

原著論文 [Original Paper]

ダム上下流・土砂還元上下流における濾過食者・刈取食者の
体内脂質割合と餌資源の化学量バランス

佐藤智春¹⁾・土居秀幸²⁾・片野泉^{3), 4)*}

(2019年12月11日受付, 2020年2月7日受理)

Lipid contents of collector-filterer and scrapers and stoichiometric balance of food
resources in a dammed river with sediment replenishment

Chiharu SATO¹⁾, Hideyuki DOI²⁾, Izumi KATANO^{3), 4)*}

摘要

造網型の濾過食者であるウルマーシマトビケラ (*Hydropsyche orientalis*) と刈取食者であるカゲロウ科 3 種の脂質量, およびその餌資源である付着藻類・流下物・BPOM の栄養量 (化学量) をダム上流・ダム直下・ダム下流かつ土砂還元下流の 3 地点で比較した。餌資源は, それぞれ挙動は異なるもののダムや土砂還元の影響を受け, 3 地点の化学量バランスが変化する傾向にあった。また, シマトビケラはダムの下流で有意に脂質量が減少したのに対し, カゲロウ科は脂質量が増加していた。このことから, 同じダム下流に生息する底生動物であっても, 餌資源の種類 (摂食機能群) によって底生動物体内の脂質量の変化方向が異なることが示唆された。

キーワード: ダム, ウルマーシマトビケラ, 濾過食者, 付着藻類, 流下プランクトン, BPOM

Abstract

We here measured lipid contents of the net-spinning caddisfly *Hydropsyche orientalis*, as collector-filterer and the three mayfly species as scrapers, and stoichiometric balances of periphyton, drifting particulate organic materials, and benthic particulate organic materials as their food resources in a dam river. We compared those values among the upstream, downstream of the dams and downstream of the sediment replenishment. The stoichiometric balances of food sources would vary among the study sites with dam and sediment replenishment, although the trends differed each other.

1) 奈良女子大学大学院 人間文化研究科 〒630-8506 奈良県奈良市北魚屋東町 Graduate School of Humanities and Sciences, Nara Women's University, Kitauoya-higashimachi, Nara, 630-8506 Japan

2) 兵庫県立大学大学院 シミュレーション学研究所 〒650-0047 神戸市中央区港島南町 7-1-28, Graduate School of Simulation Studies, University of Hyogo7-1-28 Minatojima-minamimachi, Chuo-ku, Kobe, 650-0047, Japan

3) 奈良女子大学大学院自然科学系生物科学領域 〒630-8506 奈良県奈良市北魚屋東町, Faculty, Division of Natural Science, Nara Women's University, Kitauoya-higashimachi, Nara, 630-8506 Japan

4) 奈良女子大学 共生科学研究センター 〒630-8506 奈良県奈良市北魚屋東町, KYOUSEI Science Center, Nara Women's University, Kitauoya-higashimachi, Nara, 630-8506

* 連絡代表者 (Corresponding author): katano@cc.nara-wu.ac.jp

Hydropsyche orientalis significantly decreased their lipid contents in the downstream of the dam, while the mayfly significantly increased those. Changes in macroinvertebrates' lipid contents would differ depending on their food resources by their feeding function groups, even inhabiting at the same downstream of dam site.

Keywords: dam, *Hydropsyche orientalis*, collector-filterer, periphyton, drifting plankton, BPOM

はじめに

貯水ダムは河川流程を分断することで、河川環境を様々に変化させる。ダム下流における代表的な環境変化の例として、ダム湖に由来する流下プランクトンの増加や栄養塩などの水質変化、土砂の流れが制限されることで発生する、河床の粗粒化やアーモコート化、それに伴う付着藻類の増加などがあげられる (Poff et al., 2002; 池淵, 2009)。このような環境変化に伴って、生息する底生生物の多様性や群集構造も変化し、ダム下流では種多様性低下や優占種の変化が知られている (谷田・竹門, 1999)。一般的に、ダム下流では濾過食者や採集食者が優占種となることが多く (Katano et al., 2009)、刈取食者や破碎食者は減少するといわれている (波多野ら, 2005; 竹門, 2009)。なぜなら、流下有機物 (DPOM; Drift Particulate Organic Materials) を餌とする濾過食者や採集食者は、新たな餌資源であるダム湖起源プランクトンを利用できるため、ダム湖の存在による餌資源の改変が有利にはたらくと考えられる。しかし刈取食者が利用する付着藻類は、ダム下流では分厚く繁茂し死細胞も多いため (谷田・竹門, 1999)、餌資源の価値は低下すると考えられる (宮川ら, 2016)。これらのことから、ダムによる環境改変は、餌資源自体はもちろん底生動物体の栄養量 (化学量や脂質量) に影響を与えていることが予想されるが、実際に報告された例は非常に少ない。小林ら (2019) は、濾過食トビケラ 2 種の体内脂質量をダム上流下流間で比較し、流下プランクトンという栄養価の高い餌資源が供給されるダム下流では濾過食者の脂質量が増加するという予想に反して、脂質量は減少することを明らかにした。トビケラ類の捕獲網メッシュサイズ (mesh opening) の違いや、トビケラ類が実際に利用する餌資源は、単純に濾過食者であるから流下プランクトンのみを利用するという事ではなく、付着藻類や BPOM (Benthic Particulate Organic Materials) も複雑に利用することなどが原因として考えられたが、調査対象のトビケラ種数も少なく、濾過食者に一般的な事象かどうか、ま

た、他の摂食機能群における反応は不明である。

一方、上述のようなダム下流における環境改変を緩和するための試みとして、近年ではいくつかのダムで土砂還元が試行されている。土砂還元とは、ダム上流やダム湖内の土砂をダム下流に輸送し下流の任意の地点に再供給することで、環境改善を目指すものである (Sumi et al., 2017)。実際の河川環境の改善については、ダム下流における瀬淵構造の変化 (Ock et al., 2013) や付着藻類の剥離効果の増進 (坂本ら, 2005) などの報告がある一方、餌資源や底生動物の栄養量に与える影響についての報告は全くない。

餌資源の栄養量変化、および底生動物の栄養量・脂質量の変化は、ダム河川の食物網構造の理解や改変の理解にもつながる重要な視点といえる。そこで本研究では、付着藻類と DPOM, BPOM など餌の栄養量 (化学量: 炭素・窒素・リン含量) と濾過食者・刈取食者の脂質量を測定し、ダム上流、ダム下流、土砂還元下流の 3 地点で比較することとした。濾過食者として調査対象としたのはウルマーシマトビケラ (*Hydropsyche orientalis*) で、本種は日本国内の河川に最も広く分布する普通種であり、DPOM を主な餌資源とする (Oswood, 1976; Wallace et al., 1980)。ウルマーシマトビケラは、小林ら (2019) が対象としたオオシマトビケラ (*Macrostemum radiatum*) ・ヒゲナガカワトビケラ (*Stenopsyche marmorata*) よりも雑食性の傾向が強く、餌資源の有無や量によって餌を変える。つまり、周辺の餌環境に依存する傾向が強くなるため (谷田, 1980; Benke et al., 1997)、ダム河川における餌資源の改変と底生動物の栄養量変化について考察しやすいと考えられる。刈取食者は 3 地点を通して共通して生息する種がなかったため、カゲロウ科の 3 種を調査対象とした。

方法

2019 年 3 月 29 日に淀川水系名張川支川宇陀川 (奈良県宇陀市) にある室生ダム (34° 33' 19" N, 136° 00'

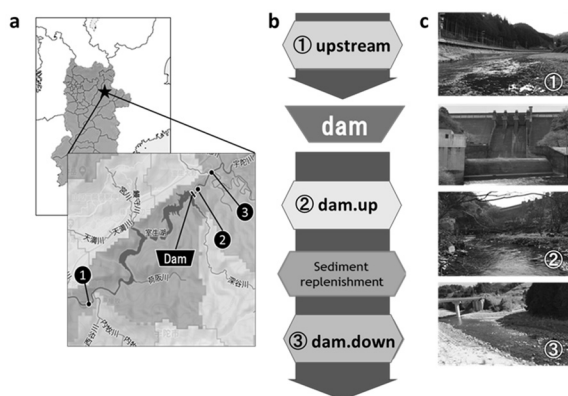


図1. 調査地点図.

a : 調査地点地図 b : 調査地点モデル c : 調査地点写真 a-c は共通して, ①がダム上流 (upstream), ②がダム直下・土砂還元前 (dam.up), ③がダム下流・土砂還元後 (dam.down) を表す.

Fig. 1. Study sites.

25° E, ダム目的: 洪水調節, 上水道, 河川維持用水, 竣工: 1974 年) 周辺で調査を行なった. ダム湖である室生湖の深度は約 40 m, 滞留時間は約 520 時間, 出水は選択取水により行っている. また, 湖内には深層曝気施設が設置され稼働している. さらに, ダム下流の河床環境改善のため 2006 年から定期的に土砂還元が行われているため, 調査地点の選定にはダムだけでなく土砂還元にも留意した. 調査は, ダム上流 (upstream: ダム堤体より上流に 6.2 km 地点), ダム直下・土砂還元前 (dam.up: ダム堤体より下流に 0.2 km), ダム下流・土砂還元後 (dam.down: ダム堤体より下流に 1km) の 3 地点で行った (Fig.1).

現地調査では, 各調査地点において環境変数 (水温, 電気伝導度: Electric Conductivity) の測定と付着藻類, 流下物, BPOM, 底生動物の採集を行った. 水温 (°C) と EC (mS/m) は EC メーター (CT-27112B, TOADKK) を用いて, 各調査地の流心部で測定した. 付着藻類は, 流心部における任意の大礫を 1 つ選択し, 礫上部 5 cm × 5 cm 枠内の付着藻類をブラシで剥がし, 蒸留水でポリ瓶内に洗い流してサンプルとした. 流下物は, ブランクトンネット (mesh size : 100 μm, 口径 : 30 cm) を各調査地点の河床にペグで固定し, 5-10 分放置して採取しサンプルとした. 採取中にネット口部での流速を複数回測定し, 設置時間も記録して, ネットの濾過水量を計算した. これらのサンプルはクーラーボックス内で保冷しながら実験室に持ち帰った.

底生動物と BPOM は, D フレーム型ハンドネット

(mesh size : 475 μm) を用い, キックサンプリングにより各調査地で無作為に採集した. 採集後, 現地でメッシュサイズ 0.25, 0.5, 1, 4 mm のシーブを用いてメッシュサイズごと (<0.25, 0.25-0.5, 0.5-1, 1-4, >4 mm) に分類し, クーラーボックス内で保冷しながら実験室に持ち帰り, ソーティングまで冷凍固定・保存した.

実験室において, 各サンプルは以下のように分析した. 付着藻類サンプルは, クロロフィル a (Chl.a) 量と SS (Suspended Solid) 量, および化学量を測定するため, 試料の一部を予め重量を測定しておいたガラス繊維ろ紙 (GF/C, GE Healthcare) に吸引ろ過して捕集した. Chl.a 量測定用のろ紙は, ユネスコ法 (UNESCO, 1966) を基に 99.5% のエタノールに十分液浸させ, 色素を抽出した後, レシオビーム分光光度計 (HITACHI, U-5100) を用いて測定した. SS 量測定用のろ紙は, 50°C に設定した恒温乾燥器内 (Yamato, DX402) で十分乾燥させ乾燥後重量を測定した後, 470°C に設定したマッフル炉 (Yamato, FO410) で 2 時間燃焼し, 燃焼後重量を測定した. 乾燥後重量と燃焼後重量の差分を POM (Particulate Organic Materials), 燃焼後重量とろ紙重量の差分を PIM (Particulate Inorganic Materials) とし, 両者の合計を SS 量とした. 化学量用のろ紙も 50°C 恒温乾燥器内で十分乾燥させた. 詳しい測定方法については後述する.

流下物サンプルは SS 量 (DPOM + DPIM) と化学量の測定のため, サンプルの一部を吸引ろ過してガラス繊維ろ紙に捕集し, ろ紙ごと 50°C 恒温乾燥器内で乾燥させた. SS 量測定については付着藻類サンプルと同様の処理を行い, DPOM と DPIM の合計を流下物量とした.

底生動物と BPOM はサンプルの解凍後, 適量を保冷剤の上に置いたシャーレに移しソーティングと同定を行った. 底生動物は, 同定と同時に摂食機能群 (functional feeding groups) も分類した (竹門, 2005 ; Merritt et al., 2008). 底生動物は, ダム下流の餌資源変化を強く受けると考えられる濾過食者 (Collector-filterer) のウルマーシマトビケラと剥ぎ取り食者 (Scraper) のシロハラコカゲロウ (*Baetis thermicus*), フタバコカゲロウ (*Baetiella japonica*), ユミモンヒラタカゲロウ (*Epeorus nipponicus*) を対象として脂質量を測定した. それぞれ, 調査地点ごとに 5-20 個体程度を無作為に選び, 1 個体ずつマイクロチューブにいれて 50°C の恒温乾燥器内で十分乾燥させた. カゲロウ類はそれぞれの調査地点で採集できた数が異なるため, 測定に用いた種と個体数は, upstream: シロハラコカゲロウ (n=6), フタバコカゲロウ (3), dam.up: フタバコカゲロウ (6), dam.down: ユミモンヒラタカゲロウ (4) とした. シャーレ上に残った BPOM はメッシ

ユサイズごとにアルミカップに移し同様に乾燥させ、化学量測定用のサンプルとした。

化学量測定

底生動物の餌資源となる付着藻類, DPOM, BPOM における化学量の測定を, 生物体内に多く含まれる炭素 (C)・窒素 (N)・リン (P) の3種類について, P量はモリブデンブルー法を, C量及びN量は微量元素分析装置 (JSL/JM10) を用いて行った。また底生動物は濾過食者と剥ぎ取り食者の脂質量を Folch 法 (Folch et al., 1957) で測定した。固形サンプル (プランクトン・BPOM・底生動物) は充分乾燥させ保存しておいたものを使用し, ペッスルでホモジェナイズしてから必要量を測り取り使用した。また, ろ紙に吸着させたサンプル (付着藻類) は, ろ紙ごとにはさみで必要量を切り取り, 重量を測定して吸着量を計算し使用した。以下にそれぞれの測定方法の詳細を示す。

P量測定のため, サンプルは精密上皿天秤 (CPA2250, Sartorius) を用いて 0.3~0.8 mg を測り取り試験管内にこれ, Milli-Q®水とアルカリペルオキソ二硫酸カリウム溶液を 2 mL 添加混合した。コントロールとスタンダード用の試験管も準備し, 全ての試験管を 121°C, 60 分の設定でオートクレーブ (ALPKTS-2346) にかけて。オートクレーブ終了後は熱いうちに試験管をよく振盪し, 常温に戻した後にカラーリエージェント (西條・三田村, 1995) 1.5 ml を加え振盪した後, 暗所で青色を発色させた。分光光度計で波長 880 nm, 750 nm での吸光度を測定し, 検量線を用いて吸光度を PO₄-P 濃度に換算し, サンプル 1mg 中の P 量を求めた。

N, C 量の測定に先立ち, 測定用ボートをマッフル炉で 600-700°C で 30 分空焼した。サンプルは精密上皿天秤を用いて約 2-3 mg を測りボートに乗せ, 微量有機元素測定装置で測定し, サンプル 1 mg 中の C, N 量を求めた。

底生動物の脂質量は, 未ホモジェナイズの個体を用い, 個体ごとに分析した。乾燥重量の測定後, クロロホルム:メタノール = 2 : 1 の混合液を入れたバイアル瓶に入れ, 1 週間程度放置して十分に脱脂した。脱脂後, サンプルを取り出し再び 50°C の恒温乾燥器内で充分乾燥させた後, 脱脂後乾燥重量を測定し, 脱脂前後の乾燥重量差から脂質量を算出し, 個体の乾燥重量で割って脂質率を求めた。脂質率のデータは R を用い箱ひげ図を作成した。その際, 飛び値は外して行った。

統計解析はエクセル統計 (柳井, 2011) に基づいて行った。脂質率の統計的な差異については, 一元配置分散

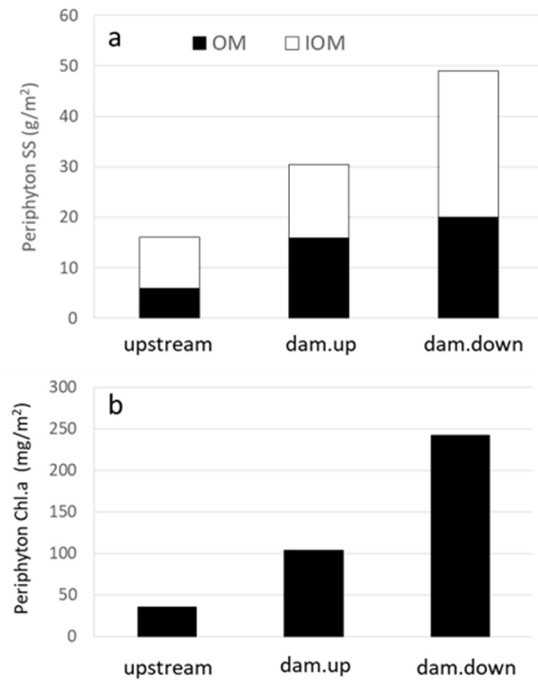


図 2. a: 付着藻類中の SS 量 (付着藻類中に含まれる OM 量: 有機物量, IOM: 無機物量) を示す. b: 付着藻類中の Chl.a 量を示す. 横軸は upstream: ダム上流地点, dam.up: ダム直下・土砂還元前地点, dam.down: ダム下流・土砂還元後地点を示す。

Fig. 2. a: Amounts of SS (g/m²) in periphyton, b: amounts of Chl.a (mg/m²) in periphyton.

The horizontal axis; upstream: upstream of the dam. dam.up: downstream of the dam. dam.down: downstream of the sediment replenishment.

分析 (one-way ANOVA) で *F* 値と *p* 値を算出し, 統計的有意差の有無を検定した。ANOVA で有意差 (*p*<0.05) が認められた変数については, パラメトリック多重比較検定 (Turkey-Kramer 法) を行った。

結果

Fig.2 に付着藻類中の SS 量 (POM・PIM 量) とクロロフィル a 量を示す。SS 量, クロロフィル量ともに, 有機物量, 無機物量ともに下流に行くにつれて増加する傾向にあった。

Fig.3 に流下物量を示す。DPOM 量はダム直下で多い傾向があったが全地点間で差がほとんどみられなかった。一方, DPIM 量はダム上流で多く, ダム下流では大きく減少していた。ダム直下と土砂還元下流での DPIM 量の差はほとんど無かった。

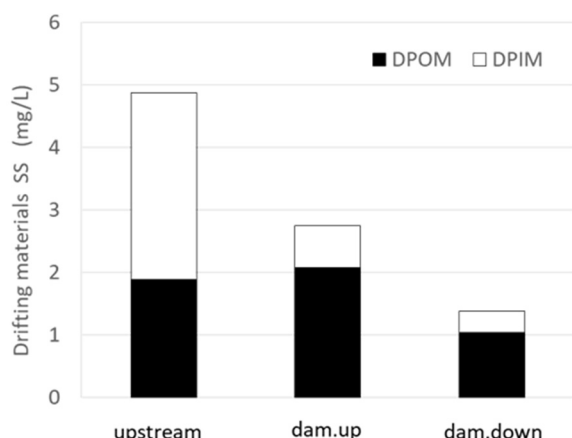


図 3. 流下物中の SS 量 (DPOM 量: 流下有機物+DPIM 量: 流下無機物量) を示す. 横軸は upstream: ダム上流地点, dam.up.: ダム直下・土砂還元前地点, dam.down: ダム下流・土砂還元後地点を示す.

Fig. 3. Amount of SS (mg/L) in drift materials.

The horizontal axis; upstream: upstream of the dam. dam.up: downstream of the dam. dam.down: downstream of the sediment replenishment.

各地点における餌資源の化学量比を Fig.4 に示す. one-way ANOVA の結果は, 附着藻類は 3 つの化学量比全てで地点ごとに有意差があった. DPOM と BPOM については, DPOM の C:N 比以外で有意差は無かった. 附着藻類と BPOM の C:N 比は, ダム直下 (dam.up) 地で上昇し, 土砂還元下流 (dam.down) 地点で下降していた. 特に附着藻類については各地点毎に有意に差があった (Tukey 多重比較, $p < 0.05$). つまり, ダム直下で炭素量が増加し土砂還元下流で減少していた. しかし流下物の C:N 比は逆の傾向があり, ダム直下 (dam.up) 地点で値が下降し, 土砂還元下流 (dam.down) 地点で上昇しており, ダム直下では流下物に含まれる炭素量が減少していた (Tukey 多重比較, $p < 0.05$). C:P 比についても, 附着藻類と BPOM はダム直下で値が上昇し, 土砂還元下流で下降する傾向にあり, 附着藻類については各地点で有意差があった (Tukey 多重比較, $p < 0.05$). また, 流下物の C:P 比は下流に向かうにつれて値が上昇する傾向があった. N:P 比はそれぞれの餌資源ごとに異なる傾向が出ており, 附着藻類はダム直下で上昇し土砂還元下流で下降, DPOM はダムの下流で上昇していた. BPOM は地点間でほとんど差が無かった.

シマトビケラの脂質量を Fig.5 に示す. 脂質量は下流に向かうにつれて減少していて, ダム上流と土砂還元下

流では有意に差があった. (one-way ANOVA, $p = 0.041$; Tukey 多重比較, $p < 0.01$). 砂還元下流地点のシマトビケラ脂質量は, ダム上流地点に比べ有意に減少していた. カゲロウ科の脂質量については ANOVA で有意な差異はみられなかった (ANOVA, $p = 0.138$, Fig.6). 統計的には有意ではないものの下流に向かうにつれて脂質量が増加する傾向があった.

考 察

底生動物の餌資源である附着藻類, DPOM, BPOM は, ダム上下流また土砂還元前後で量的にも質的にも変化していた. 附着藻類中の SS 量と Chl.a 量がダム下流 (dam.up) において増加傾向にあったのは, クレンジング効果の減少が原因であると考えられる. ダム下流では細粒河床材料の供給が少なくなるため, 河床表面のクレンジング効果 (掃流砂効果) も減少していることが多い (波多野ら, 2005). 自然河川では, クレンジング効果に加えて, 刈取食者による摂食圧も高いため, 附着藻類は薄い膜を維持している (Steinmann et al., 1996). 室生ダム直下地点では刈取食者の密度も低下していることから (佐藤智春, 未発表), 附着藻類はこれら環境変化の影響を強く受けることが示唆された. 土砂還元は失われたクレン

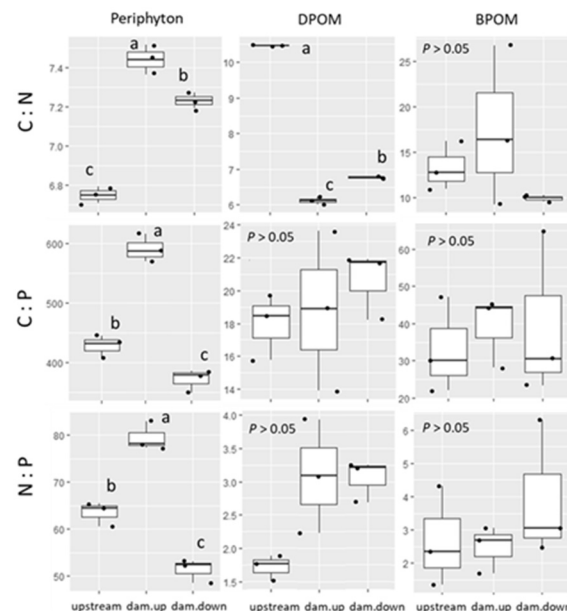


図 4. 餌資源である附着藻類, DPOM, BPOM の化学量の比較. 箱ひげ図は箱が $\pm 25\%$ 四分位, 箱中の太線が中央値, エラーバーが $1.5X \pm 25\%$ 四分位を示す. 黒点は各サンプルの実測値を表す.

Fig. 4. Comparison of C/N in three food resources between points.

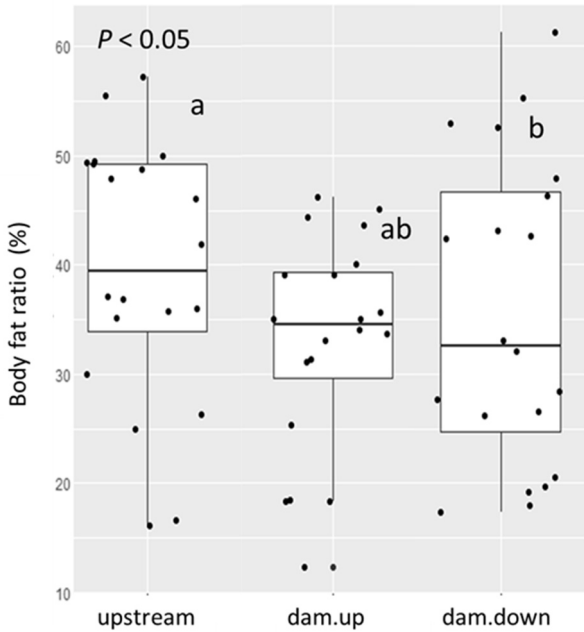


図 5. ウルマーシマトビケラ (*Hydropsyche orientalis*) の脂質率各地点における脂質率の比較. 箱ひげ図は箱が±25%四分位, 箱中の太線が中央値, エラーバーが $1.5X \pm 25\%$ 四分位を示す. また, 図中のアルファベットは多重比較検定 (Tukey-Kramer) によって有意差が認められたことを表す. 黒点は各サンプルの実測値を表す.

Fig.5. Comparison of lipid contents ratio in *Hydropsyche orientalis* between points.

ジング効果に戻すことで付着藻類量を減少させる効果をもつとされているが, 本研究での土砂還元下流地点 (dam.down) における Chl.a 量と SS 量は減少せず, さらに増加していた. 掃流砂量を測定していないためクレンジング効果については論じることができないが, 両地点の地形は, ダム直下よりも土砂還元下流の方が, 川幅が非常に広く河畔林も無いため, 付着藻類の生産が上がり現存量が増したことが可能性として考えられる.

このような付着藻類現存量増加の変化を受け, 化学量も変化がみられた. ダム下流でみられた C 増加と N 減少は, 付着藻類の厚さによるものと考えられる. すなわち, 付着藻類の上層部は河川水中の N を吸収利用できるが, 基部に近い下層の付着藻類は水中の N を利用できず貧窒素状態もしくは死細胞になっている可能性があり, 膜全体を測定すると C 量が増加し N 量が減少していることが考えられる. またダム直下での CN, CP 比増加は, 相対的に炭素含有量が増加したという事であり, 付着藻

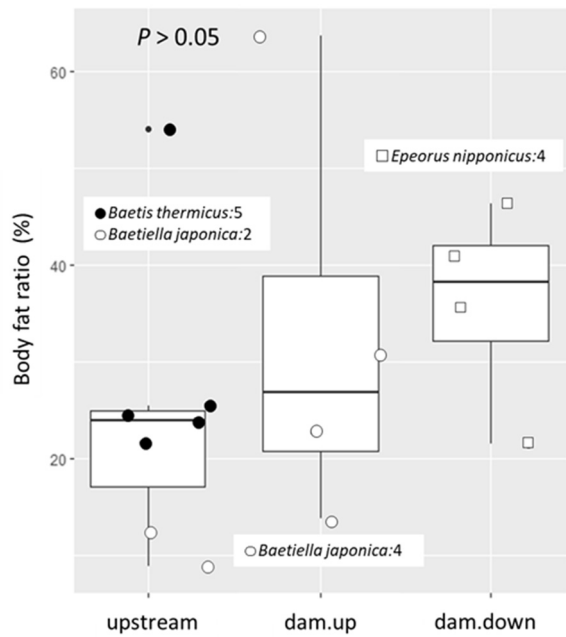


図 6. カゲロウ科 (*Ephemeroptera*) の脂質率各地点における脂質率の比較. 箱ひげ図は箱が±25%四分位, 箱中の太線が中央値, エラーバーが $1.5X \pm 25\%$ 四分位を示す. また, 図中のアルファベットは多重比較検定 (Tukey-Kramer) によって有意差が認められたことを表す. 図中の各プロットは各サンプルの実測値を表し, 小さな黒丸は飛び値を表す.

Fig. 6. Comparison of lipid contents ratio in there *Ephemeroptera* between points.

類がより硬く摂餌しにくい餌資源となっていることを示している. さらに, C 量の増加は P や脂肪酸の相対含有量が低下し, 餌としての質の低下がおこる (Urabe and Sterner, 1996) ことからダム下流の付着藻類の栄養価は低いことが予想される.

流下物量は, ダム上流に比べダム下流で増加することが多い (谷田・竹門, 1999). また, 一口に DPOM と言ってもその組成は, 調査地点によって大きく変化し, 自然河川やダム上流では系外から供給された落葉落枝や水生昆虫の脱皮殻などの破砕物が, 都市河川では人為的活動による有機物残渣が, ダム下流ではダム湖で生産されたプランクトンが主となるといわれている (吉村, 2013). しかし室生ダムにおける DPOM 量は, ダム上下流で明瞭な差はみられなかった. これは, 室生ダム上流部が一般的なダム上流部とは異なり人口密度が比較的高い地域となっており, 人為的活動による有機物残渣が多かったためと考えられる. また, 過去 (1986 年頃～)

には、ダム湖での滞留時間が比較的長いことや、上流からダム湖へN・P量の流入による富栄養化で、アオコや赤潮の発生など湖内で環境問題が起きていたが、2007年からその改善のため、曝気施設や選択取水などが行われている。これらも、ダム下流でDPOMが有意に増加しない理由の1つとして考えられる。また、流下物を顕微鏡下で観察してもダム上流ではプランクトンの著しい優占は見られなかったが、ダム下流特に土砂還元下流地点ではカメノコウワムシ (*Keratella cochlearis*) の著しい優占がみられた。流下物量としては明瞭な差はないが、その組成は異なっていたと考えられる。

DPOMの化学量バランスでは、ダム下流でC、Pの減少とNの増加傾向がみられた。一般的に、ダム湖内では堆積有機物からPが遊離するため、Pは河川水中よりも多く存在し、それがプランクトンに取り込まれてダム下流へと供給されることが考えられる。そのためダム下流でのCP比は減少することが考えられるが、室生ダムの下流ではCP比の変化は顕著ではなかった。室生ダムでは、過去に底層の無酸素化による、リン、窒素などの栄養塩や鉄、マンガン等の重金属の溶出が確認されていたが、上記した2007年から導入された調節によって、PやN量が制限された可能性がある。各地点で測定したECもそれぞれの値にほとんど差が無かったことから、調節の影響が考えられる。一方ダム下流でのCN比減少、つまりC量の減少傾向はDPOMがより柔らかい餌資源となっていることを示している。

BPOMに関して、本研究での量的なデータはないものの、化学量バランスについてはダム直下でCの増加とN、Pの減少がみられた。C増加・NP減少の要因としてはダム直下の流量安定が、生物遺骸の堆積を促進した可能性が考えられる。調査では、ダム下流のBPOMとして剥離し崩れた付着藻類マットや何らかの陸上生物の死骸等が観察された。既往研究でも、ダム直下で流量が安定すると堆積物が増加することが報告されている(谷田・竹門, 1999)。また、またダム直下でのCN、CP比増加つまりC含有量の増加は、BPOMも付着藻類同様により硬い餌資源となっていることを示している。

土砂還元が餌資源の化学量に与える影響について、付着藻類やBPOM(NP比以外)で化学量比が上流の値に戻る様子が見られた。DPOMのような河川水中の栄養量よりも、河床に影響される付着藻類やBPOMの栄養量に変化があったことから、栄養量の面でも土砂還元は河床環境に影響を与えることが考えられる。これら結果から、底生動物が利用する餌資源は、種類によって挙動の様子や変化の程度は様々ではあるものの、ダムや土砂還元

の影響を少なからず受けていることを示唆している。

ダム下流におけるウルマーシマトビケラの体脂質量は、ダム上流よりも減少していた。これは先行研究で、ダム下流では濾過食トビケラ2種の体脂質量が減少すると報告した小林ら(2019)に準じる結果である。水生昆虫の体脂質量に関する報告はあまりないが、餌資源の化学量が増えると水生昆虫の化学量も変化することや、シマトビケラ科やヒラタカゲロウ科では、餌の種類が変化すると脂肪酸量が増え脂肪酸構成が変化すること、それにより成長率と発育率が高まるとされている(Torres-Ruiz et al., 2007, 2010)。また、脂質はそもそも高エネルギー貯蔵物質(Arts, 1999)であるため、良質な(化学量のバランスの取れた)餌を摂餌することがそのまま水生昆虫の脂質量を増加させることにつながると考えられる。先行研究ではウルマーシマトビケラが摂餌するのはDPOMであるとされているが、本研究でのダム下流でのDPOMの化学量バランスは、C、Pの減少とNの増加が起きていた。水生昆虫はもともと甲殻類や陸上昆虫に比べて、CP比やNP比を比較すると相対的にPの比率が少なく(Evans-White et al., 2005)、Pが成長抑制因子となることは少ない。しかし、ダム下流において餌のP量が減少することは、Pが成長抑制因子となる可能性を高めているのかもしれない、そのためダム下流では脂質の貯蓄に回すだけのエネルギーが得られず、脂質量が減少した可能性が考えられる。またシマトビケラは雑食性であり、消化管分析結果からは栄養効率のいい付着藻類や動物質(キチン質)の餌内容比率が高くなることが判明している(谷田, 1980; 新名, 1995)。ダム下流では上流とは餌の化学量バランスが大きく変化したことで、雑食であるウルマーシマトビケラの脂質量にも変化が起きたことは十分に考えられることである。また、土砂還元下流の脂質量について、ウルマーシマトビケラではさらに低下していたことから、餌資源に対する土砂還元の効果は弱いことが予想される。

一方、刈取食者であるカゲロウ科の体脂質量は濾過食者の結果とは異なり、有意ではないものの下流に向かうにつれて脂質量が増加する傾向があった。比較した種が異なっていることもその原因である可能性は否めないが、*Baetis japonica*だけをダム上下流で比較した場合、ダム下流で脂質量が増す傾向が見て取れる。今後、土砂還元下流も含め同種で比較することが必要であろう。

化学量変化の傾向が異なる餌資源を摂食するカゲロウ科とウルマーシマトビケラの脂質量の変化が異なっていることは、同じダム下流に生息する底生動物であっても、餌資源の違いによって脂質量の変化方向が異なり

うることを強く示唆している。今後、ダム河川の食物網構造を理解するためには、餌資源と摂食機能群を網羅した上で、底生動物の化学量や脂質量の測定を行うことが必要であろう。

謝 辞

奈良女子大学理学部化学生命環境学科の中村葉さんに野外調査を手伝っていただきました。ここに記し、深く謝意を表します。

引用文献

- Arts, M. T. (1999): Lipids in freshwater zooplankton: selected ecological and physiological aspects. In *Lipids in Freshwater Ecosystems*, M. T. Arts and B. C. Wainmann (eds.), 71-90. Springer, New York.
- Benke, A. and B. Wallace (1997): Trophic basis of production among riverine caddisflies: implications for food web analysis. *Ecology*, **78**, 1132-1145.
- Evans-White, A. M. and G. A. Lamberti (2005): Grazer species effects on epilithon nutrient composition. *Freshwater Biology*, **50**, 1853-1863.
- Folch, J., M. Lees and G. H. Sloane Stanley (1957): A simple method for the isolation and purification of total lipids from animal tissues. *The Journal of Biological Chemistry* **226**, 497-509.
- 波多野圭亮・竹門康弘・池淵周一 (2005) : 貯水ダム下流の環境変化と底生動物群集の様式. 京都大学防災研究所年報, **48**, 919-933.
- 池淵周一編著 (2009) : ダムと環境の科学 I - ダム下流生態系. 京都大学学術出版会, 京都.
- Katano, I., J. N. Negishi, T. Minagawa, H. Doi, Y. Kawaguchi and Y. Kayaba (2009): Longitudinal macroinvertebrate organization over contrasting discontinuities: effects of a dam and a tributary. *Journal of the North American Benthological Society*, **28**, 331-351.
- 小林優太郎・角絢香・土居秀幸・片野泉 (2019) : ダム上下における造網性トビケラ 2 種の体内脂質割合. 陸水研究, **6**, 11-19.
- 宮川幸雄・角哲也・竹門康弘・小林草平 (2016) : 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. 都大学防災研究所年報, **59**, 517-524.
- Ock, G., G. M. Kondolf, Y. Takemon and T. Sumi (2013): Missing link of coarse sediment augmentation to ecological function in regulated rivers below dams: Comparative approach in Nunome River, Japan and Trinity River, California, US. *Advances in River Sediment Research*, S. Fukuoka, H. Nakagawa, T. Sumi and H. Zhang (eds), 1531-1538, CRC press, Boca Raton, FL.
- Oswood, M. W. (1976): Comparative life histories of the Hydropsychidae (Trichoptera) in a Montana lake outlet. *The American midland naturalist* **96**, 496-497.
- Poff, N. L. and D. D. Hart (2002): How dams vary and why it matters for the emerging science of dam removal: An ecological classification of dams is needed to characterize how the tremendous variation in the size, operational mode, age, and number of dams in a river basin influences the potential for restoring regulated rivers via dam removal. *Bioscience*, **52**, 659-668.
- Merritt, W. R., W. K. Cummins and M. B. Berg (2008): An introduction to the aquatic insects of North America. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, **80**, 593- 595.
- 西條八東・三田村緒佐武 (1995) : 新編 湖沼調査法. 講談社, 東京.
- 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, **11**, 273-278.
- 新名史典 (1995): 河川底生動物群集の食物網の実態とその動的側面.平成 6 年度文部科学省研究補助金報告書: 60-69.
- Steinman, A. D., P. J. Mulholland and J. J. Beauchamp (1995): Effects of biomass, light, and grazing on phosphorus cycling in stream periphyton communities. *Journal of the North American Benthological Society*, **14**, 371-381.
- Sumi, T., S. Kantoush, T. Esmacili and G. Ock (2017): Reservoir sediment flushing and replenishment below dams: insights from Japanese case studies. *Gravel-Bed Rivers: Process and Disasters*, **14**, 385-414.
- 竹門康弘 (2005) : 底生動物の生活型と摂食機能群による河川生態系評価. 日本生態学会誌, **55**, 189-197.
- 竹門康弘 (2009) : ダム下流河川の底生環境と底生動物群集の変化. ダムと環境の化学 I ダム下流生態系, 池淵周一 (編), 147-176, 京都大学出版会, 京都.
- 谷田一三 (1980) : 貴船川におけるシマトビケラ属 3 種の生活史と分布, とくに生活環の変異と密度と幼虫の成長との関連について. 日本陸水学会誌, **41**, 2, 95-111.

谷田一三・竹門康弘 (1999) : ダムが河川の底生動物へ与える影響. 応用生態工学, **2**, 153-164.

Torres-Ruiz, M., J. D. Wehr and A. A. Perrone (2007): Trophic relations in a stream food web: importance of fatty acids for macroinvertebrate consumers. *Journal of American Benthological Society*, **26**, 509-522.

Torres-Ruiz, M., J. D. Wehr and A. A. Perrone (2010): Are net-spinning caddisflies what they eat? An investigation using controlled diets and fatty acids. *Journal of American Benthological Society*, **29**, 803-813.

Urabe, J. and R. W. Sterner (1996) Regulation of herbivore growth by the balance of light and nutrients. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*, **93**, 8465-8469.

Wallace, B. J. and W. R. Merritt (1980): Filter-feeding ecology of aquatic insects. *Annual Review of Entomology* **25**, 103-32.

柳井久江 (2011) : エクセル統計 第3版, オーエムエス出版, 東京.

吉村千洋 (2013) : 河川における物質の流れ. 河川生態学, 中村太士 (編), 34-47, 講談社.