扇状地の用排兼用幹線水路における炭素・窒素安定同位体比測定による食物網の推定

山吹裕昌¹・一恩英二²・平松 研³・長野峻介⁴・柳井清治⁵

Examination of the Food Webs in Irrigation and Drainage Canals on an Alluvial Fan Using Carbon and Nitrogen Stable Isotope Ratios

Hiroaki Yamabuki¹, Eiji Ichion², Ken Hiramatsu³, Shunsuke Chono⁴ and Seiji Yanai⁵

Abstract: We examined the food webs in the main irrigation and drainage canals on the alluvial fan of the Tedori River (Ishikawa Prefecture, Japan) by measuring the carbon and nitrogen stable isotope ratios in food sources, aquatic insects, other benthic animals, and freshwater fishes in the upper, middle, and lower reaches. The results showed that the food webs in the canals mainly comprised aquatic insects, freshwater shellfish, and fish that originated from the canal bed sediment, and periphyton on the concrete-lined bed and side walls, and cobbles and boulders on the channel bed. The results also showed that the carbon and nitrogen stable isotope ratios of the periphyton increased in the lower reaches due to a decrease in flow velocity and an increase in the anthropogenic nitrogen load; the increases in the stable isotope ratios of the primary producers triggered increases in the stable isotope ratios of the entire food chain. The nitrogen of high stable isotope ratio conveyed by diadromous fish from a sea also might triggered the increase in the nitrogen stable isotope ratio of the entire food chain. Upstream migration of fishes and downstream migration of aquatic insects left gaps in the stable isotope ratios between predators and prey. Sustainable management of the cobbles and boulders will contribute to the conservation and rehabilitation of aquatic fauna and will promote water purification in the canals by increasing the number of aquatic insects that feed on periphyton and the number of fishes that feed on aquatic insects and periphyton.

Keywords: Stable isotope; Irrigation and drainage canal; Periphyton; Aquatic insects; Freshwater fishes

1 はじめに

我が国では、農作業の低コスト化・効率化を目指した圃場整備事業や水路の老朽化に対処する水路改修事業によって、農業水路は用水と排水が分離されコンクリート水路へと変貌している。この水路のコンクリート化には、水路底の砂や小石の消失、水路の直線化、水深の一定化、水辺植物の消失による魚・貝・水生昆虫・植物・野鳥の生息環境の破壊の問題が指摘されている（例えば、小林，1989）。

石川県の手取川扇状地の右岸に展開する七ヶ用水においても例外ではなく、1954年から延長7.8kmの幹線水路と延長約140kmの支線水路の直線化とコンクリート化が開始され、1982年には現在の用水形態がほぼ完成し（昭和の大改修）、1991年以降も水路の老朽化と雨水排水に対

応する改修事業（平成の大改修）を実施中である（村島ら，2004）。

平井（1992）は、コンクリート化や湧水涸れが原因で、1970年から1990年の20年間に手取川扇状地の小川や用水路に生息する魚類の生息地点数や個体数が減少したことを報告している。手取川扇状地における最近の研究では、コンクリート化が完了した七ヶ用水の上流・中流・下流で異なる生物相が報告された（山本・田中，2004；金山・田中，2004；上田ら，2004）。

近年、食物網を解析する手法として、炭素・窒素安定同位体比法が普及している。農業水路においても、この炭素・窒素安定同位体比法を用いて、都市域を流れるコンクリートライニング水路における食物網の研究（Hiramatsu *et al.*, 2014）や谷津内の土水路の食物網の研究（松澤ら，2008）が実施されているが、農業水路での研究はまだ多いとはいえない状況にある。

本研究で対象とした手取川七ヶ用水はコンクリート化された水路で、その幹線水路は用排兼用として用水の反復利用を行っており（吉田ら，2012）、北陸地方の急勾配扇状地地形を流下している。本研究は、独特の用排水システムを持つ七ヶ用水の上流、中流、下流に成立している食物網の現状を炭素・窒素安定同位体比法によって推定し、餌資源の観点から水路内の生物多様性を修復する方法を検討することを目的とした。

¹ 株式会社北川ヒューテック技師, Engineer, Kitagawa Hutek Co., Ltd., 1-13-1 Kanda, Kanazawa 921-8027, Japan

² 石川県立大学生物資源環境学部准教授, Associate Professor, Faculty of Bioresources and Environmental Sciences, Ishikawa Prefectural University, 1-308 Suematsu, Nonoichi, Ishikawa 921-8836, Japan (Corresponding Author) E-mail: ichion@ishikawa-pu.ac.jp

³ 岐阜大学応用生物科学部教授, Professor, Faculty of Applied Biological Sciences, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu 501-1193, Japan

⁴ 石川県立大学生物資源環境学部助教, Assistant Professor, Faculty of Bioresources and Environmental Sciences, Ishikawa Prefectural University, 1-308 Suematsu, Nonoichi, Ishikawa 921-8836, Japan

⁵ 石川県立大学生物資源環境学部教授, Professor, Faculty of Bioresources and Environmental Sciences, Ishikawa Prefectural University, 1-308 Suematsu, Nonoichi, Ishikawa 921-8836, Japan

2 研究方法

2.1 調査対象水路

調査対象とした水路は、七ヶ用水の幹線の一つである山島用水の4-1号支線及び4-2号支線である。山島用水は前述の平成の大改修によって改修された比較的新しいコンクリート水路である。また、4-1号支線では一部が二階建て水路、4-2号支線では多段式落差工が多数設置されるなど生態系に配慮した構造となっている（一恩ら, 2013）。なお、扇頂部の白山頭首工より取水された灌漑用水は、扇状に広がる用水路を通じて、灌漑期のみでなく、非灌漑期も水路の管理用水として流されている（吉田ら, 2012）。

図 1: 調査対象水路

図 2: 調査水路縦断面図(水路底)

山島用水を構成する4-1号支線にSt.1、4-2号支線にSt.2とSt.3を設定し、調査を実施した（図 1）。St.1は

矢頃島町の落差工、St.2は村井町の多段式落差工、St.3は上小川町の多段式落差工で、調査は落差工下流の水クッション部において実施した。調査水路周辺の主な土地利用は水田であり、水田以外に、集落、工場が点在している。

対象水路の縦断面図を図 2に示す。山島用水の下流端から上流端までの距離は約10.2km、地表の標高差が約60m、水路沿いの平均地形勾配は約1/170である。また、落差工区間を除いた水路区間の平均水路勾配は、上流部で約1/500、中流部で1/600、下流部で1/1000となっており、上流から下流にかけて勾配が緩やかになっている。

一恩ら（2013）は、4-2号支線の下流部3.5kmの区間において、(i) アユ、アユカケ、カジカ、スミウキゴリ、ウキゴリ、シマヨシノボリ、ヌマチチブの7種の回遊魚の分布が確認され、これらの魚種は海域から農業水路に遡上していると考えられること、(ii) 回遊魚のうち、アユカケ、カジカは海域近くに分布が限定されており、落差工が多いコンクリート水路では成長が阻害されている可能性があること、(iii) アユとウグイは調査水路に広く分布しており、調査水路内の落差工を移動していると考えられること、(iv) ドジョウは、灌漑期に支線用排水路や末端用排水路に移動し、非灌漑期に幹線水路へ戻って越冬する個体が多いと考えられること、(v) 腹鰭が吸盤状になっているウキゴリ、スミウキゴリ、シマヨシノボリも落差工を移動している可能性があること、などを指摘している。

2.2 安定同位体比

物質を構成する原子の中には同じ原子番号を持ちながら、質量数の異なる同位体が存在する。同位体は放射性同位体と安定同位体の2つに分類され、放射壊変して別の原子に変わるものを放射性同位体、放射壊変せずに安定しているものを安定同位体という。例えば炭素では、最も多く存在している ^{12}C と安定同位体である ^{13}C 、放射性同位体である ^{14}C がある。この最も多く存在している原子に対する安定同位体の存在比のことを安定同位体比といい、食物網の解析に用いられる炭素・窒素の安定同位体比は、 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 、 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ と表される。

安定同位体比は、非常に小さい値でしか変化しないことから、ある特定の基準物質の安定同位体比に対する千分率偏差(‰:パーミル)で表記する。この表記法を δ 記法といい、質量数の大きい同位体の記号に δ を付けて表す。例えば炭素の安定同位体比の千分率偏差は $\delta^{13}\text{C}$ と表し、下式のように表す(永田・宮島, 2008)。

$$\delta^{13}\text{C} = \left(\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{ref}}} - 1 \right) \times 1,000 \quad [\text{‰}] \quad (1)$$

ここに、

R_{sample} : 試料中の $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比

R_{ref} : 基準物質中の $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比

$\delta^{15}\text{N}$ についても同様に、試料中と基準物質中の $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 比を用いて定義される。

消費者の体を構成する炭素・窒素安定同位体比は、餌となる生物の安定同位体比の影響を強く受け、それぞれ一定の割合で濃縮されることがわかっている。この割合を

濃縮係数といい、濃縮係数は $\delta^{13}\text{C}$ で約1‰(DeNiro and Epstein, 1978), $\delta^{15}\text{N}$ は約3‰(1~5‰)になることが経験的に明らかになっている(DeNiro and Epstein, 1981; Minagawa and Wada, 1984). このような性質から、生物の安定同位体比を測定し、 $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ マップを作成すると、生態系内の食物網構造を推定することができる(南川, 1997).

2.3 試料の採集

St.1では2012年3月と9月の2回、St.2とSt.3では2011年10月、2012年3月、2012年9月の3回、試料採集を実施した。ただし、2011年10月調査では、水生昆虫の採集は実施していない。

落葉(リター)は、水路内を流下しているものと沈澱しているものを採取した。採取した落葉はスクリュー管に移して、持ち帰った。石礫付着物は、水路内の粒径10~30cmの石礫を2~5個採集し、歯ブラシを用いて表面の付着物をバット内にすり落として採集した。すり落とした付着物は、蒸留水に懸濁させ、スクリュー管に移した。石礫付着物の試料は、安定同位体比測定用と同定用の2種類作成した。同定用試料は、スクリュー管に移した後、ホルマリン濃度が3~5%となるよう、10%ホルマリンを加えて固定した。また、付着藻類は、ピンセットを使って水路の底面や側壁のコンクリート表面に付着した藻類を採集し、スクリュー管に保管した。

CPOM(粗粒状有機物)とFPOM(細粒状有機物)の安定同位体比測定用試料は、容量1Lのメスシリンダーで水路内の水を10L採集し、100 μm と20 μm のふるいを重ねたところに水を注ぎ、100 μm のふるいに残留した有機物をCPOM、20 μm のふるいに残留した有機物をFPOMと定義した。ふるいに残ったCPOM、FPOMは、それぞれ蒸留水で容量30mLのスクリュー管に流し込んだ。同定用の試料は、数L程度の採水を行って採取し、石礫付着物と同様にホルマリン固定を行った。

河床沈殿物は、水路に沈殿する有機物を採集した。採集にはバケツを使い、水路底の堆積物をすくい、20 μm のふるいに通過させて、ふるいに残留した有機物のうち、石やゴミなど特に大きな物質を取り除いて河床沈殿物とした。ふるいに残留した河床沈殿物は、蒸留水を用いてスクリュー管に流し込んだ。

魚類、水生昆虫およびその他の底生動物の採集には、フィッシュネット(ジェックス株式会社, GX-02, 間口16cm×11.8cm, 目合い0.5mm及びGX-03, 間口13.5cm×10cm, 目合い0.1mm)、角網(HOGA, 間口0.5m×1.0m, 目合い1mm)、投網(三谷釣漁具店, cn-1, 目合い5mm, 裾周り14m)を用いた。採集に当たっては、落差工下流の水クッション部の約20mを主な調査範囲とし、石礫堆積部、水際部、護岸コンクリートブロックの隙間等で、魚類、水生昆虫およびその他の底生動物について、より多くの種を採集するように努力した。採集した水生昆虫とその他の底生動物は、安定同位体比測定用と同定用に分け、同定用の試料は石礫付着物と同様の方法でホルマリン固定を行った。採取した安定同位体比測定用試料はすべてスクリュー管に入れ、クーラーボックスで研究室へ持ち帰り、安定同位体比の測定を行うまで冷凍庫で保存した。

採集された魚類の同定には中坊(2013)を、水生昆虫の同定には川合(1985)を、その他の底生動物の分類には刈田(2010)を用いた。また、POMと石礫付着物に含まれ

ていた藻類の分類は、一瀬・若林(2005)にしたがって、属レベルを目安に行った。

2.4 安定同位体比の測定

動物の試料では部位ごとに安定同位体比の転移時間が異なるため、魚類は解剖キットを用いて解剖し、肉片のみを試料とした。水生昆虫と底生動物は、体が小さいため、体全体を試料とした。解剖した魚類の肉片とその他の採集した試料は、蒸発皿に移し、60℃に設定した炉乾燥機を用いて、24時間乾燥させた。乾燥した試料は、乳鉢と乳棒を用いて十分すりつぶして粉末試料とした。ヨコエビの粉末試料には、1 mol/Lの塩酸を数滴加え、脱炭酸塩処理を施した後、もう一度60℃で炉乾燥を行い、すりつぶして粉末試料を作成した。魚類の肉片に含まれる脂質は筋肉に比べて $\delta^{13}\text{C}$ の値が低いため、体長の大きい魚類は脱脂を行った後、もう一度60℃で炉乾燥を行い、すりつぶして粉末試料を作成した。魚類肉片の脱脂にはメタノール・クロロホルム(1:2)混合液を加えて攪拌し、800rpmで10分間の遠心分離を行う工程を3回繰り返した。これらの粉末試料は、安定同位体比の測定まで、マイクロチューブまたは試験管に移したのち、デシケーター内の低湿度環境で保存した。

安定同位体比の測定は、EuroVector社製の元素分析装置とGV Instruments社製の安定同位体比質量分析装置を連結した装置(IsoPrime EA)を用いて行った。安定同位体比測定のために、試料と安定同位体比標準物質をそれぞれスズ箔に、中の空気が抜けるように包んだ。スズ箔に入れる物質は、安定同位体比標準物質は0.5mg、動物試料は1.5mg、それ以外の試料は0.8mgになるように、電子天秤で重さを測定した。試料を包んだスズ箔はその後、口を閉じて、小さな球状になるようにピンセットで丸めた。また、2回測定するために、1試料につき原則2個ずつスズ箔の包みを作成した。

試料測定の前に、3つのブランク(スズ箔のみを丸めた試料)と3つの安定同位体比標準物質の測定を行い、その後、試料の測定を行った。試料10個測定するごとに安定同位体比標準物質の測定を行い、値の補正を行った。値は2回の測定値の平均を採用した。

2.5 POMと石礫付着物の同定

検査用生物顕微鏡(オリンパス株式会社, BX41)とプランクトン計数板(松浪硝子工業, MPC-200)を用いて、CPOM、FPOM、石礫付着物に含まれるプランクトンの検鏡を行った。

検鏡は倍率200, 400, 1000で行った。プランクトン計数板は、試料を0.3mL注入すると、検鏡部(20マス×20マスの格子状の線が引かれている)に0.1mL入るように設計されている。

CPOM、FPOMの試料1Lに含まれるプランクトンの個体数を、採水した水の量から次式で計算した。

$$N = v \times \frac{400}{x} \times n \times 10 \quad (2)$$

$$A = \frac{N}{V} \quad (3)$$

ここに、

N: スクリュー管内のプランクトン数(個体数)

v : スクリュー管内の試料の体積 (mL)
 x : 計測したマス数 (25マス)
 n : 計測したプランクトン数 (個体数)
 A : 試料1L中のプランクトン数 (個体数)
 V : 濾過した水の体積 (L)

3 結果と考察

3.1 食物網の起源となりうる物質

2012年9月に採取したCPOM, FPOMに含まれていた藻類の1Lあたりの個体数を図 3に示す. 図 3に示したように, CPOM, FPOMとも, St.1からSt.2にかけてわずかに減少し, St.2からSt.3にかけて大きく増加する傾向が見られた.

粒状有機物は石礫付着物の中にも含まれており, St.1の石礫付着物中に粒状有機物が占める割合は80~90%で, St.2やSt.3の40~60%と比較して明らかに高かった.

検鏡によって確認された藻類の構成割合を図 4に示す. CPOM, FPOM, 石礫付着物とも, 珪藻類が50%以上を占めており, 次いで緑藻類が多く見られ, まれに鞭毛藻類や藍藻類が見られた. 珪藻類ではクチビルケイソウ(キンペラ)属(*Cymbella* sp.)やコメツブケイソウ(コッコネイス)属(*Cocconeis* sp.)などが見られ, 緑藻類ではボルボックス属(*Volvox* sp.)やコスマリウム属(*Cosmarium* sp.)などが見られた.

CPOMとFPOMの安定同位体比は, $\delta^{13}\text{C}$ は $-25 \sim -20\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}$ は $2 \sim 6\text{‰}$ の範囲にあった(図 5). 地点による変動よりも季節変動が卓越する傾向があった. また, FPOMとCPOMの $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ は共に近い値を示していたこと, および検鏡結果から, FPOMとCPOMは共に藻類を含んでいると考えられる. 藻類を含む割合が季節変動するため, FPOM, CPOMの $\delta^{13}\text{C}$ も季節変動をしているのかもしれない.

河床沈殿物の $\delta^{13}\text{C}$ は, $-26 \sim -24\text{‰}$ の範囲で, FPOMやCPOMの $\delta^{13}\text{C}$ より低かった. また, $\delta^{15}\text{N}$ はSt.1, St.2に比べ, St.3の方がわずかに高くなっていた. 森ら(2006)において河床沈殿物に含まれる有機物が陸起源有機物と藻類で構成されていることが報告されているように, 図 5に示した河床沈殿物の $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ の値も同様に, CPOMやFPOMに比べて藻類の割合が少なく, より落葉に近い値を示していると考えられる.

落葉の $\delta^{13}\text{C}$ は, 地点・季節に関わらず変動が小さく, $-30 \sim -28\text{‰}$ の範囲で, 米山(1987)の C_3 植物の $\delta^{13}\text{C}$ 値の範囲とほぼ類似していた. 一般に落葉の $\delta^{15}\text{N}$ は, 負の値を示すことが多いが(阿部・布川, 2005; 松澤ら, 2008; 山本ら, 2005など), 本研究で採集された落葉の $\delta^{15}\text{N}$ は $0 \sim 6\text{‰}$ の範囲で大きかった. 落葉の高い $\delta^{15}\text{N}$ の原因は高い $\delta^{15}\text{N}$ を示す生活雑排水や畜産廃棄物等に含まれる窒素の影響(森, 2004)や魚食性鳥類の高い $\delta^{15}\text{N}$ を含む排泄物の影響(Osono *et al.*)などが考えられるが, 今のところその原因は明らかではない.

石礫付着物の $\delta^{13}\text{C}$ は, 上流ほど小さくなる傾向が見られた. Jacques *et al.* (1999)は, 石礫付着物の主要成分である珪藻の $\delta^{13}\text{C}$ は, 流速の大きいところでは CO_2 の供給量が多くなり, 大きな同位体分別が起こるため, $\delta^{13}\text{C}$ が低くなるという仮説を示している. この仮説に従えば, 対象水路では上流ほど流速が大きいので(一恩・田中, 2004), 上流ほど $\delta^{13}\text{C}$ が低下する(下流ほど $\delta^{13}\text{C}$ が上昇する)現象が説明される. また, 図 4に示す検鏡結果から, 石礫付

図 3: CPOMとFPOMにおける藻類の個体数(2012年9月)

図 4: 藻類の構成割合(2012年9月)

着物中の粒状有機物に藻類の含まれる割合は下流ほど高かった. 下流ほど珪藻の割合が高くなる傾向と, 下流ほど流速の影響で珪藻の $\delta^{13}\text{C}$ が高くなる傾向によって, 下流ほど石礫付着物の $\delta^{13}\text{C}$ が高くなっていると考えられる.

また, 石礫付着物の $\delta^{13}\text{C}$ は, 3月より, 9月, 10月に高くなる傾向が見られた. この傾向も, Jacques *et al.* (1999)の流速が珪藻の $\delta^{13}\text{C}$ に与える影響や, Fry (1996)の水温が珪藻の $\delta^{13}\text{C}$ に与える影響で説明できる. 珪藻周辺のこれらの環境要因の影響によって, 主に珪藻で構成される石礫付着物の $\delta^{13}\text{C}$ の季節変動が生じていると考えられる.

図 5: 食物網起源となりうる物質の炭素・窒素安定同位体比

石礫付着物の $\delta^{15}\text{N}$ が下流ほど高くなる傾向も、珪藻の $\delta^{15}\text{N}$ の変動が関係していると考えられる。珪藻の周

りの溶存態窒素が枯渇している場合や、珪藻の増殖速度が速い場合、珪藻の生物量が多い場合などに、珪藻の同位体分別が小さくなり、珪藻の $\delta^{15}\text{N}$ は周りの溶存態窒素に近くなる (土居, 2002)。また、いさわ南部地区原川排水路では、生活雑排水に含まれる $\delta^{15}\text{N}$ の高い窒素が排水に流入し、付着物中の藻類がその窒素を吸収した結果、付着物の $\delta^{15}\text{N}$ が水の $\delta^{15}\text{N}$ に追従していた (森, 2006)。七ヶ用水においても、硝酸態窒素やアンモニア態窒素が秋季や冬季に上昇する地点があり (一恩・田中, 2004)、生活雑排水や畜産排水に含まれる $\delta^{15}\text{N}$ の高い窒素が藻類に吸収されて $\delta^{15}\text{N}$ の季節変動が生じていたと推定される。

付着藻類においても、石礫付着物と同様に、下流の変動は、St.1とSt.2では9月、10月に $\delta^{13}\text{C}$ が増加し、 $\delta^{15}\text{N}$ は減少した。St.3では $\delta^{13}\text{C}$ の変化は小さく、 $\delta^{15}\text{N}$ は2011年10月に高い値が測定された。流速と水温の変化、畜産排水、生活雑排水の流入によって、付着藻類の $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ も大きく変動していると考えられる。

3.2 水生昆虫

採集された水生昆虫を表 1に示した。表 1に示すように、各調査地点で3月と9月の水生昆虫の種数を比較すると3月が多い傾向であった。また、水生昆虫の種数は、St.1とSt.2は同数であったが、下流側のSt.3では減少した。これらの傾向は、七ヶ用水全域の水生昆虫の分布を報告した金山・田中 (2004) と一致している。水生昆虫の炭素・窒素安定同位体比を図 6に示した。

表 1: 採集された水生昆虫

和名	学名	St.1		St.2		St.3	
		2012.3	2012.9	2012.3	2012.9	2012.3	2012.9
サホコカゲロウ	<i>Baetis sahoensis</i> Gose	●	●	●	●		●
ナミヒラタカゲロウ	<i>Epeorus ikanonis</i> Takahashi	●	●				
ヒメヒラタカゲロウ	<i>Rhythrogena japonica</i> Uéno			●		●	
フタバコカゲロウ	<i>Pseudocloeon japonica</i> Imanishi	●					
カミムラカワゲラ	<i>Kamimuria tibialis</i> Pictet	●					
ウルマーシマトビケラ	<i>Hydropsyche orientalis</i> Martynov						●
ヒゲナガカワトビケラ	<i>Stenopsyche marmorata</i> Navas		●		●		
ガガンボ科	Tipulidae spp.			●	●	●	
トンボ目	Odonata spp.			●			

サホコカゲロウはすべての地点で採集され、 $\delta^{13}\text{C}$ はほかの水生昆虫に比べて広い値の範囲を持っていたのに対して、 $\delta^{15}\text{N}$ の変動は2~4‰と小さかった。また、下流ほど $\delta^{13}\text{C}$ が大きくなる傾向が見られた。ナミヒラタカゲロウは山地溪流の激流部に生息する水生昆虫で (川合, 1985)、St.1でのみ2012年3月と9月に採集された。ナミヒラタカゲロウの $\delta^{15}\text{N}$ は約4‰であったが、 $\delta^{13}\text{C}$ は3月の -25 ‰に対して、9月には -29 ‰に低下した。 $\delta^{13}\text{C}$ の低下は、St.1やSt.2のサホコカゲロウでも同じく生じている。ヒメヒラタカゲロウは2012年3月に

St.2とSt.3で採集されているが、その $\delta^{13}\text{C}$ の値は大きな差があった。カゲロウ類の幼虫はすべて植食性で、水中の石面上や堆積物の表面に付着する珪藻などの微小藻類を食べているので（川合，1985），石礫付着物や付着藻類とカゲロウ類の $\delta^{13}\text{C}$ の季節変化と地点変化は対応関係があった（図5，図6）。すなわち，3種のカゲロウ類の $\delta^{13}\text{C}$ は，石礫付着物や付着藻類の $\delta^{13}\text{C}$ と同様に，下流地点でより高くなる傾向を示した。季節変化は，カゲロウ類の $\delta^{13}\text{C}$ の値は9月より3月に大きくなっていたのに対して，カゲロウ類の餌物質である石礫付着物と付着藻類の $\delta^{13}\text{C}$ は3月より9月の値が大きくなっていた。この逆転現象は，水生昆虫の体組織において安定同位体比の変動が約6ヶ月で転移すると考えられると矛盾なく理解できる。

ヒゲナガカワトビケラは9月にSt.1とSt.2で採集された。 $\delta^{15}\text{N}$ は4‰程度でSt.1とSt.2で類似の値を示していたが， $\delta^{13}\text{C}$ は下流ほど高い値を示した。ヒゲナガカワトビケラは造網型の採集食者で（丸山・高井，2000），刈田（2010）によれば，流下してきた藻類や落葉などの有機物を食べることが報告されている。ヒゲナガカワトビケラ，CPOM，FPOM，落葉の $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ の値は，安定同位体比の転移時間を6ヶ月程度と考えれば，この餌資源の記述におおむね一致するものであり，対象水路に生息するヒゲナガカワトビケラの餌資源は，刈田（2010）に述べられているように，流下藻類と落葉と考えることができる。

ガガンボ科の生物は3月にSt.2とSt.3で，9月にSt.2で採集された。カゲロウ類の $\delta^{13}\text{C}$ は下流ほど高い傾向にあったのに対して，ガガンボ科はSt.3の値が最も低かった。刈田（2010）は，ウスバガガンボは付着藻類食であるのに対して，マダラガガンボは落葉食であると，種による食性の違いを述べている。本研究ではガガンボ科の詳しい種の同定を行っていないが，St.3のガガンボ科生物は落葉食，St.2のガガンボ科生物は付着藻類食であった可能性がある。

フタバコカゲロウは，3月にSt.1でのみ採集された。フタバコカゲロウの安定同位体比は，同じ調査日にSt.1で採集したナミヒラタカゲロウに近い値を示していた。フタバコカゲロウは，カゲロウ類の一種であり，水中の石面上や堆積物の表面に付着する珪藻などの微小藻類を食べており（川合，1985），安定同位体比の値からもそのことが確認された。

カミムラカワゲラは3月にSt.1でのみ採集された。金山・田中（2004）においても，カミムラカワゲラは山島用水上流のSt.1付近でのみ分布が確認されている。カミムラカワゲラの分布は，河川の中流域から下流域の流れの緩やかな場所（丸山・高井，2000）や上流から中流の瀬の石の下（財）リバーフロント整備センター，1996）などであり，その生息場所の記載は文献によって差がある。金山・田中（2004）によれば，きれいな水の指標生物であるカワゲラ目，プラナリア，ヒラタカゲロウ科，ヤマトビケラ科などの水生生物が扇状地扇頂部の水路で採集されていると報告されており，カミムラカワゲラの分布は主に水質に関係している可能性が考えられる。カミムラカワゲラの安定同位体比は，同時に採集された藻類食のフタバコカゲロウと近い値であったが， $\delta^{15}\text{N}$ ， $\delta^{13}\text{C}$ とも，カミムラカワゲラの方がわずかに高い値を示していた。カミムラカワゲラ

図6: 水生昆虫の炭素・窒素安定同位体比

はユスリカ，カゲロウ，ウスバガガンボ属，カワゲラのほか，藻類を食べることもあるので（磯辺，1989），St.1のカミムラカワゲラの $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{13}\text{C}$ の値がフタバコカゲロウと類似しているのは，フタバコカゲロウや藻類を主

な餌資源としている可能性がある。

トンボ目の一種の $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{13}\text{C}$ は St.2 で採集された水生昆虫の中で最も高い値を示した。トンボは成虫、幼虫とも肉食であるので (川合, 1985), その $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{13}\text{C}$ の値から推定すると, 主にほかの水生昆虫を餌資源にしていると考えられる。

ウルマーシマトビケラは9月に St.3 で採集され, その $\delta^{15}\text{N}$ や $\delta^{13}\text{C}$ は同時期に同地点で採集された藻類食のサホコカゲロウの $\delta^{15}\text{N}$ や $\delta^{13}\text{C}$ の値に近い値を示していた。(財) リバーフロント整備センター (1997) には, ウルマーシマトビケラは付着藻類とデトリタスを食べることが記載されており, St.3 のウルマーシマトビケラもその $\delta^{15}\text{N}$ や $\delta^{13}\text{C}$ の値から藻類食であると考えられる。

3.3 その他の底生動物

採集された水生昆虫以外の底生動物を表 2 に示す。St.1 で採集された水生昆虫以外の底生動物の種数は, 1 ~ 3 種と, St.2 や St.3 の 4 ~ 6 種に比較して少ない傾向にあった。また, その他の底生動物の炭素・窒素安定同位体比を図 7 に示す。

表 2: 採集されたその他の底生動物

和名	学名	St.1			St.2			St.3		
		2012.3	2012.9	2011.10	2012.3	2012.9	2011.10	2012.3	2012.9	2011.10
シマイシビル	<i>Erpobdella</i> sp.	●		●	●	●	●	●	●	●
ウマビル	<i>Whitmania pigra</i>				●	●	●	●	●	●
シジミ	<i>Corbicula</i> sp.			●	●	●	●	●	●	●
カワニナ	<i>Semisulcospira</i> sp.		●	●	●	●	●	●	●	●
ヨコエビ科の一種	<i>Gammarus</i> sp.		●	●	●	●	●			
モクズガニ	<i>Eriocheir japonica</i>		●		●					●

シジミは濾過食性で粒子状有機物を食べる ((財) リバーフロント整備センター, 1997) 。 St.2 と St.3 では季節に関係なくシジミが採集された。図 7 に示すように, シジミの $\delta^{15}\text{N}$ や $\delta^{13}\text{C}$ の値は場所や時期による変動が比較的少なく, $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{13}\text{C}$ とも St.2 より St.3 が大きくなる傾向が示された。これらの傾向は, 河床沈殿物の $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{13}\text{C}$ の傾向と類似しており, シジミは主に河床沈殿物を濾過して食べていると考えられる。

カワニナは, 付着藻類, 落葉・朽木, 魚などの死肉を食べる (刈田, 2010 ; (財) リバーフロント整備センター) 。 カワニナの $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{13}\text{C}$ は, シジミと異なり, 特に St.3 では, 付着藻類や石礫付着物に影響を受けていると考えられる季節変動が生じていた。また, カワニナの $\delta^{13}\text{C}$ は $-20 \sim -16\text{‰}$ で後述する本調査水路で採集される魚類の $\delta^{13}\text{C}$ 値と類似した範囲の値をとっている。これらのことから, カワニナは魚類の死肉や付着藻類・石礫付着物を主要な餌資源にしていると考えられる。

ウマビルとシマイシビルの安定同位体比は大きな差異はなかった。ウマビルの $\delta^{13}\text{C}$ は $-22 \sim -20\text{‰}$ であったのに対し, シマイシビルは $-24 \sim -19\text{‰}$ とやや広い値をとっていた。 $\delta^{15}\text{N}$ はウマビル, シマイシビルとも $4 \sim 8\text{‰}$ であった。シマイシビルはユスリカ, イトミミズ, 水生昆虫を, ウマビルは巻き貝などを捕食する肉食性とする (刈田, 2010 ; (財) リバーフロント整備

図 7: その他の底生動物の炭素・窒素安定同位体比

センター, 1996) 。 また, 寺居・梅津 (2007) は, シマイシビルを用いた 48 時間の実験で, 生きたカワニナ稚貝は捕食されなかったが, カワニナとドジョウの死骸は速やかに捕食されたことを報告している。これらの文献およびシマイシ

ビルとウマビルの $\delta^{15}\text{N}$ や $\delta^{13}\text{C}$ の値から推測すると、これらのヒル類はカワニナを餌資源にしている可能性が高いと推定される。ただし、St.3のカワニナの $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{13}\text{C}$ はヒル類の単独の餌資源としては高い値であるため、上流から流下してくるカワニナの死骸やカワニナより $\delta^{15}\text{N}$ や $\delta^{13}\text{C}$ が低いシジミを餌資源にしている可能性も考えられる。また、本研究ではユスリカは採集されていないが、ミミズ類の $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{13}\text{C}$ は、St.2でそれぞれ約5‰と約-24‰、St.3で約6‰と約-20‰で、シマイシビルの餌資源の一つと考えて不自然でない値であった。

ドジョウの死骸や水生昆虫なども本調査水路には豊富に存在すると考えられるので、これらもまたシマイシビルの餌資源になっている可能性があると考えられる。

ヨコエビ科の生物の $\delta^{13}\text{C}$ は-25～-20‰であったのに対して、モクズガニは-21～-17‰と大きかった。 $\delta^{15}\text{N}$ についても、モクズガニは6～9‰と、ヨコエビの2～8‰よりも全般的に高い傾向を示した。本調査水路のヨコエビは詳しい種の同定は行われていないが、ヨコエビ目は一般的に腐食性シュレッダーに分類され、落葉枝を主とする植物遺体とそれに定着する微生物を摂食する(加賀谷, 2013)。(財)リバーフロント整備センター(1997)によれば、ニッポンヨコエビの採餌内容は、付着藻類、死骸、落葉・朽木とあり、本調査水路のヨコエビ科の生物の $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{13}\text{C}$ から推定すると、ニッポンヨコエビの摂餌内容に類似したやや肉食性が低い採餌内容であると考えられる。モクズガニは小魚、貝類、死骸を採餌していると考えられており(財)リバーフロント整備センター, 1997)、 $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{13}\text{C}$ の値からも本調査水路のモクズガニはヨコエビより肉食性が高いことが示された。モクズガニの詳しい餌資源の特定には、消化管内容物の調査などが必要である。

3.4 魚類

本研究で採集された魚類を表3に示す。山本・田中(2004)によれば、4-1号支線の中流部ではアユとトウヨシノボリが、下流部ではタカハヤ、ウグイ、タモロコ、オオヨシノボリ、トウヨシノボリの5種が、4-2号支線ではコイ、アブラハヤ、タカハヤ、ウグイ、タモロコ、ドジョウ、アユ、ヤマメ、アユカケ、カジカ(回遊型)、スズキ、ドンコ、スミウキゴリ、ウキゴリ、シマヨシノボリ、ヌマチチブ、ミミズハゼの17種が採集されている。さらに、一恩ら(2013)は、4-2号支線では、アユ、ドジョウ、アユカケ、シマヨシノボリの採集個体数が多いことを報告している。本調査の魚類の出現種数は、既往研究と比較して、調査の地点数や頻度の違いから差異が生じているが、下流ほど種数が多くなる傾向は既往研究と同様に得られた。

アユは藻類食者であり(井上, 2013)、アユの $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{13}\text{C}$ の値は、石礫付着物や付着藻類の $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{13}\text{C}$ に影響されていると考えられる。したがって、高 $\delta^{15}\text{N}$ グループのアユは水路下流部の付着藻類を、低 $\delta^{15}\text{N}$ グループのアユは水路中流部の付着藻類を主に摂食していた可能性が高い。St.1で採集されたアユの $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{13}\text{C}$ の値は、St.1の石礫付着物や付着藻類の摂食者の値より大きいことから、St.1のアユはより下流で主に採餌していたと推定される。大宮ら(2005)は、ホトケドジョウとタモロコの0歳魚を飼育し、同位体回転率を5ヶ月と推定している。野外のアユの同位体回転率に関する知見は得られていない

が、仮に5ヶ月程度と考えると、採集された9月の5ヶ月前の4月にはSt.1に海域からアユがまだ到達しておらず、St.1に到達後に採餌した石礫付着物や付着藻類は体にまだ反映されていないと考えられる。したがって、St.1は流速が速く、アユの餌となる石礫付着物や付着藻類が少ないと考えられるが、アユの $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{13}\text{C}$ からSt.1周辺でアユが採餌していないと結論づけることはできない。

表 3: 採集された魚類

和名	学名	St.1		St.2		St.3			
		2012.3	2012.9	2011.10	2012.3	2012.9	2011.10	2012.3	2012.9
アブラハヤ	<i>Phoxinus logowskii steindachneri</i>					●			
ウグイ	<i>Tribolodon hakonensis</i>			●		●	●	●	
ドジョウ	<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>			●	●	●	●	●	●
アユ	<i>Plecoglossus altivelis altivelis</i>		●			●			●
ドンコ	<i>Odontobutis obscura</i>						●		
スミウキゴリ	<i>Gymnogobius petschiliensis</i>						●		
オオヨシノボリ	<i>Rhinogobius fluviatilis</i>		●			●			
シマヨシノボリ	<i>Rhinogobius nagovae</i>								●

次に、魚類の安定同位体比の測定結果を図8に示す。アユは $\delta^{15}\text{N}$ が9～10‰の高 $\delta^{15}\text{N}$ グループと5～6‰の低 $\delta^{15}\text{N}$ グループの2つのグループに明瞭に分かれた。各グループの $\delta^{13}\text{C}$ は、-17～-13‰と-19～-15‰と重複を持ち、 $\delta^{15}\text{N}$ に比較して変動幅が大きかった。アユは2012年9月のみ、St.1、St.2、St.3の全ての水域で採集されたが、高 $\delta^{15}\text{N}$ グループは、St.3で採集された3個体とSt.2で採集された1個体より構成され、低 $\delta^{15}\text{N}$ グループはSt.1で採集された3個体とSt.2で採集された2個体より構成されていた。

ドジョウも、 $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{13}\text{C}$ からアユと同様に、明瞭に2グループに分かれた。高 $\delta^{15}\text{N}$ のグループはSt.3で採集した5個体で構成され、低 $\delta^{15}\text{N}$ グループはSt.3の3個体とSt.2の6個体から構成される。宮地ら(1976a)によれば、ドジョウの成魚は底生藻類やその分解物を泥土とともに吸いこんで摂食するが、体長8cm程度まではユスリカ・イトミミズなどの動物をかなり多く食うと述べられている。また、(財)リバーフロント整備センター(1997)には、ドジョウの採餌内容として、水生昆虫、付着藻類、落葉・朽木、水草、デトリタスが記されている。ドジョウも藻類を食べることから、アユと同じように、下流ほど $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{13}\text{C}$ の値が大きくなる傾向を示したが、粒状有機物(POM)や河床沈殿物を含む、広範な採餌を行うことで、藻類食であるアユより小さい $\delta^{13}\text{C}$ になっていると考えられる。

St.3で採集されたウグイは12～14‰という魚類の中で最も高い $\delta^{15}\text{N}$ を示した。St.2のウグイの $\delta^{15}\text{N}$ は8～10‰とSt.3より低い値を示した。 $\delta^{13}\text{C}$ は-20～-18‰で、藻類食のアユや雑食性であるドジョウに比べて小さい変化幅を示した。ウグイは付着藻類や水生昆虫、水面

図 8: 魚類の炭素・窒素安定同位体比

の落下昆虫のほか、ほかの魚やけものなどの死骸、小魚や魚卵なども好む、典型的な雑食性の魚である（酒井，2001）。St.3のウグイは、スミウキゴリとともに最も $\delta^{15}\text{N}$ の高く、本調査で採集された生物の中で最も高次の捕食者であると考えられる。

また、Kline *et al.* (1990) は、遡河回遊魚（カラフトマス）が海起源の高い $\delta^{15}\text{N}$ の窒素を淡水域に運搬することを報告している。石川県では七尾湾に面した漁港などでウグイの姿が見られ、降海型と純淡水型の2つのタイプが存在する（石川県淡水魚類研究会，1996）。七ヶ用水のウグイに降海型がいるという証拠は得られていないが、もしこの降海型ウグイが存在するとすれば、

海域の高い $\delta^{15}\text{N}$ の窒素を含んだ餌を食べたウグイが淡水域に遡上している可能性が考えられる。

オオシノボリの $\delta^{15}\text{N}$ はSt.1で約7‰、St.2では約8‰と大きな差は見られなかったが、 $\delta^{13}\text{C}$ は、ウグイと同様に藻類食の魚類に比べて、 $-21\text{‰} \sim -18\text{‰}$ と低い、地点間で明瞭な差異があった。オオシノボリは雑食性で付着藻類、水生昆虫、小魚、甲殻類を採餌するので（水野，2001；（財）リバーフロント整備センター，1997），付着藻類や付着藻類を摂食する水生昆虫の $\delta^{13}\text{C}$ に影響を受けて、この地点間の差異が生じていると考えられる。

2011年10月にSt.3で採集されたスミウキゴリの $\delta^{15}\text{N}$ は約13‰、 $\delta^{13}\text{C}$ の値は約 -18.4‰ で、2011年3月にSt.3で採集したウグイの値に類似していた。スミウキゴリは、小魚、水生昆虫、環形動物を採餌する魚類で（（財）リバーフロント整備センター，1997），ウグイより高い肉食性を持つと考えられる。

また、シマシノボリは2012年9月に2個体のみ採集され、その $\delta^{15}\text{N}$ は約11‰、 $\delta^{13}\text{C}$ は $-16 \sim -14\text{‰}$ を示した。シマシノボリは、一般に、甲殻類、小魚、水生昆虫、付着藻類、魚卵などを採餌する雑食性で（（財）リバーフロント整備センター，1997），St.3のシマシノボリの $\delta^{15}\text{N}$ や $\delta^{13}\text{C}$ の値はほかの魚類に比べて高いので、 $\delta^{15}\text{N}$ や $\delta^{13}\text{C}$ が高いSt.3のアユやアユの卵、付着藻類を主な餌資源としている可能性がある。

ドンコの $\delta^{15}\text{N}$ の値は、同じ調査日にSt.3で採集されたウグイやスミウキゴリに比べて低く、約9‰を示した。ドンコは大型の水生昆虫や甲殻類、魚類を飽食する肉食魚であることから（宮地ら，1976b），水生昆虫やヨコエビ、ドジョウなどを食べている可能性がある。

アブラハヤの $\delta^{15}\text{N}$ は9.7‰であり、同じ日に同じSt.2で採集したウグイの10.4‰よりやや低かった。 $\delta^{13}\text{C}$ はウグイに比べわずかに高く、約 -19‰ を示した。アブラハヤは底生生物や付着藻類などを食べているため（板井，2001）ウグイよりもわずかに肉食性が低いと考えられる。

アユ、スミウキゴリ、シマシノボリなどの両側回遊魚は、仔稚魚期に、海域の $\delta^{15}\text{N}$ の高い餌を食べている可能性がある。これらの両側回遊魚が海域から高い $\delta^{15}\text{N}$ の窒素をどの程度、水路の食物網に運び、食物網の $\delta^{15}\text{N}$ を押し上げているのか、今後詳しく研究する必要がある。

3.5 各調査地点の食物網の推定

採集した水生昆虫は破碎食者（SH:Shredder）：落葉や大型の植物体をかじるグループ、濾過食者（CF:Collector-Filter）：流下するPOMを濾過して食べるグループ、採集食者（CG:Collector-Gatherer）：堆積しているPOMを集めて食べるグループ、刈取食者（SC:Scraper）：石の表面付着物を食べるグループ、捕食肉食者（PR:Predator）：他の動物類を捕食するグループ、という5つの摂食機能群に分類される（竹門，2005；阿部・布川，2005）。本研究で採集した水生昆虫は、松澤ら（2008）に従い、SC、CG、CFの3つのグループを表4のように、食物網の推定のために雑食性ベントスとしてひとまとめに扱い、主要動物とその餌資源に関する $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ マップを地点毎に作成した（図9）。

St.1の水生昆虫（CF/SC/CG）は河床沈殿物から伸ばした破線上にあるので、主に河床沈殿物を食べている

ように見える。セヶ用水では灌漑期の上流地点では流速が200cm/s前後と大きく、(一恩・田中, 2004), 前述のように石礫付着物に含まれる藻類の量が少ない。水谷・森(2009)では、コカゲロウ類の研究から、コカゲロウは藻類が少ない環境では堆積物(河床沈殿物)を餌とすることが報告されており、St.1のコカゲロウ類などの水生昆虫(CF/SC/CG)は、河床沈殿物に餌資源を依存している可能性がある。もう一つの解釈は、St.1より上流から水生昆虫の流下して、St.1の水生昆虫(CF/SC/CG)の $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{13}\text{C}$ が変化したとするものである。一般に河川の底生動物の流下は洪水時だけでなく、平水時にも認められる一般的な現象である(御勢, 1993)。この場合、上流でSt.1の河床沈殿物と類似した $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{13}\text{C}$ を持つ付着藻類などの餌資源を食べていた水生昆虫(CF/SC/CG)がSt.1に流下して、St.1においても石礫付着物や付着藻類を餌資源にしている可能性も否定できない。

表 4: 水生昆虫と摂食機能群

生物種	摂食機能群	St.1	St.2	St.3
サホコカゲロウ	CF/SC/CG	●	●	●
ナミヒラタカゲロウ	CF/SC/CG	●		
ヒメヒラタカゲロウ	CF/SC/CG		●	●
フタバコカゲロウ	CF/SC/CG	●		
カミムラカワゲラ	PR	●		
ウルマーシマトビケラ	CF/SC/CG			●
ヒゲナガカワトビケラ	CF/SC/CG	●	●	
ガガンボの一種	SH		●	●
トンボ目の一種	PR		●	
ミズムシ	CF/SC/CG			●

アユは石礫付着物や付着藻類を食べる魚類であるが(西田, 2001), St.1の石礫付着物や付着藻類の $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{13}\text{C}$ は、St.1で採集されたアユの主要な餌資源としては低すぎる値である。前述のように、安定同位体の転移に要する時間の関係で、下流のSt.2やSt.3の石礫付着物や付着藻類の $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{13}\text{C}$ はアユの体の同位体に反映しているが、St.1の餌資源はまだアユの体に反映していないと考えられる。つまり、アユの移動性と同位体転移に要する時間の影響で、St.1の餌資源(石礫付着物や付着藻類)から推定されるアユの $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{13}\text{C}$ とSt.1で実際に採集されたアユの $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{13}\text{C}$ の間にずれが生じていると解釈される。森・柚山(2005)が、下流の安定同位体比特性を持つ魚類が上流で捕獲されれば魚類の移動を証明できると指摘していたように、St.2やSt.3の安定同位体比特性を持つアユがSt.1で採集された可能性が高く、アユは海域から水路へ進入し、遡上してSt.1に達している可能性が高い。ただし、手取川から白山堰堤の取入口を経由してSt.1にアユが進入する可能性も残されており、今後は手取川のアユや迷入アユの $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{13}\text{C}$ についても調査を行う必要がある。

St.1のオオヨシノボリの $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{13}\text{C}$ の値も、アユの場合より小さいが、餌資源である付着藻類・水生昆虫から推定される $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{13}\text{C}$ の値より、右上にずれた値が得られた。このずれも、オオヨシノボリの移動性と関連している可能性があり、今後の研究が期待される。石川県淡水魚類研究会(1996)によれば、オオヨシノボリは、手取川では、セヶ用水取水口より上流の

図 9: 主要な動物とその餌資源の $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ マップ (図中の値は平均値, エラーバーは標準偏差, マップ上の破線矢印は $\delta^{13}\text{C} = 1\text{‰}$ あたり $\delta^{15}\text{N} = 3\text{‰}$ の割合で上昇させたもの)

白山市中島町でのみ分布が確認されている。このため、セヶ用水の上流部から中流部にかけて分布するオオヨシノボリは、用水の取水口である白山堰堤の上流から進入した魚種に分類されている(山本・田中, 2004)。今後、手取川のオオヨシノボリの $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{13}\text{C}$ の計測を

行い、七ヶ用水のオオヨシノボリの $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{13}\text{C}$ と比較することで、上流からの進入の有無や頻度、七ヶ用水の中でのオオヨシノボリの移動状況が解明できる可能性がある。

次にSt.2の食物網の考察のため、マップ上に石礫付着物から始まる破線矢印を示した(図9)。破線矢印上には、水生昆虫(CF/SC/CG)を始め、ドジョウ、ウグイ、アブラハヤ、オオヨシノボリがプロットされた。

St.2の水生昆虫(CF/SC/CG)の主な餌資源は石礫付着物であると考えられる。水生昆虫(CF/SC/CG)と石礫付着物の $\delta^{15}\text{N}$ の差異は約2‰で一般値である3‰より低い。前述の御勢(1993)の水生昆虫の流下の影響で、St.2の水生昆虫(CF/SC/CG)の $\delta^{15}\text{N}$ は低下している可能性がある。

ドジョウは、デトリタスや水生昆虫、付着藻類を中心に幅広い食性を持っているものの、肉食性が強い(松澤ら, 2006)。St.2のドジョウも同様の傾向を持ち、 $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{13}\text{C}$ の値から、CPOM、河床沈殿物、水生昆虫(CF/SC/CG)、石礫付着物、付着藻類などがドジョウは主な餌資源だと考えられる。一恩ら(2013)は、ドジョウが灌漑期に支線用排水路や末端用排水路へ移動し、非灌漑期に幹線水路へ戻る可能性を指摘している。本研究では、支線用排水路や末端用排水路、水田におけるドジョウの餌資源の $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{13}\text{C}$ の情報は得られていない。今後、支線・末端用排水路、水田での安定同位体比の調査が進捗すれば、ドジョウの新たな餌資源やドジョウの移動状況が解明される可能性がある。

St.2のウグイ、アブラハヤ、オオヨシノボリは、ドジョウよりも高い、8‰を超える $\delta^{15}\text{N}$ を示した。St.2の水生昆虫(CF/SC/CG)の $\delta^{15}\text{N}$ は平均で約3‰であり、これらの魚類の $\delta^{15}\text{N}$ は、主な餌資源だと考えられる水生昆虫(CF/SC/CG)の $\delta^{15}\text{N}$ より5‰以上の高い値であった。アユの $\delta^{15}\text{N}$ は、約7‰で、餌資源である石礫付着物や付着藻類の $\delta^{15}\text{N}$ より、やはり5‰以上の高い値であった。このように、大きな $\delta^{15}\text{N}$ の差が生じる原因は、

(i) 流下による水生昆虫(CF/SC/CG)の $\delta^{15}\text{N}$ の低下、
(ii) $\delta^{15}\text{N}$ の高い動物(カミムラカワゲラ、魚卵、魚類の死骸、小魚等)の捕食、(iii) 魚類の遡上による $\delta^{15}\text{N}$ の上昇、などが考えられる。一恩ら(2013)では、前述のとおり、多数の回遊魚が多段式落差工を移動(遡上)している可能性を指摘しており、アユ、ウグイ、アブラハヤ、オオヨシノボリの $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{13}\text{C}$ からも移動の可能性が指摘された。

St.3の水生昆虫(CF/SC/CG)も、St.2と同様に、石礫付着物を主に食べていると考えられる。ただし、St.3のマップ上では、両者の位置関係は逆転しており、石礫付着物の $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{13}\text{C}$ の値(平均)は、その捕食者である水生昆虫(CF/SC/CG)の $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{13}\text{C}$ の値(平均)より高くなっている。この逆転の原因は、(i) 石礫付着物の $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{13}\text{C}$ の値は時間的に大きな変動を示しているのに対して調査回数が少なく、水生昆虫(CF/SC/CG)が食べた石礫付着物の平均的な $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{13}\text{C}$ の値を表していない、(ii) 流下による水生昆虫(CF/SC/CG)の $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{13}\text{C}$ の低下等が考えられる。

ドジョウも、St.2と同様に、CPOM、河床沈殿物、水生昆虫(CF/SC/CG)、石礫付着物、付着藻類を主に食べていると考えられる。ドンコの $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{13}\text{C}$ の値はドジョウと類似しているが、前述の文献などから、水生昆虫(CF/SC/CG)、ヨコエビ、ドジョウを主な餌資

源としていると推定される。ウグイ、スミウキゴリは、共に $\delta^{15}\text{N}$ が13‰程度と非常に高い値を示していることから、肉食性が強いと言える。スミウキゴリは、水生昆虫(CF/SC/CG)、ドジョウなどの小魚を、ウグイはドジョウなどの小魚を主に食べている可能性が考えられる。St.3は海域から0.7kmと近い地点であるため、St.1やSt.2に比べると、魚類の遡上が $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{13}\text{C}$ に及ぼす影響は小さいと考えられる。

最後に、全体の傾向について述べる。St.1からSt.3へ下流に向かうに従って、 $\delta^{15}\text{N}$ - $\delta^{13}\text{C}$ マップ上の食物連鎖網の位置は右上方向へ全体が移動する傾向を示した。この傾向は、下流では、主に流速低下が一次生産者である珪藻を主成分とする石礫付着物や付着藻類の $\delta^{13}\text{C}$ を上昇させたことと、扇状地内の生活雑排水や畜産排水などの人為的な窒素負荷の流入が石礫付着物や付着藻類の $\delta^{15}\text{N}$ を上昇させたことによって引き起こされたと考えられる。

また、前述のように、アユ、ウグイ、スミウキゴリ、シマヨシノボリなどの回遊魚が、海起源の $\delta^{15}\text{N}$ の高い窒素を採餌によって体内に蓄積して、淡水域に運搬し、水路の食物網全体を押し上げている可能性も考えられる。今後の詳しい研究が必要である。

以上の結果から、手取川扇状地のコンクリート化された用排兼用水路である山島用水では、河床沈殿物、石礫付着物、付着藻類を起源とした、水生昆虫、淡水貝類、魚類などからなる食物網の形成が確認された。この食物網に着目すると、コンクリート水路においても、河川から自然に流入する石礫を除去せずに保全することで石礫付着物を増加させ、水生昆虫やアユなどの餌資源を確保することができる。また、水生昆虫が増加することによって、水生昆虫を餌資源とする魚類の個体数の増加も期待でき、水生動物相の保全や修復に寄与すると考えられる。さらに、石礫付着物は、人為的な窒素負荷を吸着することで水質浄化にも一定の効果があると考えられる。

一方、石礫を保全することは、落差工において石礫が落下した衝撃によって施設が損傷することや、水路において粗度の増大と流積の減少による排水機能の低下が生じるなどのデメリットもある。今後は、石礫を保全しながら、生態系に配慮し、施設の長寿命化と維持管理費の削減を図り、排水機能も確保できる、流積にある程度の余裕を見込んだ水路の設計を、ライフサイクルコストを最小化するという観点から検討することが必要だと考える。

4 まとめ

本研究では、北陸の典型的な扇状地の一つである手取川扇状地の山島用水の食物網の現状を分析するために、上流・中流・下流で食物網起源となりうる物質、水生昆虫、その他の底生動物および魚類を採集して、安定同位体比法により炭素・窒素安定同位体比を測定した。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 扇状地のコンクリート化された用排兼用幹線水路では、河床沈殿物、石礫付着物、付着藻類を起源として、主に水生昆虫、淡水貝類、魚類などから食物網が形成されていた。
- (2) 下流地点ほど、流速低下や人為的な窒素負荷量の増大などの影響で、1次生産者である石礫付着物や付着藻類の $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{13}\text{C}$ が増大し、その結果、食物

網全体の $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{13}\text{C}$ が増大した。

- (3) 通し回遊魚が海域から高い $\delta^{15}\text{N}$ を含む窒素を水路へ運んでくることによって、食物網全体の $\delta^{15}\text{N}$ を押し上げた可能性がある。
- (4) 各地点の捕食者と被食者の間で、魚類の遡上や水生昆虫の流下が原因と思われる、 $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{13}\text{C}$ のずれが生じていた。
- (5) 水路内の石礫の保全を行うことで、石礫付着物を食べる水生昆虫や水生昆虫を食べる魚類の個体数が増加し、水生動物相の保全・修復や水質浄化に寄与すると考えられる。
- (6) アユ、ウグイ、オオヨシノボリ、ドジョウなど、水路内で移動している魚類の移動経路は、河川、海域、幹線水路、支線用排水路、小用排水路、水田における魚類の採集調査や魚類の安定同位体比測定によって、今後解明できる可能性がある。

謝辞

本研究は、平成22～26年度日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究(B)課題番号22380128)の助成を受けた。また、安定同位体比の測定は、石川県立大学生物資源環境学部土壌環境学研究室米林甲陽教授(当時)に懇切丁寧な指導を賜った。ここに記して心より感謝する。

引用文献

- [1] 阿部俊夫・布川雅典 (2005): 春季の溪流における安定同位体を用いた食物網解析, 日本森林学会誌, 87(1), pp.13-19.
- [2] DeNiro, M. J., and Epstein, S. (1978): Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 42, pp.495-506.
- [3] DeNiro, M. J., and Epstein, S. (1981): Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animals, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 45, pp.341-351.
- [4] 土居秀幸 (2002): 珪藻における安定同位体比の変動, *RADIOISOTOPES*, 51, pp.97-98.
- [5] Fry, B. (1996): $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ fractionation by marine diatoms, *Marine Ecology Progress Series*, 134, pp.283-294.
- [6] 御勢久右衛門 (1993): II 底生生物の生態学的研究, 河川の生態学, 築地書店, pp.23-102.
- [7] 平井賢一 (1992): 手取川扇状地における淡水魚の減少傾向, 日本海域研究所報告24, pp.49-62.
- [8] Hiramatsu, K., Yonebayashi, K., Ichion, E., Nishimura, S., and Onishi, T. (2014): Food web structure in an agricultural drainage channel through an urbanized zone in Japan, *Paddy and Water Environment*, 12(1), pp.113-123.
- [9] 板井隆彦 (2001): 山溪カラー名鑑 日本の淡水魚(第3版), アブラハヤ, 山と溪谷社, pp.270-273.
- [10] 一恩英二・能登達也・山本邦彦・長野峻介・上田哲行 (2013): 海域に流入する農業水路における淡水魚類の遡上と分布について, 日本雨水資源化システム学会誌, 19(1), pp.19-28.
- [11] 一恩英二・田中省吾 (2004): セケ用水の水理水質, 石川県農業短期大学研究報告, 特集 セケ用水の生物相, 33, pp.1-13.
- [12] 石川県淡水魚類研究会 (1996): 石川の自然環境シリーズ, 石川県の淡水魚類, 石川県環境部自然保護課, 74p.
- [13] 一瀬 論・若林徹哉 (2005): やさしい日本の淡水プランクトン 図解ハンドブック, 150p.
- [14] 井上幹生 (2013): 3.4 魚類, 河川生態学, 株式会社講談社サイエンティフィク, pp.123-144.
- [15] 磯辺ゆう (1989): 大型カワゲラ属4種の幼虫の生態的分化, 日本の水生昆虫 種分化とすみわけをめぐって, 東海大学出版会, pp.68-84.
- [16] Jacques C. F., Mary E. P., and Gilbert C. (1999): Effects of water velocity on algal carbon isotope ratios: Implications for river food web studies, *Limnology and Oceanography*, 44(5), pp.1198-1203.
- [17] 加賀谷隆 (2013): 3.2 底生無脊椎動物, 河川生態学, 株式会社講談社サイエンティフィク, pp.88-116.
- [18] 金山 晃・田中省吾 (2004): セケ用水の水生昆虫, 石川県農業短期大学研究報告, 特集 セケ用水の生物相, 33, pp.39-46.
- [19] 刈田敏三 (2010): 新訂 水生生物ハンドブック, 文一総合出版, 80p.
- [20] 川合禎次 (1985): 日本産水生昆虫検索図説, 東海大学出版会, 409p.
- [21] Kline, Jr. T. C., Goering, J. J., Mathisen, O. A., Poe, P. H., and Parker, P. L. (1990): Recycling of elements transported upstream by runs of Pacific salmon: I. $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ evidence in Sashin Creek, southeastern Alaska, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 47, pp.136-144.
- [22] 小林一郎 (1989): 生態系を考えた改良ヒューム管, 淡水魚保護, 11, pp.56-58.
- [23] 松澤真一・水谷正一・森 淳・大宮裕樹・後藤 章 (2005): 安定同位体比法を用いた谷津内食物網の解析, 農業土木学会全国大会講演要旨集, pp.92-93.
- [24] 松澤真一・水谷正一・森 淳・後藤 章 (2008): 谷津内水路を中心とした環境に生息する生物群集の安定同位体比, 農業農村工学会論文集, 254, pp.11-21.
- [25] 松澤真一・水谷正一・後藤 章 (2006): 谷津内水路に生息する底生魚の食性, 農業土木学会全国大会講演要旨集, pp.310-311.
- [26] 丸山博紀・高井幹夫 (2000): 原色 川虫図鑑, 全国農村教育協会, 244p.
- [27] Minagawa, M., and Wada, E. (1984): Stepwise enrichment of ^{15}N along food chains: Further evidence and the relation between $\delta^{15}\text{N}$ and animal age, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 48, pp.1135-1140.
- [28] 南川雅男 (1997): 安定同位体比による海洋食物網研究, 月刊海洋, 29(7), pp.391-398.
- [29] 宮地傳三郎・川那辺浩哉・水野信彦 (1976a): ドジョウ, 原色日本淡水魚類図鑑, 保育社, pp.241-244.
- [30] 宮地傳三郎・川那辺浩哉・水野信彦 (1976b): ドソコ, 原色日本淡水魚類図鑑, 保育社, pp.343-345.
- [31] 水野信彦 (2001): 山溪カラー名鑑 第3版日本の淡水魚, オオヨシノボリ, 山と溪谷社, pp.590-591.
- [32] 水谷正一・森 淳 (2009): 春の小川の淡水魚 その生息場の保全, 学報社, pp.149-175.
- [33] 村島和男・一恩英二・上田哲行 (2004): 特集にあたって, 石川県農業短期大学研究報告, 特集 セケ用水の生物相, 33, pp.i.
- [34] 森 淳 (2004): 農業用排水路と溜池における生物を媒介とした物質循環, 農村計画学会誌, 23(3), pp.203-210.
- [35] 森 淳 (2006): いさわ南部地区原川排水路における付着

- 物の炭素・窒素安定同位体比特性, 農業土木学会誌, 74 (2), pp.131-136.
- [36] 森 淳・水谷正一・松澤真一 (2006): 里山から谷津田水路に供給される陸起源有機物の炭素・窒素安定同位体比の変化, 農業土木学会論文集, 243, pp.121-126.
- [37] 森 淳・柚山義人 (2005): 安定同位体比法による食物網解析の水田水域生態系における展開, 農業土木学会論文集, 240, pp.131-140.
- [38] 永田 俊・宮島俊宏 (2008): 流域環境評価と安定同位体水循環から生態系まで, 京都大学学術出版会, 476p.
- [39] 中坊徹次 (2013): 日本産魚類検索 全種の同定 第三版, 東海大学出版会, 2428p.
- [40] 西田 睦 (2001): 山溪カラー名鑑 第3版日本の淡水魚, アユ, 山と溪谷社, pp.66-79.
- [41] 大宮裕樹・松澤真一・森 淳・水谷正一 (2005): 飼育環境下における淡水魚の安定同位体比の測定による転移時間の推定, 農業土木学会全国大会講演要旨集, pp.408-409.
- [42] Osono, T., Hobara, S., Koba, K., Kameda, K., and Takeda, H. (2006): Immobilization of avian excreta-derived nutrients and reduced lignin decomposition in needle and twig litter in a temperate coniferous forest, *Soil Biology and Biochemistry*, 38, pp.517-525.
- [43] 酒井治己 (2001): 山溪カラー名鑑 第3版日本の淡水魚, ウグイ, 山と溪谷社, pp.259-264.
- [44] 竹門康弘 (2005): 底生動物の生活型と摂食機能群による河川生態系評価, 日本生態学会誌, 55, pp.189-197.
- [45] 寺居雅広・梅津 剛 (2007): シマイシビルの生態及び駆除手法に関する実験的研究, 第34回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, VII-022.
- [46] 上田哲行・一恩英二・村島和男 (2004): セケ用水の生物相について, 石川県農業短期大学研究報告, 特集 セケ用水の生物相, 33, pp.1-14.
- [47] 山本邦彦・田中省吾 (2004): セケ用水の淡水魚類, 石川県農業短期大学研究報告, 特集 セケ用水の生物相, 33, pp.63-72.
- [48] 山本直樹・渡辺幸三・草野光・大村達夫 (2005): 炭素・窒素安定同位体分析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, 28(12), pp.737-744.
- [49] 米山忠克 (1987): 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、活用, 日本土壌肥料学会誌, 58(2), pp.252-268.
- [50] 吉田 匡・丸山利輔・能登史和・高瀬恵次・瀧本裕士 (2012): 手取川扇状地試験地における水田用水地区内還元水の分析, 農業農村工学会論文集, 282, pp.35-42.
- [51] 財団法人リバーフロント整備センター (1997): フィールド総合図鑑 川の生物, 山海堂, 383p.

この論文の公開の質疑または討議は2016年12月31日まで受付けます。