

## 恒久的堆砂対策に伴う微細土砂が底生性生物におよぼす影響に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 22～平 24

担当チーム：水環境研究グループ

（自然共生研究センター）

研究担当者：萱場祐一、森照貴

### 【要旨】

ダム湖における恒久的堆砂対策により、自然発生する濁水とは、濃度の異なる濁水がダム下流部を流れ、場合によって砂を含む場合と含まない場合がある。平成 23 年度はシルトを主体とした濁水による付着藻類への影響を検討したため、平成 24 年度は、微細土砂濃度（SS 濃度）と砂の双方が存在する場合での付着藻類に及ぼす影響を検証した。その結果、SS 濃度が高いほど付着藻類中の無機物量や無機物含有比が増加しており、アユなどの餌としての質の低下が観察された。一方、砂が存在することで摩耗効果が発揮され、餌としての質の改善が観察された。つまり、濁水の影響は、濃度だけでなく濁水に含まれる粒径にも依存することが示された。

キーワード：付着藻類、流速、濁水、砂、シルト

### 1. はじめに

ダムは水を貯めると同時に、上流部から流下してくる多くの土砂をダム湖内に留める。そのため、大量の土砂がダム湖には堆積しており、貯水機能の低下など様々な問題が懸念されている(Morris & Fan 1998)。また、ダム湖によって、本来は流下するはずの土砂が補足されてしまうため、ダム下流部の河床では、土砂が供給されなくなる。これにより、粗粒化(写真 1)と呼ばれる微細土砂の欠乏が報告されており、河床構造の変化に伴う河川生態系への影響が問題視されている(池淵 2009)。近年では、ダム湖の貯水機能の改善と同時に、ダム湖下流部の底質環境の改善を図るため、ダム湖に堆積している土砂を下流河川へ排出する方策(フラッシングなど)や、ダム湖への土砂の流入を防ぐために土砂を迂回させる方策(バイパスの建設など)が検討されており(図 1)、これらは恒久的堆砂対策と呼ばれる。

恒久的堆砂対策の実施に伴い、ダム下流へと放出される土砂には、シルトなどの微細成分を多く含まれており、ダム下流域に高濃度の濁水が流下する場合がある。高濃度濁水は、自然発生する洪水時にも観察されるが、恒久的堆砂対策によって生じる濁水とは、濁水に含まれる粒度組成に大きな違いが存在する。すなわち、恒久的堆砂対策によって放出される濁水には、粒径の細かいシルト成分を大量に含むだけでなく、砂や砂以上の粒径集団が欠乏する場合とそうでない場合があり、2つのケースを対象とした検討が必要である。

ダム上流



ダム下流



写真1 ダム下流域での微細土砂の欠乏による粗粒化の様子

濁水が河川生態系に及ぼす影響は、魚類や底生動物、付着藻類など様々な生物を対象に研究が進められてきた。これまでに、多くの生物に対して濁水の影響が報告されてきたが(Shaw & Richardson 2001, Bilotta & Brazier 2008)、その多くは濁水の濃度や継続時間について注目したものである。それに対し、濁水の成分に注目した研究はほとんどなく、砂等の粒径集団の欠乏による河川生態系への影響に関する知見は限られたものである。

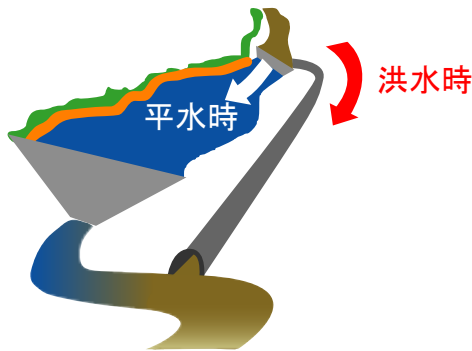
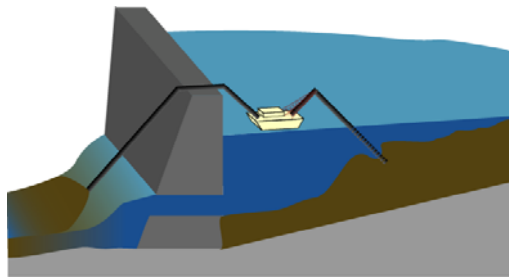
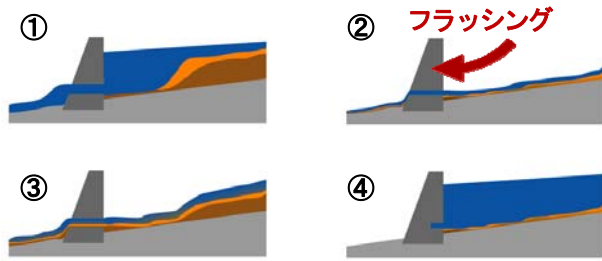


図 1 恒久的の堆砂対策の例。フラッシング排砂(上段)、水圧差を利用した吸引による排砂(中段)、土砂バイパスによる排砂(下段)

濁水中に含まれるシルトと砂は、粒径が異なることにより、付着藻類に及ぼす影響が大きく異なる。粒径が数 $\mu\text{m}$ 程度の浮遊シルトは、付着藻類に取り込まれ(写真 2)、付着藻類の無機物量を高めることが知られている(Graham 1990, 森・萱場 2011)。そして、この現象は例え流速が速い条件下であって生じることが示されている(森・萱場 2011)。一方、粒径が $10^{-1}\text{ mm}$ から $10^0\text{ mm}$ 程度の砂は、流速や付着藻類の状態によっては取り込まれることもあるが、ある程度速い流速下では、付着藻類の剥離を促す摩擦効果があることが示されている(Schofield et al. 2004 Merten et al. 2010)。このように、濁水に含まれる土砂の成分に依存して、付着藻類が受ける影響は異なるものと考えられ、シルトが大部分を占める濁水では、砂を含むか否かによって、付着藻類への影響が異なるものと考えられる。



写真 2 シルトが取りこまれた付着藻類の様子

これまで、自然発生した洪水時の野外調査が困難なことから、濁水が付着藻類に及ぼす影響は、主に実験水路を用いて検証されてきた。しかし、既存研究の多くは、洪水時やダムからの放水時に見られるような非常に早い流速を実験条件に反映させておらず、実際に野外で生じている現象を再現しているとは言い難い。そのため、洪水時における、濁水の影響についての知見は非常に限られており、ダム湖における恒久的の堆砂対策を実施する上で、ダム下流の生態系に配慮した濁水の放出のあり方については不明な点が多い。特に、付着藻類は様々な面から流速の影響を受けることが知られており、流速の変化は一次生産速度の変化や剥離量の変化をもたらす。そのため、濁水が付着藻類に及ぼす影響を解明するためには、流速の影響を考慮することが重要である。そこで、本研究では、洪水時に見られる流速を再現可能な循環型管路(図 2)を用いて、濁水の濃度と砂の有無を操作することで、濁水に含まれる成分の違いが付着藻類に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、実験を行なった。

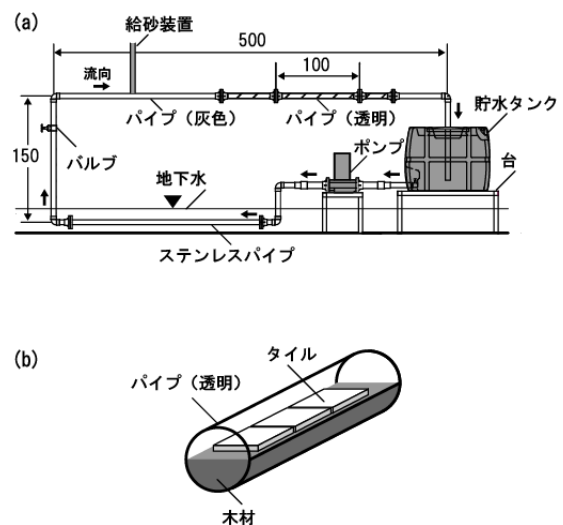


図 2 循環型管路。全体図 (a) および透明パイプの拡大図 (b)

## 2. 濁水の成分の違いが付着藻類に及ぼす影響：流速に依存した砂の効果

### 2.1. 実験の概要

本研究では、フラッシングやバイパス（図 1）など、恒久的堆砂対策の実施に伴って発生する濁水と、自然発生する濁水とで、付着藻類に及ぼす影響がどのように異なるのかを、砂の有無と濁水濃度の違いに注目して実験を行った。ダム下流域を流れる際に想定される流速 4.0 m/s を再現可能な循環型管路を 6 基用い（写真 3）、平水時の流速（0.5 m/s）と洪水時の流速（4 m/s）の条件下において検証を行った。



写真3 実験に用いた循環型管路

### 3. 2 材料と方法

本研究では、あらかじめ自然共生研究センター内を流れる実験河川（新境川より導水）にタイルを沈水させておき、定着した付着藻類を実験に用いた（写真 4）。沈水期間は 12 日間とし、付着藻類が定着したタイルを循環型管路の透明パイプ内に設置し（図 2）、各実験処理条件を設定した循環型管路に設置した。本研究での実験処理条件は、平水時の流速を想定した 0.5 m/s と洪水時の流速を想定した 4.0 m/s の二段階に設定し、濁水濃度として浮遊土砂濃度（粒径  $5 \mu\text{m}$  のシルト（カオリン））を用いて SS 濃度を調整を 10, 1000, 10000 mg/L の三段階に設定した（写真 5）。さらに、全ての条件において、砂（粒径 0.1-2 mm の砂）を使用し、0 g/m<sup>3</sup> もしくは 0.01 g/m<sup>3</sup> の有無を変化させた（合計で 12 条件の実験水路を設定）。各条件で付着藻類を濁水に 24 時間曝露させた後、付着藻類に含まれる無機物量、有機物量、無機物含有比、クロロフィル *a* 量を測定した。さらに、一次生産量を測定することで、単位クロロフィル *a* 量あたりの生産速度（藻類活性）を測定した。

無機物量および有機物量は、特殊アクリル繊維（ミクロクロス）を用いてタイル表面の付着藻類を擦りとり、60°C で 24 時間以上乾燥させ、絶乾重量を秤量後、550°C で 4 時間灼熱し、再び秤量した。これらの差（強熱減量）から無機物量および有機物量を算出し、さらに、これらの値から無機物含有比を算出した。付着藻類の現存量の指標となるクロロフィル *a* 量は、吸光度法により求めた。付着藻類を擦り取った特殊アクリル繊維を 99.5% エタノールに浸し（4°C, 24 時間）、色素を抽出後、抽出液の吸光度を計測し、SCOR/UNESCO (1966) の方法に準じて、クロロフィル *a* 量を算出した。単位クロロフィル *a* 量あたりの藻類活性 (mg-O<sub>2</sub> / μg / chl. *a* · hr) は、各処理条件の濁水に曝露した後、密閉型管路（写真 6）にタイルを入れ、明条件で 4 時間、暗条件で 4 時間にわたって溶存酸素量を測定し、使用したタイルのクロロフィル *a* 量から算出した。

SS 濃度および砂が付着藻類の特性に及ぼす影響を明らかにするため、各流速条件下において二元配置分散分析を用いて解析を行った。SS 濃度と砂の有無について交互作用が有意な場合、チューキーの HSD 検定により SS 濃度および砂の主効果を解析した。



写真4 タイルに定着した付着藻類

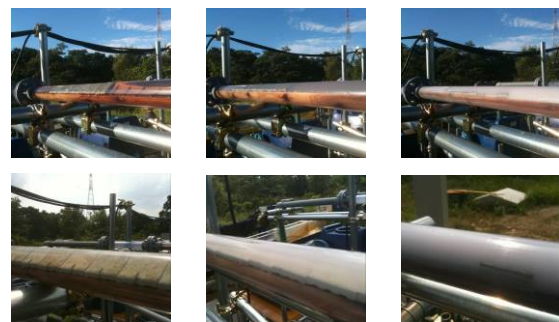


写真5 濁水の実験処理条件。カオリンを用いて SS 濃度を 10 mg/L (左), 1000 mg/L (中), 10000 mg/L (右) に調整。



写真6 付着藻類による溶存酸素濃度の変化を測定可能な密閉型管路

### 3. 3 結果

流速の速いおよび遅い条件における二元配置分散分析の結果、有機物量、無機物量、無機物含有比および藻類活性については、どちらの流速でも同じ傾向となる結果が得られた。一方、クロロフィルa量については、流速によって結果が異なっていた。

付着藻類中の有機物量は、砂の有無によって有意な差が見られたが ( $P < 0.05$ )、SS 濃度の影響は受けていなかった ( $P > 0.05$ , 図3)。一方、付着藻類中の無機物量については、砂の有無および SS 濃度の違いによる有意な差が見られた ( $P < 0.05$ )。SS 濃度が高いほど無機物量が多くなるのに対し、砂が有る方が少なくなっていた (図3)。無機物含有比についても、無機物量と同じ傾向となる結果が得られ (図3)、SS 濃度が高いほど含有比が高く、砂が有る方が含有比は小さくなっていた ( $P < 0.05$ )。

クロロフィルa量については、流速によって傾向が異なっていた。遅い流速条件下では、SS 濃度はクロロフィルa量に影響を及ぼさないのに対し ( $P > 0.05$ )、砂が有ることでクロロフィルa量は減少していた ( $P < 0.05$ , 図3)。一方、速い条件下では、SS 濃度と砂の有無の両方がクロロフィルa量に影響を及ぼしていた ( $P < 0.05$ )。SS 濃度が高いほど、クロロフィルa量は多くなり、砂があることでクロロフィルa量は減少していた (図3)。また、藻類活性については、SS 濃度および砂の有無の影響は検出されなかった ( $P > 0.05$ , 図3)。

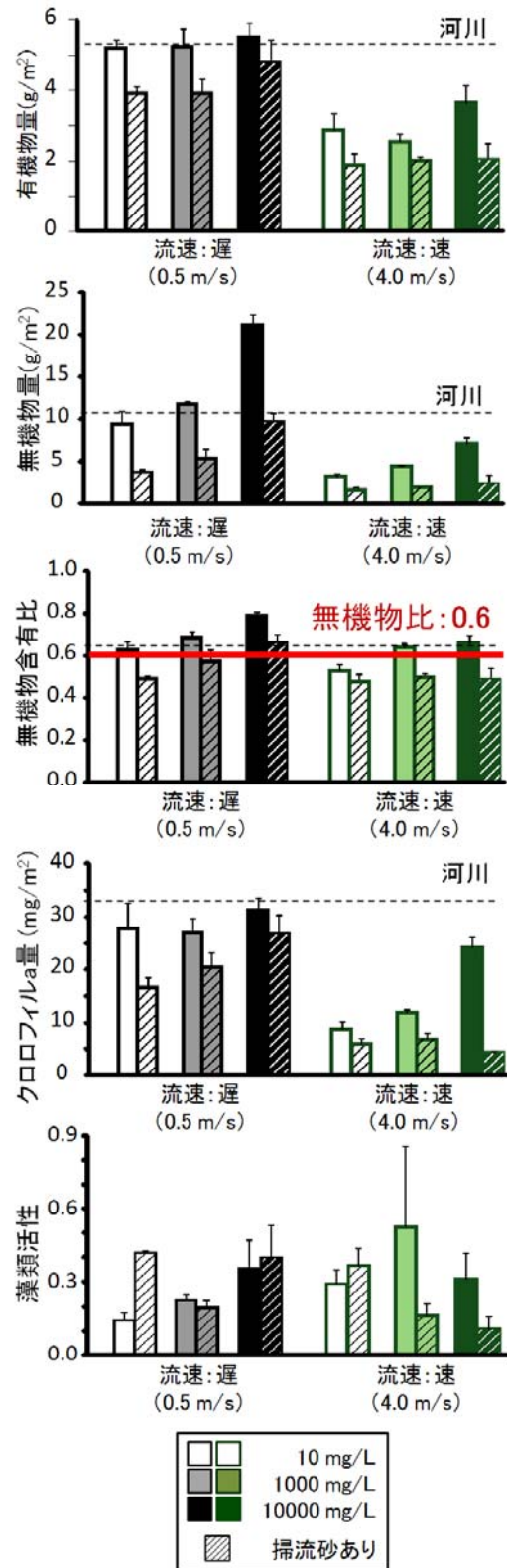


図4 流速の違い (0.5 m/s) および速い (4.0 m/s) 条件において、各 SS 濃度 (10, 1000, 10000 mg/L) および砂が有機物量、無機物量、無機物含有比、クロロフィルa量および藻類活性に及ぼす影響

#### 4. 考察

本研究より、付着藻類に対する微細土砂の影響は、砂によって緩和されることが示された。無機物量および無機物含有比は、SS 濃度が高くなるほど、増加する傾向にあった。しかし、砂が存在することで、無機物量および無機物含有比は減少する傾向にあった。つまり、本研究より、砂の存在は流速に関係なく付着藻類に対して摩耗効果をもたらしたものと考えられる。

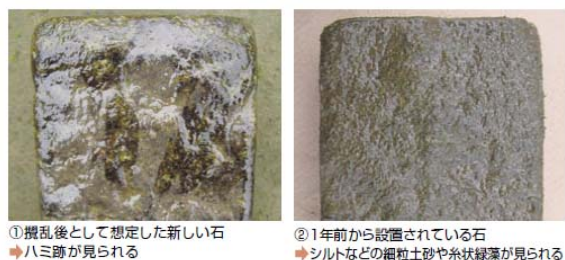


写真7 付着藻類の状態に依存して異なる  
アユのハミ跡の有無

付着藻類は河川の一次生産者としての機能を持っており、アユなどの藻類食者に餌資源を提供する。しかし、付着藻類の状態によって、餌資源の質は大きく変化し、質が低下することで多くの藻類食者は付着藻類を食べなくなってしまう(写真7)。例えば、アユと付着藻類の関係に注目した研究によると(皆川ほか 未発表)、無機物含有比が0.6以上となった場合、アユは付着藻類を食べなくなることが報告されている。付着藻類はアユなどの藻類食者による摂食や物理的な摩耗・剥離といったプロセスが機能しない状況では、種組成を変化させつつ無機物含有比の高い状態へと過剰成長とも呼べるような変化をしてしまう。アユは付着藻類を食べることで過剰成長を抑え、付着藻類をアユ自身にとって食べるのに適した状態に保つことが知られている(阿部 2012)。そのため、ダム下流域においてアユの生息が維持されるためには、アユが食べないような付着藻類の状態へ移行してしまうのを防ぐ必要がある。本研究では、砂がない処理条件では、濁水が流れることで無機物含有比が0.6を上回っていた。しかし、砂が有ることで、1つの条件(流速が遅く、SS濃度が10000 mg/L)以外では、無機物含有比が0.6を下回る結果が得られた。つまり、砂が存在することで、これが河床近傍を掃流し、無機物が堆積した付着藻類の剥離を促進し、アユなどの藻類食者にとって質の良い付着藻類を保つ可能性があると考えられる。

これまで、高濃度濁水に含まれるシルトが付着藻類内に取り込まれることにより、付着藻類と無機物が一体となり、流水に対して強固な構造を形成し、剥離を防ぐことが示されている(森・萱場 2011)。これは、シルトによるコーティング効果と呼ばれ、付着藻類の餌資源としての質の低下や光合成活性の低下をもたらす可能性が示唆されている。本研究でも、流速が速い条件であるにも関わらず、SS濃度が10000 mg/Lの条件で無機物量が多く、クロロフィルa量も多いままとなっていたことから、剥離を防ぐコーティング効果の存在が確認された。しかし、本研究より、砂が存在することによる摩耗効果で、このコーティング効果が防がれ、無機物量とクロロフィルa量が低下することが観察された。

付着藻類の活性については、SS濃度や砂による明確な影響は検出されなかった。藻類活性は、無機物の堆積による光透過性の阻害の影響を強く受けるものと予想されるが、無機物含有比が少ない処理条件で活性が高くなるわけではなかった。これらの結果は、付着藻類の活性は、無機物の堆積以外にも、付着藻類の絶対量、種組成の影響も受ける可能性を示唆するものである。

過年度の研究により、高濃度濁水の流下は、付着藻類に影響を及ぼすことが示された。これは、速い流水環境を作り出すことで、ある程度は緩和されることが示されているが(森・萱場 2011)、コーティング効果をもたらす負の影響が懸念されていた。本研究では、コーティング効果が砂の存在により緩和され、アユなどの生物にとっても好適な餌資源がもたらされることが示された。つまり、高濃度濁水が流下する場合には、河床近傍を掃流し、摩耗効果が期待できるより大きな粒径集団が流下することが大切である。これは、付着藻類の剥離・更新を促し、洪水後においても付着藻類の餌資源としての質を維持する。これまで、土砂還元などの方策が行われており、付着藻類の剥離・更新が促進されたと言う報告はあるものの、多くの場合、その効果は短期的であり、還元土砂が一旦流下し終わると、付着藻類が再度過剰に繁茂する可能性もある。今回、実験に用いた砂は自然河川における洪水時流量と比べ非常に少ない量であるが、十分な付着藻類の剥離をもたらすといった結果が得られた。つまり、濁水に砂などの粒径成分を含める際には、短期・高濃度ではなく、低濃度で良いから長期的に砂を供給できるシステムを構築することにより、ダム下流域の生態系の健全性が保たれるものと考えられる。

参考文献

- 1) Morris L. G. & Fan J., Reservoir Sedimentation Handbook, McGraw-Hill Professional, 1998
- 2) 池淵周一, ダム下流生態系, 京都大学学術出版会, 2009
- 3) Shaw E. A. & Richardson S. J., Direct and indirect effects of sediment pulse duration on stream invertebrate assemblages and rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) growth and survival. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 58(11): 2213–2221, 2001
- 4) Bilotta G. S. & Brazier R. E., Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota. Water Research, 42: 2849–2861, 2008
- 5) Allan J. D. & Castillo M. M., Stream Ecology, 2nd ed, Springer, 2007
- 6) Graham A.A., Siltation of stone-surface periphyton in rivers by clay-sized particles from low concentrations in suspension. Hydrobiologia, 109:107–115, 1990
- 7) 森照貴, 萱場祐一, 高流速および高濃度濁水が付着藻類におよぼす影響 —流速及びSS濃度の変化と付着藻類の変化に着目して—, 土木技術資料, 53(12), 38–41, 2011
- 8) Schofield A.K., Pringle M.C. & Meyer L.J., Effects of increased bedload on algal- and detrital-based stream food webs: Experimental manipulation of sediment and macroconsumers. Limnology and Oceanography, 49(4), 900–909, 2004
- 9) Merten C.E., Hintz D.W., Lightbody F.A. & Wellnitz T., Macroinvertebrate grazers, current velocity, and bedload transport rate influence periphytic accrual in a field-scale experimental stream. Hydrobiologia, 652:179–184, 2010
- 10) SCOR/UNESCO, Determination of photosynthetic pigments in seawater, Report of SCOR/UNESCO Working Group 17, In: Monograph on Oceanographic Methodology, pp. 69. UNESCO, Paris, 1990.
- 11) 阿部信一郎, 河川付着珪藻とアユの生態学的相互関係, 潰瘍と生物, 166(28): 495–500, 2012

# A STUDY ON ALTERNATION IN SUSPENDED SOLIDS BY SUSTAINABLE SEDIMENT MANAGEMENT OF DAM RESERVOIRS ON STREAM BENTHIC ORGANISMS BELOW DAMS

**Budget:** Grants for operating expenses General account

**Research Period :** FY2010-2012

**Research Team :** Water Environment Research Group  
(Aqua Restoration Research Center)

**Author :** YUICHI Kayaba, TERUTAKA Mori

**Abstract :** Methods which discharge sediments depositing in dam reservoirs have recently been discussed and implemented. Because operations of methods run off highly turbid water, which contain more silts but less sands, to downstream, we examined effects of suspended solids and bedload transport on benthic periphyton. Suspended solids and bedload have negative and positive effects on periphyton, respectively. These findings indicated that not only concentration but also component of turbid water is important to manage effects of turbid water on stream ecosystems.

**Key words :** periphyton, velocity, turbidity, bedload transport, silt