

## 水田生態系における食物網構造と物質循環

- 原川排水路と西風堤ならいつつみ（国営いさわ南部地区）を事例として -

森 淳\*・柚山義人\*

目 次			
緒 言 .....	105	2 <sup>13</sup> Cの特性 .....	108
食物網解析と安定同位体比 .....	106	3 <sup>15</sup> Nの特性 .....	110
1 安定同位体比の特性 .....	106	4 幅広水路における食物網 .....	111
2 安定同位体比を用いた食物網解析 .....	106	5 西風堤における食物網 .....	111
調査地点と調査方法 .....	106	結 言 .....	112
結果と考察 .....	108	参考文献 .....	112
1 付着物の構成と特徴 .....	108	Summary .....	114

## 緒 言

農業農村整備事業の実施にあたって生態系に配慮した事例が各地から報告されている。生態系は動的であり、我々はその復元能力を推し量る術を持っていないから、人為が加えられた後における生物群集の姿を正確に予測することはできない。今後対策工の効果が検証されると、課題もともに浮き彫りにされるだろう。

農業農村整備事業における生態系保全工法は、ピオトープネットワークの連続性が失われる落差工のような施設の改良に傾注されてきた。これはいわば必要条件であり、水生生物の移動確保と個体群の維持に効果があることは疑いない。

河川改修では、都市部や一部の急傾斜地において三面張化・暗渠化される場合を除き流速はあまり変化せず、底質も上流にダムなどの河川構造物が築造されなければ著しい変化は見られないのが普通である。また、エコトーンとしての河原は残存することが多い。これに対して農業農村整備事業ではコンクリート水路が多用されるため流速が大きくなり、施行前の多様な底質はコンクリートに画一化される。また土手における水の浸潤を通じて保たれてきた陸域との物質的連続性は消失する。このように考えると農業農村整備事業によって水路環境がリセットされ、生物群集は新しい環境で相互作用を構築し始めることになる。水域環境の改変という意味では農業農

村整備事業と河川事業は類似しているものの、生態系に対して加えられるインパクトの質と程度はかなり異なると思われる。

こうした環境で彼らの生活史を完結させるには、当面生息できる空間をピオトープネットワークの確保によって、あるいは代替ピオトープを造成して用意するとともに、生命の維持、成長に不可欠な餌資源を確保することが必要である。前者はいわば住の整備、後者は食の供給と位置づけられる。しかしながら、食の供給システムとしての食物網に関する基礎的知見と修復技術はほとんど用意されていない。

近年、湖沼、河川、閉鎖的な海域における食物網解析には、炭素安定同位体 (<sup>13</sup>C) や窒素安定同位体 (<sup>15</sup>N) が生物に含まれる割合、すなわち安定同位体比を用いる方法が活用されている。この方法によれば、過去の採餌行動が累積されて安定同位体比に現れるため、胃内容物調査を用いた方法のように一瞬の採餌行動が過大評価されないというメリットがある。安定同位体比法は、水田生態系においても適用されつつあり（たとえば、森，2004；松澤，2005）、環境との調和に配慮した事業推進に貢献するものとして期待されている。

安定同位体比を用いた食物網解析において、生産者の安定同位体比は最も重要な情報である（吉岡，1997）。水田生態系は水田、水路、溜池など水域によって特徴づけられる。水域における生産者として機能しているのは藻類と陸域から流入する有機物であるが、これらがどのように水域と水田生態系全体に作用しているか、知見はほとんどない。このため、水田生態系における食物網解析の端緒として、国営いさわ南部地区の幹線排水路である原川排水路と溜池ならいつつみ（西風堤）において、一次消費者の

\* 地域資源部資源循環研究室

平成18年1月10日受理

キーワード：水田生態系，食物網，安定同位体比，陸起源有機物

餌となっていると考えられる付着物の炭素・窒素安定同位体比の特性を把握し、これらから出発する食物網構造と物質循環の解析結果を報告する。

安定同位体比の計測にあたっては国際農林水産業研究センターの飛田哲博士に便宜を諮っていただいた。記して謝意を表す。

## 食物網解析と安定同位体比

### 1 安定同位体比の特性

物質を構成する原子には、同じ元素番号を持ちながら質量数が異なる同位体が存在する。同位体には、放射壊変して別の核種に変わる放射性同位体(Radio Isotope)と放射壊変しない安定同位体(Stable Isotope)がある。たとえば炭素を例にすれば、最も多く存在する $^{12}\text{C}$ の他に、遺跡等の年代測定に用いられている放射性同位体である $^{14}\text{C}$ 、安定同位体である $^{13}\text{C}$ が存在する。同様に、炭素とともに生命活動に必須である窒素にも $^{14}\text{N}$ より重い $^{15}\text{N}$ がわずかながら存在している。

一般的に分子間に質量差が存在すれば軽い分子の方が安定的である。また、化学反応過程においては、重い同位体を含む分子の方がより多くの反応時間を要する。さらに質量差は分子の移動・拡散にも差を生じさせる。この結果、同じ物質間でも、質量差に起因して物質に含まれる同位体の存在比(安定同位体比)が変化する。これを同位体分別(fractionation)という。

炭素を例にすれば、安定同位体比 $^{13}\text{C}(\text{‰})$ は次式で表される。安定同位体比の標準(standard)は、アメリカ合衆国サウスカロライナ州ピーディー層産ベレムナイト化石( $\text{CaCO}_3$ )である。

$$^{13}\text{C} \frac{\left( \frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right)_{\text{sample}} - \left( \frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right)_{\text{standard}}}{\left( \frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right)_{\text{standard}}} \times 1,000(\text{‰}) \quad \dots(1)$$

窒素の場合は $^{15}\text{N}$ と表される。Standardは空気中の窒素ガスである。

(1)からわかるように、重い同位体が標準より少なければ安定同位体比はマイナス値になる。

### 2 安定同位体比を用いた食物網解析

食物網の出発点である植物の $^{13}\text{C}$ には、光合成の仕組みの違いにより、 $\text{C}_4$ 植物 > 藻類 >  $\text{C}_3$ 植物という関係があり、米山・笹川(1994)は、 $\text{C}_3$ 植物の $^{13}\text{C}$ を $-35 \sim -25\text{‰}$ 、 $\text{C}_4$ 植物で $-15 \sim -10\text{‰}$ としている。藻類の $^{13}\text{C}$ は $-20\text{‰}$ 前後を示す(和田, 1986)。

生物体の $^{13}\text{C}$ は餌とほとんど変わらないため、生物群集の $^{13}\text{C}$ を計測すると食物網の出発点となった植物を推定できる。たとえば、ある生物の $^{13}\text{C}$ が $-30\text{‰}$ 程

度の低い値ならば、 $\text{C}_3$ 植物から出発する食物網に属していると推定できる。

降雨の $^{15}\text{N}$ は通常マイナスとなる。 $^{15}\text{N}$ は生物の影響を受けて高くなるため人家や畜舎からの排水は高い値を示す。したがって河川下流部では高いのが一般的である。 $^{15}\text{N}$ は栄養段階が1段階上昇するごとに $3\text{‰}$ 程度上昇する性質がある。このため、たとえば生産者の $^{15}\text{N}$ が $2\text{‰}$ ならば、これを餌としている動物の $^{15}\text{N}$ は $5\text{‰}$ 程度を示す。

これらの性質を利用して、 $^{13}\text{C}$ から食物網の起源に関する情報を、 $^{15}\text{N}$ から栄養段階に関する情報を得ることができる(和田, 1984)。

生物の安定同位体比の解析は、採餌選択性の時間変動性を軽減するほか、生物が生育した環境の化学的な痕跡が生物体に刻印されるため、無生物界における物質動態を知る手がかりを与える。

わが国における生物組織の安定同位体比を利用した食物網分析は、湖沼や海域を中心として進められてきた。Yoshioka et al. (1994)は富栄養湖である諏訪湖における食物網を解析し、同湖に生息する生物の同位体比が季節変動していることを示している。Yamada et al. (1998)は、琵琶湖北湖の食物網が水平方向には沖帯と沿岸帯に、沖帯はさらに鉛直方向に4つの食物網で構成されていることを明らかにしている。

Kasai et al. (2004)は安定同位体比を用いて、アサリが生息する干潟の有機物はほとんど陸上植物由来であるにもかかわらず、アサリは海域で生産された藻類を選択的に餌としていることを明らかにしている。

河川生態系における安定同位体比を用いた食物網解析は、河川環境の保全に対する社会的な要請の高まりとともに推し進められるようになった。沖野(2002)は、千曲川上流の無脊椎動物の炭素安定同位体比が中流より低い理由を、上流に生息する生物が陸起源有機物に依存しているためとしている。高津ら(2005)は、再蛇行化実験が行われた北海道の標津川において、本流と河跡湖の食物網構造の違いを明らかにしている。

## 調査地点と調査方法

胆沢平野は岩手県南部の北上川支流胆沢川が作り出した扇状地である。国営農地再編整備事業いさわ南部地区は、胆沢平野南端の水田地帯を受益地とする。そのほとんどは胆沢川を用水源とし、地区のほぼ中央を幹線排水路である原川が流下している。調査地点位置をFig.1に、地点概要をTable 1に示す。

原川は、萩森堤を水源とする地区外水田の排水と山林からの流出水を受けて受益地に入る。Sta.1より下流には地区内水田の排水が流入している。Sta.2からSta.4の間には、水田排水の他、中沢集落からの生活雑排水が流入している。

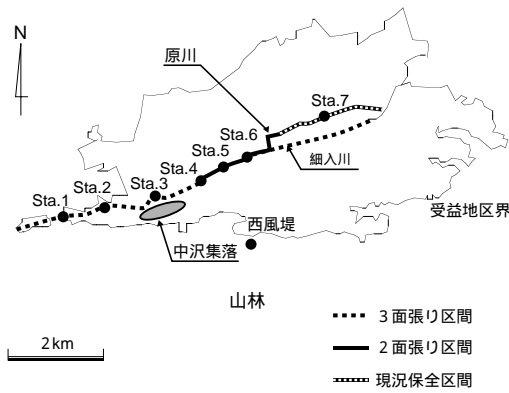


Fig.1 調査地点位置

Location of the investigated points



Fig.2 幅広水路 (Sta.6) の状況  
Scene of Habahiro suiro(Sta.6)

付着物の採取は、平成15年4月から平成16年2月までの間、2ヶ月ごとに行った。各調査地点では、流心付近の直径15cm程度の礫、礫がない場合はコンクリート壁の付着物を3箇所ずつ歯ブラシで擦り取り現地でホルマリン固定した。採取地点で採水も行った。

水生生物が多く生息するSta.6（幅広水路）の付着物については6月と12月に詳細調査を行った。幅広水路には水深、流速の多様性が見られる。特に流速は、岸近くに出現したトロ場や抽水植物群落の中では極めて小さくなり、流心付近とはかなり様相を異にしている。流速・水深が変化する地点で細分化し、それぞれの流況を代表していると思われる7地点を選び、前述の3地点と合わせた10地点で付着物採取と流速計測を行った。

幅広水路の食物網を構成する主要種として、底質の付着物のほか、トビケラ類(Trichoptera)、ドジョウ (*Misgurnus anguillicaudatus*) およびアブラハヤ(*Moroco steindachneri*)を6月に採取した。トビケラ類はハンドソーティング法、魚類はタモ網で採取した。

西風堤は、いさわ南部地区の南端に位置する池面積は約300m<sup>2</sup>の小さな溜池である。水源は雨水であり、原川とは流域を異にする。西風堤付近は、いさわ南部地区の受益地から南側に広がるなだらかな丘陵へ移行するエコトーンが形成されている。池畔はブナ科(Fagaceae)を中心とした広葉落葉樹で覆われており、池底には落葉落枝(リター)が厚く堆積している。池水はこれらから

溶出した成分によって茶色を呈している。事前調査では、トンボ類(Libellulidae)やマツモムシ(*Notonecta triguttata*)などの無脊椎動物が多く生息するが、魚類は確認されていない。

採取は平成15年6月に行った。まず、タモ網を用いて堆積している落葉ごと採取し、その場で落葉など大きな雑物を除いてから持ち帰り、実験室で分別した。動物プランクトンはフルイに200μmのプランクトンネットを装着し、有機物の少ない場所を選んで静かに掬い上げた。植物プランクトンの採集は採水法を用いた。

付着物とアブラハヤの胃内容物については、光学式顕微鏡(400倍)で検鏡した。付着物及び水生昆虫は体全部を、アブラハヤは筋肉組織のみを、それぞれ-40で凍結乾燥後粉碎した。アブラハヤについては、粉碎後脱脂してから再度凍結乾燥・粉碎した。脱脂は、メタノールとクロロホルムの混合液(1:2)を加えて攪拌、遠心分離(800rpm, 10min)の行程を3回繰り返した。水に含まれる無機態窒素のほとんどは硝酸態だったので、濾過後1cm<sup>3</sup>程度まで濃縮した。

以上の前処理を施した後、Thermo Finnigan社製の質量分析計Delta plus XP(外部精度：<sup>13</sup>C, <sup>15</sup>Nとも0.15‰)で安定同位体比を測定した。

また、各地点で採取した水をイオンクロマトグラフによる水質分析を行った。

Table 1 調査地点の特徴  
Profile of the investigated points

地点	水路タイプ	特徴等
Sta.1	土水路	未改修の土水路。
Sta.2	3面装工	原川の改修基点。コンクリート壁から採取。
Sta.3	3面装工	植生回復試験のために中沢集落付近に設置されたポーラスコンクリート製のポットで採取。
Sta.4	2面装工	生態系保全のために造成された急流式の落差工。水路勾配が急なため、流速が速く小規模な瀬と淵が形成されている。付着藻類、無脊椎動物、魚類が多い。
Sta.5	2面装工	2面張り水路であるが、底質に付着物が存在しなかったため壁面コンクリートで採取。
Sta.6	2面装工	生態系保全のために造成された、幅広水路と呼ばれる拡幅部。付着藻類、無脊椎動物、魚類が多い。
Sta.7	土水路	現況保全される土水路で、河畔林が発達している。

Table 2 付着物の  $^{13}\text{C}$ ・ $^{15}\text{N}$ の年平均値  
Annual average of  $^{13}\text{C}$  and  $^{15}\text{N}$  of attached matter  
(単位: ‰)

	Sta.1	Sta.2	Sta.3	Sta.4	Sta.5	Sta.6	Sta.7
$^{13}\text{C}$	-22.2	-23.7	-23.2	-22.1	-23.1	-22.9	-25.4
$^{15}\text{N}$	1.0	2.7	3.8	5.4	5.4	4.9	3.5

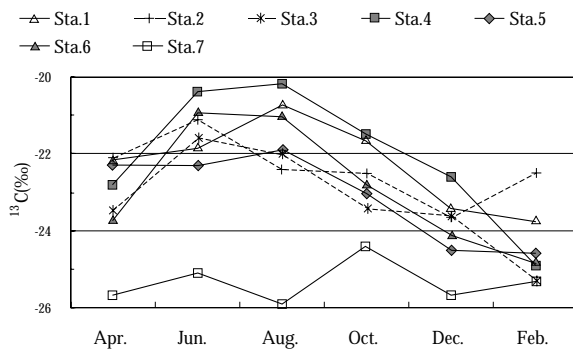


Fig.2 付着物の  $^{13}\text{C}$ の季節変化  
Seasonal changes of  $^{13}\text{C}$  of attached matter

## 結果および考察

### 1 付着物の構成と特徴

検鏡の結果、いずれの付着物も藻類と懸濁態有機物(POM: Particulate Organic Matter)の混合物で構成されていた。その割合には地点差がみられ、Sta.7において混合物に占める藻類の割合は明らかに小さかった。

Sta.3は、一般的に生物の生息に適していないとされるコンクリート3面装工であるが、壁面に付着した藻類やこれに沈澱した土砂が1~2cmの付着物を構成し、その上に藻類の糸状体が繁茂していた。これらの中にはユスリカ科(Chironomidae)の幼虫などの大型無脊椎動物が生息していた。3面装工区間にこのような付着生物群落と呼ばれる生物群集が存在することは、生物の生息に適していないとされるコンクリート構造物に改良を加えることによって、生態系に与えるインパクトを軽減できる可能性を示唆している。

この付着生物群落では、6月には珪藻のメロシラ・バリアンズ(*Melosira varians*)の糸状体が卓越していたが、8月には緑藻のアオミドロ(*Spirogyra* sp.)に交代した。Sta.4ではエスガタケイソウ属(*Gyrosigma* sp.)が優占していた。

### 2 $^{13}\text{C}$ の特性

各調査地点の年平均  $^{13}\text{C}$  と  $^{15}\text{N}$ をTable 2に示す。全平均は -23.2‰となった。上流から順にみると、Sta.1~Sta.6の  $^{13}\text{C}$  はおおむね -22‰~-23‰程度であるが、Sta.7では -25.4‰と低い値を示した。

付着物の  $^{13}\text{C}$  は、Fig.2に示すようにSta.7を除き夏季に向けて上昇し秋季から下降するパターンを示し、概

ね -24‰~-20‰の範囲内にあった。 $^{13}\text{C}$  の最高値はSta.4(8月)の -20.2‰、最低値はSta.7(8月)の -25.9‰だった。Sta.7を除き、6月または8月に最高値を示した。7地点全体の月平均値についても、最高は6月の -21.9‰、ついで8月の -22.0‰となり、最低は2月の -24.4‰だった。

まず、 $^{13}\text{C}$ の年平均値が -22~-23‰となった理由を、年間の変動幅が小さく、また10月に最高値をとるなど、他の6地点とは異なる挙動を示したSta.7の特性とあわせて考察する。

原川の流域は山林と水田がほとんどを占めるため、POMの主な供給源は山林の樹木とイネである。これらはいずれも $\text{C}_3$ 植物であるので、POMの  $^{13}\text{C}$  は -27‰程度と考えられる。

前述のように藻類の  $^{13}\text{C}$  は -20‰前後であるが、生育環境によって変化することがある。これは、光合成基質である溶解態無機炭素の  $^{13}\text{C}$  が大気中の $\text{CO}_2$ と比べて変化しやすいことに加え、光合成活性度と正の相関があるためである(Takahashi et al., 1991)、 $\text{CO}_2$ 濃度と負の相関があるためである(吉岡, 1997b)。特に湖沼ではこれらの要因に個性があるため、藻類の  $^{13}\text{C}$  にも固有の値や変動パターンがある(Wada and Yoshioka, 1995)。

一方、流水域に生育する藻類の  $^{13}\text{C}$  に関する知見は少ない。伊藤(2002)は、名取川河口で培養された底生藻類の  $^{13}\text{C}$ が浮遊珪藻より高い -17.9‰~-11.1‰となった理由として、炭酸の代謝メカニズムの違いを指摘している。このような同位体分別が小さくなるメカニズムは、 $\text{CO}_2$ 濃度の低下が引き金になって発動するとされている(藤田, 1997)。底生珪藻が -20‰より高い  $^{13}\text{C}$ を示したのは、河口は流速が小さいため大気中に含まれる $\text{CO}_2$ 濃度からの供給量が少なかった可能性がある。

今回、付着物の  $^{13}\text{C}$ は最高で -20‰前後を示した。本調査地では付着物が藻類単体で構成されることはなかったため、付着藻類の  $^{13}\text{C}$ がこれより高い可能性を否定できない。

本調査地で確認された藻類種の  $^{13}\text{C}$ に関する知見は見あたらない。種の交替や分布の偏在が付着物の安定同位体比に影響を与えている可能性がある。仮に、小さな同位体分別を示す種が含まれていたり、外的環境要因によって同位体分別が小さくなれば、付着藻類の  $^{13}\text{C}$  は -20‰より高くなり、 $\text{C}_3$ 植物との差はさらに大きくなる。

今回得られた付着物の  $^{13}\text{C}$  は、 $\text{C}_3$ 植物の  $^{13}\text{C}$  と藻類の  $^{13}\text{C}$  の間に位置しており、付着物が藻類と懸濁態有機物の混合物で構成されていたという検鏡結果と整合している。付着物の  $^{13}\text{C}$ はPOMと藻類の混合割合の傾向を示していると考えられる。

Sta.7の  $^{13}\text{C}$ が低かった原因は、光合成に必要な日照が河畔林によって遮られ、付着物に含まれる藻類が少な

Table 3 付着物の <sup>13</sup>C変動要因  
Changing factors of <sup>13</sup>C of attached mater

	藻類	有機物	<sup>13</sup> Cに対する作用
流速			CO <sub>2</sub> 濃度に差がなければ、流速とともに陸起源有機物が減少し <sup>13</sup> Cが上昇。
底質			礫床は藻類の増殖を促進させ <sup>13</sup> Cは上昇するが、落葉落枝供給量が多ければ貯留量が増えて有機物量が増加する可能性。
日照			少なければ藻類生産が抑制され <sup>13</sup> Cが低下
CO <sub>2</sub> 濃度			低いと <sup>13</sup> Cは上昇。ただし、流速のある農業水路では濃度差は生じにくいと思われる。
流域植生			落葉落枝、イネ残滓の供給量が多ければ <sup>13</sup> Cが低下。

注： は、付着物を構成する藻類及び有機物の <sup>13</sup>Cに影響を与える環境要因

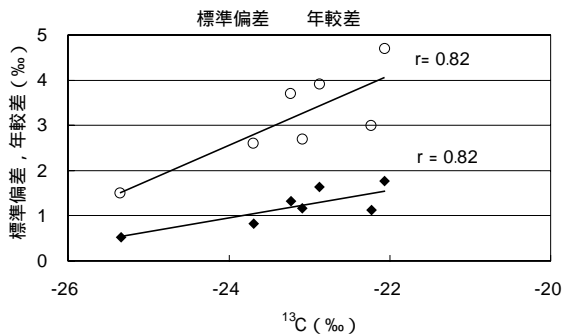


Fig.3 年平均値と標準偏差及び年較差の相関

Correlation between annual average of <sup>13</sup>C of attached matter and standard deviation, annual range

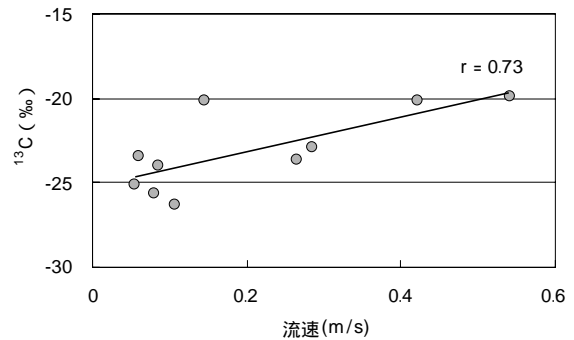


Fig.4 流速と付着物の <sup>13</sup>Cの相関

Correlation between water velocity and <sup>13</sup>C of attached matter

かったためと考えられる。Sta.7には、日照条件以外にも、落葉落枝の供給量が多いこと、流速が速く瀬が発達していること、底質に礫が多いことなど、溪流との共通点が多い。溪流では藻類生産が貧弱であるため、水生生物はエネルギーを陸上で生産された落葉落枝やその分解物などの外来性有機物に依存している (Cummins and Klug, 1979)。また、礫質床に滞留した落葉落枝は無脊椎動物の餌として利用される。Sta.7には、溪流のように陸上植物に依存した従属的食物網が存在している可能性がある。

各地点の <sup>13</sup>C 年平均値と標準偏差には  $r=0.82$  ( $p<0.05$ )、年平均値と年較差には同じく  $r=0.82$  ( $p<0.05$ ) の正の相関がみられた (Fig.3)。

Sta.7を除く地点で夏季に <sup>13</sup>Cが上昇したのは、藻類生産が活発化し、付着物に占める付着藻類の割合が増加したためと考えられる。高い年平均値を示した地点では付着物に含まれる藻類の割合が大きく、藻類の活性化にともなう <sup>13</sup>C変動の影響をより強く受けるため、標準偏差および年較差と正の相関を示したと考えられる。

Sta.6 (6月) では、付着物の <sup>13</sup>Cは、最高で  $-20.1\text{‰}$ 、最低で  $-26.3\text{‰}$ と  $6.2\text{‰}$ の差が生じた。低い値を示したのは流れのほとんどないト口場で採取した付着物である。付着物の <sup>13</sup>C と流速の間には正の相関 ( $r=0.73$ ,  $p<0.05$ ) が認められた (Fig.4)。強い水流のもとでは大気からのCO<sub>2</sub>供給量が増加するため藻類の <sup>13</sup>Cは低下するが (France, 1995), Sta.6における10個所の測定点はいずれも隣接しており、CO<sub>2</sub>濃度に大きな差はない

と考えられる。また、日照など藻類の増殖速度に影響を与える環境要因にも大きな差は存在しない。このため、付着物の <sup>13</sup>Cと流速に相関がみられたのは、流速が大きい地点ほどPOMが掃流され、付着物に占める藻類の占める割合が大きくなるためと考えられる。

Sta.1の玉石表面に付着した藻類の分布状況と平水状態における流速の関係を調べたところ、流速が約  $0.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  以上の部分では珪藻類より藍藻類が優先していた。魚類や無脊椎動物の餌資源として重要な珪藻類を確保するには一定範囲の流速が必要であると思われる。

付着物に占める藻類とPOMの割合は、流速のほか、流域の植生と水路底質の影響を受けるだろう。すなわち、流域内の山林樹木由来の落葉落枝やイネ残滓の賦存量が多いほど水域に流入するPOMは増加し、付着藻類の生産量はシルトや粘土などの底質に比べて礫床において増えようと考えられる。Table 3に付着物の <sup>13</sup>Cと環境要因の関係を示す。

生産者の炭素安定同位体比は採食されることによって動物に受け継がれる。Sta.6の動物群集の <sup>13</sup>Cは  $-22\text{‰}$  ~  $-24\text{‰}$ 程度に多く分布していることから、付着物から出発する食物網を構成していると考えられる。

今回確かめられた付着物の <sup>13</sup>C変動は、一次消費者を経て高次消費者に伝達されていると考えられる。しかし、安定同位体の転移にはタイムラグがあるため、上位消費者の変動幅は縮小する。飼育実験によって得られた知見によれば、トビケラ類の餌を変えた場合の体の

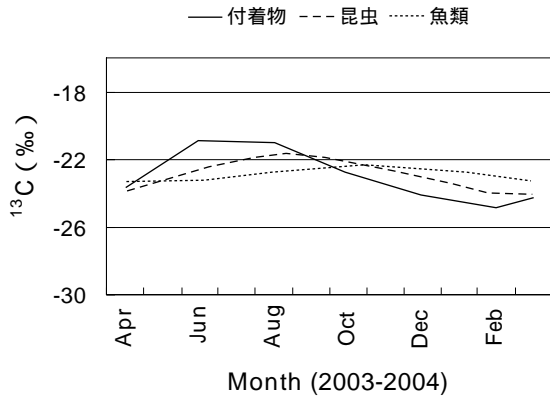


Fig.5 付着物の季節変化と消費者の <sup>13</sup>Cの試算 (幅広水路) Seasonal changes of attached matter and <sup>13</sup>C simulation of consumers (Habahirosuiro)

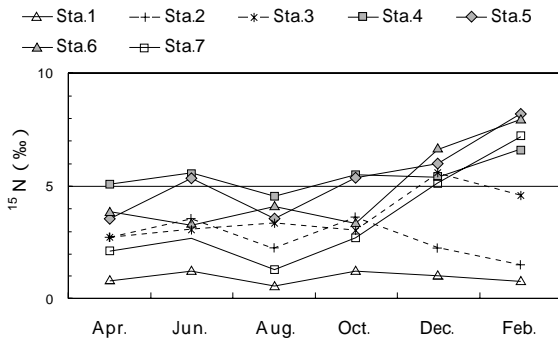


Fig.6 付着物の <sup>15</sup>Nの季節変化 Seasonal changes of <sup>15</sup>N of attached matter

<sup>13</sup>Cが入れ替わるまでの速度，すなわち回転速度 (turnover time) は約1%・d<sup>-1</sup>であり (東井・伊藤, 1985), タモロコ (*Gnathopogon elongatus*) では4~5ヶ月程度だった (大宮ら, 2005)。

ここで，水生昆虫の転移時間を3ヶ月，魚類で5ヶ月と仮定して，水生昆虫については羽化による世代交代は考慮せずに1ヶ月あたり1/3ずつ付着物の <sup>13</sup>Cに，魚類は1ヶ月あたり1/5ずつ水生昆虫の <sup>13</sup>Cに近づくとしてそれぞれの <sup>13</sup>Cの変化を試算すると，付着物の年間変動幅3.9‰は2次消費者である魚類では1.0‰に縮小する (Fig. 5)。原川で測定された生産者の <sup>13</sup>C変動は，上位消費者の <sup>13</sup>Cに大きな影響を与えない可能性がある。

### 3 <sup>15</sup>Nの特性

<sup>15</sup>Nの季節変化をFig. 6に，原川の窒素濃度との関係をFig. 7 (6月)とFig. 8(12月)に示す。

原川7地点で採取された付着物全体の <sup>15</sup>N 平均は3.7‰となった。<sup>15</sup>NはSta.1から次第に上昇しSta.4~Sta.6で5‰程度を示した後Sta.7で3.5‰に下降した。

藻類は水に含まれる溶存態無機窒素(DIN: Dissolved Inorganic Nitrogen)を吸収するため，藻体の <sup>15</sup>N は水のDINの特徴を示現する。Sta.1とSta.2以外の5地点

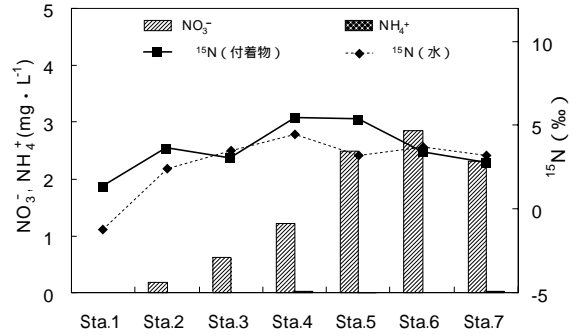


Fig.7 硝酸濃度と <sup>15</sup>N (6月) Concentrations of nitric acid and <sup>15</sup>N (Jun)

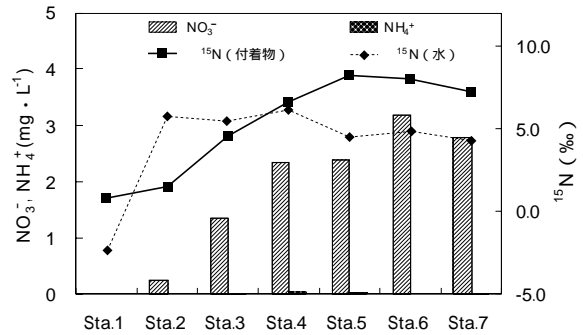


Fig.8 硝酸濃度と <sup>15</sup>N (12月) Concentrations of nitric acid and <sup>15</sup>N (Dec)

では，冬季に <sup>15</sup>N の上昇がみられた (Fig. 6)。これは非灌漑期に流量が減少したため，生活雑排水等に含まれる <sup>15</sup>N の高い窒素が希釈されないためと考えられる。

Fig. 7, Fig. 8 から，付着物の <sup>15</sup>N は水の <sup>15</sup>N に追従しており，付着物に含まれる藻類が水中の窒素を吸収していることを示している。Sta.6の動物の <sup>15</sup>Nは，降水に依存する地区内溜池に生息する動物より高いことから，人間が農村空間に排出した物質が藻類を経由して食物網に取り込まれていることが確かめられた。

Fig. 7において，硝酸濃度のピ - クはSta.6であるのに対して，付着物の <sup>15</sup>N のピ - クはSta.4からSta.5にみられ，両者の間にズレがみられた。この原因を考察する。

Sta.2からSta.4にかけて付着物の <sup>15</sup>N が上昇しているのは，前述のように人家からの生活雑排水によるものである。一方，空気中の窒素を固定して合成されている化学肥料の <sup>15</sup>N はゼロ付近の値を示すため (米山, 1987), 生活雑排水より <sup>15</sup>N の低い硝酸態窒素が水田から排水路に流入している。この化学肥料から溶出した <sup>15</sup>N の低い窒素が，Sta.4より下流側の窒素濃度を上昇させた一方，<sup>15</sup>N を下降させたと推察される。

なお，脱窒が発生すると，同位体分別により残存物の

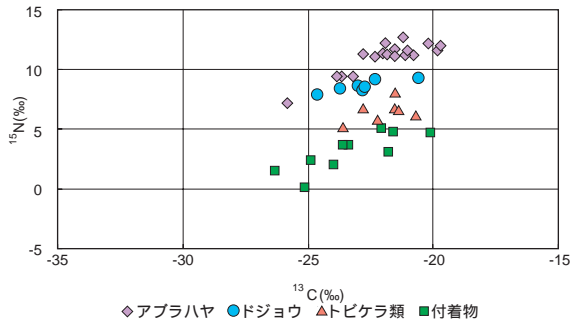


Fig.9 幅広水路における生物群集の  $^{13}\text{C}$  -  $^{15}\text{N}$  マップ  
 $^{13}\text{C}$  -  $^{15}\text{N}$  map of biological community in a canal (Habahirotsu)

$^{15}\text{N}$  が上昇する。土水路では非灌漑期には底泥が安定し脱窒量が高まることのあるため(駒田・竹内, 1998), Sta.7で12月にみられた  $^{15}\text{N}$  の上昇は、幅広水路における脱窒作用による分が含まれている可能性がある。

#### 4 幅広水路における食物網

幅広水路で採取された生物等の安定同位体比をFig.9に、平均値をTable 2に示す。いずれの種も  $^{13}\text{C}$  が約 -22‰となり、また  $^{15}\text{N}$  が階層構造を示したことから、同じ食物網にあると推察される。

中沢集落の生活雑排水の影響を受けて高くなった付着物の  $^{15}\text{N}$  が、食物網全体の  $^{15}\text{N}$  を上昇させていることが明らかである。

付着物の  $^{13}\text{C}$  偏差が大きいのは、流速差ごとに採取地点を選定したことが影響している。ミオ筋では付着物の  $^{13}\text{C}$  はいずれも -24‰以上を示した。

トビケラ類の  $^{15}\text{N}$  は、5.3‰から8.2‰とかなりの差が生じた。トビケラ類はヒゲナガカワトビケラ (*Stenopsyche marmorata*) とナガレトビケラ類 (Rhyacophilidae) だった。前者は造網性であり、玉石に礫を用いて作った巣を用いて流下してきた有機物を餌としている。これに対してナガレトビケラ類は肉食性である。最も高い8.2‰を示したのはナガレトビケラ類であったことから、トビケラ類の  $^{15}\text{N}$  のばらつきは、トビケラ類の食性の多様性を示唆している。

ドジョウの平均  $^{15}\text{N}$  は8.6‰となった。栄養段階が1である付着物の平均が3.4‰、トビケラ類平均の6.6‰であったことから、ドジョウの栄養段階は2から3の間であるといえる。これはドジョウが主として底に堆積した有機物やこれに混在する微少な動物を食べているためであろう。一方、アブラハヤの平均  $^{15}\text{N}$  は11.0‰となり、ドジョウより肉食依存度が大きいといえる。

Fig.9のアブラハヤの  $^{13}\text{C}$  = -25.8‰,  $^{15}\text{N}$  = 7.2‰のアブラハヤは、明らかに他の個体の安定同位体比より  $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$  とも低く、同じ環境で生育したとは考えられない。 $^{13}\text{C}$  と  $^{15}\text{N}$  の間には  $R^2=0.76$  ( $p<0.05$ ) の相

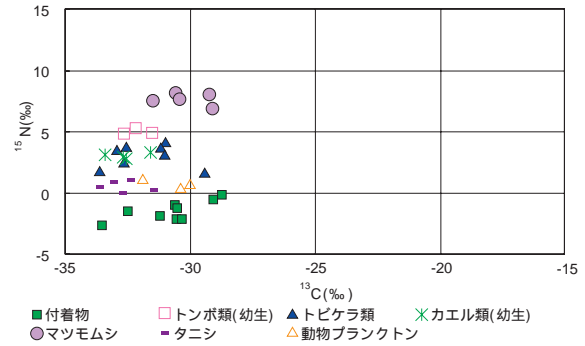


Fig.10 西風堤における生物群集の  $^{13}\text{C}$  -  $^{15}\text{N}$  マップ  
 $^{13}\text{C}$  -  $^{15}\text{N}$  map of biological community in a pond (Naraitsumi)

関があった。ドジョウについても同様に、 $^{13}\text{C}$  と  $^{15}\text{N}$  の間に  $R^2=0.76$  ( $p<0.05$ ) の相関があり、全体として右肩上がりの分布となった。

原川の上流部は山林に近く、本調査地と比べて藻類生産が活発ではないと推察されること、高い  $^{15}\text{N}$  を排出する人家や大規模な畜舎などは見あたらないことから、食物網の  $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$  は低いと考えられる。 $^{13}\text{C}$  および  $^{15}\text{N}$  の低いアブラハヤやドジョウは、原川の上流で生育した後に降下し幅広水路の個体群に加わった可能性がある。幅広水路は上流から流下してきた魚類の生息地となっていることが示唆される。

#### 5 西風堤における食物網

西風堤の水質には、酸性である、電気伝導度が低い、CODが高い、有機態炭素が多い、窒素やリンに乏しいなどの特徴があった(森・柚山, 2004)。付着藻類は非常に少なく、またサイズの小さなものが大半を占めた。採取した付着物は主に沈澱したPOMで構成されていた。

水生生物のうちベントスとしてはトビケラ類(幼生)、イトトンボ類の幼生 (Coenagrionidae(larvae)), タニシ類 (Cipangopaludina), コカゲロウ属の幼生 (*Baetis* sp.(larvae)), ネクトンはニホンアマガエルの幼生 (*Hyla japonica*(larva)), マツモムシ (*Notonecta triguttata*) などがみられた。プランクトンについては、ワムシ類 (Rotatoria) やミジンコ類 (Daphniidae) などの動物プランクトンがみられたが、植物プランクトンはわずかに珪藻綱羽状目 (Pennales) がみられたものの種数、個体数とも少なかった。

生物の安定同位体比は、個体数の多い種について計測した。分析結果をFig.10に示す。生物群集の  $^{13}\text{C}$  は、付着・沈殿物に近い -30‰以下の低い値を示した。さらに動物種の  $^{15}\text{N}$  に階層構造が認められたことから、この溜池の食物網は、 $\text{C}_3$ 植物起源の有機物に依存していることが明らかになった。

付着・沈殿物の主成分であるPOMは、池畔からの落葉のほか、池内に生育するフトイ類 (*Schoenoplectus* sp.),

ヨシ類 (*Phragmites* sp.), コウホネ (*Nuphar japonicum*) などの抽水・浮葉植物および動物プランクトン等の遺骸に由来していると考えられる。池底に堆積している未分解のリターは落葉広葉樹の落葉が大勢を占めているから、域内の有機物のほとんどは系外から流入したと推察された。ただし、南岸と西岸に比べて北岸付近には落葉広葉樹がなく開放空間となっているためリターフォールの堆積は少なく、代わりにコウホネやタヌキモ類 (*Utricularia* sp.) の群落に由来すると思われる腐食物が多かった。溜池内の微小な生態系ごとに、水生生物が利用している有機物の起源が、系外と系内に分かれている可能性がある。

一般的な溜池では植物プランクトン - 動物プランクトン - 無脊椎動物 - 脊椎動物という連鎖が形成されるが、本溜池では植物プランクトンが著しく少ない。越川 (1999) は、動物プランクトンが植物プランクトン以外のマングローブ起源の有機物や、溶存態有機物 (DOM: Dissolved Organic Matter) を餌資源とする微生物も捕食していることを示している。本溜池に生息する動物プランクトンは本溜池の豊富なリターやその分解物をエサ資源として利用していると考えられる。

西風堤は、前述の水質、外見的特徴、藻類が少ないにも関わらず消費者が豊富であるという偏った生物相がみられることから、非調和型の腐植栄養湖沼に該当する可能性が高い。本溜池の食物網は、従属栄養的と考えられる。

Fig.9とFig.10を比べると、幅広水路の食物網の  $^{13}\text{C}$  および  $^{15}\text{N}$  は西風堤のそれより明らかに高い。幅広水路の食物網は藻類と生活雑排水など  $^{15}\text{N}$  の高い窒素の影響を受けていることが示された。

## 結 言

安定同位体比を用いた食物網解析は水田生態系においても有効に機能することが確かめられた。

幅広水路の生物群集は藻類とPOMの混合物から出発する食物網にあった。この混合物の  $^{13}\text{C}$  は藻類の活性の影響を受けて夏季に上昇した。また、流速が大きい地点で  $^{13}\text{C}$  が高くなるのは、POMが掃流され付着藻類の存在比が大きくなるためと考えられた。

幅広水路に隣接する河畔林に覆われた区間では、日射が遮られるため藻類が少なく、 $^{13}\text{C}$  が低く、また季節変化が見られなかった。

幅広水路の食物網の  $^{15}\text{N}$  は高く、人家等から排出された窒素が生物界に取り込まれていることが確かめられた。水田から排出される  $^{15}\text{N}$  の低い窒素は、排水の無機態窒素の  $^{15}\text{N}$  を低下させ、一方で硝酸濃度を上昇させたため両者のピークにズレが生じた。

魚類の  $^{13}\text{C}$  -  $^{15}\text{N}$  マップの分布および本調査地の空間特性より、幅広水路は流下してきた魚類の受け皿と

なっていると考えられた。

水田と丘陵地帯のエコトーンに位置する西風堤の食物網は落葉由来有機物に依存する従属栄養的だった。

水田生態系の地誌的条件、日射、外界から流入する有機物量などの環境条件によって、生物群集が利用している有機物が異なることが明らかになった。

農業農村整備事業のような人為が加えられる時には、食物網における生産者と一次消費者の多様性と生物の群集構造の多様性を確保する配慮が必要と思われる。

## 参考文献

- Cummins, K. W. and Klug, M.J. (1979) : Feeding ecology of stream invertebrates, Annual Review of Ecology and Systematics, 10, 147-172.
- France, R.L. (1995) : Carbon-13 enrichment in benthic compared to planktonic algae: foodweb implication, Marine Ecology Progress Series, 124, 307-312.
- 藤田善彦 (1997) : 水域環境と藻類の生理; 藻類の生態, 秋山優, 有賀祐勝, 坂本充, 横浜康継共著, 内田老鶴圃, pp.16.
- 東井純一, 伊藤時夫 (1985) :  $^{15}\text{N}$  標識による河床付着藻類から水生昆虫への窒素移行率の測定, 東海水研報, 117, 21~29.
- 伊藤絹子 (2002) : 浮遊性および底生性珪藻類の炭素・窒素安定同位体比について, 陸水学雑誌, 63, 166-168.
- Kasai, A., Horie, H. and Sakamoto, W. (2004) : Selection of food sources by *Ruditapes philippinarum* and *Macra veneriformis* (Bivalva Mollusca) determined from stable isotope analysis, Fisheries Science, 70, 11-20.
- 駒田充生, 竹内誠 (1998) : 農業域の小水路による脱窒速度の測定と窒素浄化機能の評価, 日本土壌肥料学雑誌, 69(2), 162-169.
- 越川海, 原田茂樹, 渡辺正孝 (1999) : 溶存有機物の微生物食物連鎖を経由する高次栄養段階への伝達, 日本プランクトン学会報, 48(1), 78~87.
- 松澤真一 (2005) : 安定同位体比法の谷津内食物網への適用, 宇都宮大学大学院修士論文
- 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), 203-210.
- 森 淳, 柚山義人 (2004) : 西風堤における生物の安定同位体比特性, 平成16年度農業土木学会大会講演要旨集, 772-773.
- 沖野外輝夫 (2002) : 河川の生態学, 共立出版, pp.74-81.
- 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, 平成17年度農業土木学会大会講演要旨集, 408-409.



- Takahashi, K., Wada, E., Sakamoto, M (1991) : Relationship between carbon isotope discrimination and the specific growth rate of green alga *Chlamydomonas reinhardtii*, Japanese Journal of Limnology, 52, 105-112.
- 高津文人, 河口洋一, 布川雅典, 中村太士(2005) : 炭素, 窒素安定同位体比自然存在比による河川環境の評価, 応用生態工学, 7(2), 201-213
- 和田英太郎 (1984) : 生物による窒素・炭素安定同位体比の変動-海洋への応用-, 月刊海洋科学, 16, 117-123.
- 和田英太郎 (1986) : 生物関連分野における同位体効果 生物界における安定同位体比の変動 , Radioisotope, 35, 136-146.
- Wada, E. and Yoshioka, T. (1995) : Isotope biogeochemistry of several aquatic ecosystem, Geochemistry International, 32, 121-141.
- Yamada, Y., Ueda, T., Koitabashi, T. and Wada, E. (1998) : Horizontal and vertical isotopic model of Lake Biwa ecosystem, Japanese Journal of Limnology, 59, 409-427.
- 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, 利用, 日本土壌肥学雑誌, 58(2), 252-268
- 米山忠克, 笹川英夫 (1994) : 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 : 1987年以降の研究の進歩, 日本土壌肥料学雑誌, 65(5), 585-598.
- Yoshioka, T., Wada, E. and Hayashi, H. (1994) : A stable isotope study on seasonal food web dynamics in a eutrophic lake, Ecology, 75, 835-846.
- 吉岡崇仁 (1997a) : TL=1の同位体比, 月刊海洋, 29, 408-412.
- 吉岡崇仁 (1997b) : 有機物の一次生産と分解過程における安定同位体比の変動, 水環境学会誌, 20, 292-295.

# Food Web Structure and Material Circulation in a Paddy Field Ecosystem

- A Case of Harakawa canal and narai-tsutsumi pond in Isawa-nambu Area -

MORI Atsushi and YUYAMA Yoshito

## Summary

Conservation of rural ecosystems in execution of agricultural infrastructure improvements and rural development projects is required since the revision of the Land Improvement Act. Preparations of food resource for lives are critical to sustain the ability of facilities to conserve the ecosystem.

Food web construction in a canal and a pond were analyzed using the stable isotope ratio method. Carbon isotope ratio ( $^{13}\text{C}$ ) of the attached matter in Habahirosuiro, a widened section in a canal, increased during the summer due to the activation of algae production.  $^{13}\text{C}$  in a section covered with a riparian forest was low and static. Insufficient solar radiation may have prevented algal growth. A low nitrogen stable isotope ratio ( $^{15}\text{N}$ ) present in chemical fertilizers from paddy fields caused the peak of nitrate nitrogen concentrations to lag behind  $^{15}\text{N}$ . The food web in narai-tsutsumi pond was evidently based on terrestrial organic matter.