河床堆積物を用いた中国地方一級河川 の環境評価

ASSESSMENT OF RIVER ENVIRONMENT BASED ON RIVERBED SEDIMENT IN THE FIRST CLASS RIVERS OF CHUGOKU DISTRICT

高村紀彰¹・赤松良久²

Yoshiaki TAKAMURA, Yoshihisa AKAMATSU

¹学生会員 学(工) 山口大学大学院生 理工学研究科社会建設工学専攻
(〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

²正会員 博(工) 山口大学大学院准教授 理工学研究科社会建設工学専攻
(〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

A new assessment of river environment using the riverbed sediment is proposed in this study. Field observations for riverbed sediment, water quality and river plant were conducted at 4~12 points in the ten first-class rivers of Chugoku District. As a result, there isn't any significant correlation relationship among the water quality, the stable isotope ratios of nitrogen ($\delta^{15}\text{N}$) in the sediments and in the river plant. However, $\delta^{15}\text{N}$ in the riverbed sediments have a clear relation with the amount of nitrogen load from the catchment which is estimated using GIS analysis. This result indicates that the $\delta^{15}\text{N}$ in the sediments can be an indicator of the river environment.

Key Words : *stable isotope , river assessment, nutrient load, riverbed sediment, Chugoku District*

1. はじめに

現在、日本の河川環境は主にBOD (Biochemical Oxygen Demand)等の水質環境基準により評価が行われている。BODについては、基準の達成率は年々着実に上昇しており、平成18年度で約93%となっている。これは、日本の河川の水環境の改善に向けた取り組みが一定の役割を果たしてきたと考えられるが、生物も含めた河川環境全体を保全・再生するためには、水質環境基準のみでの評価は不十分である。平成9年に河川法が改正され、従来の河川管理の目的であった「治水」「利水」に新たに「環境」が加えられた。これにより、新たに魚類や水生昆虫などの生物を指標とする河川環境の評価方法が提案され、その有効性が実証されている¹⁾。しかし、これらの生物調査は広範囲にわたって評価を行うことが難しく、評価の方法や基準が複雑になる可能性があり汎用的な指標としては使用し難い²⁾。

水文学や地球化学などの分野では安定同位体比による自然界での物質の流れや食物連鎖についての研究が行われており³⁾、生態系の仕組みを理解することに安定同位体比が有効であることが明らかにされている。近年では、生態系の評価や河川の健全性の評価の指標として底質や

水棲生物の窒素・炭素安定同位体比を用いる研究も進められており⁴⁾⁵⁾、安定同位体比を用いた流域環境評価についての研究も行われている⁶⁾。

そこで、本研究では新たな河川環境の評価指標として水棲生物の生息環境や河川景観にも密接に関わっていると考えられる河床堆積物に着目し、その窒素・炭素安定同位体比を用いて中国地方の一級河川を対象とした環境評価について検討を行った。

2. 河床堆積物を用いた環境評価

前述したように、河川環境の評価は主に水質に着目して行われてきたが、刻々と変化していく水質に比べ、陸域からの影響を反映する河床堆積物の方が環境指標として適切であると考えられる。宮本らの研究⁷⁾においても人の感じる景観的な河川環境評価は水質よりも河床堆積物の富栄養化度と強い相関があることが明らかになっている。したがって、本研究では河床堆積物に着目し、河川環境評価を行うこととした。河床堆積物の状態を代表する指標として、河床堆積有機物中の窒素・炭素安定同位体比を用いる。安定同位体比とは特定の標準物質に対しての差を千分偏差(δ 値)で表したものであり、以下の

図-1 中国地方一級河川における観測地点

表-1 河川内での代表的な窒素・炭素安定同位体比値

有機物の起源	$\delta^{15}\text{N}(\text{‰})$	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$
陸域の森林	-1~+1	-30~-25
C4植物	-1~+1	-14~-11
付着藻類	0~+8	-10~-5
植物プランクトン	+6~	~-20

式(1)で表される。

$$\delta = \left(\frac{R(\text{試料})}{R(\text{標準})} - 1 \right) \times 1000 \quad (1)$$

この安定同位体比は、自然界の物質の流れを把握するトレーサーとなりえる。河床の堆積有機物は、陸域の森林由来、河川内の植生由来、河川内で生成される有機物で構成されている。河床堆積有機物の代表的な窒素・炭素安定同位体比($\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{13}\text{C}$)の値としては、陸域の森林でそれぞれ0‰前後、-27‰前後の値をとることが知られている。表-1に河川内での代表的な窒素・炭素安定同位体比の値を示す⁸⁾。陸上植物はほぼ一定の値をとるのに対し、河川内の付着藻類や植物プランクトンなどは生育環境により大きく変動する。また、窒素・炭素安定同位体比の値は陸域から海域へ向かう過程で、付着藻類やプランクトン等の活動の活発化により両者の値が増加していくことが知られている⁹⁾。

3. 研究方法

(1) 観測概要

中国地方の一級河川のうち10河川において(図-1)、河口から上流の4~12地点で河川水、河床堆積物、河道内植生の採取を行った。河床堆積物は礫背面などの細粒土

砂が堆積しやすい箇所を川幅によらず滞筋で1箇所、両側岸近くで1箇所ずつ横断方向に3点程度選定し、それぞれ約10cm×10cmの表層1cmの土砂を採取・混合してその地点のサンプルとした。また、河道内植生については河道内の中洲や河岸の水際に生育するツルヨシの地上部を採取した。河川水については、河川の流心に近い場所で表層水を採取した。現地調査は斐伊川を除き観測日の3日前までに総降水量が20mmを超えない比較的流量の安定した平水時を対象として行った。各河川の調査日は、高津川2011年11月4日、斐伊川2011年11月7日、佐波川2011年12月20日、江の川2011年11月23日、太田川2011年11月24日、芦田川2011年12月2日、吉井川2011年12月3日、旭川2011年12月4日、高梁川2011年12月5日、小瀬川2011年12月18日である。河川水については栄養塩濃度(T-N, T-P, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$)、河床堆積物及び河道内植生に関しては同位体比質量分析計(DELTA^{plus} Advantage, Finnigan TM)を用いて窒素安定同位体比($\delta^{15}\text{N}$)及び炭素安定同位体比($\delta^{13}\text{C}$)の計測を行った。なお、河床堆積物の計測については2mmのふるいにかけたのち、粉碎し2mm以下の成分について計測を行った。

(2) 汚濁負荷解析

各河川の各観測地点について集水域内の土地利用割合や窒素負荷量の算出方法を以下に示す¹⁰⁾。

a) 集水域内の土地利用割合の算出

GIS(ArcView9.3, ESRI社)を用いて観測地点ごとに集水域の算出を行った。解析には国土地理院が発行している基盤地図情報より入手した標高データを使用した。この集水域を用いて、各地点の集水域内の土地利用割合を算出した。土地利用のデータについては国土数値情報より土地利用細分メッシュデータ(平成18年度版)を用いた。

図-2 中国地方一級河川における硝酸態窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)の空間分布

図-3 中国地方一級河川における河床堆積物中の窒素安定同位体比($\delta^{15}\text{N}$)の空間分布

b) 集水域内で発生する窒素負荷量の算出

集水域内で発生する窒素負荷量は土地利用割合の算出時と同様にGIS解析を用いた原単位法により算出することができる。原単位法は各発生源別原単位とその基数の積で求められ以下の式(2)で表される。

$$L = \sum L_i = \sum a f_i p_i \quad (2)$$

ここで、 L ：総汚濁負荷発生量、 L_i ：発生源別発生量、 f_i ：発生源別基数、 p_i ：発生源別原単位、 a ：排出率である。窒素負荷には大きく2つの発生源があり、汚濁物質の排出ポイントが特定しにくい山林、農地、市街地などから発生する面源負荷(nonpoint source)と、排出ポイントが特定できる工場、下水処理場、畜産などから発生する点源負荷(point source)が存在する¹¹⁾。これらの和によって集水域内の窒素負荷量を決定した。面源負荷は面積と土地利用ごとに定められている原単位¹²⁾との積で求

められるため、a)で求めた集水域内の土地利用割合を用いて算出した。点源負荷は人、畜産、工業由来の負荷に分類される。人由来の窒素負荷量については、自治体ごとの単位面積あたり人口を算出し、同時に自治体ごとの下水処理による軽減率を算出した。そこから下水処理後の単位面積あたり発生量を算出し、自治体ごとの集水域内の建物用地面積から求められる流域人口を乗じることによって自治体ごとの窒素負荷発生量を求めた。対象集水域内の自治体ごとの発生量を合計することにより、対象地点の人由来の窒素負荷量を求めた。人口については平成17年の国勢調査のデータを用いた。また、下水道の整備についてのデータは国土交通省が発表している平成22年の全国下水道普及率を用いた。畜産由来の窒素負荷量についても人由来と同様に、集水域内の建物用地に対して単位面積当たりの飼育頭数を算出し、原単位¹²⁾を乗じることにより算出した。畜産頭数のデータに関しては

図-4 (a) 佐波川 (b) 芦田川における河床堆積物の $\delta^{15}\text{N}$ と河道内植生中の $\delta^{15}\text{N}$ と T-N の縦断分布

図-5 (a) $\text{NO}_3\text{-N}$ と河床堆積物の $\delta^{15}\text{N}$, (b) $\text{NO}_3\text{-N}$ と河道内植生中の $\delta^{15}\text{N}$, (c) 河道内植生中の $\delta^{15}\text{N}$ と河床堆積物の $\delta^{15}\text{N}$ の関係図

農林水産省が発表している平成19年の畜産統計調査を用いた。最後に工業由来の窒素負荷量については、業種ごとの原単位¹²⁾に出荷額を乗じ、総発生量を算出した後、建物用地の面積で除することで、単位面積当たりの負荷量を求め、これをもとに集水域内の建物用地の面積から発生量を求めている。工業ごとの出荷額のデータについては、経済産業省が発表している平成18年工業統計を用いた。これらの合計値により各河川の観測地点の窒素負荷量を算出した。

4. 観測結果及び考察

(1) 水質と河床堆積物の $\delta^{15}\text{N}$ の空間分布

図-2, 3に中国地方における現地調査から得られた河川水中の硝酸態窒素濃度 ($\text{NO}_3\text{-N}$) と河床堆積物の窒素安定同位体比 ($\delta^{15}\text{N}$) の空間分布図をそれぞれ示す。図-2, 3より佐波川や高津川等の陸域からの人間活動による有機物負荷が小さいと考えられる河川においては、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度、河床堆積物の $\delta^{15}\text{N}$ とともに河口域を除いて低い値を示しており、縦断方向の変化量も小さいということが分かる。しかし一方で、芦田川や吉井川等の有機物負荷が大きい河川においては、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が高く河床堆積物の $\delta^{15}\text{N}$ についても高い値をとっているが、両者の値の縦断分布については異なることが分かる。

(2) 水質と河道内植生の $\delta^{15}\text{N}$ と河床堆積物の $\delta^{15}\text{N}$ の縦断分布

図-2, 3の空間分布図で対照的であった佐波川と芦田

川を対象とし、水質、河道内植生の窒素安定同位体比 ($\delta^{15}\text{N}$) および河床堆積物の窒素安定同位体比 ($\delta^{15}\text{N}$) についての縦断分布を図-4に示す。ここで、水質としては国土交通省の水文水質データベースより入手した2011年平均の全窒素 (T-N) の値を用いた。なお、芦田川は国土交通省の行っている水質調査において1972年から38年間中国地方一級河川の中で最も水質が悪い河川である。図-4から、陸域からの汚濁負荷が少ない佐波川においてはT-N、河床堆積物の $\delta^{15}\text{N}$ の値が低く、縦断方向の変化についても小さいということが分かる。一方、芦田川のT-Nは上流域においても佐波川の下流域よりも高い値をとっており、さらに生活排水等の影響を受け、河口に近づくほど値が大きくなっている。しかし、河床堆積物の $\delta^{15}\text{N}$ の値は中流域においても高い値をとっており、T-Nの様に単純な変化ではない。このように、水質と河床堆積物の $\delta^{15}\text{N}$ について値に有意な関係性が見られないことが分かる。河道内植生の $\delta^{15}\text{N}$ については、佐波川では河口に向かうにしたがって値が増加しているように見えるが、芦田川においては上流域で最も高い値をとり下流域で値が低くなっている。河道内植生の $\delta^{15}\text{N}$ の値がこのような変化をする理由については、今後の検討が必要である。

(3) 水質と河道内植生の $\delta^{15}\text{N}$ と河床堆積物の $\delta^{15}\text{N}$ の関係

図-5に (a) $\text{NO}_3\text{-N}$ と河床堆積物の $\delta^{15}\text{N}$, (b) $\text{NO}_3\text{-N}$ と河道内植生の $\delta^{15}\text{N}$, (c) 河道内植生の $\delta^{15}\text{N}$ と河床堆積物の $\delta^{15}\text{N}$ の関係図を表す。図-5より、(c) 河道内植生の $\delta^{15}\text{N}$ と河床堆積物の $\delta^{15}\text{N}$ には弱い正の相関が見られるものの、(a) $\text{NO}_3\text{-N}$ と河床堆積物の $\delta^{15}\text{N}$, (b) $\text{NO}_3\text{-N}$ と河道内植生の $\delta^{15}\text{N}$ に明確な関係性は見られない。

図-6 中国地方一級河川における河床堆積物の $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ マップ

図-7 中国地方一級河川における河道内植生の $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ マップ

(4) 河床堆積物および河道内植生の $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ マップ

図-6に対象河川の各地点における河床堆積物の $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ マップを示す。人間活動の影響の少ない河川では上流から河口に向かうにしたがって、 $\delta^{13}\text{C}$ も $\delta^{15}\text{N}$ も増加していく傾向があり⁹⁾、 $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ マップ上の左下から右上に向かってデータが分布すると考えられる。しかし、図-6においてはこのような分布から大きく外れる地点が存在していることが分かる。ここで、吉井川の青丸の地点が大きく外れているのは、この地点の近くの採石場からの石灰岩 ($\delta^{13}\text{C}$: 0‰) を多く含む水が大量に流れ込んでおり、 $\delta^{13}\text{C}$ の値が他の地点に比べて高くなっているためと考えられる。また、太田川の外れている地点(赤丸)については、ダム直下に位置しているため、ダムから流下してくる植物プランクトンの影響(表-1)を受けて、 $\delta^{15}\text{N}$ の値は高く、 $\delta^{13}\text{C}$ の値は低くなっていると考えられる。このように河床堆積物の窒素・炭素安定同位体比は局所的な環境変化を起こしている地点を評価するのに有効であると言える。

図-7に対象河川の河道内植生の $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ マップを示す。植生の $\delta^{15}\text{N}$ は0‰付近から+6‰を超える値までをとっていることから、河川中の栄養塩濃度を反映していると考えられる。しかし、採取したサンプルが同一種であるため $\delta^{13}\text{C}$ の値が-30~-27‰程度の値をとっており、流下に伴った $\delta^{13}\text{C}$ の値の変化がないことが分かる。このため、河道内植生の窒素・炭素安定同位体比では河床堆積物の $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ マップのように局所的な環境変化を表す指標としては使用できないと考えられる。

図-8 中国地方一級河川における(a)土地利用割合と河床堆積物の $\delta^{15}\text{N}$ (b)土地利用割合と $\text{NO}_3\text{-N}$ の関係図

5. 解析結果及び考察

観測結果から河床堆積物の $\delta^{15}\text{N}$ は陸域からの環境負荷の影響を表していると考えられるため、集水域内の窒素負荷量との関係について検討する。

(1) 集水域内の土地利用との関係

図-8に集水域に占める「宅地+農地」の割合と現地調査から得られた(a)河床堆積物の $\delta^{15}\text{N}$ 、(b) $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度との関係を示す。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度については「宅地+農地」の割合が増加するとともに増加していく傾向があることが分かる。しかし、河床堆積物の $\delta^{15}\text{N}$ については値がばらつくことが分かり、集水域の土地利用割合とは明確な相関がないということが分かる。これは、河床堆積物の $\delta^{15}\text{N}$ は水質($\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度)に比べて、単純な土地利用割合によって決まらない点源による負荷や局所的なダム・堰といった横断構造物の影響が大きいためであると考えられる。つまり、河床堆積物の $\delta^{15}\text{N}$ は平水時と出水時の集水域からの汚濁負荷の影響や横断構造物の影響を積分的に反映していると考えられる。このことから、河床堆積物の $\delta^{15}\text{N}$ は水質のみで評価のできない陸域からの負荷や河川横断構造物による河川環境の悪化を反映している可能性がある。

(2) 集水域内で発生する窒素負荷量と河床堆積物の $\delta^{15}\text{N}$ の関係

図-9 中国地方における窒素負荷量の空間分布

図-10 集水域内の単位面積あたりの窒素負荷量と河床堆積物の $\delta^{15}\text{N}$ の関係

図-9に原単位法によって行政区画単位で求めた中国地方における窒素負荷量の分布図を示す。日本海側の山陰では窒素負荷量が少なく、瀬戸内海側の山陽では窒素負荷量が多いことが分かる。また、特に、岡山県で排出される窒素負荷量が多いことも分かる。

3. (2)の方法で求めた各観測地点の集水域内の単位面積あたりの窒素負荷量と窒素安定同位体比の関係を図-10に示す。なお、図-10においては中国地方一級河川の結果に過去の研究¹³⁾で行われた沖縄の都市河川の結果を加えている。集水域内で発生する単位面積あたりの窒素負荷量が増加すると河床堆積物の $\delta^{15}\text{N}$ の値も増加するという関係が見える。また、集水域内で発生する単位面積あたりの窒素負荷量がある程度まで高くなると河床堆積物の $\delta^{15}\text{N}$ 値は頭打ちになる傾向にある。このことから、河床堆積物の $\delta^{15}\text{N}$ は集水域内で発生する単位面積あたりの窒素負荷と関係があることが分かる。しかし、今回点源負荷の算出において使用した土地利用細分メッシュデータでは住宅地や工業用地、畜舎などが建物用地として統一表示されている。したがって、点源負荷をより正確に算出するためにはそれらを区別する必要がある、この関係図については今後改良の余地がある。

6. 結論

中国地方の一級河川を対象として水質、河床堆積物、

河道内植生の調査を行った結果、河床堆積物の安定同位体比は水質だけでは評価のできない、陸域からの負荷や河川横断構造物による河川環境の悪化を反映する新たな河川環境指標として有効であることが分かった。また、河床堆積物の窒素安定同位体比は集水域内で発生する単位面積あたりの窒素負荷量と関係があることが明らかとなった。

謝辞：本研究は文部科学省科学研究費補助金若手研究(B) (課題番号：23760465, 研究代表者：赤松良久) の補助を受けている。また、安定同位体比の分析に関して、東京工業大学理工学研究科の吉村千洋准教授ならびに吉村研究室の学生の皆様に機器の使用法等、多くのご指導を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 竹門康弘：底生生物の生活型と摂食機能群による河川生態系評価，日本生態学誌，第55巻，pp189-197, 2005.
- 2) 中村太士，辻本哲郎，天野邦彦：川の環境目標を考える-川の健康診断-，技報堂出版，2008.
- 3) 酒井均，松久幸敬：地球化学安定同位体，東京大学出版会，1996.
- 4) 赤松良久，宮本大輔，吉村朋子：炭素・窒素安定同位体比に基づく流域圏生態健全性評価法の開発，水工学論文集，第53巻，pp1117-1122, 2009.
- 5) 中島沙知，山田佳裕，多田邦尚：香川県の沿岸域における魚類の炭素・窒素安定同位体比の分布，香川大学農学部学術報告，第59号，pp59-64, 2007.
- 6) 永田俊，宮島俊宏：流域環境評価と安定同位体，京都大学学術出版会，2008.
- 7) 宮本大輔，吉村朋子，赤松良久：沖縄の河川における水環境の総合的評価に関する研究，土木学会年次学術講演会講演概要集第2部，第63巻，pp207-208, 2008.
- 8) 和田英太郎：地球生態学，岩波書店，2002.
- 9) 和田英太郎，水谷広，柄沢亨子，蒲谷裕子，南川雅男，米本昌平，辻堯：大槌水系における有機物の挙動，地球科学，vol.18, pp89-98, 1984.
- 10) 北原健司，菅原琢磨，馬籠純，竹内邦良，石平博：GIS及び分布型流出モデルを用いた流域内の汚濁物質輸送過程の検討，水工学論文集，第49巻，pp1585-1590, 2005.
- 11) 國松孝男，村岡浩爾：河川汚濁のモデル解析，技報堂出版，1989.
- 12) 流域別下水道整備総合計画制度設計会議編：流域別下水道整備総合計画調査，指針と解説，日本下水道協会，2008.
- 13) 赤松良久，宮本大輔：河床堆積物中の炭素・窒素安定同位体比による河川環境評価，水工学論文集，第55巻，pp1261-1266, 2011.

(2012. 9. 30受付)