

13.9 河川を流下する栄養塩類と河川生態系の関係解明に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 18～平 22

担当チーム：水環境研究グループ（河川生態）

研究担当者：天野邦彦、中西哲、矢島良紀、小林草平、赤松史一

【要旨】

本研究では河川の物理環境と流況が物質動態に与える影響の定量化を行うとともに、物理環境と物質動態の関係を検討する。また、流域レベルで、河川生態系を支える栄養塩の由来を明らかにすることが生態系を保全する上で重要であるため、安定同位体比解析を用いて由来を明らかにし、河川生態系の保全に資する知見を得ることを目的に調査を実施した。平成 20 年度は、上流から下流に至る流程調査を行い、年間を通じ水質、流下有機物、付着藻類、水生昆虫を分析し、流域の土地利用との関係を調査した。安定同位体比分析による底生動物の有機物源の推定およびその流程変化をもとに、上流から下流の間に行われる水中と河床の物質の交換について検討を行った。窒素は、流域の土地利用を反映して、下流域で河川への流入量が増加し、食物連鎖を通して陸域由来物質が河川生態系へ取り込まれていることが明らかになった。安定同位体比解析からは、水生昆虫のエネルギー源は、上流では陸域有機物、中流では河川内有機物、下流は陸域有機物が卓越していることが示唆された。下流域では有機物の分解が水生昆虫の餌資源利用と関連している可能性があり、加えて、地形と関連性がある可能性を見いだした。

キーワード：物質動態、豊川、底生動物、付着藻類、安定同位体、土地利用、有機物

1. はじめに

河川生態系は、陸域から物質、栄養塩、有機物、生物が流入しており、陸域との相互作用により複雑な系を形成している。このため、河川生態系は、多様性が高く、生物多様性保全の観点からも重要な系となっている。これまで物質動態の問題は、水質汚染、つまり公害として取り扱われ、河川管理者は水質に関する環境基準の達成を目標としていた。しかし、河川生態系が生物の生息場所としての保全と整備も目的に加わった今日においては、環境基準達成のためだけの水質管理でなく、河川生態系保全の観点からの物質動態管理のあり方も必要となるであろう。

河川を流れる粒状有機物（流下有機物）は、陸上で植物が生産した有機物と河川で付着藻類等が生産した有機物の混合物である。流下有機物は、河川生物の重要な餌資源であり、河口、沿岸域においても、生物の主要な餌資源の供給源となっている。一方で、河口、沿岸域における有機物堆積は、底層の貧酸素化を招き、底層を利用する生物に深刻な悪影響を与えるため、水産業などで大きな問題となっている。沿岸海域では、河川から供給される有機物と海洋で生産された有機物が複雑に混じり合っており、有機

物の過剰な供給とそれに伴う底層の貧酸素化の問題を解決する上で、有機物の起源・特性を明らかにすることが必要となっている。

一方で、付着藻類などの河川生産物は、流域から流入する栄養塩を利用してその生産量を維持するため、陸域とも密接な関係がある。流域からの栄養塩流入量は、人間活動、すなわち土地利用によって大きく変動する。流域の人間活動は、水質を規定し、河川生物の生息環境に影響を与えていると思われるが、定量的知見は少ない。栄養塩類や有機物の増加による水質の悪化は、しばしば生物多様性の減少を招くが、逆に水質が良すぎる河川では生物生息量や多様性が低いことも珍しくない。また、河川の水質は陸域からの物質供給とともに河川内の物理・化学・生物的なプロセスによって変化するものであり、水質と生物の関係は一方向の作用のみで決まるものではない。水質と生物の関係は、特に生物が水質に及ぼす影響については未解明な部分が多い。

平成 20 年度は、豊川を対象に主に、①上流から下流に至る流下有機物の構成物質の変遷、及び、②上流から下流までの水質と土地利用の関係を調査するとともに、安定同位体比解析を用いて、水生生物を構成する有機物の由来を調査した。

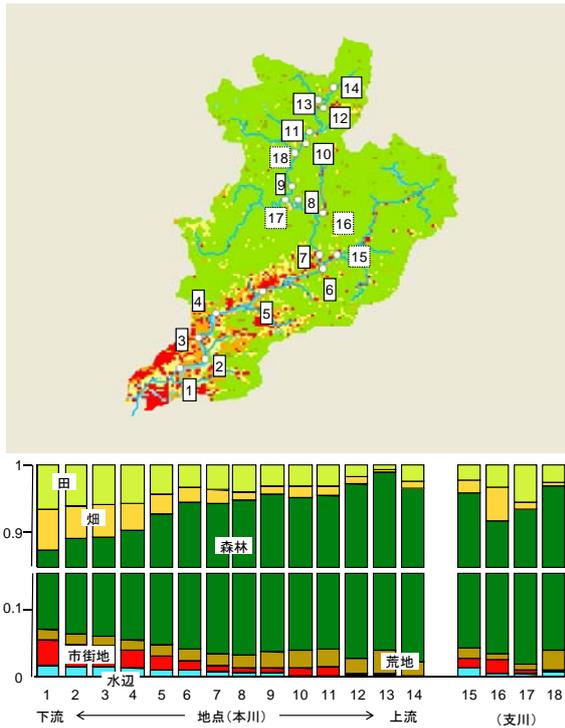


図1 豊川流域の土地利用図

2. 調査地概要

豊川は愛知県東部に位置し、愛知県北設楽郡設楽町の段戸山（標高：1,152 m）を源流としている流域面積 724 km²、幹川流路延長 77 km、流域内人口約 21 万人（H7 河川現況調査）の一級河川である。設楽町を源流とする寒狭川と宇連川が合流し豊川本川となり新城市、豊川市、豊橋市を通り三河湾へ流れている。豊川の下流では江戸時代から設けられている「霞堤」や昭和 40 年完成の「放水路」が河道構造の一部となっている。また農地開発に伴う用水路整備のため、大野頭首工や牟呂松原頭首工からの取水は多く、人間による水利用の多い河川である。水質は一級河川の中でも極めて良好であるとともに、浅瀬や河原が多く存在し、レクリエーションなどの河川利用率は高く、自然環境・親水場提供の観点では河川の機能を果たしている。

豊川流域は、80%以上の面積が森林で構成されている。下流ほど、田、畑、市街地の占める割合が増加しており（図1）、上流よりも下流で人間活動の影響が大きい流域である。

3. 材料と方法

豊川の上流から下流の 18 地点（本川 14 地点、支川 4 地点）で調査を行った（図2）。最下流の地点は

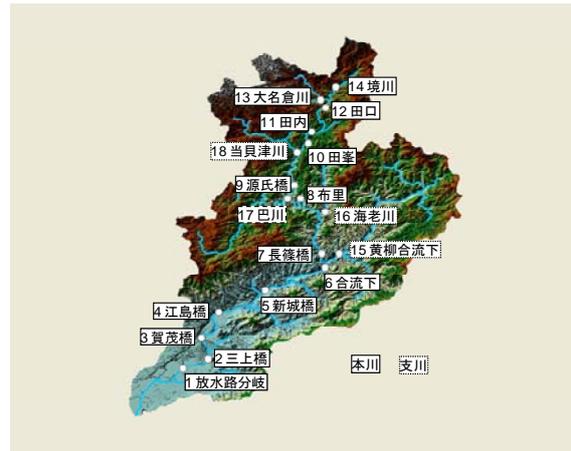


図2 調査地点

本川 11.8km 付近（放水路分岐）であり、最上流の地点は本川 70km 付近（境川、大名倉川の地点）である。下流から 6 地点目（合流点下）までは豊川本川、7 地点目（長篠橋）から上流は寒狭川にあたる。2、3、5、8、11 月に河川水、流下有機物、付着藻類、水生昆虫を採集した。

各地点において 0.1mm メッシュのフルイを通して 5L ボトルに採水した。冷蔵で分析室に運んだ後に、試水はガラス製フィルター（Whatman 製 GF/C、孔径：0.12 μm）で濾し、濾液の一部は、Bran Luebee 社の AACS-III を用いて硝酸態窒素、リン酸態リン濃度を測定した。濾液の残りについて、硝酸態窒素の安定同位体比分析のため、水酸化ナトリウムを加えて濃縮し、水蒸気蒸留法を用いてテトラフェニルホウ酸ナトリウムに吸着させた硝酸を収集した。

流下有機物は、河川水中に 5-10 分間設置したプランクトンネット（孔径：0.1 mm）で捕捉された有機物を用い、篩で区画分けを行った。相対的に量の多く、水生昆虫に最も多く利用されている 100-250 μm の粒径区画を分析に用いた。

付着藻類は、瀬のなかから選んだ 3 つの礫（粒径 10-20 cm）についてそれぞれ表面 5×5cm をブラシで擦り採集した。採集物は二等分し、片方はクロロフィルをエタノールで抽出し、クロロフィル a 量を分光光度計で測定した。もう片方は、安定同位体比分析のため、水生昆虫やデトリタスを除去し、60 度で 24 時間以上乾燥後、粉末化した。

底生動物は各地点の瀬において多く見られる 5-10 の分類群についてそれぞれ 3-5 個体を分析に供した。底生動物種による食性の違いを考慮し、付着物食者、ろ過食者、捕食者の種類を含むようにした。底生動物は、胃内容物を除去してから 60 度で 24 時

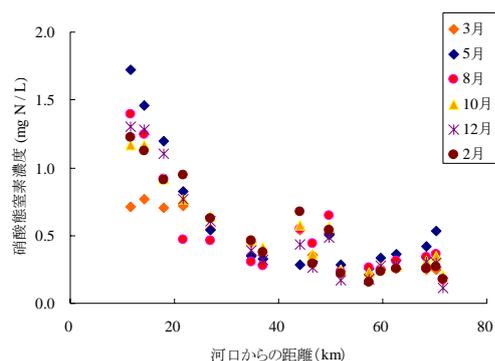


図3 豊川における硝酸態窒素濃度

間以上乾燥させ、粉末化した。

粉末化した試料の炭素・窒素安定同位体比は、元素分析計を接続した質量分析計 (Thermo Fisher Scientific 社製、Delta plus XL) で測定した。測定値は、次式のように標準物質からの千分偏差で表した。 $\delta X (\text{‰}) = (R_{\text{sample}} / R_{\text{standard}} - 1) \times 1000$ 、ここで、 X は ^{13}C もしくは ^{15}N 、 R は $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ もしくは $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ である。炭素の標準物質は PDB、窒素の標準物質は大気、測定精度は $\pm 0.2\text{‰}$ である。

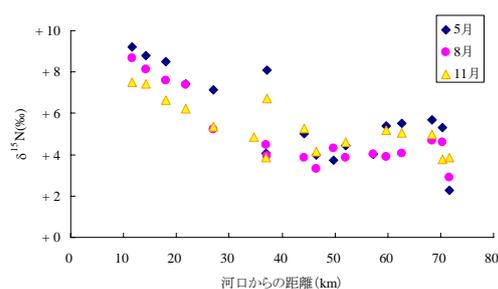
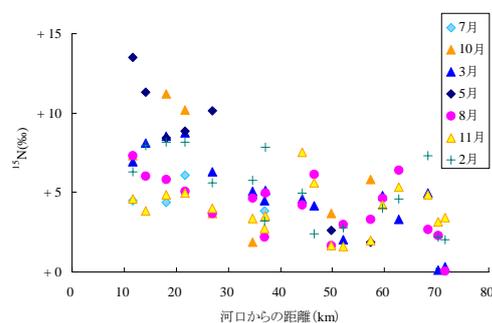
4. 結果と考察

4.1 河川生態系における窒素源の変化と河川生物の関係

豊川の硝酸態窒素濃度は、上流から下流にかけて上昇していた (図 3)。豊川流域では、80%以上を森林が占めているが (図 2)、下流ほど窒素負荷の大きい田、畑、市街地が増加しており、豊川の硝酸態窒素濃度の増加の要因となっている。季節変動は、下流部で大きく、河川生態系による無機態窒素の取り込み量が、水温や流量によって変化している可能性がある。

硝酸態窒素の窒素安定同位体比 (以下、 $\delta^{15}\text{N}$) は、上流から下流にかけて増加していた (図 4)。硝酸の $\delta^{15}\text{N}$ 値は、窒素由来により異なり、森林由来では、 $-2 \sim +5\text{‰}$ 、化学肥料由来では 0‰ 前後、下水・畜産廃棄物由来では、 $+10 \sim +25\text{‰}$ 程度である (米山 1987)。豊川の硝酸態窒素の $\delta^{15}\text{N}$ の上流から下流にかけての上昇は、田畑と市街地面積と正の相関があり、人為由来窒素の増加がその原因であることが窒素安定同位体比からも裏付けられた。

また、硝酸態窒素の $\delta^{15}\text{N}$ の流程による上昇は、季節によって異なっており、夏季の方が冬季よりも、同位体分別が大きい (図 4)。同位体分別は、硝酸態

図4 豊川における硝酸態窒素の $\delta^{15}\text{N}$ 図5 豊川における付着藻類の $\delta^{15}\text{N}$

窒素が消費される際に生じるが、ここでは生物による取り込みが、硝酸態窒素の同位体分別が生じる第一要因と推測される。豊川は下流ほど淵の面積が多く、瀬淵構造による生物活動の違いが、同位体分別に反映されている可能性がある。

河川の一次生産者である付着藻類の $\delta^{15}\text{N}$ 値も、硝酸態窒素と同様に、上流から下流にかけて増加していた (図 5)。付着藻類は、無機栄養塩類を河川水から取り込んで生長する。付着藻類と硝酸態窒素の $\delta^{15}\text{N}$ の高い相関は、流域の土地利用に応じて負荷された栄養塩が、河川生態系の一次生産者に取り込まれ、河川生態系の物質動態に影響を及ぼしている直接的な証拠である。

加えて、河川の消費者である水生昆虫の $\delta^{15}\text{N}$ もまた、付着藻類と同様に上流から下流にかけて増加していた (図 6)。ろ過食者と捕食者は、各地点でばらつきが小さかったが、付着藻類食者は、大きい。この違いは、現場の付着藻類への依存度に関連している可能性があるが、この点は今後の調査が必要であろう。水生昆虫の $\delta^{15}\text{N}$ の上昇は、窒素源として付着藻類が重要な餌資源であることを示していると同時に、流域の人間活動の影響を、食物連鎖を通して

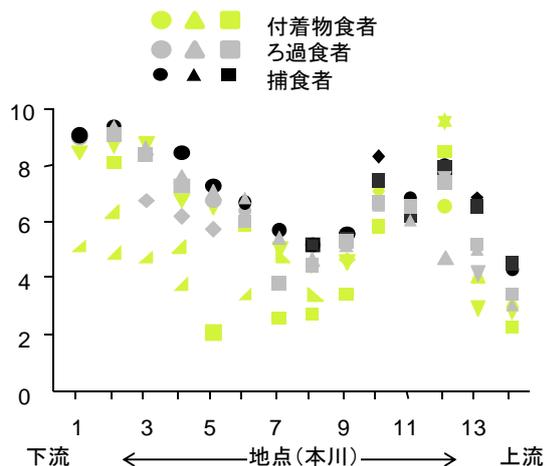


図6 豊川における水生昆虫の $\delta^{15}\text{N}$

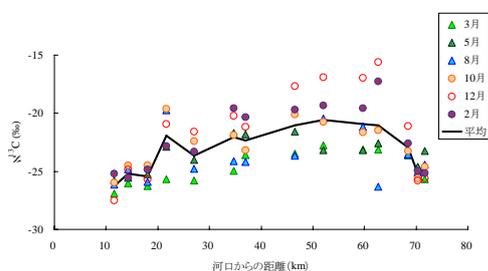


図7 豊川における流下有機物の $\delta^{13}\text{C}$

受けていることを示唆している。

人間活動により河川へ負荷された無機態窒素は、河川を流下し、湾へ到達する。湾では無機態窒素は、植物プランクトンの栄養源として機能しているが、その過剰な供給は、植物プランクトンを劇的に増加させるため、赤潮や貧酸素塊の原因となっている。我々の結果は、無機態窒素が河川生態系へ取り込まれることによってその形態を変え、沿岸へ到達する時間を遅くしている、もしくはその量を減衰させている可能性を示唆しており、今後、定量的な評価が望まれる。

4.2 豊川における流下有機物の炭素源と一次生産者の関係

流下有機物の $\delta^{13}\text{C}$ が、付着藻類の $\delta^{13}\text{C}$ よりも低いことから(図7, 8)、流下有機物が河川生産物だけでなく、流域からの外来性有機物である陸上生産物との混合物であることがみとれる。端成分モデルから算出した結果では、豊川を流下する流下有機物は、平均40%が河川生産物由来の物質で構成されており、残り60%が外来性の陸上生産物であった(図9)。

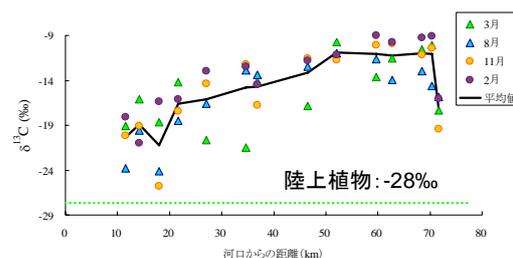


図8 豊川における付着物の炭素安定同位体比 $\delta^{13}\text{C}$

図9 豊川における流下有機物への付着物の寄与率

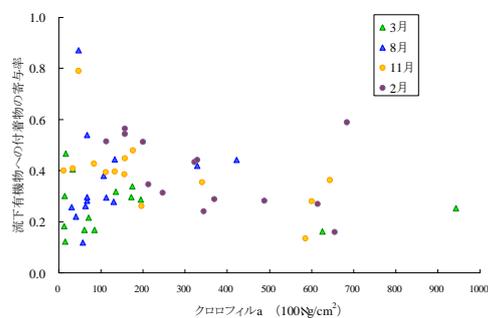
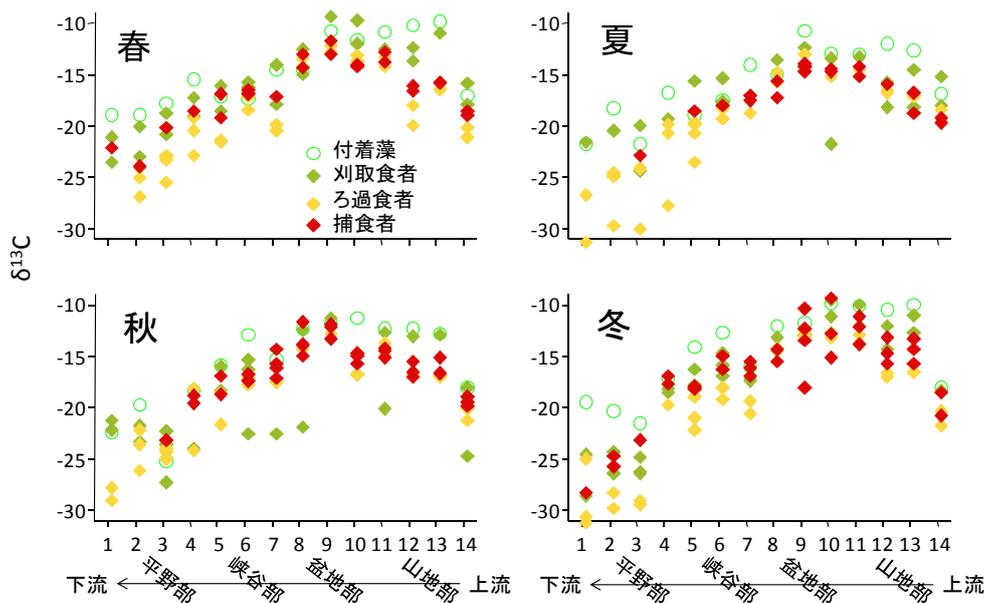


図10 豊川における流下有機物の付着物含有率とクロロフィルa量の関係

また、流下有機物に占める付着藻類の割合は、夏季に少なく、冬に多い傾向があった。河川流量変化による付着藻類の剥離なども関与している可能性があり、今後この点を明らかにしていく必要がある。

流下有機物に占める付着藻類の割合と現地の付着藻類の現存量を示すクロロフィルa量とは線形関係は見られなかった(図10)。流下有機物に占める付着藻類の割合は、クロロフィルa量が小さい領域では、広い変動幅を示しているが、クロロフィルa量が大きい領域では、一定の値に収斂している。このことは、流下有機物への付着藻類の寄与が、現地の

図 11 季節ごとの附着藻類および底生動物の $\delta^{13}\text{C}$

附着藻類の現存量に依存する場所と、外来性有機物に依存する場所があることを示しており、河川生態系の流下有機物への係わり方が、場所によって大きく異なることを示唆している。今後、瀬淵などの河道の地形構成、水生生物の附着藻類への摂食量などの検証を経て、評価していく必要がある。

4.3 河川生態系における炭素源の変化と河川生物の関係

図 11 に季節ごとの各地点における附着藻類と底生動物の $\delta^{13}\text{C}$ を示した。この図において底生動物は、摂食機能群別に表している。各季節各地点において全般的に、底生動物の $\delta^{13}\text{C}$ は附着藻類の $\delta^{13}\text{C}$ よりも低く、底生動物のなかでは刈取食者が高く、ろ過食者が低かった（例外的に、夏に一部の刈取食者が低い値を示した）。

附着藻類と底生動物の $\delta^{13}\text{C}$ から、底生動物に対する附着藻類の貢献度を推定した。ここで底生動物の食物起源として附着藻類と外来性有機物（落葉など）を想定し、各地点の附着藻類の $\delta^{13}\text{C}$ と外来性有機物の $\delta^{13}\text{C}$ （どの地点も一律 -28‰ と仮定）を用いた端成分モデルにより底生動物における附着藻類の貢献度を求めた。各地点において底生動物における附着藻類の貢献度は、刈取食者が高く、ろ過食者が低い傾向にあった（図 12）。刈取食者は礫面の附着藻類を主に食物とするのが一般的であり、流れている有機物を食物とするろ過食者よりも附着藻類の利用が多

いことが本研究でも示された。捕食者の $\delta^{13}\text{C}$ は、山地部や盆地部ではろ過食者と似たような値であるのに対して、峡谷部や平野部ではろ過食者よりは高い値であった。上下流によって捕食者の食物における刈取食者からろ過食者の貢献度が変わっていることが考えられる。

底生動物の $\delta^{13}\text{C}$ は上流から下流へ進む過程において、山地部から盆地部へ（上流から中流へ）は上昇するが、盆地部から平野部（中流から下流）にかけては下降した。季節による違いは認められるものの、上下流の流程パターンはどの季節においても明白であった（図 11）。上流から中流にかけて附着藻類や底生動物の $\delta^{13}\text{C}$ が上昇するのは既存研究からも示されている（Finlay 2001, Finlay 2004, Walters et al. 2007）。上流から中流へは、川幅が広がり河川上の樹冠がなくなって日射量が多くなるとともに、陸上有機物の供給が少なくなる。これにより①河川内では陸上有機物の分解によって生成される溶存炭素（低い $\delta^{13}\text{C}$ を持つ）から大気由来の溶存炭素（高い $\delta^{13}\text{C}$ を持つ）へと変わることで、②河川内の光合成が多くなることで水中の溶存炭素の濃度が減少すること、③附着藻類の光合成が多くなることで溶存炭素の需要が高まることによって、上流から中流へと附着藻類とそれを利用する底生動物の $\delta^{13}\text{C}$ が上昇すると言われている。

中流から下流にかけての $\delta^{13}\text{C}$ の減少については報告例がほとんどない。安定同位体比の流程による

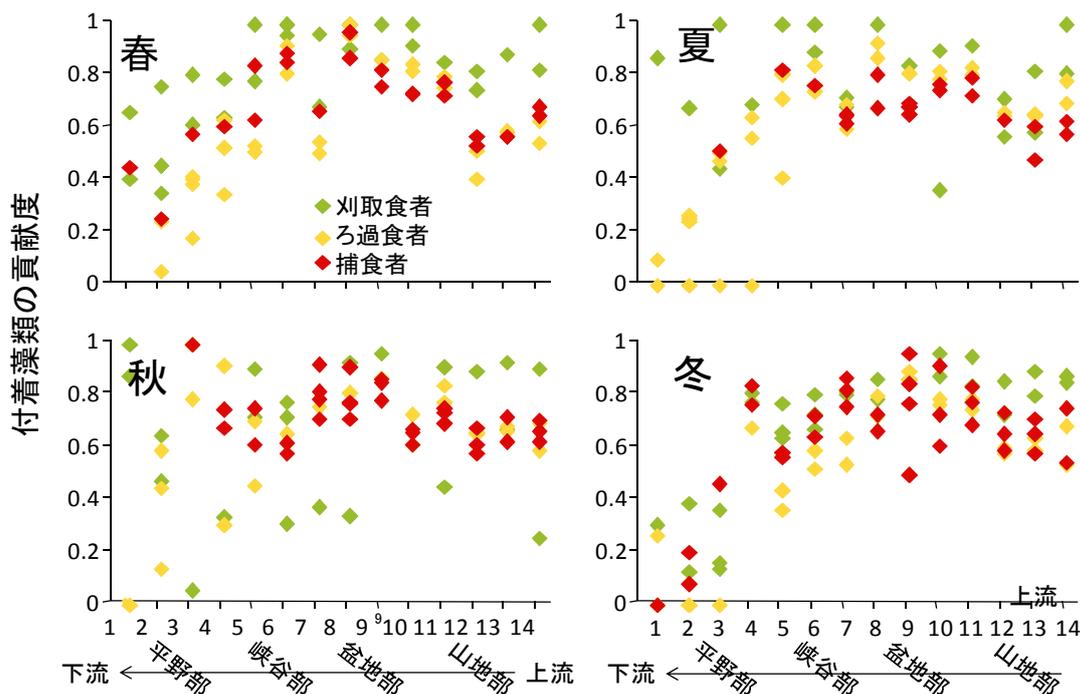


図 12 端成分モデルから求めた季節毎の底生動物の炭素起源に対する付着藻類の貢献度

変化の研究は、比較的上流で行われるものが多く、下流においてどの起源の有機物が底生動物の食物となっているかは未解明である。 $\delta^{13}\text{C}$ が減少する理由として、先に示した上流から中流への変化の逆のことが起こっていることが考えられる。例えば、河床の光合成が低下し、陸上有機物の供給が増えているかもしれない。

豊川の上下流を物理環境から見てみると、中流か

ら下流へかけては、流れの速い瀬に対して流れの遅い淵の占める割合が、特に峡谷部から平野部に入ると大きく増加する。瀬では付着藻類の生産が、淵では外来有機物の分解が相対的に活発であると仮定すると、下流における淵の増加によって付着藻類による光合成に対して外来性有機物の分解の割合が増加することは十分に考えられる。中流から下流にかけて付着藻類や底生動物の $\delta^{13}\text{C}$ が減少する1つの仮説として、このように淵の増加に伴う河川内における光合成に対する分解プロセスの台頭があげられる。

付着藻類と底生動物の $\delta^{13}\text{C}$ の差は上下流の地点によって異なり、盆地部で差が小さいのに対して、上流の山地部または下流の平野部で差が大きかった(図 11)。この結果、付着藻類の貢献度は、特に春と冬において、底生動物全般的に上流から中流へは高くなり、中流から下流へは低くなったと考えられる。ろ過食者では夏においてもそのような傾向がみられた。刈取食者と捕食者は夏と秋では、上下流方向の明瞭なパターンは見られなかった。付着藻類と底生動物の $\delta^{13}\text{C}$ の関係を図 13 に示す。この図では 1:1 線より点が離れるほど、付着藻類と底生動物の $\delta^{13}\text{C}$ の差が大きいことを表している。付着藻類の $\delta^{13}\text{C}$ が低い下流では、付着藻類と底生動物の $\delta^{13}\text{C}$ の差が大きい傾向があり、この傾向は夏と冬、またろ

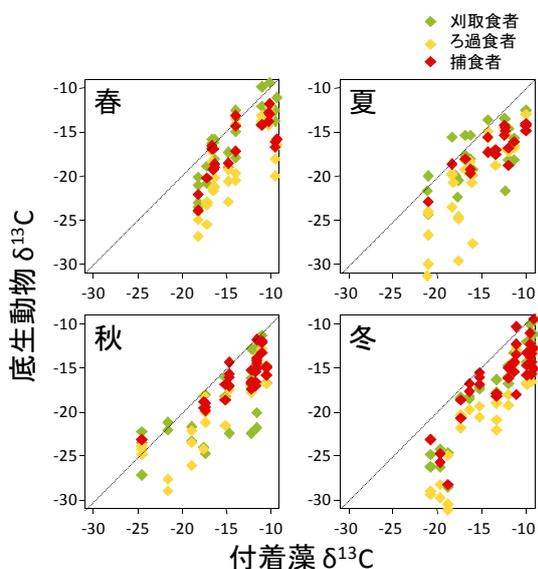


図 13 豊川の底生動物と付着藻類の $\delta^{13}\text{C}$ の関係

過食者で顕著であった。

この上下流の地点による付着藻類の貢献度の違いの1つには、流下有機物に占める付着藻類の割合が地点によって異なることが考えられる。ろ過食者は水中を流れている粒状有機物（流下有機物）を食物としている。このため中流から下流にかけて流下有機物に占める付着藻類の割合が減少すれば、底生動物に対する貢献度も減少しやすくなる。先述した淵の増加に伴って、付着藻類に対して外来性有機物や分解プロセスを受けた有機物の割合が増加している可能性は十分にある。

また上下流の地点によって、底生動物にとっての付着藻類と外来性有機物の食物価値が変わっている可能性がある。落葉などの外来性有機物は、リグニン等難分解性物質を含むため、一般に付着藻類に比べると底生動物にとって質の低い食物と考えられている。しかし、外来性有機物の質はそれを利用する微生物の付着によって大きく変化する。平野部といった下流の地点では、先述した淵の多さに加えて水温も相対的に高いことによって、有機物上の従属微生物が多く、上流の地点に比べると底生動物の食物としての価値が高まっているかもしれない。

N. まとめ

流域の土地利用に応じて負荷された窒素は、河床付着藻類に取り込まれ、消費者である底生動物にまで至っていることが窒素安定同位体比から明らかになった。また河川水における無機態窒素は、水温等の要因によって河川生態系への取り込み量が季節に

より変化していることが示唆された。

付着藻類と底生動物の炭素安定同位体比は、上流から中流にかけて上昇し、中流から下流にかけて低下することが分かった。上流から中流へは樹冠が開け河川内光合成が大きくなること、中流から下流へは淵が増加することによって分解系が台頭することを表しているものと思われる。

底生動物に対する付着藻類の貢献度は中流で高く、上流や下流では低かった。水中を流れている有機物に占める付着藻類と外来性有機物の割合、またそれぞれの底生動物の食物としての質が、上下流地点で異なっていると考えられる。

参考文献

- 1) Finlay JC : Stable-carbon-isotope ratio of river biota, implications for energy in lotic food webs, *Ecology*, 82, 1052-1064, 2001.
- 2) Finlay JC: Patterns and controls of lotic algal stable carbon isotope ratios, *Limnology and Oceanography*, 49, 850-861, 2004.
- 3) Walters DM, Fritz KM, Phillips DL: Reach-scale geomorphology affects organic matter and consumer in a forested Piedmont stream, *Freshwater Biology*, 52, 1105-1119, 2007.
- 4) 米山 忠克：土壌-植物系における炭素、窒素、酸素、水素、イオウの安定同位体自然存在比：変異、意味、利用, *日本土壌肥科学雑誌* 58, 252-268, 1987

STUDY ON THE RELATIONSHIP BETWEEN RIVER ECOSYSTEM AND MATERIAL CYCLING IN A RIVER

Abstract : We focused on the quantitative evaluation of the influence of physical condition to river ecosystem through the nutrient and/or material cycling. In the Toyo River, we investigated that how land use affect water quality from the sources to river mouth, and which nutrient and organic sources support the river ecosystem, using stable isotope analysis. Our results showed that the energy sources of macroinvertebrates were mainly depended on aquatic production, which combined with derived from terrestrial organic matter in the upstream, potamic organic matter in the middle reaches, and allochthonous organic matters in the downstream. Our results also exhibited the riverine organisms took up from nutrients form terrestrial environment affected by the human activity through the food webs.

Key words : nutrient dynamics, the Toyo River, macro invertebrates, attached algae, stable isotopic composition,, land use, organic matter