

# 流速の多様化がもたらす食物連鎖の生産者の生物多様性

森 淳\*・渡部恵司\*・小出水規行\*・西田一也\*

## 目次

I 緒言	157	2 藻類等の特徴	159
II 調査方法	157	3 流速と種の関係	160
1 実験方法	157	IV 考察	162
2 安定同位体比と分析方法	158	V 結言	164
III 結果	158	参考文献	165
1 流速	158	Summary	166

## I 緒言

環境に配慮した農業水利施設の整備を行うには、水域ネットワークの保全とともに健全な生息場所を確保する必要がある。生息場所の環境を支配する主な環境要因として流速、水深、底質、植物群落を挙げることが出来る。つまりこれらを多様にすることが出来れば、少なくとも「器」としての生息場所の多様性を確保できる。

このうち流速は、すべての農業農村整備事業の設計時にコントロールできる唯一の物理性である。そして流速が多様であれば上流から流入する土砂の堆積量と粒径に違いが生じるから底質が多様化し、また水深、植生も多様となると考えられる。つまり多様な流速を確保できる設計は、その後の遷移によって生息場所の多様性を創出する可能性がある。流速の多様性は水域に多様な微生物場場所を作り出し、それぞれがいわば小さな生態系（ここでは局所的な食物網と考えてよいだろう）となって水路系全体の生態系の多様性を生み出すという仮説を提示することができる。

この仮説を検証する前に、まず本研究によって流速自体が生物界の生産者である藻類の生態に与える影響に焦点を当てる。加藤（1999）は、河川では流速が遅いほど珪藻の種多様性が高く、流速が多様な流路を確保することが重要だとしている。農業水路における流速が多様であれば一流速を大きくし流下断面の縮小を図る農業農村整備事業では、流速の多様化は小さな流速を発生させることとほぼ同義である一種多様性が高くなると考えられ

る。

また餌資源として、生物遺骸の腐食であるデトリタスも重要である。デトリタスはエネルギーの物質化を行っていない点で植物や藻類とは峻別され生産者とは見なされない。そしてデトリタスから始まる食物連鎖を腐食連鎖として別個に扱われることが多い。

しかし、自然界の水域には生食連鎖と腐食連鎖がそれぞれ独立して存在しているのではなく、少なくとも2次消費者より上位では一体化している。水域に生息する消費者の餌資源となっている点では食物連鎖の生産者と同等に扱って差し支えないだろう。デトリタスは底質等に固着していないので、流速の影響を最も受けると考えられる。

本研究では、流速が藻類・デトリタスに与える影響や食物連鎖における生産者の特徴を明らかにすることを目的とした。

なお本研究の一部は日本学術振興会科学研究費基盤研究(B) No. 22380133 によった。ここに記して深謝の意を表す。

## II 調査方法

### 1 実験方法

実験には農村工学研究所構内の実験水路（コンクリート三面張り、B=130cm）を用いた。藻類の生態は、成長のための栄養塩類や光などの資源、流速の大小等の外力および底生生物や魚類などによる摂食に支配される（Biggs, 1996）。このうち本実験水路で藻類の生育に影響を与える環境要因は流速だけである。

水路中央をコンクリートブロック（39cm × 19cm × 15cm）で仕切りを設けたうえで、川砂を厚さ10cm投入した。仕切りの右岸側の水路敷には同じブロックを千鳥

\* 資源循環工学研究領域生態工学担当

平成23年12月13日受理

キーワード：藻類、珪藻、緑藻、デトリタス、流速、底質、生態系の多様性、炭素安定同位体比

状に設置し流れを蛇行させた（以下「蛇行区」とする）。左岸側は単調な流れのままとした。以下「対照区」という）。2010年12月から2011年1月にかけて、ポンプの吐出口に設けられた三角堰を用いて一定流量 ( $Q=0.05\text{m}^3/\text{s}$ ) にしながら通水した。

蛇行区 32 箇所、対照区 39 箇所 (Fig.1) でアクリル製の円筒 ( $\phi=5\text{cm}$ ) を用いて砂ごとコア抜きして試料を採取した。流速をケネック社製 3 次元電磁流速計 (VP-3000) で計測した。合わせて水深を計測した。

採取した試料に蒸留水を加えてよく攪拌した後、砂と藻類等を含む液体を分離させた。この液体を再度攪拌してから 1 滴スライドグラスに採り、顕微鏡のステージを動かしながら全ての視野にある藻類等を観察した。1 箇所につきこの観察を 3 回繰り返す、非常に多いもの（たとえばしばしば視野の 1/3 以上を占めるもの）を ++, 1 つの視野に 2, 3 個体見られたものを +, この中間を ++ とし、これを順位と見なした。

また、藻類を  $60^\circ\text{C}$  で乾燥させた後専用のスズカップに充填し、Thermo Electric 社製の質量分析計 DELTA<sup>plus</sup> Advantage (前処理: Flash EA-ConFlo III) で炭素安定同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) を計測した。

統計解析には IBM 社 SPSS Statistics 19 を用いた。

## 2 炭素安定同位体比と分析方法

同じ元素番号を持ちながら質量数が異なる同位体には、放射壊変して別の核種に変わる放射性同位体と放射壊変しない安定同位体が存在する。炭素には 98.9% を占める  $^{12}\text{C}$  の他に、これより原子核中の中性子が一つ多く、したがって質量がわずかに重い  $^{13}\text{C}$  が 1.1% 含まれている。

質量が異なる同位体は、同位体効果によって物理化学的性質が異なる。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



Fig.1 実験開始前の水路  
Canal before experiment

る。この結果、同じ物質の間でも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。

炭素安定同位体比  $\delta^{13}\text{C}$  (‰) は次式により算出され、‰ で表される。

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

ここで 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バレムナイト化石の値である。

動物の体は、植物が生産した有機物あるいはこれに依存する動物を摂食、同化することによって作り出されている。餌となる生物と上位消費者の間では、生物体全体としての平均的な炭素安定同位体比はほとんど変わらない。したがって生産者の安定同位体比が食物網解析のカギである。

木本類や多くの植物は  $\text{C}_3$  植物に属する。イネは  $\text{C}_3$  植物である。一方ススキ (*Miscanthus* sp.), エノコログサ (*Setaria* sp.), イヌビエ (*Echinochloa* sp.), チガヤ (*Imperata* sp.), メヒシバ (*Digitari* sp.), カヤツリグサ (*Cyperus* sp.), トウモロコシ (*Zea mays*) など、イネ科植物の一部は  $\text{C}_4$  植物に属する。

$\text{C}_3$  植物の光合成時の同位体分別は  $\text{C}_4$  植物より大きい。そのため、生産される有機物の炭素に占める  $^{13}\text{C}$  の割合は  $\text{C}_4$  植物より少ない。つまり  $\text{C}_3$  植物の炭素は  $\text{C}_4$  植物より軽い。米山・笹山 (1994) は、 $\text{C}_3$  植物の  $\delta^{13}\text{C}$  を  $-35 \sim -25\%$ 、 $\text{C}_4$  植物で  $-15 \sim -10\%$  としている。これまでの分析によれば水田や里山付近の  $\text{C}_3$  植物の  $\delta^{13}\text{C}$  は  $-30 \sim -27\%$  程度を示すことが多い。イネ (*Oryza sativa*) は  $-27 \sim -26\%$  を示す。これに対して水田周辺の  $\text{C}_4$  植物の  $\delta^{13}\text{C}$  は  $-11 \sim -13\%$  程度を示すことが多い。

水域では  $\text{C}_3$  植物由来のデトリタスと藻類が食物連鎖の起源であることが多い。デトリタスの  $\delta^{13}\text{C}$  は  $-25 \sim -27\%$  程度を示すことが多く、 $\text{C}_4$  植物の影響は小さいと考えられる。これは、流域である斜面林には  $\text{C}_4$  植物がほとんど生育していないこと、イネが  $\text{C}_3$  植物であるためである。

陸水界の藻類の  $\delta^{13}\text{C}$  は光合成に用いられる水中の溶解態無機炭素の  $\delta^{13}\text{C}$  に強く影響を受ける。大気とのガス平衡が成立している場合の植物プランクトンの  $\delta^{13}\text{C}$  は  $-20\%$  前後である。

## III 結果

### 1 流速

実験水路の平均流速は、蛇行区  $0.277\text{m/s}$ 、対照区  $0.287\text{m/s}$  となった。両者間で Mann-Whitney の U 検定を行ったところ、平均流速に有意差はなかった。しかし

三次元の流速成分について分析したところ、水路横断方向（以下本稿において「y 方向」という、U 値 399.0 :  $p=0.009$ ）および鉛直方向の流速（同様に「z 方向」という、U 値 442.0 :  $p=0.035$ ）に有意差があった（Table 1）。

対照区は蛇行区と比べて一様な流れになると考えた。対照区における流れの均質性を確かめるため、流れの観察結果から右岸側（すなわち水路中央仕切り近く）、中央部および左岸側に分けて（以下、「3 グループ」とする）流速、流速の各成分および水深の環境要因について一元配置分析を行った結果、これら環境要因の平均値に有意差はみられなかった。次に、3 グループの流速分布ヒストグラムの特徴を解析したところ、尖度は、順に 2.922, 7.267, -0.604 となった。つまり、右岸は 3 に近い値を示したことからほぼ正規分布を示し、左岸はなだらかな分布を示したが、中央部は特定の流速（0.1 ~ 0.3m/s）に分布が集中する、尖ったヒストグラムとなった。

さらに 3 次元方向でみると、流下方向（以下「x 方向」という）の尖度は、右岸、中央、左岸の順に（以下、同様）1.296, 6.599, -1.167 に、y 方向が 2.448, -0.090, 1.762 に、z 方向が 0.269, 10.327, 3.015 に、平面（x 方向と y 方向の合成流速）が 1.792, 6.453, -0.866 となった。このように、中央部は y 方向を除き、ある範囲の流速が集中していることが明らかになった。

蛇行区では投入したブロックの影響により流向や流速に違いが観察されたため、ブロックとの位置関係により A ~ E の 5 グループに分けて解析した（Fig.2）。コンクリートブロックの下流側に藻類とデトリタスが堆積し、上流側は砂が洗掘されて若干薄くなっていた。蛇行区 5 グループ間において、流速（3 次元の合成流速）、流下方向流速（x 軸）、横断方向流速（y 軸）、平面流速（x 軸と y 軸の合成流速）、鉛直流速（z 軸）、水深などの物理性について一元配置分散分析を行った。その結果、群間の流速には有意差が見られ（ $F(4,27)=5.049$ ）、Tukey を用いた多重比較を行ったところ、B-C 間および C-D 間で C の流速が有意に小さいことが明らかになった。x 方向についても有意差が見られ（ $F(4,27)=9.740$ ）、A-C 間、B-C 間、C-D 間および C-E 間において C が有意に小さいことがわかった。さらに平面流速（x 軸、y 軸の合成流速）に有意差が認められ（ $F(4,27)=5.260$ ）、B-C、C-D

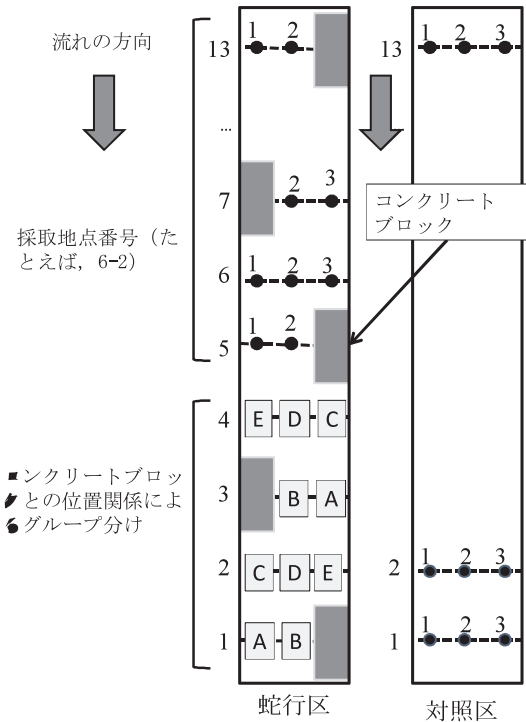


Fig.2 採取地点の位置  
Location of sampling points

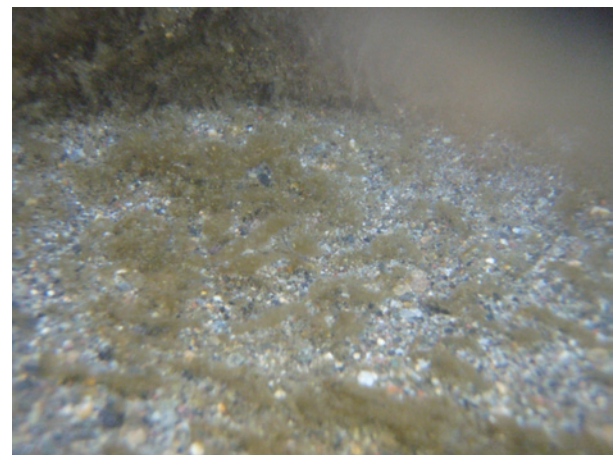


Fig.3 水路底で生育する藻類  
Algae on the canal bottom

間に C の流速が有意に小さいことがわかった（いずれも  $p<0.05$ ）。y 方向および z 方向については、有意差はみられなかった。以上からグループ C は成分を含めた流速が他のグループより小さいことが明らかになった。

## 2 藻類等の特徴

出現した藻類のタクサ数は、デトリタスを加えて調査地点全体で 34 となった。両試験区をとおした出現率 80% 以上の種は、出現率の高かった順に、ディアトマ属 (*Diatoma* sp.)、シネドラ属 (*Synedra* sp.)、スタウラストルム属 (*Staurostrum* sp.)、ナビクラ属 (*Navicula* sp.)、デトリタス、セネデスムス属 (*Scenedesmus* sp.)、メロシラ属 (*Melosira* sp.)、アオミドロ属 (*Spirogyra* sp.) だっ

Table 1 試験区毎の平均流速

Average velocity of Meandering section and Control canal

(単位: m/s)

	蛇行区		対照区	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
流速	0.277	0.109	0.287	0.132
平面流速	0.242	0.097	0.276	0.125
流下方向	0.203	0.095	0.268	0.119
横断方向*	0.102	0.087	0.055	0.057
鉛直流速*	0.094	0.109	0.051	0.071

注: \* は試験区間に有意差 ( $p<0.05$ ) が認められた流速成分

**Table 3** 種ごとの平均出現量  
Average quantity in order of the algae appearance

全試験区		蛇行区		対照区	
属名等	平均量	属名等	平均量	属名等	平均量
デトリタス	2.5	デトリタス	2.2	デトリタス	2.6
シネドラ属	2.2	シネドラ属	2.0	シネドラ属	2.4
ディアトマ属	1.8	ディアトマ属	1.7	ディアトマ属	2.0
メロシラ属	1.6	アオミドロ属	1.5	ナビクラ属	1.7
アオミドロ属	1.6	メロシラ属	1.5	メロシラ属	1.7
ナビクラ属	1.5	ナビクラ属	1.3	アオミドロ属	1.6
ニッチア属	1.3	ニッチア属	1.3	ニッチア属	1.4
スタウラストルム属	1.3	スタウラストルム属	1.2	スタウラストルム属	1.3

た。このうちディアトマ属、シネドラ属、スタウラストルム属はすべての調査地点で採取された。試験区毎に出現率 80%以上の種を高い順に挙げると、蛇行区では、シネドラ属、ディアトマ属、スタウラストルム属、デトリタス、メロシラ属、ナビクラ属、セネデスム属、アオミドロ属、対照区ではシネドラ属、ディアトマ属、ナビクラ属、スタウラストルム属、デトリタス、セネデスム属、メロシラ属、アオミドロ属の順となった。

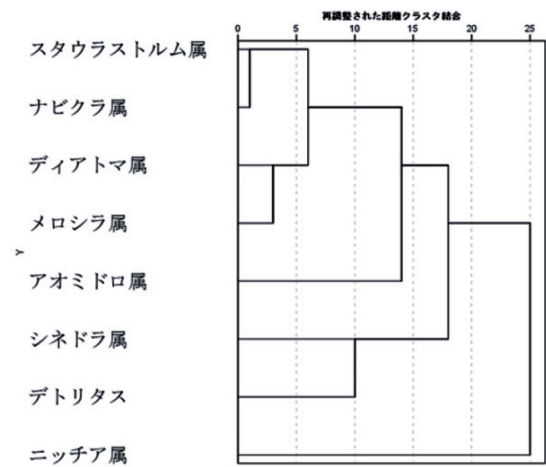
次に、出現量順の種を **Table 3** に示す。試験区間で比較すると、上位3種（デトリタス、シネドラ属、ディアトマ属）の順位は両試験区とも同じだったが、4位は蛇行区がアオミドロ属、対象区はナビクラ属だった。6位はこの両種が入れ替わり、蛇行区がナビクラ属、対象区がアオミドロ属だった。出現量をもとにクラスター分析（平方ユークリッド距離、Ward法）を行ったところ、**Fig. 4** に示すデンドログラムが得られた。

藻類に関する出現量等について両試験区間で Mann-Whitney の U 検定を行ったところ、種数、Shannon-Wienwer の多様度指数において有意差はみられなかったが、出現量の総量（U 値 362.5,  $p=0.02$ ）有意差が認められた。

対照区内の3グループについては、種数、多様度指数等について有意差は見られなかったが、出現量の総量（ $F(2,38)=3.76$ ）、ニッチア属（*Nitzschia* sp.,  $F(2,38)=5.31$ ）およびアオミドロ属（ $F(2,38)=3.80$ ）で有意差があり、いずれも左岸側が右岸側に比し大きな値を示した。蛇行区については後述する。

蛇行区の出現藻類の順位についてグループ間で Kruskal Wallis 検定を行ったところ、シネドラ（ $p=0.019$ ）、ナビクラ（ $p=0.023$ ）、メロシラ（ $p=0.029$ ）、デトリタス（ $p=0.032$ ）およびアオミドロ（ $p=0.039$ ）について順位に違いがあることが明らかになった。

種数と出現量の総量の間には、調査地点全体で  $\rho=0.86$ （蛇行区： $\rho=0.81$ 、対照区： $\rho=0.89$ ）の有意な正の相関があった（ $p<0.01$ ）。出現量の総量と多様度指数の間にも全体で  $\rho=0.76$ （蛇行区： $\rho=0.73$ 、対照区： $\rho=0.80$ ）の有意な正の相関があった（ $p<0.01$ ）。



**Fig.4** 種の出現量によるデンドログラム  
Dendrogram of cluster analysis of algae quantity

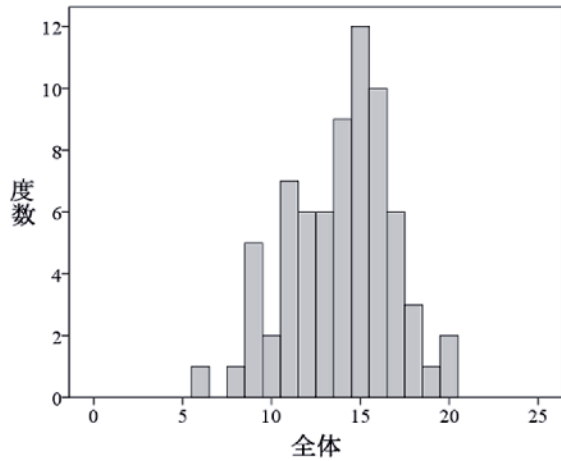
近傍の調査地点は似た藻類相を示すと予想して、藻類相をクラスター分析したが、そのような傾向はみられなかった。

**Fig.5** ~ **7** に種数のヒストグラムを示す。Shapiro-Wilk 検定の結果、全体（ $p=0.192$ ）及び対照区（ $p=0.539$ ）では正規分布を示したが、蛇行区は正規性を示さなかった。

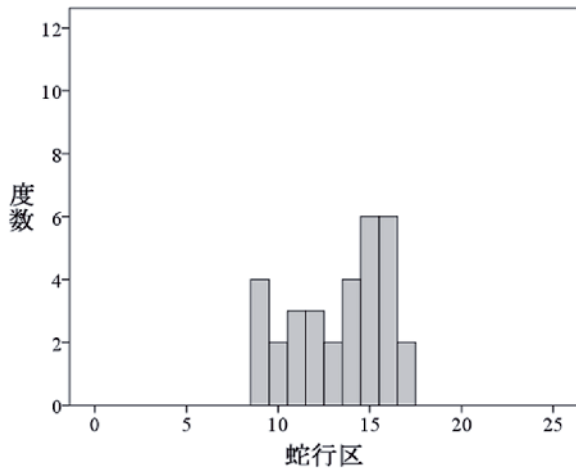
### 3 流速と種の関係

調査地点全体でみると、流速と種数の間には  $\rho=0.49$  の正の相関が、対照区、蛇行区でもそれぞれ  $\rho=0.53$ 、 $\rho=0.42$  が見られた（いずれも  $p<0.05$ ）。しかし流速と多様度指数の間には、全調査地点、蛇行区および対照区のいずれにも有意な相関はみられなかった。

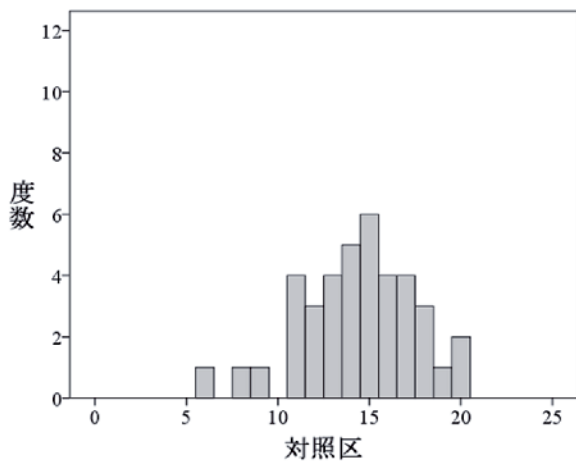
調査地点全体を流速 0.2m/s 未満（グループ1）、0.2m/s 以上 0.4m/s 未満（グループ2）、0.4m/s 以上（グループ3）に分けて出現量総量、種数、多様度指数等の一元配置分析を行ったところ有意差は認められなかった。主な種の出現数割合を **Fig.8** ~ **10** に示す。種別出現量は、ディアトマ属、アオミドロ属、メロシラ属では有意差なし、ニッチア属（ $F(2,68)=3.12$ ）、シネドラ属（ $F(2,68)=4.31$ ）、スタウラストルム属（ $F(2,68)=4.70$ ）、デトリタス（ $F(2,68)=3.40$ ）、ナビクラ属（ $F(2,68)=8.44$ ）にグルー



**Fig.5** 種数のヒストグラム (全体)  
Histogram of species number (Both of the sections)



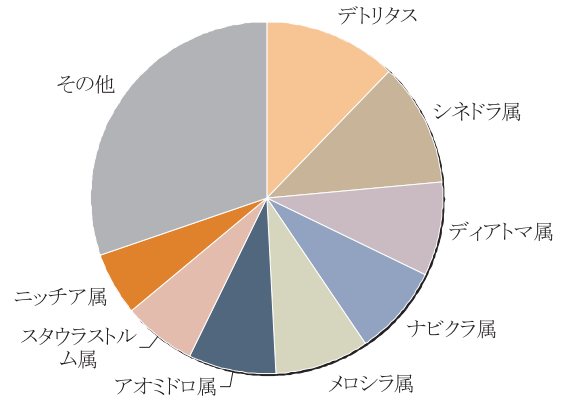
**Fig.6** 種数のヒストグラム (蛇行区)  
Histogram of species number (Meandering section)



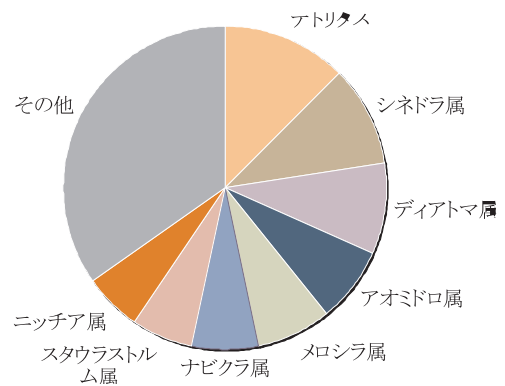
**Fig.7** 種数のヒストグラム (対照区)  
Histogram of species number (Control section)

グループ間の有意差があった。多重比較の結果、ニッチア属はグループ3の方がグループ2より多かった。その他の種はいずれも流速の小さなグループの方が多かった。

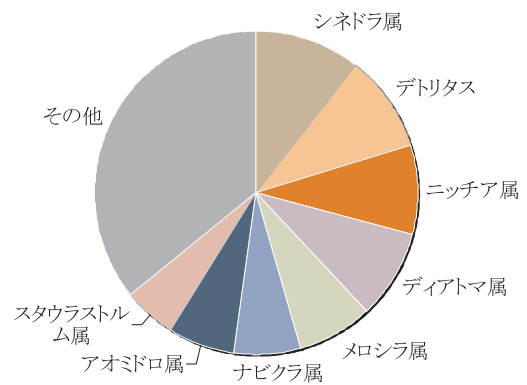
すなわちシネドラ属はグループ1>グループ2、スタ



**Fig.8** グループ1の出現割合 (0.2m/s未満)  
Appearance ratio of algae in Group 1



**Fig.9** グループ2の出現割合 (0.2m/s以上0.4m/s未満)  
Appearance ratio of algae in Group 2



**Fig.10** グループ3の出現割合 (0.4m/s以上)  
Appearance ratio of algae in Group 3

ウラストルム属でグループ1>グループ2, グループ1>グループ3, デトリタスはグループ1>グループ3, ナビクラ属ではグループ1>グループ2, グループ1>グループ3だった。

流速とデトリタス量間に有意な負の相関 ( $\rho = -0.51$ ) が、鉛直流速とデトリタス間に  $\rho = -0.64$  の相関が (いずれも  $p < 0.05$ )、また、流速と藻類総量の間には  $-0.88$  ( $p < 0.01$ ) の強い負の相関があった。

蛇行区各5グループの平均流速と各代表種の出現量を Fig.11 ~ 18 に示す。各グループの平均流速と、スタウラストルム属 ( $\rho = -0.95$ ), デトリタス ( $\rho = -0.91$ ), シネドラ属 ( $\rho = -0.90$ ), ナビクラ属 ( $\rho = -0.90$ ) との間に、それぞれ有意な負の相関があった ( $p < 0.05$ )。これらの種は、前述した流速を3グループに分けた場合グループ間に有意差が生じた種と、ニッチア属を除いて一致した。

主要8種の平均量をもとにしたクラスター分析(ユークリッド平方距離, ウォード法)のデンドログラムを Fig.19 に示す。A, E および B が類似し、ブロック直下流の C が離れて位置しており、D がもっとも遠くに位置している。

5グループの平均多様度指数は、A が 2.38, B が 2.33, C が 2.42, D が 2.45, E が 2.34 となり、いずれの間にも有意差は見られなかった (U 検定)。

5グループで一元配置分散分析を行った結果、出現量の総量 (F(4,27)=3.708), シネドラ属 (F(4,27)=4.085), デトリタス (F(4,27)=3.636), ナビクラ属 (F(4,27)=3.921), アオミドロ属 (F(4,27)=3.245), メロシラ属 (F(4,27)=3.673) で有意差がみられた。ニッチア属, ディアトマ属およびスタウラストルム属では有意差は見られなかった。多重比較の結果、有意差があった種の全てにおいて、Dグループに比しCグループの出現量が多いことが明らかになった。

#### 4 生産者の炭素安定同位体

サンプルの平均炭素安定同位体比は、 $-20.0 \sim -22.3\%$  となった (Table 4)。 $\delta^{13}\text{C}$  と流速等との間の順位相関係数を求めたところ、流速の間に  $\rho = 0.45$  (以下、いずれも  $p < 0.05$ ) の有意な正の相関があった。 $\delta^{13}\text{C}$  と出現量の総量との間に  $\rho = -0.535$ , デトリタスとの間に  $\rho = -0.54$ , アオミドロ属との間に  $\rho = -0.45$ , ニッチア属との間に  $\rho = -0.48$  の相関があった。

グループ間で一元配置分析を行ったところ有意差が認められた (F(4,27)=5.337)。多重比較の結果、グループ C の  $\delta^{13}\text{C}$  が他のグループに比べて低いことが明らかになった。

### IV 考 察

#### 1 流速

蛇行区と対照区の平均流速には有意差がなかったが、流れの成分では差が生じた。特にデトリタスの出現量と負の相関のある鉛直方向の流速は生産者の組成に影響を与える可能性があることが明らかになった。

対照区は横断的な位置の違いにより流れの均質性に差が出た。すなわち中央部は同じような流れ特定の流速が集中した一方、壁面に近いと流れが乱れることにより正規分布を呈した。今回用いた水路は幅が狭かったため壁面の影響が増幅されたと考えられるが、規模の大きな水

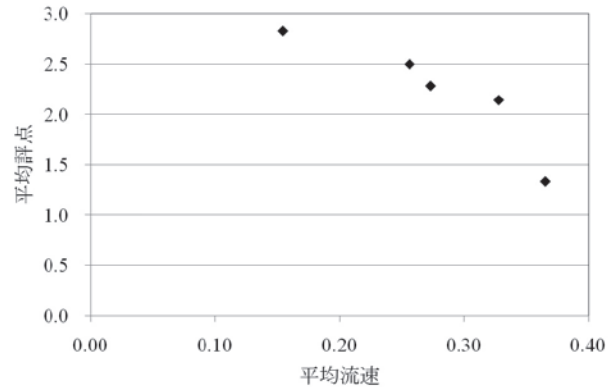


Fig.11 蛇行区の流速と出現量 (デトリタス)

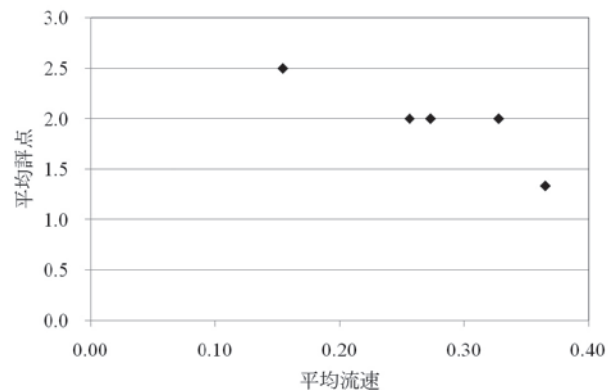


Fig.12 蛇行区の流速と出現量 (シネドラ属)

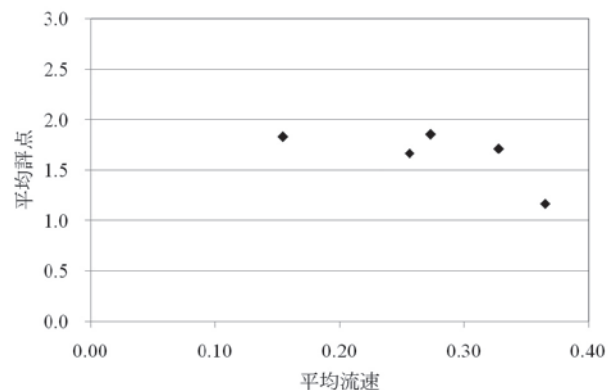


Fig.13 蛇行区の流速と出現量 (ディアトマ属)

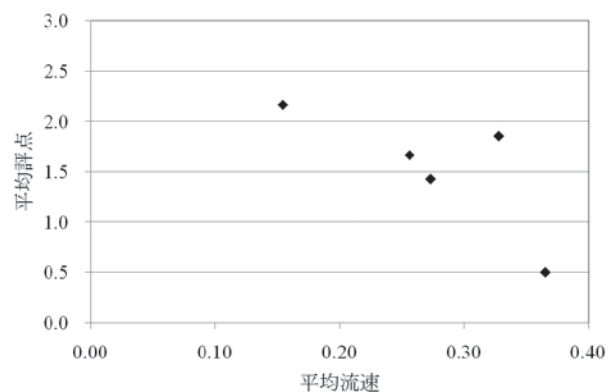


Fig.14 蛇行区の流速と出現量 (アオミドロ属)

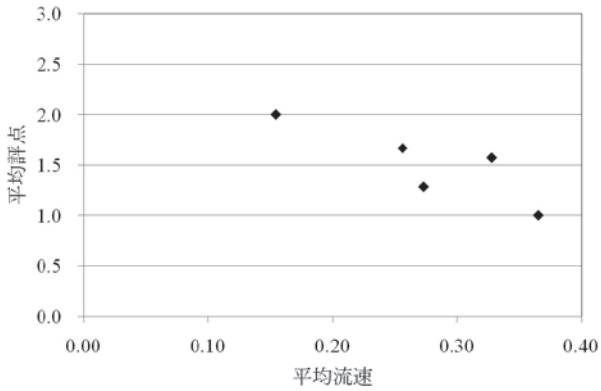


Fig.15 蛇行区の流速と出現量 (メロシラ属)

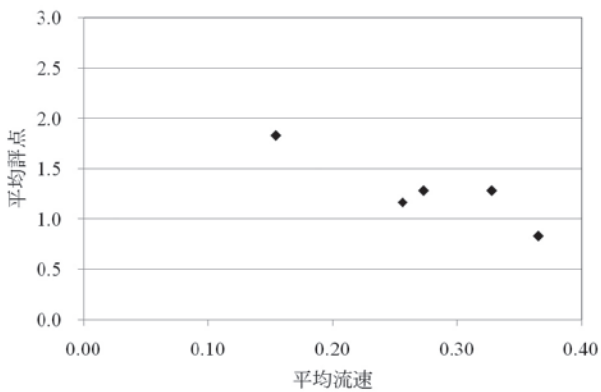


Fig.16 蛇行区の流速と出現量 (ナビクラ属)

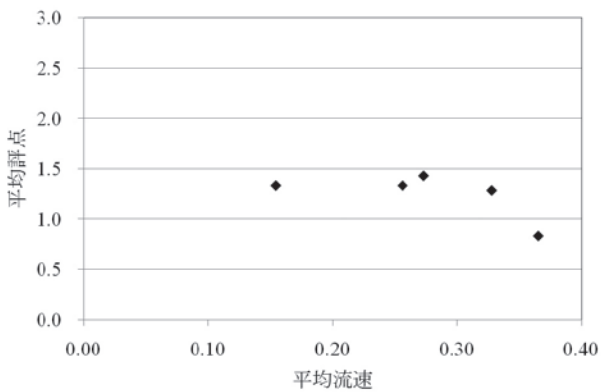


Fig.17 蛇行区の流速と出現量 (ニッチア属)

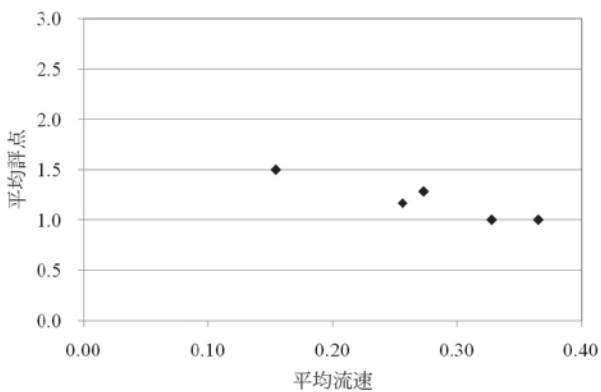


Fig.18 蛇行区の流速と出現量 (スタウラストルム属)

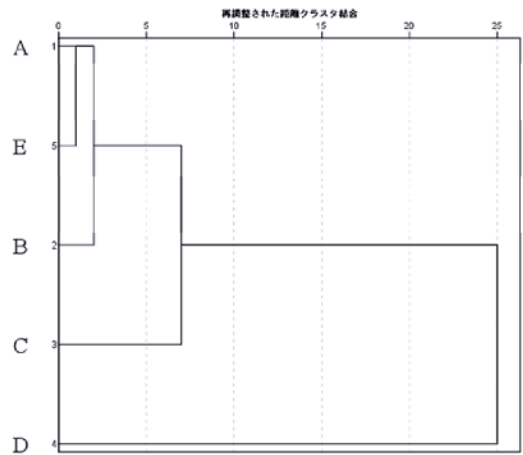


Fig.19 蛇行区5グループのデンドログラム

Dendrogram of cluster analysis of 5 Groups in meandering section

Table 4 試料の炭素安定同位体比  
Stable isotope ratio of organic matter

(単位：%)

グループ	A	B	C	D	E
$\delta^{13}\text{C}$	-20.9	-21.1	-22.3	-20.0	-20.8

路ではこの中央部に相当する流れが占める割合が相対的に増加し、結果的に全体の流れの多様性が低下する可能性がある。

蛇行区においてブロックの直下流部 (C) の流速が小さくなることは予想されたが、これが定量的に裏付けられた。蛇行区における5グループ別の流速は、ブロックの直下流に位置するCと蛇行区中央部(ブロックとブロックの間)に位置するDの間で、Cが有意に小さかった。このほかの流速成分でもCは小さな流速が形成された。ブロックを投入したことにより、流速の多様性が形成されたことが確かめられた。

## 2 藻類

今回の研究で出現した藻類はいずれも河川などの陸水域における類出種である。珪藻群落の種構成は生息場所によって異なるが、砂上ではナビクラ属、ニッチア属などが多かったという大塚(1998)の報告と合致している。また久保田ら(1966)は流れの速さによって流速が60~140cm/sを早瀬、15~60cm/sを平瀬としたうえで、ナビクラ属が流速の小さな場所に多く出現する傾向があると述べている。この分類に従えば、本実験は平瀬に該当する。

Fig.3のデンドログラムは、ニッチア属が他の種と比べて異なる出現傾向があることを示している。すなわちデトリタスや藻類種は流速が大きいほど出現量が減少する傾向があるが、ニッチア属は、本実験の流速分布内において流速は生育の制限要因にならなかった。

河村(1994)の付着機構によって藻類を分類し、そのなかで砂底に多く生育する種は、殻の全面で基質に水

平方方向に付着し、活発な滑走運動をする付着力は弱いA型(ナビクラ属, ニッチア属など)や単体で蓋面前面で気質に付着するB型が砂底で多いとしている。これは砂泥のような不安定な場所では基質自体の動きや基質表面の更新などが大きな影響を及ぼす(河村, 1998)からである。付着力の弱いA型に属するニッチア属では、本実験の範囲内の流速は出現の制限要素にならなかった。この理由として、同じA型の間でも付着力に差があるか、ニッチア属の増殖速度が他種より速いことが考えられる。流速が多様な環境では、流速に生育の影響を受ける種、あまり受けない種が適した環境が供給され、水路における種多様性が高まる。

藻類群落の遷移は被摂食と光条件の影響を受ける。まず増殖速度が速いA型がコロニーを形成した後、藻類群落は徐々に大きな群体を形成し三次元的群落が発達する。そして、次第に細胞の端を付着させてロゼット状の群体を作るアオミドロ属のような種、寒天質の柄を細胞から伸ばして付着する種などが出現する(河村, 1998)。多細胞が連結した糸状群体を形成し末端細胞で基質に付着するH型のメロシラ属が頻出したのは群落の遷移が進んでいたことを示唆している。更なる群落成長の制限要因がない場合、次にB型が卓越することになるが、本研究で認められたB型はコッコネイス属(*Cocconeis* sp.)が多少みられたのみであった。この原因として採取時点は遷移の途中だった可能性、種間競争の影響が考えられる。

流速と種数の間に正の相関がみられたことは、加藤(1999)の報告と異なる結果となった。これは本研究における流速が、大きな流速を含む河川のような環境ではなく、平瀬に該当する小さい流速範囲だったためかもしれない。すなわち、流速がある範囲を超えると種多様性が減少するが、小さな流速の狭いレンジでは、流速が藻類相の遷移速度、種間競争に影響を与え、流速が大きいほど種数が増加する可能性がある。しかし蛇行区5グループの種多様性に有意差がみられなかったことから、本研究のような小さな流速の範囲では、流速は種多様性に明瞭な違いは生じさせないと考えた。

一方、出現量と流速は負の相関がみられた。河床の礫が移動するような流速の大きな流路では底生藻類による一次生産は抑えられるが、流速の遅い部分を創出することができれば底生藻類の群落の発達が見込める(河口・中村, 2005)。水路に流速の小さな場所を確保することは水生動物の餌である藻類を確保するために重要である。さらに本研究では流速と種数が正の相関があったことから、一定の流速レンジの下では流速が小さいほど特定の種が優占する可能性が示唆された。

蛇行区の種数ヒストグラムが正規分布を示さなかったことから、藻類の生息に適した環境だけでなく、あまり適していない環境も創出されたといえる。水路には藻類種が多い水生動物にとっての餌場環境だけが用意される

必要はなく、避難場、繁殖場、越冬場など餌場以外の機能も必要である。蛇行区では様々な流速をもつ水域環境が用意され、結果的に藻類の生息にはあまり適していない空間が創出されたと解釈することもできよう。藻類群落が発達する場所、発達しない場所の特性解明は今後の課題である。

蛇行区のCは流速、藻類相だけではなく物質フローからも特徴的である。Cの $\delta^{13}\text{C}$ は他の地点と比べて低く、 $\text{C}_3$ 植物由来の有機物であるデトリタスが他グループに比べて多く含まれていることを表している。現場の農業水路でもしばしば石の直下流に落葉・落枝やその破砕物、腐食物の堆積を見ることができる。水域中の石は匍匐型、営巣型など水生昆虫の生息場所となるだけでなく、付着力がないデトリタスが餌資源となって食物網に取り込まれる場を提供している。

本研究は生産者の生態に対する大きな因子であり、設計時にある程度制御可能な流速に着目した。現場の水路はこの他に、①底質の粒度分布、②上流からの土砂の供給、③出水による攪乱などの影響を受ける。今後これらを含めて解析することによって、水路内の食物連鎖、すなわち微小な生態系の多様性を確保する整備手法が開発される。

## V 結 言

流速による藻類相の違いを把握するため、人工水路において実験を行ったところ、以下の知見が得られた。

- ① 流速と種数には正の相関が見られた。しかし流速による藻類の多様性指数の違いはみられなかった。
- ② 藻類の総量は流速と強い負の相関があった。
- ③ 本実験の条件下では、流速が小さいほど特定の種が優占する可能性がある。
- ④ 同じ付着機構を持つ種間でも出現傾向に差が見られた。ナビクラ属の出現量は流速と負の相関があるが、ニッチア属は流速の影響を受けないことが明らかになった。
- ⑤ デトリタス量は流速、特に鉛直流速と負の相関がある。
- ⑥ コンクリートブロックの直下流の試料は、他に比べて $\delta^{13}\text{C}$ が低かった。これは流速が小さく、デトリタスが溜まりやすかったためと考えた。

水路における定常的な流速環境下において、流速の影響の受けやすさに種間差があること、デトリタスは流速の小さなところに堆積しやすいことが明らかになった。底生生物(ベントス)はさまざまな生活型、摂食機能群を有する。流速の多様性は藻類種の出現、デトリタスの堆積に影響を与えるから、底質の変化などとともに、微小な生態系を形成するきっかけとなっている可能性がある。



## 参考文献

- 1) 加藤和弘 (1999) : 珪藻類の種多様性を保全するための河川環境整備のありかた, ランドスケープ, 65 (5), 561-564.
- 2) Biggs, B. J. F.: Patterns in benthic algae of streams, In: Stevenson, R. J., Bothwell, M. L., Lowe, R. L. (eds) *Algae ecology*, Academic Press, San Diego, CA, 1996
- 3) 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, 日本土壌肥科学雑誌, 65 (5), 585-598.
- 4) 大塚泰介 (1998) : 河川の一形態単位内における付着藻類群落, 特に珪藻群落の生息場所による違い, 陸水学雑誌, 59, 331-328.
- 5) 久保田苑子・草間真知子・矢矧宏子 (1966) : 川の流速と付着藻類の構成-吉野川の場合-, 奈良女子大学生物学会誌, 16, 19-20.
- 6) 河村知彦 (1994) : 海産付着珪藻の分類と形態, 付着生物研究, 10 (2), 7-25.
- 7) 河村知彦 (1998) : 付着珪藻-その生態と付着生物群集における役割-, *SESSILE ORGANISM*, 15 (1), 15-22.
- 8) 河口洋一・中村太士 (2005) : 直線化された川の再蛇行化-分野間の協働について-, 日本生態学会誌, 55, 497-505.

## Diversification of Water Velocity Provides Biodiversity of Producer in a Food Chain

MORI Atsushi, WATABE Keiji, KOIZUMI Noriyuki and NISHIDA Kazuya

### Summary

Important factors for aquatic lives in canals involve water velocity, water depth, substrate of canal and plant community. We can control only water velocity to conserve ecosystem in canal when land improvement project is put into practice. As water velocity affects environment through succession, variety of water velocity might help us to create diversity of ecosystem. Algae and detritus are most important producers in ecological pyramid. We analyzed relationship between ecology of the producers and water velocity using an artificial canal.

Water velocity correlated with number of species. On the other hand, velocity correlated inversely with quantity of algae. Though attach mechanism of *Nitzschia* sp. is common to *Navicula* sp., the quantity of the former was not been influenced to water velocity, but the latter was negatively correlated to water velocity. Quantity of detritus correlated with water velocity, especially vertical velocity.  $\delta^{13}\text{C}$  of samples collected from behind concrete blocks that have been set in order to emerge diversity of water velocity was lower than the other samples. The samples were considered to include more detritus that was derived from terrestrial plants.