

水位変動によって特徴付けられるダム湖の堆砂デルタ －寒河江ダムの事例－

Sedimentation delta in dam reservoir characterized
by water level fluctuation: A case in Sagae Dam

東京工業大学 環境・社会理工学院 准教授 吉村千洋
研究第三部 上席主任研究員 一柳英隆

水位変動の大きい寒河江ダムを事例として、ダム湖における水位変動と堆砂デルタの関係をデルタの地形、土壌特性、植物群落、底生動物群集などの時空間分布の特徴に着目して明らかにした。現地調査の結果、河川とダムの接続部では水位変動に応じて堆砂プロセスが決まるため、水位に対する比高の分布、細粒土砂の重量割合、有機物含量などが水位変動と密接な関係にあることが示された。そして、植物群落や底生動物群集の調査の結果、水位変動帯ではその場の物理条件の変化と生物の生活史の両者の季節的なタイミングにより生物の分布が決まることが示された。また、このような場では水位のような物理的（直接的）影響だけでなく物質動態や他の生物相を介した（間接的）影響も生物群集に働くことが示唆された。ダムが形成する貯水池には新しい生態系が形成されており、このような生物群集の評価方法の検討もダム管理上重要である。

キーワード：水位変動帯、エコトーン、土壌特性、植物群落、底生動物群集

Focusing on Sagae Dam Reservoir characterized by large water level fluctuation, we investigated the relationship between such the fluctuation and sedimentation delta in this reservoir from viewpoints of spatial and temporal distributions of topography, soil property, and plant and benthos communities. The field survey revealed close relations of the water level fluctuation to the distribution of elevation relative to the water level, mass fraction of fine sediment, organic matter content, and other physicochemical conditions in the delta due to such fluctuation largely determining sedimentation process in the inundation area connecting the incoming river and the reservoir. The result on plant and benthos communities showed that their distributions are determined by the concurrent timing of changes both in physical condition and life cycle of organisms in the sedimentation delta. In addition, our finding implied biologically and biogeochemically mediated (indirect) effects on those distribution of biological communities, not only physical (direct) effect such as hydraulic conditions, in this environment. Overall, we confirmed that dam reservoirs create unique ecosystems at this type of interface and it is therefore important to develop effective assessment methods of such dynamic biological communities as a part of dam reservoir management.

Key words : inundation zone, ecotone, soil property, plant community, benthos community

1. はじめに

ダム貯水池の水位はダムの目的を満たすように制御されている。自然の湖沼では水位の変動幅が1m以内であることが多いが、ダム湖の場合はその幅が大きく、洪水調節を担うダムの場合、変動幅が10メートル以上になる場合が多い。ダム貯水池を湖沼生態系として理解する場合、この水位変動は最も支配的な因子であると言える。

水位の変動幅に標高がある湖岸や湖床は水位変動帯と称される。流入河川と接続するダム湖上流端には上流域から輸送される土砂が堆積するため、デルタ上の

地形が形成されることが多い。このような堆砂デルタの規模や形状は河川勾配と土砂供給量に強く依存し、堆砂量が少ない場合は河川から貯水池へ変化する場となる。そして、堆砂量が多く堆砂デルタが形成される場合には、流水部と止水部が混在する洪水氾濫原に似た環境や湿地帯が形成されることがある。このような水位変動帯では、土砂の分級効果が一般的に見られるため (Pharo and Carmack 1979; McHenry et al. 1982)、堆砂デルタには物理条件が空間的に連続的に変化する環境 (エコトーン) が形成される。

ダム・貯水池の河川への影響については、ダム下流域を対象とし、流量、水温、水質、堆積物といった物

理化学的要素だけでなく、生態学的な影響についても調査研究が多く行われている (Tanida and Takemon 1999; Poff and Hart 2002)。一方で、貯水池内の生態系や物質循環は上流域の環境条件や生態系などの影響を強く受けることが知られているものの、上流域に与えるダム・貯水池の影響は、物理的にも生態学的にも未解明な部分が多い。ダム湖上流端は主に地形、土砂、水位という3つの要因で特徴が決まり、水生植物、昆虫、両生類、魚類等の生物に適した生息場が形成されることもある。また、ダム貯水池を含めた上流域の影響には、微気象の変化、淡水魚の陸封化、水生生物群集の変化に伴う物質循環など多くのプロセスが考えられる (例えば、Argent and Kimmel 2011; Garcez et al. 2011)。よって、特に堆砂デルタの物理条件やその場に形成される生物群集を理解するためには、上流の河川生態系と貯水池の生態系を合わせて考える必要がある。

以上より、本稿ではダム湖における水位変動と堆砂デルタの関係を、水位変動の大きい寒河江ダムを事例として、デルタの地形、土壌、植物群落、底生動物群集などの時空間分布の特徴を報告する。自然環境に対するダムの影響については、下流河川が議論的になることが多いが、ダムにより創られる貯水池も湖沼生態系として多くの生物が定着おり、自然の湖沼と似ているもののダム貯水池には独特の生態系が形成されていてダムの構造や運用と密接な関係があると考えられる。このように、ダム湖を生態系として理解するために、堆砂デルタの形成過程を解明し、堆砂デルタの物理環境と生物群集や物質循環との関係を示すことが本研究の狙いである。

なお、本研究は水源地環境センターの水源地生態研究会における共同研究として実施されたものであり、その報告書および地形・土砂に関する論文 (増山ほか、2011) をダム管理者の視点を意識して再編集したものである。

2. 寒河江ダムの水位変動特性

ダム湖の堆砂デルタの形成過程や生態系を理解するために重要となる条件はダムによる水位操作である。ダム湖上流域から運ばれる土砂はダム湖と流入河川の接続部に主に堆積することが知られており、この接続部の位置は水位変動によって移動するためである。そこで、寒河江ダムの水位変動の特徴を明確にするために、全国のダムの統計データを活用して、水位変動の観点から寒河江ダムの位置づけを明らかにした。

表-1 水位変動指標のリスト (水深とは日平均水深)

変動指標	定義	単位
平均的水深を示す指標		
M1	水深の中央値 (年ごとの水深中央値の中央値)	m
M2	最低水深の中央値 (年ごとの最低水深の中央値)	m
M3	最大水深の中央値 (年ごとの最大水深の中央値)	m
水深の変動性を示す指標		
V1	水位の変動幅 (最大水位と最小水位の差、年ごとの中央値)	m
V2	月平均水位の標準偏差 (年ごとの中央値)	m
V3	水位の25%値と中央値の差 (年ごとの中央値)	m
V4	水位の75%値と中央値の差 (年ごとの中央値)	m
V8	年ごとの最低水位の標準偏差 (経年変動)	m
V9	年ごとの最大水位の標準偏差 (経年変動)	m
V10	年ごとの水位の中央値の標準偏差 (経年変動)	m
季節性を示す指標		
T1	季節性の強さ (contingency (Colwell, 1974), 0~1の値)	-
T4	月平均水深が最低の月 (中央値)	月
T5	月平均水深が最大の月 (中央値)	月

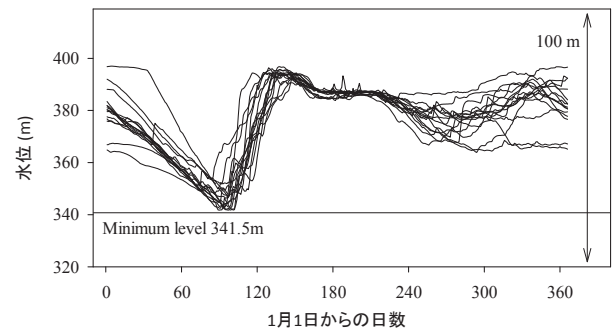


図-1 寒河江ダムの水位変動 (1993-2007年)

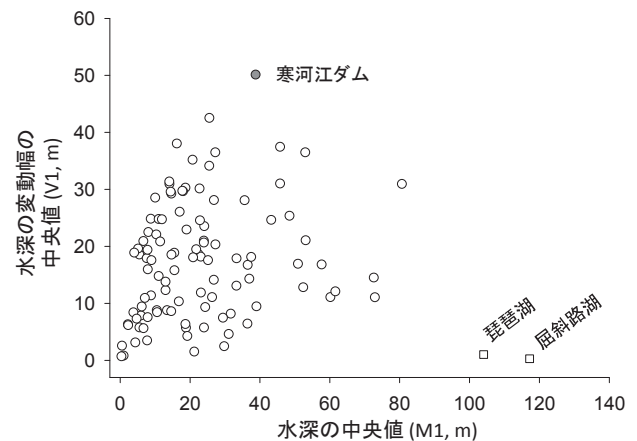


図-2 全国のダム湖【直轄】及び自然湖沼 (琵琶湖、屈斜路湖) の水深及び水位変動幅 (1998-2007年)。ダム湖の水深はダムサイトの水深で、自然湖沼は最深部の水深で整理した。

国土交通省または水資源機構が管理している国土交通省直轄の104ダムを対象として、ダム湖の基本条件、水位変動特性、水質、魚類群集に関する重要項目を用いて、寒河江ダムの位置づけを明らかにした。解析対象とした期間は1993~2007年の15年間である。日平均水深を用いて、表-1に示した合計13の水位変動指標 (表-1) を求めることでダム湖の類型化を行った。これらの指標は、平均的水深、水深の変動性、季節性に大別でき、ダム湖内および湖岸における生物の物理

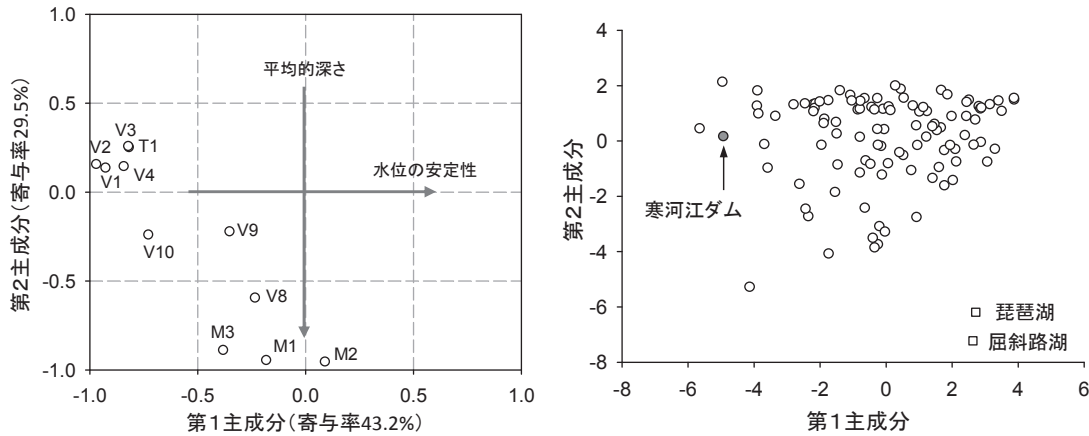


図-3 ダム水位指標を対象とした主成分分析の結果(左図. 主成分負荷量, n=106) およびダム水位指標を対象とした主成分分析の結果(右図. 主成分得点)

生息場に関する情報を数値化したものである。

対象河川の河川次数は2～6の範囲にあり、次数4の河道にあるダムが最も多く42.3%、次数5の河道にあるダムは42.3%であり、寒河江ダムは最頻値を示した次数4の河道に位置していた。対象ダムを流域面積、総貯水容量、湛水面積、平均滞留時間により整理した結果でも、寒河江ダムは平均的な特徴を示した。寒河江ダムの流域面積は231km²、総貯水容量は1.09×108m³、湛水面積は3.4km²、平均滞留時間は0.11年である。よって、ダムの位置、規模、滞留特性で評価すると、寒河江ダムは日本における一般的な貯水池と言える。

水位変動指標により整理した結果、全国のダムの平均的水深(中央値、M1)は90m以下の範囲にあり、寒河江ダムの水深は中央値で38.8mであった(図-1、図-2)。また、最高水深が寒河江ダムでは53.2mであった。調査対象としたダム湖の指標V1～V4とV8～V10によると、いずれの指標でもダム湖では自然湖沼に比べて変動性が高いことが示された。特に寒河江ダムの水位変動性は著しく、特に水位の変動幅(V1、図-2)と月平均水位の標準偏差(V2)では対象とした104ダムの中で最も高い値を示した。なお、年ごとの水位の変動性(V8～V10)は、奈良俣ダム、阿木川ダム、浦山ダムで高く、寒河江ダムと三春ダムでは経年変動が比較的小さく毎年安定的に水位が変動するダムであることも示された。

季節性を示す指標T1では、ダム湖では自然湖沼に比べて季節変動性が強く、特に寒河江ダムが豊平峡ダムと定山溪ダムに次いで季節変動性が強いことが示された。これは季節的な水位の変動パターンが明確であることを意味する。なお、寒河江ダムにおいて水位が最低となる時期は3月、最高となる時期は5月であった。

さらに、主成分分析により水位変動パターンを総合

的に評価して類型化を試みた(T4とT5は季節を示すため主成分分析には含めていない)。その結果、第1主成分が43%のダム間の水位変動特性を表しており、特に水位の変動性を示す指標や季節性の強さを示す指標の負荷量が小さかった(図-3)。つまり、第1主成分は水位の安定性を示す成分と言える。一方、第2主成分(負荷量30%)は平均的水位の大きさを示す指標(M1～M3)の負荷量の絶対値が大きいことから、絶対的な水位の小ささ(浅さ)を示すと考えられた。対象としたダムの中での寒河江ダムは、上述の個別指標での評価結果と一致する形で、主成分得点によると平均的な深さであるが水位変動性が強いことが示された(図-3)。

以上より、ダム湖の水位変動特性を13の水位変動指標により解析したところ、寒河江ダム貯水池は平均的な水深を有しているものの、季節的な水位変動幅が50m程度であり、他のダム湖と比較すると非常に変動性の大きなダムであることが示された。したがって、ダム湖の水位変動特性がダム湖上流端や湖岸の生態系に及ぼす影響、そしてダム湖と周辺森林の関係を解明するためには、寒河江ダム貯水池は調査対象として適切であると判断できた。

3. 水位変動と地形および土壌特性の関係

谷間の川筋に形成されるダム貯水池は、天然湖に比べて上下流方向に生じる1次元的な環境変化が強い(Sundborg 1967)。特に河川により土砂が流入するダム湖上流端では、勾配と流速の変化に伴い、デルタ、流水帯、遷移帯、止水帯が形成され、その流下過程において流入土砂はふるい分け作用を受けながら堆積する(Vanoni 1975; Thornton et al. 1981)。つまり、粒径の大きな土砂は上流端デルタや流水帯に堆積する

が、シルトのような細粒分は沈降速度が遅いため遷移帯や止水帯まで輸送されて堆積する。山地に設置されるダム湖では、礫などの粗粒分も含めて幅広い粒径の土砂が供給される。また、森林域では倒流木や落葉など森林由来の粒状有機物も多く供給される。有機物は鉱物に比べて密度が小さいため、河川から流入した後は細粒土砂と同様にダム湖の遷移帯まで輸送されて沈降することが多いと考えられ、平地の湖沼に比べてダム湖では流れ方向に堆積土砂の明瞭な粒径変化が生じると推測される。

よって、堆積土砂の粒径分布や土壤環境特性の空間分布を明らかにすることは、ダム湖貯水池内における化学的・生物学的プロセスを理解する上でも重要である。本章では、水位の異なる季節に現地調査を実施し、エコトーンにおける微地形や堆積土砂の物理的特性を明らかにした上で、その特性と土壤環境の関係の解明を試みた結果をまとめる。

2009年6月、8月、10月、さらに2010年10月において、ダム湖、ダム湖への流入河川（寒河江川、河川次数4）、及びその間のエコトーン（堆砂デルタの水位変動帯）で調査を行った（図-4）。2009年6月には比較的水位が高く（水位：約387m）、エコトーンの大部分が冠水していたが、2009年8月には約384mまで水位が下がったため干出部分が広がり、流入河川が二又に分かれて流れていた。2009年10月にはさらに水位が低く（水位：約372m）、ダム湖への河川の流入点が6月に比べて500m以上下流側に移動していた。2010年10月の調査時における水位は383mであり、2009年10月よりは水位が高く、干出していた下流側の中州がやや冠水

していた。エコトーンにおいて流下方向の変化を確認するために横断方向に測線を5本設定し（Line-1～5）、さらに河川横断方向の変化を調べるためにLine-1～5と直行する縦断方向にも測線（Line-A～D）を設定して地形や土壤特性を調べた（図-4）。

エコトーンの微地形を測量（2010年10月）した結果、測量対象地の upstream 端 Line-1 と downstream 端 Line-5 の水面の高低差は約3.5mであった。Line-1 から Line-5 までの水平距離は約500m（各測線間は上流から順に173m、95m、87m、148m）であったので、エコトーンでの平均勾配は約7/1000であった。二又に分かれた流れの中央の中州において Line-2 から Line-4 にかけての土壤堆積量は多く、横断測線上で見ると中州の高い地点は水面より約2m高かった。10月には Line-3 から Line-5 の中州には多くの流木が漂着しており、落枝も多く堆積していた。Line-4 や Line-5 では堆積土壌の色が黒かった。写真判定によると、堆積物の干出時間は Line-1～5 で順に71日、68日、58日、56日、53日程度であった。中州の Line-2 と Line-3 には草本が多く茂っており、他の測線上においても、エコトーンの両岸には周辺森林に連続的に変化する植生が見られた。

堆積土砂に関して、2009年6月の高水位期に調査した結果、水際に近い表層土壌の粒径分布は上流から下流にかけて大きな変化はなく、1～300 μ mの粒径の土壌が80%前後と、大半を占めていた（図-5A）。一方、水位が低下した8月及び10月は水際に近い堆積土砂の粒径に上下流方向の明確変化があり、下流側ほど粒径の細かい土壌が表層に多く堆積していた。特に10月の下流側（測線の格子点 Line-3A、Line-4' C、Line-5B）

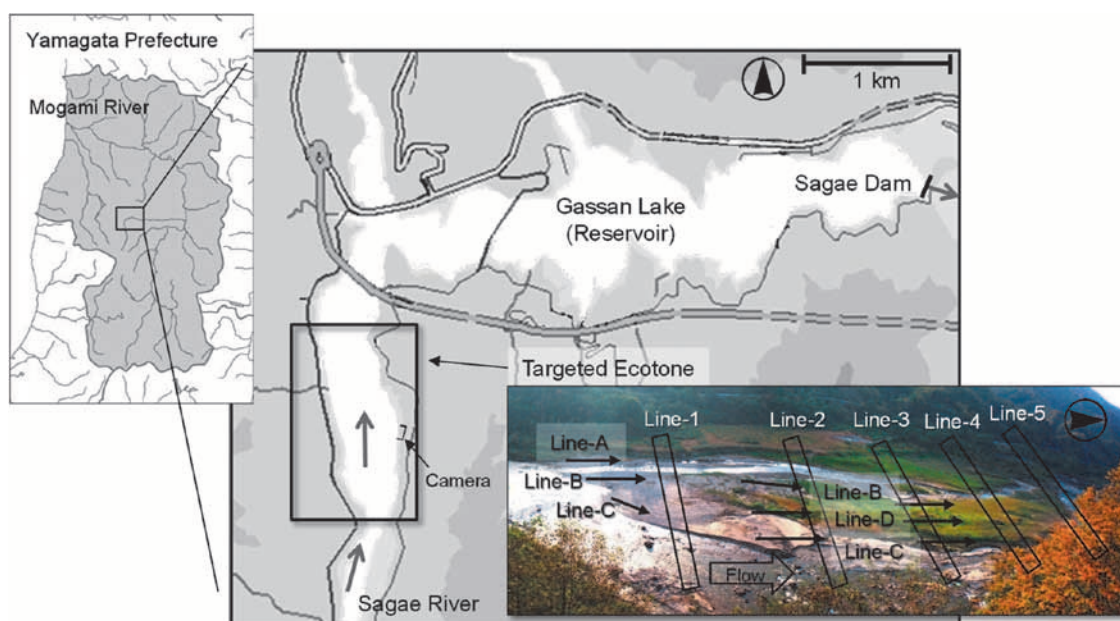


図-4 寒河江ダムの位置及び調査測線の位置（標高：約370m～約390m）

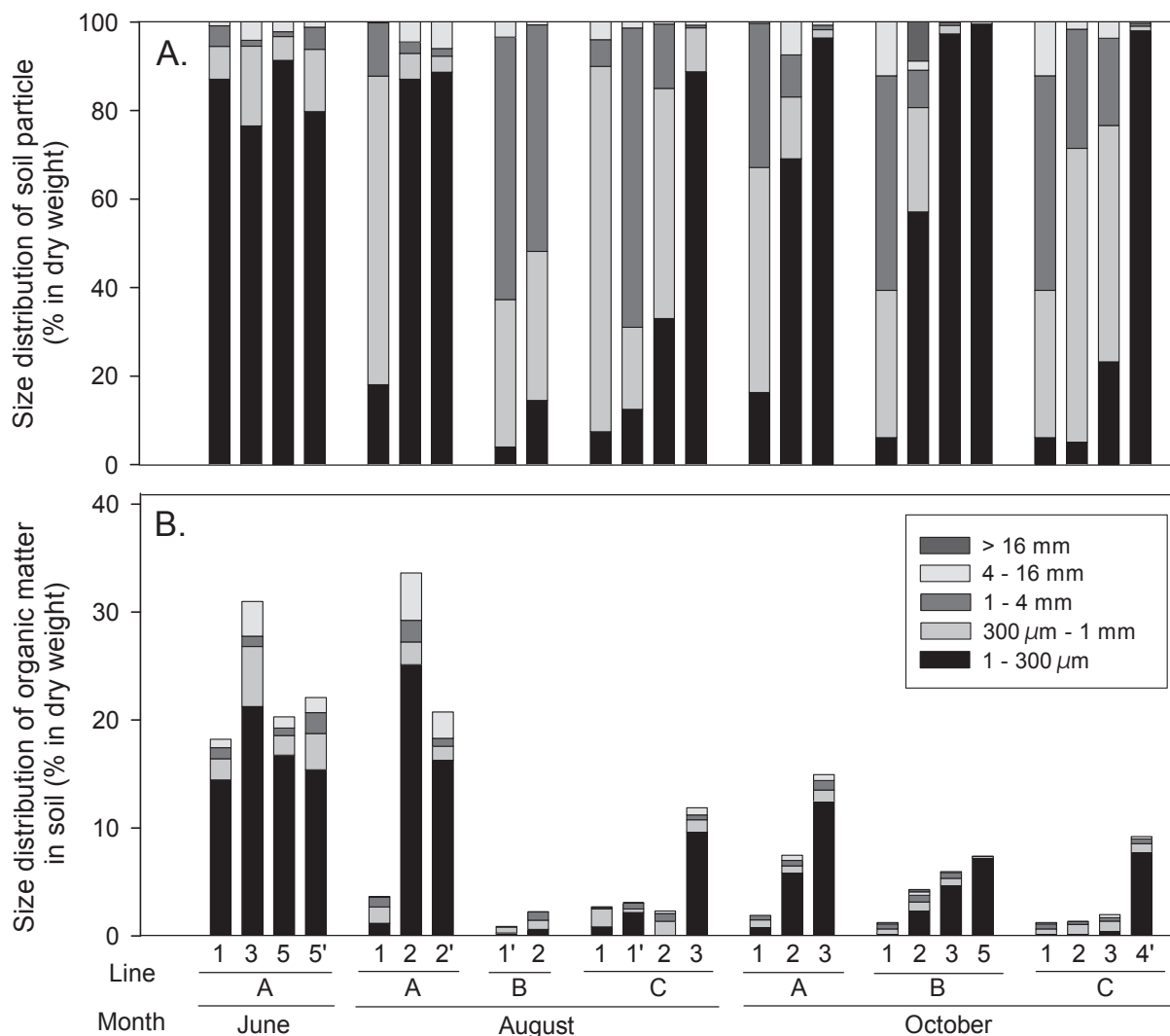


図-5 エコトーン内の表層土壌の粒径分布 (A) と有機物含有量の分布 (B) (増山ほか、2011)

表-2 測線1から5における表層水および間隙水のORP、pH及びDOC (増山ほか、2011)。間隙水を採取した深さは、Line-1で10cm、その他は30cmおよび60cmであり、スラッシュの左側が浅い間隙水、右側が深い間隙水の結果である。

Parameter		Surface water	Line-1	Line-2	Line-3	Line-4	Line-5
ORP	mV	208 - 245	227 / -	183 / -	172 / -	-19 / -35	222 / 230
Water pH	-	7.05 - 7.88	7.83 / -	7.02 / -	6.12 / -	6.68 / 6.63	6.44 / 6.46
DOC	mg/l	1.18 - 1.95	3.27 / -	3.43 / -	10.50 / -	14.38 / 17.98	6.75 / 9.10

では1～300 μ mの粒径の土壌が100%に近い割合で堆積していた。また、2010年に深度別土壌の粒径分布を調査した結果、2009年10月と同じく上流から下流にかけて細粒分が増加していた。特に表層部においてはその傾向が強く、前年の表層土壌粒径分布と同様の結果であった。最下流のLine-5においては表層から深度1mまで、1～300 μ mの粒径の土壌の割合がほぼ100%であった。

6月の表層土壌の有機物含量は粒径分布と同様に上流から下流にかけて大きな変化はなかった(図-5B)。8月および10月では、水位が低下して干出した場所で採取しており、有機物粒径にも流下方向の変化が確認できた。また、高水位期から低水位期にかけて各縦断

測線上での採取地点を水位に応じて下げて採取した結果、総有機物含量は減少傾向にあった。6月時点での細粒有機物含量(1～300 μ m)が15～20%程度、総含量では20～30%程度と概して多かったが、8月以降では8月のLine-2A及びLine-2' Aを除き、総含量が10%に達する地点はLine-3より下流側のみとなった。また、6月および8月のLine-Aでは300 μ m以上の有機物が比較的多く含まれていた。

土壌pHは上流側のLine-1ではエコトーン各地点の表流水(7.05～7.88)とほぼ同程度の7.32であり、Line-2より下流では徐々に減少し、Line-4では5.22～5.94の範囲にあった(表-2)。ただし、Line-5では5.52～6.12であり、Line-4よりやや高い値を示した。間

隙水のORPはLine-1において227 mV（深度10cm）、Line-5において222 mV（深度30cm）と230 mV（深度60cm）であり、エコトーン各地点の表流水のORP（208～245 mV）と同程度の値となった（表-2）。Line-2、3では若干低く172～183 mVであったが、Line-4では本調査で最も還元的であり、ORPは-19～-35 mVであった。また、間隙水のpHは上流側（Line-1、Line-2）において7.02～7.83の範囲にあり、エコトーン表流水のpHと同程度であった。一方でLine-3より下流側では6.12～6.68の範囲にあった。土壌間隙水のDOC濃度はLine-4までは下流ほど濃度が高くなる傾向が見られたが、Line-5は細粒有機物含量が多いにもかかわらず、DOC濃度はLine-2とLine-3の中間程度であった。

一般に、河川が流入するダム湖上流端では、勾配と流速の変化に伴い、物理的、化学的、生物的特性を異にする明瞭な三つのゾーンに分けられる。その三つのゾーンとは、流水帯（Riverine zone）、遷移帯（Transition zone）、止水帯（Lacustrine zone）であり、そのゾーンの流下過程において流入土砂がふるい分け作用を受けながら堆積することが知られている（Thornton et al. 1981）。寒河江ダム上流端エコトーンにおいても、堆積土砂の粒径分布は土砂輸送時にエコトーンが流水帯、止水帯、またその遷移帯のいずれのゾーンであったかによって説明できると考えられる（図-6）。

高水位期である6月は同年5月よりも水位が低いため、土砂採取場所は水没時に河川から輸送された土砂が堆積したと考えられる。さらにその土砂の粒径分布は流下方向に大きな変化がなかったことから、エコトーンが止水帯及び遷移帯時に輸送されてきた土砂が堆積したものであり、調査時に陸上に冠出していたと考えられる。やや水位の下がった8月においては、堆積していた土砂は流下方向に堆積物粒径の変化が現れ始めていた。流水帯における流速は河川より緩やかになるものの、ダム湖下流部と比較して速く、相当な量のシルト、粘土、有機物微粒子といった微細懸濁態粒子を運ぶ輸送力が十分にある（Gordon & Behel 1985）。そのため、8月の調査における堆積土砂はエコトーンの上流側が流水帯で、下流側が遷移帯の様相を帯びた時期に堆積したものであると示唆される。つまり、上流側に堆積していた細粒土砂は掃流され、下流側に堆積していたと考えられる。さらに低水位期である10月はその傾向がさらに顕著に現れていたため、より流水帯に近い時に輸送されてきた土砂も堆積していたといえる。図-5AのLine-1Aでは6月から10月にかけて粗粒分の割合が増加しており、流れの変化によ

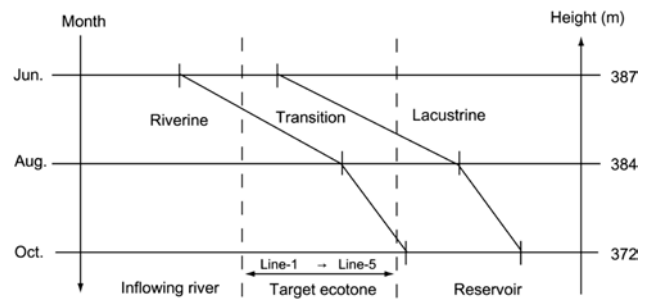


図-6 2009年6月から8月にかけてのエコトーン内の水位低下に伴う流動特性の状況変化（増山ほか、2011）

る土砂堆積過程が如実に反映されていたと考えられる。

本研究の結果より、水位変動により細粒土砂の重量割合と微細有機物含量、そして水位に対する比高が変化することが示された。また、土砂特性が土壤環境特性（土壤の含水比、土壤pH、間隙水のORP、DOC濃度）を規定し、さらに土壤中の物質動態にも影響を与えると考えられる。水位変動の大きなダム湖が水位変動の小さいダム湖と異なる重要な条件は、細粒土砂や微細有機物の堆積している底質が干出することである。もし水位変動が小さく、エコトーンが常に水没しているならば、細粒土砂や微細有機物を多く含む底質は常に嫌氣的でメタンが生成されている可能性がある。水位低下により土砂を干出させても、30cm以深の微細有機物含量の多い堆積層は、干出後50日程度でも好氣的になりにくいことも本研究で確認された。

4. 堆砂デルタの植物群落

水位変動帯に植物が生育した場合、その群落は水生・陸生生物のハビタットや食料となり得る。寒河江ダムのサーチャージ水位時の湛水面積は約344ha、最低水位時が約62haのため、約282haが冠水と干出を繰り返す面積である。常時満水位時約327haと制限水位時約240haの間でも約87haの違いがある。寒河江ダムは山間部に作られたダムで、湖岸、とくにダム堤体近くは急峻なところが多く、水位変動により冠水と干出を繰り返す面積の大部分は、堆砂デルタを含むダム湖上流端の河川流入部である。本章ではこのような水位変動帯における植物群落の分布について報告する。なお、この植物群落に関する部分は、一柳ほか（2014）を再編集したものである。

寒河江ダム河川流入部には左岸側にダム建設以前の河道外にあたる一段高い場所がある（ここを「テラス」と呼ぶ、図-7）。また、旧河川区域には、堆砂デルタを形成している。テラスや堆砂デルタの景観は、冠水

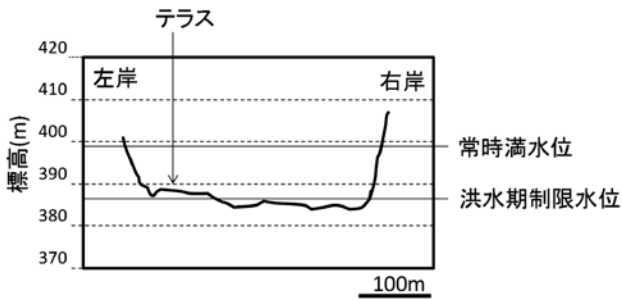


図-7 寒河江ダム湖堆積デルタ (Line 2、図-4)における横断面図(一柳ほか、2014)



図-8 ダム湖河川流入部水変動帯の季節変化 (2012年)。下写真において、黄色破線で囲んだ部分がダム建設以前には河道外だったところ、青点線が河道内に形成された堆砂デルタ。河川は左から流入し、右側がダム堤体に近い。(谷田ほか、2014)



図-9 寒河江ダム月山湖河川流入部景観の経年変化 (2009-2012年の9月下旬～10月初旬)。河川は左手前から流入する。(谷田ほか、2014)

や干出によりどのように変化するかを把握するために、右岸側のこの場所が一望できる場所に定点撮影カメラを設置し、2009～2012年の積雪がない期間(5月初旬～11月初旬)稼働させ、毎日正午に撮影し、継続観測を行った。

2012年における定点写真の抜粋を、図-8に示した。

5月には水位が高く、テラスや堆砂デルタは水面下である。水位が低下すると、まずテラスが干出するが、干出直後は枯死した草本で覆われ、テラスは茶色く見えた(6月26日)。しかし、干出直後から草本の成長が始まり、テラスは緑に覆われる(8月15日)。デルタも、水面からだと一部はすぐに緑に色づく。時間がたつと、中州もある程度の面積(とくにダム堤体に近い側)が緑になった。しかし、秋(9月22日)になっても裸地のままである場所も多かった(とくに上流側)。また、2009～2012年の定点写真(図-9)に示したように、秋のテラスはどの年も植物に覆われた。また、デルタは下流側で植生が発達するが、その面積や場所は年によってやや異なっていた。

テラスや堆砂デルタの下流側を見る限り、干出後、比較的短期間のうちに緑になった。これは水位変動帯の比較的長く冠水する場所であっても、条件さえ整えば速やかに植物は生育することを示している。しかし、ほぼ同じ冠水期間の中州において、ダム湖に近い下流側は植生が発達するものの、上流側はそうはならないことが多かった。これは主に堆積している土砂の粒度やその移動によるものであろう。先に述べたように下流側に比較的細かな粒度の土砂が堆積し、上流側は比較的粒度が粗い。植生が発達し堆積土砂の粒度は強く関係し、細かな土砂の場所では、その水分保持のために植生が発達することが多い(浅枝、2014)。実際、寒河江ダムにおいても、堆砂デルタの上流側では土壌水分量が少ない(中島拓ほか 未発表データ)。また、堆砂デルタにおいては経年的に、植生が発達する場所に違いが見られた。デルタに堆積する土砂の粒度組成は、洪水の大きさや継続時間により堆積傾向が異なり、この違いが植生への発達に影響し、年によって植生が発達する場所が異なることになると考えられる。

テラスは水没時も流心からはなれた場所にあり、砂や大きな河床材料が堆積しない。ダム建設以前の地形としての比較的固い地盤の上に、薄く比較的粒子の小さな材料や植物遺骸が乗り、土砂の流入や移動の影響を強く受けない。植物が安定的に生育するためには、このように基盤が攪乱されない条件が重要である。

テラスや堆砂デルタに生育する植物相ため、2010～2011年に調査が行われている(沼宮内信行ほか 未発表データ)。テラスではヤナギ林(ハビタットA)、草地(B)、湿地(C)の3ハビタットに、デルタでは湿地(D)および砂礫地(E)に分割し、それぞれのハビタットにおいて1m×1m～3m×3mの方形枠(コドラート)を3～5個設置し、植物相を調査した。植物相調査では、ヤナギ類などの木本が大きくなり低木層を作り、その

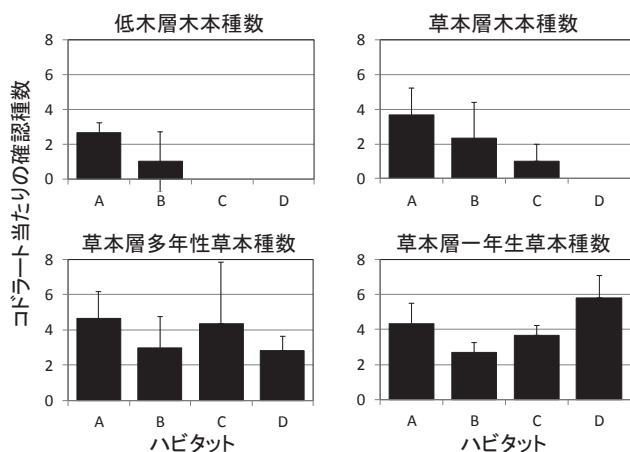


図-10 テラスと中州のコドラートごとの生活型別の植物種数(平均値±標準偏差). ハビタットAはヤナギ林, Bは草地, Cは湿地(以上テラス), Dは湿地およびEは砂礫地(以上中州). なお, ハビタットEは1種も確認されていないので, ここでは図示しなかった。(一柳ほか, 2014)

下に草本層が認められる場合は、階層を低木層と草本層の2層に分け、それぞれの階層に出現する維管束植物の種類を記録した。

ハビタットAには低木層としての木本が確認できた(図-10)。テラス(ハビタットA～C)では、草本層の中に木本(実生や稚樹)が確認できるものの、堆砂デルタ(ハビタットD)では木本が確認されない。デルタでは植生は草本のみで構成され、テラスに比べて多年生草本の種数が少なく、一年生草本が多かった。水位変動帯において、標高の低いところから、標高の高いところにかけて、一年生草本群落、多年生草本群落、木本群落というゾーンになることは、他のダムでもしばしば観察されている(例えば、菅原ほか 2002)。おもにこのゾーンは、冠水日数とそれに対する耐性の関係により決まっていると考えられるが、寒河江ダムにおいては、もう一つ、冠水日数の長い堆砂デルタの土砂移動による攪乱の影響もあるのかもしれない。

次に、生育する植物の種と、冠水日数の関係を見てみたい。これには、2001年・2002年に事業者により実施された植物調査を再集計した。調査では、テラス、堆砂デルタを含めて、横断でベルトランセクトが5本設定され、そのなかを2m×2mのコドラートに分割し、秋に陸上だった部分において2001年には410コドラート、2002年には412コドラートで植物相の調査が行われている。同時に横断測量が行われているので、標高と植物相の対応が解析可能である。このとき、標高と水位データから、それぞれの場所の冠水日数を計算し、対応させた。

種ごとに解析すると、生育している場所に違いがあった。カサスゲ *Carex dispalata*、ススキ *Miscanthus sinensis*、アゼスゲ *Carex thunbergii*、ギシギシ *Rumex*

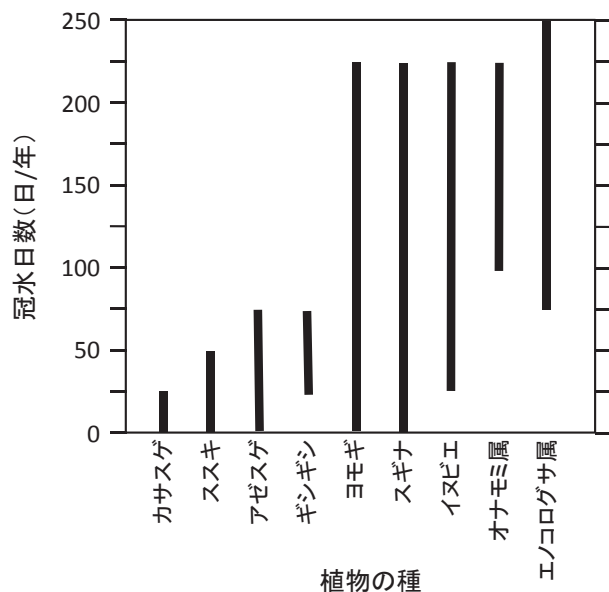


図-11 寒河江ダム水位変動帯に生育する代表的な植物と確認される冠水日数(一柳ほか, 2014)

*japonicus*は水位変動帯で多くの場所に見つかる種であるが、冠水日数が多い場所では見られない。オナモミ属 *Xanthium*、エノコログサ属 *Setaria*は、比較的冠水日数の多い場所で多くみられる。ヨモギ *Artemisia indica* var. *maximowiczii* やスギナ *Equisetum arvense*、イヌビエ *Echinochloa crus-galli*は、広範囲に観察される(図-11)。

冠水日数はダムの水位管理によってコントロールできる変数であり、今後ダム水位変動帯の植生管理を考えるうえで、冠水日数と植物群落の関係は重要な情報である。しかし、水位変動帯の植物は冠水日数にだけ依存して生育するわけではない。寒河江ダムの場合、中州の植生発達は堆積土砂の攪乱が頻繁で粒度の大きな場所を含むために、冠水日数と堆積土砂の粒度の影響が交絡している可能性が高い。今後は、これらの要因を分離していくことで、植生管理により適切な情報が得られると期待される。

5. 水位変動と底生動物群集の変化

河川が流入するダム湖上流端は流水環境と止水環境が接する地点であることから、底生動物群集は流水性の種構成から止水性の種構成へと変化するのが一般的であろう。しかし、水位操作がダム湖上流端の物理的な生息場条件に支配的な影響を与えており、底生動物群集は時空間的に変化するると推測できる。本章では水位低下時の底生動物群集の変化についてまとめる。

2009年の水位が徐々に低下する時期(6月、8月、10月)に底生動物群集を調査した。水位が381.6 mの状況下(8

月下旬の水位)で調査した結果、測線Line 1～Line 6の流速は順に116.4、16.9、15.9、4.7、<4.5 cm/sであり、堆積土砂の長径(最大から5番目までの平均)はLine 1～Line 6において順に15.8、25.2、23.8、4.8、13.8 cmであった。なお、6月はダム湖の水位が高いため、水位変動帯の測線Line 1からLine 7は水没し、止水帯となっていた。水位の低下によって止水帯と流水帯の境界は下流側へ移動し、8月には測線Line 3からLine 7、10月においては測線Line 7が止水帯であり、これ以外の測線は流水環境下にあった。また、水位変動帯の河川部に淵は見られず、この区間はすべて早瀬もしくは平瀬で構成されていた。

底生動物に関して、6月、8月および10月において、合計98種の種数を含む1209個体が同定された。その同定された個体のうち、優先種はハエ目(27種)、カゲロウ目(25種)、トビケラ目(16種)であった。なお、

流水帯ではサーバーネットによる定量調査、止水帯ではキックネットもしくはEkman-Berge dredgerによる半定量調査を実施した(調査対象とした個体サイズは0.5mm以上)。6月にはLine 1からLine 7の全ての測線が水没しており、数種のカゲロウ目を含む止水帯で典型的に見られる種が観察された。この時期の優占種は*Siphonurus*属(フタオカゲロウ科)、*Sergentia*属(ユスリカ科)、*Jesogammarus*属(キタヨコエビ科)であり、他の種に関しては1～数個体程度であった。なお、この水没された環境下では、河川からダム湖への縦断方向に明確な群集や個体密度の変化は見られていなかった(表-3)。

その後、ダム湖での水位が下がるにつれて、流水帯は広がり、底生動物群集の空間的分布が確認された。8月には6月に比べて水位が約3m下がったことで測線Line 0からLine 2には流水部が形成され、そこに

表-3 寒河江ダム上流端及び流入河川(寒河江川)における底生動物群集(0.5m²当たりの分類数、個体密度、優占種)。測線の位置については図-2を参照。優占種は個体密度に基づく。測線については図-4を参照(Line 6およびLine 7は貯水池側に設置した追加測線)。なお、この集計表では種及び属の分類のみを対象とした。また、数値に下線を引いた群集は止水域に生息しており、ndは採取していない地点を示す。

測線	6月		8月		10月	
	分類数	優占種 (個体密度)	分類数	優占種 (個体密度)	分類数	優占種 (個体密度)
Line 0	nd		33	<i>Antocha</i> sp.	22	シロハラコカゲロウ
河川部			(177)	<i>Ephemerella</i> sp. <i>Orthocladius</i> sp.	(103)	オオマダラカゲロウ <i>Rhithrogena</i> sp.
Line 1	<u>7</u> (-)	<i>Siphonurus</i> sp. <i>Sergentia</i> sp. <i>Polypedilum</i> sp.	16 (101)	シロハラコカゲロウ フタバコカゲロウ ヨシノマダラカゲロウ <i>Simulium</i> sp.	25 (142)	シロハラコカゲロウ フタモンコカゲロウ アカマダラカゲロウ
Line 1'	nd		15 (44)	ヨシノマダラカゲロウ シロハラコカゲロウ フタバコカゲロウ クシゲマダラカゲロウ <i>Rhithrogena</i> sp.	nd	
Line 2	nd		20 (53)	ヨシノマダラカゲロウ シロハラコカゲロウ <i>Polypedilum</i> sp.	26 (128)	シロハラコカゲロウ オオマダラカゲロウ <i>Antocha</i> sp.
Line 3	<u>5</u> (-)	<i>Jesogammarus</i> sp. <i>Sergentia</i> sp. <i>Microtendipes</i> sp.	<u>5</u> (16)	<i>Polypedilum</i> sp. <i>Chironomus</i> sp. <i>Paratanytarsus</i> sp.	21 (75)	オオマダラカゲロウ シロハラコカゲロウ <i>Simulium</i> sp.
Line 5	<u>4</u> (-)	<i>Sergentia</i> sp. <i>Siphonurus</i> sp. <i>Arctoconopa</i> sp. <i>Zavrelimyia</i> sp.	nd		14 (55)	シロハラコカゲロウ フタモンコカゲロウ <i>Rhithrogena</i> sp.
Line 6	<u>6</u> (-)	ヌカエビ <i>Sergentia</i> sp. <i>Zavrelimyia</i> sp. <i>Jesogammarus</i> sp.	nd		24 (126)	シロハラコカゲロウ オオマダラカゲロウ <i>Limnodrilus</i> sp.
Line 7	nd		nd		<u>2</u>	<i>Limnodrilus</i> sp.

は流水部に生息しているカゲロウが見られた(表-3)。この流水部で優占していた底生動物はシロハラコカゲロウ、フタバコカゲロウ、ヨシノマダラカゲロウ、*Antocha*属(ガガンボ科)、*Orthocladius*属(ユスリカ科)、ミドリカワゲラ科の一種であった。この時期、測線Line 5は止水部であったが、この止水部にはカゲロウは見られず、ユスリカ科が優占していた(*Polypedilum*属、*Chironomus*属、*Paratanytarsus*属など)。8月に最も分類数が多かったのは測線Line 0であり(33分類/0.5m²)、最も少なかったは測線Line 3であった(5分類/0.5m²)。よって、堆砂デルタ全体では、底生動物の種数と個体密度は下流方向に減少する傾向が明らかに見られた。10月は測線Line 0～Line 6が流水部となり、8月と同様にカゲロウが多く観察され、優占種はシロハラコカゲロウ、ヨシノマダラカゲロウ、フタモンコカゲロウ、*Rhithrogena*属(ヒラタカゲロウ科)であった。カゲロウに加えて、優占的ではないものの、ナカハラシマトビケラ、チャバネヒゲナガカワトビケラ、ヒゲナガカワトビケラなどのトビケラも確認された。この時期には測線Line 2で分類数が最も多く(26分類)、Line 1で個体密度が最も高かった(142個体/0.5m²)。ただし、表-3にまとめたように、8月には底生動物の空間的な変化が確認されたが、10月は種数とその密度の両者に関して、空間的な傾向が見られなかった。

調査結果を月別に比べてみると、寒河江ダムの堆砂デルタでは6月よりも8月と10月に流水性の種が多かった。この変化は明らかに水理条件の変化により生じたものであり、調査日以前の水位情報とも関連があると考えられる。既往の研究から、干ばつおよび洪水後の底生動物群集の回復は、上流域に生息する群集と個体ごとの流下プロセス(分散)に依存することが示されている(例えば、Gore 1979; Gore 1982; Minshall et al. 1983)。寒河江ダム堆砂デルタの場合、調査期間内の水位変動幅は3.5m程度であり、対象デルタが流水条件に変わる期間は8月のサンプリング時で2週間未満であった。よって、貯水池の水位が下がり、デルタの水域が止水から流水に変わるときに、高水位時に堆積した微細な堆積物は2週間以内に貯水池に流失したと考えられる。さらに、上流に位置する測線状(Line 1)では底生動物が河川からデルタに移動できる期間が、下流部(例えば測線Line 3)よりも長かった。このように堆砂デルタの地形と水位変動パターンが、底生動物群集の構造と個体密度の両者において、10月よりも8月の方が明確に流下方向の差異を示した主因と考えられる(表-3)。

以上の結果を整理すると、8月には河川に生息していた底生動物が2週間以内に堆砂デルタに移動してきたことを意味する。このことは掘潜性および匍匐型の底生動物種で明らかで、例えばヨシノマダラカゲロウやユスリカ科の数種がデルタ状の測線で確認されている。貯水池の水位は8月の調査日までの30日間で3.15m低下していた。この水位低下と平均流下方向勾配(7/1000)を考慮すると、底生動物群集の調査結果から堆砂デルタ上に形成された流水部では一部の底生動物の移動速度は約15m/日だったことを意味する。つまり、底生動物の中でも、デルタの上流部で確認されたヤマトビケラ属、*Antocha*属、*Simulium*属、チャバネヒゲナガカワトビケラなどの移動速度が15m/日程度であったことを意味する。このように堆砂デルタは人工的に制御されている環境であるが、流水部における底生動物群集の調査から、底生動物の移動に関する知見が得られることは興味深い。

なお、8月および10月の両時期で止水帯(8月は測線Line 3、10月は測線Line 7)では流水部に比べて種数が少なかった(表-3)。止水帯の群集ではユスリカ科(*Chironomus*属、*Polypedilum*属)、オヨギミミズ科、イトミミズ科の個体が大半を占めた。よって、概して流水部では止水部に比べて底生動物の種多様性と個体密度が高く、このパターンは他の研究報告でも見られることから流水部と止水部の接点における一般的なパターンと考えられる(Johnson et al. 2004)。

底生動物の生活史も、8月と10月の群集の違いを理解する上で不可欠であろう。たとえば寒河江ダム上流端の場合は、測線Line 0において、8月に優占していた掘潜型および匍匐型の種が、10月には遊泳型および造網型の種に変化しており、この群集構成の変化は季節の違いによるものであろう(図-12)。この結果は生活史と貯水池水位の相互作用が堆砂デルタにおける底生動物の流下方向の分布に影響することを示唆している。つまり、堆砂デルタにおける底生動物の移動は、貯水池の水位が同じように変化するとしても、季節によって下流方向への分散パターンが異なると考えられる。これはMackay (1992)の研究でも報告されており、底生動物の分布に関して移動性と生活史の両者が重要であることを示している。

また、底生動物や餌資源の炭素・窒素安定同位体比を分析した結果、底生動物の優占種の主要な餌資源が推定され、その空間的な変化が示唆された。6～10月の期間において、隣接した森林、堆砂デルタ、河床で採取された微細有機物の $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ はそれぞれ-27.8～-26.7‰、-1.3～0.3‰の範囲にあった(図-13)。

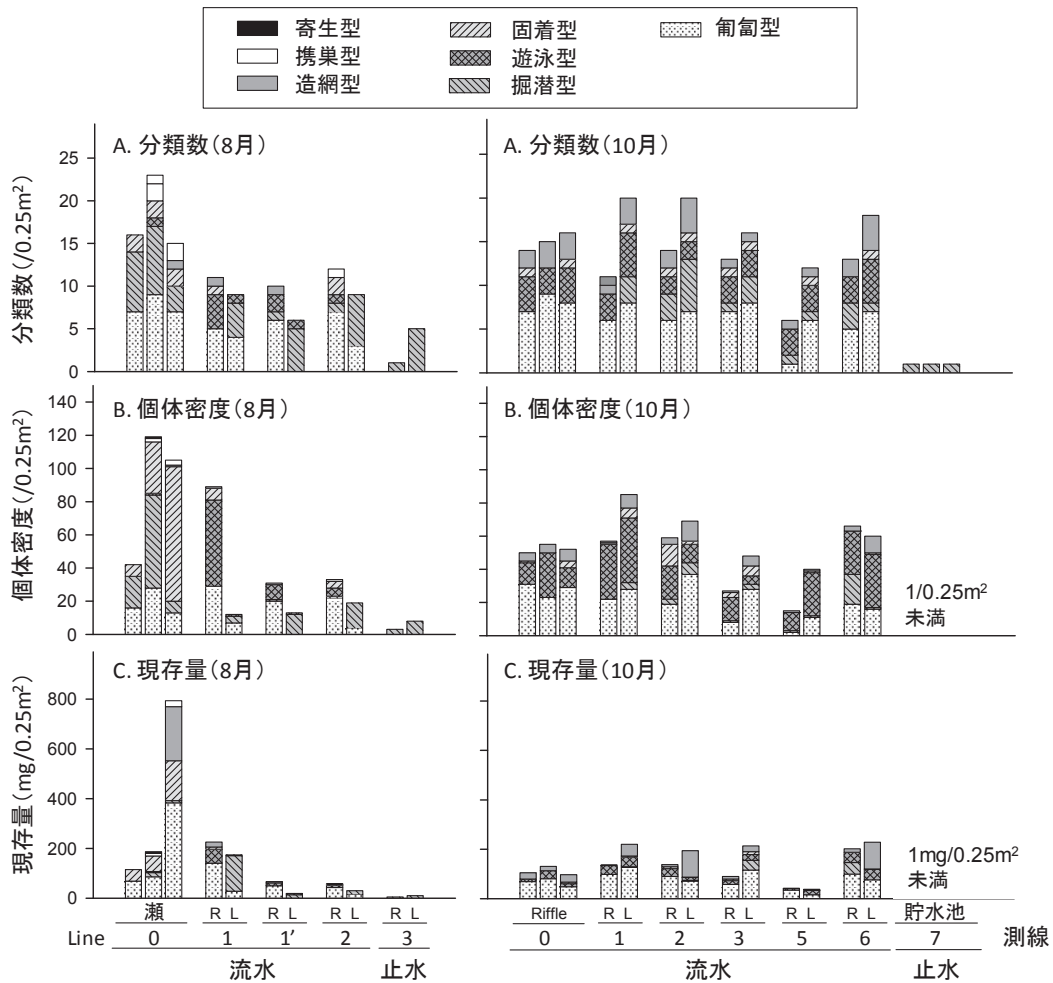


図-12 底生動物群集の各生活型の構成及びその時空間変化 (A:種類数、B:個体密度、C:現存量 (湿重量)、いずれも0.25m²あたり) R及びLは水位変動帯に形成された二つの流れのうち、右岸側の流れと左岸側の流れを示す。

河川で採取された落葉および落枝の微細有機物の範囲よりも低く、 $\delta^{13}\text{C}$ で-29.4 ~ -28.5‰、 $\delta^{15}\text{N}$ で-4.3 ~ -3.7‰だった。対照的に、植物プランクトン、河床生物膜、草本を含めた一次生産者は大きな季節変化を示した。図-13に示したように、ダム湖の植物プランクトンは6 ~ 8月の期間で-26.5‰ ($\delta^{13}\text{C}$)、-1.6‰ ($\delta^{15}\text{N}$)、8 ~ 10月の期間では-26.8‰ ($\delta^{13}\text{C}$)、0.3‰ ($\delta^{15}\text{N}$)となっていた。水位変動帯の河川で採取された生物膜は6 ~ 8月にかけて-24.6‰ ($\delta^{13}\text{C}$)、0.3‰ ($\delta^{15}\text{N}$)であり、8 ~ 10月にかけては-20.8‰ ($\delta^{13}\text{C}$)、0.6‰ ($\delta^{15}\text{N}$)であった。

8月の底生動物の同位体比は-23.2‰ ($\delta^{13}\text{C}$)、0.26‰ ($\delta^{15}\text{N}$)より高い値を示した(図-13)。これらの値は測線ごとに特徴的な傾向はみられなかったが、餌資源より高い値を示した。多くの個体の同位体比を計測できた測線Line 0ではヘビトンボの同位体比は-19.5‰ ($\delta^{13}\text{C}$)、4.3‰ ($\delta^{15}\text{N}$)であり、すべての生物の中で最も高い値だった。ほとんどのトビケラとカゲロウはこの捕食者と生産者の間の値を示した。そして、10月の底生動物は、Line 0とLine 1では8月の安定同

位体比と同様の範囲にあった。その範囲は、 $\delta^{13}\text{C}$ で-22.7から-15.0‰であり、 $\delta^{15}\text{N}$ で3.9から0.0‰となり、生物膜の値(-20.8‰、0.6‰)と同程度であった。比較的大きな $\delta^{15}\text{N}$ を示したのは測線Line 0の底生動物であり、ミドリカワゲラ科(3.4%)、シノビアミメカワゲラ(2.7%)、ナカハラシマトビケラ(2.7%)、測線Line 1ではアミメカワゲラ科(3.9%)およびミドリカワゲラ科(3.5%)であった。

栄養段階が1つ増加すると、一般的に安定同位体比は炭素で0.4‰、窒素で3.4‰増加することが知られている(Post 2002)。このことを踏まえると、底生動物の安定同位体比はその主たる食物源が河床生物膜もしくはデトリタスであったことを示している。河床生物膜は両期間における有機炭素源の中でも $\delta^{13}\text{C}$ が高く(6月~8月-24.6‰、8月~10月-20.8‰)、10月の下流域(測線Line 3~Line 6)以外では、ほとんどの個体で生物膜よりも高い $\delta^{13}\text{C}$ を示した。寒河江川はダム貯水池地点で4次河川であり、水路幅は基本流量時で30m ~ 50mあることから、河川水中での一次生産が底生群集にとって重要な餌資源である。さらに、寒河

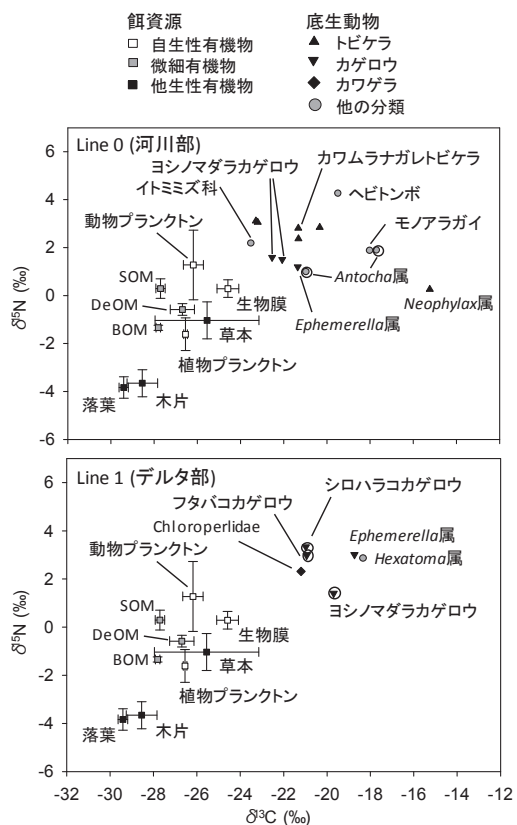


図-13 各測線における主な底生動物と餌資源の炭素・窒素安定同位体比 (2009年8月)。誤差バーは標準誤差を示し、○を付した種は優占種である。

江川の上流域には貯水池がなく、堆砂デルタには他生性有機物が相当量蓄積されているものの、落葉や木片の同位体比は底生動物との差が窒素で4.0‰、炭素で3.0‰を超えたため、落葉や木片の利用度は低いことが示された。

ただし、河床生物膜の相対的重要性は8月と10月で異なっていた。たとえば、カゲロウや貧毛類等の優占種は $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ の値が河床生物膜よりも低く、餌資源が時期によって異なることが示されており、 $\delta^{15}\text{N}$ の値に基づくと自生性の餌資源から水辺草本由来の有機堆積物へと餌資源が変化している可能性が示された。このような食物網構造は、貯水池内の水位変動や水の流れに関係している可能性がある。ただし、堆砂デルタ上の河岸植生から水中の底生動物への物質変換経路については、更なる調査研究が必要である。

また、10月において測線Line 5とLine 6は河川と貯水池間の混合領域内にあり、そこでは特定の有機物が河床に堆積しやすく、プランクトンが貯水池から供給されて堆積する可能性もある。河床上の流速は河床生物膜の安定同位対比 ($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$) を変える1つの要因であることが知られている (Finlay et al. 1999; Trudeau and Rasmussen 2003)。本調査では生物膜の同位体比に関する空間分布を把握していないが、底

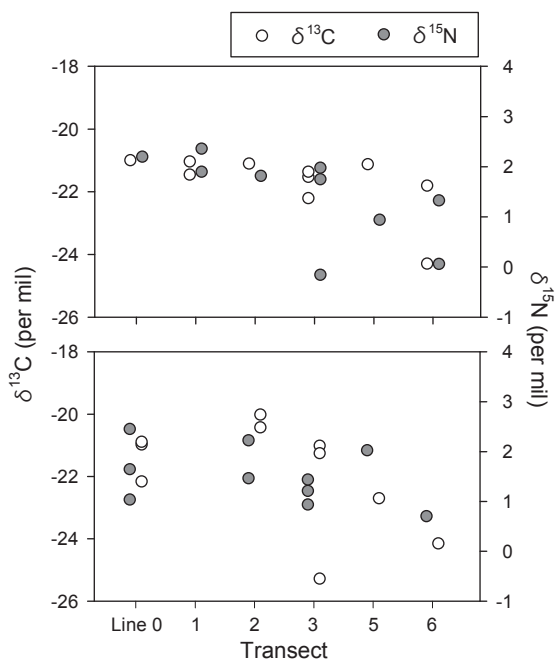


図-14 シロハラコカゲロウ (A) と *Rhithrogena* 属 (B) の同位体比の流下方向変化 (2009年10月)

生動物の分析結果は、河川部の流速が低いと河床生物膜の安定同位対比 ($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$) が低くなっており、これは既往の研究報告と逆の傾向であった (図-14)。したがって、シロハラコカゲロウや *Rhithrogena* 属の同位体比が河川と貯水池の接点で減少していたことは、このような種が河床生物膜ではなく、水辺草本から供給された有機物に依存していることを支持する結果である。ただし、カゲロウ目は一般に移動性が高いため、同位体比の変化を説明する明確な証拠は得られていない。測線Line 3～Line 6での動物相の同位体特性の変化は、調査日以前に生じている40日間に及んだ貯水池の低水位も重要であると推測できるため、底生動物の移動パターンと食物網構造を合わせて検討することが重要となる。

6. おわりに

本稿ではダム湖における水位変動と堆砂デルタの関係を、水位変動の大きい寒河江ダムを事例として、現地調査の結果に基づきまとめた。自然環境に対するダムの影響については、下流河川が議論的になることが多いが、ダムにより創られる貯水池も湖沼生態系として多くの生物が定着おり、自然の湖沼と似ているもののダム貯水池には独特の生態系が形成されていてダムの構造や運用と密接な関係があることが示された。

植物群落や底生動物群集に関して考察したように、水位変動帯ではその場の物理条件の変化と生物の生活

史の季節的なタイミングにより生物の分布が決まっているのだろう。つまり、水位変動のタイミングが変わることで、その場に定着する種構成が大きく変化する可能性がある。さらに、河川から貯水池への移行帯（主に水位変動帯）における生物群集を理解するには、物理的（直接的）影響だけでなく物質動態や他の生物相を介した（間接的）影響も存在することが推測された。ここに示した結果は、河川と貯水池の接点である堆砂デルタが餌資源の比較的豊富な独特な生息環境であり、堆砂デルタ上の草本から河川の底生動物群集へのエネルギー経路の存在も示唆している。ただし、このプロセスは仮説の域に留まっており、更なる調査研究が求められる。また、集水域での出水により河川の底生動物が貯水池へと流されるプロセスがあることから、河川もしくは堆砂デルタの底生動物が貯水池の魚類群集などの上位の生物相の餌資源となっている可能性も十分に考えられる。

水位変動帯という場合はダム湖の中でも陸域や上流河川との接続部であることから、周辺生態系と密接な関係にあることが予測される。しかしながら、水位変動帯における生物群集に関する調査例は限られているため、ダム湖上流端における自然条件や人為的なダム運用と生物群集の複合的な関係については更なる解明が期待されている。ダム運用の主な目的は下流域を対象とした治水や利水などであるが、ダムが形成する貯水池には新しい生態系が形成されており、ダムが通常50年以上運用されることを考えると、新たに形成される生物群集をどのように評価、管理、保全していくかという視点での検討も重要となるだろう。

謝辞

本研究は水源環境センターの水源生態研究会の支援を受けて実施しました。特に周辺森林グループの皆様、また調査時に東京工業大学の学生であった増山貴明氏、伊藤潤氏、大谷絵利佳氏には感謝申し上げます。

参考文献

- Argent DG & Kimmel WG (2011) Influence of navigational lock and dam structures on adjacent fish communities in a major river system. *River Res. Appl.* 27: 1325-1333.
- 浅枝隆 (2014) 流入量の変動と地形植生形成。「ダムと環境の科学 III エコトーンと環境創出」(谷田一三・江崎保男・一柳英隆編) pp.21-34. 京都大学学術出版会.
- Finlay JC, Power ME & Cabana G (1999) Effects of water velocity on algal carbon isotope ratios: Implications for river food web studies. *Limnol Oceanogr* 44: 1198-1203.
- Garcez R, Calcagnotto D & De Almeida-Toledo LF (2011) Population structure of the migratory fish *Prochilodus lineatus* (Characiformes) from Rio Grande basin (Brazil), an area fragmented by dams. *Aquat Conserv: Mar Freshwat Ecosyst* 21: 268-275.
- Gordon, J. A. & R. M. Behel II (1985) Suspended sediment characteristics of Lake Cumberland, Kentucky. 259-264. In *Proc. N. Am. Lake Mgt. Soc.* 1984.
- Gore JA (1979) Patterns of initial benthic recolonization of a reclaimed coal strip-mined river channel. *Can J Zool* 57: 2429-2439.
- Gore JA (1982) Benthic invertebrate colonization: source distance effects on community composition. *Hydrobiologia* 94: 183-193.
- 一柳英隆, 沼宮内信之, 沖津二郎 (2014) 水位変動帯の草本植物: 寒河江ダムを中心に、「ダムと環境の科学 III エコトーンと環境創出」(谷田一三・江崎保男・一柳英隆編) pp.41-61. 京都大学学術出版会.
- Johnson RK, Goedkoop W & Sandin L (2004) Spatial scale and ecological relationships between the macroinvertebrate communities of stony habitats of streams and lakes. *Freshwat Biol* 49: 1179-1194.
- Mackay RJ (1992) Colonization by lotic macroinvertebrates: A review of processes and patterns. *Can J Fish Aquat Sci* 49: 617-628.
- 増山貴明, 吉村千洋, 藤井学, 伊藤潤, 大谷絵利佳 (2011) 寒河江ダム貯水池と流入河川のエコトーンにおける堆積土砂と土壤環境特性の空間分布. *応用生態工学* 14: 103-114.
- McHenry, J. R., C. M. Cooper & J. C. Ritchie (1982) Sedimentation in Wolf Lake, lower Yazoo river basin, Mississippi. *Freshwat. Ecol.* 1: 547-558.
- Minshall GW, Andrews DA & Manuel-Faler CY (1983) Application of island biogeographic theory to streams: macroinvertebrate recolonization of the Teton River, Idaho. (ed. Bernes JR & Minshall GW), pp. 279-297, *Stream ecology: application and testing of general ecological theory.* Plenum, New York
- Pharo, C. H. & E. C. Carmack. (1979) Sedimentation processes in a short residence-time intermontane lake. Kamloops Lake. *British Columbia. Sedimentology* 26: 523-541.
- Poff NL & Hart DD (2002) How dams vary and why it matters for the emerging science of dam removal. *BioScience* 52: 659-668.
- Post DM (2002) Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions. *Ecology* 83: 703-718.
- 菅原亀悦, 竹原明秀, 北上川ダム統合管理事務所 (2002) 湯田ダム湛水地域の植物群落. 北上川ダム統合管理資料.
- Sundborg, A. (1967) Some aspects of fluvial sediments and fluvial morphology I. General views and graphic methods. *Geografiska Annal.* 49A: 333-343.
- 谷田一三, 江崎保男, 一柳英隆編 (2014) ダムと環境の科学 III エコトーンと環境創出. 京都大学学術出版会. 352pp.
- 谷田一三, 竹門康弘 (1999) ダムが河川の底生生物へ与える影響. *応用生態工学* 2 (2) :153-164.
- Thornton, K. W., R. H. Kennedy, J. H. Carrol, W. W. Walker, R. C. Gunkel & S. Ashby (1981) Reservoir sedimentation and water quality-A heuristic model.

Proceedings of the symposium on surface water impoundments (ed. H. G. Stefan) , pp. 654-661. Amer. Soc. Civil Engr., New York, NY.

22) Trudeau V & Rasmussen JB (2003) The effect of water velocity on stable carbon and nitrogen isotope signatures of periphyton. *Limnol Oceanogr* 48: 2194-2199.

23) Vanoni, V. A., ed. (1975) *Sedimentation engineering*. Amer. Soc. Civil Engr. New York.