

## 貯水ダムの生態系影響を軽減するための河床地形管理に関する研究

竹門康弘・中井健太郎\*・角 哲也

\* 京都大学工学部地球工学科

### 要 旨

河床地形の生態的機能評価手法を開発するために、河道の流下粒状有機物に占めるプランクトンの寄与率の流程変化を測定することによって河床地形の有機物捕捉効率を推定し、これを河床の生態機能の指標に用いた。地形条件の異なるダム下流河川において現地調査を行ない、有機物捕捉効率と河床地形要因との関係を回帰分析した結果、単位水面面積あたりの水際線長さおよび平均水面幅が有機物捕捉効率の有意な説明変数であることがわかった。すなわち河道の粒状有機物の捕捉効率は水際線長さが長いほど指数関数的に増加し、水面幅が狭いほど反比例的に高まると考えられる。

**キーワード:** 流下粒状有機物, プランクトン, 河床地形, 有機物捕捉効率, 炭素窒素安定同位体比

### 1. はじめに

貯水ダムによる土砂供給の遮断は、上下流域の河床地形の変化を通じて流下粒状有機物の動態や底生動物群集の種多様性に影響している。その影響過程には、1) 河床の砂州形状、河床の起伏、河道の蛇行度などの地形変化を通じて生態系の機能の劣化を結びつく過程と、2) 貯水池で生産されたプランクトン由来の有機物が流下し、石表面の有機物沈着や河床間隙の閉塞などの環境変化を通じて生態系の機能の劣化を結びつく過程が区別されている(池淵, 2009)。1) による環境問題を解決するには土砂動態の適性化が、2) の過程の根本的な改善のためには、貯水池の水質改善か清流バイパス対策が必要とされている。

本研究では、貯水ダム下流河川の生態系の機能劣化の現状評価法の開発とその機能を修復改善するために必要な管理手法の提案を目的としている。その具体化のためには、「生態系の機能を何に着眼してどのように評価するか」が重要なポイントとなる。本研究では、河川生態系の評価軸として生物多様性尺度(Biodiversity measures)と物質循環尺度(Material cycle measures)を考え、それらを河床地形尺度(Riverbed geomorphic measures)に読替える手法を検討した(Fig. 1)。生物多様性尺度と物

質循環尺度には多くの候補がありうるが、ここでは底生動物群集の多様性尺度と粒状有機物の生産起源と捕捉効率尺度を利用することにした。これらの尺度を相関や回帰で連結することによって、ダムにより劣化した河川生態系を改善するために必要な河床地形条件を追究した。本研究の最終目標は、ダムの流況変動操作(Flow regime operation)と土砂供給操作(Sediment supply manipulation)により、生態機能を発揮する生息場の形成維持を目指した河床地形管理の手法を確立することにある(Fig. 1)。

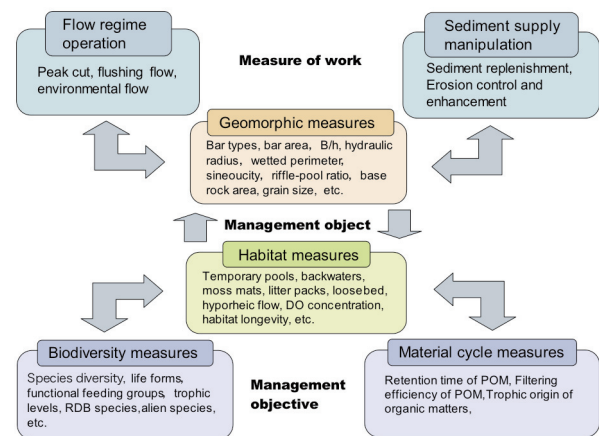


Fig. 1 Conceptual framework of the riverbed geomorphology management

## 2. 調査地

現地調査地として、和歌山県古座川水系の七川(しちかわ)ダム、福井県九頭竜川水系真名川流域の真名川ダムおよび雲川ダム、そして淀川水系木津川支川布目川流域に位置する布目ダムの4つのダム流域(Fig. 2)を選び各流域のダム直下流地点・ダム下流数km地点、ならびにダム上流ないし下流の支川にダム影響のない参照地点を設定した。

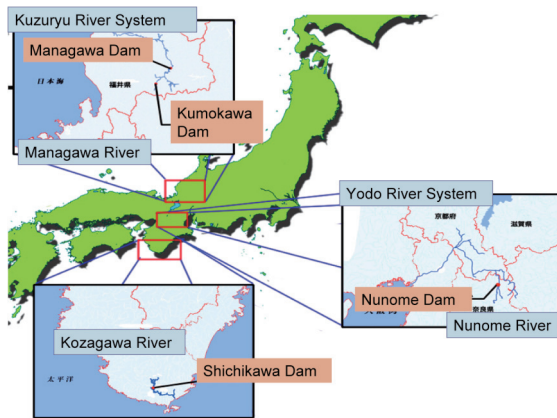


Fig. 2 Map of the study area selected at four dam sites.

調査を行った4ダムの概要と調査対象とした下流河川の特徴は以下の通りであった。

- ・七川ダム：1956年竣工(調査時点で満53年)の発電・治水を目的とした重力式コンクリートダムであり、集水域面積は102.0 km<sup>2</sup>、有効貯水容量は25,400千m<sup>3</sup>である。発電用水放流口から佐本川の合流部まではが河岸が露出した岩盤となっている部分が多い。下流に向かうにつれ、河岸の一部に河原が発達や河道内での砂州の形成が見られるようになる。
- ・真名川ダム：1977年竣工(同満42年)の発電・洪水調節・不特定用水を目的としたアーチ式コンクリートダムであり、集水域面積は223.7 km<sup>2</sup>、有効貯水容量は95,000千m<sup>3</sup>である。平水時はダムからの放流の多くが下流の五条方発電所に送水され、ダム直下には0.67 m<sup>3</sup>/s程度の環境維持流量が放流されている。
- ・雲川ダム：真名川ダムの上流部に位置し、七川ダムと同時期である1957年竣工(同満52年)の発電専用である重力式コンクリートダムであり、集水域面積は58.8 km<sup>2</sup>、有効貯水容量は1,490千m<sup>3</sup>と比較的小規模である。貯水池は上流からの土砂が溜まりほぼ満砂状態になっている(平成8年の時点で堆砂率88.6%)。すぐ上流は背水部となり、土砂の堆積が進んで砂河川の様相を呈している。

真名川ダムでは貯水池から取水した発電用水を約

3.5km下流の五条方発電所まで送水管により直接送水している。ダム直下への環境維持流量は平水時0.67 m<sup>3</sup>/sである。雲川ダムからの発電用水は、同じく真名川上流の別系統支川に位置する笹生川ダム(1957年竣工。同満52年)からの発電用水と合流し中島発電所を経由したのちに五条方発電所に送水される。

- ・布目ダム：4ダムの中で最も新しく1992年に竣工(同満17年)した洪水調節・水道用水・不特定用水が目的の重力式コンクリートダムであり、集水域面積は75 km<sup>2</sup>、有効貯水容量は15,400千m<sup>3</sup>である。今回の調査対象となる河川に位置するダムの中では最も新しいため、ダムによる下流河床の粗粒化の程度は比較的進行していないと予想される。
- ・置土による土砂還元の実施状況：4ダムのうち真名川ダムでは平成16年度および20年度に、また布目ダムでは16年度から毎年、ダムからのフラッシュ放流による置き土流下試験を実施し、下流への土砂供給を行っている。置土地点は真名川のGD~YB間、布目川のND1~ND2間である。

## 3. 調査方法

### 3.1 環境条件の測定

各調査地点では水質環境条件として、水温・電気伝導度・塩分濃度・溶存酸素濃度(DO)・pH・NO<sub>3</sub><sup>-</sup>・NH<sub>4</sub><sup>+</sup>・PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>・化学的酸素要求量(COD)の9項目の水質を計測した。計測結果は表2.3に示した。また、底質環境条件として、ライントランセクト(8.5~10m×3本)の調査を行った。

### 3.2 資料採集の方法

サンプリングは河川内の粒状有機物(POM, Particulate Organic Matter)・藻類・石面附着層・陸上植物・水生動物を対象とした。POMは水中を流下するSPOM(Suspended POM)と止水域において河床に堆積したBPOM(Benthic POM)とで別々に採取した上で、さらに粒径が1.0mmより小さなものをFPOM(Fine POM)、大きなものをCPOM(Coarse POM)として分画し、全部でSFPM, SCPOM, BFPOM, BCPOMの4種類を採取した。なお、本稿における藻類とは、アオミドロ類やカワシオグサなどの糸状緑藻類や糸状ラン藻類であり、石面附着層は、ケイ藻類・ラン藻類・緑藻類やデトリタス等の有機物とシルトや粘土を含む石面附着物である。

各調査地点において、SPOMの採集は流れが速い早瀬や平瀬の流心部において、巻き上げられた河床堆積物が混入しないよう水深が30cm以上ある地点において採集を行った。一方BPOMは河道脇のわんどや

たまりといった水深の浅い止水域において有機物のよく堆積している場所を見つけて採集した。藻類、石面付着層は流れの速い瀬の礫や巨石の上面から採取した。陸上植物については、木本は河道内の流水部に近い場所で採取し、草本は可能な限り水中に存在するものを選んだ。

SPOMはPOMネット（口径30cm・100 $\mu$ mメッシュ）を用い、約2分間流水中に入れて濾し取られたものを採集した（竹門ほか2006）。BPOMは加工した樹脂製容器にプランクトンネットを装着した設備で、周囲の砂やシルトを巻き上げないように刷毛で掃き取って採集した（図2.4.3に採集の様子、採集方法については竹門ほか2007）。SPOMとBPOMはそれぞれ口径1mmと100 $\mu$ mの2種類のふるいを用いて、1mmのふるいに残ったものをCPOM、1mmのふるいを通過して100 $\mu$ mに残ったものをFPOMとして分画しサンプルとした。真名川・雲川、布目川では各3サンプルずつ採取し、古座川では分画は行わずSPOM、BPOMの2つのサンプルとした。

藻類は直接手やピンセットを用いて剥ぎとって採取、石面付着層は歯ブラシで擦り取って採取した。陸上植物は河道内の調査地点付近の樹木から直接、また水中の落ち葉を収集して採取した。またツルヨシなどのヨシ科植物とコケ植物も採取した。なお、各地点では作業時間が極力同じになるように注意してサンプリングを行った。

底生動物は採集用ネット（口径40cm、網目サイズ1mm（対角1.3mm））によって捕獲した。また、採取した石面に付着した個体を直接ピンセットで剥がしとるなどして採集した。

### 3.3 採集した試料の同定

動物サンプルについては川合・谷田(2005)、Wiederholm(1983)、鈴木・佐藤(1994)、林(1992)、川那部・水野(1989)、紀平ほか(2003)、藤谷(2006)を基に可能な限り種レベルないし属レベルまで同定したのち、種数を計数するとともに、Merritt & Cummins(1996)・竹門(2005)を参考にして生活型・摂食機能群・餌型に分類した。これらは底生動物の生活要求に基づいて生物種を分類したもので、底生動物群集間の比較を行うことによる河川生態系の構造を把握する手法として用いられる（竹門2005）。今回は種組成情報をダム間での生物群集の違いの分析に用いた。多くの研究でダム河川での底生動物群集が空間的に変化することがわかっており（谷田・竹門1999）、その変化は種々の河川特性や流域内の位置など様々な条件に影響される（Armitage 1987）。なお布目ダム下流の調査区域内では2000、2005年度に河川水辺の国勢調査が行われ底生動物群集が把握さ

れているため、そのデータも参考に用いた。また波多野ほか(2005)、玉・竹門(2008)が行った同ダム直下地点での底生動物のサンプリング結果も用いた。現地で採取したサンプルは保冷容器に入れて持ち帰り、冷凍庫に保管した。

### 3.4 安定同位体比分析

水生動物は同定した上で、大きな個体に関しては消化管などを除去し、また植物・藻類は蒸留水で洗浄した後で、乾燥機において60 $^{\circ}$ Cで約24時間乾燥させた。この時、乾燥重量で0.1mgに満たない場合は分析対象から外し、種組成分析のみに用いた。POMは出来る限り植物プランクトンを抽出し沈殿後に上澄みを捨てた後、他のサンプルと同様に乾燥させた。その後分析用にエッペンドルフ社製のマイクロテストチューブに入れ、POM・藻類・陸上植物・水生動物消化管内容物を有機物サンプルとし、水生動物を動物サンプルとして、分析日まで乾燥ケースにて別々に保管した。なお、複数個体のサンプルは挿り鉢を用いて十分粉末化し、個体差が出ないように処理を行った。

得られた安定同位体比分析の結果は分析機器に接続されたコンピュータで解析され $\delta$ 値として出力されているが、水トラップ交換などの分析条件の違いによって測定誤差が生じる。これを補正するため、ワーキングスタンダードサンプルであるアラニンの安定同位体比分析値と実際の安定同位体比值との差を求め、その補正値を加えることにより全データの同位体比の値を補正した。

得られた全試料の安定同位体比のデータから、ダム下流河川の有機物起源をダム貯水池内一次生産物由来のもの(plankton)と下流河川内での一次生産物である付着藻類(algae)、河川周辺の陸上植物(t. plant)の3つと仮定し、それぞれの起源として最も代表していると思われるサンプルを代表値として選定した。図に全有機物サンプルとエンドメンバーの安定同位体比の値をC-Nグラフにプロットした。なお、これらのエンドメンバーはそれぞれの起源としてそれ自身のみ含有すると仮定した。寄与率を計算するサンプルにおける窒素、炭素の $\delta$ 値を $\delta_{N, sample}$ 、 $\delta_{C, sample}$ とおくと、

$$\delta^{13}C_{sample} = f_{dam} * \delta^{13}C_{dam} + f_{algae} * \delta^{13}C_{algae} + f_{plant} * \delta^{13}C_{plant} \quad (1)$$

$$\delta^{15}N_{sample} = f_{dam} * \delta^{15}N_{dam} + f_{algae} * \delta^{15}N_{algae} + f_{plant} * \delta^{15}N_{plant} \quad (2)$$

$$f_{dam} + f_{algae} + f_{plant} = 1 \quad (3)$$

と表せる。ここで、 $f_s$ は起源sの寄与率、 $\delta_{N, s}$ 、 $\delta_{C, s}$

はそれぞれ起源  $s$  の窒素、炭素の安定同位体比である(起源  $s$  は plankton, algae, terrestrial plant)。この3元1次連立方程式を解くことによって、各サンプルについて貯水池由来、付着藻類由来、陸上植物由来の有機物の寄与率を求めた。この寄与率の変化によって、POMのダム影響および下流河川での一次生産、陸上植物由来の比率を推定することができる。なお、寄与率の計算結果が負の数、あるいは1を超える数が出る場合がある。これは、図に示したように、3つの起源有機物により描かれる三角形の内部に入らないサンプルに見られる。この場合寄与率は、サンプルの値と最も遠い場所にある起源はそのサンプルにまったく含まれていないとして、最大値と最小値をそれぞれ1と0に圧縮した値に修正した。

### 3.5 河床地形分析

河床地形要因として、水面幅・裸地面積・水面面積・水際線長さ・区間直線距離・河川勾配・地点集水面積を測定した。水面幅・裸地面積・水面面積の測定には航空写真(NTTネオメイト発行、50cmピクセルオルソデータ)および画像編集アプリケーションソフト Adobe Photoshop CS4 を用い、水際線長さ・区間直線距離の測定には航空写真(同上)および描画ソフト Adobe Illustrator CS4 を用いた。河川勾配および地点集水面積は国土地理院発行の数値地図50mメッシュ(標高)およびESRI製の地理情報ソフトウェア ArcGIS を用いて計測した(Fig. 3)。なお、航空写真の撮影日はそれぞれ古座川流域が2004年10月22日11時ごろ、真名川・雲川流域が2006年8月11日9:00~11:00、布目川流域が2007年4月10日14:00~15:00である。

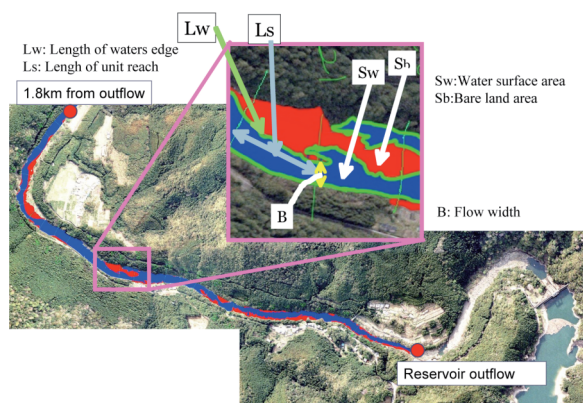


Fig. 3 An example of GIS analysis on riverbed geomorphology in the tail waters of the Kozagawa Dam.

それぞれの河床地形要因の定義と測定方法を下に示す。

- ・裸地面積、水面面積：航空写真から水面と裸地河

原を判読、50m(真名川では100m)毎に画素抽出機能を用いて水面部面積および河原面積を計測した。なお樹冠などにより地形の判読が著しく困難な場合、その区間は測定の対象から除外した

- ・水面幅(B)：調査区間内の区間境界部の水面幅を50m(真名川では100m)間隔で「ものさしツール」を用いて計測した。水面幅は流線に垂直な方向と定義した。
- ・水際線長さ、区間直線距離：50m(真名川では100m)毎に、パス長さ計測機能を用いて求めた。河道内の砂州、露出した岩の水際線もできる限り含めた。区間直線距離は水面幅の中間点同士を直線で結んだ長さを計測した。
- ・河川勾配：各調査地点における標高を求め、区間長で割ることにより算出した。
- ・地点集水面積：各調査地点間の区域に流入する集水域をそれぞれ抽出し、ピクセル数から集水域面積を算出した。

これらから平均水面幅・水際線長さ比・裸地率・平均河床勾配・支川合流比、単位水面面積あたり水際線長さを求め、これらを河床地形要因として統計分析に用いた。それぞれの定義は以下のものとする：

- ・平均水面幅：区間ごとに測定した水面幅の平均をとった。
- ・水際線長さ比：区間ごとに水際線長さを区間直線距離で割り、その平均をとった。
- ・裸地率：裸地面積の全区間合計を裸地面積と水面面積の和の全区間合計で割って算出した。
- ・平均河床勾配：調査区間のうち最上流地点と最下流地点の標高差を流程距離で割った。
- ・支川合流比：最下流地点の集水面積を用いた。
- ・単位水面面積あたり水際線長さ：水際線長さの全区間合計を水面面積の全区間合計で割った。
- ・単位区間面積あたり水際線長さ：水際線長さの全区間合計を水面幅と区間直線距離の積で割った値の全区間合計で割って算出した。単位水面面積あたり水際線長さとの値の比較を行った。
- ・水面面積に対する水際線長さ比の平均：区間ごとに水際線長さを水面面積で除した値を全区間で合計し算出した。

### 3.6 統計分析

得られた測定値間の違いを確認するため、正規性の仮定できるデータについては分散分析とt検定を行い、有意水準を5%として判定した。なお検定の際には、正規性と等分散性を改善するために対数変換した値を用いた。河川地形要因と有機物起源寄与率の流程変化率との間で各種関数関係を想定して回帰分析を行った。さらに互いに内部相関が小さいと予

想される要因のうち回帰係数の高いものを選んで重回帰分析を行った。

#### 4. 貯水池由来有機物の流程変化

##### 4.1 ダム下流河川の有機物起源特性

各地のダム上下流における SPOM, BPOM, 藻類, 陸上植物などの有機物サンプルの炭素・窒素安定同位体比の散布図として布目川の結果を Fig.4 に示す。図中に楕円で囲った部分は、貯水池プランクトン, 付着藻類, 陸上植物の値を示しており, これら3つを起源物質(エンドメンバー)に設定した。

Fig.4 には各サイト別に色分けして全有機物サンプルをプロットした。布目ダム下流の有機物サンプルは, NU(布目上流部)のサンプル群および他の3つのサイトに比べ炭素の $\delta$ 値が低く, 窒素の $\delta$ 値が高く, 値の分散値が大きかった。布目ダム下流で窒素の安定同位体比が高い原因としては, 布目ダム上流の流域人口が多いことから生活排水に含まれる人為起源の有機物や農地から流出した化学肥料起源の窒素が影響したと考えられる。計測した水質のうちアンモニウムイオン濃度が他のダムサイトに比べ高い値を示していたこともこの可能性を示唆していた。また, これらのサンプルから, 有機物起源の代表となるサンプルを選出しそれを用いて寄与率計算を行った。

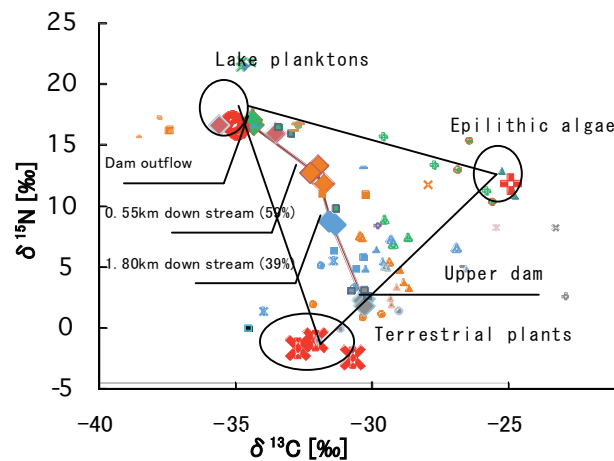


Fig. 4 Biplot map of carbon and nitrogen stable isotope values of organic matters collected at upper dam (gray), outflow site, 0.55km below and 1.80km below the Nunome Dam. The large diamond symbols indicate the mean values of SPOM.

Three Source Model で求めた粒状有機物 POM (SFPOM・SCPOM, BFPOM・BCPOM) の起源組成のサイトごとの流程変化を Fig. 4 に示した。SFPOM, SCPOM

では貯水池起源の有機物の寄与率はダム下流域の流下とともに全調査地点において減少していた。ダム堤体の放流口から 0.55km の間に SFPOM の貯水池由来有機物の寄与率が 59.3% にまで減少していた。これは, ダムから流下してきた有機物ほどの調査区間においても順次トラップされていることを示している。また, BFPOM の貯水池由来の寄与率は 0.55km 地点ではまだ 1.1% とゼロに近く, ダム直下から 1.8km 地点において漸く 14.0% に増加した。

なお, ヒゲナガカワトビケラ, シマトビケラ科の体組織でも同様の寄与率変化が得られ, ダム影響の指標としてのこれら水生昆虫の有用性が示唆された (Fig.5)。雲川では, 貯水池の浮遊粒状有機物は植物プランクトン起源ではなく陸上植物由来であったが, 流下とともに付着藻類由来に置き換わった。

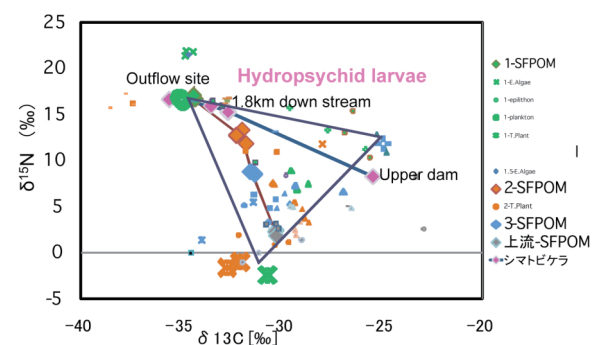


Fig. 5 Changes in carbon and nitrogen stable isotope values of hydropsychid larvae collected at outflow site, 0.55km below, 1.80km below and upper site of the Nunome Dam.

##### 4.2 貯水池由来物質寄与率の距離変化率

有機物起源の寄与率の流程変化を区間ごとに比較するため, 貯水池由来・陸上植物由来の寄与率について区間距離で割った距離変化率を求めた (Fig. 6)。

SFPOM のダム由来有機物は,  $-0.582 \sim 0.390$  の幅で変化率を示した。雲川ダム KR~KD の値のみ特異な値を示したが, これを除外すると値の幅は  $-0.582 \sim -0.020$  であった。この中で真名川 GS~GD と布目 ND1~ND2 における値が高かった。前者は発電所放流口から本川流入直後までの短い区間での急激な変化であるが, これは放流管内の射流が水面幅の広い河道内に流入する際の大きな速度変化によるものと考えられる。後者は河川内に植生の茂った比較的大きな砂州があるため, 砂州での有機物捕捉によってダム由来有機物の減少が起きたと考えられる。

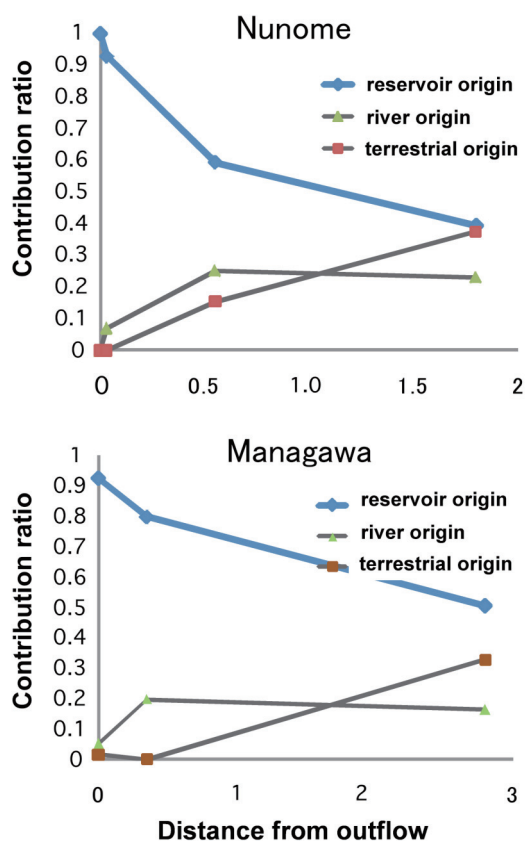


Fig. 6 Dwnstream changes in the contribution of each trophic origin of the suspended particulate organic matter in the tail water reaches of the Nunome Dam and the Managawa Dam.

BFPOM のダム湖由来有機物の距離変化率は 3 河川とも下流区間で正の値を示した。これは流程において捕捉された有機物が堆積して BFPOM となっているためと考えられる。逆に陸上植物由来の BFPOM はダム直下で増加し、次の下流側の区間で減少した。特に雲川ダムの直下では、ダム上流からきた分解済みの陸上植物が多いと考えられ、直下で順次トラップされる結果下流側区間で減少したのかもしれない。

各調査点間の区間での距離変化率を比較した結果、おおむねダム直下の区間の方が下流側区間よりも寄与率変化率が高かった。このことから、貯水池由来の有機物はダム下流で指数関数的に減少することが予想され、また実際にその指数関数モデルをもとに SFPOM の流化距離を推定した研究もある (Ock ほか, 2008)。この想定をもとにダムごとに寄与率の流程変化を指数関数で近似し、低減係数を求めた

(Fig.7)。なおこの図に用いた雲川の値は、ダム湖由来のプランクトンの影響がほとんどなく貯水池で採取された SFPOM の多くが陸上植物由来であったため、ダム湖由来の有機物として陸上植物を選び、藻類との 2 起源による寄与率を採用した。その結果、

4 ダム下流域における貯水池由来物質の寄与率の流程変化は、古座川と真名川で低減率が小さく、布目川と雲川で高いことがわかった (Fig. 7)。

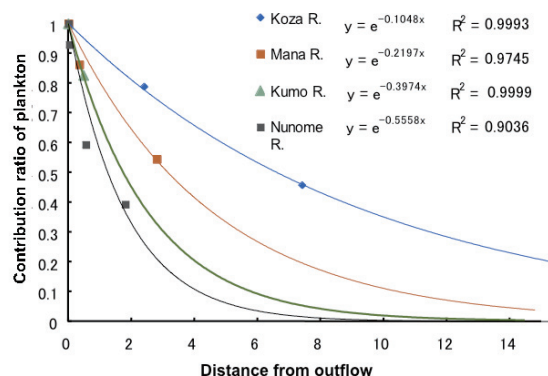


Fig. 7 Comparison of downstream changes in the contribution of reservoir originated plankton to the suspended particulate organic matter in the tail water reaches of the four dams studied.

低減率は古座川が 0.105, 真名川が 0.220, 雲川が 0.397, 布目川が 0.556 となった (図 3.1.5)。最も低減率が低い古座川と最も高い布目川との間にはおよそ 5 倍の差がある。なおこの低減係数の逆数を求めることにより、平均流下距離を推定することができる (Young 1978)。平均流下距離はそれぞれ古座川で 9.52km, 真名川で 4.55km, 雲川で 2.52km, 布目川で 1.80km であった。例えば、布目川では調査区間最下流の ND3 付近が平均流下距離にあたり、ND3 でのダム貯水池由来の有機物は 40% 程度であったことに対応している。

## 5. 河床地形が有機物の捕捉効率に及ぼす影響

### 5.1 ダム下流域の河床地形条件

各調査地における河床地形の調査結果を Table 1 にまとめた。古座川と雲川を比較した場合、古座川は平均水面幅が大きく、平均河床勾配・裸地率・水際線長さ比・単位水面面積当たり水際線長さが小さかった。雲川では平均水面幅が雲川の半分程度で、平均河床勾配・裸地率・水際線長さ比・単位水面面積当たり水際線長さは大きかった。真名川は河床地形要因の値が真名川と雲川の間になっており両者の中間の地形特性を示していた。単位水面面積あたり水際線長さは水際線長さ比から水面幅の影響を除いたものであり、この値が大きいほど流下粒状有機物が水際に接触する頻度が高いと考えられる。ここで雲川と布目川を比較した場合に裸地率は雲川が上回っているのに対し単位水面面積あたり水際線長さ

Table 1 Results of GIS measurements on the riverbed geomorphic parameters in the tail-water reaches of the four dams studied and regression coefficients between each parameter and the retention coefficient of SPOM obtained in Fig 7.

River name	Retention coefficient (k)	Distance studied (km)	Mean channel width (m)	Mean bed slope in each segment	Bareland ratio in the active channel	Shore length /unit distance	Shore length /water surface area
Koza-gawa	0.105	7.4	24.2	0.0037	0.26	1.18	0.096
Mana-gawa	0.220	2.8	14.4	0.0151	0.37	1.40	0.183
Kumo-kawa	0.397	7.1	12.1	0.0213	0.56	1.95	0.241
Nunome-gawa	0.556	1.8	9.0	0.0087	0.46	1.28	0.273
Correlation coefficient (R <sup>2</sup> )			0.9737*	0.0956	0.5260	0.1855	0.9976*

Note: \* indicates the regression coefficient is statistically significant at 5% level.

が布目川の方が大きいのが興味深い。航空写真による地形分析の際の観察での印象では、布目川には一部区間で中州が発達していたもののその内部に植生が存在しており裸地には該当しなかったことや護岸により低水敷面積が全体的に小さくその低水敷も植生に覆われていたこと、雲川には水面から露出した巨石や岩が多く見られた区間があった一方でコンクリート護岸によって水際線が単調になっている区間も多かったことや一部区間でコンクリート護岸がなくなり河岸が広い河原になっていたこと、が特徴としてあげられる。

## 5.2 有機物の捕捉効率と河床地形条件の関係

流下粒状有機物の貯水池由来プランクトンの寄与率の低減係数を流下粒状有機物の捕捉効率の指標とし、河川ごとの地形条件との間で回帰分析を行った。今回分析対象とした地形要因のうち、単位面積当たり水際線長さおよび平均水面幅に低減係数との間で有意な傾向が見られた。平均河床勾配・裸地率・水際線長さ比・支川合流比との間には有意な関係は見られなかった (Table 1, 黄色に塗りつぶした河床地形要因は回帰係数が統計的に有意であることを示す)。有意性が見られた単位面積当たり水際線長さおよび平均水面幅を説明変数として横軸に、低減係数を縦軸にプロットした図を示す (Fig.8)。水面面積に対し水際線が長く、また平均川幅が小さいほど、捕捉効率は高くなることがわかった。水際線長さ/水面面積の回帰曲線は原点を通らず、水際線が流心線に等しいような水路状の河川においても一定の低減率があることがわかるが、これは沈降、付着や水生生物の摂取などで有機物量が減少したことが関連していると思われる。低減係数 k と河床地形要因との回帰分析の結果、「水面面積/水際線長さ」および「平均水面幅」と低減係数 k との間で統計的に有意な回帰式が得られた (Fig.8)。これは川幅が小さく複雑な水際線を持つ河川が高い捕捉効率を持つことを示

している。このような河床地形の例としては、副流路の発達した網状河川などが考えられる

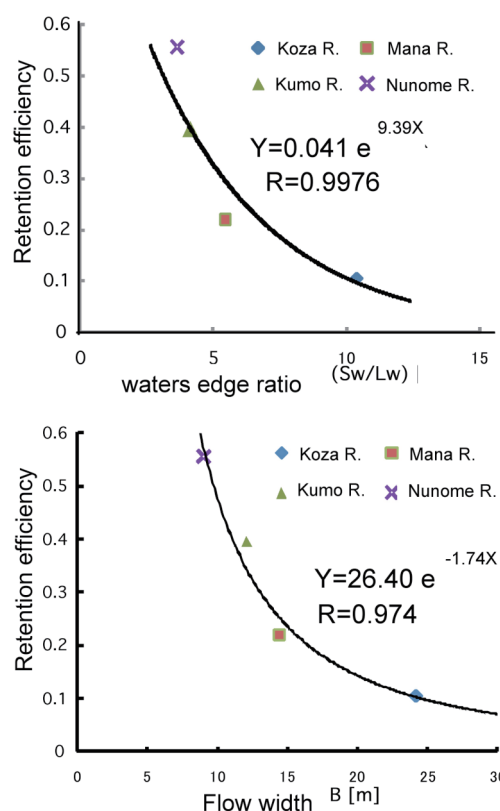


Fig. 8 Relations of retention efficiency of SPOM to waters edge ratio (upper figure) and to flow width obtained in the tail water reaches of the four dams.

## 6. 考察

### 6.1 河床地形要因と有機物捕捉効率の関係

真名川と布目川を比較した場合、水際線長さがほぼ同じ長さであるが水面幅が狭いため、低減係数が真名川で0.22であるのに対し布目川では0.556と高い値になっている。これは、水面幅が狭くなること

により流水中の流下粒状有機物が河岸でトラップされる機会が増えることを示す。また、真名川と雲川では水面幅がほぼ同じ広さであるが雲川がより複雑な水際線を有しているため、低減係数が真名川で0.22であるのに対し雲川では0.397と2倍以上高くなっている。これは、水際線が複雑になることにより流下粒状有機物が河岸部と接触した際のトラップ率が高いことを示す。これらのことから、水際線が長く、水面幅が狭い河川ほど有機物が早くトラップされることが示唆された。今回は4つのダム河川の下流域に1河床地形要因を設定し4つのプロットにより回帰分析を行ったが、これは全国の河川に適用するための一般的な法則とするにはまだサンプル数が不十分であり、より多くの事例を調査する必要がある。また各河川において指数近似を行う際に2点ないし3点の寄与率データを用いたが、より正確な捕捉効率を得るためには流程方向の調査地点数を増やすことが望ましい。またその際には、貯水池由来物質の減少が著しいダム直下付近において下流よりも間隔を密に取るのが良いであろう。

河川の有機物捕捉効率と河床地形要因との回帰分析の結果、水際線長さと水面幅が有機物捕捉効率と有意な関係を示すことが分かった。これらの結果は、同じ流量の河道であれば川幅が狭く水面に対して水際線が複雑であればあるほど有機物が捕捉されやすいことを示している。この結果をより信頼性の高いものにするためにより多くのデータを取る必要があるが、今回の結果を利用し河川生態系をより自然河川の豊かさに近づけていくための指針として、ダム貯水池由来有機物を下流河川でより多く捕捉させその影響を早く低減するためには水際線を長くする対策を施し水面幅を狭くすればよいことが考えられる。水際線長さを増加させるための河床地形の目標像には、網状流路やうろこ状流路があげられる。これらの河床地形は河道内に砂州が多く存在する結果、水際線が著しく増加するのに加え、単流路の蛇行流と比べて分岐する分各流路の水面幅が小さくなるからである。すなわち河道の平面形状の複列化や砂州の形状を促進する程度に土砂供給量を増やすことがダム下流河川の環境対策に際して目標となる。今後の研究としては、具体的にどの程度の土砂供給量によってこうした河床地形変化が生じるかについて予測可能なモデルを示すことが課題となる。また、本研究で用いたプランクトン低減係数 $k$ は、土砂還元対策の結果形成された河床地形の生態機能を評価するための指標として有効であると考えられる。今後の研究では、より正確な生息場構造の把握のため、さらに多くの河川でのデータ収集により今回の結果の補強や適用条件の確認を行うとともに、流量変化が有機物

捕捉率に及ぼす影響や平面形状と水深方向の河床地形との関連性を調べるのが求められる。同時に、川幅や水際線長さのほかに生息場環境を有効に評価しうる河床地形パラメータを見つけ、それに基づく評価指標パラメータを構築すること、また結果として得られた生態機能に望ましい土砂環境を実現するための土砂管理手法の確立も今後の課題として挙げられる。

## 6.2 水生動物によるダム影響評価

造網性トビケラのような濾過食者は、水中の流下有機物と違い有機物環境の時間的な履歴をもつので、流量条件などで変動しうる SFPOM や微地形条件の影響を受けやすい BFPOM よりも河川の持つ有機物動態の特性を平均的な値を反映する可能性がある。もし造網性トビケラの体組織が実際に履歴を的確に反映するとすれば、前節で述べたプランクトン低減係数の値を求める際の材料として造網性トビケラが優れている可能性がある。

そこで本研究では、真名川で行ったヒゲナガトビケラ胃内容物の安定同位体比の値が SFPOM と同じ流れ変化を示したことでヒゲナガカワトビケラに関して餌の濃縮係数を求めた。ただし今回ヒゲナガカワトビケラの胃内容物は真名川でしか採取せず、河川間比較はできなかった。シマトビケラ科本体に関しては SFPOM による本体有機物の寄与率推定が SFPOM の寄与率変化に比較的近かった。シマトビケラ科本体のダム上流—ダム直下における寄与率変化はダム影響の流程方向の低減を示していたが、ダム直下において  $\delta^{13}\text{C}$  値が SFPOM より低い値を示すなど SFPOM 寄与率変化との差が大きく、シマトビケラ内の種間の値の違いが影響していることも考えられる。これらより、シマトビケラの安定同位体解析が寄与率変化からの有機物捕捉効率評価に有効かどうかは今回の結果では判断できないと思われる。

今後の調査では、ヒゲナガカワトビケラおよび種をなるべく限定したシマトビケラ科を選択して採取を行い、他の河川においても胃内容物と SFPOM がほぼ同じ値を示すかどうかを確認する必要がある。それと同時に他の FPOM 食者についても同様の比較を行うことによって、ダム影響の評価指標として適した材料を見いだせることが期待される。

## 7. まとめ

古座川、真名川、布目川では、プランクトン生産由来の粒状有機物が流下とともに付着藻類由来に置き換わった。また、雲川では、貯水池の浮遊粒状有機物は植物プランクトン起源ではなく陸上植物由来であったが、流下とともに付着藻類由来に置き換わ



った。4ダム下流域における貯水池由来物質の寄与率の流程変化は、上図のように古座川と真名川で低減率が小さく、布目川と雲川で高いことがわかった。また、河床地形との関係を分析した結果、蛇行度や水面に対する水際線長比が大きいほど捕捉効率が高いことが予想された。

本研究の成果を一般化するためには、大きく2つの課題が残されている。1) 河床地形の尺度が不足している。調査河川数および地点数、標本数を増やして今回の結果を補強し、他の河床地形要因も分析して地形条件から粒状有機物の捕捉効率の予測ができるようにすることが必要である。2) 今回用いた低減係数 $k$ は距離の次元を含んだ値であるため、汎用性を高めるためには地形のみの特性値として変換した指標を開発する必要がある。

## 謝 辞

本研究の野外調査の際には、木津川上流河川事務所、淀川ダム統合管理事務所、九頭竜川ダム統合管理事務所、角研究室の皆様、ハビタットロジー研究会の皆様へたいへんお世話になりました。ここに厚く御礼申し上げます。また、安定同位体比測定の際に適切なご指導を賜りました京都大学生態学研究センター准教授・陀安一郎先生ならびに角研究室の玉基英氏に深く感謝いたします。本研究を進めるにあたり、科研費基盤(B)19360224、科研費基盤(A)21254003、水源地生態研究会による委任経理金の一部を使用した

## 参考文献

- 池淵周一編著(2009):ダムと環境の科学I, 京都大学学術出版会, 285pp.
- 香川尚徳(1999): 河川連続体で不連続の原因となるダム貯水による水質変化, 応用生態工学, 2(2), pp.141-151.
- 河川事業環境影響評価研究会編(2000): ダム事業における環境影響評価の考え方, (財)ダム水源地環境整備センター.
- 川合禎次編(1985): 日本産水生昆虫検索図説, 東海大学出版会, 409pp.
- 川合禎次, 谷田一三共編(2005): 日本産水生昆虫科・属・種への検索, 東海大学出版会, 1360pp.
- 川那部浩哉, 水野信彦編(1989): 山溪カラー名鑑 日本の淡水魚, 山と溪谷社, 720pp.
- 紀平肇, 内山りゅう, 松田征也(2003): 日本産淡水貝類図鑑 1, ピーシーズ, 159pp.
- 玉基英, 竹門康弘(2008): 河川地形が微粒状有機物

の流下距離に及ぼす影響, 京都大学防災研究所年報, 51号B, pp815-828.

- 高津文人, 河口洋一, 布川雅典, 中村太士(2008): 炭素, 窒素安定同位体自然存在比による河川環境の評価, 応用生態工学 7(2), pp.201-213, 2005
- 白川直樹(2006), 日本の中規模多目的ダムにおける河川環境攪乱頻度の人為的变化, 水工学論文集, 第50巻.
- 鈴木廣志, 佐藤正典(1994): 淡水産のエビとカニ, 西日本新聞社, 137pp..
- 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, Vol.55, pp.189-197, 2005.
- 竹門康弘(2007a): 生息場の科学としての応用生態工学, 応用生態工学, Vol.10, pp.41-46, 2007a.
- 竹門康弘(2007b): 土と基礎の生態学 6.砂州の生息場機能, 土と基礎 Vol.55, pp63-75, 2007b.
- 竹門康弘, 山本佳奈, 池淵周一(2006): 河川下流域における懸濁態有機物の流程変化と砂州環境の関係, 京都大学防災研究所年報, B 49(B), pp.677-690.
- 竹門康弘, 今井義仁, 高津文人, 永田俊, 池淵周一:(2007) 増水低減過程における微細土砂・粒状有機物・底生動物の河床分布動態, 京都大学防災研究所年報, Vol.50, pp773-780.
- 谷田一三, 竹門康弘(1999): ダムが河川の底生動物に与える影響, 応用生態工学, Vol.2, pp.153-164.
- 対馬孝治, 天野邦彦, 傳田正利, 時岡利和(2007): 下流の河川生態系への有機物供給に関する研究, 水工学論文集, 51, pp.1117-1122, 2007.
- 土居秀幸(2007): 安定同位体を使って河川食物網を調べる:樹冠の有無による水生昆虫の餌資源の違い,安定同位体を使って河川食物網を調べる樹冠の有無による水生昆虫の餌資源の違い, 河川, 736号, pp.70-72.
- 永田俊, 宮島利弘(2008): 流域環境評価と安定同位体, 京都大学学術出版会, 476pp.
- 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, 第48号, pp.919-933.
- 藤谷俊仁(2006): 日本産コカゲロウ科(カゲロウ目)の7属への検索および所属する種の分類と分布・ハビタットに関する情報, 陸水学雑誌, 67, pp.185-207.
- 古屋八重子(1998): 吉野川における造網性トビケラの流程分布と密度の年次変化,とくにオオシマトビケラ(昆虫,毛翅目)の生息域拡大と密度増加について, 陸水学雑誌, Vol.59, No.4, pp.429-441.

- Doi, H., Takemon, Y., Ohta, T., Ishida, Y. and Kikuchi, E.: (2007) Effects of reach scale canopy cover on trophic pathways of caddisfly larvae in a mountain stream, Japan, *Marine and Freshwater Research*, Vol.58, pp811-817.
- Huang, I., Y. Lin, Chen, C. and Hsieh. H. (2007): Food web structure of a subtropical headwater stream, *Marine and Freshwater Research*, Vol.58, pp596-607.
- Katano, I., Negishi, N.J., Minagawa, T., Doi, H., Kawaguchi, Y. and Kayaba, Y. (2009): Longitudinal macroinvertebrate organization over contrasting discontinuities: effects of a dam and a tributary, *Journal of the North American Benthological Society*, Vol. 28, No.2, pp.331–351.
- McCutchan, J. H., Lewis, W. M., Kendall, C., and McGrath, C. C. (2003): Variation in trophic shift for stable isotope ratios of carbon, nitrogen, and sulfur, *Oikos*, 102, pp.378–390.
- Merritt, R. W. and Cummins, K. W. (1996): *An Introduction to the Aquatic Insects of North America*, Kendall/Hunt Publishing Company, 862pp.
- Post, D. M (2002): Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions, *Ecology* 83, pp703–718.
- Takemon, Y., Imai, Y., Kohzu, A., Nagata, T. and Ikebuchi, S. (2008): Spatial distribution patterns of allochthonous and autochthonous benthic particulate organic matter on the riverbed of a mountain stream in Kyoto, Japan, *Proceedings of Water Down Under 2008*, 2393.
- Young, S., Kovalak, W. and Del Signore, K. (1978): Distances travelled by autumn-shed leaves introduced into a woodland stream, *The American Midland Naturalist*, 100, pp217-222.

## **Studies on Management of Riverbed Geomorphology for Restoration of Reservoir Dam Impacts on Tail Water Ecosystem**

Yasuhiro TAKEMON, Kentaro NAKAI\* and Tetsuya SUMI

\* Faculty of Engineering, Kyoto University

### **Synopsis**

Reservoir dams are known to degrade the ecological functions of riverbed in the tail water reaches by intercepting sediment in the reservoir. This paper aims at finding out a target image of riverbed geomorphology to recover the ecological functions in the reaches. An ability of riverbed for retention of lentic plankton was adopted as an indicator for the ecological functions of riverbed and the contribution rate of plankton to suspended particulate organic matter was measured using the stable isotope techniques in the four dam tail water reaches different in riverbed geomorphology. The result showed that the retention efficiency was higher in the Nunome and Kumokawa River than the Kozagawa and Managawa River. Relations of the retention efficiency to the channel configuration indicated that more meandering and narrow channel with longer shoreline would increase the retention efficiency.

**Keywords:** suspended particulate organic matter, plankton, riverbed geomorphology, POM retention efficiency, carbon and nitrogen stable isotope