

アーマー化した河床への土砂流入による 河床表面の鉛直構造の変動が付着藻類に 及ぼす効果の予測

PREDICTION OF ALGAL BIOMASS ON ARMORED RIVERBEDS
AFTER CHANGE OF VERTICAL RIVERBED SURFACE BY SEDIMENT SUPPLY

宮川幸雄¹・角哲也²・竹門康弘³
Yukio MIYAGAWA, Tetsuya SUMI and Yasuhiro TAKEMON

¹正会員 工修 土木研究所 水環境研究グループ 自然共生研究センター
(〒501-6021 岐阜県各務原市川島笠田町官有地無番地)

²正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³正会員 理博 京都大学准教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

Riverbeds with sediment deficits and stable boulders are referred to as armored riverbeds. Sediment replenishment is one of the effective methods to resupply depleted sediment and detach algae that has overgrown on armored riverbeds. However, there are few methods available to predict algal biomass detachment when fine sediment is deposited after flooding, decreasing the area of exposed stone surface available for algae growth. Therefore, this study aimed to predict the algal biomass per unit area after sediment replenishment by creating a prediction model based on the relationship between sediment heights and exposed stone surface area. From the results, the model can be used to predict algal biomass per unit area. Furthermore, the results show that the flow patterns of sediment mainly depend on flow regime, but the patterns can be managed by altering the volume and location of the replenished sediment.

Key Words : periphyton, dam, riverbed elevation, flushing flood, sediment replenishment

1. はじめに

上流からの土砂の流下がダムにより長期間阻害されると、下流の河床表層から粒径の細かい砂利や砂が流出し、粒径の粗い石のみが残り、その石が鎧 (armor) のように河床を覆った状態で安定する。このような現象を河床のアーマー化 (armoring) と呼ぶ¹⁾。Bainの6段階の粒径区分に基づけば²⁾、アーマー化した河床では、cobble以上 (65 mm) の河床材料によって、河床に空間的な変動 (凹凸) が形成され、そこに付着藻類が定着・生育すると考えられる。本研究では、この65 mm以上の粒径の河床材料を石とよぶ。一方、cobble以下 (～64 mm) の粒径の河床材料は石上を通過して、付着藻類の剥離を促進させるが³⁾、アーマー化した河床ではこれらが不足するため、付着藻類の剥離や新たな藻類への更新が停滞し、異常繁茂等の異変が生じる事例⁴⁾ が報告されている。

これに対し、ダム湖に堆積した土砂を下流に置土とし

て供給する等、アーマー化した河床に人為的に土砂を供給することで、付着藻類の剥離を促す取り組みが日本国内で実施されてきた。そして、室内実験およびダム下流の現場にて、増水時の土砂の供給により、付着藻類が多く剥離することが報告されている⁵⁾⁶⁾。この剥離に寄与する土砂の粒径は、Bainの粒径区分に基づけば²⁾、gravelに相当する概ね2～16 mm程度であることが多い。本研究ではこれらを砂礫とよぶ。増水時に供給された砂礫は剥離された付着藻類とともに下流に流出するが、増水の終了後、一部は河床表面に残存することがある。この場合、河床表面における石の露出面積 (以下、露岩面積) が、砂礫の堆積高さ (以下、砂礫高) に応じて減少する⁷⁾。砂礫上には付着藻類がほとんど生育しないため、露岩面積が減少した分、付着藻類の生育面積が減少することになる。すなわち、砂礫が供給された場合、衝突による剥離効果のみでは、付着藻類の現存量の減少を過小に見積もるおそれがある。砂礫の堆積による露岩面積の減少を評価するには、増水の終了後における河床表面の

鉛直構造の変化が付着藻類に及ぼす効果を考慮する必要があるが、既存の報告は増水中の砂礫の衝突による剥離効果のみに言及したものが多くが現状である。

この砂礫の堆積効果の評価には2つの課題がある。ひとつは、流下した砂礫の量は、増水開始からの流量、時間およびダムからの距離に応じて分布を持つ点である⁸⁾。このため、増水後の期間を含めた数日または数ヶ月にわたる長期的な砂礫高の変動予測は困難である。もうひとつは、露岩面積が、砂礫高だけではなく石が形成する河床の凹凸の程度にも左右される点である⁷⁾。この河床表面の鉛直構造の時間的な変化を考慮し、付着藻類の現存量を予測する手法は未だ確立されていない。

そこで本研究ではアーマー化した河床を対象に、既存の砂礫高および付着藻類の現存量を予測するモデルに対し^{6,7)}、砂礫高から露岩面積を推定する方法を追加し、付着藻類の現存量をより精緻に予測する方法を提案する。本モデルで予測する付着藻類の現存量は、石上の付着藻類の現存量と露岩面積割合との積から算出される 1m^2 あたりの現存量である。さらに、本モデルを用いて、あるダムを事例として種々の条件で置土した場合の付着藻類の現存量の変化を予測し、置土の効果の評価を行った。

2. 方法

(1) 研究サイトと調査データ

本研究では、荒川本川の二瀬ダムの下流を対象として検証を行った。このダムでは、2003年度からダム直下で置土および置土後のモニタリング調査が継続して実施されている。置土は、前年度の非洪水期間中（概ね11～3月）に行われ、その年度の洪水期間中（概ね4～10月）に流下している。年度によって流下した土砂量は異なるが、約 $5,000 \sim 15,000 \text{ m}^3/\text{year}$ である。

予測の対象区間は、ダム直下から、支川である中津川合流地点の約 4.0 km までとした（図-1）。この区間では、3地点で調査が行われており、以下St.1～St.3（置土地点（St.A）から約 $0.7, 1.8, 2.7 \text{ km}$ 下流）として、各地点の砂礫高等の予測を行った（図-1）。また、本研究では、置土を2ヶ所に分けて設置した場合の仮想的な置土地点として、St.2から 300 m 上流にSt.Bを設定した（図-1）。予測に用いるモデルの感度分析のため、2003～2013年度までの、St.1～St.3における1時間ごとに観測された流量（ m^3/s ）データを収集した。各地点の流量は、St.1の流量は二瀬ダムの放流量、St.3の流量は二瀬ダムから約 3.5 km 下流の落合観測所とし、St.2の流量は、同時刻における両者の平均値とした。また、置土流下後の非洪水期間中には、河床材料調査が年1回、付着藻類調査が年1～3回の頻度で実施されており、2003～2013年度のSt.1～St.3におけるこれらのデータも収集した。このとき、付着藻類の現存量の指標は、 $\text{chl.}a$ 量（ mg/m^2 ）とした⁹⁾。

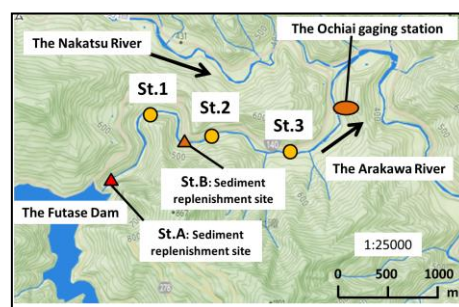


図-1 二瀬ダム下流の観測地点。

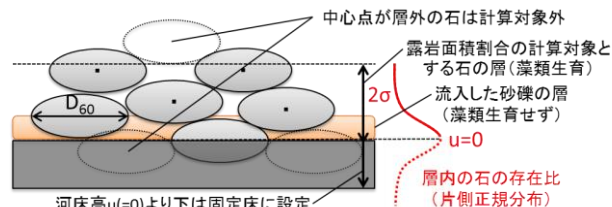


図-2 河床高、石・砂礫の層および層内の石の鉛直分布に関する設定。

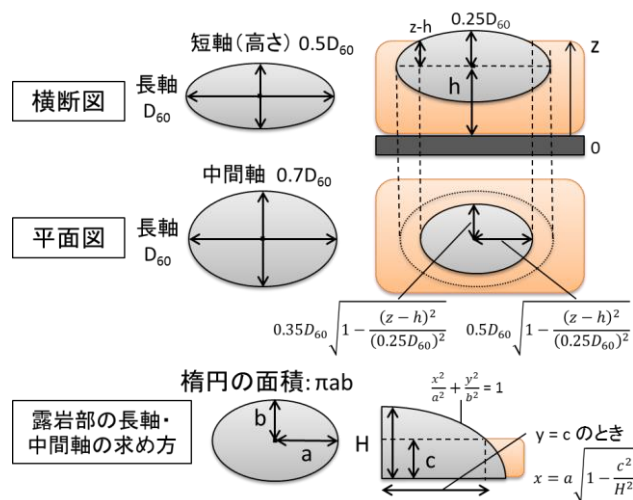


図-3 石の一部が砂礫で埋没している場合（ $h < z < h + 0.25D_{60}$ ）の露岩面積の設定。

(2) 砂礫高から露岩面積を推定する方法

はじめに、河床材料が D_{60} の単一粒径の石で構成されていると仮定した。そして、石の頂部の高さの鉛直分布は、村上¹⁰⁾の研究をもとに、河床高を平均値とした正規分布と仮定した（図-2）。このときの河床は固定床とし、河床高より上の石で形成された凹凸に砂礫が流入し、河床表面の鉛直構造が変動すると設定した（図-2）。河床高を 0 としたとき、ある石の中心点がある高さ h に存在する確率は、正規分布の式を用いて下記で表される。

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

ここで、平均 u は河床高で 0 とし、分散 σ は村上らの仮定をもとに $0.3D_{60}$ とした¹⁰⁾。また、この石に対し砂礫高が z となったとき、中心点が高さ h にある石の上面から見た露岩割合 $A(z, h)$ は、石を長軸が D_{60} 、短軸が高さの楕円体と仮定し、式(2)で設定した（図-3）。石礫の長軸、中間

軸，短軸の比は，1:0.7:0.5と仮定した¹¹⁾ (図-3)。

$$z < h : A(z, h) = \pi * 0.5D_{60} * 0.35D_{60}$$

$$h < z < h + 0.25D_{60} :$$

$$A(z, h) = \pi * 0.5D_{60} * 0.35D_{60} * \left(1 - \frac{(z-h)^2}{(0.25D_{60})^2} \right)$$

$$z > h + 0.25D_{60} : A(z, h) = 0 \quad (2)$$

これらの仮定および設定のもと，砂礫高が z となった場合の 1m^2 あたりの露岩面積を露岩面積割合 $R(z)$ として，式(3)で求めた。ここで，計算対象とする石は中心点が河床から 2σ ($=0.6D_{60}$)にあるものとした (図-2)。

$$R(z) = \frac{\int_0^{0.85D_{60}} P(h) * A(z, h) dh}{\pi * 0.5D_{60} * 0.35D_{60}} \quad (3)$$

これらは河床を単一粒径と仮定した場合での設定のため，長田らの河床変動計算をもとに，河床材料を粒径ごとに区分し，各区分の石が河床高を平均値として正規分布していると仮定して，混合粒径を想定した計算を行った¹²⁾。しかし，この結果は，単一粒径の $R(z)$ とほとんど変わらなかったため，計算負荷を軽減する観点から，単一粒径と仮定した計算を行った。また，既存のモデルに本研究で設定した z と $R(z)$ との関係式を追加する際，算出された D_{50} を観測値と比較し，精度の検証を行った。

(3) 置土による砂礫高および D_{60} の変化の計算

本研究では，置土から発生した掃流砂量 q_s を流砂量式 (式(4))，掃流砂によるSt.Aの砂礫高 z の変化を河床位方程式 (式(5))，下流のSt.1～St.3の砂礫高 z の変化をLisleら¹³⁾の土砂波の拡散方程式 (式(6))を用いて計算した^{8), 13)}。これらのモデルは，既存の研究で既に二瀬ダムにてキャリブレーションが行われ，整合性が確認されたものである⁷⁾。

$$q_s = \left(\frac{Kc_f^{3/2}u^3}{R_s g} \right) \quad (4)$$

$$\frac{dz}{dt} + \frac{1}{B(1-\gamma)} \frac{\partial Bq_s}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{Kq C_f^{1/2}}{R_s(1-\gamma)} \left[\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial}{\partial x} (1 - F_r^2) \frac{\partial h}{\partial x} \right) \right] \quad (6)$$

ここで， K ：Meyer-Peter and Müllerの経験式に基づく係数($= 8$)， c_f ：摩擦係数， u ：平均流速(m/s)， R_s ：砂粒子の水中比重($= 1.65$)， g ：重力加速度($= 9.8 \text{ m/s}^2$)， q ：単位幅あたりの流量($\text{m}^3/\text{m/s}$)， B ：川幅(m)， γ ：空隙率($= 0.3$ と設定)， F_r ：フルード数， h ：水深(m)である。各パラメータは，宮川ら⁷⁾に基づき設定した。本方法は，現状，固定された石に砂礫が流入・流出するケースにのみ適用できるが，次元河床変動計算よりも少ない計算負荷で砂礫高の変化を推定可能である。置土から砂礫が動く条件は田中・古里¹⁴⁾の提唱した移動限界粒径 D_{cri} を用いて， D_{cri} が 2 mm を上回った時に発生するものとした(式(7),(8))。

$$\tau = \rho \left(\frac{\kappa u}{\ln(10h / D_{84})} \right)^2 \quad (7)$$

$$D_{cri} = \left(\frac{\tau}{0.045R_s g D_{50}^{0.6}} \right)^{2.5} \quad (8)$$

ここで， τ ：河床材料に働く掃流力($\text{kg/m}^2\text{s}^2$)， ρ ：水の密度($= 1000 \text{ kg/m}^3$)， κ ：カルマン定数($= 0.4$)， D_{84} ：84%粒径(m)， D_{50} ：50%粒径(m)である。これらの式を用いてSt.1～St.3における z および $R(z)$ の時間変化を算出した。

そして，2004～2013年度の中で，砂礫高の上昇が最も大きい2010年度，洪水規模が大きい2004年度を対象として，次の5通りの置土を想定した計算を行った。

Case-1：十分量 (流下可能な分だけ) 置土した場合
(2004：38,000 m^3/year ，2010：18,000 m^3/year)

Case-2：置土が不足する場合 (Case-1の半分を置土)

Case-3：Case-1の置土を半分ずつ2ヶ所 (St.A, B) に分けた場合

Case-4：Case-1の置土を半分ずつ2回 (3月，9月) に分けた場合

Case-5：置土を行わなかった場合

2010年度は生起確率 (1993～2013年の日平均放流量より計算) が1/1程度の洪水 (ピーク流量：約100 m^3/s) が発生しており，2004年度は生起確率が1/5程度の洪水 (ピーク流量：約200 m^3/s) が発生している。生起確率が1/10程度の洪水が発生している2007，2011年度では河床の石が動く規模のため本研究の計算対象から除外した。

(4) 1m^2 あたりの付着藻類の現存量の変化の予測

本モデルでは，石上の付着藻類の現存量 (以下，石の藻類現存量) と，(3)で $R(z)$ として算出した露岩面積との積から， 1m^2 あたりの付着藻類の現存量 (以下， 1m^2 の藻類現存量) を求めた。

石の藻類現存量は，萱場¹⁵⁾の生長速度と剥離速度の収支から推定するモデル (式(9))を用いて算出した。

$$\frac{dB_{chl.a}}{dt} = G - R - D \quad (9)$$

ここで， $B_{chl.a}$ は $chl.a$ 量(mg-chl.a/m^2)， G は一次生産速度， R は呼吸速度， D は剥離速度を表す。 G および R は，藻類の生長に必要な栄養塩濃度および溶存酸素量が河川中に十分にある場合，式(10)，(11)で表される¹⁵⁾。

$$G = P_{max} \cdot 1.047^{T-20} \frac{I}{I_k + I} \quad (10)$$

$$R = R_{max} \cdot 1.047^{T-20} \quad (11)$$

ここで， P_{max} は20℃における全基質飽和条件下での最大光合成速度($= 3.5$ と設定， $\text{mg-chl.a/m}^2/\text{hr}$)， T は水温(℃)， I は光子束密度($\mu\text{mol/m}^2/\text{hr}$)， I_k は半飽和定数， R_{max} は20℃における全基質飽和条件下での最大呼吸速度($= 3$ と設定， $\text{mg-chl.a/m}^2/\text{hr}$)を表す。一方， D は，2.(3)で推定した掃流砂量 q_s を用いて式(12)で表される⁴⁾。

$$D = \beta \cdot \gamma \cdot q_s \cdot d^{1/3} \cdot u_*^{2/3} \cdot B_{chl,a} \quad (12)$$

ここで、 β は砂粒子による剥離のしやすさを表す係数（ $= 3.0 \times 10^{-4}$ と設定）、 γ は摩擦による仕事に関する係数（ $= 4.94 \times 10^5$ と設定）、 d は砂礫の代表粒径（ $= 2 \text{ mm}$ と設定）、 u_* は底面の流速(m/s)を表す。 u_* は Heyの式を用いて平均流速 u から算出した¹⁶⁾。本モデルは、既存の研究でキャリブレーションが行われ、既に整合性が確認されたものである⁹⁾。

初期条件を統一するため、現存量は 30 mg/m^2 、河床の D_{60} は既存の調査データからSt.A, B, 1, 2を 450 mm 、St.3を 350 mm に設定し計算を実施した。付着藻類は、剥離からおおよそ1ヵ月で剥離前と同程度の現存量に戻るから¹⁷⁾、洪水期間中に最後に剥離が発生した日から30日間の現存量を計算した(2004, 2012年度とも、10～11月を計算対象とした)。最後に、石の藻類現存量の計算部分の精度を確認するため、計算値と2004および2010年度の11月頃に観測された石の藻類現存量とを比較した。

3. 結果

(1) 観測値と露岩面積割合を加味したモデル値との比較

砂礫高 z と露岩面積割合 $R(z)$ との関係は図-4のとおりとなった。さらに、 D_{50} の計算値と観測値と比較し、キャリブレーションを行った結果、地点ごとの精度にはばらつきがあり、計算値が観測値よりも高い傾向が見られたが、両者の年変動は概ね同じ傾向となった(図-5)。

(2) 置土による砂礫高 z および D_{60} の変化

2010年度の各ケースの砂礫高 z を図-6の左側、 D_{60} を右側に示す(図-6)。この結果、置土の流下が始まった7月以降、Case-1の方がCase-5よりも砂礫高が高い傾向であり、これによりCase-1では特に7, 11月にCase-5より D_{60} が小さくなった(図-6)。この傾向は置土から近い箇所ほど強くなった(St.1>St.2>St.3, 図-6)。一方、Case-2の結果は、7月に砂礫高が数日程度上昇したことを除けば、Case-5と概ね同じであった(図-6)。Case-3は、Case-1と比べ、St.1の砂礫高があまり増加しなかったが、St.2, 3の増加量がなくなった結果、地点間の効果が均一化された(図-6)。Case-4はCase-1と同じ結果であった。また、2004年度の結果では、置土の流下が始まった10月以降、2010年度と概ね同じ傾向が見られた。

(3) 置土による付着藻類の現存量の変化

各年度・地点の 1m^2 の藻類現存量および石の藻類現存量の結果を図-7に示す。全年度・地点でCase-1, 3, 4の藻類現存量がはじめに急減し、Case-2, 5より低い傾向となった(図-7)ほか、Case-2, 5では、石の藻類現存量と 1m^2 の藻類現存量に差が生じなかった。そこで、各年度

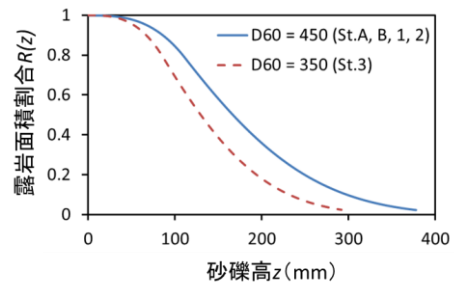


図-4 砂礫高 z と露岩面積割合 R との関係。

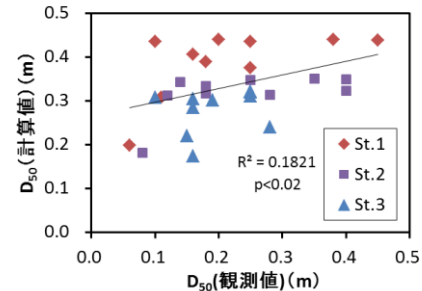


図-5 D_{50} の観測値と計算値の比較。

のCase-1, 3, 4の傾向に着目すると、2010年度は、St.1, 2にて石の藻類現存量に対し 1m^2 の藻類現存量が少ない状態が継続した(図-7)。また、Case-1, 4では各地点の 1m^2 の藻類現存量が $\text{St.3} > \text{St.2} > \text{St.1}$ となったが、Case-3では $\text{St.2} > \text{St.1} > \text{St.3}$ となった。一方、2004年度の 1m^2 の藻類現存量は、全地点でCase-1, 4がCase-3よりの少ない結果となり、特にSt.1, 2ではほとんど増加せず、石の藻類現存量との差も大きくなった。また、2004, 2010年度11月頃の石の藻類現存量の観測値は、 $14.1 \sim 31.9 \text{ mg/m}^2$ であり、Case1,3,4における石の藻類現存量(約 20 mg/m^2)と概ね一致し、石の藻類現存量の計算部分の精度が確認された。

4. 考察

(1) 露岩面積割合 $R(z)$ を追加したモデルの評価

本モデルは、アーマー化した河床において、現場スケールで、ある地点から供給される砂礫が下流の露岩面積割合に及ぼす影響を定量的に評価することが可能である。また、キャリブレーションの結果から(図-5)、モデルの精度も確認されている。ただし、計算値に対し観測値の D_{50} が高い傾向となったことは、観測時は計算時より少ない砂礫量で z が上昇し河床表面の粒径分布が細粒化されていることを意味する。この理由として、本モデルは、 $350 \sim 450 \text{ mm}$ の粒径のアーマー化した河床に1オーダー程細かい $2 \sim 16 \text{ mm}$ 程度の粒径の土砂を供給する場合を想定しており、計算では石の間に砂礫が充填される前提である。しかし、現場で供給される土砂の一部には、砂礫以上の粒径も含まれており、一部が間隙に入らず表層に残存し、その分だけ表層の粒径が細くなった可能性がある。このような河床表面の鉛直構造を考える上での土砂のより細かな挙動の再現に関しては、

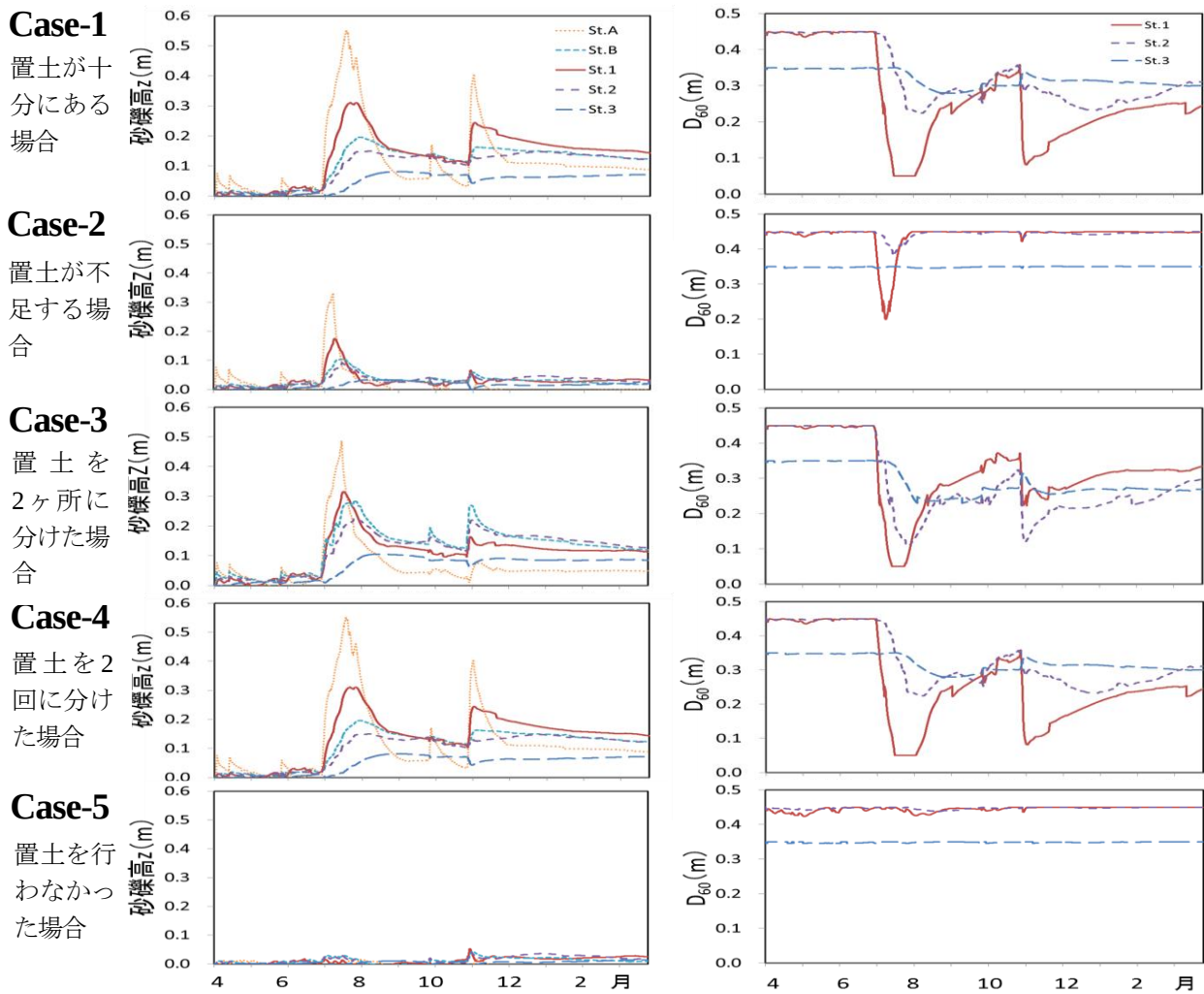


図-6 2010年の各置土のケースにおける砂礫高 z (左) および D_{60} (右) の計算結果

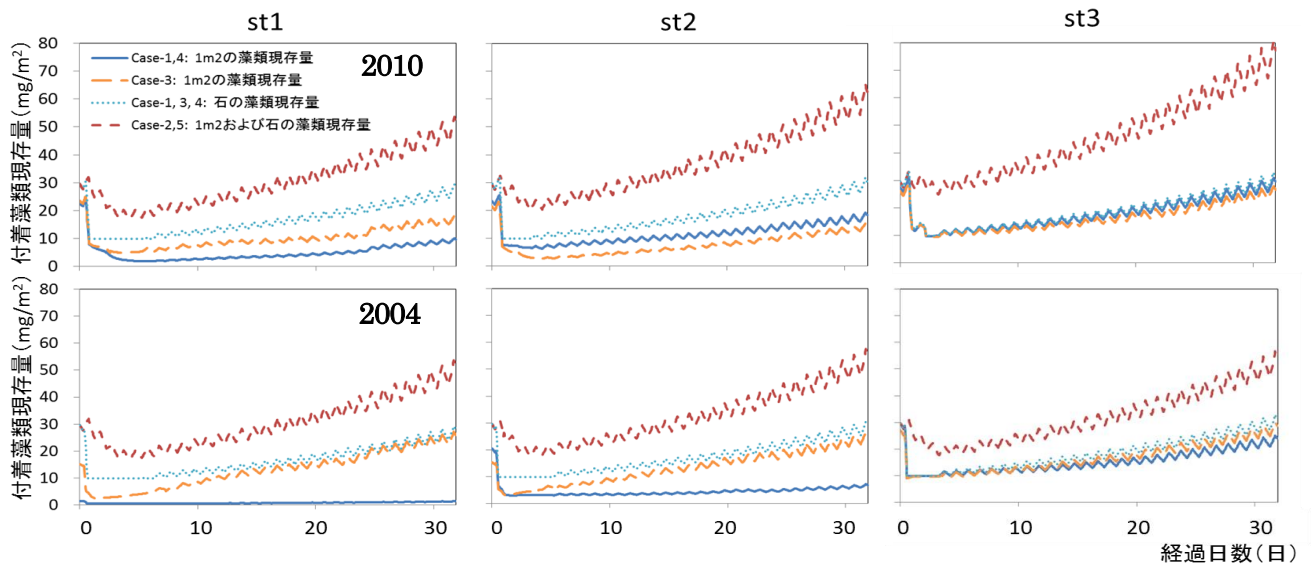


図-7 各置土のケースにおける増水後の付着藻類の現存量の予測結果 (上段: 2010, 下段: 2004)

今後の課題である。

(2) 置土による砂礫高の変化の予測および評価

置土あり (Case-1~4) となし (Case-5) の結果から、置土からの土砂の流下が砂礫高の増加を通じて河床の細

粒化に貢献したことがいえる (図-6)。置土から近い箇所ほど砂礫高がより増加し、効果に差が生じるが、Case-1と3を比較すると、置土を複数の箇所に設置することで、地点間の効果の差を緩和できることが示唆される。ただし、対象区間から砂礫が早く流出するため、河

床が細粒化される期間が短くなると考えられる。

また、Case-1と2の結果より、置土が不足すると、洪水期間中に対象区間から砂礫が流出し、再度粗粒化する可能性が高くなると考えられる。置土による効果を持続させるためには、年度中に流下させることが可能な置土量を予測する必要があるが、これは年間の流量パターンに依存するため、洪水の生起確率などからある程度推定することが可能と考えられる。

(3) 1m²あたりの付着藻類の現存量の予測および評価

置土が流下したCase-1, 3, 4の場合では、1m²の藻類現存量が石の藻類現存量よりも少なくなったことから（図-7）、これらのケースでは砂礫高の増加による露岩面積割合の減少が生じているといえる。このため、本モデルにより、砂礫の堆積による露岩面積の減少を定量化した上で、付着藻類の現存量を予測できることが示唆された。特に、2004年度の生起確率1/5程度の洪水において、Case-1, 4におけるSt.1, 2の1m²の藻類現存量が約1ヵ月増加しないと予測されたことについては、増水時の砂礫の衝突による剥離だけでは土砂供給が付着藻類に及ぼす影響を過小に評価する可能性があることが示されているといえる。

このため、生起確率1/5程度の洪水で置土が一度に流出した場合、剥離後の付着藻類の生育が1ヵ月程度遅れる可能性が示唆される。この場合、置土量を調整する（生起確率1/1の洪水で流出する程度にとどめる）、または設置箇所を2ヶ所に分けて各地点への流下土砂量を分散させる等、供給土砂の適切な管理により付着藻類への影響を緩和させることが可能と考えられる。

5. まとめ

本研究では、アーマー化した河床に対し砂礫を供給する場合を想定し、砂礫高から露岩面積割合を推定する方法を開発し、この方法を既存のモデルに加えて精度を検証するとともに、置土を行った場合の砂礫高および1m²あたりの付着藻類の現存量を予測した。この結果、観測値との比較からモデルの精度が確認されるとともに、予測結果から、主に流量が置土の流下パターンを左右するが、置土量を調整する、置土の設置箇所を複数に分ける等により、砂礫高の上昇および露岩面積の減少を緩和できることが示唆された。

参考文献

- 1) Simons, D. B.: Effects of stream regulation on channel morphology. In: Ward J. V. and Stanford J.A. (eds.), "The Ecology of Regulated Streams", Plenum, New York, pp.95-111, 1979.
- 2) Bain, M. B., Finn, J. T. and Booke, H. E.: Quantifying stream substrate for habitat analysis studies, *North American Journal of Fisheries Management*, Vol.5, pp.499-500, 1985.
- 3) Homer, R. R., Welch, E. B., Seeley, M. R., and Jacoby, J. M.: Responses of periphyton to changes in current velocity, suspended sediment and phosphorus concentration, *Freshwater Biology*, Vol.24, pp.215-232, 1990.
- 4) 内田臣一, 加藤大典, 末松朋浩, 西山正臣: 矢作川のアーマー化した河床における砂礫粒径の特徴, 愛知工業大学研究報告, Vol.37, pp.109-114, 2002.
- 5) 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.
- 6) 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的管理試験「フラッシュ放流」, 河川技術論文集, Vol.11, pp.273-278, 2005.
- 7) 宮川幸雄, 角哲也, 竹門康弘: 砂面の変動高, 礫の被度面積を考慮した付着藻類の現存量の変動予測, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.73(4), pp.1183-1188, 2017.
- 8) 宮川幸雄, 角哲也, 竹門康弘: 土砂の流下波形 (Sediment wave) を考慮した置土による河床改善効果評価モデルの提案, 河川技術論文集, Vol.22, pp.193-198, 2016.
- 9) SCOR-UNESCO: Determination of photosynthetic pigments in seawater, *Monographs on Oceanographic Methodology* 1, pp.11-18, 1966.
- 10) 村上正吾, 辻本哲郎, 中川博次: 河床砂礫のpick-up rate推定式について, 土木学会論文集, Vol.443(2), pp.9-16, 1992.
- 11) Michikami, T., Hagemann, A., Kadokawa, T., Yoshida, A., Shimada, A., Hasegawa, S., and Tsuchiyama, A.: Fragment shapes in impact experiments ranging from cratering to catastrophic disruption, *Icarus*, Vol.264, pp.316-330, 2016.
- 12) 長田健吾, 福岡捷二: 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, 2012.
- 13) Lisle, T.E., Cui, Y., Parker, G., Pizzuto, J.E., and Dodd, A.M.: The dominance of dispersion in the evolution of bed material waves in gravel-bed rivers, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol.26, pp.1409-1420, 2001.
- 14) 田中規夫, 古里栄一: ダム下流礫床河川における水生昆虫動態と小型河床材料移動性の人為的土砂供給前後の変化, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.70, pp.1327-1332, 2014.
- 15) 萱場祐一: 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, 2007.
- 16) Hey, R.D.: Flow resistance in gravel-bed rivers, *Journal of the Hydraulics Division*, pp.365-379, 1979.
- 17) Biggs, B. J. F., Smith, R. A., and Duncan, M. J.: Velocity and sediment disturbance of periphyton in headwater streams: biomass and metabolism, *Journal of the North American Benthological Society*, Vol. 18, pp.222-241, 1999.

(2017. 4. 3受付)