

置土がダム下流の河川環境に及ぼす影響 に関する研究

EFFECT OF REPLENISHED SEDIMENT ON RIVER ENVIRONMENT IN DOWNSTREAM REACH OF DAM

赤松 良久¹・武蔵 由育²・尾嶋 百合香³・山下 正浩⁴・竹林 洋史⁵

湯城 豊勝⁶・鎌田 磨人⁷・河口 洋一⁸

Yoshihisa AKAMATSU, Yoshiiku MUSASHI, Yurika OZIMA, Masahiro YAMASHITA, Hiroshi
TAKEBAYASHI, Toyokatsu YUKI, Mahito KAMADA and Yoichi KAWAGUCHI

¹正会員 博（工）山口大学大学院准教授 理工学研究科社会建設工学専攻
（〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1）

²正会員 農修 八千代エンジニアリング株式会社 水工部（〒161-8575 東京都新宿区西落合2-18-12）

³正会員 工修 国土交通省 那賀川河川事務所 工務課（〒774-0011 徳島県阿南市領家町室ノ内390）

⁴正会員 国土交通省中村河川国道事務所 計画課（〒787-0015 高知県四万十市右山2033-14）

⁵正会員 博士（工） 京都大学准教授 防災研究所
（〒612-8235 京都府京都市伏見区横大路下三栖東ノ口）

⁶正会員 工博 阿南工業高等専門学校教授 建設システム工学科
（〒774-0017 徳島県阿南市見能林町青木265）

⁷正会員 学博 徳島大学教授 工学部建設工学科
（〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町2-1）

⁸正会員 学博 徳島大学准教授 工学部建設工学科
（〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町2-1）

Reservoir sediment replenishment to downstream reach of dam has been conducted in the Nakagawa, Tokushima. However, the effect of replenished sediment on river environment is not clear. In this study, the detachment of attached algae and its influence are studied by field observation and numerical simulation.

The results of field observation and numerical simulation show that the attached algae is almost entirely detached by a flood with the sediment augmentation. On the contrary, over half of attached algae survive in the numerical simulation for the assumed flood without the sediment augmentation. The comparison of longitudinal distribution of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in the riverbed sediment between before and after the flood reveals that $\delta^{15}\text{N}$ can be a tracer of the detached algae and the deposition of the detached algae could cause secondary pollution in the downstream reach of dam.

Key Words : Sediment augmentation, Attached algae, Bed deformation analysis, Stable isotope, Riverbed sediment

1. はじめに

日本のほとんどの河川においては上流にダムが建設され、下流の水・土砂動態が大きく変化している。それによって、ダム下流では土砂供給の減少による河床低下、河床材料の粗粒化が生じる場合がある。また、このような物理環境の変化はダム下流の河川生態系にも大きな影響を与えている。具体的には、河床材料の固定化による

ダム下流での糸状藻類の異常繁茂、特定の底生動物だけが個体数や現存量を増やすことによる底生動物の群集多様度の低下などが挙げられる。ダムと下流河川の物理環境との関係については現時点での知見に基づき、技術的課題も含めた包括的な取りまとめが行われている¹⁾。しかし、ダムによる下流の物理環境の変化が河川生態系に与える影響については十分な知見が得られていない。

このようなダム下流の河川環境の改善に向けて全国の河川でフラッシュ放流が実施されている。さらに、現在

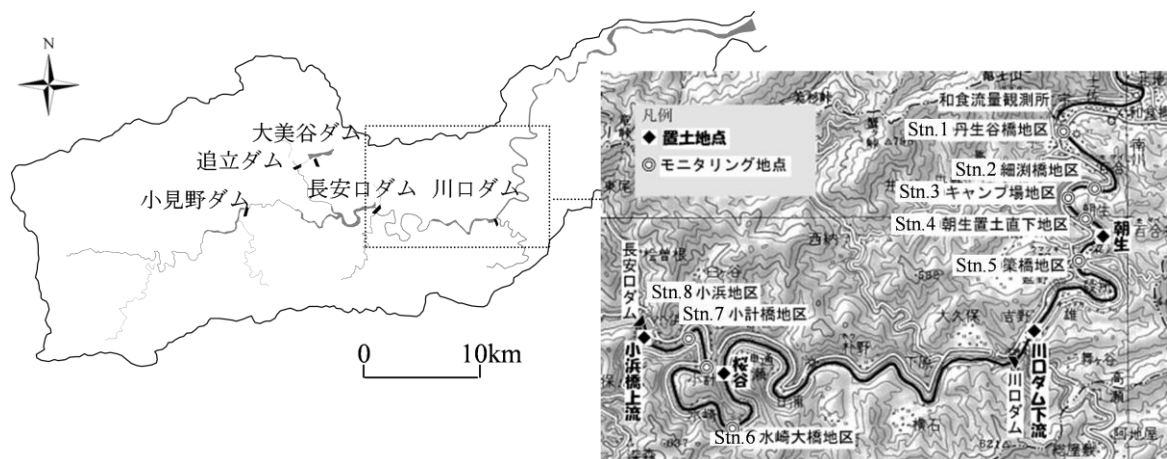


図-1 那賀川における置土地点とモニタリング地点の位置図

はフラッシュ放流時に置土を行い、下流の河川環境を改善する試みも行われている。従来、置土はダム湖に堆積した土砂の下流への還元を目的として行われることが多いが、掃流砂による河床のクレンジング効果も期待できる。掃流砂による河床付着藻類の剥離に関しては室内実験や数値シミュレーションに基づく研究が行われており^{3), 4)}、糸状藻類の剥離に5-10mm程度の粒径の土砂が有効であることが示されている⁵⁾。また、福井県の真名川ダムではアユの餌となる付着藻類の剥離更新の促進を目的として、土砂還元を組み合わせたフラッシュ放流を行い、流砂による藻類の剥離増進効果も確認されている²⁾。しかし、実河川における置土のダム下流の河川環境改善効果についての知見は少ないのが現状である。

そこで、本研究では国内でも最大規模の置土の実施されている徳島県那賀川を対象として、置土による土砂還元がダム下流の河川環境に及ぼす影響を付着藻類および河床堆積有機物に着目して検討した。

2. 研究方法

(1) 現地調査

研究対象の那賀川流域(図-1)では、長安ロダム上流の堆砂を下流へ置土している。置土の平均粒径は6~20mm程度である。平成20年度には55,700m³が設置されたものの、置土が流下する規模の出水が無かった。平成21年度には小浜橋上流(54,700m³)、桜谷(3,900m³)、川口ダム下流(18,200 m³)、朝生(83,100m³)に計159,900m³の置土が設置され、2009年8月10日豪雨による出水によって、置土量の74.8%(小浜橋上流: 87.0%, 桜谷: 100.0%, 川口ダム下流: 63.2%, 朝生: 68.1%)が流下した。図-2に出水時の和食地点(図-1)での流量変化を示す。

現地調査では図-1中のStn.1(丹生谷橋)、Stn.4(朝生置土直下)、Stn.5(築橋)、Stn.6(水崎大橋)、Stn.7(小計橋)において出水前(2009年6月9日)および出水

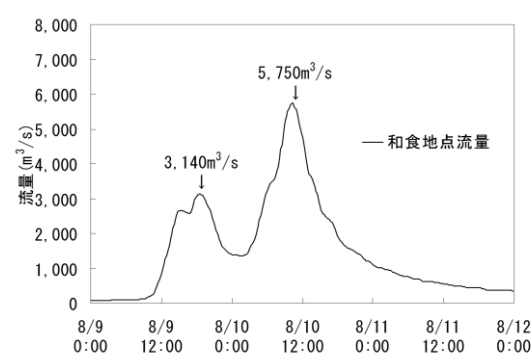


図-2 平成21年8月10日豪雨出水時の流量

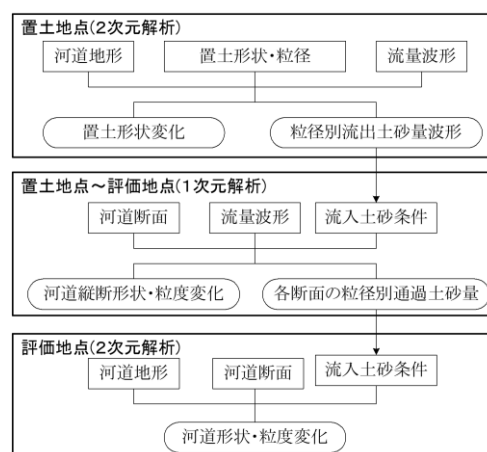


図-3 解析モデルの概念図⁶⁾

後(2009年8月25日)に3個の礫を採取し、その平均の付着藻類現存量を強熱減量として計測した。また、出水前の2009年6月9日には長安ロダムからその60km下流域までの13地点において水質・堆積有機物調査を行った。水質に関しては窒素三態($\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$)およびリン酸態リン($\text{PO}_4\text{-P}$)の計測を行った。堆積有機物は各地点において3箇所から同量を採取し一つの試料とし。試料は2mmのふるいにかけたのちに、炭素・窒素安定同位体比の計測を行った。炭素・窒素安定同位体比は同位体比質量分析計(DELTA^{plus} Advantage, Finnigan TM)により

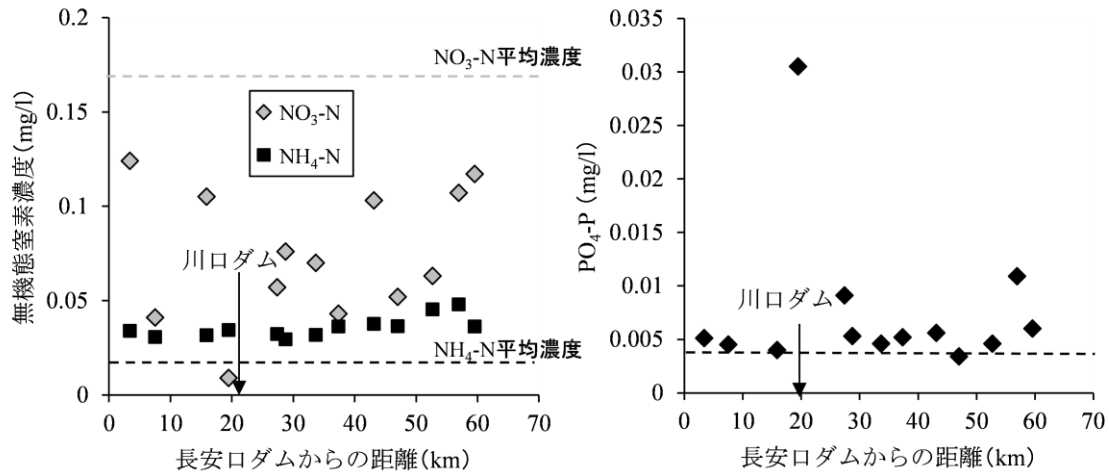


図-4 NO₃-N, NH₄-N, PO₄-P の縦断分布 (2009 年 6 月 9 日)

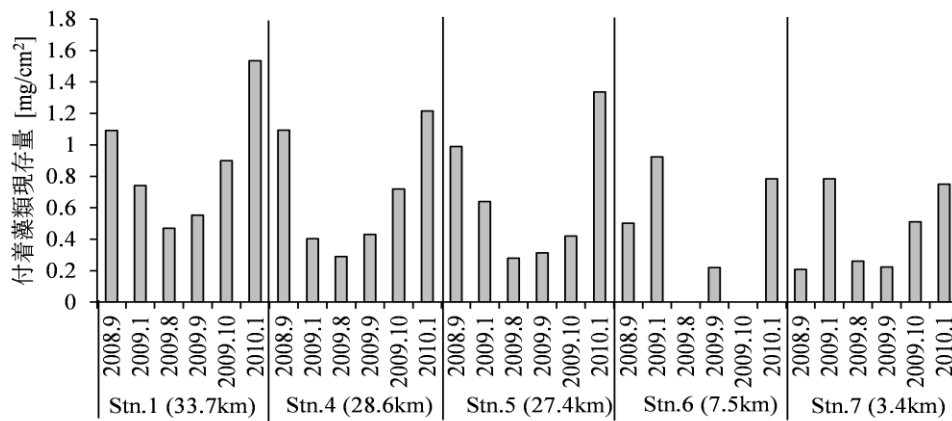


図-5 2008 年 9 月～2010 年 1 月にかけての Stn.1, Stn.4～7 における付着藻類現存量
() 内は長安口ダムからの距離

測定を行った。安定同位体比計測の標準偏差は炭素では約±0.3‰で、窒素では約±0.4‰であった。

(2) 数値解析概要

本研究では、置土地点と置土による河床位と河床材料の粒度の回復効果の評価地点 (図-1 のモニタリング地点) は二次元解析、置土地点～評価地点は一次元解析を適用した解析モデルを用いた (図-3)。解析モデルの再現性等の検証は武蔵ら⁹⁾を参照して頂きたい。ここでは、本モデルから得られた各評価地点での摩擦速度、粒径ごとの掃流砂量を用いて、付着藻類の剥離量の予測を行った。付着藻類の剥離量の予測には各粒径 d_i ごとに掃流砂による仕事量 W_i と減少率 P_i の以下の関係式を用いた⁵⁾。

$$p_i = \alpha_i W_i \quad (1)$$

ここで、 α_i ：各粒径に対する藻類の剥離抵抗を表す係数であり、仕事量 W_i は以下のように表される⁵⁾。

$$W_i = \gamma q_{Bi} d_i^{1/3} u_*^{2/3} \quad (2)$$

ここで、 q_{Bi} ：各粒径の砂礫の掃流砂量(m^2/s)、 u_* ：摩擦速度(m/s)であり、 $\gamma=4.94 \times 10^5 (N/m^4/s^{3/2})$ とした。 α_i は実験結果から得られる値を用いて、各粒径の剥離率の和を掃流砂による剥離率と考えた。

3. 現地観測結果及び考察

(1) ダム下流の水質環境

出水前の2009年6月9日における長安口からその60km下流域までのNO₃-N, NH₄-N, PO₄-Pの縦断分布を図-4に示す (各濃度は6月9日の瞬間値)。なお、河口から約7kmに位置する那賀川橋における2000～2010年にかけての平均濃度を破線で示している。NH₄-Nは流下方向にほとんど変化がないのに対して、NO₃-NおよびPO₄-Pは変動がみられる。NO₃-Nは地点によるばらつきがあるものの、

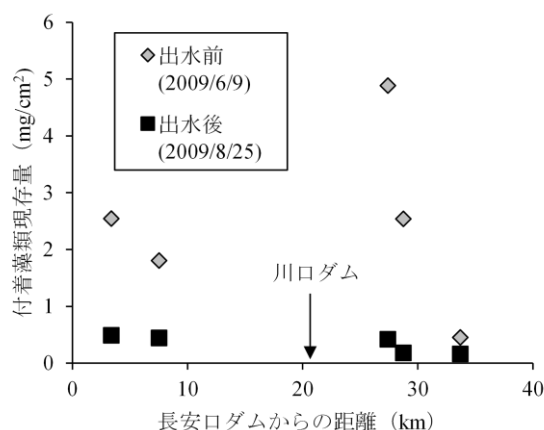


図-6 出水前後の付着藻類現存量

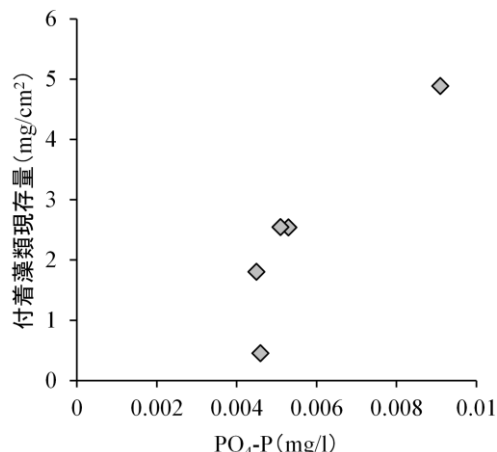


図-7 付着藻類現存量と $\text{PO}_4\text{-P}$ の関係

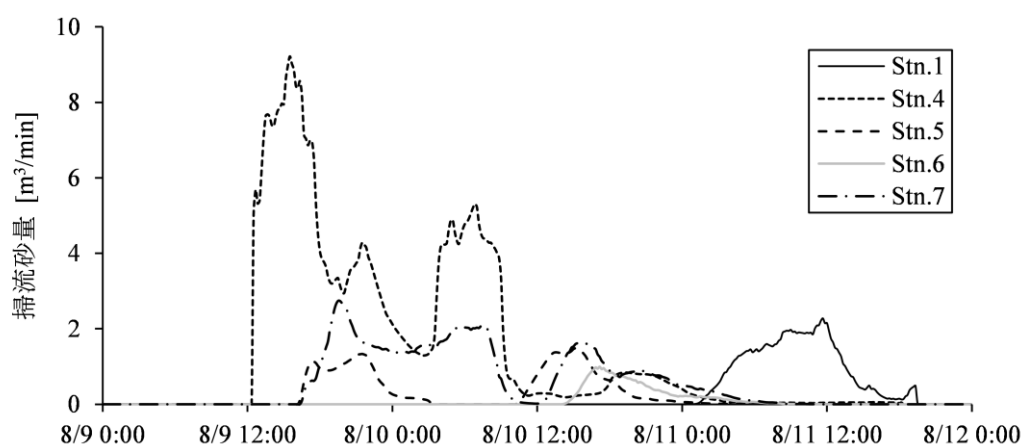


図-8 Stn.1, Stn.4～7における出水期間中の5-10mm粒径土砂の掃流砂量の時系列変化

すべての地点で下流域での平均濃度を下回っている。また、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は長安ロダムから約20kmの川口ダム下流の地点などで、破線の平均濃度を大きく上回っていることがわかる。

(2) 出水前後の付着藻類現存量

図-5に2008年9月～2010年1月にかけてのStn.1, Stn.4～7における付着藻類の現存量を示す。ここで、付着藻類の現存量は強熱減量で示している。全体的に、夏季より冬季に付着藻類現存量が多い傾向にあることがわかる。また、上流の長安ロダム下流のStn.6, 7に較べて、川口ダム下流のStn.1, Stn.4, Stn.5における付着藻類の現存量が多い。

図-6に強熱減量として計測した出水前後のStn.1, Stn.4～7における付着藻類現存量を示す。2009年の9月から11月にかけて一カ月ごとに行ったStn.1, Stn.4～7の平均付着藻類現存量は $0.4\text{mg}/\text{cm}^2$ 程度であったことから、出水前の6月9日には藻類が例年に比べて大量に繁茂していたと考えられる。出水後にはすべての地点において現存量が $0.5\text{mg}/\text{cm}^2$ 以下に低下しており、出水時に十分な付着藻類の剥離が起こっていることがわかる。ま

た、図-7に出水前の6月9日の付着藻類現存量と $\text{PO}_4\text{-P}$ の関係を示す($\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度は6月9日の瞬間値)。両者には正の相関があり、長安ロダムからその60km下流域までの $\text{PO}_4\text{-P}$ は下流地点の平均濃度に比べて高い地点が見られることから、藻類異常繁茂は $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度の増加によるものと考えられる。なお、各地点の光・水温環境に大きな変化はなかった。

(3) 流砂量と付着藻類の剥離

図-8に数値シミュレーションから得られたStn.1, Stn.4～7における出水期間中の5-10mm粒径の土砂の単位時間当たりの掃流砂量の時系列変化を示す。アオミドロを対象とした既往の研究⁴⁾より、糸状藻類の剥離には5-10mm粒径の土砂が最も有効であることが示されている。本研究の対象域ではビロウドランソウが優占していたが、同じ糸状藻類であることから5-10mm粒径の土砂に着目して検討を行った。また、数値シミュレーションでは置土がない場合の5-10mm粒径の土砂の単位時間当たりの掃流砂量も算出した。その結果、Stn.4においてわずかな掃流砂があったものの、その他すべての地点において5-10mm粒径の土砂の掃流砂として移動は見られなかった。

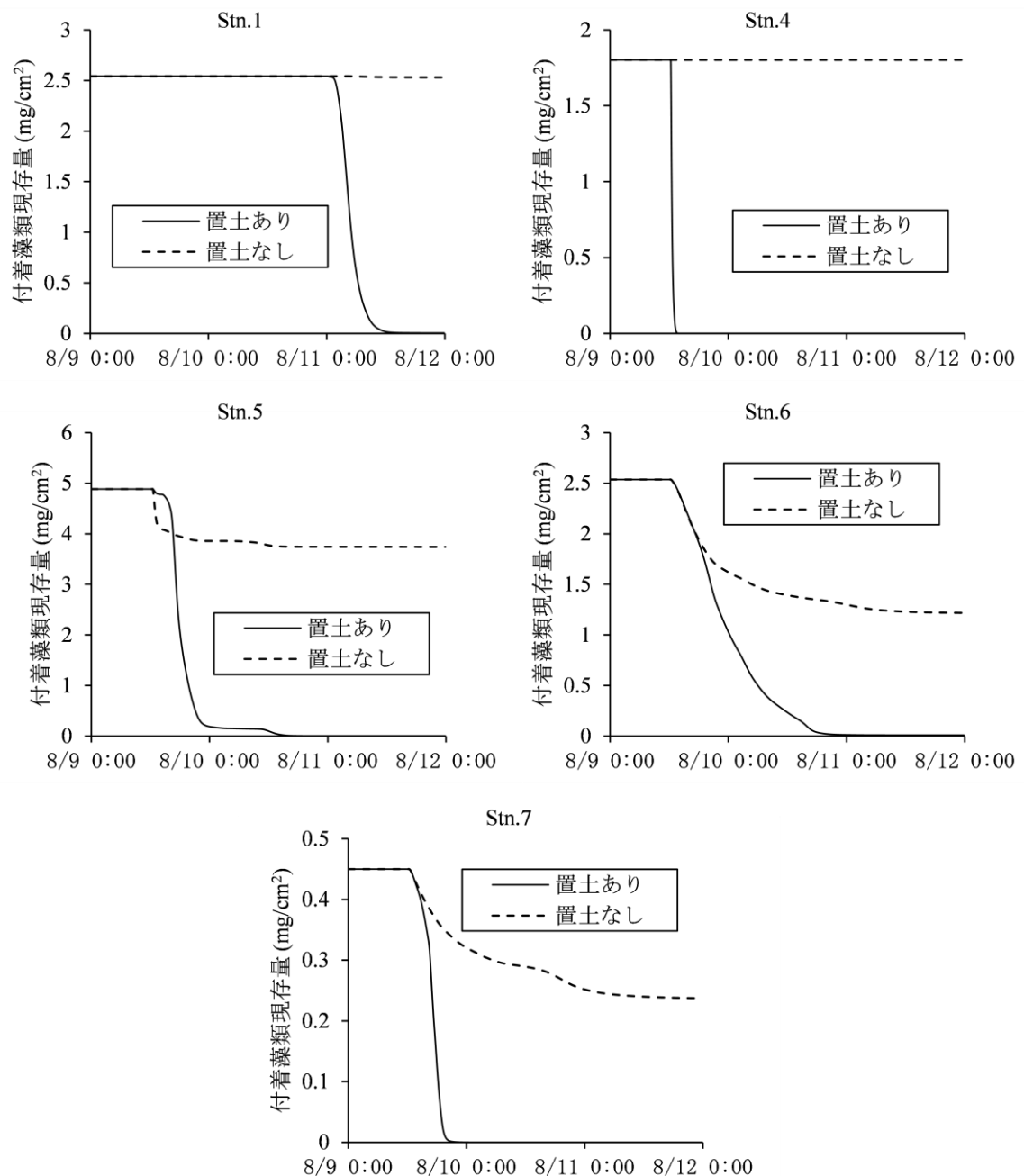


図-9 置土がある場合とない場合の Stn.1, Stn.4～7 における出水期間中の付着藻類現存量の時系列変化

それに対して、置土を考慮した結果では（図-8），すべての地点において糸状藻類の剥離に有効な5-10mm粒径の土砂の掃流がみられる．特にもっとも大規模な置土の行われた朝生置土の直下のStn.4においては8月9日の1回目の流量増加時に多量の掃流砂が生じていることがわかる．それに対して，最下流のStn.1では流量が低下しつつある8月11日の正午にピークがある．これは，朝生置土から流出した土砂が2回目の流量ピーク後（図-2）にStn.1まで掃流したものと考えられる．

また，2-5mm，5-10mm，10-20mm，20-50mmの粒径の土砂の掃流量と藻類の剥離率の関係式(1)，(2)を用いて，置土がある場合（実際の状態）と置土がない場合（仮想状態）の付着藻類現存量の出水前後の変化を予測した．

図-9に置土がある場合とない場合のStn.1, Stn.4～7における出水期間中の付着藻類現存量の時系列変化を示す．この結果より，再現計算では置土がある場合には全地点で完全に剥離することがわかる．現地調査では出水後に完全に剥離した状態ではなかったが，これは出水後の調査が出水から15日後に行われたものであるためであり，出水直後には計算結果と同様に完全に付着藻類が剥離していたと考えられる．置土がない場合においては，Stn.5, 6, 7では剥離率が20～50%程度であるものの，Stn.1, 4では全く剥離していないことがわかる．以上の結果から，置土による土砂還元が付着藻類の剥離に有効であることが明らかとなった．

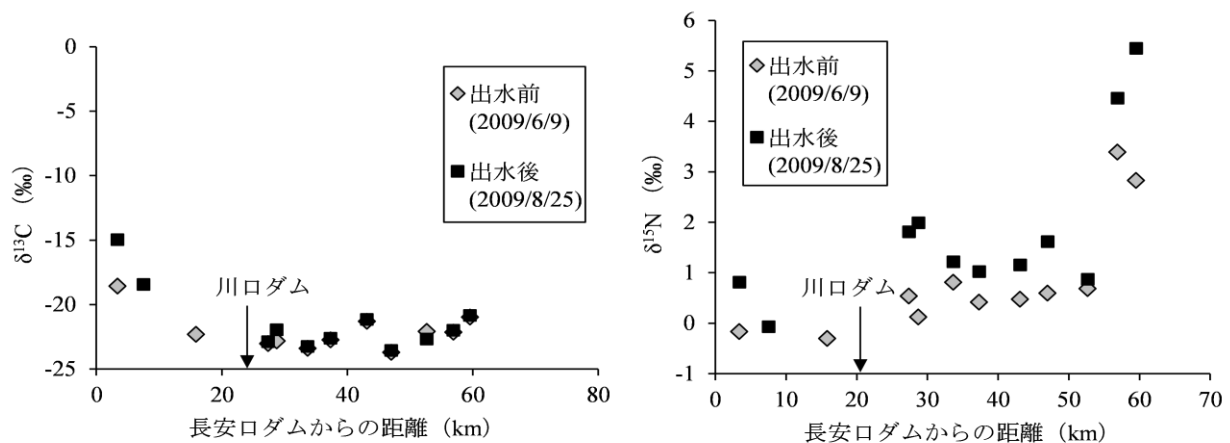


図-10 出水前後の河床堆積物の炭素および窒素安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$) の河川縦断分布

(4) 河床堆積有機物の変化

図-10に出水前後の河床堆積物の炭素および窒素安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$) の河川縦断分布を示す。炭素安定同位体比は長安ロダム直下を除いて出水前後で大きな変化がないことがわかる。河床堆積有機物中の炭素安定同位体比は起源となる有機物の組成で決まり、長安ロダム直下を除いて森林 ($-27\text{‰} \sim -25\text{‰}$) に近い値を示している。これは那賀川の長安ロダム下流域では森林起源の有機物が剥離した藻類 ($-10\text{‰} \sim -5\text{‰}$) に比べて多量に存在しているためと考えられる。一方で、窒素安定同位体比に関しては、出水前後でその値が増加しており、最下流地点では5‰を超える高い値を示している。森林起源の有機物の窒素安定同位体比は0‰前後であるため、相対的には森林起源の有機物が剥離した付着藻類の比に比べて多いにもかかわらず、下流域では剥離した藻類 (0‰ $\sim$ 8‰) が河床に堆積することによって、窒素安定同位体比が増加していると考えられる。これは出水時の藻類の剥離・堆積により、ダム下流域の二次汚濁が起こりうることを示している。また、以上の結果は河床堆積物中の窒素安定同位体比が剥離藻類の流下過程を明らかにするのに有効であることを示唆している。

4. 結論

徳島県那賀川の長安ロ・川口ダム下流では、置土をすることによって、出水時に異常繁茂した付着藻類の強制剥離を十分に期待できることが現地観測および再現シミュレーションから明らかとなった。また、再現シミュレーションによって置土がされない場合には、半分以上の付着藻類が残存することが示された。さらに、河床堆積物中の窒素安定同位体比が剥離した藻類の流下過程を明らかにするのに有効であることが示唆され、出水時の藻類の剥離・堆積により、ダム下流域の二次汚濁が起こ

りうることが明らかとなった。また、那賀川の長安ロダム、川口ダム下流での藻類の異常繁茂は溶存態リン濃度の増加によるものと考えられ、この藻類の異常繁茂そのものを抑制することが必要であることが示唆された。

謝辞：本研究は河川懇談会共同研究による成果である。記して謝意を表す。安定同位体分析では東京工業大学大学院理工学研究科吉村千洋准教授ならびに吉村研究室の学生の皆様に機器の使用法等、多くのご指導を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省：ダムと下流河川の物理環境との関係についての捉え方—下流河川の生物・生態系との関係把握に向けて—、国土技術政策総合研究所資料第521号，2009。
- 2) 坂本博文，谷崎保，角哲也：河川土砂還元を組み合わせ真名川ダム弾力的管理試験「フラッシュ放流」，土木学会河川技術論文集，Vol.11，pp.273-278，2005。
- 3) 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。
- 4) 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攪乱作用の評価について，水工学論文集，第47巻，pp.1063-1068，2003。
- 5) 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。
- 6) 武蔵由育，志宇知誠，山下正浩，竹林洋史，湯城豊勝，鎌田磨人，赤松良久，河口洋一，中田泰輔：置土された土砂の流下過程の数値解析モデルの構築と実河川における適用，水工学論文集，第55巻，pp.s_817-822，2011。

(2012. 4. 5受付)