

ダム下流に出現する付着藻類群集に与える 自然河川中の溶存有機物の影響について

EFFECTS OF DISSOLVED ORGANIC SUBSTANCES IN NATURAL RIVER ON
PERIPHYTON ASSEMBLAGES AT DOWNSTREAM OF DAM

藤野 毅¹・カヤディスラウィ²・高橋陽一³・浅枝 隆⁴

Takeshi FUJINO, Karyadi SURAWI, Yoichi TAKAHASHI, and Takashi ASAEDA

¹正会員 工博 埼玉大学准教授 大学院理工学研究科 (〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255)

²非会員 埼玉大学大学院生 大学院理工学研究科 (〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255)

³正会員 工学士 独立行政法人水資源機構 (〒330-6008 さいたま市中央区新都心11-2)

⁴正会員 工博 埼玉大学教授 大学院理工学研究科 (〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255)

This topic presents the effect of dissolved organic matter on periphyton growth and richness under unpolluted natural river water at both upstream and downstream of the Dam in Japan. Humic acid or fulvic acid as the main components of DOM was thought to be recalcitrant. But, recent research has suggested that they have many roles in aquatic ecosystems, for example, influencing light penetration such as filtering UV-B radiation, providing substrates for microbial growth, altering rates of primary production although still mechanism is unknown. With abundance of phytoplankton drift from the dam, periphyton community was increased at the downstream of dam compared with the upstream or other low DOM stream. Although the detail experiments would be requested, the results suggest that the natural humic or fulvic substances has a indirect role of growth of periphyton. This kind of monitoring should be done in the long periods.

Key Words : *Periphyton abundance, Dissolved organic matter, Dam, UV-B radiation*

1. はじめに

河川の付着藻類の出現、増加とその分布に与える直接的な要因は光、温度、流況、基盤特性、出水による剥離、水質、および捕食など多くあり、その機構は複雑である¹⁾。ダム直下付近ではこれら多くの条件が上流とは異なるため、出現種や現存量が急変し、それが河川生態系の中で一次生産としての役割を持っていることから系全体に影響を及ぼす。ここで、これまでに環境評価および将来予測のために付着藻類の現存量を予測するモデルが多く提案されているが、それらはまず外部の物理環境が支配し、加えて水質に関しては主要な栄養塩である窒素およびリンに着目して律速段階が藻類の生長を支配すると考えられている^{2,3)}。

また、ダムが建設されることによって、枯れ葉や土壌由来の粒状有機物が内部でトラップされる一方、プランクトンの内部生産が増大してそれが流下することから、ダム下流は無機物だけでなく有機物輸送に関して質および量も異なる⁴⁾。これらの流下有機物は栄養塩とともに河床表面を基質としてバイオフィーム形成の元となるため、付着藻類の出現および増殖に多大に影響する。これ

まで、藻類の枯死によって溶存物質が有機物が発生することが知られており、直接的には藻類自身が溶存有機物を吸収することは明確に記されていないものの、近年では、自然由来の様々な溶存態有機物がバイオフィームに吸収され、それが藻類の増殖にも寄与することが報告されている⁵⁾。人為負荷の無い河川では、濃度は低いものの、フミン酸やフルボ酸などの難分解性溶存有機物が主体成分であり、ダム湖内では光、特に紫外線を吸収することなど複雑な物理化学的挙動をもたらす⁶⁾。しかも、その紫外線量はオゾン層の破壊が進み、今後も増大する傾向にあること、また、大気中の二酸化炭素濃度の増加と合わせて、複合的な作用によって水圏環境中の炭素収支に大きな変化をもたらすであろうと予見されている⁷⁾。

以上の背景のもと、本研究は、完成して現在も試験湛水期間中のダム上下流を主な対象として、付着藻類の出現種や現存量の違いに関して新たな知見を得ることを目的に調査を行った。初期の段階として、現地で採取した流下有機物の質の違いを調べ、さらに各場所で溶存有機物の濃度や質が変化しているのかどうかを比較分析し、これまでに生態学的には不応性の物質として扱われていたフミン質が付着藻類の増殖に寄与するかどうかについて考察した。

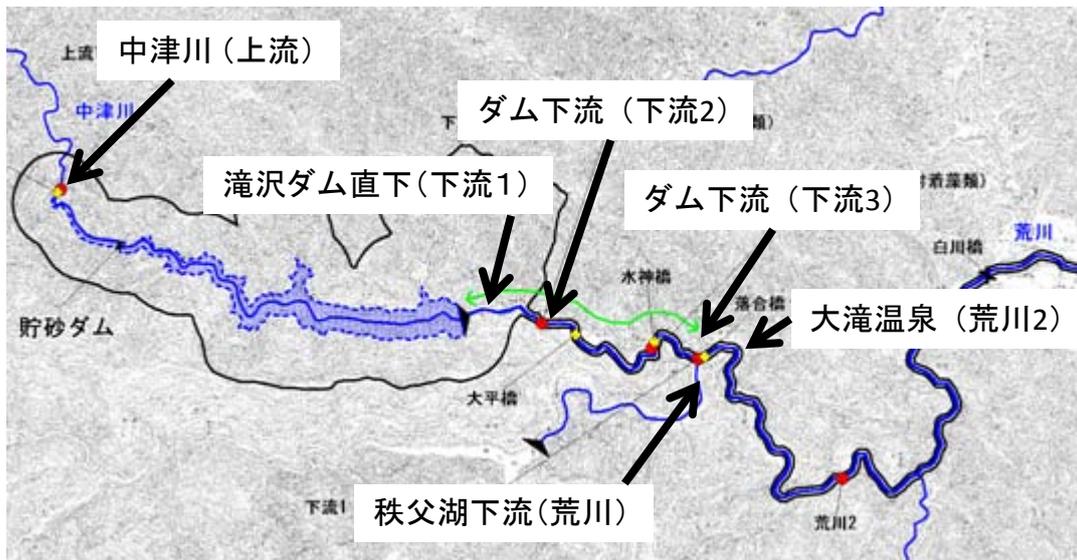


図-1 調査地点(埼玉県秩父市大滝 滝沢ダム周辺, 原図は参考文献8)を引用)

2. 現地に出現した付着藻類種のこれまでの知見

独立行政法人水資源機構滝沢ダム建設所(現荒川ダム総合事業所)による自然環境調査の一環として、滝沢ダム上下流を対象に、試験湛水前の2004年秋季から試験湛水中の2007年夏季にかけて、全11回にわたる付着藻類のサンプリングが実施されている⁸⁾。この調査によれば、2005年10月の試験湛水前までは*Achnanthes convergens*や*Nitzschia dissipata*等の好清水性とされる珪藻類が見られたが、試験湛水後はダム下流で*Achnanthes minutissima*、*Achnanthes pyrenaica*などの珪藻類が継続的に優占したと記されている。これらは上流にも出現していたが、細胞数が下流で10倍以上も多かった。また、糸状性緑藻類として*Cladophora glomerata*が繁茂していることが記されている。確認種数は、試験湛水前の数階の調査で3綱(藍藻、珪藻、緑藻)4目14科67種(73タクサ)であったのに対し、試験湛水中は3綱4目17科83種(94タクサ)と報告されている。ここで、試験湛水前にも*Achnanthes minutissima*は出現しており、細胞数の規模もすでに異なっていた。このダム工事では、試験湛水前はバイパスによって下流の流量が維持されているが、河床の礫サイズ分布はすでに異なっており、下流は比較的サイズが大きい安定した礫で占められていることや、試験湛水中は放流水温が2℃から7℃も高かったことがすでに影響したことが考えられる。なお、ほぼ同時期に行った独自の調査によって⁹⁾、付着藻類の現存量のピークはダムの上下流ともに秋から冬の流量が安定する時期に最大値を記録することを確認した。2008年4月以降、試験湛水が一旦終了したため、ダム上下流で大きな温度差が解消されている。

3. 滝沢ダム上下流における流下有機物の分析

2章で得られた知見を踏まえて、2008年7月より滝沢ダム上下流周辺において流下物、水質、および付着藻類に関する予備調査を実施した(図-1)。しかしながら8月末まで局所的集中豪雨を繰り返す、流況は安定せず、評価に値するデータが得られず、ここでは9月8日以降の比較的晴天が多く流量も安定した時期に行った調査について記す。

(1) 粒状有機物の採取と分析

粒状有機物は径30cm、メッシュサイズ100 μ mのプランクトンネットを河川中に設置することにより粒状有機物を採取し、ふるいによって1mm以上の粗粒状有機物と1mm以下の細粒状有機物に分けた¹⁰⁾。ここでは、細粒状有機物のみに着目し、強熱減量、炭素・窒素含有量をCHNコーダーで分析した。さらに、ダム上下流で有機物の成分にどのような違いが生じているかを把握するため、リグニン(試料1gに対して72%硫酸で静置後3%濃度で4時間110℃で加熱還流、炭水化物を取り除き、残重量を算出)やアミノ酸含有量(6N塩酸で16時間加水分解した後、Na型アミノ酸分析カラムを用いてHPLCにより16種を抽出)を分析した。

(2) 溶存有機物および無機イオンの分析

図-1に示す各地点で採水し、0.7 μ m径のガラス繊維濾紙(Whatman GF/F)によって濾過後、全有機炭素量(TOC5000-A, Shimadzu)と紫外線吸光度(UVmini-1240, Shimadzu)を測定した。さらに、水中のフルボ酸様蛍光強度を三次元励起蛍光分光光度法¹¹⁾により分析した。無機イオンの分析は、NO₃⁻-NおよびPO₄⁻-P濃度を流路型自動化学分析装置(オートアナライザー、ビーエルテッ

表-1 各調査地点の基礎水質および無機態イオン濃度

地点	TOC(mgC/L)		紫外線吸光度(U ₂₅₄ /cm)		フルボ酸様蛍光相対強度	pH		NO ₃ -N(mg/L)		PO ₄ -P(mg/L)		SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)
	9月8日	19日	9月8日	19日		9月8日	19日	9月8日	19日	9月8日	19日		
中津川(上流)	0.68	0.94	0.015	0.011	0.152	8.50	8.43	-	0.612	-	0.005	>40	23.8
ダム直下(下流1)	0.81	1.06	0.015	0.014	0.155	8.25	8.23	0.540	0.673	0.001	0.001	37.7	24.7
ダム下流(下流2)	0.78	1.01	0.017	0.016	-	7.74	8.22	-	0.778	-	0.002	29.1	24.2
ダム下流(下流3)	0.85	1.03	0.013	0.015	0.192	7.65	8.34	0.660	0.698	0.001	0.003	35.9	23.7
秩父湖下流(荒川)	0.56	0.58	0.007	0.010	0.099	7.70	8.18	-	0.642	-	0.004	5.4	10.1
大滝温泉(荒川2)	0.76	0.79	0.012	0.017	0.169	7.67	8.66	-	0.758	-	0.004	23.4	22.4

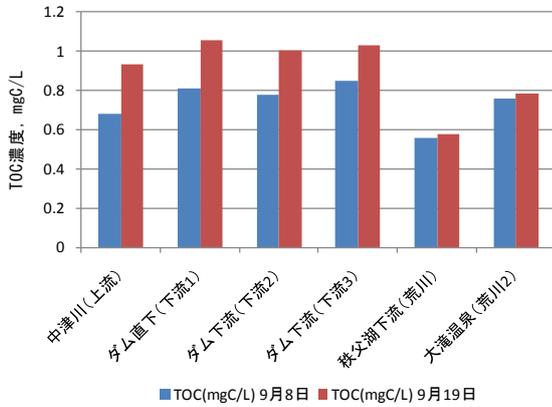


図-2 全有機炭素濃度の比較

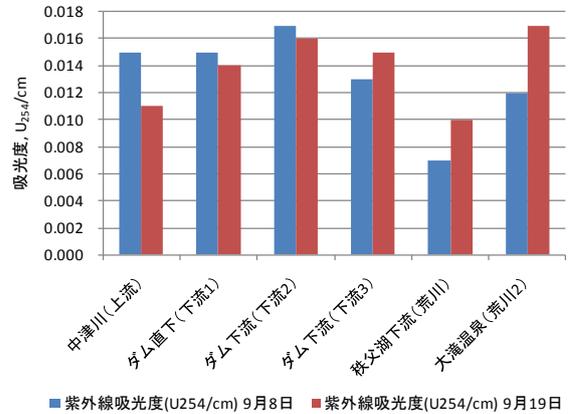


図-3 紫外線吸光度の比較

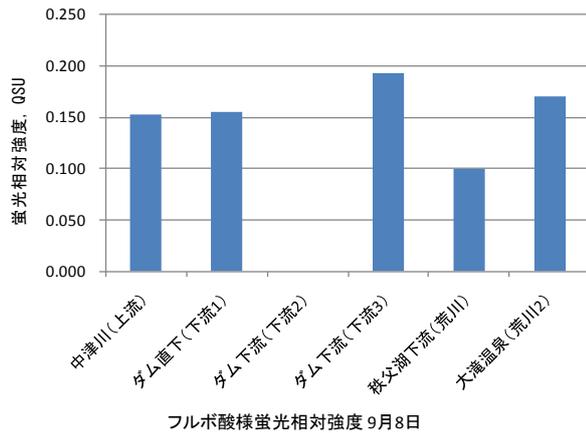


図-4 フルボ酸様相対強度(単位:QSU) (下流2は欠測)

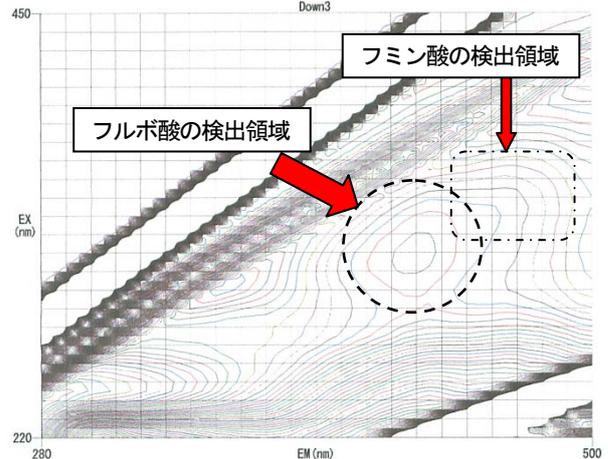


図-5 3次元励起蛍光スペクトルの等高線図(下流3)

ク)により、Ca⁺などの各種イオンをイオンアナライザ(IA-100, 東亜DKK)で測定した。また、現地では、硝酸性窒素濃度が常に0.5 mgN/L以上を記録し、自然河川としては極めて高いことから、ダム直下(下流1)とダム下流(下流3)に自動サンプラー(日科機バイオス)を設置し、2時間おきに48時間連続で採水し、付着藻類が繁茂する両区間で栄養塩の吸収など日変化が得られるかどうかを調べた。

(3) 付着藻類の測定

各地点の礫を採取し、5cm四方を対象に付着藻類をはぎ取り、クロロフィルaとして定量した。なお、これは過去の状態を反映させたものであるため、セラミックタイルを河床に置き、設置後1日、3日、10日に出現し

た種類の同定と、優占種の細胞数を数えた。また、その場のその他の基礎水質項目(水温、電気伝導度、溶存酸素、pH(以上、556MPS, YSI)および流速(プロペラ流速計、ケネック)と水深を記録した。

4. 各地点の水質の比較

表-1に各地点の基礎水質項目および無機態のイオン濃度を示す。まず、水温の差異は1℃以内であり、もはや堪水による水温差は生じていない。pHはどの地点も7以上であった。溶存酸素濃度も同じであるが、電気伝導度については、荒川下流の大滝温泉で高く、次いで

中津川上流, ダム下流という順で, 秩父湖下流は最も低かった. 硝酸態窒素濃度はどの地点も0.5 mgN/L以上と高く, 9月19日の測定ではリン酸態リンは中津川上流で最も高いものの0.005 mgP/Lであり, ダム直下で差があったが流下方向に対して徐々に増加する傾向が見られていた. その他の無機イオン濃度で差異があったものとして, 硫酸イオンとカルシウムイオンが秩父湖下流で顕著に少なく, 電気伝導度の値に反映している.

次に, 溶存有機物濃度の評価として, 全有機炭素量, 紫外線吸光度 (UV₂₅₄), およびフルボ酸様有機物の蛍光相対強度 (QSU) の比較結果を示す(図-2から図-4). ここでフルボ酸様有機物の蛍光相対強度は, 50 μg/L硫酸キニーネ溶液の励起波長345nm / 蛍光波長430nmの蛍光強度を1 QSUとした場合の相対強度として表している¹¹⁾. まず全有機炭素量は, どの地点も1mgC/L程度か

それ以下であり, 平水時の自然の溪流として典型的な値である. 中でも, 秩父湖下流は0.6mgC/Lと顕著に低い. 紫外線吸光度の比較においても同様であり, 中津川および大滝温泉(荒川2)では0.01以上であるのに対し, 秩父湖下流は0.01以下で低い. 同様な傾向はフルボ酸様蛍光相対強度にも見られる. その3次元スペクトル等高線の分布より, 測定地点の中で最も高い値のダム下流3の例を図-5に示す. 縦軸の励起波長(Ex)320nmに対して, 横軸の蛍光波長(Em)430nm付近にピークが明瞭であり, これがフルボ酸に相当する^{11), 12)}. また, それよりやや右上よりに伸びているのがフミン酸と見られている^{11), 12)}. このピーク模様は歪でなく, 等高線が明瞭であるほど人工由来の難分解性有機物が含まれないことを示し, 人為負荷の極めて少ない水質であることがわかった.

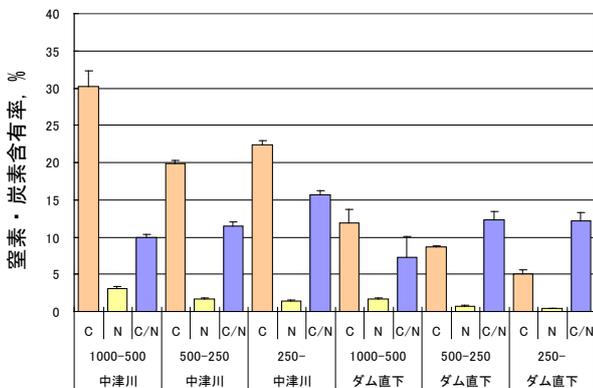


図-6 細粒状有機物の炭素, 窒素含有率

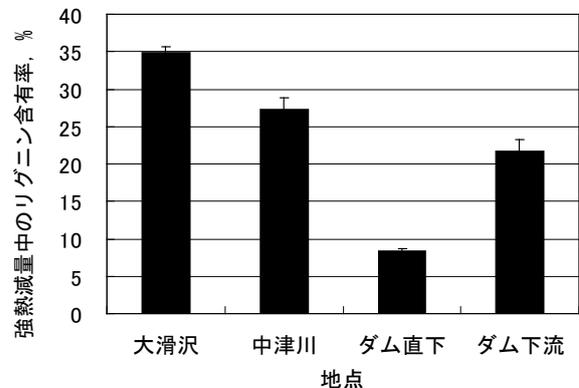


図-7 細粒状有機物中のリグニン含有率の比較

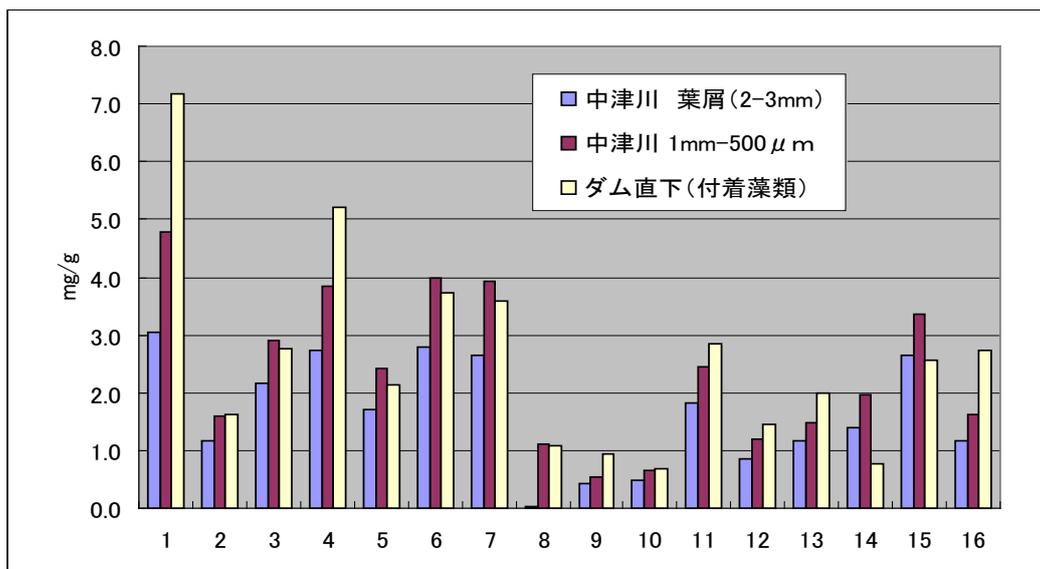


図-8 中津川上流の葉屑(2-3mm), 細粒状有機物(1-500μm), ダム直下の付着藻類(デトリタス)中のアミノ酸含有量の構成比 (番号は 1:Aspartic acid; 2: Threonine; 3: Serine; 4: Glutamic acid; 5: Proline; 6: Glycine; 7: Alanine; 8: Valine; 9: Methionine; 10: Isoleucine; 11:Leucine; 12: Tyrosine; 13: Phenylalanine; 14: Histidine; 15: Lysine; 16: Arginine)

5. 粒状有機物の比較

採取した細粒状有機物の炭素、窒素含有率は、中津川上流においてCとして20~30%台、Nとして2~3%台であるのに対して、ダム直下ではCとして5~10%台、Nとして1~2%台となり、ダム直下のほうが少なかった(図-6)。ここで、バクテリアに利用されにくい(あるいはされやすい)、物質として、リグニンおよびアミノ酸の含有率を比較すると、土壌由来とされるリグニン含有率は中津川上流(もしくはその支流である大滑沢)で高く、ダム直下は低い(図-7)。これよりダム直下の細粒状有機物の主成分は植物プランクトン由来であることを示唆している。他方、アミノ酸の各成分および全体の含有率を比較すると、ダム下流のデトリタスは上流の細粒状有機物と同程度もしくは高い結果となった(図-8, 9)。成分の比較から、ごく一部を除いてどの試料から同様に検出されていることがわかった。

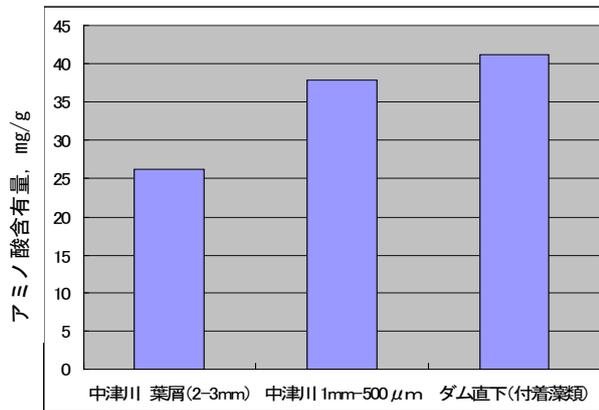


図-9 細粒状有機物中のアミノ酸含有量の比較(mg/g)

6. 付着藻類発生量と考察

図-10に、セラミックタイルに付着した藻類のうち、2章で記した調査⁸⁾から得られた知見に基づき、優占種である*Achnanthes minutissima*の細胞数について比較を行った。これより、水質の結果から細胞の増殖の条件としてリン濃度が制限因子になっていると考えられるが、それが最も低かったダム直下において、通常モニタリング結果と同様に、上流や荒川よりも10倍程度多く発生していることがわかった。但し、注意すべきこととして、河川水中に含まれるクロロフィルa量が上流では0.04 μg/Lであったのに対し、ダム下流の3地点では0.4~0.5 μg/Lと、同じく10倍多かったことを書き留めておく。

この藻類の発生および細胞数の増加の違いを考察するにあたって、まず、流速に着目すると、現地ではタイル上の流速条件を完全に同じにすることは不可能であるが、珪藻類の剥離に影響を及ぼすほどの流速差ではないこと

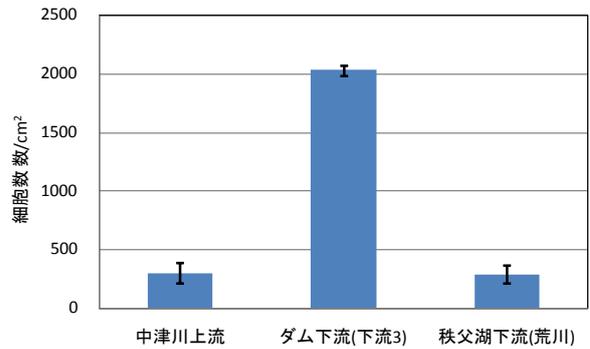


図-10 セラミックタイルを設置後、10日間で発生した*Achnanthes minutissima*細胞数(1cm²当たり)の比較(n=3)

表-2 調査区内の流速と水深(9月12日計測)

	中津川上流	ダム下流	荒川
流速 (m/s)	0.41-0.51	0.37-0.39	0.20-0.30
水深 (cm)	30-40	30-40	30-40

は間違いなく^{1), 2)}、にもかかわらず発生量は大きく異なった(表-2)。次に、水質の条件から比較すると、窒素やリン濃度が低くはないが、溶存有機物や他の無機イオン濃度の低かった荒川において、流速は遅く剥離は生じ難い条件であるものの、藻類の発生量としては最も少なかった。

今回は一度のみの調査結果が示されており、今後も同様な調査を繰り返し実施して、流下藻類の影響も考慮してデータを解析する必要があるが、ここでは溶存有機物の役割に着目して考察する。人工的な汚染の無い自然河川において、溶存有機物の濃度は低い、そのほとんどが難分解性であり、その多くがフルボ酸様であることがわかっている^{11), 12)}。フルボ酸の存在により、水中の紫外線を吸収し、特に生長阻害を起こすB領域の侵入を緩和する¹³⁾。また、直接的な作用として細胞の透過率を高める作用が見出されている¹⁴⁾。また、Toezら(2004, 2006)によれば、直接的な作用は不明であるとしながらも、実験レベルにおいてフミン物質の添加によって付着藻類の増殖が20%程度早まったと報告されている^{15), 16)}。

次に、流下する細粒状有機物は河床に堆積し、その分解が進むことで河床のバイオフィルムの形成に寄与している¹⁷⁾。本研究による分析結果で示したように、ダム下流では微生物が利用しやすいアミノ酸を多く含んでおり、かつ、バイオフィルムは様々な溶存物質を交換していることから、バイオフィルムの発達が付着藻の生長に寄与することが考えられる¹⁸⁾。

以上より、溶存有機物の場所による違いを見出し、その特性を踏まえると、付着藻の生長に与える影響としては直接的な作用の他に、間接的な作用が働いていることが考えられる¹⁹⁾。但し、その度合いについてはさらに詳細に調べる必要がある。

7. おわりに

今回調査対象とした滝沢ダム上下流の溶存有機物濃度は低く、三次元励起蛍光分光光度法による腐食物質の解析から人為負荷の少ない河川であることを検証した。そうした条件のもと、窒素およびリンの栄養塩濃度がほぼ同じであるものの、相対的に溶存有機物濃度や他の無機イオン濃度の異なる個所において付着藻類の出現状況を簡易に調べた結果、溶存有機物濃度の高い場所でより多量の藻類の発生を確認した。付着藻類の生長に及ぼす溶存有機物の役割について、本論は一度の現地調査から導かれたものであり、実験室レベルでの検証も含めて繰り返し調査を実施することが不可欠であるものの、これまで報告されている腐食物質の特性によって、本結果は種間競争や被食なども含めて他の要因と比較すれば影響の度合いは小さいかもしれないが、間接的に関与していることを示唆するものである。

調査対象としたダムでは、今後も有機物の質的変換が持続し、予測される紫外線量の増加によって、難分解性溶存有機物の生態学的役割はより大きくなる傾向にある。こうした部分についても長期的なモニタリングが行われるべきであり、通常のモニタリング結果の理解にも役立つと思われる。

謝辞：ダム流入および放流量、滝沢ダム自然環境調査結果については独立行政法人水資源機構荒川ダム総合事業所より提供頂きました。三次元励起蛍光分光光度法については、埼玉県環境科学国際センターの高橋基之博士より御指導頂きました。最後に、本研究は科学研究費補助金(基盤研究(C)) No.19560509によって行われた。

参考文献

- 1) Allan, J.D. and Castillo, M.M. eds.: Primary producers, Stream Ecology 2nd edition, Springer, pp.105-134, 2007.
- 2) Asaeda, T. and Son D.H.: Spatial structure and populations of a periphyton community: a model and verification, *Ecological Modelling*, Vol.133, pp.195-207, 2000.
- 3) Steven T.R. and Stevenson, R.J.: Response of periphytic algae to gradients in nitrogen and phosphorus in streamside mesocosms, *Hydrobiologia*, Vol.561, pp.131-147, 2006.
- 4) Ward, J.V. and Stanford, J.A.: The ecology of regulated streams, Plenum Press, 1979.
- 5) Woodruff, S.L., House, W.A., Callow, M.E., and Leadbeater,

B.S.C.: The effects of biofilms on chemical processes in surficial sediments, *Freshwater Biology*, Vol.41, pp.73-89, 1999.

- 6) Steinberg, C.E.W.: Ecology of humic substances in freshwaters, Springer, 2003.
- 7) Wetzel, R.G. ed.: 23 Detrius: Organic carbon cycling and ecosystem metabolism, *Limnology*, Academic Press, pp.731-775, 2001.
- 8) 関東地方ダム等フォローアップ委員会: 第3回滝沢ダムモニタリング調査結果資料集, 2006
- 9) 高橋陽一, 藤野 毅, ニン ウィリ, 浅枝 隆: ダム上下流における底生動物群集の試験湛水開始前後の比較, *水工学論文集*, Vol.52, pp.1165-1170, 2008.
- 10) Richard, H.F., and Gary L.A., *Methods in Stream Ecology*, 2nd Edition, Academic Press, 2007.
- 11) 高橋基之, 海賀信好, 河村清史: 蛍光分析法による環境水中溶存有機物の計測, *水環境学会誌*, Vol.27, pp.721-726, 2004.
- 12) Westerhoff, P, Chen, W., and Esparza, M.: Fluorescence analysis of a standard fulvic acid and tertiary treated wastewater, *J. Environ. Qual.* Vol.30, pp.2037-2046, 2001.
- 13) Kelly, D.J., Clare, J.J., and Bothwell, M.L.: Attenuation of solar ultraviolet by dissolved organic matter alters benthic colonization patterns in streams, *J. N. Am. Benthol. Soc.*, Vol.20, 96-108, 2001.
- 14) Toez, D., and Payton, M.: Synergism of nutrients and humic acid in accrual of periphytic biomass in a subalpine stream, Colorado front range, *J. Freshwater Ecology*, Vol.19, pp.35-40, 2004.
- 15) Toez, D., and Payton, M.: The role of dissolved organic matter in accrual of periphytic biomass in a subalpine stream, Colorado front range, *J. Freshwater Ecology*, Vol.21, pp.613-620, 2006.
- 16) Parent, L., Twiss, M.R., and Campbell P.G.C.: Influences of natural dissolved organic matter on the interaction of aluminum with the microalga *Chlorella*, *Environ. Sci. Technol.*, Vol.30, pp.1713-1720, 1996.
- 17) Vigneault, B., Percot A., Lafleur M., and Campbell P.G.C.: Permeability changes in model and phytoplankton membranes in the presence of aquatic humic substances: *Environ. Sci. Technol.*, Vol.34, pp.3907-3913, 2000.
- 18) Wellnitz, T., and Rader, R.B.: Mechanisms influencing community composition and succession in mountain stream periphyton: interactions between scouring history, grazing, and irradiance, *J. N. Am. Benthol. Soc.*, Vol.22, 528-541, 2003.
- 19) Armstrong S.M, and Barlocher F., Adsorption and release of amino acids from epilithic biofilms in streams, *Freshwater Biology*, Vol.22, pp.153-159, 1989.

(2008. 9. 30受付)