

生物指標を用いた水環境の指標化に関する研究

研究第三部 主任研究員 木 下 猛
研究第三部 次 長 関 克 己

1. はじめに

河川の環境に国民的な関心が寄せられる中、安全でうるおいのある河川を目指した広範な取り組みが進められている。河川を多様な生物の生育・生息の場として捉え、多様な生息空間の保全と創出を目指した多自然型川づくり、河川の持つ自浄機能にかなった水質の改善等が進められるとともに、市民のグループによる河川環境の調査等への参画も広がってきている。

このような状況において、多様な河川の水環境を総合的に表現するのみならず、専門的分野を越えてあるいは水環境に係わる様々なグループ相互において共通認識の基本ともなる指標として生物指標は重要な役割を担っている。

本報では、水環境に係わる生物指標に関するこれまでの研究や知見とその経緯を整理するとともに、河川管理の観点から求められる役割と今後への課題と展望をまとめ概説する。

2. 生物指標による評価手法の概要

生物指標による評価手法について、盛下は「生物指標の概念と種類、1985.5. 公害と対策」で、その有効性について

- (1) 生物の存在そのものが環境の総合的結果であること。
- (2) その時点の生物の存在は、過去の水環境要素

の変化の集積結果であること。

- (3) 生物体あるいは細胞・諸器官等の物質に対する反応を把握することによって影響を予測したり評価できること。

などがあり、化学的、物理的分析等の持つ一過性的な特性をも補い得るものであるとしている。

本稿では、この報文を基に、これまでの調査、研究を加え、経緯等も踏まえて整理し、生物指標の現状と総合的水環境指標化について取りまとめる。

2.1 生物指標の分類

水環境に係る「生物指標」は、表-1に示すように「生態学的指標 (ecological method)」と「生理・生化学・細胞生物学・的指標 (physiological, biochemical, and cell biological method)」とに分類される。

後者は、従来から生物検定 (bioassay) と称されるものであるが、特定生物種の成長、増殖、あるいは細胞内小器官、細胞、組織、個体等の生物反応等を規準とするものであることから、本報においては出現する生物群集の種組成の変化、指標種の出現頻度、現存量、優先度、個体数、種類数の変化量などを評価規準とする生態学的指標を対象とする。

表-1 生物指標 (Biological indicator) の分類と評価規準

A. 生態学的指標 (本報の主対象)	B. 生理・生化学・細胞生物学・的指標
(1)生物種の特性、種数、個体数を利用するもの	(1)個々の生物あるいは混合集団の酸素消費量
(2)優占的に出現する生物の特性を利用するもの	(2)個々の生物体の細胞・組織の反応
(3)群集構成状態度、(多様性)を利用するもの	(3)特定な生物の増殖状態
(4)一つの系中における物質代謝栄養性、酸素要求等を基準として利用するもの	(4)特定な生物物質・生活物質の変化
	(5)個体・細胞、細胞内小器官の生物応答結果及び変異原性

2.2 生態学的生物指標

生態学的生物指標の史的経緯を図-1に示すが、現在用いられているものは、Kolwitz and Marsson^{1), 2), 3)}らが提唱し、Liebmann⁶⁾によって確立された「污水生物体系(Saprobien system)」に基づくものが多い。

(1) 伝統派的法(指標種法(表-1のA(1)):

伝統派的法は、Kolwitz-Marsson-Liebmannの基本的体系に準じるもので、汚濁の程度によって水域を4つの階級にわけ、それぞれに「指標種」を分類して、どのような指標生物(細菌から魚類にいたるさまざまな動植物中の生物群)がどの程度(量と頻度)出現するかで、その水域の階級を決定するものである。

(2) 数字表現的手法(表-1のA(1)):

「伝統派的法」と「数字表現派」は、これらの基本的に同じであるが、特に「結果」を数値化して表すものを「数字表現派」と称して区別されることが多い。これに属するものに、Knöpp法¹⁴⁾、Pantle and Buck法(Pollution index法)⁹⁾、Beck and Tsuda法(Biotic index法)¹²⁾、Zelinka and Marvan法(Saprobic index法)¹¹⁾などがある

(3) 分割拡張的手法(表-1のA(1)):

「分割拡張派」に属するものは多くあるが、Sládeček, V²²⁾が最も代表的であり、「伝統派」の基本的階級をさらに細分割し、また本来の有機物汚濁中心の腐水性概念に「毒性」「物理的影響による変性」「放射能活性」など微生物分解と関係のない性質までを対象とする指標体系である。したがって、指標生物の各階級所属には一部伝統的指標との間に違いがある。

以上の(1)~(3)は、生態学的生物指標のなかでは普遍的で多く使用されている。

(4) 優占種使用法(表-1のA(2)):

前述の諸法の中にも優占的に出現する生物を重要視する考え方があるが、本項のものは群集を構成する属種のうちで優占的に出現する属種に重点を置き、事実上、群集-優占種の関係を

中心に指標させようとするものである。代表的事例としてはFjordingstad^{16), 17)}がある。この方法の特徴は「細菌」「動物性鞭毛虫類」「藻類」を中心に群集-優占種を設定していることであろう。

この方法は「優占種」のみに重点を置くため、実際の運用は容易であるが、わが国に適用するには、優先種と各水質項目の関係や優先種の選定手法などについて十分な調査、検討が必要である。

(5) 物質代謝論法(表-1のA(4)):

Casperus and Karbe²⁰⁾を中心とする考え方で、生物群集と物質代謝との関係(一次生産と全呼吸の量的関係、酸素収支、栄養性)から所属階級を決定しようとするもので、水域中での有機物の分解と生産の状態をあらわす諸事項を総括して評価しようとするもので従来からの伝統派的体系から大きく異なる。

(6) 多様性指数法(表-1のA(3)):

この方法は、「汚濁された水域では一般に出現する種類数が少なくなり、少数の種が残存し、特定の種の個体数が多くなる」すなわち「生物群集としての多様性が減少する」という考え方に立脚するものである。多様性指数式にはShannon-Weaver⁵⁾の情報理論式、Cairns and Dickson²⁴⁾のSequential comparison indexなどが比較的多用されているが、適用においては今後検討を残す点もある。

(7) 群集種組成法(表-1のA(1)):

群集変動論に立脚して群集変化を数式化し、有機濁度状態と種の関係に主点を置くものである。これには、生物指標によって指標しようとする環境状況を理化学的に測定できる水質構成要素-例えばBOD-に限定するものとした渡辺^{31), 32)}などの研究がある。渡辺らは、付着性珪藻類の種の相対頻度とそれらの項目の関係を定式化し、DAI_{PO}値(有機汚濁指数: Diatom Assemblage Index to organic water pollution)を用いて指数化しており、結果として有意な相関($r=0.76\sim0.89$)があると報

```

graph TD
    A[kolenati(1848)] --> B[cohn(1853)]
    B --> C[wez(1898)]
    C --> D[kolkwitz and marsson(1909)]
    D --> E[thomass(1944)]
    D --> F[thunmark(1945)]
    D --> G[cyrus and cyrus(1947)]
    D --> H[shannon-weaver(1949)]
    D --> I[sramak-husek(1950)]
    D --> J[sladecek(1963)]
    D --> K[cairns and dickson(1971)]
    D --> L[sequential comparison index]
    D --> M[liebmann(1951)]
    D --> N[knopp(1955)]
    D --> O[pantle and buck(1955)]
    D --> P[zelinka and mervan(1961)]
    D --> Q[beck and tsuda(1961)]
    D --> R[casperus and krabe(1966)]
    D --> S[trent biotic index]
    D --> T[fjordingstad(1964)]
    D --> U[indices biotique]
    D --> V[chandler's score]
    D --> W[biological monitoring working parking score]
    D --> X[modified BMWP score]
    D --> Y[belgian biotic index]
    D --> Z[indice biotique de qualite general]
    D --> AA[hilsenhoff's biotec index]
    D --> AB[extended biotic index]
    D --> AC[hilsenhoff's impruved biotec index]
    D --> AD[indice biologique global]
    L --- L1[分割拡張法]
    L --- L2[多様性指数派]
    S --- S1[England, 1964]
    S --- S2[trent biotic index]
    S --- S3[England, 1964]
    S --- S4[England, 1964]
    S --- S5[England, 1964]
    S --- S6[England, 1964]
    S --- S7[England, 1964]
    S --- S8[England, 1964]
    S --- S9[England, 1964]
    S --- S10[England, 1964]
    S --- S11[England, 1964]
    S --- S12[England, 1964]
    S --- S13[England, 1964]
    S --- S14[England, 1964]
    S --- S15[England, 1964]
    S --- S16[England, 1964]
    S --- S17[England, 1964]
    S --- S18[England, 1964]
    S --- S19[England, 1964]
    S --- S20[England, 1964]
    S --- S21[England, 1964]
    S --- S22[England, 1964]
    S --- S23[England, 1964]
    S --- S24[England, 1964]
    S --- S25[England, 1964]
    S --- S26[England, 1964]
    S --- S27[England, 1964]
    S --- S28[England, 1964]
    S --- S29[England, 1964]
    S --- S30[England, 1964]
    S --- S31[England, 1964]
    S --- S32[England, 1964]
    S --- S33[England, 1964]
    S --- S34[England, 1964]
    S --- S35[England, 1964]
    S --- S36[England, 1964]
    S --- S37[England, 1964]
    S --- S38[England, 1964]
    S --- S39[England, 1964]
    S --- S40[England, 1964]
    S --- S41[England, 1964]
    S --- S42[England, 1964]
    S --- S43[England, 1964]
    S --- S44[England, 1964]
    S --- S45[England, 1964]
    S --- S46[England, 1964]
    S --- S47[England, 1964]
    S --- S48[England, 1964]
    S --- S49[England, 1964]
    S --- S50[England, 1964]
    S --- S51[England, 1964]
    S --- S52[England, 1964]
    S --- S53[England, 1964]
    S --- S54[England, 1964]
    S --- S55[England, 1964]
    S --- S56[England, 1964]
    S --- S57[England, 1964]
    S --- S58[England, 1964]
    S --- S59[England, 1964]
    S --- S60[England, 1964]
    S --- S61[England, 1964]
    S --- S62[England, 1964]
    S --- S63[England, 1964]
    S --- S64[England, 1964]
    S --- S65[England, 1964]
    S --- S66[England, 1964]
    S --- S67[England, 1964]
    S --- S68[England, 1964]
    S --- S69[England, 1964]
    S --- S70[England, 1964]
    S --- S71[England, 1964]
    S --- S72[England, 1964]
    S --- S73[England, 1964]
    S --- S74[England, 1964]
    S --- S75[England, 1964]
    S --- S76[England, 1964]
    S --- S77[England, 1964]
    S --- S78[England, 1964]
    S --- S79[England, 1964]
    S --- S80[England, 1964]
    S --- S81[England, 1964]
    S --- S82[England, 1964]
    S --- S83[England, 1964]
    S --- S84[England, 1964]
    S --- S85[England, 1964]
    S --- S86[England, 1964]
    S --- S87[England, 1964]
    S --- S88[England, 1964]
    S --- S89[England, 1964]
    S --- S90[England, 1964]
    S --- S91[England, 1964]
    S --- S92[England, 1964]
    S --- S93[England, 1964]
    S --- S94[England, 1964]
    S --- S95[England, 1964]
    S --- S96[England, 1964]
    S --- S97[England, 1964]
    S --- S98[England, 1964]
    S --- S99[England, 1964]
    S --- S100[England, 1964]
    S --- S101[England, 1964]
    S --- S102[England, 1964]
    S --- S103[England, 1964]
    S --- S104[England, 1964]
    S --- S105[England, 1964]
    S --- S106[England, 1964]
    S --- S107[England, 1964]
    S --- S108[England, 1964]
    S --- S109[England, 1964]
    S --- S110[England, 1964]
    S --- S111[England, 1964]
    S --- S112[England, 1964]
    S --- S113[England, 1964]
    S --- S114[England, 1964]
    S --- S115[England, 1964]
    S --- S116[England, 1964]
    S --- S117[England, 1964]
    S --- S118[England, 1964]
    S --- S119[England, 1964]
    S --- S120[England, 1964]
    S --- S121[England, 1964]
    S --- S122[England, 1964]
    S --- S123[England, 1964]
    S --- S124[England, 1964]
    S --- S125[England, 1964]
    S --- S126[England, 1964]
    S --- S127[England, 1964]
    S --- S128[England, 1964]
    S --- S129[England, 1964]
    S --- S130[England, 1964]
    S --- S131[England, 1964]
    S --- S132[England, 1964]
    S --- S133[England, 1964]
    S --- S134[England, 1964]
    S --- S135[England, 1964]
    S --- S136[England, 1964]
    S --- S137[England, 1964]
    S --- S138[England, 1964]
    S --- S139[England, 1964]
    S --- S140[England, 1964]
    S --- S141[England, 1964]
    S --- S142[England, 1964]
    S --- S143[England, 1964]
    S --- S144[England, 1964]
    S --- S145[England, 1964]
    S --- S146[England, 1964]
    S --- S147[England, 1964]
    S --- S148[England, 1964]
    S --- S149[England, 1964]
    S --- S150[England, 1964]
    S --- S151[England, 1964]
    S --- S152[England, 1964]
    S --- S153[England, 1964]
    S --- S154[England, 1964]
    S --- S155[England, 1964]
    S --- S156[England, 1964]
    S --- S157[England, 1964]
    S --- S158[England, 1964]
    S --- S159[England, 1964]
    S --- S160[England, 1964]
    S --- S161[England, 1964]
    S --- S162[England, 1964]
    S --- S163[England, 1964]
    S --- S164[England, 1964]
    S --- S165[England, 1964]
    S --- S166[England, 1964]
    S --- S167[England, 1964]
    S --- S168[England, 1964]
    S --- S169[England, 1964]
    S --- S170[England, 1964]
    S --- S171[England, 1964]
    S --- S172[England, 1964]
    S --- S173[England, 1964]
    S --- S174[England, 1964]
    S --- S175[England, 1964]
    S --- S176[England, 1964]
    S --- S177[England, 1964]
    S --- S178[England, 1964]
    S --- S179[England, 1964]
    S --- S180[England, 1964]
    S --- S181[England, 1964]
    S --- S182[England, 1964]
    S --- S183[England, 1964]
    S --- S184[England, 1964]
    S --- S185[England, 1964]
    S --- S186[England, 1964]
    S --- S187[England, 1964]
    S --- S188[England, 1964]
    S --- S189[England, 1964]
    S --- S190[England, 1964]
    S --- S191[England, 1964]
    S --- S192[England, 1964]
    S --- S193[England, 1964]
    S --- S194[England, 1964]
    S --- S195[England, 1964]
    S --- S196[England, 1964]
    S --- S197[England, 1964]
    S --- S198[England, 1964]
    S --- S199[England, 1964]
    S --- S200[England, 1964]
    S --- S201[England, 1964]
    S --- S202[England, 1964]
    S --- S203[England, 1964]
    S --- S204[England, 1964]
    S --- S205[England, 1964]
    S --- S206[England, 1964]
    S --- S207[England, 1964]
    S --- S208[England, 1964]
    S --- S209[England, 1964]
    S --- S210[England, 1964]
    S --- S211[England, 1964]
    S --- S212[England, 1964]
    S --- S213[England, 1964]
    S --- S214[England, 1964]
    S --- S215[England, 1964]
    S --- S216[England, 19
```

—28—

表-2(1) 主要生態学的生物指標の要約

指標名 事項	Kolkwitz-Liebmann 法 (1951年)	Knöpp 法 (1955年)	Pantle u Buck 法 (1955年)	Zelinka u Harvan 法 (1961年)	Sládeček 法 (1966年)	Fjordingstad 法 (1963年)
カテゴリー	汚水生物体系 (伝統法) 指標種法 (1)	汚水生物体系 (数字表現法) 指標種法 (2)	汚水生物体系 (数字表現法) 指標種法 (2)	汚水生物体系 (数字表現法) 指標種法 (2)	汚水生物体系 分類級限法 (3)	汚水生物体系 優占種・群集構成法 (4)
指標生物 および使用法	細菌類から魚類迄の様々な生物種の種を用い階級表により階級を判定する。	Kolkwitz-Liebmann 法で用いられている指標生物と個体数を用いず、多少を見送り2つの評点を加え平均を作成して評価する。	Kolkwitz-Liebmann 法で用いられている指標生物を用い、その出現多少度を用い汚濁階級指数を算出し数値を算出し汚濁度を評価する。	細菌類・藻類・原生動物 (蠕虫類・貝類・甲殻類・ミズダニ類・水生昆虫類) にサブプロビ値を与え評価平均点で階級を評価する。	細菌類・藻類・原生動物・原生動物・植物、魚類を階級表を作成して該当階級 (水質特性) を評価する。	細菌類・原生動物類 (但し蠕虫類のみ) 藻類の優占種による群集型と構成状態で評価する。
被指標項目	水質階級 (4階級) 総合的階級性格	水質階級 (4階級)	水質汚濁階級 (強度) 14階級	水質汚濁階級 (5階級)	水質階級 (10階級) 総合的階級	水質階級 (9階級) 特定項目 (H.S. BOD, NH ₄ -N, BOD, N系物質の存在状態、他)
国名	ドイツ等東欧諸国・日本	ドイツ	ドイツ、日本	ドイツ、中欧	チェコを中心とした東欧諸国	デンマーク
長所	指標生物の選定が可能	河川の縦断方向の変化を相対的に数値的に把握することができる。	定性的汚濁度を数値で評価しえる。	汚濁階級を的確に数値で評価できる。	有機性汚濁以外の物理的影響・無機性 (放射能・毒物を含む) 水質状況	どのような水質なのか、上記項目を考慮した水域像を求められる。
短所	種の同定に技術 (熟練) を要する。水質階級の定量的表現が不可能。	種の同定に技術 (熟練) を要する。階級を数値表現できても、総合的かつ定性的色彩が強い。	種の同定も技術 (熟練) を要する。階級を数値表現できるが汚濁の物理・化学的状況を定量的に表現しえない。	種の同定に技術 (熟練) を要するのと状況の出現種についてサブプロビ値を作成しなければ使用できない。汚濁の物理・化学的状況を定量的に表現しえない。	種の同定に技術 (熟練) を要する被指標項目との定量的関係を明確に出来ない。	種の同定に技術 (熟練) を要する。デンマークの狭い河川で細菌、蠕虫類のみを指標生物とし、汎用性が確立されていない。定量的表現は不可能。

表-2(2) 主要生態学的生物指標の要約

指標名 事項	Caspers u Karbe 法 (1967年)	多様性指数法 (Shannon u Weaver 1945年) (数字表現法)	DAI 法 (波辺・他 1985年) (数字表現法)	トレント生物指数法 (Woodiwiss 1964年) (数字表現法)	チャンドラースコフ法 (Chandler 1970年) (数字表現法)	A S P T (平均スコア法) (Armitage 1983年) (数字表現法)
カテゴリー	汚水生物体系改良法 (物質代謝法) (5)	非汚水生物体系 多様性・指標法 (6)	汚水生物体系 群集組成法 (7)	汚水生物体系 指標生物法 (8)	汚水生物体系 指標生物法 (8)	汚水生物体系 指標生物法 (8)
指標生物 および使用法	指標生物を使用せず、1次生産と全呼吸量、酸素消費、生物群集の栄養構造等から評価する。	出現する種の多様性を基準として、多様性指数から水質汚濁の状況を評価する方法が強い。	送餌群集組成法、群集中の好汚濁性種と広適応性種、好汚濁性種等の相対頻度を用いて水質評価する方法	肉眼的無脊椎動物の種または科レベルの出現生物を用い、グループ数の合計を用い、水質評価を行う。	肉眼的無脊椎動物の種または科レベルの出現生物を用い、出現状況ごとに点数を与え水質評価を行う。	肉眼的無脊椎動物の科レベルの出現生物を用いるが、個体数を数えない汚濁非耐性から耐性種までに10~1までの点を与え14項目の水質を指標・評価する。
被指標項目	水質汚濁階級 (6階級)	特に規定なし	有機汚濁階級 (7階級) BOD, EC, T-P, T-N, COD	DO, BOD, COD, NH ₄ -N, NO ₃ -N, アルカリ度, 等の絶対値	DO, BOD, COD, NH ₄ -N, NO ₃ -N, アルカリ度, 等	DO, T-N, C.B.T., DP ₀ -P, 総アルカリ度, pH 他
国名	ドイツ	米国・日本	日本・米国	英国	英国	英国
長所	汚水生物体系と栄養体系を結びつけ指標種重視から生態的・生物群集面的なもの (群集型を含む)	出現全生物群を用いるため各生物の指標を問わない。	具体的な水質 (例 BOD) を用いて汚濁階級の判定が出来る。	高度の同定技術を有しなくても実施でき、具体的な水質値を決定できる。一般河川管理者にも使用できる。	高度の同定技術を有しなくても実施でき、調査法も簡単。水質・水城状況を数値で表す。一般河川管理者にも使用できる。	高度の同定技術を有しなくても実施でき、調査法も簡単。水質・水城状況を数値で表す (平均スコア法) で表現できる。一般河川管理者にも使用できる。
短所	生物生産量・酸素収収、呼吸量を計測する必要があるため一般的でなく、実用上多面的技術が必要とする。	採取方法・試料サイズに規定がないこと、多様性指数と被指標項目の整合性・理論的裏付けがないこと、普遍性に問題がある。	種の同定に高度な技術と精査を必要とし、専門技術者でないで使用できない。研究向きで一般的かつ普遍性が少ない。	数ヶ年間の調査・解析・検討が必要。特定生物の選定は各河川または地域で実施・検証する必要がある。	数ヶ年間の調査・解析・検討が必要。特定生物の選定は各河川・地域で実施・検証する必要がある。	数ヶ年間の調査・解析・検討が必要。特定生物の選定は各河川・地域で実施・検証する必要がある。

注) : 表中の国名は、各手法の利用に向けて積極的に取り組んでいる国を示す。

(8) 指標生物法(表-1のA(1)):

イギリスのWoodiwiss¹⁸⁾は、代表種と種類数によって点数を与える「トレント生物指数」を案出した。表-1のA(1)に属する他の手法では、種の同定に知識と時間を要することから、この手法では「科」あるいはさらに上位の分類階級に限定している。

Chandler²¹⁾は、5分間の単位時間採集で採れた個体数を階級に分けて、個々の生物種あるいはグループ(分類の難しいものは属や科に留める)に点数を与える「スコア法」または「Chandler生物指数」と呼ばれるものを発表している。

さらに、イギリスにおいてBMWP(Biological Monitoring Working Party UK)システムを基礎としてスコア法の改良が行われた。その特徴は、種の同定は科までとし個体数をも勘案した点にある。この方法はトレント指数やChandlerのスコア法よりも単純で、かつ必要十分な情報が得られると云われている。

主要な生態学的生物指標の内容を表-2(1)、(2)に要約した。

2.3 生物学的生物指標が持つ水環境指標としての特性

水質指標は、実用上は水域環境や水そのものが利用目的に適した質を備えているかどうかを知り、また未知の原因、機構による水環境の変化を察知するために設けるものである。このため、生態学的生物指標を利用する場合の水環境指標としての実用的特性について以下にまとめる。

- (1) 生物を指標媒体とすることで、人間に与える環境劣化の影響を、水中の生物を通してより直接的に知ることができる。
- (2) 生物指標で表わされる環境の質は、調査の時点までの過去のかかなり長い期間、および対象生物の行動範囲と媒質の流動に関係するかかなり広い空間の質を反映したものとなる。
- (3) 生物指標によれば、日常の物理・化学的な観測だけでは知ることのできない水質等の異

常を察知することができる。

- (4) 生物指標による水環境の調査・測定は生物分類の知識さえあれば簡易でありかつ経費が安い。また、総合的な評価のためには、生物の分類・同定に精通していなくても、工夫によって手法をかなり簡易化することができる。
- (5) 応用生態学的な理論の確立とともに、学校や社会における環境教育に活用することができる。
- (6) 環境条件の変化に対して生物はある程度の受容能力をもっており、理化学的指標によって容易に感知されるような鋭敏なものではない。

3. 生物指標の研究と活用状況

3.1 生物指標の調査・研究の状況

我国における生物指標の研究調査の実状を把握し、今後の動向を検討する基礎資料として、1960年から1993年迄に公表(J I C S Tに登録)された諸報文・調査結果を年代別に整理した(表-3参照)。

同表より、1975年(昭和50年)から1990年(平成元年)迄に非常に多くの調査研究が行われ、特に行政研究機関(衛生研究所、公害研究所、環境研究所等)による事例が多いことがわかる。

内容的には理論的研究報文は全体の約12%程度で、ほとんどのものが「汚水生物体系」にもとづくもので、国内河川における方法論の適用可否の確認、指標生物表の作成、あるいは水生生物の実態把握的調査である。水環境あるいは河川水質汚濁レベルの判定(評価)を目標としたものは、汚水生物体系の4階級基準による判定が多く、物理化学的指標との整合を行ったものは少ない。

大学研究機関においては、従来からの汚水生物体系における種と水質指標との関係に係る研究と、例えば渡辺らの珪藻群集による有機汚濁指数(DAI_{po})など、本来の河川生態系からの視点に立って有機濁度状態と種との関係を主

表-3 JICST等情報に基づく水環境生物指標報文実態

年	理論 1	方法 論 2	大学・教育機関 (Ⅰ)							行政研究機関 (Ⅱ)							行政・教育機関 (Ⅲ)											総数		
			指標生物 3					評価 判定 4	監視 5	理論 1	方法 論 2	指標生物 3					評価 判定 4	監視 5	理論 1	方法 論 2	指標生物 3					評価 判定 4	監視 5		啓蒙 6	
			(1)	(2)	(3)	(4)	(5)					(1)	(2)	(3)	(4)	(5)					(1)	(2)	(3)	(4)	(5)					
1960～1962 1964(4年)	2	3	1	3				5																						5
1965～1969 (5ヶ年)	2	3	3	1				3			2	2	1				2													7
1970～1974 (5ヶ年)	3	4	5	2				7			1	1	1				1													8
1975～1979 (5ヶ年)	2	11	7	4			1	12	2		15	7	5	1			15													28
1980～1984 (5ヶ年)	11	20	13	10	2	1		27	2		46	21	17	17	3	1	47	1	1	4	1						3	3	4	78
1985～1989 (5ヶ年)	6	19	13	11	4	1		20	4	3	86	38	60	21		2	91	15	9	2	6	3					3	2	9	123
1990～1993 (4ヶ年)	6	10	8	2	1		1	10		2	30	8	21	5		1	25	1	5		5						2		3	53
合 計	32	70	50	33	7	2	2	84	8	5	180	77	105	44	3	4	181	17	15	6	12	3					8	5	16	302

注1: 理論1: 体系、理念
方法論2: 調査法、解析法

生物指標3: (1)藻類 (付着藻類を含む)
(2)底生動物 (水生昆虫を除く)
(3)水生昆虫
(4)魚類
(5)水生植物

評価・判定4: 水質判定、水質類型、水質レベル

注2: 報文総数は、理論1と方法論2の合計値に合致するが、その他は重複などがあり合計値は異なる。

点とする研究が行われている。

3.2 生物指標の利用状況

我国においては、1940年頃より当時奈良女子大学の津田松苗博士を中心として研究が行われ、津田が著した1964年「汚水生物学」¹⁹⁾、1972年「水質汚濁の生態学」²³⁾の中で「汚水生物体系(Sprobiensystem)」が紹介された。その後、多くの水生生物研究者によって全国河川において調査・研究が行われて、「水質汚濁状況の生物学的水質判定手法」として汚水生物体系に基づく手法が定着した。

建設省は、河川水質状況を外観して水環境管理に資するとともに、市民の河川環境への関心の高まりを目指して、1983年に環境庁との共同で汚水生物体系に立脚して、肉眼的底生動物のうち水質階級の明らかな26種を用いた「水生生物による水質調査法」²⁹⁾を策定した。1985年度から、それを用いて全国主要河川において、中学生・高校生および一般市民等の参加を得て毎年6～9月の間に調査が行われており、全国で毎年約1万人が参加している。

一方、環境庁においても「水生生物による水質調査法」²⁹⁾を基に、都道府県の衛生研究所・公害研究所等とともに調査を行っている。

また海外ではイギリスのWoodiwiss(1964)¹⁸⁾は代表する種類とそれと一緒に出現する種類数によって点数を与えようとする「トレント生物指標」を案出した。この方法の場合でも河川管理者にとって「種類」を同定することは困難であり、また時間がかかることなどから「科」あるいはさらに上位の分類階級に限定している。この方法はその容易さで多くの人達に受け入れられた。

さらにイギリスにおいては前述(2-2節、(8))のように、1976年に環境省に生物指標ワーキングパーティーが設置されスコア法の改良が行われた。これは、トレント指数やChandlerのスコア法よりも単純であるが、必要十分な情報が得られるとしていると云われている。³⁷⁾

アメリカにおいては種組成・生物量等の相

違や機能群の組成変化等を目安にしたものなどが発表されているが、最近ではBiological Monitoringの再検討が行われ始めている。³³⁾

ドイツにおいては公共用水域の水環境の評価に化学・物理的な分析結果と、生物的・生態的な観測結果とから総合的評価判定を行っているとのことであり、また近自然化工法、再自然化工法を実施した場合の生態系の回復または創造の状況の「バイオメーター」として利用されている。³⁸⁾

特にバイエルン州では州内の全河川について「汚水生物体系」による調査を行い、水質階級を色別した河川図を作成し、河川管理情報として用いる。

全体の流れとしては河川管理者が一般的に使用でき、かつ肉眼で見える「無脊椎動物」を指標生物として用いる例が多いが、ドイツ・東ヨーロッパ(ハンガリー・ポーランド等)の国々のように生物分類学研究者の厚い層を有する国々においては、様々な生物群を用い「汚水生物体系」を中心とした研究を行っている。

4. 生物指標の体系化について

4.1 指標生物

指標生物としては、少なくとも次の条件を満たすものが望ましい。

- a) 容易にかつ定量的に採取でき、短時間に種の同定が出来るもの。
- b) 対象とする試料を採取するために特殊な技術者あるいは高価な装置を必要とせず、容易にかつ定量的に採取できるもの。
- c) 狭い範囲に分布せず、普遍的に広く分布しているもの。
- d) 多くの生態学的な情報をもっている。
- e) 資源的、経済的にも価値のあるもの。
- f) 汚濁物質あるいは有害物質を迅速に蓄積するもの。
- g) 研究室内でも容易に培養しうるもの。
- h) 生物群落の内でニッチの変化が少ない。

また、今回収集した1960～1993年の文献を整

理すると、指標生物として用いられている生物群は藻類136例、底生動物（主に水生昆虫類）204例、魚類5例、水生植物9例となっており、肉眼的大きさの底生動物と微小な藻類が多く使用されている。

4.2 被指標項目

被指標項目とは生物指標によって翻訳された水質項目のことであり、収集した文献で対象とされた被指標項目は、大部分が汚水生物体系に基づく有機性汚濁状況の類型を用いており、一部において栄養レベル、環境基準項目（BOD、COD、pH、T-P、T-N等）やNH₄-N、Cl⁻、Cu、Znなどがある。

また、学術的にあるいは定量的に確立されていないが研究分野においては、表-4のような生物群が指標生物として使用できる可能性があると云われており、今後多方面にわたる水環境の指標として生物指標の適用が期待される。²⁶⁾

しかし、「生物学的水質階級」を指標させようとする「汚水生物体系」においては、生物指標の結果から理化学的水質値の絶対値を指標させることは従来の方法論では困難であり、なんらかの工夫をくわえないかぎりある幅を持った「階級的差異」を指標させるのに留まらざるを得ない。

表-4 指標生物と被指標項目

指 標 生 物		被 指 標 項 目
細 菌 類	硫酸塩還元細菌	水中・泥中の硫黄塩
	硫黄細菌	水中・泥中の硫化水素、硫黄・チオ硫酸塩
	有機栄養細菌	湖沼の栄養タイプ(貧栄養・富栄養・酸栄養・腐植栄養 等)
	鉄細菌	水中の第1鉄イオン濃度
	Zooglea属細菌	水中の有機物の存在
	Sphaerotilus属細菌	水中の有機物の存在
原生動物類	根足虫類・鞭毛虫類	水質階級、水質濃度、D0濃度
	繊毛虫類	
微小藻類	珪藻類・緑藻類・藍藻類	pH、流水性、水質階級
高等植物	水生植物	湖沼遷移、陸化状態、栄養状態、底質、風波、動水、pH
後生動物	輪毛虫類・腹毛虫類	塩分濃度、pH、水分、水温、流速、水質階級
	甲殻類	栄養階級
	貝 類	水質階級、流速、塩分濃度
	魚 類	水質階級・水質汚濁状況

「環境と生物指標2. -水界編- 日本生態学会問題専門委員会編」から作成

5. 生物指標の展望と課題

5.1 生物指標を適用する目的

我国に限定せず、諸外国を含めて生物指標を

水環境あるいは水質の指標として適用して行く
目的について、表－5のように様々な議論が行
われている。

表－5 生物指標の適用目的

適 用 目 的	現 状
a) 水環境の快適性の評価	化学、物理的指標が主となるが、快適性を表現する要素である透明度・濁度・色相成分となるプランクトンや付着藻類などの単位面積または容積中の現存量を指標の1つとして使用するものであるが、方法論的に確立されていない。
b) 漁業等2次生産性の評価	主として藻類・底生無脊椎動物の単位面積または容積中の現存量、または1次生産量等を使用するもので、漁業学・生態学ではその方法論がほぼ確立されている。
c) 有機性汚濁状況の評価	汚水生物体系にもとづく指標生物を使用する方法（既記）
d) 有毒物質の評価	有毒物質の濃度と各種の生物の生死率を用いるBioassay法（生物検定法）として、技術的に確立されている。この他変異原性試験法と呼ばれるものがある。
e) 富栄養化度の評価	プランクトン中の優占種、群集構成状態を指標とし、水中の栄養塩類レベルとの対応結果から評価するもので、汚水生物体系法の中にもある。
f) 濁質汚濁影響の評価	濁質量と光合成量の変化、付着藻類・底生動物量の関係を調査するもので方法論としては完全に確立されていない。
g) 温排水影響の評価	温排水と水生生物の生存率、生長、増殖等の関係を調査するもので、Bioassay的手法・現場調査法が確立されている。
h) レクリエーション可能性の評価	腸内細菌類、大腸菌類等の存在と量を衛生学的安全性の指標とするもので、下水試験法・上水試験法等の内では方法論としては確立されている。
i) 灌漑用水としての評価	大腸菌類、腸内細菌類、寄生虫類等の存在を指標とするもので、用水基準の中に1部位置付けられている。
j) 原水および処理水の評価	病原性微生物の存在を指標とするもので、上水試験法・下水試験法の中で位置付けられている。

「合田 健編. 1979. 水環境指標 思考社」より引用、一部加筆

5.2 生物指標の役割と総合的な指標化

河川の管理において、生物指標はより大きな役割を果たしていくことが期待される。以下、今後一層の発展が期待される水質の改善や多自然型川づくり等と生物指標との係わりについて列挙する。

(a) 水質管理における指標として

- ・水質情報、河川諸情報との整合性を統計学的に検討し、特定生物群の科、属、種、あるいは群集型を用いることにより、より明確な水質値、階級判定。
- ・底生無脊椎動物を指標生物とし、その生死、現存量を用いた水質事故発生の有害物流入点および河川縦断方向の影響状態の把握。
- ・底生無脊椎動物、魚類等と河川形態等との関係を検討することによって指標生物によって河川形態、水理特性を指標する。等

(b) 河川構造物および環境形成機能に係る生態学的評価指標

- ・構造物周辺の調査による生態学的多様性の程度を用いた多自然型川づくりによる護岸等水彩、水中構造の生態学的評価。
- ・多様性の程度と汚水生物体系の従来の手法を組み合わせによる親水機能、水辺レクリエーション利用性等についての評価。

(c) 河川浄化機能の評価指標として

- ・2地点間の優占種あるいは群集型、多様性度の比較手法を用いることによる区間内浄化状態、あるいは水質階級の改善評価。

これを進めていくためには、「指標生物の同定」「指標生物と被指標項目との関連性」「結果の定量的表現方式」等の課題を解決し、総合的水環境指標化にむけた検討が必要である。

「水環境の状態」を総合的に指標させるためには、現在の方法論のみでは限界があり、水環境の構成する様々の要素と状態を総合的に把握し得る「生態学的視点に立脚する指標体系」の検討を行う必要がある。現在用いられている指標と総合的水環境指標との関係の

例を表-6に示す。

5.3 今後の生物指標適用のための課題

現在、我国において用いられている「生態学的生物指標」は、汚水生物体系に基づく総合的かつ平均的な水質、特に有機性汚濁状況の階級判定のための生物指標として位置付ける必要がある。しかし、汚水生物体系に基づいた生物指標を水質汚濁階級の指標として使用するためには、以下のことを進める必要がある。

(a) 「生物指標表の補完」と「水質階級像の整理」を進める。

(b) 「理化学的測定値」との関連性を統計学的手法を用いてその整合性がとれる程度に整理する。

また、現時点で水生生物指標の持つ次のような長所と短所があることが明らかとなって来た。

(a) 調査結果の数値化がむずかしい、数値化した場合分かりにくくなる恐れがある、また理化学的測定値との整合性に限度がある。

(b) 水域、水系毎で生物が異なり全国統一的な取扱いが難しい。また生物の多様性によって、ある程度の専門的知識が必要である。

(c) 汚濁源および汚濁物質との因果関係の解明が難しい。

(d) みじかな生物を用いれば極めて分かりやすい。

(e) 長期間にわたる水質、流速、河床の状況等が総合的な環境の状況を反映していることは概念的に云えても数値化が困難である。

これらの課題に対して、まず基本情報の整備が必要であり、欧米諸国における権威ある動・植物誌あるいは指標生物の「分類学的同定」に用いる「分類学的基準資料」を我が国においても整備していくことが待たれている。

また、欧米諸国のような権威ある各生物群の分類学的基準図書がなく、特に微小生物についてはコスモポリタンの性格であるため、欧米諸国の基準的図書が使用できるものの、それ以外の生物については早急に国内既調査研究報文から出現頻度の高い各生物群の属・種について同

表-6 水環境に係る諸指標とその指標目的との関係

基礎的 カテゴリー	指 標 レ ベ ル			指 標 目 的
	現象・一般個別指標	部分的総合指標	総合的指標	
化学的指標	PH, BOD, COD, NO ₃ -N, PO ₄ -P, Hg, Cd, Cr ⁶⁺ , As, PCB et al	T-P, T-N, PON, SS 中の有機態N, DON, 溶存物中の有機態 N, POC, DOS, POP, DIP・クロロフィル TSI.		基礎値との個別的対比・ 評価(汚濁状態、水質類 型、富栄養化度、水質濃 度レベル、水質階級)
生物学的指標	一般細菌類、菌類、 微小藻類、原生動物 病原性細菌類、病原 性原生動物 {細胞・器官・組織 細胞抽出物(酵素)} {高等植物・後生動物 (魚類・他)}	(汚水生物体系)	(生態系指標) (総合水質指標) (アメンティ 指標)	分解性評価 衛生学的安全性 物質の影響度 (安全性を含む) 毒性限界・長期的蓄積性 評価 生物生産力 環境保全施策の効果評価 生活環境質の評価 親水性度の評価
物理学的指標	水温・水色・水量・ DO、透明度、濁度 ゴミ量	{BIP, BI AGP 総生産・純生産 生物濃縮指数 TLM 細胞毒性試 験(変異原性)}		景観質の評価
		{フルード数・リ チャード数・ペ クレ数}	(美的心理的指標) (感覚的指標)	

定情報を整理し、専門分野の学識経験者による学術的検討を経て、かつ利用者が「属・種の同定」を間違いなく、かつ容易に出来るような「基準資料」を早急に整備することも必要である。

6. おわりに

生物指標は、河川環境の改変などによる生物への影響を、生物量などから直接的に、また生物の固有の生息環境から間接的に把握できるなど、現在鋭意推進されつつある豊かでうるおいある川づくりに寄与することが期待される。

本検討は、多くの既往報文等を参考に取りま

とめたものであるが、特に主要な参考資料を以下に示す。最後に、本文を作成するに当たって多大なるご支援、ご協力をいただいた東京水産大学 講師 盛下 勇氏に感謝する次第である。

<主要な参考文献>

1. Kolkwitz, R. & Marsson, M. (1902) : Grundsätze für die biologische Beurteilung des wassers nach seiner Flora und Fauna. Mitt. Prüfungsansee. Wasserversorg. 1;33-72
2. Kolwitz. R. & Marsson. M. (1908) : Ökologie der pflanzlichen Saprobien. Ber. dt Bot. Ges. 26A: 505. bis 519.
3. Kolwitz. R. & Marsson. M. (1909) : Ökologie der tierische Saprobien Beiträge zur Lehra von dere biologische Gewaseer beurteilund. Int. Rev. Hydrobiol. 2: 126-152
4. Nygard, G. (1946) : Hydrobiological studies on some Danish pond and Lakes 2, The quotient hypothesis and some new little know phytoplankton organisms. Kong Danske, Vidensk. Selskab. Boil, skribter. 7. 1. 1-293.
5. Shannon, C.E. & Weaver, W. (1949) : The mathematical theory of communication. Urbana University Illinois Press.
6. Liebmann, M. (1951) : Handbuch der Frischwasser-und Abwasserbiologie. Band I, : 539pp R. Oldenbourg, München.
7. Back, W.M. (1954) : Studies in stream pollution biology 1, A simplified ecological classification of Organisms, Quart. J. Fia, Acad. Sci. 17: 211-227.
8. Beck, W.M. (1955) : Suggested method for reporting biotic data. Sew, Ind, Waste, 27: 1193-1197.
9. Pantle, R. & Buck, H. (1955) : Die biologische Überwachung der Gewässer und die Darstellung der Ergebnisse. Gas u Wasserfach, 96. 604.
10. Offaus, K. (1958) : Einführende Betrachtung zur Biologischen Abwasserreinigung : Fischerei-und Flussbiologie. Bd. 5.
11. Zelinka, M. & Marvan, P. (1961) : Zur Präzisierung der biologischen Klassifikation der Reinhert fliessender Gewässer. Arch Hydrobiol, 57: 389-407
12. 津田松苗 (1961) : ベック氏法の再検討. 淡水生物. No7. 4-5.
13. Knopp. M. (1961) : Der A-Z Test, ein neues verfahren zur toxikologischen Prüfung von Abwassern. Dt. Gewasaer Kundel Mitt 5: 66-73.
14. Knopp. H. (1962) : Über situation und Entwicklungstendenzen der Saprobiologie, Internat. Rev. Hydrobiol. 47: 85-99.
15. Kothe, P. (1962) : Der Artenfehlbestrag, ein einfaches Gutekriterium und seine Anwendung ber biologischen Vorfluterunter suchungen. Dt. Gewasserkundl, Mitt 6: 60-65.
16. Fjordingstad, E. (1963) : Limnological estimation of water pollution levels. WHO EBL. 10: 1-29.
17. Fjordingstad, E. (1964) : Pollution of streams estimated by benthal phytomicro-organisms I. A saprobic system based-on communities of organisms and ecological factors. Internat. Rev. Hydrobiol, 49: 63-131.
18. Woodiwiss, F.S. (1964) : The biological system of stream classification used by the Trent River Board. chem. Ind., 443-447.
19. 津田松苗 (1964) : 污水生物学 258pp. 北陸館
20. Caspers, H. & Karbe, L. (1966) : Trophic und Saprobität als stoffwechseldynamischer

- komplex. Gesichtspunkte für die Definition der Sprobitatsstufen. Arch. Hydrobiol, 61: 453-470.
21. Chandler, J. R. (1970) : A biological approach to water quality management, Water Poll., 69: 415-422.
 22. Sladeczek, V. (1971) : Saprobic sequence with the genus Vorticella. Water Research, 5: 1135-1140.
 23. 津田松苗 (1972) : 水質汚濁の生態 240pp. 公害対策同友会
 24. Cairns, J. Jr. and Dickson, K. L. ed (1973) : Biological methods for the assesment of water quality. 256pp. Americal Society for Testing an materials.
 25. Ames, B. N., etal (1975) : Method for detecting carcinogens and mutagens with Salmonella/mammalian microsome mutagenicity test. Mutat. Res. 31: 347-363.
 26. 日本生態学問題専門委員会編 (1975) : 環境と生物指標2. -水界編- 310pp. 共立出版
 27. 御勢久右衛門 (1978) : Zelinka, Marvan による肉眼的底生動物のサプロビ値、インディケーター値の適用への試み. 日本水処理生物学会誌、14: 9-17.
 28. Armitage, P. D., Mass, D, et al (1983) : The performance of a new biological water quality score system based on macroinvert ebrates over a wide range of unpolluted running water sites. Water Research, 17: 333-347.
 29. 建設省・環境庁 (1983) : 水生生物による水質調査法
 30. 森下郁子 (1985) : 指標生物-生物モニタリングに考え方 218pp. 山海堂
 31. 渡辺仁治・浅井一視・伯耆昌子 (1986) : 珪藻群集による河川有機汚濁の数量評価、関西自然保護機構 会報 13: 31-48.
 32. 渡辺仁治・浅井一視・伯耆昌子 (1986) : 付着珪藻群集に基づく有機汚濁指数DAI_{RO}とその生態学的意識. 奈良女子大・人間文化研究科年報 1: 77-95.
 33. Stanford L. Loeb, & Anne Specie ed. (1994) : Biological Monitorring of Aquatic Systems. 381pp Lewis. Publishers.
 34. 佐谷戸安好・中室克彦・上野仁 (1993) : Ames試験による水質評価. 用水と排水. 35.4 13-21
 35. 宗宮 功・小野芳朗 (1993) : umuテストによる水質評価. 用水と排水. 35.4 28-34
 36. 細見正明 (1993) : マイクロトックスによる水質評価. 用水と排水. 35.4 35-38
 37. 安野・熊野 編 (1987) : 水域における生物指標の問題点と将来 135pp. 国立公害研究所
 38. 白藤周司 (1992) : ドイツにおける水生生物を用いた河川環境監視について 用水と廃水 134.11 33-34
 39. 盛下 勇 (1981) : 生物指標の概念と種類 公害と対策 5月号 (別冊)
 40. 合田 健 編 (1979) : 水環境指標 思考社