

河床表層の鉛直構造の変動を考慮した付着藻類現存量の変動予測

Predicting Algal Biomass Focusing on Vertical Riverbed Structure

宮川幸雄⁽¹⁾・角哲也・竹門康弘

Yukio MIYAGAWA⁽¹⁾, Tetsuya SUMI and Yasuhiro TAKEMON

(1) 国立研究開発法人 土木研究所 自然共生研究センター

(1) Public Works Research Institute, Aqua Restoration Research Center

Synopsis

Supplying sediment below dams may change algal biomass on stone surfaces by not only promoting detaching algae but also decreasing exposed stone surface area for algae growth. This study is aiming to predict the algal biomass per unit area. Attached algae growth and detaching rate were measured in the prototype flume to make a prediction model focusing sand height and algal biomass. We also developed a new model to estimate the average height of exposed stones and their distribution. The result showed that the production rate was higher after sediment supply. Especially, the highest rate was recorded in case that the sand height was the just before the stone surface area start to decrease by sediment covering. If sediment will not reduce exposed area, higher production rate can be expected under the increasing sediment supply condition. The estimation of the exposed height or the riverbed covered degree should contribute to evaluate the effects of sediment supply on the habitat of attached algae.

キーワード: 付着藻類, 河床, 露出高, 河床埋没度

Keywords: attached algae, riverbed, exposed height, riverbed covered degree

1. はじめに

ダム下流では、上流で土砂移動が寸断され貯水池に土砂が堆積することで、細粒子が消失し、河床のアーマー化が進行する(Erskine, 1985)。これにより、付着藻類が細粒子と衝突して剥離される機会が減少することが報告されている(皆川ら, 2007)。さらに、付着藻類が剥離せず残存期間が長い環境下では、異常繁茂および流下する無機物の堆積が生じやすく、付着藻類を餌とするアユ等の水生生物に多大な影響を及ぼすおそれがある。これに対し、貯水池に堆積した土砂を人工的に下流に供給することで、河床材料の細粒化を促進させる試みが日本国内で実施されている。さらに、供給された細粒子は掃流砂として

サルテーション運動し、その衝突により付着藻類の剥離を促し、異常繁茂等を抑制する効果をもたらすと期待されている。この細粒子の衝突による付着藻類の剥離は、掃流砂の運動のなす摩擦力による仕事量と関連付けられることが報告されている(北村ら, 2000)。さらに、この理論をもとに、掃流砂による付着藻類の剥離量を予測するモデルを構築し、実河川に適用することで、付着藻類現存量を算出する試みもある(田代ら, 2003)。

しかし、河床に細粒子が供給されることで、河床間隙に細粒子が堆積し、その堆積厚(以下、砂面高)が上昇することが報告されている(藤田ら, 2008)。さらに、この間表層に露出している石の表面積(以下、露岩面積)が減少することも報告されている(藤

田ら, 2008). 一般的に, 付着藻類は粒径が大きく安定した石上には定着しやすく, 粒径が小さく流出しやすい砂面上には定着しにくいとされる (野崎・内田, 2000). このため, 土砂供給により河床表層の鉛直構造が変化する, 具体的には砂面高が増大し露岩面積が減少することで, 付着藻類が定着・生育可能な面積は少なくなると考えられる. 上昇した砂面高は, 細粒子の供給が終了すれば, 堆積した細粒子が流出されることで再び低減するが, 土砂供給前と同じ砂面高に戻り安定するとは限らない. このため, 土砂供給による付着藻類現存量への効果を定量的に予測する上で, 掃流砂の移動による剥離効果のみでは, 付着藻類現存量の減少を過小に見積もるおそれがある. また, 付着藻類の生長速度は, 生長開始の段階と成熟した段階とで異なることが報告されており (Hill・Boston, 1991), 細粒子によって剥離された後の生長速度が剥離前とは異なる可能性もある. 土砂供給後の河床におけるこの2つの現象を同じ時間軸で定量的に評価するためには, 河床1m²あたりに占める露岩面積の割合 (以下, 露岩面積割合) と石上の付着藻類現存量の密度 (mg-chl.a/m²) との積から算定される河床1m²あたりの付着藻類現存量 (mg-chl.a/m²) を推定する必要がある. しかし, 既往研究では, 石上の付着藻類現存量の密度のみに着目したものが多く, 土砂供給後における河床の露岩面積割合の減少およ

び付着藻類の成長速度の増加を考慮して, 付着藻類現存量を予測した事例はほとんどない. さらに, 河床の鉛直構造は砂面高だけでなく, 初期河床の石の配置による凹凸によって形成されている. このため, 河床の鉛直構造の変化を定量的に表すには, 河床の凹凸に関する設定方法も新たに考案する必要がある.

そこで本研究では, 土砂供給による河床の鉛直構造の変化, すなわち砂面高の変化と初期河床の凹凸を考慮した上で, 土砂供給が付着藻類現存量に及ぼす効果を予測する方法を開発する. さらに, この方法を用いて, 従来の石上の付着藻類現存量の密度に加え, 露岩面積割合および河床1m²あたりの付着藻類現存量を算出し, 付着藻類現存量をより精緻に予測する [Fig.1]. また, この予測モデルの精度の検証のため, 土砂を河床に敷き詰めた後の砂面高, 露岩面積および付着藻類現存量の経過観測を行い, データを収集した. このとき, 付着藻類の剥離量の予測に必要な河床にはたらく掃流力を把握するため, 流量および川幅が概ね一定の条件下で実験が可能な人工河川施設で観測を行った. また, 砂面高が増減する間は河床に水生昆虫等の生物が定着しないため, それらの生物による付着藻類の摂食の影響はほとんどないものとした.

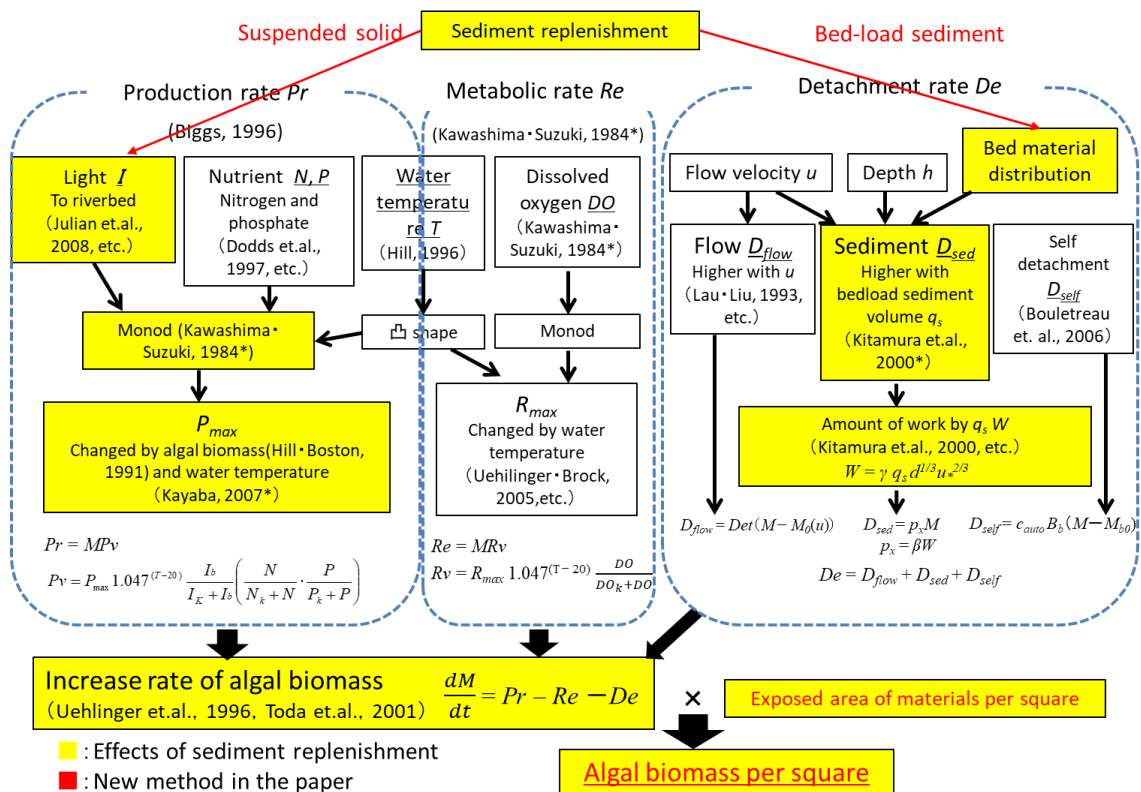


Fig.1 The process of calculating algal biomass in this study

2. 河床表層の鉛直構造の変化のモデル化

本項ではアーマー化した河床に細粒子が供給された場合、すなわち平均粒径が数百mm程度の河床に1オーダー以上細かい粒子が供給された場合の鉛直構造の変化について、モデルを用いて定量的に推定する方法を提案する。

モデルの仕組みを説明するにあたり、はじめに、河床表層における石礫の鉛直方向の配置の設定方法について解説する。このとき、説明の簡易化のため、単一粒径の河床を想定して説明する。また、はじめは河床表層に砂が堆積していない状態を仮定する

(2.1)。次に、現場の河床の状況として、混合粒径の河床を想定した設定方法を説明する(2.2)。最後に、河床表層の凹凸について、河床材料を構成する石礫の砂面から露出している高さ(以下、露出高)の分布状況として定量予測する(2.3)。

また、本研究では簡易な予測とするため、現場では様々な形状の石礫を、一律の扁平率を有する楕円体と近似している。さらに、現場では河床の基盤となる大粒径の石礫は覆瓦構造をなし(福留ら, 2010)、傾斜角度も様々と考えられるが、その上部または周辺に堆積する中・小粒径の石礫も含めると、石礫の長軸は概ね河床面と並行(倒れた状態)であると仮定し、モデルを構築した。

2.1 河床表層の石礫の鉛直方向の配置の設定

はじめに、河床表層において、石礫が互いに隣接し連なっている状態を仮定した[Fig.2]。このとき、各石礫の鉛直方向の中心位置(以下、中心高)が異なることで、河床表層の凹凸が形成されるといえる。また、これらの石礫底部より下の部分の構造は考慮しないものとする。

次に、これらの石礫の中心高の平均値を z_a (m) とし、個々の石礫の中心高 z (m) を、村上らの既往研究をもとに、 z_a を平均値として、正規分布していると仮定した (Fig.2, 村上ら, 1992)。このとき、河床表層において、ある石礫の中心高が z (m) である確率 $P(z)$ は、確率密度関数の式を用いて表される(式(1))。

$$P(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{z-z_a}{\sigma}\right)^2\right) \quad (1)$$

ここで、 σ は標準偏差を表し、石礫が単一粒径かつ完全球体の場合は、石礫の粒径 d (m) の約0.3倍とされる(村上ら, 1992)。

また、露出高 x (m, >0) を、石礫の天端高さ z_h (m) と河床地盤の高さ z_0 (m) との差と設定する(式(2), Fig.3)。ここで、河床地盤の高さ z_0 は、河床表層の

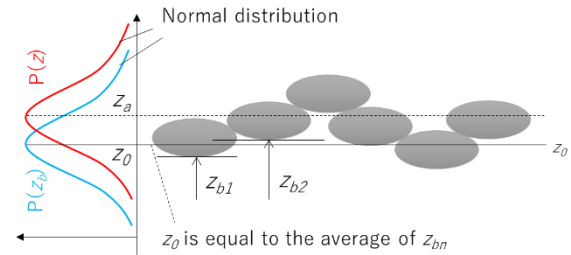


Fig.2 The configuration of riverbed material distribution in this study (Reference: Murakami et al., 1992)

石礫の底部の高さ z_b (m) の平均値と定義する[Fig.2]。 z_b は z と同じ形状の正規分布にしたがうことから、同じ確率密度関数で表される(式(3))。ある石礫の厚さを S (m) とした場合(式(4))、式(3)は z_b と z_0 を消去し、露出高 x を変数とした式(5)に変換される。これは、石礫の露出高 x が、石礫の厚さ S を平均値とした正規分布にしたがうことを表す[Fig.3]。この石礫の厚さ S は、石礫を完全球体とみなした場合は粒径の値となるが(村上ら, 1992)、現場に即して楕円体と仮定した場合[Fig.2, 3]、粒径に扁平率をかける等の補正が必要である。

$$x = z_h - z_0 \quad (2)$$

$$P(z_b) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{z_b-z_0}{\sigma}\right)^2\right) \quad (3)$$

$$S = z_h - z_b \quad (4)$$

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-S}{\sigma}\right)^2\right) \quad (5)$$

最後に、露出高の平均値 x_a を、 x と式(5)との積の積分値から推定するモデルを構築した(式(6), $x > 0$)。

$$x_a = \int_0^{\infty} x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-S}{\sigma}\right)^2\right) dx \quad (6)$$

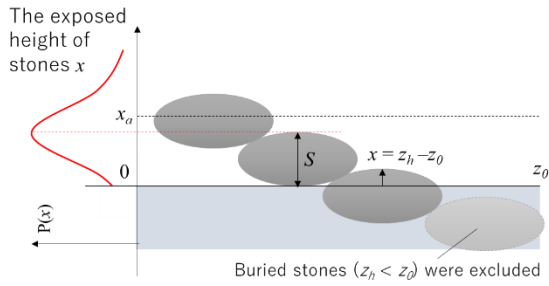


Fig.3 The exposed height distribution of riverbed stones

2.2 混合粒径の河床における石礫の露出高の平均値および分布状況の予測

2.1では単一粒径の河床条件のもと、河床表層の石礫の鉛直配置を設定したが、現場の河床表層は様々な粒径の石礫で構成されている。ただし、混合粒径の組成は、正規分布しているとは限らないため、2.1のような確率密度関数で表すことは困難である。そこで本研究では、石礫の組成を引用事例の多いWentworthの粒径区分に基づき（Wentworth et al., 1922）、石礫を巨石（257 mm以上）、石（65～256 mm）、および礫（17～64 mm）の3つに分類し、それぞれの河床表層中の存在割合で表した。このときの巨石、石、礫の存在割合 $F(i)$ を、それぞれ $F(1)$ 、 $F(2)$ 、 $F(3)$ とした。また、粒径が礫未満の砂・砂利の存在割合は $F(4)$ とした。そして、ある粒径区分 i ($i=1\sim3$)における露出高の分布および平均値 x_{ai} から、混合粒径の河床における露出高の分布および平均値 X を予測した。

具体的には、Fig.2の河床表層の石礫の配置をもとに、3つに区分された各粒径の石礫は、混合粒径下において粒径区分ごとに正規分布していると仮定した（Fig.4、長田・福岡、2012）。このときの確率密度関数は下記で表される（式(7)、(8)）。式中の a_i は、ある粒径区分における露出高 x_i を無次元化した値である（長田・福岡、2012）。

$$P(a_i) = \frac{1}{\sigma_i S_i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{a_i}{\sigma_i}\right)^2\right) \quad (7)$$

$$a_i = \frac{x_i - S_i}{S_i} \quad (8)$$

ここで、 S_i は粒径区分 i の石礫の厚さの代表値である。また、区分ごとの標準偏差 σ_i は、 S_i が小さいほど大きく、0.435～0.6の間で変動する（長田・福岡、2012）。そして、式(7)、(8)と各区分の石礫の存在割合 $F(i)$ との積から、混合粒径における露出高 x の頻度分布 $P(x)$ および平均値 X を予測するモデルを構築した（式(9)、(10)）。

$$P(x) = \sum_{i=1}^3 \frac{F(i) \cdot P(a_i)}{F(1) + F(2) + F(3)} \quad (9)$$

$$X = \sum_{i=1}^3 F(i) \int_0 x_i P(a_i) dx_i \quad (10)$$

ただし、この場合、粒径区分 i ごとの石礫の底部の高さ z_{bi} 、すなわち河床地盤の高さが異なってしまう。そこで、露出高0の位置を統一するため、河床地盤の高さ z_0 を巨石・石・礫の底部の平均高さ z_{ba1} 、 z_{ba2} 、 z_{ba3} と、 $F(1)\sim(3)$ を組み合わせた式で設定し（式(11)）、それに基づき式(7)～(10)の露出高 x_i を x_i' に補正した（式(12)、Fig.4）。

$$-(z_{bi} - z_0) = \frac{1}{2} S_i - \sum_{i=1}^3 \frac{F_i \cdot \frac{1}{2} S_i}{F(1) + F(2) + F(3)} \quad (11)$$

$$x_i' = x_i - (z_{bi} - z_0) \quad (12)$$

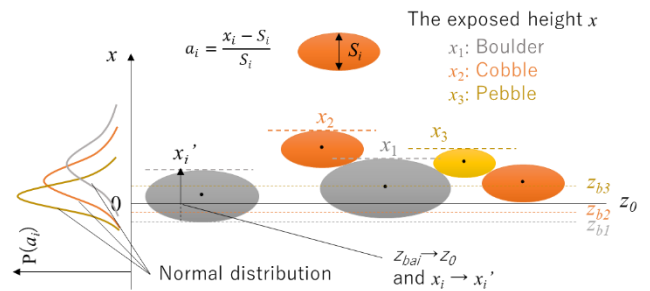


Fig.4 The configuration of exposed height if the riverbed materials are mixed particle size

2.3 砂面高および露岩面積割合の設定

本研究では、河床表層の平均粒径が、供給された土砂のもの比べて1オーダー以上大きく、供給土砂が概ね河床表層の間隙に入り込む場合を想定している（道上ら、1994）。また、入り込んだ土砂が、河床表層で堆積しているものとして観測されるのは、2.1で設定した河床地盤の高さ z_0 (=0 mm) 上からとした。すなわち、河床地盤の高さ z_0 に対する砂面の高さを砂の堆積厚とし、砂面高 z_s と定義した。また、河床地盤は固定床に設定した。このとき、2.3で定義した石礫の露出高 x は、 z_s の上昇分だけ減少することとなる。

そして、砂面高 z_s と2.1の石礫の中心点の高さ z を変数とし、ある石の上面から見た露岩面積 $A(z_s, z)$ を、石を楕円体と仮定して、式(13)で設定した[Fig.5]。このときの石の長径、中間径、短径（高さ）の比は、こ

ここでは既往文献から1:0.7:0.5と仮定し (Michikami et al., 2016), 石の長径を Y として, それぞれの径を $Y, 0.7Y, 0.5Y$ と設定した[Fig.5].

$$z_s < z: A(z_s, z) = \pi \cdot 0.5Y \cdot 0.35Y$$

$$z < z_s < z + 0.25Y:$$

$$A(z_s, z) = \pi \cdot 0.5Y \cdot 0.35Y \left(1 - \frac{(z_s - z)^2}{(0.25Y)^2} \right)$$

$$z_s > z + 0.25Y: A(z_s, z) = 0 \quad (13)$$

最後に, これらの仮定および設定のもと, 砂面高 z_s を変数として, 露岩面積割合 $R(z_s, z)$ を求めた. 具体的には, 石礫の中心点が z である確率 $P(z)$ とそのときの露岩面積 $A(z_s, z)$ との積を計算対象の範囲で積分し, 上面から見た石の面積に対する百分率を求めた (式(14)). このときの河床は, 2.2で設定した混合粒径を想定している. ただし, 河床の石と供給する細粒子の粒径の差 (1オーダー程度) を考慮して, $R(z_s)$ の下限値を0.1で設定した (式(14)).

$$R(z_s, z) = \sum_{i=1}^3 F(i) \frac{\int_0^1 P(z) A(z_s, z) dz}{\pi \cdot 0.5Y \cdot 0.35Y} \quad (14)$$

(ただし, $0.1 < R(z_s, z) < 1$)

最後に, 砂面高の変化を無次元化・一般化するため, 2.2で設定した露出高の平均値 X に対する砂面高 z_s の比を河床埋没度と定義し, 砂面高 z_s に対する R の変化をグラフ化した上で, x 軸にあたる z_s を B に変換して露岩面積割合 R の変化を分析した.

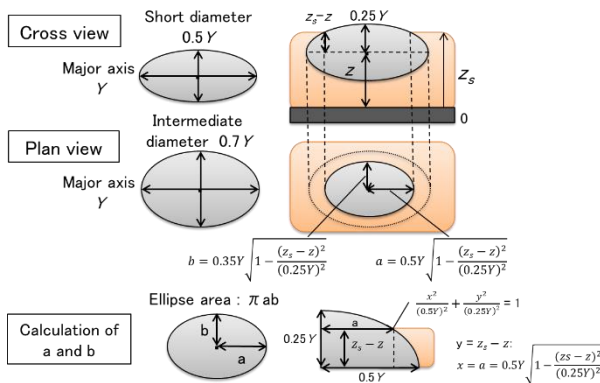


Fig.5 The method of calculating the exposed area of particularly buried stone ($z < z_s < z + 0.25Y$)

3 実験および分析方法

本研究では, 2のモデルの精度を検証するため, 岐

阜県各務原市の自然共生研究センターの野外に敷設された2本の人工河川施設にて実験を行った. 実験は, 各河川の上流部に位置する幅約2m, 延長約60mの直線区間で行った. この河川は, 木曾川水系の河川水を導水し, 直上の放流口から一定の流量を流すことが可能な施設である. 実験中, 流速は約0.4m/s, 水深は約0.25mに維持した.

3.1 実験全体の流れ

はじめに, 付着藻類を生育させる石を2本の河川の河床に設置した. 設置した石は長径・中間径の平均値が約260・220mm, 短径(高さ)の平均値が約160mmのもの(以下, 大礫)と, 長径・中間径の平均が約130・110mm, 短径の平均が約80mmのもの(以下, 中礫)の2種類とした. ダム下流で見られるアーマ化した河床を再現するため, 大礫および中礫の河床1m²あたりに占める割合がそれぞれ20~30%程度になるように, 河床1m²あたりに大礫を約4.5個, 中礫を約15個敷設した. 各礫の設置から約1ヶ月経過し, 礫上に付着藻類が生育したことを確認した後, 実験を開始した. 具体的には, 1本の河川(以下, 実験区)の区間全体に, 礫を設置した地盤を高さ0mとして, そこから約200mmの高さまで, 平均粒径が約2mmの砂を敷設した. もう1本の河川(以下, 対照区)には砂を敷設しなかった. そして, 砂の敷設日から-4, 1, 3, 7, 11日後に2本の河川において物理環境および付着藻類の計測を実施した(計測の詳細は3.2参照). このとき, 砂の粒径が河床間隙より1オーダー以上小さければ, 流入した細粒子は概ね河床間隙に入り込むと推定されることから(道上ら, 1994), 敷設した砂(平均粒径が約2mm)は設置した礫(平均粒径が100mm以上)の間隙に入るものとし, その下の地盤(平均粒径が約10mm)より下には沈下しないものと仮定した.

3.2 物理環境の計測

計測した物理環境は, 砂面高, 河床の被度割合, 流下土砂量である. 以下に各値の計測方法を示す.

a) 砂面高 z_s

2.3をもとに, 砂を敷設する前の地盤(以下, 河床地盤)を高さ0mとしたときの敷設した砂の厚さとして実験区で計測した. 具体的には, 砂の敷設前に実験区の上流, 中流, 下流(実験区の上流端からそれぞれ15, 30, 45m下流の地点)の中心にピンを設置した[Fig.6]. そして, ピン直近, ピンから両岸に向かって1m離れた2地点の計3地点を計測地点に設定した[Fig.6]. 砂の敷設後, 設定した地点に径1mmの針金を河床地盤にあたるまで刺し, その針金を中心として直径約50mmのゴム製円盤を砂面に落下させた.

ゴム製円盤は砂面まで落下するものとして、針金下端（河床地盤面）とゴム製円盤（砂面）までの高さを計測した[Fig.6]. 本方法は、長谷川式貫入試験機による河床軟度の測定方法を参考に実施している（鈴木ら, 2011）.

b) 河床の被度割合

計測は実験区と対照区にて実施した. 地点は, a)で設定した上流, 中流, 下流の中心部から両岸に1 m離れた箇所(1つの横断測線につき2箇所)とした[Fig.6]. そして, その地点における0.5×0.5 m中の河床表層における被度割合を計測した. 粒径区分は, 既存の文献を参考に（Bain et al., 1985）, 大礫の粒径を表す指標として①257 mm以上, 中礫の粒径を表す指標として②65~256 mm, 河床地盤の材料の粒径を表す指標として③3~64 mm, 敷設した砂の粒径を表す指標として④2 mm以下と設定した.

c) 流下土砂量

実験区の最下流部から更に約5m下流の中心部にプラスチックボックス(幅380 mm, 奥行264 mm, 高さ155 mm)を設置し, 流下した土砂を採取した[Fig.6]. ボックスは, 砂を敷設してから1, 3, 7, 11日後の午前中に一旦回収し, 測定後すぐに空になったボックスを再度同じ箇所に設置した.

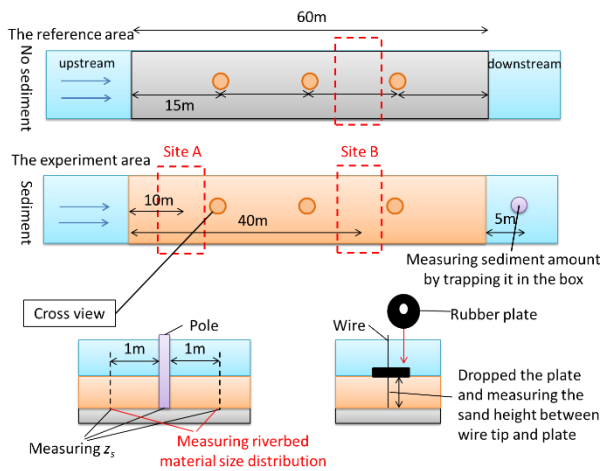


Fig.6 Measuring sites of the physical parameters (the orange colored round point) and the algal biomass (site A and B) in the experiment

3.3 付着藻類現存量の計測

実験区の上流端から約10, 36 m離れた箇所をそれぞれ地点A, Bとし, それらの地点内にて礫の回収および礫上の付着藻類の採取を実施した[Fig.6]. はじめに, 回収を行う測線を地点A, B内でそれぞれ決定し, その測線上の右岸, 流心, 左岸部の3か所にある

大礫, 中礫を1つずつ(計6個)選定した. 次に, 選定した礫における砂に埋もれていない部分(露岩部分)の長径, 中間径, 短径(高さ)を記録した. そして, 選定した礫の露岩部分に生育した付着藻類を全てブラシで擦りとり, サンプルとして採取した. その後, 礫全体の長径, 中間径, 短径(高さ)を記録し, 採取したサンプル中に含まれるchl.a量を, 付着藻類現存量の指標として, SCOR/UNESCO (1966)の方法に基づき測定した(SCOR-UNESCO, 1966). また, 対照区では上流端から約36 m離れた箇所において, 実験区と同様の方法でサンプルを採取し測定を行った.

3.4 砂面高, 露岩面積割合 $R(z_s, z)$ および掃流砂量の分析

砂面高の変化が露岩面積割合に及ぼす影響を分析するため, ある砂面高における各粒径の被度割合を計測した上で, 砂の被度割合 F_s を用いて, 露岩面積割合 R' を下記の式から求めた(式(15)). この R' を観測値から算出した露岩面積割合と定義した.

$$R' = 1 - F_s \quad (15)$$

そして, R' を2.3で設定・計算した露岩面積割合 $R(z_s)$ と比較し, $R(z_s)$ の R' に対する適合度を検証した. 具体的には, ある砂面高 z_s における R' (観測値) と $R(z_s)$ (予測値) について単回帰分析を行い, 両者が1:1の関係に近くなるかを検証した. 本項において, $R(z_s)$ の計算(式(14))で用いる $P(z)$ は, 簡易的に式(1)を用いた. ここで, 計算で入力する Y, z_a は, 現場の初期河床の粒径分布[Fig.7]をもとに, それぞれ200 mm, 50 mmで設定した.

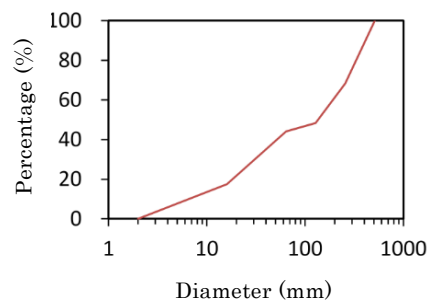


Fig.7 The particle size distribution curve before supplying sediment in the artificial river

ある砂面高 z_s における掃流砂量は, 以下の方法で推定した. はじめに, ある z_s における D_{60} の時間変化を $R(z_s)$ から推定した. 次に, 下記の式から混合粒径河床においてある粒径区分 i の粒子にはたらく無次元掃流力 τ_i^* (式(16)), ある粒径区分 i の粒子の無次元限界掃流力 τ_{ci}^* (式(17)) および有効摩擦速度 u_e^* (m/s,

式(18)を算出した(芦田・道上, 1972)。掃流力の算出に必要な摩擦速度 u^* (m/s)は, Heyの式を用いて算出した(式(19), Hey, 1979)。

$$\tau_i^* = \frac{u^{*2}}{Rgd_i} \quad (16)$$

$$\tau_{ci}^* = Hi \cdot \tau_{cm}^* \cdot \frac{d_m}{d_i} \quad (17)$$

$$\frac{u}{u_e^*} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \left\{ \frac{R_s}{d_m(1 + 2\tau_m^*)} \right\} \quad (18)$$

$$\frac{u}{u^*} = 5.75 \log_{10} \left\{ \frac{11.16h}{3.5D_{84}} \right\} \quad (19)$$

ここで, u : 平均流速 (m/s), R_s : 砂の水中比重 (= 1.65), g : 重力加速度 (= 9.8 m/s²), d_i : ある粒径区分 i の平均粒径 (砂の場合, = 2 mm), Hi : 遮蔽係数 ($d_i = 2$ mmのとき, 0.85), τ_{cm}^* : 河床材料の平均粒径の大きさの粒子 m の無次元限界掃流力 (= 0.05), d_m : 河床材料の平均粒径 (m), τ_m^* : 河床材料の平均粒径の大きさの粒子 m にはたらく無次元掃流力, h : 平均水深 (m), D_{84} : 河床材料の粒度加積曲線が84%となる粒径 (m)を表す。このときの d_m は D_{60} に設定した。そして, 芦田・道上の式から混合粒径の河床におけるある粒径区分 i の粒子による単位幅あたりの掃流砂量 q_i (m²/s)の時間変化を推定した(式20, 芦田・道上, 1974)。最後に, 地点A, Bにおける掃流砂量 q_{iA} , q_{iB} (m²/s)をそれぞれ推定した(式(21))。

$$\begin{aligned} \tau_i^* > \tau_{ci}^* & \quad \frac{q_i}{F(i)u_e^*d_i} = 17\tau_{ei}^* \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{ci}^*}{\tau_i^*}} \right) \left(1 - \frac{\tau_{ci}^*}{\tau_i^*} \right) \\ \tau_i^* < \tau_{ci}^* & \quad q_i = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

$$q_{iA} = 0.17 \cdot \alpha \cdot q_i \quad q_{iB} = 0.6 \cdot \alpha \cdot q_i \quad (21)$$

ここで, τ_{ei}^* : ある粒径区分 i の粒子にはたらく有効掃流力 (kg/m²/s)を表す(式(22))。

$$\tau_{ei}^* = \frac{u_e^{*2}}{Rgd_i} \quad (22)$$

式(21)の掃流砂量に関する補正係数 α は, 算出した q_i が, 3.2(c)の方法で観測した流下土砂量に最も近づく場合の値を, 0.05間隔で試算することで求めた。また, q_{iA} , q_{iB} 中の0.17, 0.6は実験区下流(実験区の上流端から60 m下流)まで流下した土砂のうち地点A, B(実

験区の上流端からそれぞれ10, 36 m下流)を通過した土砂の割合を表す。

3.5 砂面高と付着藻類現存量との関係の分析

中礫および大礫上のchl.a量の観測データを集約した後, 付着藻類現存量の予測式を, 既往研究をもとに生産速度, 代謝速度, 剥離速度の収支で構築した(式(23), 川島・鈴木, 1984)。このときの単位は, 現場でも観測されるchl.a量 (mg-chl.a/m²)とした。ここで, Pr と Re は, 既往研究では炭素量換算のため, chl.a量換算に補正した($\times 0.03$, 式(23))。

$$\frac{dM}{dt} = 0.03(Pr - Re) + De \quad (23)$$

ここで, M : 付着藻類現存量 (mg-chl.a/m²), Pr : 光合成による生産速度 (mg-chl.a/m²/hr), Re : 代謝速度 (mg-chl.a/m²/hr), De : 剥離速度 (mg-chl.a/m²/hr)を表す。 $Pr - Re$ は, 付着藻類の一次生産速度の推定式であり(川島・鈴木, 1984), 本研究では, その時間変化の1日の累積値をもとに付着藻類現存量の日変化を予測した。

Pr および Re は, 溶存酸素濃度が飽和状態の場合, 光量子束密度, 水温, 栄養塩濃度による制約を受け, その制約はMonod型に従うものとして, 下記で表すことができる(川島・鈴木, 1984)。

$$Pr = M \cdot P_{\max} \cdot 1.047^{(T-20)} \frac{I_b}{I_k + I_b} \frac{N}{N_k + N} \frac{P}{P_k + P} \quad (24)$$

$$Re = M \cdot R_{\max} \cdot 1.047^{(T-20)} \quad (25)$$

ここで, P_{\max} : 付着藻類の最大比生産速度(/hr), I_b : 河床に届く光量子束密度(umol/m²/s), N : 溶存態窒素濃度(または硝酸態窒素濃度, mg/L), P : 溶存態リン濃度(またはリン酸態リン濃度, mg/L), T : 水温(°C), R_{\max} : 最大比代謝速度(/hr), I_k , N_k , P_k : 各値に対する半飽和定数を表す。 N_k , P_k は, 既往研究をもとにそれぞれ10 μmol/L(0.14 mg/L), 1 μmol/L (0.031 mg/L)に設定した(Borchardt, 1996)。実験時, 河川中の N および P は, 約0.81 mg/L, 0.072 mg/Lを維持していたことから, 付着藻類の生長に必要な栄養塩濃度は実験中, 概ね飽和状態であったと考えられる。さらに, 河川中の溶存酸素濃度は約9 mg/Lを維持していたことから, 同じく飽和状態と考えられる。したがって, T , I_b , P_{\max} , R_{\max} , I_k を算出することで, 付着藻類の生長速度と代謝速度を算出可能である。ただし, 生長段階に応じて付着藻類の P_{\max} および I_k は異なるため(Hill・Boston, 1991), 剥離前後の付着藻類の P_{\max} および I_k をそれぞれ推定した。

一方、剥離速度 De は、1時間ごとの敷設した砂の移動による剥離量 D_{sed} と付着藻類の自己剥離量 D_{self} の和で算出した。このとき、実験中の流速は平水状態である約0.4 m/sに維持しており、流水のみによる剥離 D_{flow} および転石による剥離は生じないものとした。 D_{self} はBouletreauらの自己剥離の算出式をもとに、式(26)から算出した (Bouletreau et al., 2006)。

$$D_{self} = c_{auto} \cdot B_b \cdot (M - M_{b0}) \quad (26)$$

ここで、 c_{auto} : 自己剥離に関する係数 ($= 1.0 \times 10^{-15}$ mg-chl.a/cells/hr), B_b : 単位付着藻類現存量あたりのバクテリアの細胞数 ($=$ cells/mg-chl.a), M_{b0} : バクテリアの活動が開始される付着藻類現存量 ($= 0$ mg-chl.a/m²) を表す。 B_b は既往研究をもとに、水温の関数として、式(27)から算出した (Bouletreau et al., 2006)。

$$B_b = 3 \cdot 10^{-10} \cdot \exp(0.5 \cdot (T - 20)) \quad (27)$$

一方、 D_{sed} は3.4で推定した掃流砂量 q_i を用いて式(28)で表される (北村ら, 2000)。

$$D_{sed} = 3600 \cdot (M - D_{self}) \cdot \beta \cdot \gamma \cdot q_i \cdot d_i^{1/3} \cdot u_*^{2/3} \quad (28)$$

ここで、 β : 剥離のしやすさを表す係数 ($= 3.0 \times 10^{-4}$ と設定), γ : サルテーション粒子による仕事量に関する係数 ($= 4.94 \times 10^5$ と設定) を表す (北村ら, 2000)。このとき、秒単位である q_i (m²/s) を式(23)の時間単位に換算するため、3600をかけている。また、自己剥離により消失する量を剥離量に考慮しないよう、付着藻類現存量 M から D_{self} を予め除いている。

ここで、砂の敷設直後から大礫は掃流砂に衝突するが、砂に深く埋没している中礫には、砂面高がある程度低下してから掃流砂が衝突するものと仮定した。そして、砂の敷設直後の大礫の平均高さ (約160 mm) と砂面高 (約200 mm) の比率から、砂面高が約100 mmのときに中礫 (平均高さ約80 mm) への剥離が開始されると設定した。また、既存の報告を参考として (Auel et al., 2016), 砂面の天端から約20 mmの高さまでを掃流砂の通過する範囲と設定し、そこより高い範囲では剥離が生じないと仮定した。実験中、そのような区間は中礫では発生しないが大礫では発生するため、大礫上の付着藻類の剥離速度 De' を下記の式(29)で補正した。

$$z_h > z_s + 20$$

$$De' = De \cdot \frac{z_s + 20}{z_h} \quad (z_h < z_s + 20, De' = De) \quad (29)$$

ここで、 z_h は大礫の高さ ($= 160$ mm) を表す。

計算に必要な変量は、河床に届く光量子束密度 I_b および水温 T である。これらは、河床に光量子計 (MDS-MKV/L, JFEアドバンテック社製) および水温計 (Tidbit v2, Onset製) を設置し、実験中に1時間間隔で自動測定した。

本モデルを用いて、はじめに対照区の礫上の付着藻類現存量を計算し、観測値と比較することで剥離前におけるモデルの適合度を検証し、剥離前における P_{max} , R_{max} および I_k の算出を行った。具体的には、観測した付着藻類現存量の平均値に最も近づく場合の P_{max} , R_{max} および I_k をそれぞれ0.5, 0.5, 50間隔で試算することで求めた。はじめに、モデル計算の際の付着藻類現存量の初期値を、砂の敷設日から-4日目に観測された値の平均をもとに設定した。次に、検証後のモデルを用いて、実験区の大礫および中礫上の付着藻類現存量を砂敷設日まで計算し、観測値に対する De の適合度を検証した。最後に、実験区の砂敷設後における礫上の付着藻類現存量を計算し、観測値と比較することで、剥離後におけるモデルの適合度を検証し、剥離後における P_{max} および I_k の算出を行った。このとき、 R_{max} は剥離前と変わらないとし、 P_{max} および I_k は剥離前と同様の方法で試算して求めた。

さらに、A地点、B地点における河床1m²あたりの付着藻類現存量を露岩面積割合 $R(z_s)$ を用いたモデル計算で求め、観測値 (付着藻類現存量の観測値と R' との積) から算出した値と比較することで、モデルの精度を確認した。このとき、礫以外の砂面および河床地盤上の付着藻類現存量は0 mg-chl.a/m²として計算した。また、露岩面積割合 $R(z_s)$ の算出に必要な砂面高 z_s の時間変化は、実験区内の砂面高を空間的に一様と仮定し、流下土砂量の時間変化を観測値から推定した上で、ある時間における敷設土砂量と流下土砂量との差から推定した。

最後に、砂面高が河床1m²あたりの付着藻類現存量に及ぼす影響を、砂面高を横軸、河床1m²あたりの付着藻類現存量の増加速度を縦軸とした散布図により分析した。このときの付着藻類現存量の増加速度は、付着藻類現存量そのものに依存する上、日変動 (特に日中・夜間) が大きいことから、前日の同時刻に対する増加速度の変化率 (%) で求めた。

4. 結果

4.1 観測されたデータ

砂面高および河床の被度割合を観測した結果、上流、中流、下流とも砂を敷設した直後から砂が流出し、3日後に安定した[Fig.8, 9]。また、安定後の砂面高は上中下流の平均で約60 mmとなり、河床の被度割合は概ね砂敷設前に戻るが、上中下流とも砂が10%程度残存した。本研究では、砂面高が低減する過程における付着藻類現存量の変動について分析するため、砂敷設の-4, 1, 3日後のデータを対象に以降の分析を実施した。一方、中礫・大礫上の付着藻類現存量を観測した結果、実験区では対照区と異なり、A地点・B地点ともに、砂敷設から1日後は4日前よりも概ね減少するものの、1~3日後にかけて増加する傾向が見られた[Fig.10]。

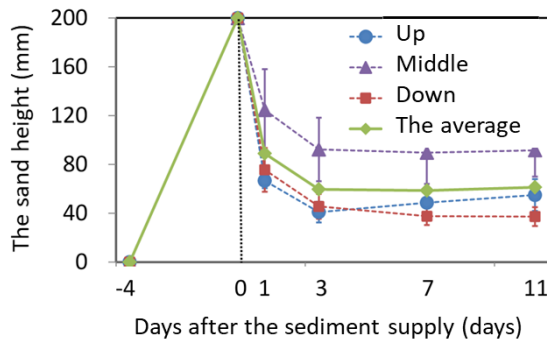


Fig.8 The daily change of sand height in the experiment

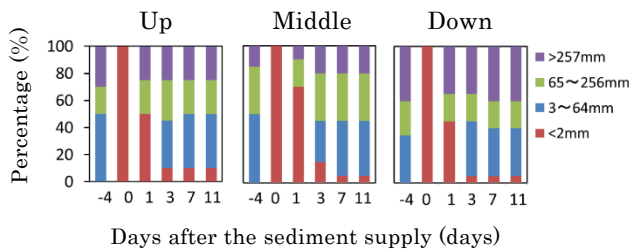


Fig.9 The daily change of riverbed material distributions in the experiment

4.2 砂面高、被度割合、 R' および $R(z_s)$ の関係

砂面高の変動が大きい1, 3日後における露岩面積割合の観測値 R' と予測値 $R(z_s)$ を比較した。そして、式(15)から、砂敷設から1, 3日後における砂面高 z_s と露岩面積割合の観測値 R' をプロットした結果、 R' は砂面高 z_s の上昇とともに減少する傾向が見られた[Fig.11]。さらに、観測値 R' と予測値 $R(z_s)$ との単回帰分析を行った結果、両者には概ね1:1の関係が見られた (Fig.12, $R(z_s) = 0.8951R' + 0.0261$, $R^2 = 0.8803$)。

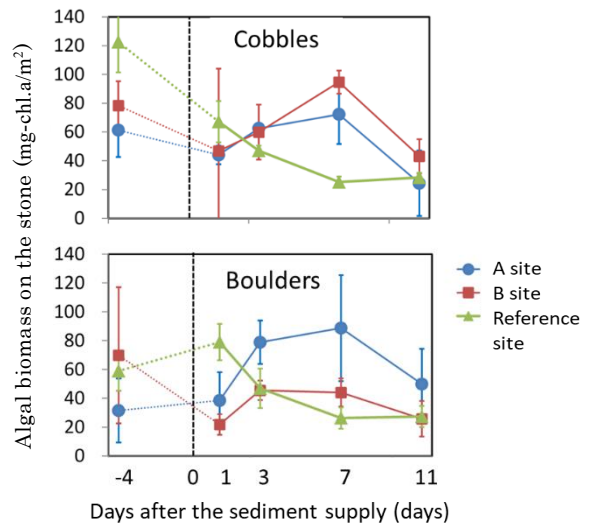


Fig.10 The daily change of algal biomass on the cobles or the boulders in the artificial river (The dotted lines show the day when sediment was supplied)

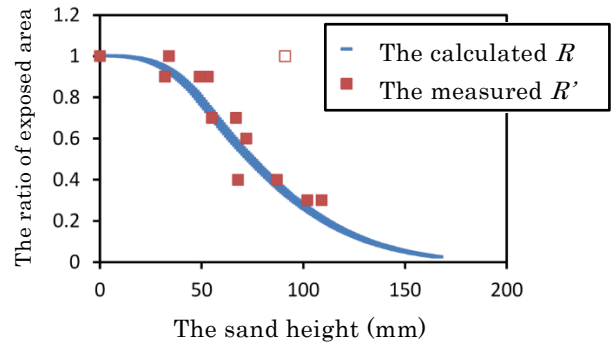


Fig.11 Comparing the calculated R and the measured R' in the experiment (□ shows the outlier)

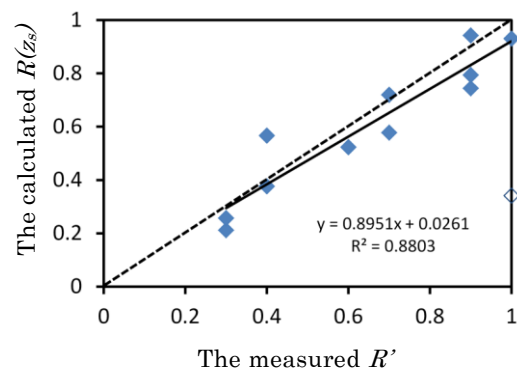


Fig.12 The relationship between calculated R and measured R' in the experiment (◇ shows the outlier)

一方、芦田・道上の式から算出した掃流砂量 q_i を補正した結果、式(21)の a が0.20のとき、観測値から推定した掃流砂量と概ね一致する結果となった。

4.3 砂面高と付着藻類現存量との関係

対照区における礫上の付着藻類現存量の観測値とモデルによる予測値を比較し、適合度を検証した結果、 P_{max} および R_{max} がそれぞれ3.5, 1, I_k が200でモデルは観測値の平均と概ね一致した[Fig.13]. さらに、検証後のモデルを用いて、実験区の砂敷設後の付着藻類現存量を予測した結果、砂敷設後に P_{max} が6, I_k が100でモデルは観測値の平均と概ね一致した[Fig.14]. そして、土砂供給後におけるA, B地点の河床1m²あたりの付着藻類現存量のモデルによる予測値と観測値を比較した結果、砂敷設後から1日後の予測値は観測値より低い傾向となったが、3日後の予測値は概ね一致した[Fig.15].

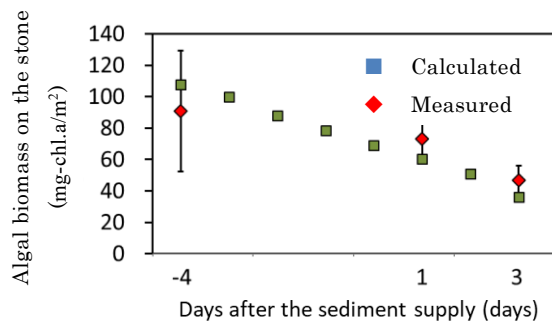


Fig.13 Comparing calculated algal biomass and measured one on the stone in the reference area ($P_{max} = 3.5$, $R_{max} = 1.0$, $I_k = 200$)

また、Fig.11をもとに、河床埋没度と露岩面積割合 $R(z_s)$ 、掃流砂量、および河床1m²あたりの付着藻類現存量の増加率との関係を比較した結果、A, B地点ともに、河床埋没度が0.5~1付近で付着藻類現存量の増加率は2~3%と覆砂前の1~2%よりも高くなった[Fig.16]. しかし、河床埋没度が1.5付近では、A地点ではほぼ0%, B地点では負になった[Fig.16]. 一方、 $R(z_s)$ は河床埋没度が0.5~1で特に減少し、掃流砂量は0.8以上で発生する結果となった[Fig.16].

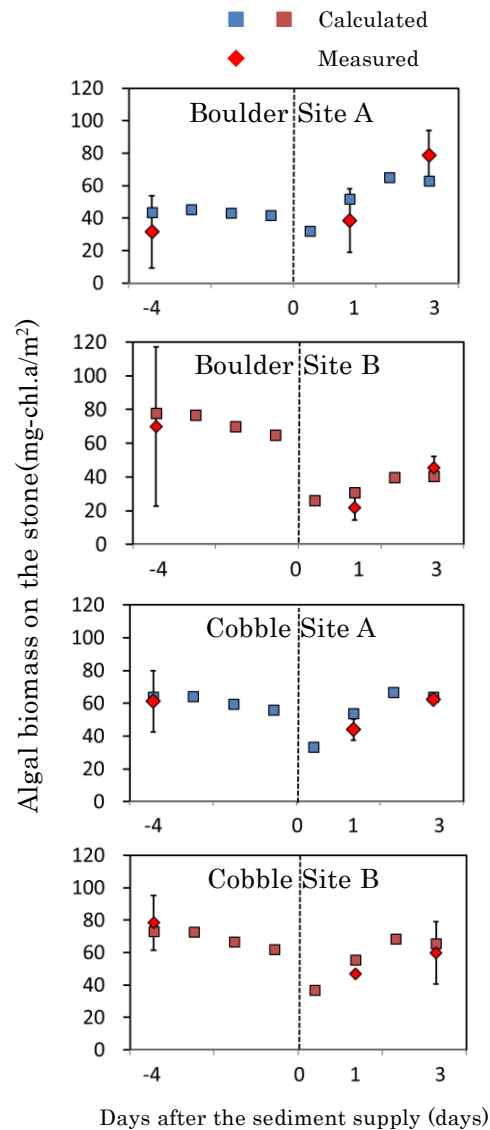


Fig.14 Comparing calculated algal biomass and measured one on the stone in the experimental area (Before the sediment supply: $P_{max} = 3.5$, $R_{max} = 1$, $I_k = 200$, After the sediment supply: $P_{max} = 6$, $R_{max} = 1$, $I_k = 100$)

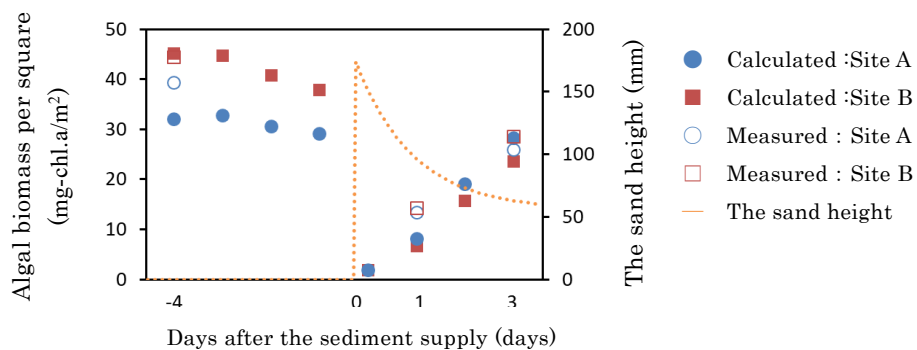


Fig.15 Comparing the calculated algal biomass per square with the measured one in the experimental area (P_{max} , R_{max} , I_k was the same to those in Fig.14. Sand height was the average value in the experimental area)

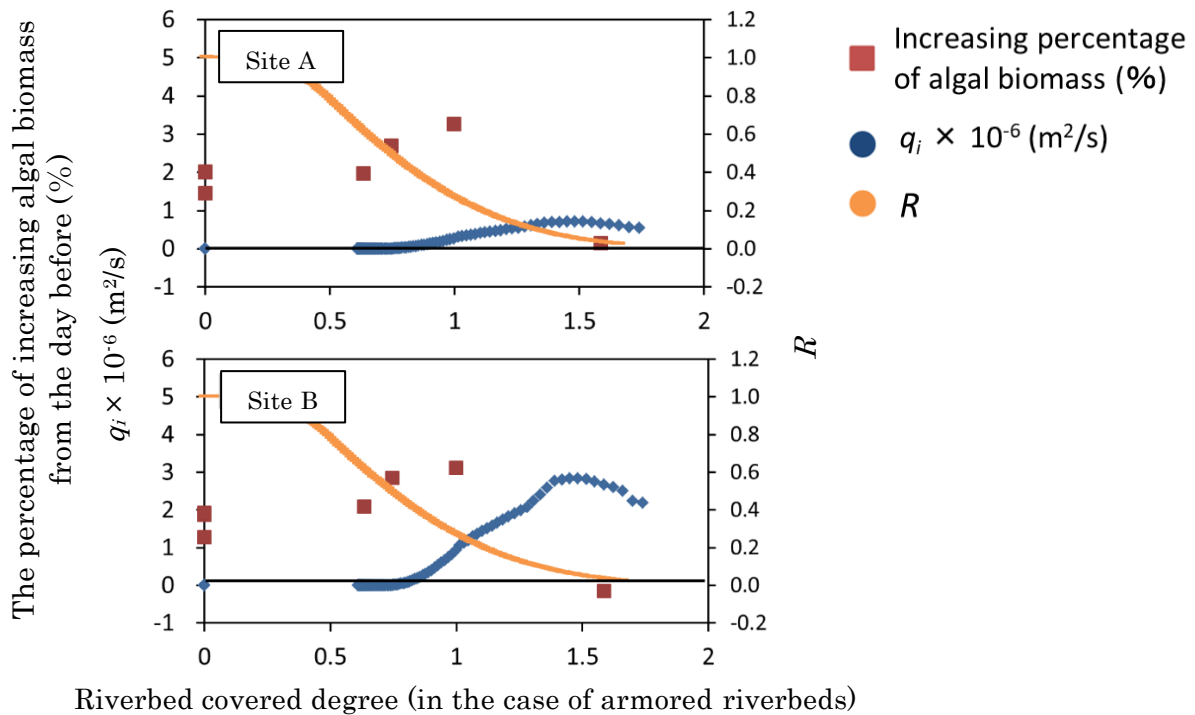


Fig.16 The relationships between riverbed covered degree, the percentage of increasing algal biomass from the day before, the bed-load sediment volume, and the ratio of exposed area on riverbed materials

5. 考察

5.1 砂面高、礫の被度割合および掃流砂量との関係

本研究の結果から、河床表層が一面に砂で覆われた場合でも、平水時の流量で3日程度経過すれば砂が流出し、砂面高がある程度の高さで安定することが示された[Fig.8]. この砂面高が安定するまでの間に着目すると、砂面高がある高さを超えると河床表層の礫割合が減少し始めるほか、掃流砂も発生しはじめ、細粒子の移動による剥離効果と堆積による露岩面積割合の減少効果がともに発生すると考えられる。そして、これにより河床1m²あたりの付着藻類現存量が大きく減少することが示唆される[Fig.15]. この砂面高と露岩面積割合との関係は、本章で開発したモデルにより定量化が可能である。さらに、砂面高を河床材料の露出高との比率で無次元化した河床埋没度に変換することで、河床の粒径によらない一般的なモデルとして用いることが可能である[Fig.16]. 本モデルは観測値との比較から、高い予測精度を有するといえる[Fig.13, 14].

芦田・道上式で計算した掃流砂量 q_i に対し、観測値(流下土砂量)から推定した値が少ない理由($\alpha = 0.20$)について補足する。計算では、大礫の高さを一律とし、それより高い砂面高では砂の被度割合を

100%としたため、砂敷設直後は高い掃流砂量が算出された。しかし、実際は大礫の高さにばらつきがあり、一部の突出した大礫により、砂敷設直後から大礫がある程度の被度割合を占めたため、計算よりも河床に働く掃流力が小さく、流下土砂量が少なくなったと考えられる。また、芦田・道上式は土砂移動が平衡状態での予測値であり、本実験では砂敷設後、上流からは給砂を行っておらず、砂敷設直後より上流端の方から非平衡状態になったことも、流下土砂量の観測値が計算値より少なくなった理由と考えられる。

5.2 砂面高と付着藻類現存量との関係

本研究で算出された P_{max} , R_{max} および I_k の値は過去に同じ場所で観測された年間の値と概ね一致しており(萱場, 2007), 妥当な範囲と考えられる。砂敷設後の P_{max} は、敷設前および対照区のもの比べて高くなり、 I_k は低くなった。これは砂の敷設により、生長開始から日数が経過し生産速度が低下した付着藻類(P_{max} が低く、 I_k が高い傾向)が除去され、新たに生長をはじめる高い生産速度を有する付着藻類(P_{max} が高く、 I_k が低い傾向)に更新されたためと考えられる。これらの付着藻類の生長段階に応じた P_{max} , I_k の傾向は既存の研究報告とも概ね一致する(Hill・Boston, 1991)。

検証により精度が確認された露岩面積割合 $R(z_s)$ 、および礫上の付着藻類現存量の予測モデルを組み合わせて、河床 1m^2 あたりの付着藻類現存量を算出した結果、砂敷設から1日後を除き、モデルによる予測値と観測値が概ね一致した[Fig.15]。このため、本モデルは礫上および河床 1m^2 あたりの付着藻類現存量の予測に対し、高い精度を有しているといえる。ただし、5.1と同様、予測値では大礫の高さおよび砂面高を一律としたが、実際はこれらの値に大きなばらつきがあることに留意する必要があるといえる。

また、河床埋没度との関係から[Fig.16]、露出高の平均値 X の0.5~1.0倍の高さまで供給土砂が堆積すれば、アーマー化した河床表層における露岩面積割合 R の減少が進行するほか、河床 1m^2 あたりの付着藻類現存量の生産速度が、土砂供給前よりも向上することが示唆される[Fig.16]。そして、0.8倍以上の高さにおいて平水時でも掃流砂が発生し始め、1.5倍の高さまで達した場合、付着藻類現存量の増加率が0%まで低下すると考えられる[Fig.16]。以上をまとめると、[Fig.17]のとおり。

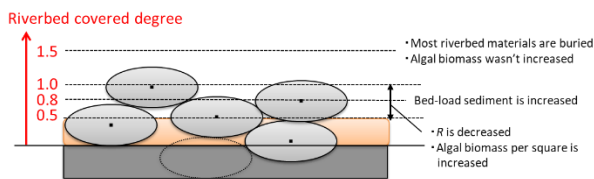


Fig.17 The relationship between river-bed covered degree and vertical riverbed structure

5.3 河床埋没度の現場への適用とその留意点

本研究では、河床の鉛直構造の変化による付着藻類現存量への効果を河床埋没度および露岩面積割合のような無次元化した指標で簡素化・一般化し、定量的に評価する手法を提案した。以下に、本手法の現場への適用方法とその課題について記載する。

今回、モデルの精度の確認を目的として行った実験では、平坦な河床地盤に石礫を一定の割合で設置し、粗粒化した河床の凹凸を再現した。この場合、石礫の底部の高さ(河床地盤高)は一定のため、河床埋没度の算出に必要な露出高の平均値は、設置した石礫の平均粒径から簡易に算出が可能であった。この点について、河川の現場では石礫ごとに底部の高さが異なるものの、2.1のように石礫底部の高さの平均値を河床地盤高として設定することで、石礫の露出高の平均値および分布状況を推定することが可能である。さらに、石礫の露出高の平均値を推定するには、河床の被度割合が必要となるが、河川の現場で

は、河床のコドラート内の被度割合または粒度加積曲線のデータから設定可能である(宮川ら, 2018)。

また、今回の実験では河床地盤面を0 mmとして、長谷川式貫入試験機による河床軟度の測定方法を参考に(鈴木ら, 2011)、砂面高の観測が可能であった。一方、河川の現場では、上記の河床軟度を調査対象の複数箇所測定することで、表層の砂面高を推定することが可能である。ただし、本モデルは、供給土砂の粒径が河床材料の間隙にほぼ入り込むほど細かいという前提条件のもと適用可能であることに留意する必要がある。さらに、実験では供給土砂が河床地盤より下には潜り込まない条件であったが、河川の現場では、河床表層に露出している石礫底部の高さよりも砂面高が低下しているケースもある。この場合、モデル上の砂面高は負となるが、現場では0 mm以下の河床軟度は測定できないため、モデル値と観測値が比較できないことにも留意が必要である。

今後の展望として、本研究では砂・砂利といった細粒子の供給を念頭にモデルの構築等を行ったが、より粒径の大きい粒子等、幅広い粒径成分に対応できるように、モデルの改良を検討することが考えられる。また、本研究ではアーマー化を念頭に、河床を固定床と仮定したが、現場では河床材料が動く規模の洪水も生じることがあるため、移動床を仮定した場合の予測方法の検討も考えられる。さらに、河床埋没度がどのような値(または状態)であれば、現場の河床および付着藻類が健全かを評価する手法について、より議論を深める予定である。具体的には、評価の時期、および予測値の扱い方(例えば、ある時点の値、ある時期における平均値または積分値、等)について、更に研究を進める予定である。

6. まとめ

本研究では、河床 1m^2 あたりの付着藻類現存量の変化を予測するため、砂面高および河床埋没度に応じた河床表層の鉛直構造の変動を数値化する手法を開発した。具体的には、河床表層の砂面高 z_s および河床埋没度を変数として、露岩面積割合 $R(z_s)$ を算出するモデルである。本モデルの精度を確認するため、平水時、流量、水質が一定の条件下を想定して、アーマー化した河床に礫が埋没する程度の砂を敷設した場合の砂面高、礫の被度面積、礫上の付着藻類現存量を観測した。そして、観測値を用いてモデルによる予測値の精度を確認し、本モデルが土砂供給前後の付着藻類現存量の予測に対して高い精度を有することを確認した。

また、河床 1m^2 あたりの付着藻類現存量についても、観測値をもとに算出した値とモデルによる予測値と

を比較し、高い精度を有することを確認した。そして、本モデルをもとに、砂面高および河床埋没度に対する河床1m²あたりの付着藻類現存量の増加率を算出した。

これらの結果、アーマー化した河床では、河床埋没度が0.5~1.0において露岩面積割合 R が減少するとともに、付着藻類現存量の増加率が土砂供給前より高くなる傾向が示された。また、河床埋没度が0.8以上で掃流砂が発生しはじめたほか、1.5付近で付着藻類現存量の増加率が概ね0%となった。

以上から、本章で開発したモデルにより、露岩面積割合の減少から付着藻類の生育面積の減少を定量的に予測し、土砂供給による付着藻類現存量の抑制効果をより精緻に予測できることが示されたといえる。本モデルのうち、特に河床の鉛直構造を石礫の露出高の分布として定量的に表す部分のモデルについては、2にて考え方・設定方法を記載し、4.2の実験結果にて精度を確認した上で、5.2にて現場への適用方法およびその留意点を記載した。本アプローチは、河床の露出高および露岩面積割合について、現場で測定する方法を提案するものである。

参考文献

- 芦田和男・道上正規 (1972) : 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, Vol.206, pp.59-69.
- 萱場祐一 (2007) : 河川中流域における物理環境場が一次生産過程に及ぼす影響に関する研究, 博士論文.
- 川島博之・鈴木基之 (1984) : 浅い富栄養化河川水質シミュレーションモデル, 化学工学論文集, Vol.10(4), pp.475-482.
- 北村忠紀・加藤万貴・田代喬・辻本哲郎 (2000) : 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.
- 鈴木崇正・角哲也・竹門康弘・中島佳奈 (2011) : 土砂供給に伴うアユ産卵河床の変化予測, 京都大学防災研年報, Vol.54(B), pp.711-718.
- 田代喬・渡邊慎多郎・辻本哲郎 (2003) : 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, Vol.47, pp.1063-1068.
- 長田健吾・福岡捷二 (2012) : 石礫河川の河床変動機構と表層石礫の凹凸分布に着目した二次元河床変動解析法, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.68(1), pp.1-20.
- 野崎健太郎・内田朝子 (2000) : 河川における糸状緑藻の大発生, 矢作川研究, Vol.4, pp.159-168.
- 福留脩文・有川崇・西山穂・福岡捷二 (2010) : 石礫河川に組む自然に近い石積み落差工の設計, 土木学会論文集F, Vol.66, No.4, pp.490-503.
- 藤田光一・山原康嗣・富田陽子・伊藤嘉奈子・小路剛志 (2008) : 大礫床表面における砂の堆積状況と浮遊砂量との関係についての実験的研究, 水工学論文集, Vol.52, pp.547-552.
- 道上正規・藤田正治・北川豊広・三村光太郎 (1994) : 空隙の大きな河床への浮遊砂の沈み込み過程と非平衡浮遊砂, 水工学論文集, Vol.38, pp.609-614.
- 皆川朋子・福嶋悟・萱場祐一 (2007) : ダム下流の河床付着膜の特徴とフラッシュ放流による掃流, 土木技術資料, Vol.49(8), pp.52-57.
- 宮川幸雄・角哲也・竹門康弘 (2018) : 土砂供給で変動する河床の石礫の露出高を予測する方法の提案, 河川技術論文集.
- 村上正吾・辻本哲郎・中川博次 (1992) : 河床砂礫の pick-up rate 推定式について, 土木学会論文集, Vol.443(II-18), pp.9-16.
- Auel C., Albayrak I., Sumi T., Boes R.M. (2016): Bed load particle dynamics in high-speed flows, Earth Surface Processes and Landforms.
- Bain M.B., Finn J.T., Booke H.E. (1985): Quantifying stream substrate for habitat analysis studies, North American Journal of Fisheries Management, Vol.5, pp.499-500.
- Bouletreau S., Garabetian F., Sauvage S., Sanchez-Perez J.M. (2006): Assessing the importance of a self-generated detachment process in river biofilm models, Freshwater Biology, Vol.51, pp.901-912.
- Borchardt M.A.: Algal ecology: chapter7 (1996): Nutrients, pp.183-227, Academic Press.
- Davies-Colley R.J., Nagels J.W. (2008): Predicting light penetration into river waters, Journal of Geophysical Research, Vol.113, pp.1-9.
- Erskine W.D.: Downstream geomorphic impacts of large dams (1985): The case of Glenbawn Dam, Applied Geography, Vol.5, pp.195-210.
- Hey R.D. (1979): Flow resistance in gravel-bed rivers, Journal of the Hydraulics Division, Vol.105, pp.365-379.
- Hill W.R., Boston H.L. (1991): Community development alters photosynthesis-irradiance relations in stream periphyton, Limnology and Oceanography, Vol.36 (7), pp.1375-1389.
- Michikami T., Hagermann A., Kadokawa T., Yoshida A., Shimada A., Hasegawa S., Tsuchiyama, A. (2016):

Fragment shapes in impact experiments ranging from cratering to catastrophic disruption, *Icarus*, Vol.264, pp.316-330.

SCOR-UNESCO (1966): Determination of photosynthetic pigments in sea-water, *Monographs on Oceanographic Methodology*, Vol.1, pp.11-18.

Wentworth C. K. (1922): A scale of grade and class terms for clastic sediments, *The Journal of Geology*, Vol.30, No.5, pp.377-392.

Wood P.J., Armitage P.D. (1997): Biological effects of fine sediment in the lotic environment, *Environmental Management*, Vol.21(2), pp.203-217.

(論文受理日 : 2018年6月13日)