

13.8 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：三輪準二、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流下有機物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、その由来と質の変化を明らかにし、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。流域の土地利用変化による窒素負荷量増加が、食物網内の物質循環を改変していることを示し、人為由来窒素が食物網を介して高次の栄養段階へ伝播していることを安定同位体比解析から明らかにした。河川の物理環境・流況変動による底生動物の生物量変化は、無機態よりも有機態の物質動態に影響が顕著であることを明らかにした。窒素などの栄養塩濃度と、摂食機能群を問わず底生動物の現存量の関係は明瞭には認められなかったが、一方で栄養塩濃度の上昇が底生動物の種組成の単純化を招いている可能性を明らかにした。特に緩勾配の礫河床でこの傾向が強く、広域データからは、酸素消費量の増大が遠因であることが示唆された。河川生態系における底生動物の現存量は、栄養塩濃度よりも河床材料や流量などの河道特性に依存する部分が大きく、水生生物を介した物質循環を理解するには、河床材料や流量などの河道特性の把握が重要であることを示した。

キーワード：物質動態、豊川、底生動物、付着藻類、安定同位体、栄養塩、有機物

1. はじめに

河川生態系は、河川内生産物だけでなく、陸域からも物質、栄養塩、生物が流入しており、河川地形と密接な関係を持ちながら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質である。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としての役割を担っている。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。

豊川を対象に、(1) 集水域の人為由来窒素の動態、(2) 河川食物網における炭素源の流程変化、(3) 水質と底生生物の関係、(4) 河床の底生生物

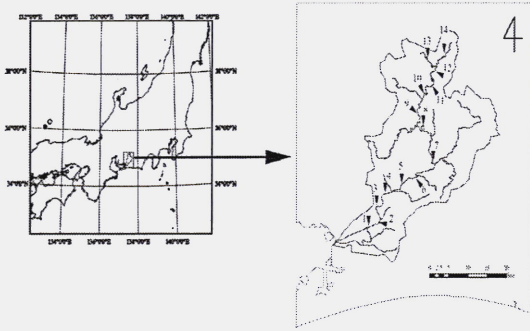


図-1 豊川の調査地点

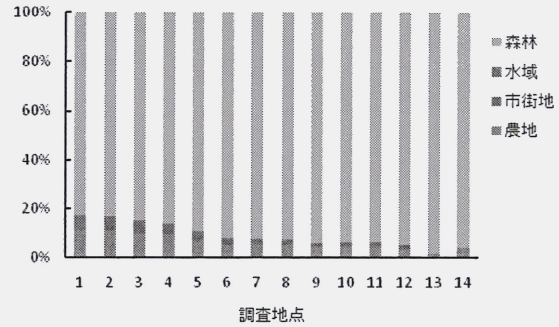


図-2 豊川集水域の土地利用割合

を組み込んだ河川水質変化モデルによる栄養塩・有機物の流下量変化の評価を行った。

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」が存在する。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での河川利用率は高く、地域住民の親水場としても機能を果たしている。

3. 集水域における人為由来窒素負荷

3.1 調査方法

豊川本川沿いの上流から下流の14調査地点を設定した(図-1)。最下流地点は、感潮域よりも上流に位置する。河川水は、各調査地点で1~5Lポリタンクを用いて採水した。採水は、季節変化を考慮するため2007年5月、8月、11月、2008年2月の年4回、出水の影響を排除するため5日間以上降雨のなかった日を選んで行った。加えて、森林由来窒素の窒素安定同位体比を得るため、源流域の支流(図1、調査地点1と2の支流)で採水を行った。採水した試水は、冷却して速やかに実験室に運び、ガラス繊維フィルター(Whatman, GF/C, 平均孔径1.2μm)でろ過後、-30℃で保存した。

付着藻類は、各地点の瀬から選んだ5つの礫(粒

径10~20 cm)についてそれぞれ表面をブラシで擦り採集した。採集物は水生昆虫やデトリタスを除去し、60度で24時間乾燥後、粉末化した。

3.2 化学分析

ろ過した試水のNO₃-N濃度は、Bran Lube社製のAACS-IIIで決定した。NO₃-Nの精製は、Sakata 2001の手法に準じて行った(Sakata 2001)。精製したNO₃-Nのδ¹⁵Nは、元素分析計(FlashEA 1112, Thermo Electron)を接続した安定同位体比質量分析計(Delta plus XL, Thermo Electron)で測定した。測定値は下記のように千分偏差で表した。

$$\delta^{15}\text{N}(\text{‰}) = (R_{\text{試料}}/R_{\text{標準試料}} - 1) \times 10^3$$

ここでRは¹⁵N/¹⁴N、標準試料は大気である。ワーキングスタンダードの分析精度は0.2‰以内であった。

3.3 集水域の土地利用の算出

各調査地点の土地利用を、地理情報システム(GIS, ArcGIS 9.3, ESRI)で決定した。GIS解析は、国土交通省国土計画局の数値地図50mメッシュ(標高)及び、1/10細密度土地利用メッシュを用いた。本研究では、土地利用を農地(田+畑)、森林、市街地(宅地+幹線交通+その他用地)、水域(河川+湖沼)の4つに区分した(図-2)。農地、森林、市街地を窒素負荷源の面源とした。点源として人、牛、豚を扱った。人口については総務省統計局の国勢調査データを使用し、牛と豚の頭数は農林水産省の農林水産統計データを基に、それぞれのデータをGISメッシュに格納し、集水域ごとに割り振った。広域下水道、地域下水道及び農業集落排水地域については、下水処理されている人口として扱った。排水鶏の排泄物については、鶏糞として全て農地で利用されているものとし、点源としては考慮していない。

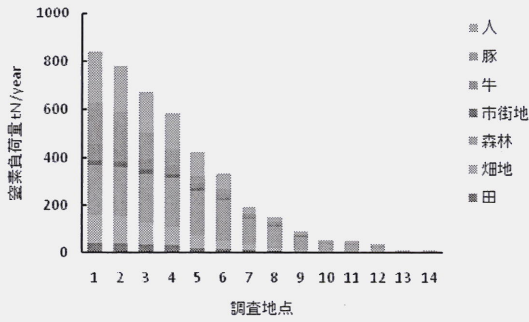


図3 豊川集水域の窒素負荷量

3.4 窒素負荷量の算出

GIS で算出した各集水域の土地利用面積に原単位を乗じて、面源からの窒素負荷量を算出した。点源(人、牛、豚)も同様にそれぞれの集水域ごとの人口・頭数に窒素負荷量を算出した。原単位は、森林：3.93kgN/ha/year、畑地：32.93kgN/ha/year、田：10.12kgN/ha/year、市街地：12.19kgN/ha/year、人：9gN/capita/day、牛：290gN/head/day、豚：40gN/head/dayの値を用いた(川島ほか、2009)。

3.5 硝酸態窒素の窒素安定同位体比の予測値

各調査地点におけるNO₃-Nのδ¹⁵Nの予測値は、土地利用割合及び窒素負荷量割合で各窒素源のδ¹⁵Nを積み付けし積算する2つの方法で求めた。土地利用割合を用いた予測は、次式で表したように、各集水域の土地利用割合に土地利用ごとの窒素負荷源のδ¹⁵Nを乗じて求めたものである(Vander Zanden et al. 2005)。

$$\delta^{15}\text{N}_{\text{予測値}}(\text{土地利用割合}) = A_{\text{森林}} \times \delta^{15}\text{N}_{\text{森林}} + A_{\text{農地}} \times \delta^{15}\text{N}_{\text{農地}} + A_{\text{市街地}} \times \delta^{15}\text{N}_{\text{市街地}} + A_{\text{水域}} \times \delta^{15}\text{N}_{\text{水域}}$$

ここで、Aは各集水域の総面積に対する各土地利用割合、δ¹⁵Nはデンマークの27の湖沼の集水域で検証された値を用い、それぞれ森林3%、農地13%、市街地21%、水域9%の値を使った(Vander Zanden et al. 2005)。

窒素負荷量割合を用いた予測は、各調査地点の総窒素負荷量に占める各窒素負荷源の割合を算出し、各窒素負荷源割合に各窒素負荷源のδ¹⁵Nを乗じて次式の形で求めた。

$$\delta^{15}\text{N}_{\text{予測値}}(\text{窒素負荷量割合}) = \text{NL}_{\text{森林}} \times \delta^{15}\text{N}_{\text{森林}} + \text{NL}_{\text{農地}} \times \delta^{15}\text{N}_{\text{農地}} + \text{NL}_{\text{市街地}} \times \delta^{15}\text{N}_{\text{市街地}} + \text{NL}_{\text{人}} \times \text{下水処理削減率} \times \delta^{15}\text{N}_{\text{人}} + \text{NL}_{\text{牛}} \times \text{家畜屎尿処理削減率} \times \delta^{15}\text{N}_{\text{牛}} + \text{NL}_{\text{豚}} \times \text{家畜屎尿処理削減率} \times \delta^{15}\text{N}_{\text{豚}}$$

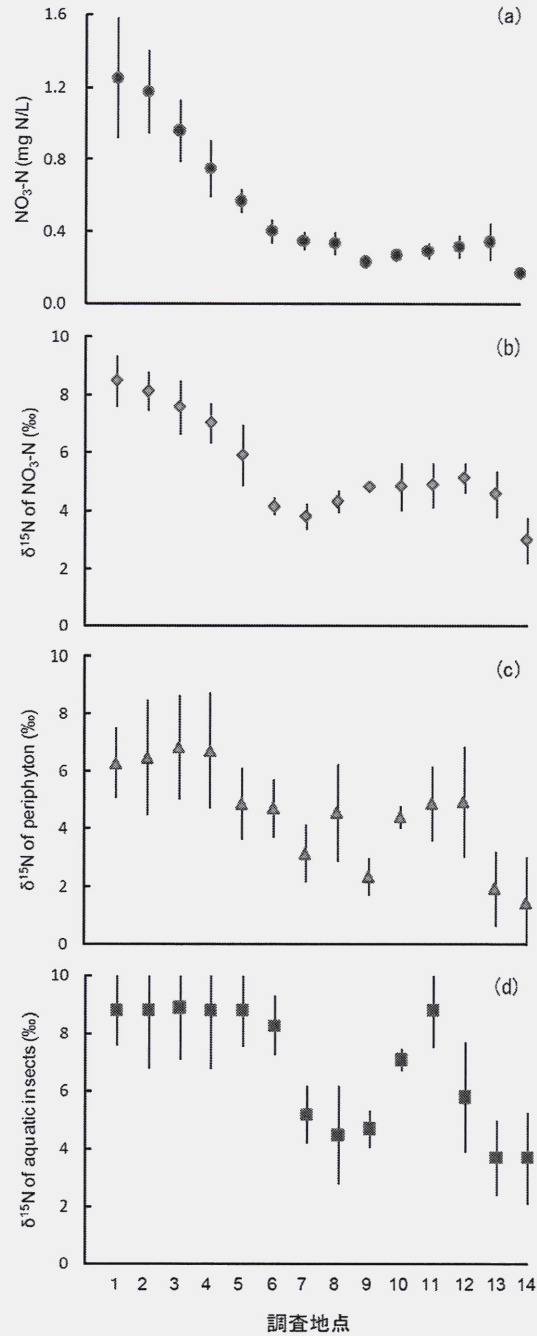


図4 豊川における硝酸態窒素の(a)濃度と(b)窒素安定同位体比(c)付着藻類の窒素安定同位体比(d)水生昆虫の窒素安定同位体比

ここで、NLは各集水域における総窒素負荷量に占める各窒素負荷量の割合、δ¹⁵Nは、同条件で比較するために上述の土地利用割合の予測モデルで使用した同じδ¹⁵Nと、豊川集水域において想定される各窒素源のδ¹⁵Nの低値(森林:3%、農地:5%、市街地:13%、人・

牛・豚:13%)を観測値と文献値(鈴木ほか 2009、Toda *et al.* 2002、山田ほか 2002)から推定して使用した。下水処理のされていない地域の由来窒素については、下水処理による窒素削減率を0%として計算を行った。また、下水処理施設の窒素削減率については、複数のタイプの処理施設が混在していることから、40%から80%の間で変動させて計算を行った。家畜尿尿処理施設の窒素削減率は60%とした(川島ほか 1997)。

3.6 豊川集水域の土地利用と窒素負荷

豊川における上流から下流にかけての河川水中の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の上昇は(図-4)、集水域の人間活動による窒素負荷量の増加に応じて起きている。窒素負荷量は、単位面積当たりで森林に対し農地で約11倍、市街地で約3倍高く(川島ほか 1997)、農地及び市街地面積の増加は、集水域の窒素負荷量増加に直結している。豊川集水域の土地利用は、森林面積が最上流地点で96%、最下流でも82%を占めており(図-2)、森林面積が占める割合が高い。豊川集水域は森林が優占する土地利用ではあるが、高い窒素負荷量を持つ農地と市街地面積の増加はわずかでも窒素負荷量増加へ寄与するだろう。これらの面源から負荷される窒素量の増加に加え、下水や畜産尿尿などの点源からの窒素負荷量はさらに多い。原単位法で算出した総窒素負荷量に占める点源の割合は、最上流地点でも15%、最下流地点では55%を占めるに至っており、下水由来窒素及び畜産尿尿由来窒素の負荷量の影響が大きい。

3.7 安定同位体比からみた豊川の硝酸態窒素の起源

豊川の $\text{NO}_3\text{-N}$ の $\delta^{15}\text{N}$ は、上流から下流にかけて上昇しており、低い $\delta^{15}\text{N}$ を持つ森林由来窒素から高い $\delta^{15}\text{N}$ を持つ人為由来窒素に窒素負荷源が移行していることを示している。下流ほど人為由来窒素の負荷が大きいことが原単位から求めた窒素負荷量から示唆されたが、窒素安定同位体比解析からもこの事実が裏付けられている。河川水中の $\text{NO}_3\text{-N}$ の $\delta^{15}\text{N}$ の上昇に、下水由来窒素及び家畜尿尿由来窒素が大きく寄与している事実は、多くの研究で報告されている(e.g. McClelland *et al.* 1997、Toda *et al.* 2002、永田と宮島2008)。

しかし、安定同位体比解析だけでこれらの窒素負荷源から河川水中の $\text{NO}_3\text{-N}$ の $\delta^{15}\text{N}$ の上昇への寄与率を独立に求めることは難しい。豊川では、下水由来窒素及び家畜尿尿由来窒素は、下流ほど増加するという同

じ傾向を有しており、それぞれの $\delta^{15}\text{N}$ も近い値を持っているためである。この点については、山間部から平野部にかけて経済活動が活発になる日本の土地利用の共通事情であり、多くの河川で同様の問題が生じると考えられる。

3.8 硝酸態窒素の $\delta^{15}\text{N}$ の予測値と観測値との差について

集水域の土地利用割合を用いて算出した $\text{NO}_3\text{-N}$ の $\delta^{15}\text{N}$ は、観測値が高いほどずれが大きく、予測値が低く見積もられていたが、一方で窒素負荷量割合を用いて算出した $\text{NO}_3\text{-N}$ の $\delta^{15}\text{N}$ は、全体的に高く見積もられていた。土地利用割合を用いた算出では、単位面積当たりの窒素負荷量の違いが考慮されていないため、相対的に負荷量が高く、高い $\delta^{15}\text{N}$ を持つ人為由来窒素が過小評価されたためである。対して、単位面積当たりの窒素負荷量の違いを考慮している窒素負荷量割合を使用した場合のずれは、人為由来窒素を過大評価した結果であると考えられる。

集水域の窒素負荷量割合から求めた $\text{NO}_3\text{-N}$ の $\delta^{15}\text{N}$ において、下水処理水由来の負荷量を低減させると(すなわち、下水処理施設の窒素削減率を上げる)、75%の削減率で予測値と観測値がほぼ1:1の関係になった。本研究では、下水処理施設の窒素削減率を40%から80%の間で変動させて検証したが、高度処理が可能な下水処理施設ほど、窒素削減率が高い。実際、豊川集水域の下水処理施設では、東栄町の施設において年平均で93%の窒素削減率を達成していることが報告されている(日本下水道協会 2010)。公共下水道や農業集落排水施設などの窒素除去率は、地域によって異なることが予想される。本研究の下水処理施設による窒素削減率の推定は、集水域全体の下水処理施設の窒素削減率として算出されていることになる。窒素削減率の他に、各窒素源の $\delta^{15}\text{N}$ の値も地域性を有している場合があり、対象地域ごとに窒素源の $\delta^{15}\text{N}$ を測定しておくことが望ましい。また、安定同位体比解析を使って過去のデータを検証する際には、窒素源の $\delta^{15}\text{N}$ の年変動や季節変動にも留意する必要がある。集水域の窒素負荷量情報と窒素安定同位体比解析を組み合わせて値を検証することによって、より精度の高い窒素負荷量推定が可能になるだろう。

本研究では、各窒素源の $\delta^{15}\text{N}$ を保存量とみなし、単純な混合モデルで現地の $\text{NO}_3\text{-N}$ の $\delta^{15}\text{N}$ を予測できることを示した。河床勾配や河床材料、瀬淵構造などの河川構造の違いによっては、窒素の消失過程におけ

る同位体分別を考慮する必要がある可能性もある。

3.9 人為由来窒素の食物網への伝播

集水域からの窒素負荷により、河川水中の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が上昇し、下流ほど下水処理水などの人為由来窒素が多く含まれていた (図-3)。河川の上流から下流にかけての $\delta^{15}\text{N}$ の上昇は、 $\text{NO}_3\text{-N}$ だけでなく、付着藻類と水生昆虫も下流ほど上昇していた。これらの $\delta^{15}\text{N}$ の上昇は、人為由来窒素が河川生態系の一次生産者である付着藻類に取り込まれ、付着藻類を餌資源として利用している水生昆虫にまで到達していることを示唆している (図-4)。集水域の人間活動は、河川生態系内の窒素動態を自然由来から人為由来窒素へ改変させている。

4. 河川食物網における炭素源の流程変化

4.1 試料採集と分析方法

河川食物網における炭素源の流程変化を調べるため、豊川本川の上流から下流の14地点で調査を行った (図-1)。最下流の地点は本川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: $0.12\mu\text{m}$) で濾し、濾液の一部は、Bran Luebee社のAACS-IIIを用いて硝酸態窒素濃度を測定した。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: 0.1mm) で捕捉された有機物を用い、篩で $100\mu\text{m}$ (FPOM: fine particulate organic matter)、 $100\text{-}250\mu\text{m}$ (MPOM: medium particulate organic matter)、 $250\text{-}1000\mu\text{m}$ (CPOM: coarse particulate organic matter) の3つの粒径区画に分け、分析に供した。

付着藻類は、各地点の瀬から選んだ5つの礫 (粒径10—20cm) についてそれぞれ表面をブラシで擦り採集し、採集物は水生昆虫やデトリタスを除去し

た。

試料は、60度で24時間乾燥後、粉末化した。粉末化した試料の炭素安定同位体比は、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。 $\delta^{13}\text{C}(\text{‰}) = ({}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}_{\text{sample}} / {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}_{\text{standard}} - 1) \times 1000$ 。標準物質はPDBで、ワーキングスタンダードの測定精度は $\pm 0.1\text{‰}$ である。試料の炭素および窒素の含有量は、元素分析計で測定した。

4.2 流下有機物の質と起源

FPOMは、MPOMとCPOMに比べて、陸上植物由来物質の寄与度が高かった (図-6)。剥離した付着藻類が粗粒分画に流入し、生物による分解を経て、細粒分画ほど付着藻類由来物質が減少した結果だと考えられる。MPOMやCPOMに含まれる付着藻類由来物質は、陸上植物由来物質に比べて低いC/Nを持っており、消費者に利用されやすい (Sterner and Elser 2002)。FPOMのような細粒分画ではリグニンやセルロースなどの陸上生産由来物質が多く含まれていると報告されており (Edwards 1987, Kaiser *et al.* 2004, Yoshimura *et al.* 2008)、これらの結果と一致する。

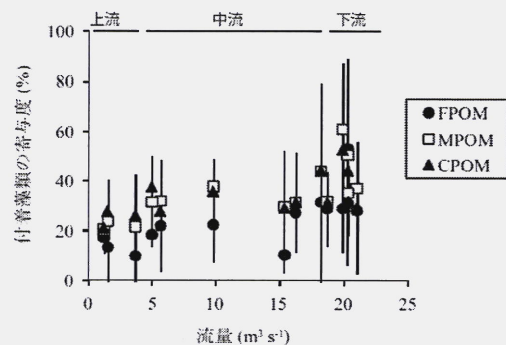


図6 粒状有機物における付着藻類の寄与度と流量の関係

付着藻類の含有率という点からは、MPOMとCPOMは、FPOMよりも消費者に利用されやすいと考えられるが、MPOMとCPOMのC/Nは、FPOMよりも高い値を示していた (図-7b)。細粒分画の粒状有機物における低いC/Nは、多くの研究で報告されており、これらの

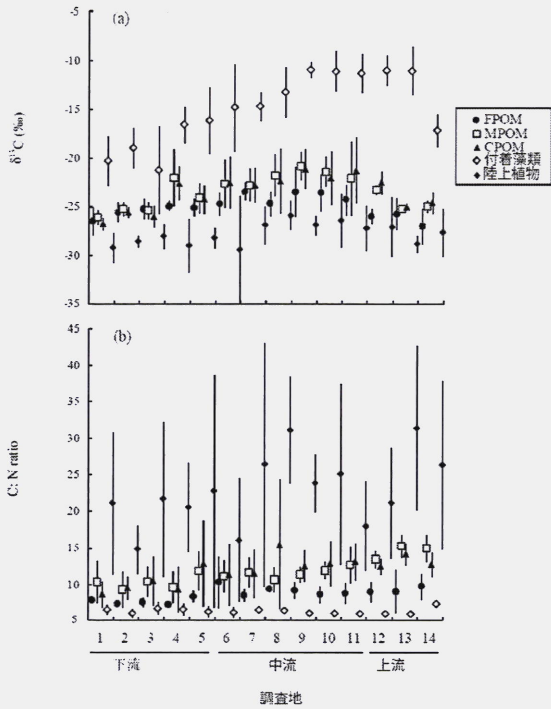


図-7 豊川における流下有機物、付着藻類、陸上植物の炭素安定同位体比 (a) と C/N 比 (b)

結果と一致した。付着藻類含有率の他にも、細粒化に伴う体積当たりの表面積の増加が微生物の増加に寄与し、低い C/N を持つ微生物が粒状有機物の C/N の低下を促進させている可能性がある (Findlay et al. 1986, Jones and Lock 1993)。

上流から下流にかけての粒状有機物の付着藻類含有率は上昇傾向にあったが、大枠では河川流量の増加で説明可能かもしれない。特に冬季でその傾向が顕著であった。冬季は、水生昆虫などの底生動物による捕食圧低下と出水の少ない安定した流量が付着藻類の現存量増加を促進し、流量増加に応じて付着藻類の剥離量が増加し、粒状有機物に流入していることが示唆される。しかしながら、中流から下流にかけては変動が大きく不明瞭である。

全てのサイズ分画の粒状有機物の C/N は、上流から下流にかけて低下していた。この C/N の低下は、上流から中流にかけては低い C/N を持つ付着藻類の含有率の上昇で説明可能である。しかし、中流から下流にかけての各サイズの粒状有機物の C/N 低下は、付着藻類の含有率では説明がつかない。C/N を下げる要因としては、付着藻類の他に植物プランクトンの寄与が考えられるが、調査地では植物プランクトンが繁殖できるような大規模な湖やダム湖は存在しないため、これらの寄与は小さいだろう。もう一つの可能性としては、流域からの栄養塩負荷の増加が考えられる。NO₃-N 濃度は、下流ほど増加しており、粒状有機物に吸着されやすくなっているかもしれない。加えて、NO₃-N は微生物の主要な栄養源であり、下流ほど微生物の生物量が増える要因になっている。低い C/N を持つ微生物の増加は粒状有機物の C/N を押し下げている可能性がある。

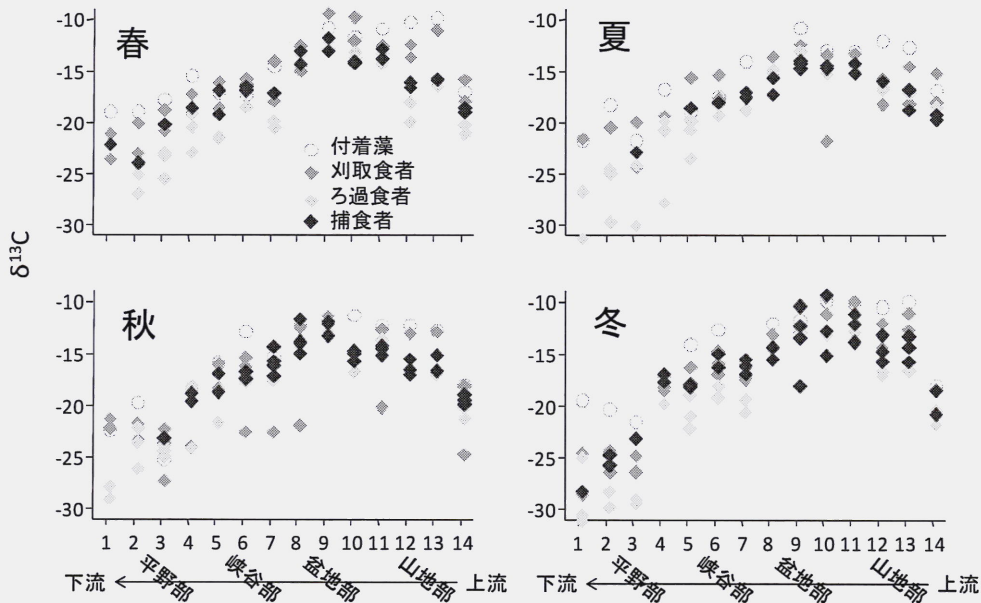


図-8 季節ごとの付着藻類および底生動物の $\delta^{13}C$

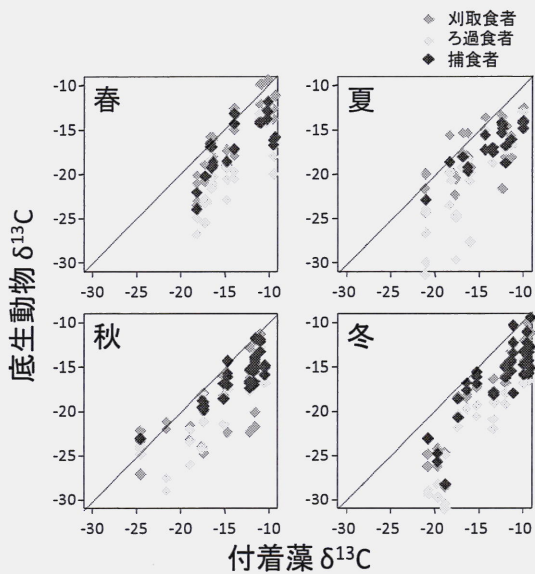


図-9 豊川の底生動物と付着藻類の $\delta^{13}\text{C}$ の関係

4.3 水生昆虫の餌資源利用変化

図8に季節ごとの各地点における付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 $\delta^{13}\text{C}$ は付着藻類の $\delta^{13}\text{C}$ 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(図-9)。例外的に、夏に一部の刈取食者が低い値を示した。

付着藻類と底生動物の $\delta^{13}\text{C}$ から、底生動物に対する付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付着藻類と外来性有機物(落葉など)を想定し、各地点の付着藻類の $\delta^{13}\text{C}$ と外来性有機物の $\delta^{13}\text{C}$ を用いた端成分モデルにより底生動物における付着藻類の貢献度を求めた。各地点において底生動物の餌資源における付着藻類の貢献度は、刈取食者が高く、ろ過食者が低い傾向にあった(図-10)。刈取食者は礫面の付着藻類を主に餌資源として利用しており、流れている有機物を餌資源として利用しているろ過食者よりも付着藻類の利用が多いことが安定同位体比からも裏付けられた。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。流程によって捕食者が餌資源としての刈取食者とろ過食者への依存度が変わっていることが示唆された。

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-8)。上流から中流にかけて付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

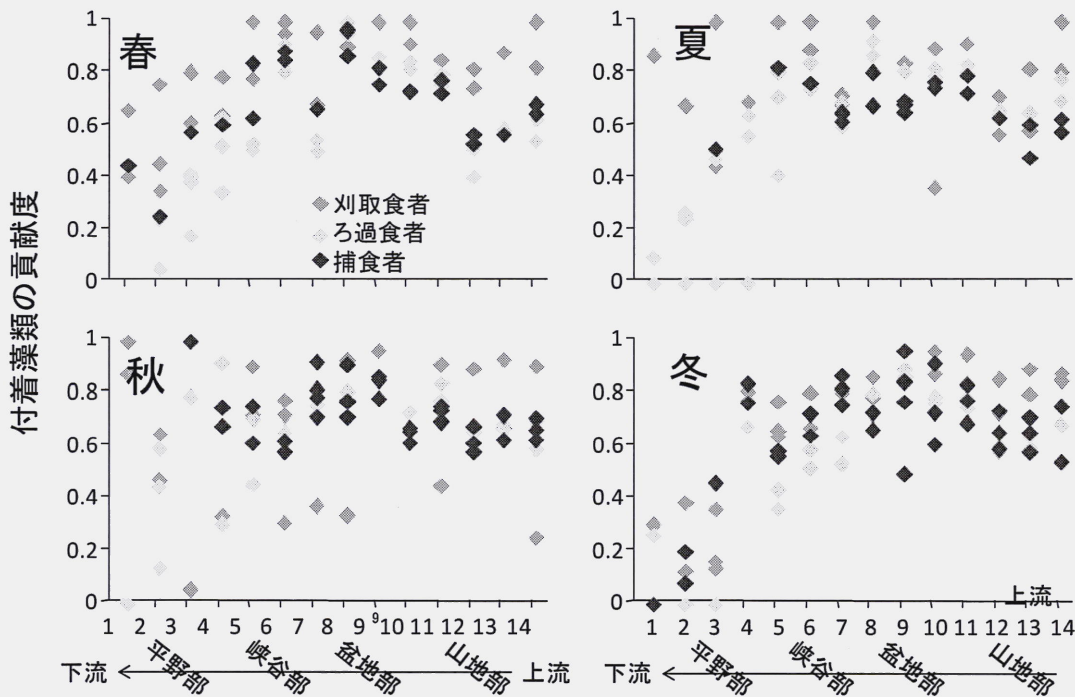


図-10 端成分モデルから求めた季節毎の底生動物の炭素起源に対する付着藻類の貢献度

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、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付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、上流から中流へと付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-8)。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。

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い可能性があり、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。

5 栄養塩と水生昆虫の現存量及び出現種数の関係

流域から河川への過度な栄養塩流入は、河川環境の富栄養化をもたらしている。一方で、食物網の基礎エネルギーである付着藻類や従属微生物の生産において栄養塩は必須であり、河川生態系は栄養塩なしでは成立しない。栄養塩は食物網への取込を通して生態系に制御されている面もあるだろう。河川生態系にとって栄養塩は少ないほど良いと考えるのではなく、豊かな生態系を保つことが出来る栄養塩レベル、食物網への取込によって生態系が許容しうる栄養塩レベルについて理解していく必要がある。

栄養塩と水生生物の関係を理解するには、理想的には他の要因が同じで栄養塩濃度が異なる地点間で生物群集が比較されるべきである。しかし、野外では水質とともに様々な要因が同時に変化している場合が多い。これまで河川水質と生物群集の関係について多数報告されてきたが、水質以外の要因の影響をうまく排除した報告は少ないように思われる。河川では上下流の地点を一緒に解析することがしばしば行われ、生物群集の変化が水質によるものなのか、または単に上下流の変化によるものなのか判断できない場合は多い。本研究では河川水辺の国勢調査(以下、水国)による多数地点の生物データを利用して、栄養塩と底生動物群集の関係について検討する。その際、地点を物理条件によって区分し、同様の物理条件を持つ地点間において栄養塩と底生動物群集の

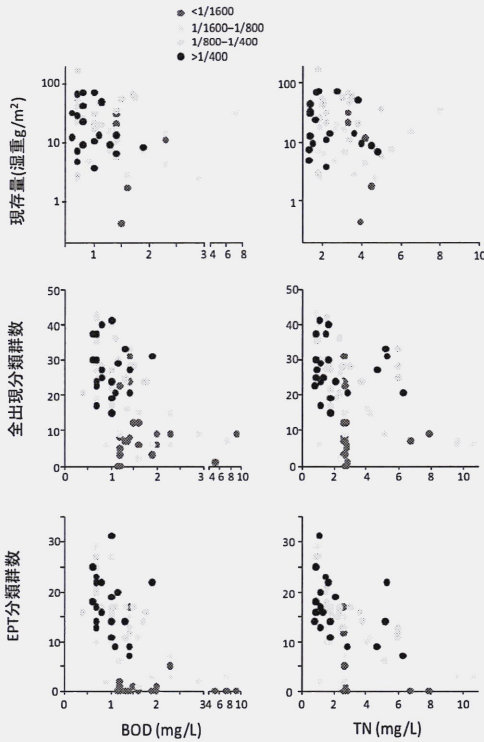


図-11 河床勾配別の水質と底生動物の関係

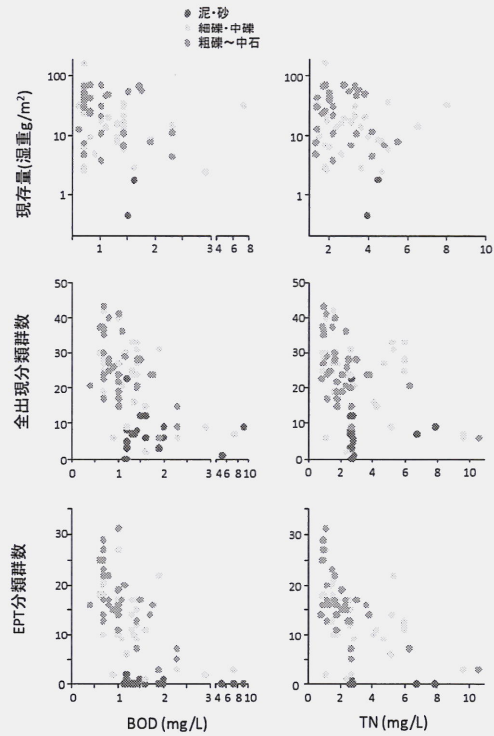


図-12 河床材料別の水質と底生動物の関係

関係がみられるか確かめた。

5.1 方法

水国の底生動物の3巡目調査(2001~2006年度)における定量調査データを対象とした。関東地方において汽水域を除く調査地点はちょうど100地点存在する(そのうち底生動物データが利用可能なのは90地点)。水国では各地点における水質データは水温や電気伝導度等しか記録されていない。したがって、各調査地点の水質は近隣の水質観測所のデータを基に推定する必要がある。水文水質データベースより各調査地点から5km圏内にある水質観測所を抽出し、観測所の水質データを各調査地点に対応づけた。この際、対応付けした観測所と調査地点の間に、大きな支流の流入、局所的な市街地や浄水処理場など、水質を大きく変える要因が存在しないことを確かめた。最終的に水質データの対応づけができた地点数は80であった。

各調査地点の底生動物の情報として全底生動物現存量(湿重 g/m^2)、全出現分類群数、カゲロウ・カワゲラ・トビケラ(EPT)出現分類群数を扱った。水国では各河川において2001~2006のいずれかの年度に基本的に3回調査が行われているが、地点間で必ずしも時期が揃っているわけではなく、本研究

では水生昆虫が多い冬または春のデータ(2つある場合はその平均)を対象とした。25地点で利用可能な現存量データがなかった。水質データのうち富栄養化や栄養塩負荷の指標となりうる生物酸素要求量(BOD: mg/L)、全窒素(TN, mg/L)について整理した。各地点において2001年から2006年に取られた全データの中央値を算出した。中央値を算出する際、観測時期に偏りが出ないように前もってデータを抜粋した。

水質と底生動物の関係をSpearmanの順位相関係数(r_s)で検定した。検定は全地点を対象にするとともに、地点を物理環境で区分し、区分毎にも検定を行った。各地点が持つ物理データのうち、河床勾配と河床材料は地点の情報を表す信頼性の高いデータである。河床勾配は任意に4区分(<1/1600、1/1600-1/800、1/800-1/400、>1/400)、河床材料は任意に3区分(砂・泥:<2mm、砂利・小礫:2-50mm、礫:>50mm)を行った。

5.2 結果

全地点を対象に水質と底生動物の関係をみると、全底生動物現存量はBOD($r_s: -0.21, p=0.097$)とTN($r_s: -0.13, p=0.31$)のいずれとも有意な関係はなかった。一方、全分類群数はBOD($r_s: -0.52, p<0.001$)お

よび TN ($r_s: -0.44, p < 0.001$) と有意な負の関係が見られた。EPT 分類群数についても BOD ($r_s: -0.62, p < 0.001$) および TN ($r_s: -0.56, p < 0.001$) と同様に負の関係がみられ、関係は全分類群数の場合よりも強かった。

河床勾配区分ごとに見ると、全現存量についても BOD ($r_s: -0.25 \sim 0.11, p > 0.40$) や TN ($r_s: -0.46 \sim 0.09, p > 0.11$) との有意な関係は見られなかった (図-11)。全分類群数については 1/1600-1/800 の区分のみ BOD ($r_s: -0.86, p < 0.001$) や TN ($r_s: -0.64, p = 0.014$) と有意な負の関係がみられた。1/1600-1/800 の区分で EPT 分類群数においても同様の関係がみられ、全分類群と比べると関係の強さは同等かもしくは小さかった [BOD ($r_s: -0.79, p = 0.001$), TN ($r_s: -0.58, p = 0.030$)]。EPT 分類群数について 1/800-1/400 の区分でも BOD ($r_s: -0.58, p = 0.006$) や TN ($r_s: -0.69, p < 0.001$) との有意な負の関係がみられた。>1/400 の区分では水質と底生動物のいずれの関係も有意ではなかった。

現存量については河床材料のいずれの区分においても BOD ($r_s: -0.16 \sim 0.11, p > 0.40$) や TN ($r_s: -0.74 \sim -0.06, p > 0.26$) との有意な関係は見られなかった (図-12)。全分類群数については礫の区分のみ BOD ($r_s: -0.49, p = 0.004$) や TN ($r_s: -0.51, p = 0.002$) と有意な負の関係がみられた。礫の区分では EPT 分類群数についても BOD ($r_s: -0.61, p < 0.001$) や TN ($r_s: -0.58, p < 0.001$) と同様の関係がみられ、全分類群数のときよりも強い相関が検出された。砂利・小礫の区分では EPT 分類群数において BOD との関係に有意性がみられたが ($r_s: -0.47, p = 0.006$)、砂・泥の区分ではいずれの関係も有意性はみられなかった。

5.3 考察

地点全体を対象としても、各物理場区分でも、底生動物現存量は BOD や TN と明瞭な関係を示さなかったことから、水質の現存量に対する影響は他の要因に比べると限定的だと考えられる。少なくとも TN は 3mg/L、BOD は 1.5mg/L 程度までは、現存量の上限値にも低下が見られないことから、現存量への影響は小さいと推察される。本研究以外にも全国一級河川の豊川、那珂川、久慈川、鬼怒川、千曲川、手取川の上下流様々な地点で底生動物の研究を行っているが、TN では 2mg/L 以下の地点がほとんどであり、全現存量や摂食機能群 (付着物食者、濾過食者など) 別の現存量においても TN との明瞭な

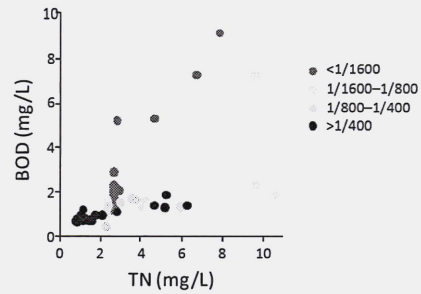


図-13 河床勾配別の TN と BOD の関係

関係は認められていない。

全地点を対象にすると、全分類群数は BOD や TN と負の関係にあったが、地点による分類群数の違いの一部は物理環境から説明されるものであった。すなわち、全分類群数は河床勾配が小さい (下流に位置する) 地点で低く、河床勾配が大きい (上流に位置する) 地点で高かった。また、分類群数は泥・砂の地点で低く、礫の地点で高かった。

物理場区分ごとに分類群数と BOD や TN との関係を見ると、全ての区分を通して関係がみられるわけではなく、河床勾配では特に 1/1600-1/800 の区分において、河床材料では礫の区分において強い負の関係が見られた。比較的緩勾配の地点で BOD や水質の影響がみられたのは、勾配が小さいと流れが遅いため淀みやすく、富栄養化によって低酸素状態が起りやすいなどの影響が考えられる。確かに、勾配別に BOD と TN の関係を比べると、同程度の TN に対して小さい勾配の地点ほど BOD が高い傾向にあった (図-13)。<1/1600 の区分において BOD や TN と分類群数に明瞭な関係が見られなかったのは、その多くの地点の底質が泥・砂であるからである。泥・砂の地点では例えば水質が良い地点でも分類群数は多くなく、こうした底質には元来から限られた分類群しか生息できないと考えられる。一方、底質が礫の地点は条件によって分類群数が高くなりうることでデータから示唆される。>1/400 の区分はどの地点も分類群数が高く、TN や BOD と明瞭な関係は見られなかったのは、BOD や TN が非常に高い地点がないことに加え、急勾配であるため、流速が速く、低酸素などの悪い条件になりにくいことが考えられる。

6.1 河床生物の活動を考慮した河川水質変化モデルの設定

流況が河床の底生生物を介して水質の変化にどの程度の影響を与えているかを評価するために、河川内の窒素および炭素に関する物質収支をモデル化し、流動モデルとの統合をおこなった上で、試行計算を実施した。

流動モデルは一次元の非定常流モデルであり、次の運動方程式および連続の式からなる。

(運動方程式)

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(QV)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) = q_L V_L$$

$$V = \frac{Q}{A}, \quad S_f = \frac{n^2 |Q| Q}{2.2 A^2 R^{4/3}}$$

(連続の式)

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial A}{\partial t} = q_L$$

ここで、 Q は流量 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)、 V は平均流速 (m s^{-1})、 g は重力加速度 (m s^{-2})、 A は断面積 (m^2)、 z は水面高さ (m)、 S_f は摩擦勾配、 q_L は単位流れ距離あたりの側面流入 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)、 V_L は側面流入の平均流速 (m s^{-1})、 n はマンニングの n 値、 R は径深 (m)、 x は流れ距離 (m)、 t は時間である。

河道形状は、国土地理院発行の 1/25,000 地形図から川幅を読み取り、設定した。下流域と上流域については、豊橋河川事務所ならびに設楽ダム工事事務所が所有する河川横断測量結果を使用した。マンニングの粗度係数は、現地条件に基づく感度分析結果から 0.03 とした。また、豊川水系では、寒狭川頭首工、牟呂松原頭首工による取水が行われている。本モデルではこれらの取水系ネットワークを組み込んで計算を行った。

物質収支のモデル化に関しては、水温・有機態炭素量・有機態窒素量・無機態窒素量・有機態リン量および溶存態リン量等に加え、河床とのやりとりとして付着藻類の成長・剥離、水生昆虫（剥ぎ取り食者及び、ろ過食者）による摂餌と排泄を組み込み、これらの反応に関する変数を設定した。

6.2 水生生物の無機態及び有機態窒素への影響

河川水質モデルにおいて、付着藻類の現存量は出水時の剥離によって減少し、平水時に増加し、流量が安定している冬に現存量が高まる季節変化がみられた。また、付着藻類を摂食する底生動物の現存量

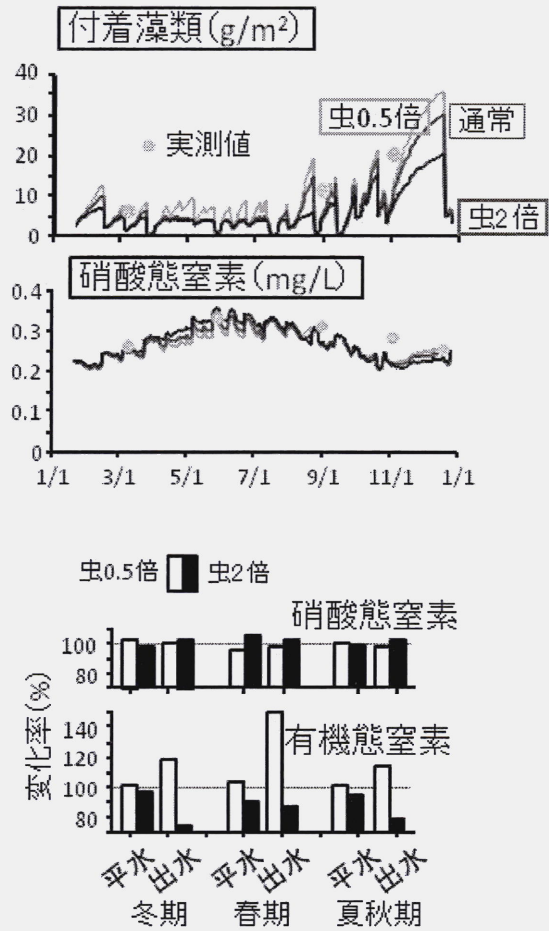


図14 水質モデルによる付着藻類・栄養塩の動態の再現(上)、底生動物量の影響の評価(下)

は野外パターンに沿うように冬に増加し夏に低下するように設定したため、付着藻類の現存量は春に大きく低下した。硝酸態窒素は付着藻類の成長に使われるため、付着藻類の現存量が高い時期に硝酸態窒素濃度が低下した。モデルにおける付着藻類や硝酸態窒素の値の範囲や季節変化パターンは現地の観測と良く合っており、モデルで再現した付着藻類や栄養塩の動態は野外パターンを一部再現できているものと考えられる(図14)。一方、モデルにおける粒状有機物の濃度は豊川で実際に観測されている濃度からは5~10倍程度高い値となるなど野外のパターンと一致しない部分がみられた。栄養塩や有機物動態に対する底生動物現存量の影響を明らかにするために、各河道区間の底生動物現存量を変えて(通常の0.5倍、2倍)感度分析を行った結果、栄養塩よりも粒状有機物への影響が大きいことが明らかとなった(図14)。底生動物現存量を通常の2倍にする

と付着藻類量は低下して栄養塩濃度は増加し、0.5倍にするとその逆のパターンになった。この傾向は底生動物の現存量が高い4~6月に特に顕著であった。また、底生動物現存量とともに付着藻類（剥離して粒状有機物になる）が少なくなり、また水中の粒状有機物の摂食が増加するため、有機態炭素や窒素の濃度は減少した。モデル河道の下流端から出る硝酸態窒素、有機態窒素、有機態炭素のフラックスの変化を季節別に、平水時・出水時別に比べたところ、硝酸態窒素のフラックスは有機態窒素・炭素のフラックスに対して底生動物現存量の影響は小さく（図12）。有機態窒素・炭素のフラックスに対する底生動物量の影響は、春季および出水期に大きかった。これは春季に底生動物による付着藻類の摂食の影響が大きく、また平水時に底生動物が付着藻類の現存量を低く抑えている分、出水時に剥離して流される付着藻類由来の有機物が減少するためである。

N. まとめ

集水域から負荷される窒素は、上流から下流にかけて自然由来窒素から人為由来窒素に変わっていた。また、負荷された人為由来窒素は、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ることが窒素安定同位体比から明らかになった。

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明らかになったが、この変化は底生動物の餌資源利用変化に起因していた。

炭素安定同位体比から求めた底生動物の餌資源に対する付着藻類の貢献度は、河川の中流で高く、上流や下流では低かった。河川を流れている有機物に占める付着藻類由来物質の割合は上流から中流にかけて上昇したが、中流から下流にかけては低下していた。一方で、有機物のC/Nは上流から下流にかけて低下しており、河川の中流から下流にかけての有機物のC/Nの低下は、付着藻類以外の寄与によって起きていることが明らかになった。

付着藻類や底生動物の物質動態への影響は、無機態よりも有機態フラックスに影響が大きいことが水質モデルのシミュレーションにより明らかになった。

参考文献

1) 永田俊, 宮島利宏編: 流域環境評価と安定同位体, 京都

大学出版, 2008.

- 2) Sakata M.: A simple and rapid method for $\delta^{15}\text{N}$ determination of ammonium and nitrate in water samples, *Geochem. J.*, Vol.35, pp. 271-275, 2001.
- 3) 川島博之, 川西琢也, 安江千恵, 林良茂: 食料供給に伴い環境に影響を与える窒素負荷量の推定, *システム農学* 13 (2), pp.91-95, 1997.
- 4) Vander Zanden, M.J., Vadeboncoeur, Y., Diebel, M.W. and Jeppesen, E.: Primary consumer stable nitrogen isotopes as indicators of nutrient source, *Environ. Sci. Technol.* Vol.39, pp.7509-7515, 2005.
- 5) 鈴木彌生子, 中下留美子, 赤松史一, 伊永隆史: 安定同位体比分析による国産米の産地及び有機栽培判別の可能性, *分析化学*, Vol.58, pp.1053-1058, 2009.
- 6) Toda H., Uemura Y., Okino T., Kawanishi T. and Kawashima H.: Use of nitrogen stable isotope ratio of periphyton for monitoring nitrogen sources in a river system, *Water Sci. Technol.*, Vol.46, pp.431-435, 2002.
- 7) 山田良三, 白井一則, 今川正弘: 赤黄色土露地野菜地帯における河川及び地下水の硝酸性窒素動態, 愛知県農業総合試験場研究報告, Vol.34, pp.79-84, 2002.
- 8) McClelland, J.W., Valiela, I. and Michener, R.H.: Nitrogen-stable isotope signatures in estuarine food webs: a record of increasing urbanization in coastal watersheds, *Limnol. Oceanogr.*, Vol.42, pp.930-937, 1997.
- 9) 日本下水道協会編: 下水道統計, 第65号, 2010.
- 10) Sterner R.W. and Elser J. J.: *Ecological Stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere*, Princeton University Press, 2002
- 11) Edwards R.T.: Sestonic bacteria as a food source for filtering invertebrates in two southeastern blackwater rivers. *Limnol. Oceanogr.* Vol.32, pp.221-234, 1987
- 12) Kaiser E, Arscott DB, Tockner K, Sulzberger B: Sources and distribution of organic carbon and nitrogen in the Tagliamento River, Italy, *Aquat. Sci.*, 66, 103-116, 2004
- 13) Yoshimura C, Gessner MO, Tockner K, Furumai H: Chemical properties, microbial respiration, and decomposition of coarse and fine particulate organic matter, *J. N. Am. Benthol. Soc.*, Vol. 27, pp.664-673, 2008
- 14) Findlay S., Meyer J. L., and Risley R.: Benthic bacterial biomass and production in two blackwater rivers. *Can. J. Fish. Aqua. Sci.* Vol.43, pp.1271-1276, 1986
- 15) Jones, S. E. and Lock M. A.: Seasonal determinations of extracellular hydrolytic activities in heterotrophic and

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

- mixed heterotrophic/autotrophic biofilms from two contrasting rivers. *Hydrobiologia*, Vol. 257, pp.1-16, 1993
- 16) Finlay JC : Stable-carbon-isotope ratio of river biota, implications for energy in lotic food webs, *Ecology*, Vol.82, pp.1052-1064, 2001.
- 17) Finlay JC : Patterns and controls of lotic algal stable carbon isotope ratios, *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 49, 850-861, 2004.
- 18) Walters DM, Fritz KM, Phillips DL : Reach-scale geomorphology affects organic matter and consumer in a forested Piedmont stream, *Freshw. Biol.*, Vol. 52, pp.1105-1119, 2007.

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

Budget: Grant for operating expenses
General account

Research Period: FY2006-2010

Research Team: Water Environment Research
Group (River Restoration Research)

Author: MIWA Junji
NAKANISHI Satoru
YAJIMA Yoshinori
KOBAYASHI Sohei
AKAMATSU Fumikazu

Abstract : We evaluated quantitatively relationships between physical conditions and nutrient flows in river ecosystems. We investigated longitudinal and seasonal changes in the origin and quality of transported particulate organic matter (POM) and the food use by aquatic consumers along a gravel-bed river in relation to physical conditions. Increases of anthropogenic nitrogen loads downstream altered the quality of POM and food use by aquatic insects in the river ecosystem. And the anthropogenic nitrogen was transported to higher trophic organisms revealed by stable isotope analyses. The total nitrogen concentration had a tendency of decrease in the number of species of aquatic insects, but not their biomass. We revealed that changes in biomass of aquatic insects in relation to physical conditions affect flux of organic matter, but has relatively little effect on that of inorganic matter.

Key words : nutrient dynamics, the Toyo River, macro invertebrates, periphyton, stable isotopic composition, organic matter