

## 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 25

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、宮川幸雄、森照貴

### 【要旨】

ダム湖における恒久的な堆砂対策とは、ダム湖に流入・堆積する土砂を減少させることを目的とし、治水機能を維持するとともに、ダム下流部に土砂を供給することで下流生態系の土砂不足を補おうとするものである。しかし、堆砂対策の実施に伴い、ダム下流部に高濃度の濁水が流出する場合があります、この濁水による河川生態系への影響が懸念されている。そこで、本研究では堆砂対策による濁水の影響を評価するために、1. 濁水が付着藻類に及ぼす影響は、流速や土砂の粒径成分に依存して変化するか、2. 濁水の影響を受けた付着藻類は、その後どのように変化（遷移）するか、3. 藻類食者である水生昆虫や魚は、濁水の影響を受けた付着藻類を餌として利用するか、について検証を行った。濁水の濃度（シルトで調整した浮遊土砂濃度）が高いほど、付着藻類に堆積する無機物量（堆積無機物量）が多くなったが、流速が速いほど堆積無機物量は少なくなる傾向にあった。ただし、流速が速くとも、濁水の濃度が非常に高い場合には藻類の表面を無機物が覆うことで、流水による剥離を阻害し、更新を妨げる可能性が示唆された。しかし、この現象はシルトのみが濁水に含まれる場合に観察され、濁水にシルトだけでなく砂（粒径：0.1-2 mm）が含まれる場合には、濁水中の砂が付着藻類の剥離を促し、高濃度の濁水が流下したとしても無機物が堆積しないことが明らかとなった。また、濁水の影響で付着藻類に堆積した無機物は、藻類の剥離・更新により約2週間後には減少し、濁水の影響は見られなくなった。濁水により付着藻類に無機物が堆積していたとしても、コヤマトビケラ属とアユは餌として摂食しており、その結果として、堆積無機物量が減少し、付着藻類の成長が抑えられることが明らかとなった。ただし、堆積無機物量が多い付着藻類のみを摂食していたアユについては、肥満度の低下を示唆する結果が得られた。一方、エルモンヒラタカゲロウについては、堆積無機物量が多い付着藻類を餌として利用しなかった。そのため、堆積無機物量が減少することはなく、付着藻類が過剰なまでに成長した。このように、恒久的堆砂対策に伴って発生する濁水は、付着藻類に直接的な影響を及ぼすだけでなく、付着藻類と藻類食者の相互関係にも影響が及ぶ可能性があることが本研究より示された。今後、恒久的な堆砂対策を実施する上で、流下する濁水の流速を速くし、シルトだけではなく砂も含むようにすることに加え、水生昆虫やアユのような藻類食者が多く存在する生態系を維持していくことで、河川生態系に対する濁水の影響は大きく緩和されるものと考えられた。

キーワード：ダム、濁水、付着藻類、水生昆虫、アユ

### 1. はじめに

ダムは水を貯めることで利水・治水での機能を発揮するが、同時に上流部から流入してくる多くの土砂をダム湖内に留める。その結果、ダム湖内には土砂が堆積し、貯水機能の低下など様々な問題が生じる恐れがある (Morris & Fan 1998)。また、本来は流下するはずの土砂がダムにより扞止されてしまうため、ダム下流部の河床では、流下しやすい微細土砂が欠乏しやすいことが報告されており、河床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)。そのため、近年ではダム下流部における

環境の改善・維持のために、堆積土砂を下流河川へ排出する対策 (フラッシングなど) や、ダム湖への土砂の流入を防ぐため、土砂を迂回させる対策 (バイパスの建設) など、様々な方策が検討されている (図 1)。

これらの手法は恒久的堆砂対策と呼ばれ、土砂を大量に含む濁水をダム下流へ流下させるものであるが、自然界で生じる濁水よりも、シルトを高濃度に含む濁水であることが多く、ダム下流域の河川生態系に対する影響が懸念されている (Morris & Fan 1998)。これまでに、様々な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 (Izaguirre et al. 2009, Molinos & Donohue 2009)。それに対し、恒久的堆砂対策の実施に伴って発生する濁水は、自然発生する濁水とは粒径分布が異なる場合があり、特にシルトを多く含む場合が多い。しかし、濁水の成分に注目した研究はほとんどなく、恒久的堆砂対策によって発生する濁水の影響を評価・予測することが困難である。

堆砂対策の多くは自然発生した洪水時に、多くの土砂をダム下流部へ流下させるものである。そのため、土砂を流下させる際、ダム下流部では非常に速い流速で濁水が流れる。つまり、堆砂対策による濁水の影響を正確に把握するためには、想定される流速条件下での検証が必要である。しかし、自然発生した洪水時に野外調査を行うことは困難であるため、濁水が水生生物に及ぼす影響は、主に実験水路を用いて検証されてきた (例えば、Lamed et al. 2004)。ただし、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速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 (Francoeur & Biggs 2006)。そのため、洪水時における濁水の影響については、十分な知見がないため、堆砂対策を行う上でどのように濁水を排出させるべきかに関して、不明な点が多く残されている。

付着藻類は河川生態系における主要な一次生産者であり、重要なエネルギー基盤である (Allan & Castillo 2007)。これまでに数多くの環境要因が付着藻類に影響を及ぼすことが示されてきたが、流速は栄養塩吸収速度や群集構造を規定する主要な要因であり、また洪水が生じることで付着藻類の剥離・更新が促されることが知られている (Munteanu & Maly 1981)。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と考えられる。また、付着藻類は様々な水生生物の餌資源であることから、付着藻類に対する濁水の影響は、藻類食者にまで波及する可能性が考えられる。付着藻類と藻類食者である水生昆虫や魚類との間の相互作用については、様々な研究が進められており (Allan & Castillo 2007)、付着藻類の現存量や生産性、種構成の変化が、藻類食者の密度や多様性に影響を及ぼすことが示されてきた (Hawkins et al. 1982)。その一方で藻類食者による摂食が付着藻類の現存量や種構成に影響を及ぼすことも知られている (森ほか 2005)。しかし、この両者の関係性について濁水の影響に注目した研究は少なく、堆砂対策の実施方法を考える上でも、どのような

影響が及ぶかについて検証する必要があると考えられる。

そこで、本研究では、シルトを高濃度に含む濁水がダム下流域を流下することで、河川生態系にどのような影響が及ぶのかを明らかにすることを目的とし、4つの実験を実施した。最初に、濁水が付着藻類に及ぼす影響は、流速や土砂の粒径成分に依存して変化するのかについて検証し、2つ目に濁水の影響を受けた付着藻類は、その後どのように変化 (遷移) するのかを示した。3つ目に藻類食者である底生性生物 (水生昆虫) に注目し、濁水の影響を受けた付着藻類を餌として利用するのかを明らかにし、最後に遊泳性魚類であるアユが濁水の影響を受けた付着藻類とどのような相互関係にあるのかについて検証を行った。

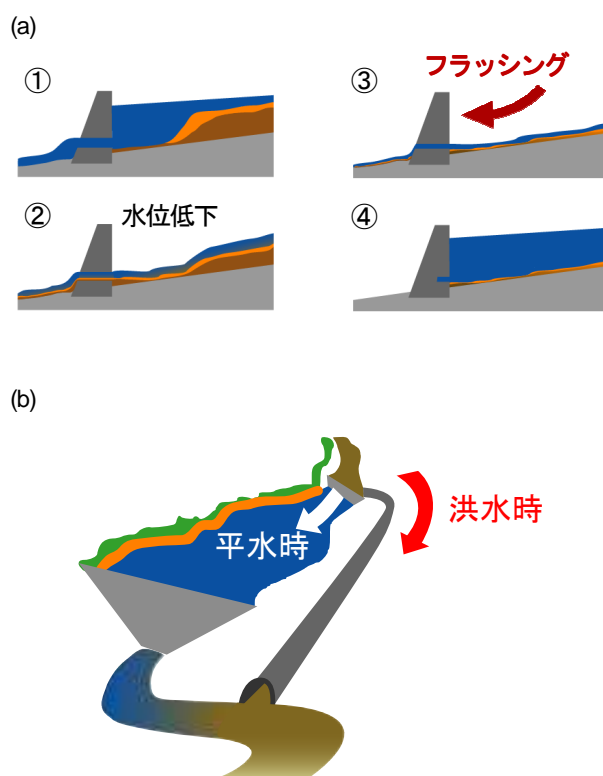


図1. 恒久的堆砂対策の例。フラッシング(a)および土砂バイパス(b)による排砂。

## 2. 実験システムの構築

### 2.1. 高流速に対応した循環型管路の製作

恒久的な堆砂対策に伴う濁水がダム下流域を流れる際、非常に速い流速が想定されることから、高流速 (流速 4.0 m/s) に対応した循環型管路システムを構築した (図2)。半径 50 mm の塩ビおよびステンレスパイプと貯水量 200 L のタンクを用いて製作し、高排出量 (約 6.0 L/s) のラインポンプを使用した (図2a)。ポンプの稼働に伴い、

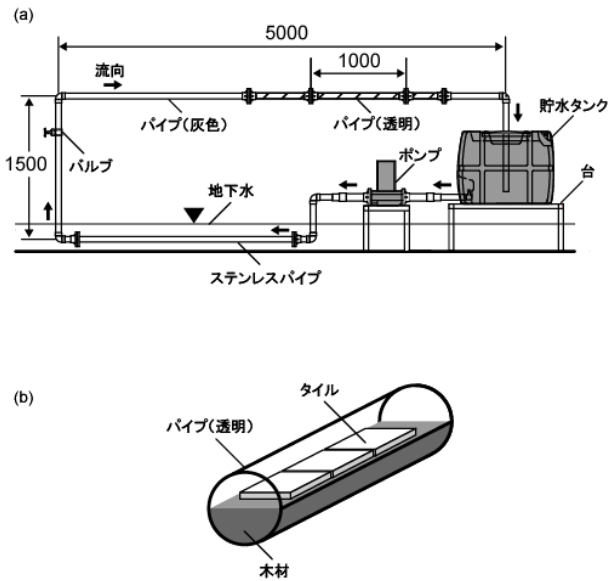


図2. 高流速対応の循環型管路。全体図 (a) および透明パイプの拡大図 (b)。

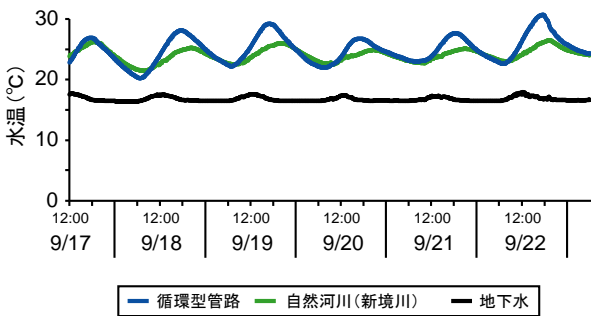


図3. 循環型管路、自然河川および地下水の水温変動。

管路内の水温が上昇することから、管路の一部に使用したステンレスパイプを、汲み上げた地下水に沈水させることで水温上昇を防いだ。また、管路内の流水環境の変化（濁水など）が付着藻類に及ぼす影響について検証できるようにするために、管路の一部に取り外し可能な透明パイプを使用し、その中に、付着藻類を定着させたタイルを挿入できるようにした（図2b）。

超音波流量計を用いて循環型管路内の流速を測定したところ、最大流速は4.1 m/sであった。また、バルブを用いて流量を調整したところ、0.4 m/sの流速下でも管路内に空間ができることはなく、安定した流れを作り出すことが可能であった。ポンプを数日間稼働させ、管路内の水温を測定したところ、地下水の冷却機能により、自然河川と類似の水温変動を示すことが明らかとなった（図3）。これらの結果から、製作した循環型管路は、自然河

川の早瀬や平瀬における平水時の流速条件（約 0.5 m/s）や洪水時（堆砂対策の実施時）の流速条件（約 4.0 m/s）を再現可能であることが明らかとなった。

## 2.2. 密閉式の循環型管路の製作

河川環境の変化が付着藻類に及ぼす影響として、現存量や種構成（多様性）の変化だけでなく、生産速度の変化も挙げられる。付着藻類の現存量は、クロロフィルa量を代替指標とすることで評価することが多く、種構成は生物顕微鏡下で種同定することで評価される。一方、付着藻類の生産速度については、流水環境下での溶存酸素の時間変化を測定する必要がある、技術的な難しさからあまり評価されてこなかった。しかし、付着藻類の生産速度は、現存量や種構成と必ずしも関係性があるわけではなく、直接的に評価する必要がある。そして藻類を摂食する生物に対して餌資源の供給量を考える上でも、生産速度は重要な評価指標である。そこで、本研究では流水環境のもとでも密閉可能な循環型管路を製作し、さらに流水中の溶存酸素濃度の経時変化を測定できるようにすることで、付着藻類の生産速度を測定可能なシステムを構築した（図4）。高流速対応の循環型管路（図2）と同様に半径 50 mm の塩ビ、ステンレスおよび透明パイプと水陸両用ポンプ（最大流量：45 L/min）を用いてシステムを製作し（図4a）、付着藻類を定着させたタイルを挿入できるようにした（図4b）。

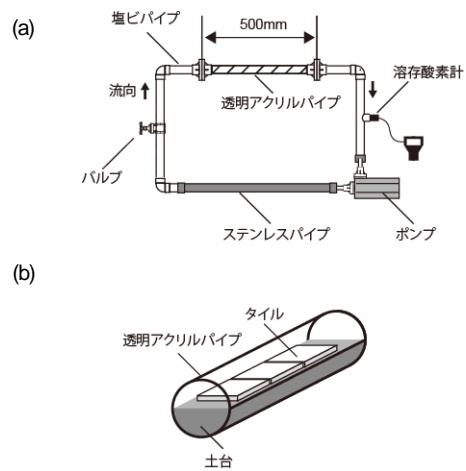


図4. 付着藻類の生産速度を測定するための密閉式の循環型管路。全体図 (a) および透明パイプの拡大図 (b)。

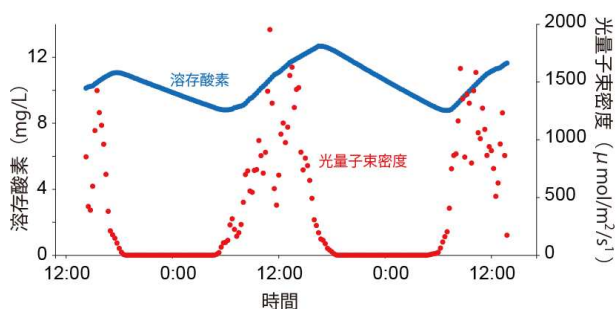


図5. 密閉式の循環型管路内の溶存酸素濃度と光量子束密度の時間変化。

製作した密閉式の循環型管路において、流路内の流速を測定したところ約0.5 m/sであった。そのため、高流速対応の循環型管路（図2）と同様に、平水時における自然河川の早瀬や平瀬の流速条件（約0.5 m/s）を再現可能なシステムと考えられる。この密閉式の循環型管路内に付着藻類が定着したタイル（3枚）を入れ、自然条件下に設置したところ、管路内の溶存酸素濃度は管路に対する光量子束密度の変化と対応関係が見られた（図5）。太陽光があたる日中には溶存酸素濃度が上昇し、太陽が沈み光量子束密度がゼロになった夜間には溶存酸素濃度が減少する傾向にあった（図5）。これらの結果から、付着藻類の光合成および呼吸による酸素濃度の変化が十分に計測できていると考えられ、対象とする付着藻類の生産速度を評価できることが明らかとなった。

### 3. 洪水時における付着藻類の劣化機構の解明

#### 3.1. 実験の概要

恒久的な堆砂対策によ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明らかにするため、流速、砂の有無、そして濁水濃度の違いに注目して実験を行った。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1）。沈水期間は2週間程度とし、付着藻類が定着したタイルを高流速対応の循環型管路内に設置した（写真2、図2）。管路内を流れる流水を、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、浮遊土砂濃度（粒径5 μmのシルトを用いて調整）を清水を想定した10 mg/Lと濁水および高濃度濁水を想定した1,000と10,000 mg/Lの三段階に設定した（写真3）。さらに、全ての条件において、砂の有無を変化させることで（粒径0.1-2 mmの砂を使用し、

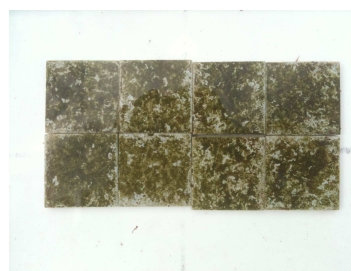


写真1. タイルに定着した付着藻類。



写真2. 実験に用いた高流速対応の循環型管路。

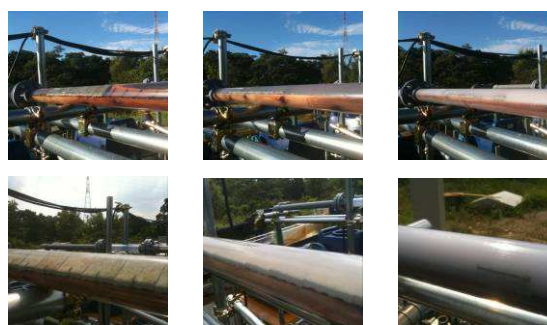


写真3. 実験処理条件。シルトを用いて浮遊土砂濃度を10 mg/L（左）、1,000 mg/L（中）、10,000 mg/L（右）に調整。

0 g/m<sup>3</sup> もしくは 0.01 g/m<sup>3</sup>）、合計で12条件の実験デザインを組んだ（各条件は4回繰り返す）。付着藻類を各条件の濁水もしくは清水に24時間曝露させた後、付着藻類のクロロフィルa量と堆積している無機物量および有機物量を測定し、さらに、密閉式の循環型管路（図4）を用いて付着藻類の生産速度を測定した。

無機物量および有機物量は、タイル表面の付着藻類を擦りとり、60℃で24時間以上乾燥させ、絶乾重量を秤量後、550℃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。また、付着藻類の生産速度を評価するために、単位クロロフィルa量あたりの最大光合成速度( $\text{mg-O}_2 \mu\text{g} / \text{mg-chl. a/hr}$ )を求めた。各処理条件の濁水もしくは清水に曝露したタイルを、密閉式の循環型管路(図4)に入れ、24時間にわたって溶存酸素量の時間変化を測定し、さらに、タイルに付着しているクロロフィルa量についても測定することで、単位クロロフィルa量あたりの最大光合成速度を算出した。浮遊土砂濃度、砂の有無、流速の違いが付着藻類に及ぼす影響を検証するため、得られた結果を分散分析とチューキーのHSD検定により解析した。

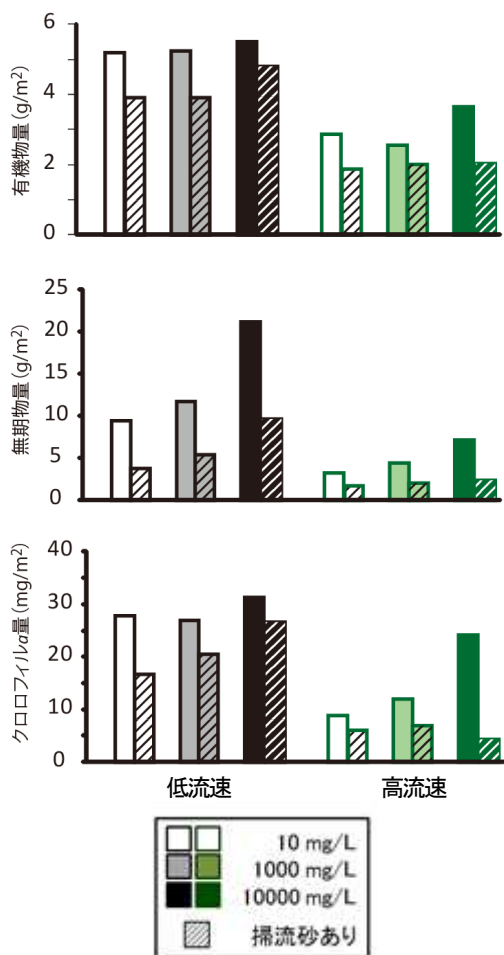


図6. 低流速 (0.5 m/s) および高流速 (4.0 m/s) 条件において、浮遊土砂濃度 (10, 1,000, 10,000 mg/L) および砂の有無が有機物量、無機物量およびクロロフィルa量に及ぼす影響。

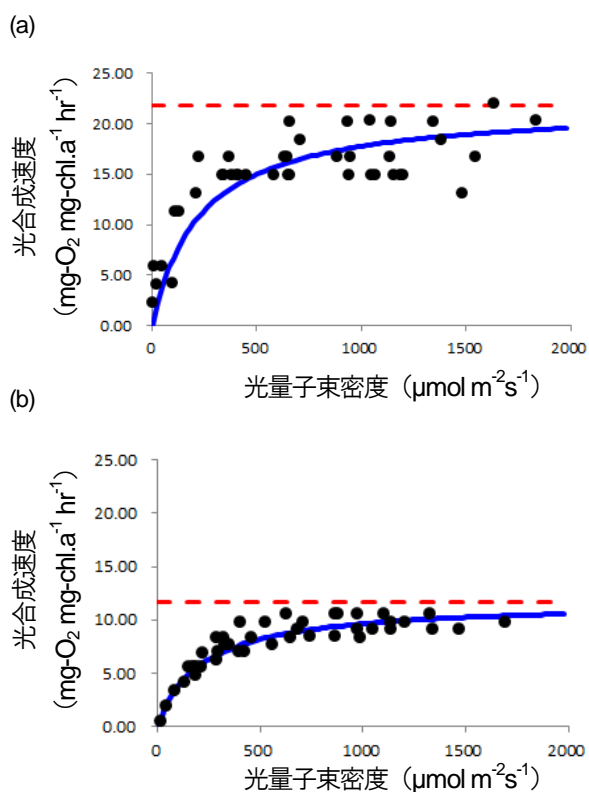


図7. 密閉式の循環型管路内の溶存酸素量から求められた、清水 (浮遊土砂濃度: 10 mg/L、砂: 無、流速: 0.5 m/s) に曝した付着藻類 (a) と濁水 (浮遊土砂濃度: 10,000 mg/L、砂: 無、流速: 0.5 m/s) に曝した付着藻類 (b) における光—光合成曲線。青線が光—光合成曲線を示し、赤線は最大光合成速度 ( $P_{max}$ ) を示す。

### 3.2 結果

付着藻類に含まれる有機物量は、流速の違いや砂の有無によって統計的な差が見られたが、浮遊土砂濃度の影響は受けていなかった(図6)。付着藻類に堆積している無機物量については、流速および砂の有無、そして浮遊土砂濃度の違いによる有意な差が見られた。浮遊土砂濃度が高いほど無機物量が多くなっていたが、流速が速く、砂が有ることによって減少する傾向にあった(図6)。一方、クロロフィルa量については、流速によって砂の有無と浮遊土砂濃度の影響が異なっていた(図6)。低流速下では、浮遊土砂濃度はクロロフィルa量に影響を及ぼしておらず、砂が有ることによってクロロフィルa量は減少していた(図6)。それに対し、高流速下では、浮遊土砂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おり、浮遊土砂濃度が高いほど、無機物量およびクロロフィルa量は多くなり、砂があることでクロロフィ

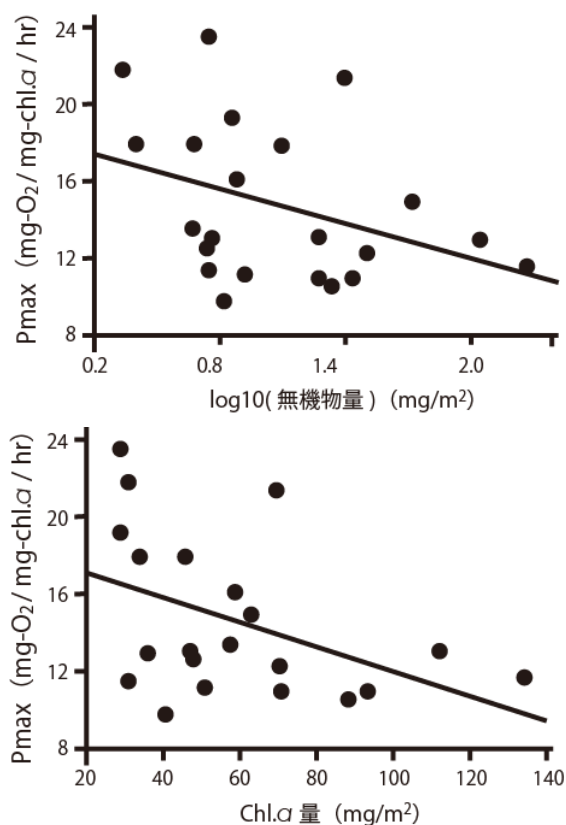


図8. 附着藻類の無機物量およびクロロフィル $a$ 量と最大光合成速度 ( $P_{max}$ ) との関係。

ル $a$ 量は減少していた(図6)。クロロフィル $a$ 量あたりの藻類活性(光合成速度)は、いずれの実験条件においても暗条件(夜間)から光量子束密度が徐々に高くなることで、急激に活性が高まり、その後、漸増する傾向にあった(図7)。そして、光-光合成曲線から求められる最大光合成速度( $P_{max}$ )は、無機物量とクロロフィル $a$ 量が多くなるほど低下する傾向にあった(図7、図8)。

### 3.3 考察

本研究より、附着藻類に対する濁水の影響は、浮遊土砂濃度だけではなく、流速や土砂の成分(砂の有無)によって変化することが示された。無機物量は浮遊土砂濃度が高くなるほど増加する傾向にあったが、砂が存在することや流速が速くなることで減少する傾向にあった。つまり、速い流水による引き剥がしや砂の存在による摩擦によって、附着藻類の剥離が促されるものと考えられる。ただし、流速が速い条件においても、濁水の濃度が高くなるほど、附着藻類に堆積もしくは取り込まれる無

機物量は多くなり、高流速であるにも関わらずクロロフィル $a$ 量が減少しない傾向が観察された。これは、流速が速くても附着藻類が剥離しないことを示している。この理由として、高濃度の濁水に含まれるシルトが、附着藻類の分泌する粘質物に捕捉されるなどして固着することで、附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たためと考えられる(コーティング効果)。このように附着藻類が剥離しなくなることで、現存量は高い状態が保たれるが、藻類の更新の可能性も示唆される。また、無機物量およびクロロフィル $a$ 量が増大するほど最大光合成速度( $P_{max}$ )が低下することが示された。これは無機物が堆積することや、藻類の現存量の増加に伴って膜が厚くなることにより、藻類に利用される光量が減少したためと考えられる。

附着藻類への無機物の堆積は、藻類を摂食する水生生物にとって質の低下を意味する可能性がある。さらに、無機物の堆積は生産性の低下を招くことから、単位時間あたりの餌の供給量の減少をもたらす。つまり、濁水による附着藻類への無機物の堆積は、質と量の両面から藻類食性の水生生物に負の影響をもたらす可能性が示唆される。しかし、本研究により濁水が速く流れることや、砂を含むことで附着藻類の剥離を促すことが明らかとなった。そのため、堆砂対策により高濃度の濁水を排出する際、河床近傍を掃流し、摩擦効果が期待できる粒径集団(砂:0.1-2 mm程度)が高流速で流下するように実施することで、附着藻類の剥離・更新が促され河川生態系への影響が緩和されるものと考えられる。

## 4. 平常時における附着藻類の回復過程の解明

### 4.1. 実験の概要

シルトを高濃度を含む濁水が流下することで、附着藻類に無機物の堆積や、それに伴う生産速度の低下が引き起こされる(「3. 洪水時における附着藻類の劣化機構の解明」を参照)。そこで、本研究では濁水の影響を受けた附着藻類が、その後どのような時間変化(遷移過程)をするのかを明らかにするため、開水路を用いた実験を行った。

濁水の影響を受けた附着藻類を用意するため、「3. 洪水時における附着藻類の劣化機構の解明」と同様の手順により、実験河川にて附着藻類を定着させたタイルを高流速に対応した循環型水路に導入した。本実験では、循環型水路内の流速を0.5 m/sと4.0 m/sの二段階に設定し、浮遊土砂濃度を粒径 $5\mu\text{m}$ のシルトを用いて10 mg/L(清水)と10,000 mg/L(濁水)の二段階に設定した。各条件

に設定した清水および濁水を用いて、付着藻類を入れた循環型水路を24時間稼働させた。その後、水生生物による摂食などの影響を除くため、実験河川水を導水した幅15 cmの開水路（流速：約0.5 m/s）に付着藻類が定着したタイルを固定した（写真4）。濁水および清水への曝露前と曝露直後、開水路に固定してから1、3、7、14日後に付着藻類を回収し、「3. 洪水時における付着藻類の劣化機構の解明」と同様の手順により、無機物量とクロロフィルa量を測定した。実験は4～5月と5～6月、6～7月にかけての計3回に渡って実施した。



写真4. 実験に用いた開水路。

## 4.2 結果

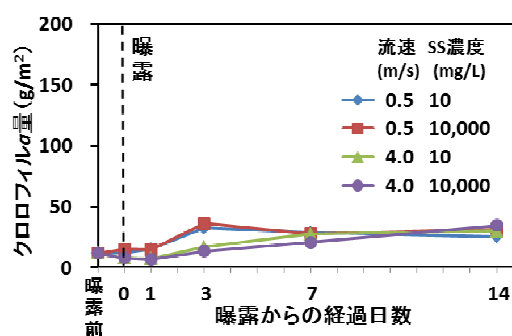
高流速対応の循環型水路にて付着藻類を清水および濁水に曝したところ、「3. 洪水時における付着藻類の劣化機構の解明」と同様の結果が得られた。高流速条件（4.0 m/s）では曝露直後にクロロフィルa量が減少する傾向にあったが、低流速条件（0.5 m/s）では曝露前後で変化は見られなかった（図9）。ただし、1および2回目に比べ3回目の実験では曝露前後の変化が大きく、高流速では明確に減少していたのに対し、低流速では増加する傾向にあった（図9）。

曝露直後の堆積無機物量は、流速0.5 m/sで浮遊土砂濃度10,000 mg/Lの条件の濁水に曝した付着藻類で大きく増加しており（図10）、特に3回目の実験では増加量が大きくなった。そして、流速4.0 m/sで浮遊土砂濃度10 mg/Lの条件の清水に曝した付着藻類では堆積無機物量が減少しており（図10）、他の条件では曝露前後で大きな変化は示さなかった（流速：4.0 m/sで浮遊土砂濃度：10,000 mg/L および流速：0.5 m/sで浮遊土砂濃度：10

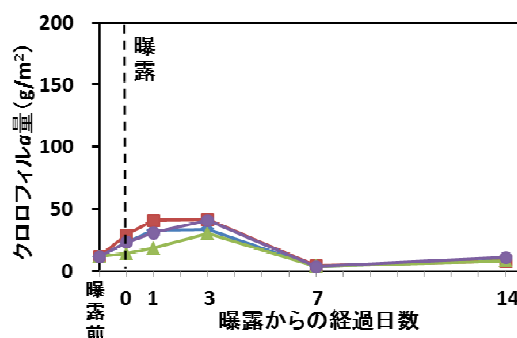
mg/L）。

付着藻類のクロロフィルa量や堆積無機物量は、条件の異なる清水や濁水に曝露させることで、直後には条件に依存して大きな違いが見られた。しかし、いずれの条件においても1および2回目の実験では7日後には、3回目の実験では14日後には曝露した条件間での違いは見られなくなった（図9、図10）。

(a)



(b)



(c)

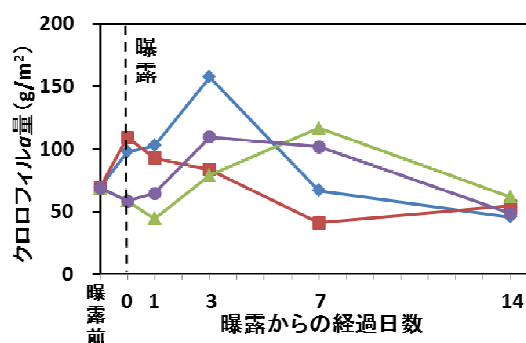


図9. 濁水および清水に曝露された前後のクロロフィルa量の変化 (a) 4～5月、(b) 5～6月、(c) 6～7月。

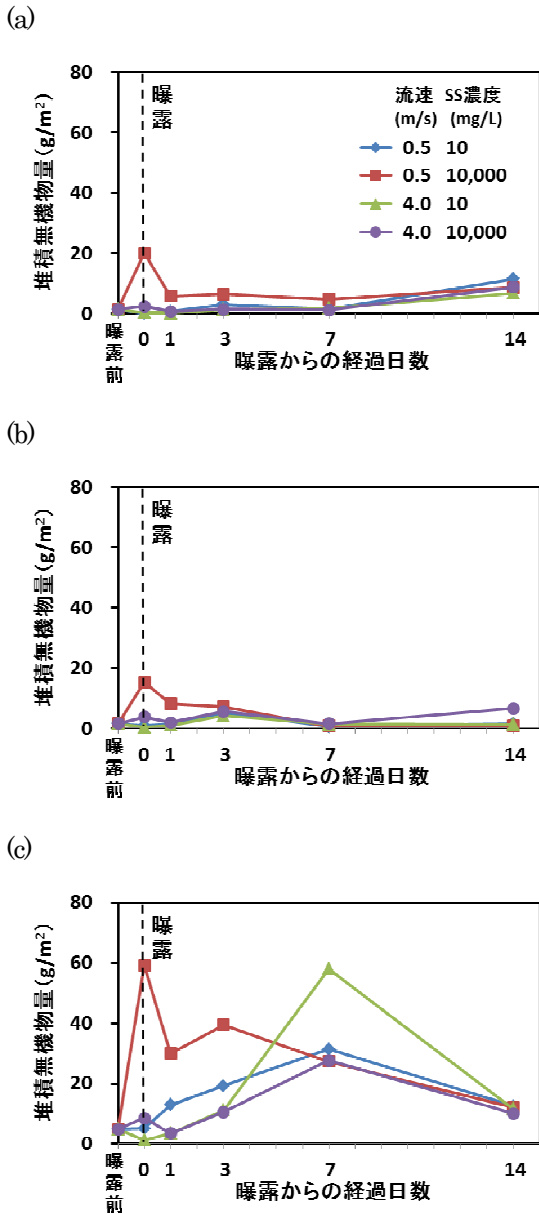


図 10. 濁水および清水に曝露された前後の堆積無機物量の変化 (a)4～5月、(b)5～6月、(c)6～7月。

### 4.3 考察

本研究より、濁水が流下することで無機物の堆積した付着藻類は、剥離・更新により14日ほどで、濁水の影響が見られなくなることが明らかとなった。曝露直後の堆積無機物量は、1、2回目と3回目とで大きく異なっており、3回目が多くなっていた。3回目の実験は気温が高い夏場に行ったため、曝露前の付着藻類の現存量(クロロフィルa量)が多くなっていた。そのため、付着藻類に堆積もしくは取り込まれた無機物量も多くなったと考えられる。1、2回目の実験では、処理間での堆積無機物量

の違いは7日目には見られなくなったが、3回目の実験では14日目で違いが見られなくなった。つまり、3回目の実験では付着藻類の現存量および堆積無機物量が多いことにより、濁水の影響が見られなくなるまで多くの時間を要したものと考えられる。

本研究より、濁水の影響を受けた後の平水時における付着藻類の回復は、濁水の影響を受ける前の付着藻類の状態(現存量)に依存することが示唆された。付着藻類の現存量は、場所や季節によって大きく変化し、河畔林が河川を覆う上流よりも、川幅が広くなり河川に光が当たる中流域の方が多くなる。また、水温が増加する夏期や、落葉により光量が増加する秋期において付着藻類の現存量が多くなることがある。このように、付着藻類の現存量は、出水の有無のほかにも水温や光量にも影響を受ける。このことから、剥離・更新によって濁水の影響が見られなくなるための時間(期間)は、水温や光量に起因して場所や季節変異が大きいと考えられる。そのため、堆砂対策により濁水を流下させる際には、より速やかに濁水の影響が見られなくなるタイミングを選択するために、その時の付着藻類の現存量について注意を払うことが重要と考えられる。

## 5. 付着藻類の劣化が底生性生物に及ぼす影響の解明

### 5.1. 実験の概要

河川生態系において付着藻類は多くの水生生物の餌資源として機能する。そのため、恒久的な堆砂対策によって発生した濁水が、付着藻類に無機物の堆積をもたらすことにより(「3. 洪水時における付着藻類の劣化機構の解明」を参照)、水生生物に影響が及ぶ可能性が考えられる。そこで、濁水に曝されることで無機物が堆積した付着藻類が、底生性生物である水生昆虫にどのような影響を及ぼすかを明らかにすることを目的に実験を行った。

「3. 洪水時における付着藻類の劣化機構の解明」で行った実験と同様に、高流速対応の循環型管路を用いて「4. 平常時における付着藻類の回復過程の解明」と同じ4条件の清水もしくは濁水に付着藻類を曝した(流速を0.5 m/sと4.0 m/sの2段階に、浮遊土砂濃度を10 mg/Lと10,000 mg/Lの2段階に設定)。清水もしくは濁水に24時間曝した後、循環型管路から取り出した付着藻類を、室内に設置した円形水槽に投入した(写真5)。この円形水槽は流水環境を再現することができ、太陽光と同じ波長の光環境下で付着藻類の成長を促すことが可能である。4つの条件に曝した付着藻類を、藻類食性の底生性生物2種(エルモンヒラタカゲロウ・コヤマトビケラ属の1種)



に与え（図 11）、2 週間後の付着藻類を採取し、堆積無機物量とクロロフィル *a* 量を測定した。

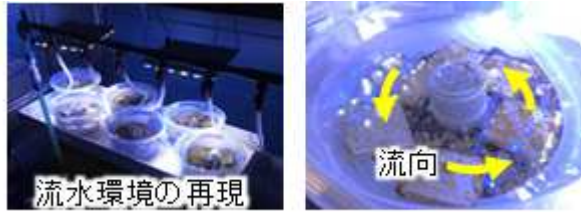


写真 5. 流水環境を再現可能な円形水槽。

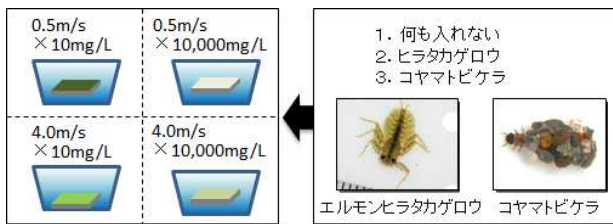


図 11. 付着藻類の変化が底生性生物（水生昆虫）に及ぼす影響を検証するための実験デザイン。流速および浮遊土砂濃度を操作した流水に付着藻類を曝し、得られた藻類を円形水槽に入れ、それぞれに、「何も入れない」、もしくは「エルモンヒラタカゲロウ」か「コヤマトビケラ属の 1 種」を入れた。

## 5.2 結果

流速に関係なく清水（浮遊土砂濃度：10 mg/L）に曝した付着藻類を用いた処理区では、堆積無機物量とクロロフィル *a* 量のどちらも、水生昆虫が存在しない場合より、存在する場合の方が減少していた（図 12）。一方、高濃度の濁水（10,000 mg/L）に曝した付着藻類を用いた処理区では、水生昆虫の種類に依存して結果が異なっていた。流速が 0.5 m/s の濁水に曝した付着藻類では、エルモンヒラタカゲロウが存在していた場合と水生昆虫が存在しない場合とで堆積無機物量とクロロフィル *a* 量に違いは見られなかった（図 12）。しかし、コヤマトビケラが存在した場合には水生昆虫が存在しない場合よりも堆積無機物量とクロロフィル *a* 量のどちらも減少していた（図 12）。流速が 4.0 m/s の濁水に曝した付着藻類では、エルモンヒラタカゲロウが存在することで、水生昆虫が存在しない場合よりも、堆積無機物量とクロロフィル *a* 量がやや減少する傾向にあったが、コヤマトビケラが存在する場合のほうが減少量は多かった（図 12）。

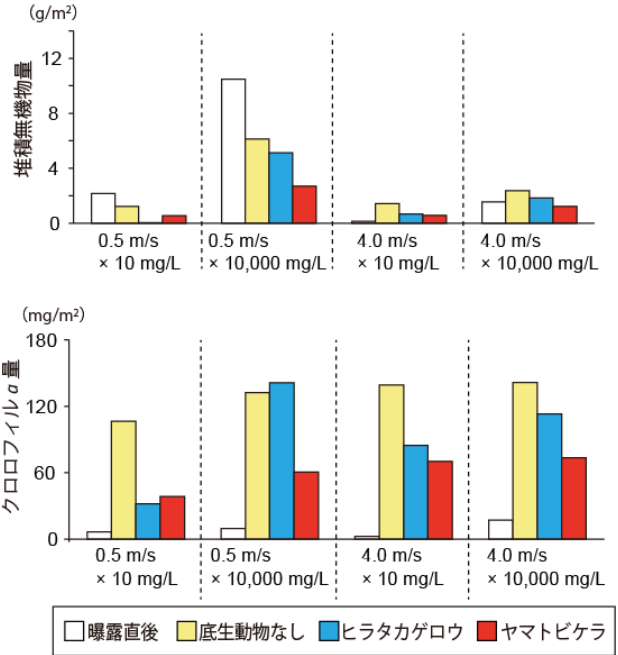


図 12. 流速、浮遊土砂濃度および水生昆虫の有無が付着藻類の堆積無機物量およびクロロフィル *a* 量に及ぼす影響。

## 5.3 考察

河川に生息する水生昆虫などの底生性生物において、多くの種が付着藻類を餌資源として利用する。これまでに底生性生物が付着藻類を摂食することで、藻類の更新を促すことが既存研究から示されてきた。しかし、本研究より濁水によって無機物が堆積した付着藻類は、全ての底生性生物に餌資源として利用されるわけではなく、付着藻類が過剰なまでに成長してしまう場合があることが明らかとなった。

コヤマトビケラ属の 1 種は、どの条件下においても付着藻類の現存量（クロロフィル *a* 量）の低下をもたらしていた。このことから、この種は無機物（シルト）の堆積に関わらず付着藻類を摂食することができるものと考えられる。コヤマトビケラ属は携帯性のトビケラであり、礫に強く固着した藻類を硬い大顎を用いて根こそぎ食べることが可能な分類群である。このため、無機物の堆積に関係なく、下層にある付着藻類を摂食し、現存量とともに無機物量も減少させたと考えられる。

一方、エルモンヒラタカゲロウは清水に曝した付着藻類の現存量と無機物量をコヤマトビケラ属と同様に減少させていた。しかし、濁水に曝した付着藻類の現存量と無機物量については、コヤマトビケラ属ほど減少させていなかった。エルモンヒラタカゲロウは匍匐型のカゲロ

ウであり、口器の鬚を用いてブラッシングするように藻類の上層部を食べる分類群である。そのため、濁水により上層に無機物が堆積したことで、付着藻類を摂食することが困難となったものと考えられ、現存量や無機物量を減らすことがなかったものと考えられる。さらに、エルモンヒラタカゲロウのみの処理区では、水生昆虫を入れていない処理区と同様のクロロフィル $a$ 量が計測されており、過剰なまでの成長が観察された。このような付着藻類の過剰な成長は、多くの水生生物にとって餌資源としては利用できない状態であり、食物連鎖のデッドエンドとも言われる。

本研究より、シルトを多く含む濁水が付着藻類に無機物の堆積とそれに伴う水生昆虫による摂食量の減少をもたらす場合があり、付着藻類の過剰な成長（食物連鎖のデッドエンド）をもたらす可能性が示唆された。ただし、この劣化の影響はエルモンヒラタカゲロウでは顕著であった一方で、コヤマトビケラ属では観察されなかったことから、水生昆虫が持つ特性に依存することが明らかとなった。つまり、堆砂対策の実施により濁水が流下し、付着藻類に無機物が堆積したとしても、コヤマトビケラ属のような分類群（無機物が堆積した付着藻類を摂食可能）が生息していることにより、濁水の影響を速やかに軽減する機能が発揮される可能性が示唆された。その一方で、水生生物が非常に少ない河川や、エルモンヒラタカゲロウのような分類群のみ生息するような河川では、濁水により付着藻類の過剰な成長（食物連鎖のデッドエンド）という新たな劣化をもたらす可能性も示唆された。

## 6. 付着藻類の劣化が遊泳性魚類に及ぼす影響の解明

### 6.1. 実験の概要

付着藻類は水生昆虫のような底生性生物だけでなく（「5. 付着藻類の劣化が底生性生物に及ぼす影響の解明」を参照）、アユ等の遊泳性魚類の主要な餌資源でもある。これら遊泳性魚類は底生性生物に比べて体サイズが大きいことから、通常、摂食量も多くなる。そのため、底生性生物よりも付着藻類へ及ぼす影響や付着藻類から受ける影響も大きい可能性がある。付着藻類を主な餌資源とする魚類には、アユ、アジメドジョウ、ボウズハゼ等があげられるが、アユはこれらの魚類の中でも体サイズが大きく、付着藻類の摂食量も多いと考えられる。そこで、本研究では、「5. 付着藻類の劣化が底生性生物に及ぼす影響の解明」と同様に、濁水により無機物が堆積した付着藻類が、遊泳性魚類であるアユにどのような影響を及ぼすのかを明らかにするために実験を行った。

自然共生研究センター内を流れる実験河川において、河床に存在する大礫（cobble: 64–256 mm）を拾い上げ、浮遊土砂濃度を3段階（10 mg/L, 1,000 mg/L, 10,000 mg/L）に操作した河川水に曝露させた。実験河川を長さ 10 m 毎に区切ることで 24 の実験区を製作し（図 13）、各濃度の浮遊土砂に約 6 時間曝した大礫を、各実験区に再投入した（図 13）。各実験区の半分にアユを 5 尾ずつ入れることで、各実験区にアユの在および不在区を製作した。そして、実験開始時（曝露直後）と 1 週間後、そして 3 週間後に大礫を回収し、定着している付着藻類の堆積無機物量とクロロフィル $a$ 量、さらに投入したアユの肥満度を調査した。

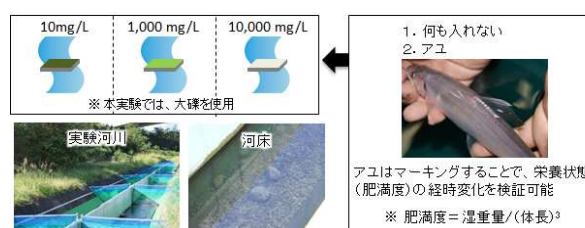


図 13. 付着藻類の変化が遊泳性魚類（アユ）に及ぼす影響を検証するための実験デザイン。各 10 m 区間内の河床にある大礫を、浮遊土砂濃度を操作した濁水および清水に曝した後、それぞれの区間に対してアユの在・不在を操作した（不在区：0尾、在区：5尾）。

### 6.2 結果

実験河川に導入したアユは付着藻類を摂食しており（写真 6）、付着藻類とアユとの間で相互に影響を及ぼしている可能性が示唆された。濁水の浮遊土砂濃度が高いほど、実験開始時（曝露直後）において、堆積無機物量は多くなっていた（図 14）。どの濁水処理においても、アユの有無に関わらず 1 週間後に堆積無機物量は低下していたが、アユが存在しない区間では 3 週間後に再び増加しており、アユが存在する区間では低いまま横ばいとなった（図 14）。つまり、1 週間後における堆積無機物量に対して、アユの有無および浮遊土砂濃度の影響はみられなかったが、3 週間後の堆積無機物量に対しては、アユの有無のみ影響がみられた（図 14）。

実験開始時（曝露直後）における付着藻類の現存量（クロロフィル $a$ 量）については、アユの有無や浮遊土砂濃度の影響はみられなかった。しかし、1 週間後のクロロフィル $a$ 量は、アユが存在しない区間に比べて、存在す

る区間では少なくなっており、その差は3週間後には大きくなっていった(図14)。また、1週間後にはあまり影響がみられなかったが、アユが存在する・存在しない両区間において3週間後には浮遊土砂濃度が高い区間ほどクロロフィルa量がわずかに多くなる傾向がみられた。アユの肥満度については、濁水の浮遊土砂濃度によって大きな違いは見られなかった。ただし、個体間変異が大きいものの、高濃度の濁水に曝した付着藻類のみを摂食したアユは3週間後にやや肥満度が低下する傾向にあった。



写真6. アユによる付着藻類の摂食。

### 6.3 考察

藻類を餌資源とするアユが付着藻類の現存量を変化させることは既存研究において示されてきたが、本研究より堆積無機物量にも影響を及ぼすことが明らかとなった。堆積無機物量はアユの有無や浮遊土砂濃度に関わらず、1週間後には減少しており処理間で同程度となっていた。一方、付着藻類の現存量(クロロフィルa量)は1週間後にアユが存在する区の方が存在しない区よりも減少していた。このことから、アユが存在する区では付着藻類の摂食によって現存量の低下と一緒に堆積無機物量が減少したものと考えられる。それに対し、アユが存在しない区では付着藻類の剥離・更新により(「4. 平常時における付着藻類の回復過程の解明」を参照)、堆積無機物量が減少したものと考えられる。1週間後に比べて3週間後には、アユが存在しない区における堆積無機物量とクロロフィルa量が増加していた。これは付着藻類が成長することで、無機物の堆積と継続的な成長が生じたためと考えられる。一方、アユが存在する区では、1週間後と3週間後では堆積無機物量やクロロフィルa量に大きな違いは見られなかった。これはアユが藻類を摂食することで、継続的に無機物の堆積や付着藻類の成長を低減させたためと考えられる。アユの肥満度に対して、浮遊土砂濃度はあまり影響を及ぼしていなかった。ただし、曝露から1週間後における肥満度に比べ、3週間後における肥満度は、浮遊土砂濃度が高く堆積無機物量が多い区間においてわずかに低下する傾向にあった。この結果

により、無機物の堆積により質の低下した付着藻類を摂食したことで、栄養状態が低下した可能性も示唆されるが、肥満度の変化傾向は個体間変異が大きく、より詳細な検証が必要である。

本研究より藻類を餌資源とする底生性生物に限らず(「5. 付着藻類の劣化が底生性生物に及ぼす影響の解明」を参照)、遊泳性生物(アユ)も付着藻類の現存量や堆積無機物量に強く影響を及ぼすことが明らかとなった。アユは底生性生物よりも体サイズが大きく、付着藻類の生産が活発で降雨による濁水が発生しやすい夏季に付着藻類の摂食を行う。そのため、夏季においてアユが存在しない河川では付着藻類の過剰な成長に至るまでの期間が短く、濁水による無機物の堆積が多くなる可能性が考えられる。水産有用種であるアユは、河川生態系の中でも注目されることが多い。しかし、アユは水産資源としてだけでなく、無機物の堆積や付着藻類の過剰な成長のような河川生態系の劣化を防ぐ観点でも重要な生物種であり、恒久的な堆砂対策を実施する上でも注視すべき生物種であると考えられる。

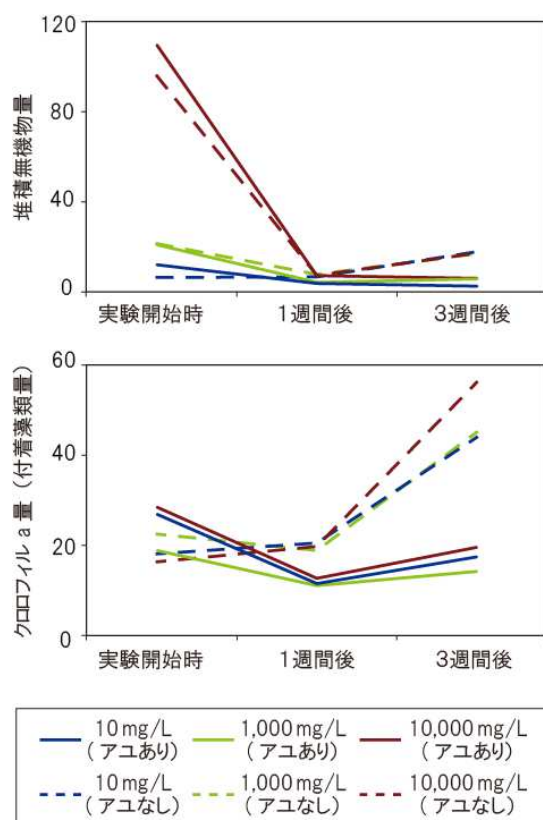


図14. アユの有無と浮遊土砂濃度が堆積無機物量およびクロロフィルa量に及ぼす影響。

## 7. まとめ

本研究で得られた結果は、次のとおりであった。

- 濁水による付着藻類への無機物の堆積は、浮遊土砂濃度が高くなるほど増加する傾向にあった。しかし、濁水が早く流れることや、砂を含むことで付着藻類の剥離が促され、無機物の堆積は減少することが明らかとなった。
- 無機物の堆積した付着藻類は、剥離・更新により約14日で（ただし、濁水の影響を受ける前の現存量など付着藻類の状態に依存して変化）、濁水の影響が見られなくなることが明らかとなった。
- 付着藻類に無機物が堆積することに伴い、底生性生物（水生昆虫）による摂食量の減少をもたらす場合があり、過剰な成長といった付着藻類の劣化をもたらす可能性が示唆された。ただし、この劣化の影響はエルモンヒラタカゲロウでは顕著であった一方で、コヤマトビケラ属では観察されなかったことから、水生昆虫が持つ特性に依存することが明らかとなった。
- 藻類を餌資源とする遊泳性生物（アユ）も、摂食活動を通じて付着藻類の現存量や堆積無機物量に強く影響を及ぼすことが明らかとなった。

## 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: 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) Izaguirre O., Serra A., Guasch H. & Elosegi A., Effects of sediment deposition on periphytic biomass, photosynthetic activity and algal community structure. Science of the Total Environment, 407: 5694–5700, 2009
- 6) Molinos J. G. & Donohue I., Differential contribution of concentration and exposure time to sediment dose effects on stream biota. Journal of the North American Benthological Society, 28: 110–121, 2009
- 7) Larned T. S., Nikora I. V. & Biggs J. F. B., Mass-transfer-limited nitrogen and phosphorus uptake by stream periphyton: a conceptual model and experimental evidence. Limnology and Oceanography, 49: 1992–2000, 2004
- 8) Francoeur, N. S. & Biggs J. F. B., Short-term effects of elevated velocity and sediment abrasion on benthic algal communities. Hydrobiologia 561: 59–69, 2006
- 9) Allan J. D. & Castillo M. M., Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters, 2nd edn. Springer, 2007
- 10) Munteanu N. & Maly J. E. The effect of current on the distribution of diatoms settling on submerged glass slides. Hydrobiologia, 78: 273–282, 1981
- 11) Hawkins, C. P., Murphy M. L. & Anderson N. H., Effects of canopy, substrate composition, and gradient on the structure of macroinvertebrate communities in cascade range streams of Oregon. Ecology, 63: 1840–1856, 1982
- 12) 森照貴, 三宅洋, 柴田勲, 河川林の伐採が河川性底生動物の群集構造に及ぼす影響. 日本生態学会誌, 55: 377–386, 2005
- 13) SCOR/UNESCO, Determination of photosynthetic pigments in seawater, Report of SCOR/UNESCO Working Group 17, In: Monograph on Oceanographic Methodology, pp. 69. UNESCO, Paris, 1966.



# 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** : FY2010-2013

**Research Team** : Water Environment Research Group

(Aqua Restoration Research Center)

**Author** : YUICHI Kayaba, YUKIO Miyagawa, TERUTAKA Mori

**Abstract** : Sustainable sediment management of dam reservoirs have been conducted to decrease sediments inflowing into and accumulating in the reservoirs. The management can maintain benefits of flood control and supply sediments to downstream of dams where sediments in substrate tend to be scarce. However, conducting the management will provide highly turbid water to downstream of dams, and then their effects on stream ecosystems have been concerned. Thus, to assess the effects of turbid water due to the sustainable sediment management on stream ecosystems, we examined to answer the three questions; 1) do effects of turbid water on periphyton vary depending on water velocity and grain size distribution? 2) how does periphyton change after exposure by turbid water? 3) can stream insects and fishes feed on periphyton influenced by turbid water? Accumulation of inorganic sediments (i.e., silt) on periphyton was positively related to suspended solids in flowing water whereas was negatively to water velocity. However, periphyton which was covered by inorganic sediments in heavily turbid water (i.e., SS = 10,000 mg/L) was not scraped by highly flowing water (i.e., 4.0 m/s), suggesting that heavily turbid water may constrict reproduction of periphyton despite high water flow. Nevertheless, this phenomenon was observed in turbid water with only silts whereas not in that with both silts and sands, because periphyton may be scraped by sand abrasion even in heavily turbid water. Accumulation of inorganic sediments on periphyton, which was provided by turbid water, decreased after about two weeks due to succession. Accumulation of inorganic sediments on periphyton and their biomass (chlorophyll *a*) decreased by both a caddisfly (*Agapetus* spp.) and sweet fish (*Plecoglossus altivelis*). Then, *Agapetus* spp. and *Plecoglossus altivelis* can feed on periphyton with inorganic sediments, although condition factor of the fish feeding only periphyton with high inorganic sediments slightly decreased. In contrast, accumulation of inorganic sediments on periphyton and their biomass increased by a mayfly (*Epeorus latifolium*), indicating that *Epeorus latifolium* cannot feed on periphyton with highly inorganic sediments. These results suggest that turbid water due to sustainable sediment management of dam reservoirs not only influence periphyton but also relationships between periphyton and their feeders. Therefore, we demonstrate that the effects of turbid water on stream ecosystems may be mitigated by following three conditions when sustainable sediment management is conducted: high water velocity of turbid water, inclusion with sands triggering scraping, and maintenance of periphyton feeders.

**Key words** : dam, turbid water, periphyton, stream invertebrates, *Plecoglossus altivelis*