

ダム下流への置土が河床粒径分布および 付着藻類の現存量に及ぼす効果

The Effect of Sediment Replenishment on Riverbed Material Size Distribution and Algal Biomass at Downstream of Dams

宮川幸雄⁽¹⁾・角哲也・竹門康弘・小林草平

Yukio MIYAGAWA⁽¹⁾, Tetsuya SUMI, Yasuhiro TAKEMON and Sohei KOBAYASHI

(1) 土木研究所 自然共生研究センター

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

Synopsis

Sediment replenishment is one of the effective methods to prevent a sediment deficiency and detaching overgrowing algae in downstream reaches of dams. In this study, we examined the effect on a bed material size and algal biomass based on data measured in Futase dam. We assumed that algae detaches from the bed materials when the bed materials are moved by flow. So, threshold bed material size in motion D_{cri} for a given τ is calculated. The result showed that in winter, algal biomass was very high if flow was constantly low (No.1). However, other result showed that the algal biomass was not so high if D_{cri} was temporally high (No.2). This is probably because the bed materials of No.2 were finer and easier to move by flow than those of No.1. Thus, sediment replenishment promotes detachment of algae not only by enhancing sediment transport during major floods but also by covering riverbed with fine materials and reducing bed stability in winter.

キーワード: 土砂供給, 河床の攪乱, 剥離, 掃流力

Keywords: sediment-supply, riverbed disturbance, detachment, tractive force

1. はじめに

ダム湖に土砂が堆積することで、ダムの治水能力が低下するだけでなく、下流への土砂供給量が減少し、河床の低下および粗粒化が進行する (Erskine, 1985)。これにより、河床の細粒土砂が減少し、河床礫に付着する藻類群集 (付着藻類) が、細粒土砂の衝突で剥離される機会が減少する可能性が報告されている (皆川ら, 2007)。付着藻類が剥離せず残存する期間が長い環境下では、異常繁茂および流下無機物の堆積が生じやすくなる。これらは、付着藻類を餌とするアユ等の水生生物の生息に多大な影響

を及ぼすおそれがある。これに対し、ダム湖に堆積した土砂を掘削して下流に置土し、増水時に流下させる (Kantoush et al., 2010) ことで、河床の低下および粗粒化を抑えるほか、付着藻類の剥離を促す効果が期待されている。

付着藻類のバイオマス (付着藻類現存量) は生長による増加と剥離による減少で決定される (Biggs, 1996) [Fig. 1]。生長による増加速度は、河床に到達する光、水中の栄養塩濃度、水温に左右され、それらを変数とした関数によって定量化される (戸田ら, 2001)。一方、剥離による減少は、流水および流水中の粒子による攪乱、付着藻類内の代謝による枯死、

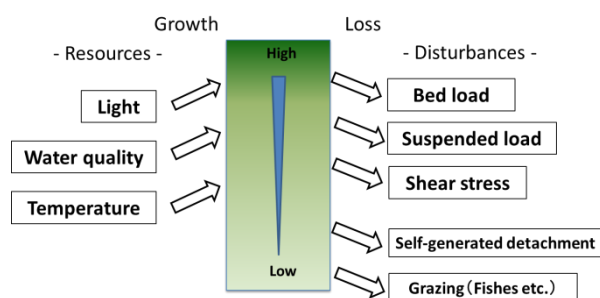


Fig. 1 Resources and disturbances related to attached algal biomass

水生動物による摂食および水生動物の移動で生じる攪乱により促進される。この中で、置土は土砂粒子による攪乱を生起させる要因として、付着藻類の剥離に貢献すると考えられる。この置土の効果を検証した事例として、増水時、置土から細粒土砂が流下した箇所では、置土が流下していない箇所よりも付着藻類の剥離が進行することが報告されている（坂本ら，2005）。ただし、その年の置土量、洪水履歴によって、土砂の流下パターンは変化する。さらに、置土からの距離に応じて到達する土砂量とその時期は異なると考えられる。付着藻類は洪水時に剥離しても、洪水後から1ヶ月程度で剥離前と同じ程度の現存量に戻るため、剥離が生じる時期は重要といえる。さらに、河床に働く掃流力は河床粒径分布に左右されるため、土砂の流下パターンが同じでも、河床粒径分布に応じて剥離効果は異なると考えられる。以上から、置土の付着藻類への効果を適切に把握するためには、置土、洪水履歴、河床粒径分布および付着藻類現存量に関して、洪水直後のデータのみでなく、複数年にわたるデータを用いた検証が必要といえる。

そこで、本研究では、置土、洪水履歴、河床粒径分布および付着藻類現存量との関係を明らかにし、置土が河床粒径分布および付着藻類現存量に及ぼす効果の解明を目的として、複数年にわたり付着藻類を観測したダムを対象にデータ分析を行った。

2. 方法

2.1 データの収集

本研究では、埼玉県秩父市の二瀬ダムを対象としてデータを収集した。二瀬ダムは昭和36年に運用が開始されてから約50年が経過し、貯水池の堆砂量が計画堆砂量の約91%まで進んでいる。さらに、ダム下流の荒川では土砂供給の減少などにより、河床低下および岩盤の露出が顕著となっている。このため、ダム湖で掘削した土砂の一部をその年の前年度にダ

ム直下に置土し、その年の洪水期間（概ね4～9月）における増水時に自然流下させる事業を2003年度から現在まで実施している[Table 1]。置土量は年度によって異なるが、数千～1万数千 m^3 の規模であり、ダム湖の年平均堆積砂量の約5～20%に相当する。

対象区間は、置土されている二瀬ダムの直下から、支川である中津川合流地点までの約4.0kmまでとした[Fig. 2]。この区間では、3地点で河床材料調査が行われており、以下st1～st3（置土地点（st0）から約0.7, 1.8, 2.7km下流）とした[Fig. 2]。データは建設環境研究所の業務報告書（H16～H25）から収集したもので、各地点の付着藻類現存量、河床粒径分布、日平均流量、および置土から流下した土砂量の推定値（流下土砂量（Sf, $m^3/year$ ））である。付着藻類の現存量は単位面積あたりのchl.a量（ mg/m^2 ）を指標として、洪水期間（概ね4～9月）後の秋季（概ね10～11月）、冬季（概ね12～1月）、初春季（概ね2～3月）にかけて最大年3回、st1～st3の河床の礫から測定されたものである [Table 1]。河床粒径分布は洪水期間後の冬季に年1回st1～st3の河床で観測されたものである [Table 1]。現存量と河床粒径分布が測定された日時は異なるが、非洪水期間中（概ね10～3月）、河床粒径分布は概ね同じ数値として取り扱った。日平均流量（ m^3/s ）は、二瀬ダムからの放流量をst1の流量として、落合観測所の流量データをst3の流量として収

Table 1 Annual schedule of sediment adding and field monitoring in Futase Dam

Year	Previous year	A given fiscal year		
	From October to March	From April to September	Autumn	From October to March
Season		Spring and summer	Winter	Early spring
Flow (m^3/s) (daily average) (e.g. 2005)				
Sediment placement	←→			
Flushing by natural floods	←→			
Bed material survey			←→	
Algal survey		←→		

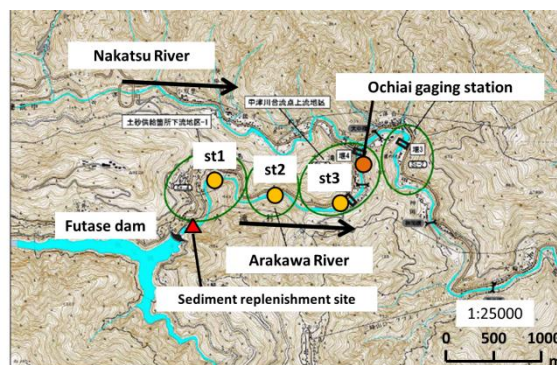


Fig. 2 Map of the study area in Futase Dam

集し、その平均値をst2の流量として取り扱った。流下土砂量は、洪水期直後の置土残存量 (m³/year) から推定した。また、洪水期間直後から更に後の期間において、付着藻類の現存量および河床の粒度分布の計測が行われている [Table 1]。

2.2 パラメーターの分析

はじめに、各年度の流下土砂量、洪水規模および河床粒径分布を整理した。洪水規模を表す指標として、最大日平均流量 (Q_{max}, m³/s) を用いた。河床粒径分布の指標として、代表粒径 (D₆₀, mm) と置土を構成する粒径100mm以下の割合 (P_{<100mm}, %) を用いた。そして、土砂の流下のインパクトと河床変動の大きさとの関係を解明するため、年度毎にQ_{max} およびSfを横軸、D₆₀およびP_{<100mm}を縦軸とした散布図を作成し、Pearsonの相関係数を用いた単回帰分析を行った。最後に、各年度の付着藻類現存量を整理した上で、Q_{max}, Sf, D₆₀, およびP_{<100mm}と付着藻類現存量との関係について、同様の方法で分析を行った。ただし、付着藻類は季節により生長速度等が異なるため、データは測定時期毎 (秋季, 冬季, 早春) に作成した。

2.3 付着藻類の剥離力の比較

河床材料に働く掃流力τ (kg/m²/s)は下記の式(1) (Wilcock, 1996) で表される。

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

ここで、ρ: 水の密度 (=1,000 kg/m³)、κ: カルマン定数 (=0.4)、u: 流速 (m/s)、h: 水深 (m)、D₈₄: 84%粒径 (m) である。この式により、日平均流量からu、hを等流計算で求め、各地点のτの日変化を算出した。さらに、付着藻類の剥離は土砂が動くことで促されることから、本研究では、剥離の強さを移動する土砂のパラメーターとして表すため、田中らの提案する移動限界粒径 (田中ら, 2014) を用いた。移動限界粒径D_{cri}(m)とは、河床材料に働く掃流力に対し、動くことのできる最大の粒径 (τ = τ(D_N)となるとき)のN) である。

$$\tau(D_N) = 0.045(\rho_s - \rho)gD_{50}^{0.6}D_N^{0.4}$$

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

ここで、R_s: 砂の水中比重、g: 重力加速度、D₅₀: 50%粒径 (m) である。そして、土砂移動の指標としてのD_{cri}と付着藻類現存量との関係を分析した。具体的には、付着藻類現存量は剥離から概ね1カ月以内に剥離前の水準に戻ることから、付着藻類現存量が観測された日から1カ月前までのD_{cri}を算出し、付着藻類現存量と比較した。

3. 結果

3.1 データの分析結果

流下土砂量、洪水履歴および河床粒径分布の年度ごとの増減傾向をグラフ化した結果、st1~st3とも、置土が流下し始めた年度 (2004,2005) はそれほど変化が見られなかったが、2006年度以降からD₆₀は減少し、P_{<100mm}は増加する傾向であった[Fig. 3]。しかし、250m³/s以上のQ_{max}が観測された2007, 2011年度では、D₆₀は再度増加し、P_{<100mm}は急減した[Fig. 3]。これらの結果から、置土が流下し始めた年度 (2004, 2005) をG1、大規模な出水があった年度 (2007, 2011) をG2、その他の年度 (2003, 2006, 2008, 2009, 2010, 2012, 2013) をG3としてグループ分けを行った。ただし、G3の中でも、2009年度は他の年度と異なり、st1のみで、D₆₀およびP_{<100mm}の増加が生じ、st2, st3では変化がなかった。

各グループにおけるQ_{max}およびSfとD₆₀およびP_{<100mm}との関係を分析した結果を以下に記載する。Q_{max}, SfとD₆₀との関係を見ると、st1のG3において、Sfが10,000 (m³/year) の場合、D₆₀がやや低くなる傾向が見られた (p=0.15) [Fig. 4]。st2, st3では2009年度のように15,000 (m³/year) 程度の高いSfにも係らずD₆₀が低いケースもあり、上記の傾向は見られなかった。また、Q_{max}とD₆₀およびG1, G2におけるSfとD₆₀との関係には、特筆すべき傾向が見られなかった。

Q_{max}, SfとP_{<100mm}との関係を見ると、G1およびG2では、st1~st3ともP_{<100mm}が20%以下であった[Fig. 5]。さらに、G3では、置土から近いst1で、Sfが多いほどP_{<100mm}が増大する傾向が見られた (p=0.04) [Fig. 5]。一方、st2, st3においても、同じような傾向が見られるものの、2009年度のように15,000 (m³/year) 程度の高いSfにも係らず、P_{<100mm}が20%以下になるケースも見られた。そのほかでは、G3におけるQ_{max}とP_{<100mm}に、st1, st2よりも高い負の相関が見られた (p=0.15) ことを除き、特筆すべき傾向が見られなかった。

st1~st3における付着藻類現存量の観測結果を見ると、2008年度のst2, st3において、200mg/m²を超える高い値が観測されたが、st1では全ての年度で100mg/m²を下回った[Fig. 6]。Q_{max}, Sfと付着藻類

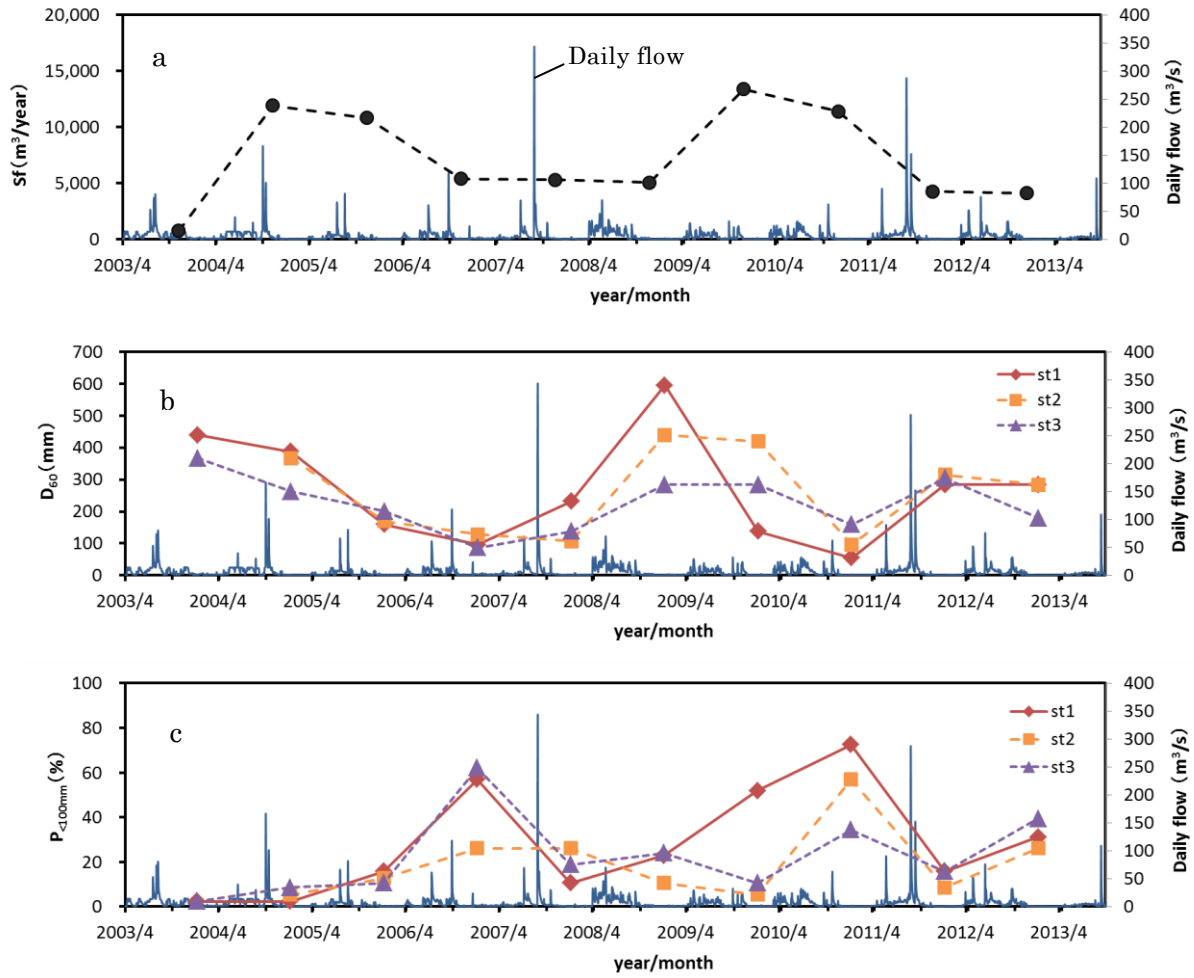


Fig. 3 The patterns of flow, Sf(a), D_{60} (b), and $P_{<100\text{mm}}$ (c)

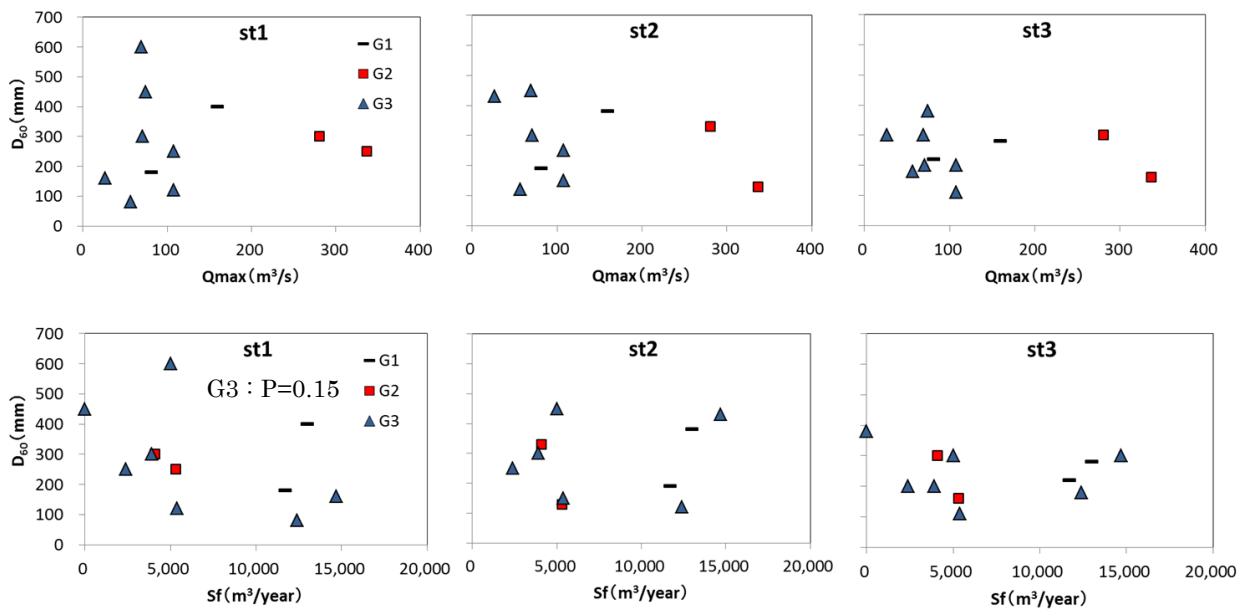


Fig. 4 Relationship between Q_{max} , and D_{60} (upper), and between Sf and D_{60} (lower)

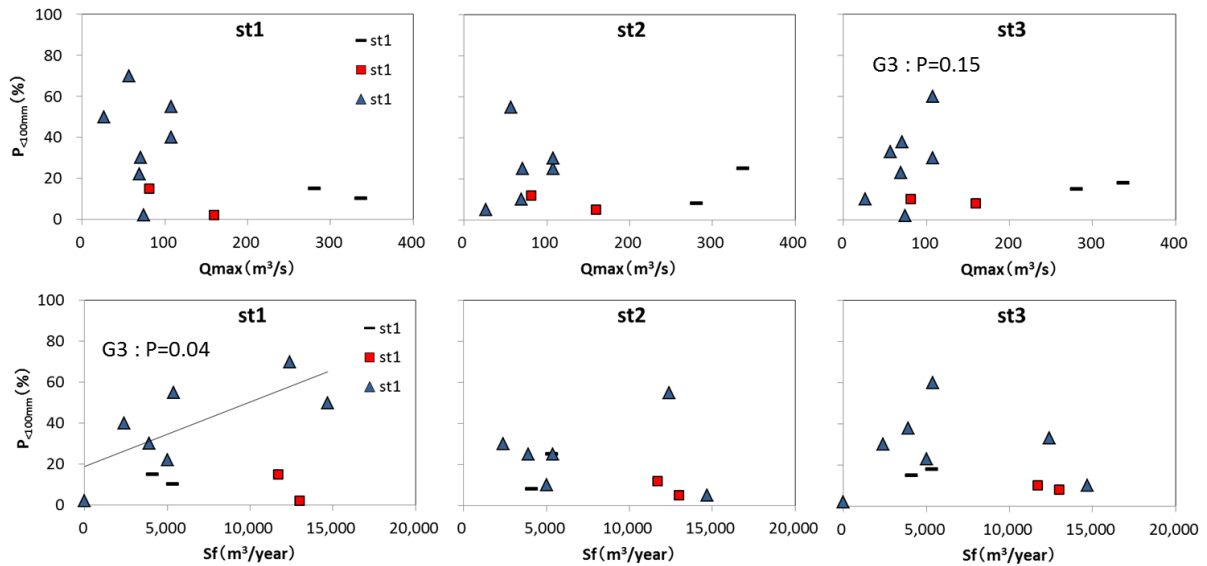


Fig. 5 Relationship between Q_{max} , and $P_{<100mm}$ (upper), and between S_f and $P_{<100mm}$ (lower)

現存量との関係を散布図で分析した結果[Fig. 7], Q_{max} が $150\text{m}^3/\text{s}$ を超えるまたは S_f が $10,000\text{ (m}^3/\text{year)}$ を超える年度A (2004, 2005, 2007, 2009, 2010, 2011)において, 現存量は他の年度B (2006, 2008, 2012, 2013)よりも低い傾向を示した. ただし, 2006, 2008, 2012, 2013年度に注目しても, 2008年度の現存量はそれ以外の年度よりも極端に高かった.

D_{60} , $P_{<100mm}$ と付着藻類現存量との関係を散布図で分析した結果, D_{60} と付着藻類現存量との関係について季節別に異なる傾向が見られた[Fig. 8]. 具体的には, 秋季において, D_{60} が低いほど現存量が低い傾向となった ($p=0.04$). 一方, 冬季, 早春季では, 年度Bのグループにおいて, st1以外で, D_{60} が 250mm を超えたあたりで, 現存量が急増する傾向が見られた. また, 年度Aでは D_{60} に係らず, 現存量は $100\text{mg}/\text{m}^2$ 以下であった. $P_{<100mm}$ と付着藻類現存量との関係については, D_{60} と同様, 冬季, 早春季において, 年度Bのグループのst1以外で, $P_{<100mm}$ が30%を下回るあたりで, 現存量が急増する傾向が見られた. また, 年度Aでは $P_{<100mm}$ が20%以下になることが多かったが, 現存量は $100\text{mg}/\text{m}^2$ 以下であった.

3.2 流量, D_{cri} および付着藻類現存量の比較

付着藻類現存量と現存量測定前の1ヶ月間における流量, D_{cri} の日変動を比較した. このとき, 全ての現存量における1カ月以内の流量, D_{cri} のデータ量は膨大なものになる. このため, 3.1の結果をもとに, 現存量が大きい2008年度のst2, st3のデータをベースに下記の3つのケースにて比較を行った.

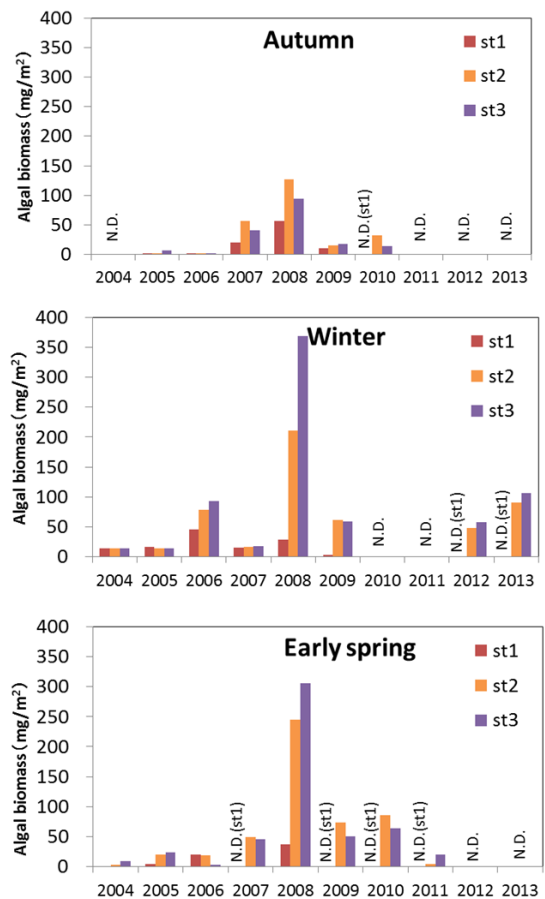


Fig. 6 Algal biomass from 2004 to 2013 in autumn, winter and early spring

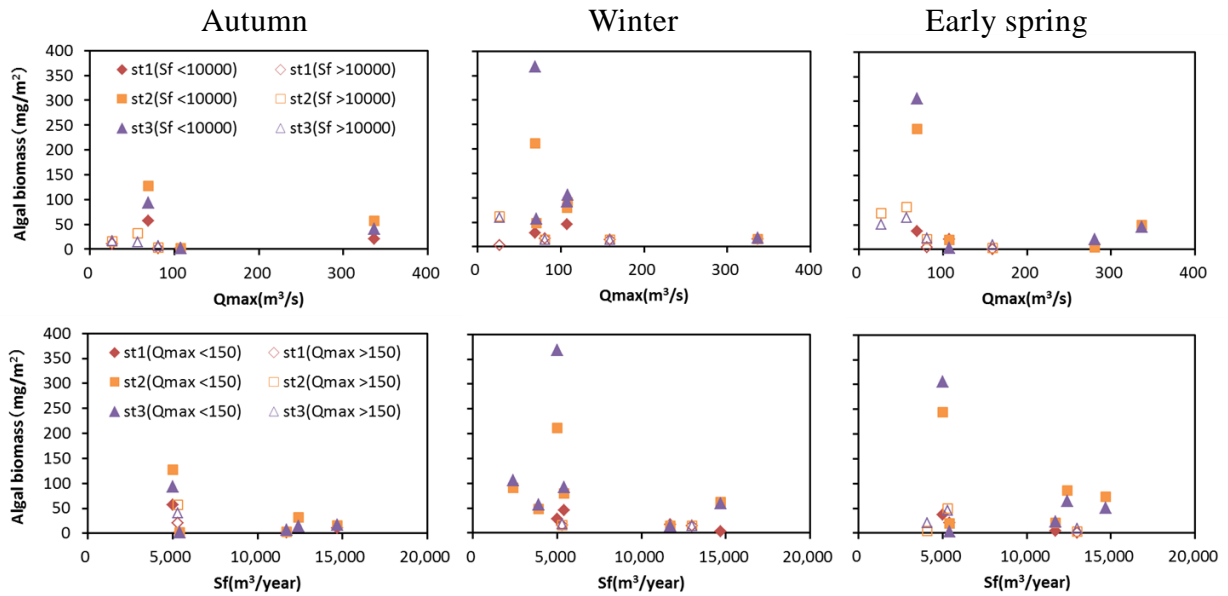


Fig. 7 Relationship between Qmax, and algal biomass (upper), and between Sf and algal biomass (lower)

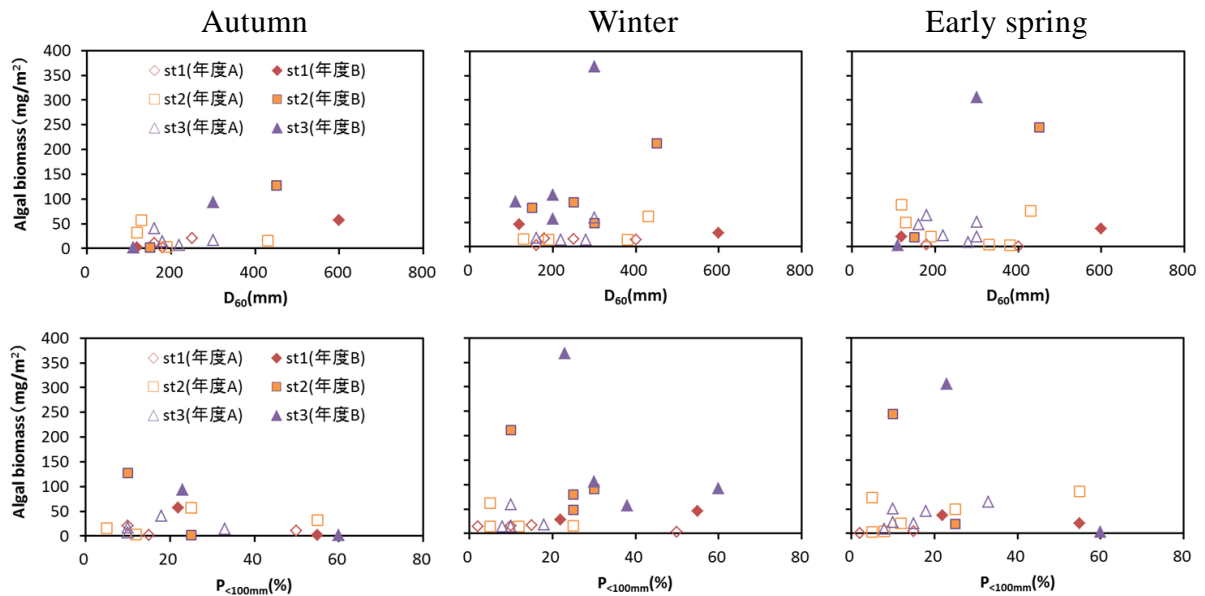


Fig. 8 Relationship between D₆₀ and algal biomass (upper), and between P_{<100mm} and algal biomass (lower)

ケース 1 : 2008年度 : 冬季 : st2, st3

Qmax : 69 m³/s, Sf : 5,000 m³/s, D₆₀ : 450 mm (st2), 300 mm (st3), P_{<100mm} : 10 % (st2), 23 % (st3)

ケース 2 : 2006年度 : 冬季 : st2, st3

Qmax : 108 m³/s, Sf : 5,400 m³/s, D₆₀ : 150 mm (st2), 110 mm (st3), P_{<100mm} : 25 % (st2), 60 % (st3)

ケース 3 : 2009年度 : 冬季 : st2, st3

Qmax : 27 m³/s, Sf : 14,700 m³/s, D₆₀ : 430 mm (st2), 300 mm (st3), P_{<100mm} : 5 % (st2), 10 % (st3)

ケース 2は、ケース 1 と概ね同程度のQmax, Sfであるが、ケース 1 と比べてD₆₀が小さくP_{<100mm}が大きい。

ケース 3は、ケース 1 と比べてQmaxが小さく、Sfが大きい、ケース 1 と概ね同程度のD₆₀およびP_{<100mm}である。各ケースにおける1カ月以内の流量およびDcriを算定した結果、流量については、ケース 1 とケース 2 においてほとんど変動しない一方、ケース 3 において、10m³/s以上の比較的小規模な増水が観測された [Fig. 9]。また、Dcriについては、ケース 1 において、1ヶ月間でほとんど変動がない一方、ケース 2, 3 において一時的な増大が確認された [Fig. 10]。付着藻類については、ケース 1 においてケース 2, 3 よりも高い結果となった。

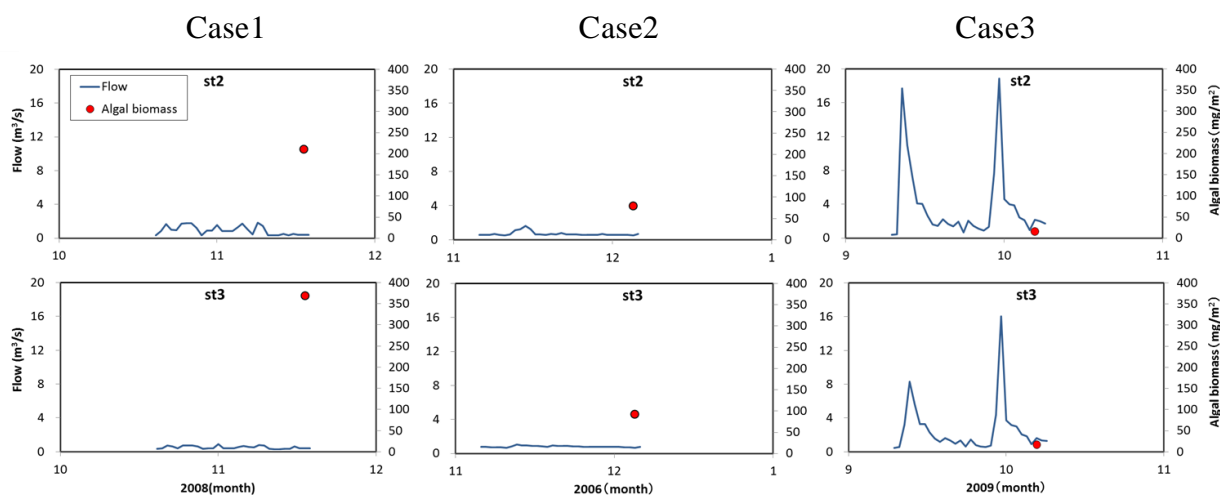


Fig. 9 Flow and algal biomass trends in Case 1, 2 and 3

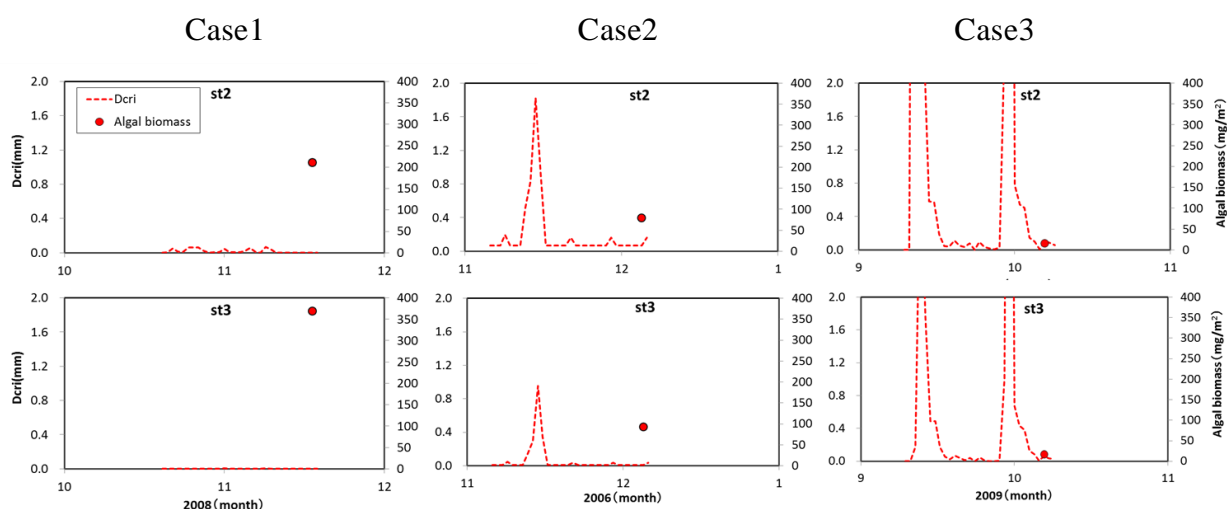


Fig. 10 Dcri and algal biomass trends in Case 1, 2 and 3

4. 考察

4.1 置土が河床粒径分布に及ぼす効果

G3の結果から[Fig. 4, Fig. 5], 置土から0.7 km程度の箇所(st1)では, 置土から流下した土砂量に比例して河床の細粒化が促進されることが示唆される. 一方, 1.0 km以上離れた箇所(st2, st3)では, 置土から流下した土砂量と河床の細粒化の程度に比例関係が見られなかった. この理由として, 置土から流下した土砂が, st2, st3にはすぐに到達せず, 時間経過によって徐々に流下するためと推定される. 他の年度と比べてQmaxが小さくSfが大きかった2009年度において, st1のみ河床が細粒化し, st2, st3では2008年度と同程度の河床粒径分布となったことについても, st1がst2, st3に対して置土箇所に近かったためと考えられる. ただし, G1の結果から, 例年より非常に強いQmaxが発生した場合は, 置土からの距離に関

らず, 細粒子が消失することも示唆される. また, 初年度に河床変動が少なかった(G2)理由として, 粗粒化し多くの空隙がある河床に土砂がとりこまれたため, 初期は表層への影響が少なかった可能性がある.

4.2 置土が付着藻類現存量に及ぼす効果

秋季においてD₆₀が低いほど現存量が低くなったことから[Fig. 8], 河床が細粒化し攪乱が生じやすくなることで, 現存量は抑制されやすことが示唆される. この傾向が秋季のみに見られた理由として, 洪水時期から間もない時期であり, 洪水時の攪乱による効果が冬季以降より反映されやすかったためと推定される. ただし, 冬季, 早春季においても, 秋季のD₆₀ほどの強い相関は見られなかったが, 現存量の急増が生じたケースと生じなかったケースが発生した[Fig. 7]. 急増が生じた2008年度では, Qmax, Sf

ともに他の年度よりも低めであり、攪乱の少ない年度であったと考えられる。2009年度は2008年度と類似した河床粒径分布であったが、現存量の急増は生じていない。この理由として、2009年度の冬季における現存量観測前の1カ月間の流量が、2008年度と異なり一時的に流量が上昇しており、このときに現存量が抑制されたためと推定される。そして、このときの攪乱は、洪水時期に生じるもの比べて小規模であったと推測されるが、それでも現存量の抑制に効果的であることが示唆される。しかし、2006年度は、2008年度と同じく攪乱の少ない年度であり、さらに現存量観測前の1カ月間の流量が2008年度と同様であるにも係らず、現存量の急増は生じていない。両者の現存量観測前の1カ月間のDcriを比較すると、2006年度では一時的に上昇する一方、2008年度はこの傾向が見られなかった。このため、2006年度では現存量観測前の1ヶ月の間に河床攪乱が生じ、現存量が抑制されたことが示唆される。同程度の洪水履歴にも係らず、2006年度のみで攪乱が生じた理由として、2006年度は2008年度よりも河床が細粒化され、河床材料が移動しやすい環境であったためと考えられる。

以上から、置土は河床を細粒化し、攪乱が生じやすい河床環境を促進することで、洪水時期、非洪水時期ともに、付着藻類現存量の抑制をもたらしていると考えられる。そして、攪乱が生じるタイミングおよび攪乱の規模に貢献する河床粒径分布は付着藻類の現存量を決定する重要な要素といえる。さらに、この攪乱を定量的に分析する上で、Dcriは有効な指標となると考えられる。

5. おわりに

本研究では、置土が河床変動および付着藻類現存量に及ぼす効果の解明を目的として、二瀬ダムを対象に、洪水履歴、河床変動および付着藻類現存量との関係を分析した。その結果、以下の成果が得られた。

- ・置土から土砂が経年的に流下することで、河床の細粒化の効果が促される（ただし、大規模洪水が発生した年度では、細粒土砂が消失する可能性もある）
- ・置土から近い箇所では流下土砂量が多い年度ほど河床の細粒化が促されるが、離れた箇所では洪水履歴により細粒化の効果が遅れて生じる等により上記と異なる傾向となる
- ・洪水期間における増水だけでなく、非洪水期間の中・小規模の増水も、付着藻類現存量を抑制する効果があると考えられる

- ・非洪水期間に流量変動が少なかった場合でも、洪水期間中に置土が流下し河床が細粒化することで、非洪水期間に河床の攪乱が生じやすくなり、付着藻類現存量の抑制に効果を発揮すると考えられる
- ・Dcriは、付着藻類に作用する攪乱を定量化するにあたり、有効な指標となりうる。

今後は、土砂供給による河床環境および付着藻類の改善効果を評価することを目的として、土砂の流下に対する河床および付着藻類現存量の応答を定量的に予測する技術を提案する予定である

謝 辞

本研究を進めるにあたり、国土交通省関東地方整備局二瀬ダム管理所には、二瀬ダムに関する長年にわたる資料を提供いただく等、数々のご協力を頂いた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 坂本博文・谷崎保・角哲也（2005）：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，第11巻。
- 田中規夫・古里栄一（2014）：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。
- 戸田祐嗣・赤松良久・池田駿介（2001）：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，Vol.45，pp.1111-1116。
- 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。
- Biggs, B.J.F. (1996): Hydraulic habitat of plants in streams, Regulated rivers, research & management, Vol.12, pp.131-144.
- Erskine, W. D. (1985): Downstream geomorphic impacts of large dams: the case of Glenbawn Dam, NSW, *Applied Geography*, Vol.5, pp.195-210.
- Kantoush, S. A., Sumi, T. and Kubota, A., (2010): Geomorphic response of rivers below dams by sediment replenishment technique, River Flow 2010, The MIT Press, pp.1155-1163.
- Wilcock, P.R. (1996): Estimating local bed shear stress from velocity observations, Water resources research, Vol.32(11), pp.3361-3366.

（論文受理日：2016年6月13日）