

水生昆虫データによる 河川生物生息環境の指標化について

INDICES OF RIVER ECOLOGICAL QUALITY USING BENTIC MACROINVERTEBRATES DATA

玉井昌宏¹・香本祥子²

Masahiro TAMAI and Sachiko KOMOTO

¹正会員 博(工) 大阪大学助教授 大学院工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

²学生会員 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻前期課程 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

Benthic macroinvertebrates have been often used as indices of river water quality from old times. In these days, a lot of researchers mainly in the EC are trying to find benthic macroinvertebrates based indices for estimation or classification of river ecological quality. The purpose of this study is to examine the relation between some river environmental or ecological factors and a variety of macroinvertebrates based indices for expressing diversity, abundance and constitution, in order to find out appropriate indices for rivers in Japan. The result shows that percentage of individual number of clingers can be a good index for water quality and some diversity indices closely relate to artificial channel structures.

Key Words : *benthic macroinvertebrates, indices, river ecosystem, the Yodo River*

1. はじめに

昨今, EU諸国やオーストラリア等の国々では, 手付かずの自然, あるいはそれに近い状態からの乖離という見地から, 底生無脊椎動物を用いて, 河川環境とくに生物の生息環境を総合的に評価しようという試みが盛んに行なわれている。ここで「総合的評価」というのは, 水質のみならず流況や流路の改変, 流路に隣接する陸上部分の改変, 流域・水系レベルの広域的改変, 河道内に加え沿岸も含めた生物同士の関わり合いといった河川生態系の成立に必須の条件をなるべくもれなく評価しようということである。

総合的な河川環境を示す指標として, 多様性指数, EPT比(環境変化に敏感なカゲロウ, カワゲラ, トビケラの3目の占める割合)などが広く用いられているが, 最近では, 環境形成要素を多く取り込んで河川環境を評価する手法(Multimetric Index)の開発が試みられている。例えば, Ofenbock et al.¹⁾は, 生息環境に及ぼす様々なストレスと底生無脊椎動物に関する様々な指標との関連を調査して, 複合項目の新たな指標の提案を行なっている。

欧米と我が国では生息生物種やそれらの環境への適応状況が異なっていることから, 既往の研究成果を日本の諸河川へ適用するためには種々検討を要する。場合によっては, 全く新しい指標の開発が必要となることも予

想される。ところが, 我が国では, 水質汚濁指標を除けば, 生物生息環境に関連する生物指標についての研究はほとんど行なわれていない。

本研究では, 淀川下流域を対象として, 「河川水辺の国勢調査年鑑」²⁾の底生生物データと生物生息環境要素との関連性について検討を行なうことにより, 我が国の河川の生物生息環境に関する適切な評価インデックスを見いだすことを目的とする。

2. 分析データ

(1) 分析の対象地点の概要

本研究では淀川下流域を対象とする。河川水辺の国勢調査年鑑の中で該当する調査ポイントは36点である。調査ポイントは, 京都府八幡市付近の三川合流地点より下流では, 右支流の芥川, 女瀬川, 水無瀬川, 左支流の天野川, 穂谷川, 船橋川, 天野川の支流の北川, 三川合流より上流では, 宇治川, 木津川, 桂川等にある。本研究で分析対象とした調査ポイントを含む河川の位置を図-1に示す。また, 分析対象とした調査地点を図-2に示す。

(2) 水生昆虫データ

この淀川下流域において底生生物調査の行なわれた,

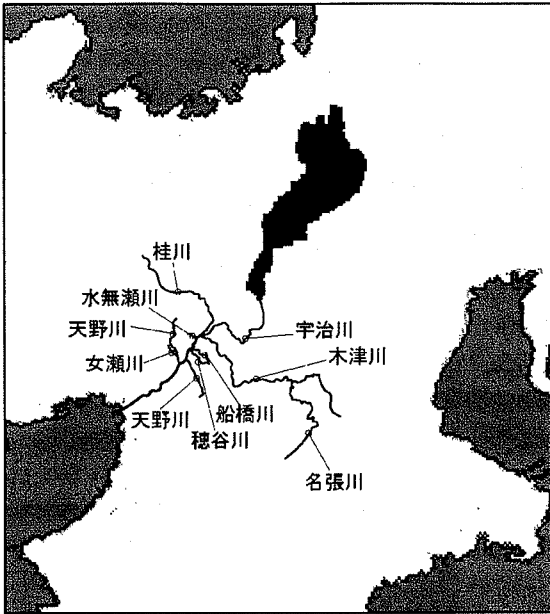


図-1 分析対象河川の位置

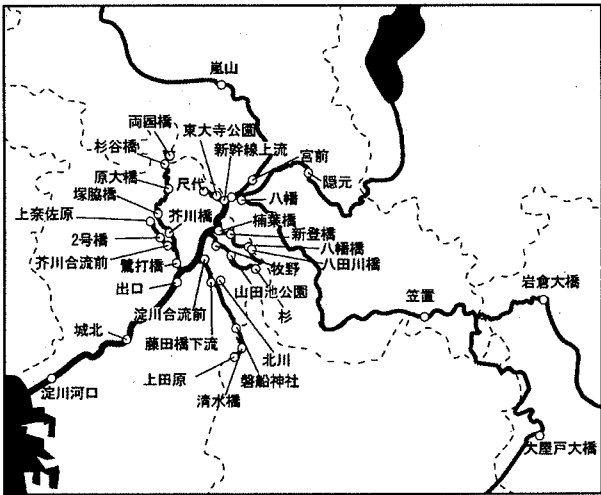


図-2 分析対象の地点

表-1 環境要素とその出典

環境要素	出典あるいは推定方法 (利用データ)
調査地点標高 水の透明度	河川水辺の調査年鑑
流域土地利用状況	GIS (標高, 土地利用データ)
瀬淵構造 河畔あるいは河道内植生 河道内構造物	現地調査

平成6年度河川水辺の国勢調査年鑑・底生動物調査編のデータを用いた。採集された昆虫種と個体数データと

もに、昆虫採集の方法が記載されている。水深の大きくない箇所では、コドラートを用いた調査が、水深の大きい場所では採泥器により採集が行なわれている。

(3) 生物生息に関係する環境要素

本研究で採用した環境要素とその出典を表-1に示す。水生生物の生息に影響を及ぼす要素は、水質、物理的なハビタットの状況、他の生息生物との関連の3つに大別できる。水質は、流域の地質状況、降雨状況など自然条件と人為的な影響により決定される。調査地点毎の水質データがないこと、水質は時間変動が大きいことから短期間調査を実施しても有意なデータを得られないこと、さらに、地点毎の水質の差異が人的影響により支配されていると予測されることから、ここでは、水質データの代わりに、各地点の流域土地利用状況を用いることとした。物理的なハビタットの特性は、緯度、経度、標高、あるいは気候帯、流域地質条件、流域土地勾配、河床勾配といった自然条件と河道や流況等に対する人為的改変の影響を受けている。今回の分析対象ポイントの空間領域では、緯度経度による気候あるいは気温差は小さいと判断した。また、手元に地質条件についてのデータが無いことから、ここでは、瀬淵など河床形態、落差工、護岸構造などの人工構造物の有無、河床材料の粒径、標高によって、物理的ハビタットの状況を分類した。ここでは、他の生物との関係として、食物の供給源となる河道内植生や河畔林の有無のみを調査した。

分析対象地点の標高、水の透明度は河川水辺の国勢調査年鑑に記載されており、そのデータをそのまま用いた。各調査ポイントの流域面積、流域土地利用状況はGIS(地理情報システム, ESRI社ArcView3.2a)の水理計算機能(Hydrologic Modeling)を用いて求めた。瀬淵、河道内構造物などの物理的なハビタット状況と河道内、河道周辺の植生状況については、現地調査により把握した。

3. 水生昆虫を用いた指標

既往の研究^{1), 3), 4), 5)}を参照して、出現した水生昆虫の種数、個体数、種数構成、汚濁耐性/非耐性、多様度、生活型、摂食機能等に着目した27種の指標を算定した。表-2に全指標を示している。

種数は、水生昆虫の多様性に関係し、生物生息環境に敏感に反応するとされている。ここでは、以下の指標について採用する。

存在量とは種などの個体数のことである。サンプリングの方法や河川規模などによって大きく変動することから、一般的には生息環境指標として用いられない。しかしながら、河床の物理的改変などに対して、良好な指標になるとされる。i, ii, iiiは個体数が場所や種によりオーダーを超えて変動することと、また出現数が0とな

表-2 水生昆虫を用いた指標

分類	用いる種あるいは指標
種数	1) カワゲラ目種数(Plecoptera taxa) 2) トビケラ目種数(Trichoptera taxa) 3) カゲロウ目, カワゲラ目, トビケラ目 (EPT)の種数総和(EPT taxa) 4) 全種数(Total Taxa) 5) 全科数(Total Families)
存在量	6) カワゲラ目の個体数(LN) (Plecoptera abundance) 7) トビケラ目の個体数(LN) (Trichoptera abundance) 8) 総個体数(LN)(Total individuals) 9) カゲロウ目, カワゲラ目, トビケラ目 の個体数合計の総個体数における割合 ([%] EPTabundance)
種数構成	10) カゲロウ目, カワゲラ目, トビケラ目の種 数割合 ([%] EPT taxa)
汚濁耐性 ／非耐性	11) Saprobic index (PantleとBuckの汚濁指数 ³⁾) 12) Sensitive taxa ; 非汚濁耐性の種数 13) ASPT (Average Score Per Taxon) ⁴⁾
多様度	14) H' (Shannon-Wiener指数) 15) J' (均衡度) 16) 1/D (Simpson数)
生活型	17) [%]Burrowers 18) [%]Climbers 19) [%]Clingers 20) [%]Swimmers 21) [%]Sprawlers
摂食機能 群	22) [%]Collectors-gatherers 23) [%]Collectors-filterers 24) [%]Scrapers 25) [%]Shredders 26) [%]Predators 27) 摂食機能がshredder, grazerの個体数合計の 全個体数における割合 (RETI, [%]shredders and grazers)

る場合があることを勘案して、LN(個体数+1)により表示している。

Saprobic index (PantleとBuckの汚濁指数³⁾)は、汚濁耐性/非耐性の指数の中でも個体数に着目した指数である。汚濁指数SIは、種*i*の出現量 h_i (3:多い, 2:普通, 1:少ないの3段階)と、既往の研究によってリストとなっている種*i*の汚濁耐性値 s_i (I, II, III, IV; 数が大きくなるほど、汚濁耐性は大きい。)の積の総和を出現量の総和で除して算出される。SIが大きいほど汚濁が進んでいることになる。次式はSIの定義式である。

$$SI = \frac{\sum_i (s_i \cdot h_i)}{\sum_i h_i} \quad (3.1)$$

本研究では、出現量について、個体数100個体以上を3、

表-3 生活型分類の説明

名称	生活の特徴
Burrowers	砂泥、有機物堆積層に穴を掘り、潜り棲む。
Climbers	水生植物や有機物堆積上に棲む。茎を伝って昇降する。
Clingers	流れの速い瀬の岩等に張り付いている。長く曲がった爪や扁平な体、吸盤等を持つ。
Sprawlers	水草の葉の表面や砂底に棲む。
Swimmers	普段は石などにしがみついているが、移動時は流、静水中を泳ぐ。

表-4 摂食機能群の説明

名称	摂食の特徴
Collectors-gatherers	沈殿している餌を集めて食べる。
Collectors-filterers	流下する有機物を網などで濾しとって食べる。
Scrapers	付着藻類などをはぎ取って食べる。
Predators	捕食。
Shredders	落葉や水草をかじって食べる。

10個体以上100個体未満を2、1個体以上10個体未満を1とした。Sensitive taxa(非汚濁耐性の種数)は、種数に着目した方法である。本研究では、Saprobic indexで4つに分けた生物の汚濁耐性値のうち、Iに分類される種の数求めた。ASPT (Average Score Per Taxon) ⁴⁾は、科に着目した方法である。すでに求められた各科のBMWP (Biological Monitoring Working Party) スコア⁴⁾から、科まで同定した出現底生無脊椎動物の合計値を科数で割って求める方法である。値が大きいほど、水質はよい。

多様度指標としての H' (Shannon-Wiener指数) は、次式で計算される。

$$H' = - \sum_i (p_i \cdot \ln p_i) \quad (3.2)$$

ここに、 p_i は、ある群集に出現する種*i*の相対優占度であり、 $p_i = N_i / N$ で示される。ここに、 N_i : 種*i*の個体数、 N : 総個体数である。この指標は、群集中の稀な種の数の変化に敏感に反応する。また、構成種すべてが同一個体数の場合に H' は多様性最大となる。 J' (均衡度) は、群集を構成する種の個体数がどれくらい近い値を示す指数である。また J' は0~1の範囲で値をとり、構成種すべてが同一個体数のとき最大値1を取る。次式により計算される。

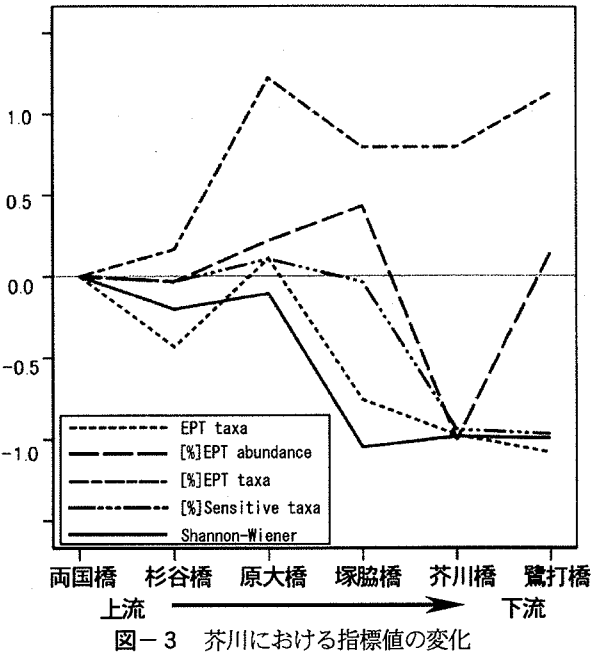
$$J' = \frac{\left(\sum_i p_i \cdot \ln p_i \right)}{\ln S} \quad (3.3)$$

ここに、 S : 種数である。1/D (Simpson数) は優占種、特に1位種の個体数の変化に敏感に反応する指標である。

Dはある群集からランダムに2匹を選んだとき、両方とも同じ種に属する確率である。これを逆数(1/D)にすることによって、値が大きくなるほど各種の個体数が近く、多様度を示す。値の上限と下限はそれぞれ種数と0である。次式により計算される。

$$\frac{1}{D} = \frac{1}{\sum_i p_i^2} \quad (3.4)$$

生活型⁹⁾は、表-3に示した各生活型の個体数割合、摂食機能群⁹⁾は表-4に示した各摂食機能群の個体数割合である。本研究では、RETIにおいてgrazerの代わりにscraperという分類を用いた。水生昆虫には適応性があり、必ずしも単一の生活型や摂食機能を有するわけでない。こうした観点から、これらを用いて河川環境を評価するのに対して批判的な意見もある。ここでは最も一般的と考えられるカテゴリーに分類した。



4. 分析結果と考察

表-5 相関分析

** : 1%有意, * : 5%有意

指標	標高 (m)	河床勾配	日流量 (m³/s)	LN 水の 透明度 (cm)	集水域面積 (km2)	人工面積比
Plecoptera taxa	0.1803	0.1394	-0.2094	0.0434	-0.1946	-0.3927 **
Trichoptera taxa	0.3589 **	0.0502	-0.1639	-0.0679	-0.1719	-0.3700 **
EPT taxa	0.3509 *	0.1073	-0.2474	-0.0172	-0.2389	-0.4500 **
Total taxa	0.3563 **	-0.0067	-0.1494	-0.1411	-0.1310	-0.4430 **
Total families	0.4010 **	0.0909	-0.2292	-0.0902	-0.2235	-0.5270 **
LN Total individuals abundance	0.1719	0.0976	-0.2312	-0.0506	-0.2088	-0.2453
LN Plecoptera abundance	0.3291 *	0.1715	-0.2026	0.0728	-0.2131	-0.4074 **
LN Trichoptera abundance	0.4318 **	0.1515	-0.2011	0.0433	-0.2402	-0.4399 **
[%]EPT abundance	0.4956 **	0.3588 **	-0.3348 *	0.3413 *	-0.3864 **	-0.6045 **
[%]EPT taxa	0.3018 *	0.2690	-0.3286 *	0.2368	-0.3603 **	-0.5278 **
Saprobic index	-0.5173 **	-0.3826 **	0.3556 **	-0.3126 *	0.4370 **	0.6290 **
[%]Sensitive taxa	0.6395 **	0.4662 **	-0.2970 *	0.3279 *	-0.3265 *	-0.5571 **
ASPT	0.3572 **	0.1604	-0.3046 *	0.0798	-0.2808 *	-0.6119 **
H' (Shannon Diversity Index)	0.2935 *	-0.1188	0.0001	-0.2630	0.0054	-0.6696 **
J' (均衡度)	0.0464	-0.0090	-0.0423	-0.0371	-0.0672	-0.2947 *
1/D (Simpson)	0.2368	-0.0299	-0.1357	-0.1400	-0.1403	-0.4808 **
[%]Burrowers	-0.3475 *	-0.1451	0.1075	-0.0553	0.2012	0.6386 **
[%]Climbers	-0.2671	0.0306	-0.1707	0.1180	-0.2281	0.4041 **
[%]Clingers	0.6644 **	0.6149 **	-0.4905 **	0.6407 **	-0.5797 **	-0.5178 **
[%]Sprawlers	-0.1874	-0.1998	0.2762	-0.2267	0.2633	0.1679
[%]Swimmers	0.0541	0.2450	-0.1725	0.3087 *	-0.2210	-0.4134 **
[%]Collectors-gatherers	-0.3407 *	-0.2338	0.0965	-0.2110	0.1808	0.3976 **
[%]Collectors-filterers	0.2521	0.2000	-0.2147	0.3336	-0.2796	-0.1012
[%]Scrapers	0.4701 *	0.6414 **	-0.1579	0.5902 **	-0.2007	-0.5589 **
[%]Shredders	-0.2177	-0.1348	0.2962	-0.1322	0.2963	0.1539
[%]Predators	-0.1658	0.0230	0.0607	0.0257	-0.0048	0.3501 *
RETI	0.3578 **	0.2653	-0.0207	0.1758	0.0012	-0.4513 **

表－6 河床構造ごとの指標値平均の差

**：1%有意，*：5%有意

指標	瀬 (I) (J)	平均値の 差 (I-J)	標準誤差	有意確率
T) [%]Burrowers	平瀬	1.2006	13.7192	1.00000
	無 早瀬	38.8321	6.7926	4.7E-05 **
	平瀬&早瀬	23.8300	8.0745	0.03239 *
	早瀬	37.6315	12.5149	0.07823
	平瀬 平瀬&早瀬	22.6294	13.2545	0.51314
	早瀬 平瀬&早瀬	-15.0021	5.7970	0.11796
T) [%]Clingers	平瀬	-17.5800	8.4690	0.31501
	無 早瀬	-43.5264	7.7922	0.08700
	平瀬&早瀬	-39.9106	7.0553	9.7E-05 **
	早瀬	-25.9464	10.7515	0.24053
	平瀬 平瀬&早瀬	-22.3306	10.2301	0.22500
	早瀬 平瀬&早瀬	3.6158	9.6772	0.99954
[%]Swimmers	平瀬	-5.9928	3.2435	0.07082
	無 早瀬	-20.4109	5.2770	0.00033 **
	平瀬&早瀬	-2.9077	2.8363	0.31043
	早瀬	-14.4181	5.6726	0.01432 *
	平瀬 平瀬&早瀬	3.0851	3.5180	0.38488
	早瀬 平瀬&早瀬	17.5032	5.4501	0.00236 **

無：平瀬と早瀬ともに無し，平瀬：平瀬のみあり，
早瀬：早瀬のみあり，平瀬&早瀬：両方あり

(1) 流下方向の指標値の変化

図－3 は淀川下流域の右支川，芥川における指標値の流下方向変化を示している。各指数の値を比較するため，最上流の調査ポイントの指標値を全指標とも0.0とし，そして散らばり度合いがすべて同じ（標準偏差±0.5）になるように，各指標の値を調整しグラフを描いた。ここに示した指標はいずれも生息環境の良好さに対して正の相関を示すような指標である。[%]EPT taxaのように，他の指標とは異なる変動特性を示すものもある。全体的に上流から下流に向かうにつれ指標値の低下がみられるが，各調査ポイントの生息環境に応じて複雑に変動する。

(2) 相関分析

表－5 は，標高，河床勾配，日流量，透明度，集水面積，流域土地利用状況から抽出した人工的な土地利用（農地，建物用地，幹線道路用地の合計）の集水面積に対する割合と，水生昆虫による生物指標との相関をとった結果である。ここに示した水生昆虫の指標の多くが「人工地面積[%]」と有意な相関を持っている。EPT関連の指標や，多様性，豊富さに関連する指標，非耐性種割合との間で負の相関がある。一方，汚濁指数との間では正の相関があり，人工面積比が生息環境を表示する重要なパラメータとなっていることがわかる。

生活型や摂食機能群については，[%]Clingers，[%]Scrapersが，[%]Sensitive taxaやEPT関連指標と類似し

表－7 河道内構造物ごとの指標値平均の差

**：1%有意，*：5%有意

指標	河道内構造物 (I) (J)	平均値の 差 (I-J)	標準誤差	有意確率
T) Total taxa	無 落差工	-5.636	5.542	0.69754
	落差工&3面張	11.200	1.753	6.4E-07 **
	落差工 落差工&3面張	16.836	5.265	0.02820 *
H' H'	無 落差工	-12.014	27.210	0.96288
	落差工&3面張	121.318	16.697	0.00035 **
	落差工 落差工&3面張	133.332	29.408	0.00145 **

無：落差工と3面張りともに無し，落差工：落差工のみあり，
落差工&3面張：両者ともにあり

表－8 植生ごとの指標値平均の差

**：平均の差は1%で有意，*：5% で有意

指数	植生 (I) (J)	平均値 の差 (I-J)	標準 誤差	有意確率
T) Total taxa	無 水際植生	0.913	2.033	0.9601
	水際植生&河畔林	-12.203	2.735	0.0002 **
	水際植生 水際植生&河畔林	-13.116	3.045	0.0003 **
H' H'	無 水際植生	15.007	26.324	0.5712
	水際植生&河畔林	-58.032	23.509	0.0171 *
	水際植生 水際植生&河畔林	-73.039	20.051	0.0007 **
T) [%]Collectors- filterers	無 水際植生	-4.005	3.224	0.5462
	水際植生&河畔林	-21.830	4.921	0.0003 **
	水際植生 水際植生&河畔林	-17.826	5.654	0.0091 **

無：水際植生，河畔林ともに無し，水際植生：水際植生のみあり，
水際植生&河畔林：両者ともにあり

た傾向を示しており，河川生息環境指標として有望であることがわかる。一方，[%]Burrowersや[%]Collectors-gatherersがこれらと逆の傾向を示すのは，ユスリカの大半がこの生活型，摂食機能群に含まれるからである。[%]Sprawlers，[%]Shredders，[%]Predatorsといった分類は，水質汚濁との関連はあまり認められない。

(3) 河床状況・植生の影響

河床状況，河道内構造物，植生の影響を調べるために，各種指標平均値の差異の有意性について検討した。等分散ではないと判定された指標については Tamhane 法を，等分散と判定された指標については多重比較の最小有意差法を用いた。前者を用いたものについては，表中に T) 印を付記している。

表－6 は，河床状況の違いによって，生活型の割合に関する指標の平均値が有意に異なるかを示したものである。[%]Burrower は，「無」（早瀬平瀬ともに無い場合）と「早瀬」（平瀬のみ存在する場合）あるいは「平瀬&早瀬」（平瀬，早瀬ともに存在する場合）の間で，

正值の有意な差が存在している。つまり、早瀬平瀬が無い方が、砂や泥底、有機物堆積層に掘潜する burrowers の存在割合を増加させるということがわかる。かぎ爪などで岩などにへばりつく clingers は平瀬、早瀬がともに存在する場合に、平均値が増加する傾向にある。また、swimmers についても clingers と同様に早瀬、平瀬の存在によって存在率が上昇する。

表-7では河道内構造物の有無によって、Total taxa, H'の平均値が異なるかについて示している。Total taxaについては、「落差工」の有無の影響は小さいのに対して、「三面張」になると10程度種数が減少していることがわかる。H'についても同様の傾向である。表-5に示したように、これらの多様度に関する指標は、水質汚濁など他の環境要素の影響を受けにくいことから、河道内構造物の影響を示す指標の有望な候補であると考えることができる。

表-8は、植生の有無による各指標に対する影響を調べたものである。水際植生は、低水路および高水敷上の植生とし、河畔林は、堤防上と河川区域外で直接落ち葉の inputs が考えられる植生とした。植生なしの場合と水際植生のみの場合と「水際植生&河畔林」との間で有意な差がみられる。しかしながら、河畔林のあるところは標高の高い、山間部であり、逆に河道内植生のみある所、植生の無い所は低地であったため、指数値は流域の土地利用の影響を大きく受けている可能性がある。したがって、有意差を植生の影響と判定するのは難しいといえる。

5. まとめ

本研究では、様々な人為的影響を量的に評価できる水生昆虫を用いた指標を見いだすために、統計解析の手法を用いて種々の水生昆虫指標と生物生息環境との関連性を調べた。

河川水質のかわりに流域土地利用状況を用いたが、各種水生昆虫指標と有意な相関関係が表れた。clingersの個体数百分率は、多種の環境要素（標高、河床勾配、日流量、透視度、集水域、人工地面積）に対して、有意で高い相関関係にある。良好な生息環境の指標として一般的に用いられるEPT関連の指数と同様の相関傾向を示し、汚濁指数とは逆の傾向を示す。生活型の指標である[%]Clingerはこれまで指標として使われた事例は見られないが、指標として有効であると考えられる。

河道内構造物の影響については、多様性と落差工の関係は認められないが、三面張河床では、多様性が著しく低下することがわかった。

参考文献

- 1) Ofenbock, T., Moog, O., Gerritsen, J., & Barbour, M. (2004) : A stressor specific multi-metric approach for running water in Austria using benthic macro-invertebrate, *Hydrobiologia*, Vol.516, pp.251-268.
- 2) 国土交通省河川局河川環境課監修, (財)リバーフロント整備センター編集 (1997) : 平成6年度河川水辺の国勢調査年鑑 魚介類調査, 底生動物調査編, 山海堂.
- 3) 森下郁子 (1985) : 生物モニタリングの考え方. 山海堂.
- 4) Armitage, P.D., Moss, D., Wright, J.F. and Furse, M.T. (1983) : The performance of a new biological water quality score system based on macroinvertebrates over a wide range of unpolluted running-water sites, *Water Research.*, Vol.17, No.3, pp.333-347.
- 5) 伊藤嘉昭, 佐藤一憲 (2002) : 種の多様性比較のための指数の問題点, *生物科学*, 第53巻第4号.
- 6) Merritt, R.W., Cummins, K.W. (1996) : *Aquatic insects of north America*, Kendall/Hunt Publish Company.
- 7) 国土地理院 (1997) : 数値地図50mメッシュ(標高) 日本-II, および数値地図2500大阪-2, 大阪-5, 京都-1, 京都-2,
- 8) 国土地理院 : 国土数値情報1/10細分区画利用データKS-202-1

(2005. 4. 7 受付)