

狩野川の水質と底生動物調査結果に基づく 水質総合指標と多様性との関係の検討

STUDY ON THE RELATIONSHIP BETWEEN PRINCIPAL COMPONENTS
OF WATER QUALITY AND BIODIVERSITY BASED ON THE RESULTS
OF WATER QUALITY AND BENTHIC COMMUNITY SURVEY OF THE KANO-RIVER

坂本康¹・鮎川一史²・平山公明³・西田継⁴・大野昌仁⁵・藤平大⁵

Yasushi SAKAMOTO, Kazufumi AYUKAWA, Kimiaki HIRAYAMA, Kei NISHIDA,
Masahito OHNO and Masaru TOUHEI

¹正会員 工博 山梨大学教授 工学部土木環境工学科 (〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11)

²学生員 工学 山梨大学大学院修士課程 (〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11)

³正会員 工博 山梨大学助教授 工学部土木環境工学科 (〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11)

⁴博(工) 山梨大学助教授 工学部土木環境工学科 (〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11)

⁵国土交通省中部地方整備局沼津工事事務所 (〒410-8567 静岡県沼津市下香貫外原 3244-2)

The relationship between principal components of water quality and biodiversity was investigated based on the water quality and benthic community survey of the Kano-river in Central Japan. The data of benthic community survey were involved in "National Censuses on River Environments" by Ministry of Land, Infrastructure and Transport. In this study, we used a reference model for estimating the relation between the number of individual biological group (i.e., species, etc.) under particular environmental condition and biodiversity indices. Our results showed that the values of biodiversity indices increased as the scores of principal components of water quality decreased when the score was bigger than a certain value, but did not change remarkably when the score was smaller than the value. This trend was similar to that of model estimation if weaker groups are supposed to be dominant under good environmental condition.

Key Words: river water quality, principal component analysis, biodiversity, benthic community survey,
National Censuses on River Environments

1. はじめに

1999年6月、「環境影響評価法」が施行され、「生態系」が新たに評価対象となったが、その評価方法は現在も検討中である¹⁾。一方、河川生態学では、「公害」の時代に「汚水生物学」の研究がなされた^{2),3),4)}が、清水域の研究^{5),6),7)}では、環境影響評価に役立つ知見は十分ではない。このような現状で、土木環境工学の分野でも、研究の必要性がいわれている⁸⁾。本研究では、そのような背景で、国土交通省の「河川水辺の国勢調査」(以下、国調と記す)データの活用を目指す共同研究の一環として、自然度の高い狩野川の水質と生物多様性との関係を検討した。

本論文では、まず研究方法と、環境条件と多様性との関連付けるために想定したモデルについて述べる。次に、

対象河川である狩野川の水質、底生動物相の特徴を主成分分析結果などにより述べ、さらに水質総合指標と多様性との関係を検討する。

2. 方法

(1) 狩野川と調査地点の概要

狩野川は伊豆半島の中央、天城山系万三郎岳に水源を発し、柿田川、黄瀬川などの支川を合わせ、駿河湾に注ぐ河川延長46km、流域面積852km²の河川である⁹⁾。支川のうち、柿田川は湧水源から約1.2kmの清澄な河川で、黄瀬川は流域からの人為的汚染のある河川である。流域の概要を図-1に示す。

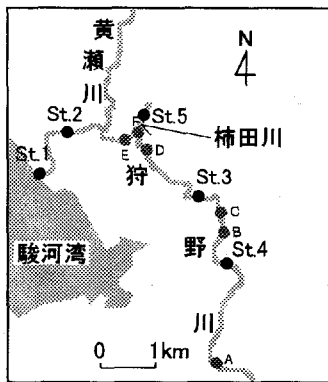


図-1 調査対象流域概要図

(2) 底生動物データ

本研究では、国調の平成8年度底生動物調査結果⁹⁾を用いた。調査地域には狩野川の上流部 9.2km は含まれていない。底生動物は、生態系の中でも鍵となるもので、底泥毒性評価¹⁰⁾、湖の生物環境評価¹¹⁾、河川食物網の健全性評価¹²⁾など種々の指標¹³⁾として使われ、その多様性については種々の要因が関係する¹⁴⁾。調査地点は、港大橋 (St.1)、黒瀬橋 (St.2)、日守橋 (St.3)、狩野川大橋 (St.4)、柿田橋 (St.5) で、調査時期は、初夏 (1996 年 6 月 9-11 日)、冬季 (1996 年 12 月 16-18 日)、早春 (1997 年 3 月 10-12 日) である。本研究では、主に汽水域の港大橋を除く 4 地点 (St.2-5) での瀬を対象とした定量採集 (サーベネット 25cm×25cm で 8 回) の結果を用いた。

(3) 水質データ

水質データは、2000 年 10 月 13 日、11 月 30 日、12 月 20 日の分析データの平均値を用いた。採水地点は、図-1 の A-F と底生動物調査地点の計 11 地点とした。測定項目は、水温、気温、pH、ORP、EC、DO、主要陽イオン濃度 (NH_4^+ 、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+})、主要陰イオン濃度 (SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NO_2^- 、 Cl^-)、ケイ酸、TOC である。主要陽・陰イオンはイオンクロマトグラフ法、ケイ酸はモリブデン黄法、他はそれぞれの測定器で分析した。また、TOC 測定時に得られる IC の値と水素イオン濃度から、 HCO_3^- 濃度を推算した。

(4) データ解析方法

本研究では、水質、底生動物相の総合的特性を調べるために主成分分析を行い、固有値 1 以上の主成分を検討対象とした。汚染の指標を得るのが目的ではないため、汚染に直接関係する TOC などではなく一般的な水質である主要陽イオン・陰イオンの濃度のみを用いた。

(5) 生物の多様性の指標

多様性の指標¹⁵⁾のうち、文献^{3), 4)}による各指標の特徴、比較結果より多様性指数として以下の DI1, DI2 を用いた。

$$\text{DI1} = - \sum N_i/N_t \log(N_i/N_t) \quad \text{〈Shannon〉} \quad (1)$$

$$\text{DI2} = 1 - \sum \{ N_i (N_i - 1) \} / \{ N_t (N_t - 1) \} \quad \text{〈Simpson+ Pielou〉} \quad (2)$$

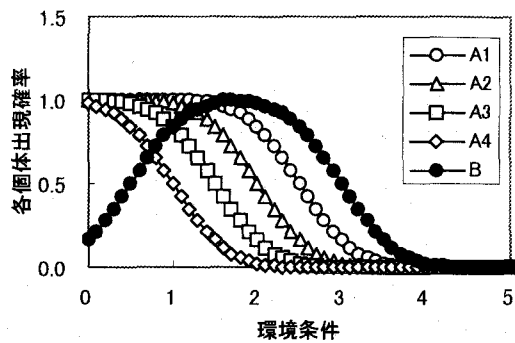


図-2 環境条件と各個体出現確率のモデル概念図

ここに、 N_i : 標本中の種 i の個体数、 N_t : 標本中の全個体数であり、 Σ は観測された種に対する総和を示す。また、種数¹⁶⁾、RFD (rank-frequency diagram)¹⁷⁾についても検討した。RFD とは種を個体数の多い順に並べ、順位と個体数の関係を対数紙上に図化したものである。

(6) モデルによる多様性の期待値の算出

a) 標本個体数の期待値のモデル

本研究では、観測結果に対するレファレンスとして、モデルでの環境条件と多様性との関係も求めた。このモデルでは、以下の標本個体数の期待値を基本とした。

$$N_i(x) = N_{0i} \cdot p_{0i}(x) \quad (3)$$

$$p_{0i}(x) = 1 - F_i(x) \quad (4)$$

ここに、 $N_i(x)$: 環境条件 x である観測で得られる生物グループ i の標本個体数の期待値、 N_{0i} : 環境が最適なときに標本採取の対象空間に存在しうる生物グループ i の最大個体数、 $p_{0i}(x)$: 環境条件 x で生物グループ i の各個体が標本中に存在する確率、 $F_i(x)$: 正規分布の確率分布関数である。4 グループ (A1-A4) を仮定して $p_{0i}(x)$ の概略図を図-2 に示す。図の横軸の環境条件は、値が大きいくほど不適な環境を表わす。汚水生物学では図中の B の形を想定しており、生物グループ間の競争を表現できるが、環境がよいほど多様性が増すことは保証されない。一方、図の A-1~A-4 の共存では生物グループ間の競争は表現できないが環境がよいほど多様性が増すことが期待できる。

b) 多様性の指標の算出

a) で設定した各生物グループの個体数の期待値から、式(1)、(2) の多様性指数を求め、また RFD を作成した。一方、出現するグループの数の期待値を以下で求めた。

(i) 各生物グループに対して標本中に 1 個体でも存在する確率 $p_{si}(x)$ を以下のように設定する。

a) で計算した個体数の期待値が 1 以上のとき :

$$p_{si}(x) = 1 \quad (5)$$

a) で計算した個体数の期待値が 1 未満のとき :

$$p_{si}(x) = (a) \text{ で計算した個体数の期待値} \quad (6)$$

(ii) 生物グループ数を m とし、各生物グループがいるかないかで起こりうるすべての場合 ($2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^m$ 通り) の生起確率をそれぞれ計算する。そして、出現グループの数毎にその確率を加算し、以下により標本中に

表-1 水質主成分負荷量

	第一主成分	第二主成分
Na ⁺	0.99	-0.01
K ⁺	0.96	-0.17
NH ₄ ⁺	0.22	0.93
Mg ²⁺	0.94	-0.26
Ca ²⁺	0.83	-0.29
HCO ₃ ⁻	0.86	-0.18
Cl ⁻	0.81	0.49
NO ₃ ⁻	0.97	0.15
SO ₄ ²⁻	0.92	0.08
固有値	6.71	1.34
寄与率(%)	74.61	14.86
累積寄与率(%)	74.61	89.47

表-2 底生動物すみわけの検討

	好む環境	St.2	St.3	St.4	St.5
水温(°C)		14.2	13.1	13.0	15.3
流速(m/sec)		0.3-0.4	0.6-0.8	0.6-0.8	1.0
ウエノヒラタカゲロウ	流速大	0 ×	0 ×	138 ○	0 ×
ユミモンヒラタカゲロウ	流速中	0 ×	0 ×	0 ○	0 ×
エルモンヒラタカゲロウ	流速小	34 ○	364 ○	802 ×	0 ×
フタスジモンカゲロウ	上流	0 ×	0 ×	0 ○	0 ×
モンカゲロウ	下流	0 ×	0 ○	0 ○	0 ×
ウルマーシマトビケラ	上流	0 ×	74 ○	2118 ○	2 ×
ナカハラシマトビケラ	下流	2 ○	0 ×	0 ×	0 ×
サトウカクツツトビケラ	上流	0 ×	0 ×	0 ×	4 ○
ヌカビラカクツツトビケラ	下流	0 ○	0 ×	0 ×	4 ○

定量採取：早瀬でサーパネット(25cm×25cm)8回による。個体/m²の数値で示す。

定性採取：川底が石礫、ヨシ帯、水際などで、いる(○)、いない(×)で示す。

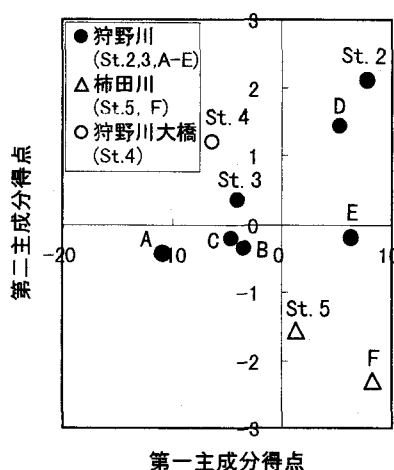


図-3 水質主成分の得点分布

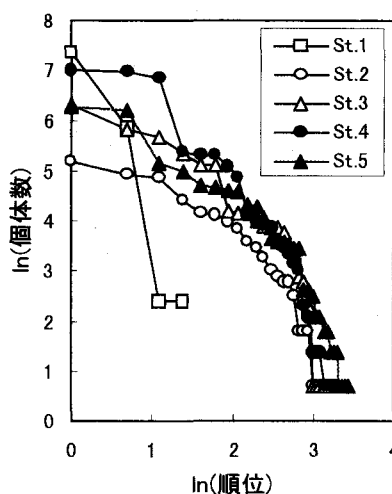


図-4 FRD(1996年6月)

表-3 目別個体数主成分負荷量

	第一主成分	第二主成分	第三主成分
半翅目	0.83	0.20	0.52
蜉蝣目	-0.98	0.03	0.17
蜻蛉目	-0.62	-0.66	0.42
セキ翅目	-0.88	-0.05	0.47
広翅目	-0.88	-0.05	0.47
鞘翅目	-0.53	0.52	-0.67
双翅目	-0.36	0.88	-0.30
毛翅目	0.11	0.73	0.67
鱗翅目	0.62	0.58	0.52
その他	0.78	-0.62	-0.05
固有値	5.03	2.79	2.18
寄与率(%)	50.27	27.91	21.82
累積寄与率(%)	50.27	78.18	100.00

出現する生物グループの数の期待値 $M_{(j)}$ を計算する。

$$M_{(j)} = \sum j \times (\text{出現グループの数が } j \text{ である確率}) \quad (7)$$

ここに、 $\sum$ は $j=1, 2, \dots, m$ の和である。

c) パラメータの設定

実データの「目」の数が十数目で、かつ 100 個体/m² 以上の種数が十数種であったので $m=10$ とした。 N_{0i} には、以下の個体数順位 k と個体数の関係¹⁷⁾を仮定した。

$$\ln(\text{順位 } k \text{ の個体数}) = -a \ln(k) + b \quad (8)$$

$$N_{0k} = N_{\max} / k^{na} \quad (9)$$

ここに、 a, b : 定数、 $N_{\max}$: 耐性が最大 (あるいは最小) の生物グループの N_0 (100 に設定)、 N_{0k} : 耐性が大きい方 (あるいは小さい方) から k 番目の生物グループの N_0 、 na : 定数 (1 か 2 に設定) である。

3. 各調査地点の水質および底生動物相の特徴

(1) 水質の特徴

TOC は 1.9-3.2mg/l で全体的には有機物汚染の少ない良好な水質といえた。また、柿田川とその影響を受ける地点ではケイ酸濃度が高くなっていた。主要イオン濃度

による主成分分析結果を表-1、主成分得点分布を図-3に示す。第一主成分は総イオン量に対応し、下流ほど得点が大きく、柿田川は本川よりも大きくなっている。第二主成分は主に NH_4^+ の指標で、狩野川大橋以外は下流ほど得点が大きく、柿田川は狩野川本川より小さい。

(2) 底生動物相の特徴

環境によるすみわけ例が報告⁶⁾されている種について、その好む環境と狩野川での出現のようすを表-2に示す。表によると、ウルマーシマトビケラが上流で多い傾向はあるが、流速や水温の影響は見られない。このことから、物理的要因より化学的要因の影響の方が大きいと考えられる。その原因として、国調の範囲が約 37km と短いこと、柿田川の影響があることが考えられる。

6月のFRDを図-4に示す。図より、式(8)の適用は困難といえる。その原因として、個体数上位の種では個体数の上限 N_0 の影響が出ていると見ることもできる。

底生動物の目別個体数の主成分分析結果を表-3に示す。第一主成分は蜉蝣目 (カゲロウ)、セキ翅目 (カワゲラ)、広翅目 (アミメカゲロウ) などが少ないと得点が多くなる指標で、第二主成分は双翅目 (ハエ)、毛翅目 (トビケ

表-4 水質・底生動物個体数の主成分得点と多様性の相関係数行列

	総個体数	総種数	10個体/m ² 以上の種数	DI-1	DI-2	DI-1(10個体/m ² 以上)	DI-2(10個体/m ² 以上)	水質第一主成分得点	水質第二主成分得点	目別個体数第一主成分得点	目別個体数第二主成分得点	目別個体数第三主成分得点
総個体数	1.00											
総種数	0.69	1.00										
10個体/m ² 以上の種数	0.62	0.63	1.00									
DI-1	0.30	0.50	0.93	1.00								
DI-2	0.53	0.55	0.99	0.96	1.00							
DI-1(10個体/m ² 以上)	0.35	0.50	0.95	1.00	0.97	1.00						
DI-2(10個体/m ² 以上)	0.54	0.55	0.99	0.95	1.00	0.97	1.00					
水質第一主成分得点	-0.82	-0.49	-0.89	-0.69	-0.87	-0.74	-0.87	1.00				
水質第二主成分得点	-0.05	-0.67	-0.63	-0.79	-0.63	-0.74	-0.62	0.22	1.00			
目別個体数第一主成分得点	-0.83	-0.18	-0.42	-0.09	-0.38	-0.16	-0.39	0.79	-0.40	1.00		
目別個体数第二主成分得点	0.31	0.64	0.91	0.98	0.92	0.97	0.91	-0.62	-0.89	0.00	1.00	
目別個体数第三主成分得点	0.46	0.75	-0.03	-0.18	-0.14	-0.20	-0.14	0.06	-0.24	0.00	0.00	1.00

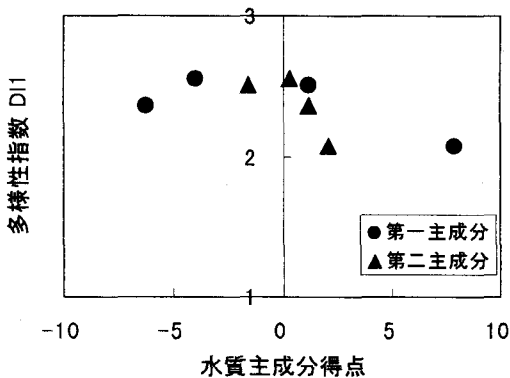


図-5 水質主成分得点と多様性指数

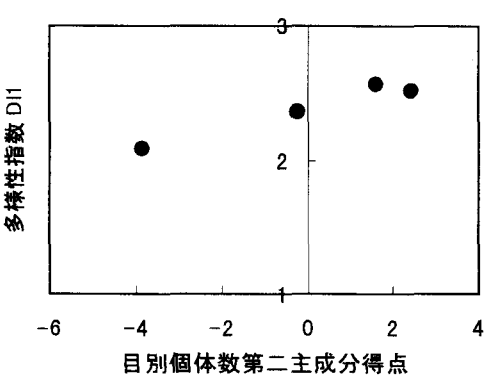


図-6 目別個体数主成分得点と多様性

ラ)が多いと得点が多くなる指標であった。本川については上流ほど蜉蝣目、セキ翅目、広翅目が多く、柿田川については双翅目、毛翅目が多いという特徴があった。

4. 実測データの多様性と水質との関係

多様性の指標と主成分得点の間の相関係数行列を表-4に示す。総個体数、総種数と他の多様性の指標との相関係数は小さいが、他の指標間の相関係数は0.95以上でどの指標でも同じような傾向を示す。

水質主成分得点とDI1との関係を図-5示す。点数が少ないため明確ではないが、主成分得点、つまり総イオン量やNH₄⁺量の指標が小さいと多様性は大きくなる。しかし、ある程度以下になると、多様性指数は水質によらない。

目別個体数主成分では、第二主成分得点と多様性の指標との関係が特に強く、双翅目、毛翅目が多いほど多様性が高くなっている。この関係を図-6に示す。

以上のように、水質主成分得点を用いることで、上・下流の差の影響や狩野川の合流の影響も含んだ形で、水質と多様性との関係を見出せた。

5. モデルによる多様性と実測の多様性の比較

本研究では、実データが4地点に限られ、得られた環境条件と多様性の関係、図-5も明瞭ではない。そこで、モデルによる環境条件と多様性との関係(図-7、図-8)を実際と比較した。図では不良な環境に耐える力はN1>N2>...>N10であり、環境が最適なときの最大個体数(N₀)が図-7ではN1<N2<...<N10、図-8ではN1>N2>...>N10とした。そして、そのときの環境条件と個体数、多様性指数、生物グループ数との関係、及び5通りの環境条件(x=0, 1, 2, 3, 4)でのRFDを示している。

図-7と図-8を比較すると、図-7の方が多様性指数、種数が上限に達する範囲が広い。また、環境条件が良すぎるとDI1が小さくなる関係も見られ、式(9)のna(RFDの傾き)が大きいほどこの傾向は強い。実測データの図-5は、どちらかという図-7に似ている。これは、不良な環境に耐える力の大きいグループは環境が最適なときの最大個体数が小さいことを示唆していると考えられる。2種の多様性指数では、DI2の変化が小さいが、これはDI2には1という上限があるためである。このことから、清水域での多様性の比較にはDI2は適さないと考えられる。

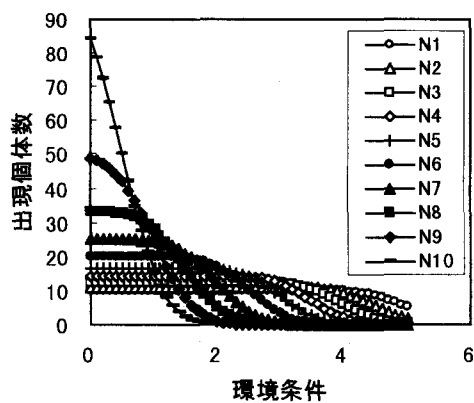


図-7a 環境条件と出現個体数

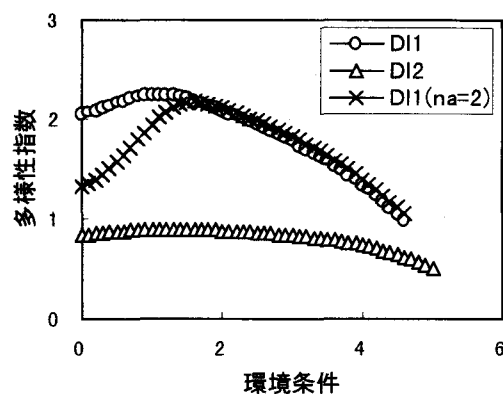


図-7b 環境条件と多様性指数

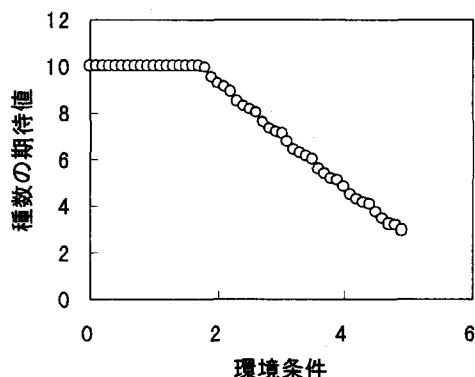


図-7c 環境条件と種数の期待値

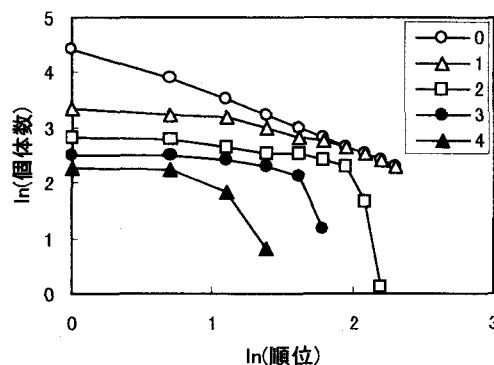


図-7d 各環境条件でのFRD

実測データのFRD (図-4) は、図-8d よりも図-7d に似ている。これは、環境条件が悪化すると数的に上位のものが減る傾向が強いことを意味する。多様性の高い柿田川と狩野川大橋で数的に上位の種は前者ではミズムシ、カワニナ、後者ではコガタシマトビケラ、ウルマーシマトビケラである。図-7の考え方が正しいとすると、これらにとっても現状は最適な環境ではないと考えられる。

6. 結論

本研究では、比較的自然度が高い狩野川の「河川水辺の国勢調査」結果をもとに、水質、底生動物相、多様性の関係を検討した。本論文の結論は以下である。

1. 狩野川の水質の主成分分析では、第一主成分は総イオン量に対応し、第二主成分は主に NH_4^+ の指標となっていた。これらの主成分得点は下流ほど高い傾向があった。
2. 底生動物相では物理的環境によるすみわけは明瞭ではなかった。目別個体数の主成分分析では、第一主成分は蜉蝣目 (カゲロウ)、セキ翅目 (カワゲラ)、広翅目 (アミメカゲロウ)、第二主成分は双翅目 (ハエ)、毛翅目 (トビケラ) の指標となっていた。これらの主成分得点によると、本川では上流ほど蜉蝣目、セキ翅目、広翅目が多く、柿田川では双翅目、毛翅目が多い特徴があった。
3. データ地点数が少ないため明確ではないが、多様性の指標と水質主成分との関係では、水質第一・第二主成分

得点、つまり総イオン量や NH_4^+ 量の指標が小さいと多様性は大きくなる。しかし、水質がある程度以上良好なら多様性指数はそれほど水質に影響されなくなる。

4. 多様性の指標と目別個体数主成分との関係では、第二主成分と多様性の指標との関係が特に強く、双翅目、毛翅目が多いほど多様性が高くなっている。

5. 環境条件と個体数を関連付けるモデルにより多様性の指標を計算した。その結果、「不良な環境に耐えうる力の大きいグループは環境が最適ときの最大個体数が小さい」と仮定したモデルで実際に類似した傾向が見られた。

参考文献

- 1) 環境省総合環境政策局環境影響評価課：環境影響評価情報支援ネットワーク、平成13年12月時点のURL—
<http://www.eic.or.jp/eanet/assessment/>
- 2) 津田松苗：汚水生物学、北隆館、1964。
- 3) 岡田光正、須藤隆一：生物種の多様性指数による水質汚濁の評価、用水と廃水、Vol. 18, No. 6, pp. 712-724, 1976。
- 4) 森谷清樹：多様性指数による水域環境の生態学的評価、用水と廃水、Vol. 18, No. 6, pp. 729-749, 1976。
- 5) 可児藤吉：溪流棲昆虫の生態、可児藤吉全集、思索社、pp. 3-91, 1970。
- 6) 柴田篤弘、谷田一三：日本の水生昆虫、東海大学出版会、1989。
- 7) 竹門康弘、谷田一三、玉置昭夫、向井宏、川端善一郎：棲み場所の生態学、平凡社、1995。
- 8) 辻本哲郎：河川の生態系保全機能の評価にかかわる水工学、

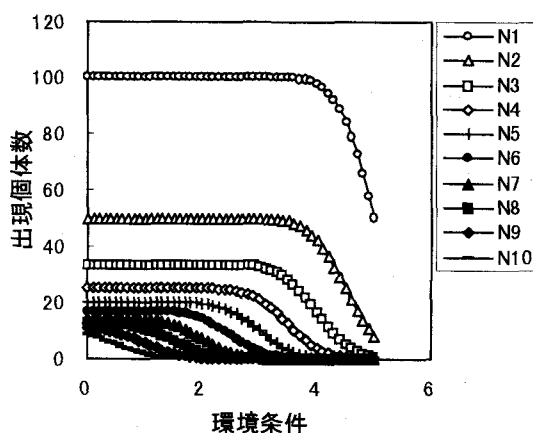


図-8a 環境条件と出現個体数

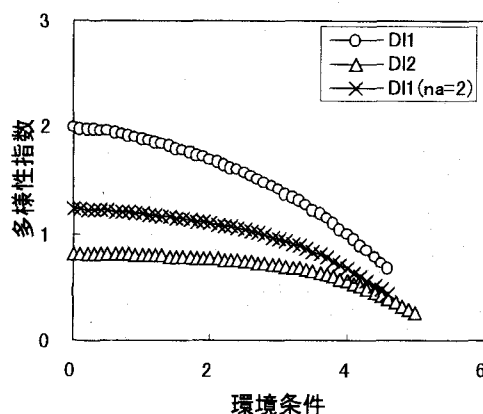


図-8b 環境条件と多様性指数

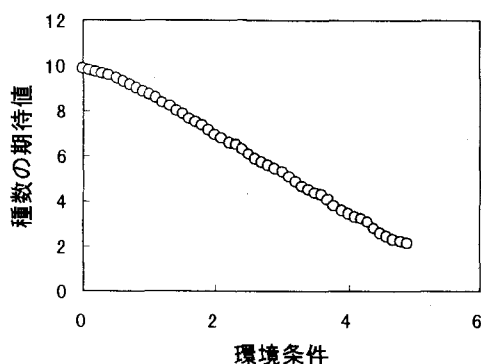


図-8c 環境条件と種数の期待値

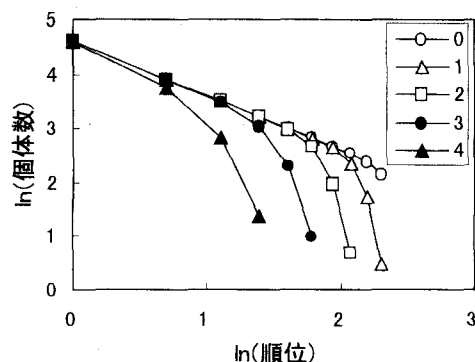


図-8d 各環境条件でのFRD

2000年度(第36回)水工学に関する夏期研修会講義集-Aコース, pp.A-6-1-A-6-20, 2000.

9) 建設省中部地方建設局沼津工事事務所:平成8年度狩野川水系底生動物調査報告書, 1997.

10) Bombardier, M. and Blaise, C.: Comparative study of the sediment-toxicity index, benthic community metrics and contaminant concentrations, Water Quality Research Journal of Canada, Vol. 35, No. 4, pp. 753-780, 2000.

11) PinelAlloul, B., Methot, G., Lapierre, L. and Willsie, A.: Macroinvertebrate community as a biological indicator of ecological and toxicological factors in Lake Saint-Francois (Quebec), ENVIR POLLU, Vol. 91, No. 1, pp. 65-87, 1996.

12) Pavluk, T., deVaate, A. and Leslie, H.: Development of an Index of Trophic Completeness for benthic macroinvertebrate communities in flowing waters, HYDROBIOL, Vol. 427, No. 1-3, pp. 135-141, 2000.

13) Reynoldson, T., Norris, R., Resh, V., Day, K. and Rosenberg, D.: The reference condition: a comparison of multimetric and multivariate approaches to assess water-quality impairment using benthic macro-

invertebrates, JOURNAL OF THE NORTH AMERICAN BENTHOLOGICAL SOCIETY, Vol. 16, No. 4, pp. 833-852, 1997.

14) Vinson, MR, Hawkins, CP: Biodiversity of stream insects: variation at local, basin, and regional scales, ANNUAL REVIEW OF ENTOMOLOGY, Vol. 43, pp. 271-293, 1998.

15) Steele, C. and Skinner, C.: Mathematical methods for comparing structures of ecological communities: a survey for ecotoxicologists, ASTM Special Technical Publication, Vol. 1333, pp. 398-411, 1998.

16) Nakano, A., and Tanida, K.: Species richness of Trichoptera in mountain stream in Japan: some practical and statistical tests to reveal the diversity in mother community, Proc. 9th International Symposium on Trichoptera, pp. 27-283, 1998.

17) Mouillot, D. and Lepretre, A.: Introduction of relative abundance distribution (RAD) indices, estimated from the rank-frequency diagrams (RFD), to assess changes in community diversity, Environmental Monitoring and Assessment, Vol. 63, No. 2, pp. 279-295, 2000.

(2001. 10. 1受付)