

小型魚類の生体内元素分析を用いた ダム下流域における急激な物質循環変化の検証

DRASTIC CHANGES OF CARBON STABLE ISOTOPE RATIO AND TRACE ELEMENT CONCENTRATIONS ON SMALL BENTHIC FISH IN DOWNSTREAM REACHES FROM DAM

東 信行¹・村元寛子²・伊藤結美³・河野冬樹⁴・
野田香織⁵・笠井亮秀⁶・渡邊 泉⁷
Nobuyuki AZUMA, Hiroko MURAMOTO, Yuumi ITO, Fuyuki KAWANO
Kaori NODA, Akihide KASAI and Izumi WATANABE

¹正会員 農博 弘前大学農学生命科学部 (〒036-8561 青森県弘前市文京町3)

²修 (農生) 弘前大学大学院農学生命科学研究科 (〒036-8561 青森県弘前市文京町3)

³弘前大学農学生命科学部 (〒036-8561 青森県弘前市文京町3)

⁴東京農工大学大学院 農学研究院 (〒183-8509 東京都府中市幸町3-5-8)

⁵博 (学術) 弘前大学理工学部 (〒036-8561 青森県弘前市文京町3)

⁶農博 京都大学大学院農学研究科 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

⁷博 (学術) 東京農工大学大学院 農学研究院 (〒183-8509 東京都府中市幸町3-5-8)

Concerns regarding sentinel species for assessing environmental impacts, if effects are to be attributable to local conditions. Stable isotope and trace elements analyses were used as a tool to investigate site fidelity of Japanese fluvial sculpin, *Cottus pollux*. Carbon stable isotope ratio was indicated extremely low level in the fish at the closest study site from discharge outlet of dam lake water. On the other hand, trace element concentrations (i.e. Cu, Zn, Cd and so on) were shown higher values than other sites because of elution from the bottom of lake. However, the values of carbon isotope ratio at 5km or more downstream sites became similar values and trace element concentrations were reduced rapidly with descending the stream. The site specific signatures suggest that this species are not moving considerable distances among study plots. The results support the use of the Japanese fluvial sculpin as a sentinel species for investigating site specific environmental impacts.

Key Words : Carbon stable isotope, Trace elements, Heavy metal, *Cottus pollux*, POM

1. はじめに

大ダムの存在は河川の連続性を遮断あるいは変化させ、特に下流側には本来とは異なる物質循環や生態系を成立させることが懸念されている。河川連続体仮説¹⁾や河川生産性仮説^{2),3)}などが提唱するように、河川の生物生産はその場で生産されるものと上流などから流下しているものとが相対的に混合され、その場所の生物群集を成り立たせている。ダム湖においては、上流から流入した有機物を含む物質が一度湖底に堆積した後に、有機物の場合は分解され再度植物プランクトンをはじめとする食物連鎖の中に取り込まれたり、あるいは様々な元素が底層

の貧酸素状態の時に溶出した後粒状有機物(POM)と結合するなどして、ダム下流河川に運搬される⁴⁾。このような現象が生じた場合に、下流に生息する生物たちがこれらの物質をどのように利用し体内に取り込んでいるかに関しての情報は乏しい。一般に魚類は河川内を大きく移動する種が多く、水生昆虫や付着藻類に比較してその場の環境や物質循環を完全に反映しない場合が多い。一方で、食地位が高く相対的に長寿命であるため、その場でおきている物質循環を積分的に捕らえることが可能であり、かつ生物濃縮などの現象を把握するのに適している。本研究では、河川での移動性が小さく、水生昆虫食であり、極めて高い定住性を持つカジカ大卵型(*Cottus pollux*)を主な対象とした^{5),6)}。米国においては、同

じ*Cottus*属の魚種を用いて、鉱山や農耕地からの物質流入のモニタリングを行っている事例もある^{7), 8), 9), 10), 11)}。ダム湖から放出されたPOMなどの下流への運搬に関しては、以前より重要な課題として扱われている¹²⁾。我が国でも玉・竹門¹³⁾や吉村⁹⁾などの研究例があり、一定の距離減衰が粒子サイズや河川形状などにおいて変化することが示唆されている。しかしながら、POMが下流でどの程度生物に取り込まれ利用されているかといった生物プロセスに関しては、より上位の生物を対象にモニタリングする必要があるが、流下しているダム湖由来のPOMの魚類など河川下流生物群集における重要性や、それがどのような距離減衰の挙動を示しているかについての事例は乏しい。

本研究ではその試行的研究としてカジカ大卵型の筋肉中の炭素同位体および肝臓中の微量元素に着目し分析を行い検討した。炭素同位体はダム湖内生産物と下流河道内生産物を判別するのに有用である。また、調査河川上流には銅(Cu)などを採掘していた廃鉱山があるため、ダム湖内から溶出しPOMとともに下流に流下して行く可能性の高い微量元素として、特にCu, Zn, Cdの挙動に注目した。

2. 調査地と方法

(1) 調査地

青森県中津軽郡西目屋村の白神山地雁森岳(987m)に水源を発する岩木川は、岩木山南麓を北東に流れ、弘前市から概ね北に向きを変え、津軽平野を潤す。津軽半島西部を流れ、河口近くに十三湖を形成したのち日本海に注ぐ流域面積2540km²、流路延長102kmの一級河川である。調査地点はダム湖より上流をU-1～4、下流をL-1～6とした(図-1)。調査対象とした流程は暗門大橋より下流の流程約42kmであり、このうち、ダム湖上流で流入する湯ノ沢川(U-4)上流にはかつて銅などを採掘していた鉱山があった。ダム上流域の調査地点の平均勾配はおおよそ1/130～1/150程度、ダム下流域のダム直下から大秋川合流点(L-4)までの平均河床勾配は1/190、またその下流では、1/270～1/500程度となっている。

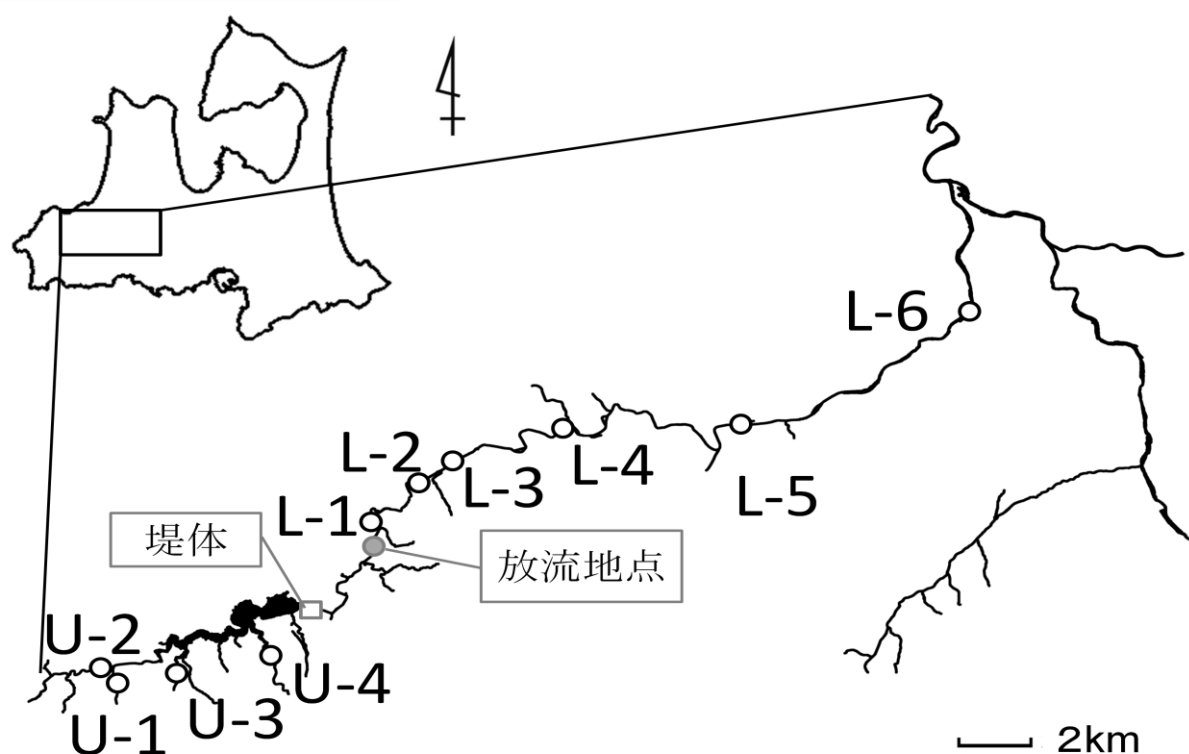


図-1 岩木川本川調査地点地図。Uはダムサイトより上流地点、Lは下流地点を示す。

(2) 材料と 採集方法

2010年10～11月に各調査地点において、電圧を300Vの直流パルスに設定したエレクトロフィッシャー (SMITH-ROOT社 LR24) を用い採集を行った。採捕した個体は、氷温で持ち帰り-30℃で保存した。50mm以上の成魚を対象とし、サンプル数は1地点6尾を基準とした。

(3) 窒素炭素安定同位体分析

試料は室温で解凍後、全長、体長、体重を計測し、背鰭付近の筋肉を切り出した。切り出した筋肉は自然対流乾燥機 (IWAKI ASAHI TECHNO GLASS社製) で十分乾燥させ (60℃で24時間程度)、乳鉢で均一な粉末状に粉碎し、分析まで乾燥した状態で保存した。前処理を行ったサンプルをそれぞれスズ箔にいれ、炭素・窒素安定同位体分析を行った。同位体分析には燃焼型元素分析装置 EA 1108 (FISONS 社製) と同位体比質量分析計 DELTA Plus (Thermo Finnigan社製) を連結した分析装置を用いた。炭素安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) と窒素安定同位体比 ($\delta^{15}\text{N}$) は δ 表記を用いて単位は‰で表され、以下の式より算出した。

$$\delta^{13}\text{C} \text{ or } \delta^{15}\text{N} (\text{‰}) = [(\text{R}_{\text{sample}}/\text{R}_{\text{standard}}) - 1] \times 10^3$$

Rには炭素の場合 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 、窒素の場合 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ を用いる。Pee Dee Belemniteを炭素安定同位体比、大気中の窒素を窒素安定同位体比のスタンダードとして用いた。

(4) 微量元素分析

解剖などの処理は窒素炭素同位体分析に準ずる。常温で解凍後解剖し、肝臓、腎臓を摘出した。各組織試料は90℃で16時間程度で乾燥後、硝酸を用いたマイクロウェーブ湿式灰化を行った。試料溶液は誘導結合プラズマ質量分析計 (ICP-MS: ICP-MS7500a, Agilent社) を用いて ^7Li , ^{24}Mg , ^{43}Ca , ^{51}V , ^{53}Cr , ^{55}Mn , ^{57}Fe , ^{59}Co , ^{60}Ni , ^{63}Cu , ^{66}Zn , ^{69}Ga , ^{75}As , ^{82}Se , ^{85}Rb , ^{88}Sr , ^{95}Mo , ^{107}Ag , ^{111}Cd , ^{115}In , ^{121}Sb , ^{133}Cs , ^{137}Ba , ^{202}Hg , ^{205}Tl , ^{208}Pb , ^{209}Bi の28元素濃度を同時測定した。検出限界値はブランクの標準偏差の3倍とした。分析の精度は室内標準試料を用い、くり返し分析で確認した。本論文では肝臓のみを使用した。

また、マスの分析可能試料数の都合により、L-3, 5の個体は肝臓の分析を行っていないため、結果に反映していない。

3. 結果と考察

(1) 安定同位体分析

図-2は窒素炭素同位体比のCNマップを示したものである。地点L-1において、炭素同位体の値が極端に低くなっていることがわかる。これはダム湖放流口直下ではダム湖内の生産物を基点に食物連鎖が成立していることが示唆される結果といえる。また、ダム湖上流と下流で

窒素安定同位体比の値が異なり二つのグループに分かれる傾向が認められた。L-1からおおよそ1km下流のL-2では既に他の下流地点に近い位置に移動していることがわかる。

この窒素同位体の挙動を示す現象は、流域の人為的窒素負荷がその要因と考えられる。既往の文献^{(4), (15), (16)}においても人口密度と窒素同位体比の上昇関係は示されており、家庭排水や有機肥料などからの窒素負荷は窒素安定同位体比を高くすることが示唆されている。本研究で注目している炭素同位体比ではダム湖を基点とした距離と各地点の値から、ダム湖水放水口直下の値が極端に低くなりその後約1kmにおいて既に他の調査地点の値に近くまで急激に上昇していることがわかる (図-3)。これは、直下の調査地点ではダム湖水中の植物プランクトンあるいはそれを元とした有機物をエンドメンバーとする食物連鎖が生物群集の特性となっているものの、その後急速にその場の河川生産物が起点となる食物連鎖にスイッチしていることが示されている。

本論文では流下粒状有機物 (POM) の定量的な評価は行っていないが、食地位が上位のカジカにおいてはわずかに放水口からの距離が異なる地点間で食物連鎖のエンドメンバーが入れ替わっていることが示された。玉・竹門⁽¹³⁾らの調査地点よりも平均河床勾配が1/190と急峻で比較的高い流下速度が予想される河道においても、急速にPOMが利用されなくなっている点は興味深い。河床付着藻類の生産性とPOMとの生物による利用動態は今後の河川生産と群集の成立に関して重要な課題を提供しているものと考えられた。

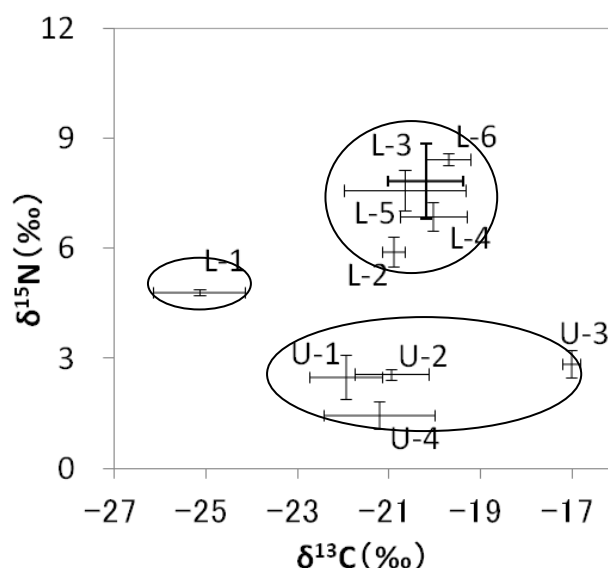


図-2 地点ごとのカジカ筋肉中窒素炭素同位体マップ。縦軸が窒素同位体比、横軸が炭素同位体比を示す。

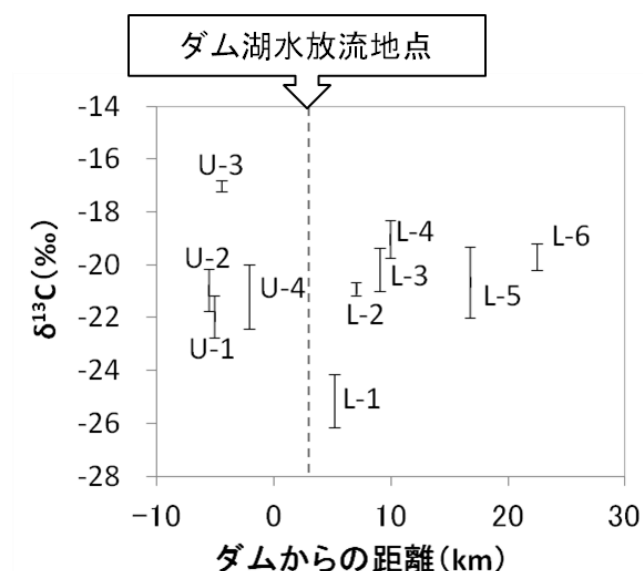


図-3 横軸にダムからの距離を置いた場合の各地点の炭素同位体比. バーは中心から±1SD, 中心は平均値.

(2) 微量元素分析

一方で、微量元素濃度の距離減衰の傾向からも同様の現象を見いだすことが出来た. 本報告では、Cu, Zn, Cdに加え同様の傾向を示したFe, Co, Moの結果も示した(図-4). いずれの元素もダム直下のL-1において高い値を示しL-2, L-4と明らかな距離減衰が認められる. また、湯ノ沢川におけるCu, Zn, Cdの値が他の上流側流入河川よりも高い値を示すことから、その起源は鉱山にあることが推察できる. また、ダム直下で最も高い値となっており、ダム湖内での溶出がその主たる要因であることが示唆された. これらCu, Znなどにおいては有機物との親和性が高いことは一般に知られている¹⁷⁾. Fe, Co, Moの起源は特定できないが、これらも湖底からの溶出が要因として考えられる. また、溶存している鉄などは好気条件では速やかに酸化され溶存態のものが固形化されるため、河床に沈降しやすい形態になる可能性もある. ここで示した6種の重金属ではいずれも炭素安定同位体比の変動に若干遅れるように下流に向かうにつれて速やかに低下していることから、一部は有機物に付着あるいは取り込まれた状態で河道へ放出されていることが示唆された. ただし、重金属の体内レベルはL-2においても上流や下流に比較して高い値をとることから、湖内有機物とともに体内に取り込まれる以外の経路も存在している可能性は否定できない.

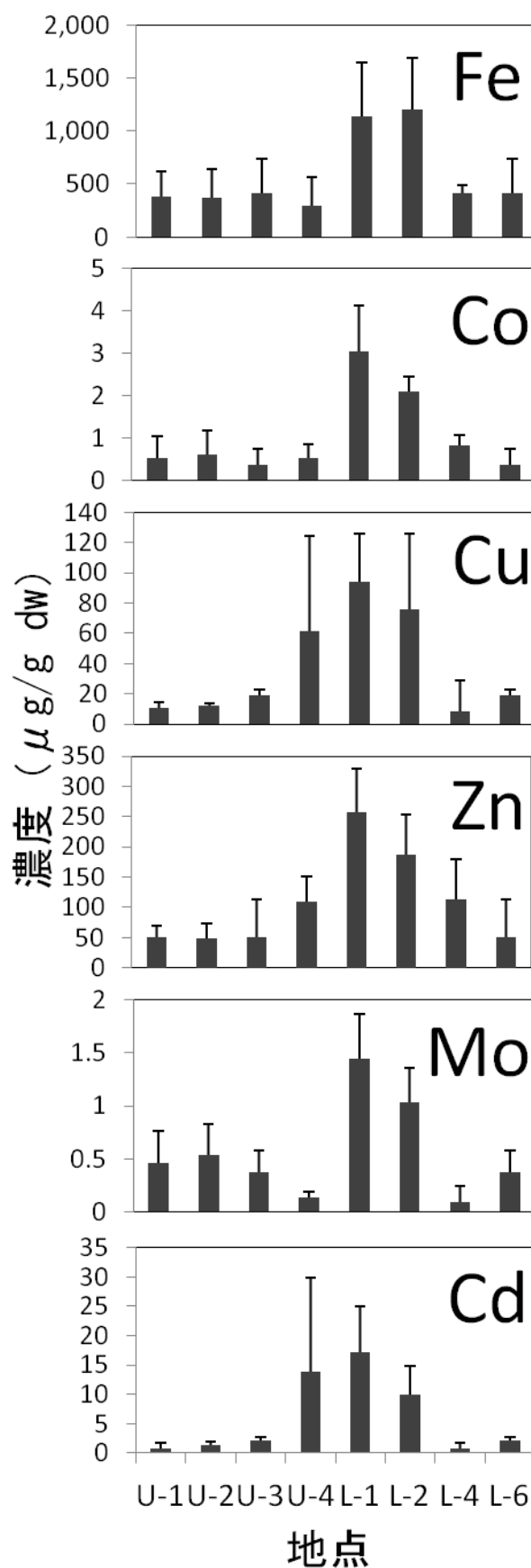


図-4 カジカ肝臓における乾燥重量あたりの6種の重金属濃度(平均値と1SD)

これらの現象の詳細把握はカジカの餌となる水生昆虫や付着藻類、POMの微量元素分析を行うことによって、ある程度解明することが可能であろう。しかしながら、炭素同位体は食物の質的变化に対して一定時間のターンオーバーが知られているが、重金属の場合は代謝の過程が異なるため、魚類の体内に取り込まれてからの挙動も異なることを考慮する必要がある。そういった側面からは、より長期間の重金属の暴露履歴を反映している可能性を考察すべきかもしれない。

(3) 本研究手法の意義と課題

河川連続体のコンセプトでは上流で生産された有機物が下流の二次生産において重要な起点となり得ることを示している。本研究の結果はその影響距離がかなり短いものとなったものの、流下粒状有機物自体がその短い距離で沈降し除去されたのかについては不明である。基点となり流下する物質が下流にまで影響を与えることが示されている。しかしながら、本研究の結果からは一部に必ずしもそうではないメカニズムが存在することも示された。

また、POMはたとえば安定同位体比の値をとると季節的な変動が大きく、それだけを計測していても下流の生態系にどの程度物質循環として貢献しているのか不明な点が残る。この点からも定住性の高い魚類をモニタリング指標とする意義はあるといえる。POMの調査分析による成果が時間的な変動をとらえる利点があるとするならば、より食地位が高い動物を利用することはダム下流における流程区間ごとの生物群集の物質循環プロセスの時間平均的なあるいは積分的な現象を捉えることを可能とする解釈もなり立つ。本研究ではその事例を示すことができた。

ダム湖からの貧酸素時の重金属溶出や濁水濁水などによる堆積物の流出などは、大ダムでは共通した問題である。飲み水等に関して水質基準に基づいたモニタリングはなされているものの、生態系の中で生じている現象を把握するにはそこに生息する生物をモニタリングすることが有効であるといえる。河道の地形や流況など多くの要素が関連する可能性はあるものの、ダム湖から放出された重金属が流程方向に急速に河川生物への取り込みが見られなくなったという現象は今後の河川水質を考える上で有益なトピックスが提供できたと考えられる。今後はこれらのメカニズムに踏み込んだ研究も並行して行う必要がある。

おわりに

ダム湖が河川の物質循環を変化させることは、ドナウ川のダム湖がダム下流河川の物質循環を変化させ（ここでは主にケイ素：Si）、流入する黒海のプランクトン組成を変化させ、最終的には生態系をも変えてしまうという著名な研究例以降²⁰⁾、多くの研究が進められつつある。

これまでの研究では、POMや溶存体の物質が中心の研究あるいは土砂を中心に据えた研究が主体である。これらは、水質に伴う化学的な側面から低次の生物生産のプロセスを解き明かすため、あるいは生物生息場に関する物理的な側面を解明するためにそれぞれ有効である。

これらに加えて、食地位がより高次に位置する魚類などを指標とし利用することで、また異なった河川生態系の物質循環のプロセスも見えてくる。このアプローチを複雑な生態系をよりよく理解するためのツールの一つとして提案する。

謝辞：本研究の遂行に当たり、弘前大学農学生命科学部動物生態学・野生生物管理学および東京農工大学農学部環境毒性学研究室に所属する学生諸氏にはフィールド調査および分析において多大なる協力を賜った。また岩木川漁業協同組合、津軽ダム工事事務所、青森河川国道事務所は魚類採捕や基本的な情報に関して多くのご協力を頂いた。本研究の一部には科学研究費補助金（20658054、23651008）および河川環境管理財団河川整備基金助成事業により援助を受け実施された。ここに期して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Vannote, R.L., Minshall, G.W., Cummins, K.W., Sedell, J.R. and Cushing, C.E.: The river continuum concept, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, Vol. 37, pp.130-137, 1980.
- 2) Thorp, J.H. and Delong, M.D.: The riverine productivity model: an heuristic view of carbon sources and organic processing in large river ecosystems, *Oikos*, Vol. 70, pp.305-308, 1994.
- 3) Thorp, J.H. and Delong, M.D.: Dominance of autochthonous autotrophic carbon in food webs of heterotrophic rivers, *Oikos*, Vol. 96, pp.543-550, 2002.
- 4) 吉村千洋：河川の有機物動態とダムの関係，*ダム湖・ダム河川の生態系と管理*，谷田・村上 編，名古屋大学出版会，pp. 239-262, 2010.
- 5) Natsumeda, T.: Year-round local movements of the Japanese fluvial sculpin, *Cottus pollux* (large egg type), with special reference to the distribution of spawning nests, *Ichthyol. Res.*, Vol. 46, pp.43-48
- 6) Natsumeda, T.: Home range of the Japanese fluvial sculpin, *Cottus pollux*, in relation to nocturnal activity patterns, *Environmental Biology of Fishes*, Vol. 53, pp.295-301, 1998.
- 7) Gray, M.A., Curry, A.R. and Munkittrick, K.R.: Non-Lethal sampling methods for assessing environmental impacts using a small-bodied sentinel fish species, *Water Qual. Res. J. Canada*, Vol. 37, pp.195-211, 2002.
- 8) Gray, M.A. and Munkittrick, K.R.: An effect-based assessment of slimy sculpin (*Cottus cognatus*) populations in agricultural regions of Northwestern New Brunswick, *Water Qual. Res. J. Canada*, Vol. 40, pp.16-27, 2005.

- 9) Gray, M.A., Curry, A.R. and Munkittrick, K.R.: Impacts of nonpoint inputs from potato farming on populations of slimy sculpin (*Cottus cognatus*), *Environmental Toxicology and Chemistry*, Vol. 24, pp.2291-2298, 2005.
- 10) Gray, M.A., Cunjak, R.A. and Munkittrick, K.R.: Site fidelity of slimy sculpin (*Cottus cognatus*): insights from stable carbon and nitrogen analysis, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, Vol. 61, pp.1717-1722, 2004.
- 11) Allert, A.L., Fairchild, J.F., Schmitt, C.J., Besser, J.M., Brumbaugh, W.G. and Olson, S.J.: Effects of mining-derived metals on riffle-dwelling benthic fishes in Southeast Missouri, USA, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Vol. 72, pp.1642-1651, 2009.
- 12) Speaker, R., Moore, K. and Gregory, S.: Analysis of the process of retention of organic matter in stream ecosystems, *Verh. internat. Verein. Limnol.*, Vol. 22, pp.1835-1841
- 13) 玉基英, 竹門康弘: 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*, 第51号B, pp. 815-828, 2008.
- 14) Cabana, G. and Rasmussen, J.B.: Comparison of aquatic food chains using nitrogen isotopes, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, Vol. 93, pp.10844-10847, 1996.
- 15) 戸田任重, 山崎未月, 沖野外輝夫: 付着藻類の窒素安定同位体比からみた天竜川水系の窒素の起源, *環境科学年報*24, pp. 127-130, 2002.
- 16) 山本直樹, 渡辺幸三, 草野光, 大村達夫: 炭素・窒素安定同位体による河川底生動物群集の栄養構造の解明 ―宮城県広瀬川流域を例として―, *水環境学会誌*, Vol. 28, pp. 385-392, 2005.
- 17) 浅見輝男: データで示す日本土壌の有害金属汚染, アグネ技術センター, 402pp., 2001
- 18) Yamazaki H., T. Hara, Y. Koyama, T. Hosokawa, A. Kasai, M. Wada, M. Nagasaki, T. Higashino and N. Azuma: Ecosystem and biological production in Lake Jusan; nutrient cycles and spatiotemporal variability, *Proceedings of the World Fisheries Congre2008*, 5a0915 460, 2008
- 19) 南川雅男: 安定同位体比による水圏生態系構造の解明, *水環境学会誌* 20(5), 296-300, 1997
- 20) Humborg, C., Ittekkot, V., Cociasu, A. and Bodungen, B.V.: Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure, *Nature*, Vol. 386, pp.385-388, 1997.

(2012. 4. 5受付)