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)).

$$P(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{z-z_a}{\sigma}\right)^2\right)$$
(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z₀(m)との差と設定する(式(2), Fig.3).ここで,河床地盤の高さz₀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z₀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.

$$x = z_h - z_0 \tag{2}$$

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

$$S = z_h - z_b \tag{4}$$

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

最後に, 露出高の平均値*xa*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).

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



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(17~64mm)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xai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).

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

$$a_i = \frac{x_i - S_i}{S_i} \tag{8}$$

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)).

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

$$X = \sum_{i=1}^{3} F(i) \int_{0} x_{i} P(a_{i}) dx_{i}$$
(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_{bal} 、 z_{ba3} と、 F(1)~(3)を組み合わせた式で設定し(式(11))、それ $に基づき式(7)~(10)の露出高<math>x_i \in x_i$ 、に補正した(式 (12)、Fig.4).

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

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



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 土砂のものと比べて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zo(=0 mm)上からとした. すなわち、河床地盤の高さzoに対する砂面の高さを 砂の堆積厚とし、砂面高zs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、zsの上昇分だけ減少することとなる.

そして,砂面高zs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(zs, 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].

$$z_{s} < z : \quad A(z_{s}, z) = \pi \cdot 0.5Y \cdot 0.35Y$$

$$z < z_{s} < z + 0.25Y :$$

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

$$z_{s} > z + 0.25Y : \quad A(z_{s}, z) = 0 \quad (13)$$

最後に、これらの仮定および設定のもと、砂面高 $z_s e$ 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)).

$$R(z_{s}, z) = \sum_{i=1}^{3} F(i) \frac{\int_{0}^{0} P(z)A(z_{s}, z)dz}{\pi \cdot 0.5Y \cdot 0.35Y}$$
(14)
(*i*t *i*t *i*, 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 zsの比を河床埋没度と定義し、砂面高zsに対するRの 変化をグラフ化した上で,x軸にあたるzs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,木曽川水系の河川水 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160 mm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ー 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 100 mm以上)の間隙に入るものとし、その下の地盤 (平均粒径が約10 mm)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Zs

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15,30,45 m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1 m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1 mm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50 mm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1m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0.5×0.5m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①257mm以上,中礫の粒径を表す指標とし て②65~256mm,河床地盤の材料の粒径を表す指標 として③3~64mm,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380mm,奥行264mm,高 さ155mm)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Fs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.

$$R' = 1 - F_s \tag{15}$$

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 t_i^* (式(16)),ある粒径区分iの粒子の無次元限 界掃流力 t_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).

$$\tau_i^* = \frac{u^{*2}}{Rgd_i} \tag{16}$$

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

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

$$\frac{u}{u^*} = 5.75 \log_{10} \left\{ \frac{11.16h}{3.5D_{84}} \right\}$$
(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%となる粒子径 (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)).

$$\tau_{i}^{*} > \tau_{ci}^{*} \quad \frac{q_{i}}{F(i)u_{e}^{*}d_{i}} = 17\tau_{ei}^{*} \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{ei}^{*}}{\tau_{i}^{*}}}\right) \left(1 - \frac{\tau_{ei}^{*}}{\tau_{i}^{*}}\right)$$
$$\tau_{i}^{*} < \tau_{ci}^{*} \quad q_{i}^{*} = 0 \tag{20}$$

$$q_{iA} = 0.17 \cdot \alpha \cdot q_i \qquad q_{iB} = 0.6 \cdot \alpha \cdot q_i \tag{21}$$

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)).

$$\tau_{ei}^{*} = \frac{u_e^{*2}}{Rgd_i} \tag{22}$$

式(21)の掃流砂量に関する補正係数αは, 算出した*qi* 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, *qiA*, *qiB*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(×0.03,式(23)).

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

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、 光量子東密度、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).

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

$$Re = M \cdot R_{\max} \cdot 1.047^{(T-20)}$$
 (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(℃), *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. Nk, Pk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, *Ib*, *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PmaxおよびIkは異なるため (Hill・Boston, 1991), 剥離前後の付着藻類のPmaxおよ び1k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).

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

ここで、 c_{auto} :自己剥離に関する係数 (= 1.0×10^{-15} mgchl.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 mgchl.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).

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

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

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

ここで、 β : 剥離のしやすさを表す係数 (= 3.0×10^{-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 (= 4.94×10^5 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.

 $z_h > z_s + 20$ $De' = De \cdot \frac{z_s + 20}{z_h}$ $(z_h < z_s + 20, De' = De)$ (29) ここで, *zh*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Ib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Pmax. RmaxおよびIk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 Pmax, RmaxおよびIk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PmaxおよびIkの算出を行 った.このとき、Rmaxは剥離前と変わらないとし、Pmax および」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(zs)*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(zs)*の算出に必要となる砂 面高*z*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(zs)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(zs)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zs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zs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(zs)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(zs)=0.8951R'+0.0261, R²=0.8803).











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*qi*を補 正した結果,式(21)のα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, PmaxおよびRmaxがそれぞれ3.5, 1, Ik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Pmaxが6, Ik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(zs)*,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(zs)*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(α = 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Pmax, RmaxおよびIk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Pmaxは,敷設前および対照区のものと比べて高 くなり,Ik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(Pmaxが低く,Ik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 (Pmaxが高く,Ik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 Pmax,Ik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(zs), 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,河床1m²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1m²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1m²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 の複数箇所で測定することで、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、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1m²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₂₅および河床 埋没度を変数として、露岩面積割合*R(zs)*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 一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1m²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・西山穏・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・冨田陽子・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 Ameri-can 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 selfgenerated detachment process in river biofilm models, Fleshwater 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)