

## 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：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。平成 21 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、河川地形との関係を調査した。また、河床の底生生物量を組み込んだ河川水質変化モデルの開発を行い、生物量の違いによる下流への栄養塩・有機物の流下量の変化を試算した。安定同位体比解析による流下有機物の起源物質の推定および C/N 比の流程変化をもとに、河川地形と有機物動態の関連性について検討を行った結果、100 μm 以下の細粒の流下有機物は、主に陸上生産物由来で構成されていたが、流程や季節の違いによる変化が乏しいことが明らかになった。一方で、100 μm 以上の粗粒では流程や季節の違いによる変動が認められ、冬季の中流域で河川生産物由来物質を多く含んでいることが示唆された。淵の割合及び栄養塩濃度が上昇するほど流下有機物の C/N 比が低下し、河川における瀬淵割合と流域からの栄養塩負荷が流下有機物の質の変化に寄与していることを見出した。流下有機物の質の変化は、底生動物を介した物質動態に変化を生じさせている可能性がある。

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。

平成 21 年度は、豊川を対象に主に、①河床の底生生物を組み込んだ河川水質変化モデルを構築し、生物量の違いによる下流への栄養塩・有機物の流下量

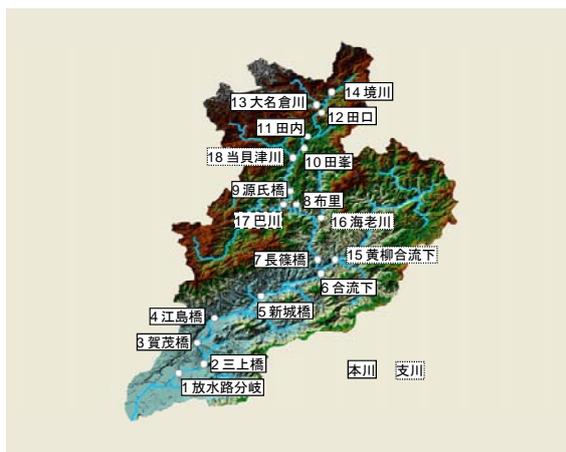


図1 調査地点

の変化を試算した。②上流から下流に至る流下有機物のサイズ分画別の起源地と質の変遷と河川地形との関連性を調査した。

## 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 km<sup>2</sup>、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。

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、上流よりも下流で人間活動の影響が大きい河川である。

## 3. 材料と方法

### 3.1 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 (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>)、 $V$ は平均流速 (m s<sup>-1</sup>)、 $g$ は重力加速度 (m s<sup>-2</sup>)、 $A$ は断面積 (m<sup>2</sup>)、 $z$ 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 (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>)、 $V_L$ は側面流入の平均流速 (m s<sup>-1</sup>)、 $n$ 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。

### 3.2 豊川における試料採集と分析方法

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 μm) で濾し、濾液の一部は、Bran Luebbe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：0.1 mm）で捕捉された有機物を用い、篩で100 μm（FPOM: fine particulate organic matter）、100-250 μm（MPOM: medium particulate organic matter）、250-1000 μm（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、瀬のなかから選んだ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。

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、測定精度は $\pm 0.1\text{‰}$ である。

## 4. 結果と考察

### 4.1 河床生物の活動を考慮した河川水質変化モデル

モデルによる流動計算結果の妥当性を検証するため、河口より48km上流にある布里地点における実測水位とモデルによる解析水位の比較をおこなった。出水時のピークの立ち上がり時に多少の差はあるものの、その他に関してはおおむね一致した結果が得られた（図2）。出水初期の差に関しては、本モデルの設定河道が複断面となっていないことが可能性として考えられる。

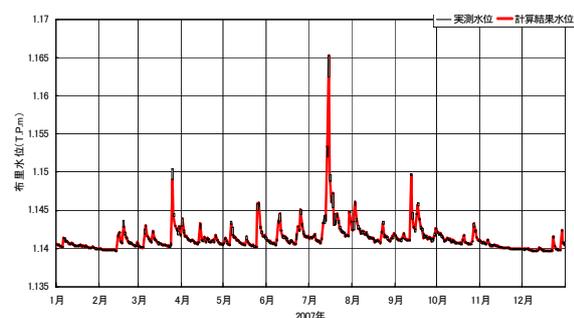


図2 実測水位と解析水位の比較

付着藻類は平水時に成長し、出水にともなう剥離によって大きく現存量が減少するなど流況によってその生物量が大きく変化する。また無機態窒素に関しては、付着藻類の現存量が多いときは、取り込み量も増加するため、河川水の無機態窒素濃度は低下する傾向にあるなど、流況に応じた河川水質の変化をモデル上で表現することができた（図3）。

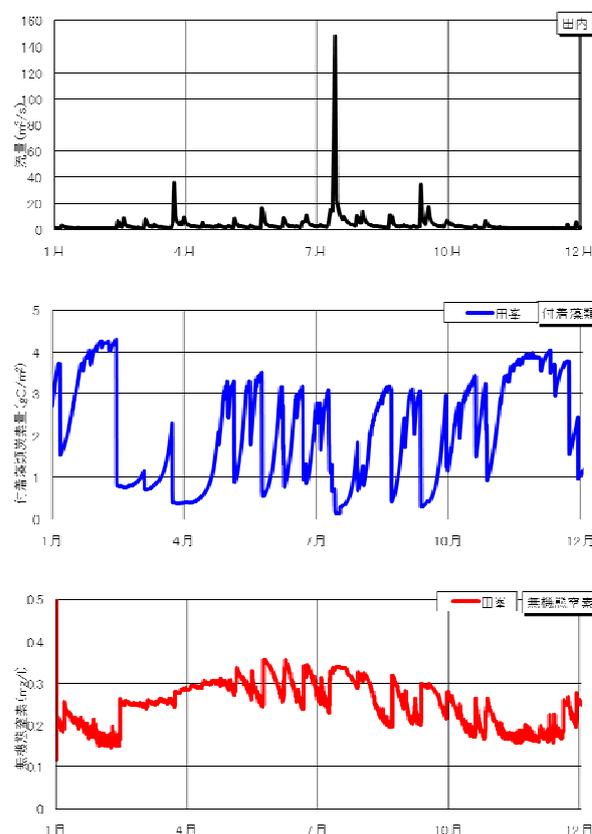


図3 物質動態モデル計算結果

### 4.2 河川生態系における瀬淵割合の変化と流下有機物の質と起源の関係

流下有機物の各分画のC/N比は、瀬の割合と有意な正の相関があった。（図4）。このことは、河川の瀬淵構造のような河川地形が流下有機物の質を決定する重要な要因であることを示唆しているだろう。リターは、河道内の物理環境の視点では、中州や河岸の際の水深が浅く流速の遅い環境や淵などで滞留しやすいとされている一方で、瀬などの流速の早い場所では滞留時間が短い。豊川の中流域は、上流や下流に比べて、中間的な瀬淵構成になっており、多様な地形を有していることが示唆される。この多様な地形が流下有機物の様々な物質の滞留時間の違いを生じさせ、流下有機物の質の変化に寄与している可

能性がある。豊川の流下有機物は、FPOM と MPOM で平均 90%を占めており、これらは、下流ほど多くなる傾向にあったが、流下有機物のサイズ構成、質の変化は、河川生態系の河川地形も寄与しているだろう。

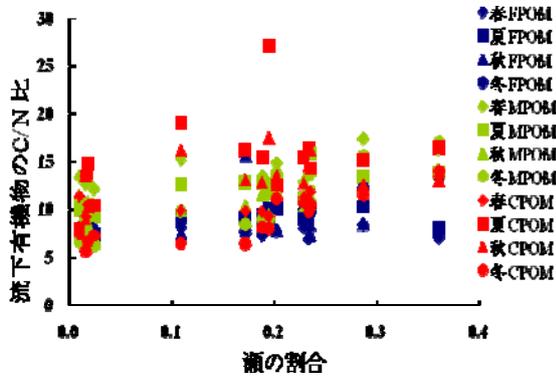


図4 瀬の割合と流下有機物の C/N 比の関係

全体的に、豊川の FPOM の C/N 比は、MPOM や CPOM の C/N 比よりも低く (図4)、下流ほど C/N 比が低くなる傾向にあったが、C/N 比の低下は N 含有量が相対的に高いことを示している。一般的に、同じ有機物量であれば、粒径が小さくなるほど、表面積が増えるために細菌や菌類などの微生物の生物量が多くなる。加えて、栄養塩濃度が高いほど、微生物による分解率が高まる。また、低い C/N 比を持つ微生物の増加が FPOM の C/N 比の低下に寄与することが報告されている (Gulis & Suberkropp, 2003)。流下有機物の C/N 比の変化は、微生物も寄与している可能性がある。

硝酸態窒素濃度は、全区画の流下有機物の C/N 比

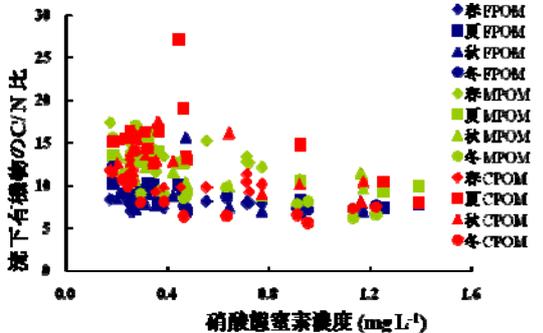


図5 硝酸態窒素濃度と流下有機物の C/N 比の関係

と負の相関があった (図5)。豊川の硝酸態窒素濃度は、0.2 mgN L<sup>-1</sup> から 1.2 mgN L<sup>-1</sup> の範囲で、上流から

下流にかけて上昇していた。豊川流域では、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。

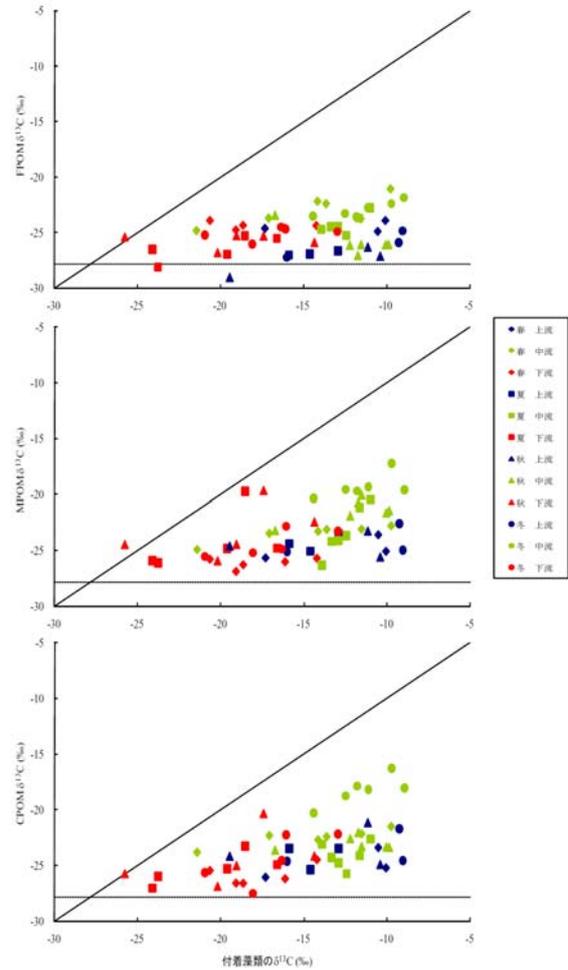


図6 瀬の割合と流下有機物の C/N 比の関係

流域からの窒素負荷と淵の増加にともなう滞留時間の変化が、流下有機物に付着している微生物の生物量を増大させ、その結果、流下有機物の C/N 比の低下に寄与しているかもしれない。

流下有機物の δ<sup>13</sup>C の冬季と他の季節との差は、上流や下流域よりも中流域で大きく、特に CPOM と MPOM で顕著だった。また、全区画で流下有機物の δ<sup>13</sup>C と付着藻類の δ<sup>13</sup>C に有意な正の相関があったが、粒径の小さい区画ほど、付着藻類の δ<sup>13</sup>C との差が大きかった (図6)。このことは、FPOM の大部分が植物の葉、枝などの陸上生産物由来物質であることを示唆している。陸上生産物は、水界生態系においても様々な役割を果たしており、底生動物にとって重要な餌資源となっている (Wallace et al. 1997)。一

方で、付着藻類も底生動物の主要な餌資源であるが、その低いC/N比は、高いC/N比を持つ陸上生産物よりも利用しやすい物質であることが化学量論の点からも示唆された。多くの河川で、FPOMの主構成物質が陸上生産物由来であることが報告されているが (Hedges et al. 1986; Kaiser et al. 2004)、流下有機物に含まれる付着藻類由来物質が一次消費者の主要な餌資源になっていることが報告されている (Delong & Thorp 2006)。FPOMはCPOMに比べてリグニン含有量が多く、水生昆虫などの生物に利用された結果であることが示唆されている (Yoshimura et al. 2008)。加えて、FPOMは上流部でも比較的多く存在していた。下流ほど細粒分が多くなるのは、流下過程で物理的に粉碎され、生物にも利用されて細分化されているものと考えられるが、上流域でのFPOMは河川生態系だけでなく、集水域の土壌由来物質も関与している可能性が高い。この点については今後の調査が必要である。

一方で、粒径が大きいほど、付着藻類由来物質を多く含んでおり、冬季に付着藻類の寄与が大きい(図6)。CPOMとMPOMの $\delta^{13}\text{C}$ とC/N比の季節変動は、河川の物理環境、生物活動の両方が関与しているものと思われる。豊川の流速は、中流域で最も速いが、流速が速いほど掃流力が大きく、付着藻類が剥ぎ取られる量も多くなることが予想される。また、底生動物の活動は温度と密接な関係があり、温度が低い冬季よりも温度が高い夏季の方が活発である。水生昆虫の消化速度は水温上昇とともに活発になるため (Miyasaka & Genkai-Kato 2009)、水温の低い冬季には摂食圧が低下することが予測される。摂食圧が低い冬季の方が付着藻類の現存量が相対的に多く、これらが剥ぎ取られて流下有機物に直接流入した可能性がある。

流下有機物の質の変化は、水生昆虫などの底生動物の餌資源利用に影響を与えている可能性がある。低いC/N比を持つ底生動物にとって、C/N比の低い流下有機物は、C/N比の高い流下有機物に比べて相対的に利用しやすいことが予想されるためである。同じ由来物質を持つ流下有機物でも、河川地形や流域からの栄養塩負荷によってそのC/N比が低下していれば、底生動物に取り込まれる流下有機物の量が増加することも考えられ、流程によって食物網を介した物質動態が変化している可能性がある。

## N. まとめ

サイズ分画別の流下有機物の $\delta^{13}\text{C}$ とC/N比は、細粒分画では流程、季節間の変動は乏しかったが、粗粒分画では流程、及び季節変動が大きく、流下有機物の起源と質が河川生態系の生物と物理の両面の影響を受けていると思われる。また、流域から負荷される栄養塩とも密接な関係があり、集水域の土地利用も流下有機物の質の変化を決める要因になっているだろう。加えて、物質の滞留時間と関連している河川地形などの景観レベルの要素も流下有機物の質の変化を読み解く上で重要な要素になることが本研究で明らかになった。現地の点データと瀬淵割合のような地形データを組み合わせることによって、集水域レベルの栄養塩、物質動態を評価できる可能性がある。

## 参考文献

- 1) Delong MD, Thorp JH: Significance of instream autotrophs in trophic dynamics of the Upper Mississippi River. *Oecologia* 147: 76-85, 2006
- 2) Gulis V, Suberkropp K: Leaf litter decomposition and microbial activity in nutrient-enriched and unaltered reaches of a headwater stream, *Freshwater Biology*, 48, 123-134, 2003
- 3) Hedges JL, Clark WA, Quay PD, Richey JE, Devol AH, Santos U De M: Compositions and fluxes of particulate organic material in the Amazon River, *Limnology and Oceanography*, 31, 717-738, 1986
- 4) Kaiser E, Arscott DB, Tockner K, Sulzberger B: Sources and distribution of organic carbon and nitrogen in the Tagliamento River, Italy, *Aquatic Sciences*, 66, 103-116, 2004
- 5) Miyasaka H, Genkai-Kato M: Seasonal change in the gut clearance rate of three stonefly species in a Japanese stream, *Ecological Research*, 24, 231-234, 2009
- 6) Wallace JB, Eggert SL, Meyer JL, Webster JR: Multiple trophic levels of a forest stream linked to terrestrial litter inputs, *Nature*, 277, 102-104, 1997
- 7) Yoshimura C, Gessner MO, Tockner K, Furumai H: Chemical properties, microbial respiration, and decomposition of coarse and fine particulate organic matter, *Journal of North American Benthological Society*, 27, 664-673, 2008

## 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 Restroration Research)

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

**Abstract** : We investigated the longitudinal and seasonal changes in the origin and quality of transported particulate organic matter (POM), using stoichiometric and stable carbon stable isotope analyses, in relation to the physical gradients and nutrient dynamics along the Toyo River. Larger POM had higher C:N ratio, which decreased downstream, and was negatively correlated to the riffle proportion and nitrate concentration in the river. The  $\delta^{13}\text{C}$  of smaller POM showed larger differences from those of periphyton, suggesting smaller POM include more terrestrial production. Our results show that small POM was the main component in the gravel-bed river and was mainly derived from terrestrial production. By combining point data with geographical data such as riffle proportion, further evaluation of river ecosystem functions such as nutrient dynamics at the catchment level will be possible.

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