, 1991.
- 6) 萩場祐一: 自然共生研究センター((独)土木研究所)(連載野外研究サイトから(28)). 日本生態学会誌, Vol. 64, No. 3, pp. 265–270, 2014.
- 7) 中土井佑輔, 椿涼太, 河原能久, 吉武央気: 付着藻類の剥離に対するフラッシュ放流の効果の定量的評価. 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 67, No. 4, pp. I-1381–I-1386, 2011.
- 8) Steinman, A. D. and Boston, H. L.: The ecological role of aquatic bryophytes in a woodland stream. *Journal of the North American Benthological Society*, Vol. 12, No. 1, pp. 17–26, 1993.
- 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. 河川技術論文集, Vol. 6, pp. 124–130, 2000.
- 10) 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搅乱作用の評価について. 水工学論文集, Vol. 47, pp. 1063–1068, 2003.
- 11) 小川弘子, 内田臣一: 磯の転がしによる大型糸状緑藻カワシオグサの剥離実験: 愛知工業大学研究報告 B, No. 40, pp. 115–120, mar 2005.
- 12) 石尾将大, 椿涼太, 河原能久, 中土井祐輔: 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, pp. I-763–I-768, 2013.
- 13) 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.

(2020.4.2 受付)