

生物学的水質指標を考慮した 河川水質の総合指標

能登勇二

正会員 工修 富山県立大学短期大学部助教授 環境工学科 (〒939-03 富山県射水郡小杉町黒河 7500)

河川水域等の水質環境が多面的になるとともに、水質指標も多様化している。このような状況の中で多くの水質指標、特に理化学的水質指標と生物学的水質指標の相互から水質総合指標を導出することにより、広範囲の水質環境の比較評価を行うことが可能となる。本稿では、まず理化学的水質指標から生物学的水質階級の推定を試みた。ついで、これら両指標を考慮した水質総合指標、その利用法について提案する。さらに、これらのことから、理化学的水質指標のみを用いた生物学的水質階級を考慮した水質総合指標を提示する。以上の指標等について、いくつかの地域の資料を用いて検討した。

Key Words : water quality, synthetic evaluation, biological index, physical and chemical index

1. はじめに

最近では、生活様式、科学技術の広範囲にわたる発展により、その反映としての河川等の公共水域の水質環境も多面的な様相を見せている。したがって、水質環境の指標は、そのことに対応して、より多様化しているのが現状である。また、環境に関する一般の人々の認識の高まりから、河川水質に関しても深い関心が寄せられるようになってきている。このような状況の中では、多くの水質指標から2~3の総合指標を導出し、それにより水質環境を評価、比較できることは理解しやすく、さらに河川水質に広範囲な関心を集める上でも意義があることと考えられる。筆者らは、生活環境6項目と流量から2つの水質総合指標を導きだし、これらにより水質環境の評価が可能であることを示した¹⁾。また最近、河川水域において多くの生物学的水質調査が行われているが、生物学的水質指標についても理化学的水質指標との関係について検討がなされてきた^{2)~4)}。生物学的水質指標としては、水質指標生物を用いた水質判定による水質階級が広く使われている。本報でも、生物学的水質指標として、この生物学的水質階級をとり上げて検討する。理化学的水質指標と生物学的水質階級はそれぞれの特徴を持つ。すなわち、理化学的水質指標はある水域の非常に短い期間の水質状況を単位尺度でとらえるものであり、代表性に欠ける反面、数値で表せることから汚濁度合いの把握が他水域との比較の上でも容易で、対策を考える場合にも理解しやすい指標である。一方、生物学的水質階級はある水域の長期の水質環境を反映した生物相により判定され

ることから、その水域の代表性のある指標である反面、順序尺度であるため他水域との絶対的な比較や、汚濁物質の特定も容易でないことがあり、水質汚濁対策あるいは汚濁度を比較することを考える場合には必ずしも有利な指標とはならない。本報では、これら両指標の特性を生かした総合指標を導き出すことを念頭に置き、これまでの両指標の関連解析の知見をもとに、

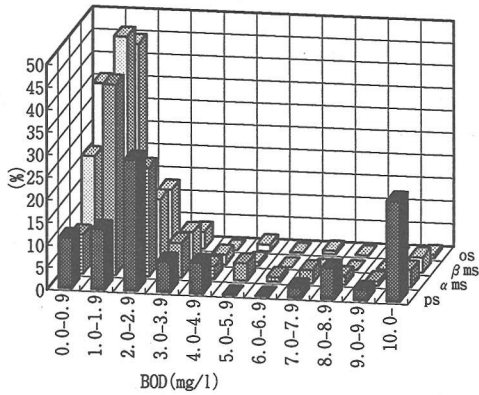
- 1) 理化学的水質指標からの生物学的水質階級の推定を試みる。
- 2) 理化学的水質指標を基に生物学的水質階級を考慮した総合指標とその利用法について提案する。
- 3) 1)の推定法を利用して理化学的指標のみから生物学的水質階級を考慮した総合指標を求めることを試案する。

ことを行った。以上の検討から若干の知見を得たので報告する。

2. 理化学的水質指標からの生物学的水質階級の推定

(1) 理化学的水質指標からの生物学的水質階級の推定法

生物学的水質階級は、ある水域の水質環境を、そこに生存する生物により判定する。生物学的水質階級はKolkwitzs-Marrsonの体系に従い、4つのザプロビ階級、oligo-saprobic zone (貧腐水性域)、 β -mesosaprobic zone (β -中腐水性域)、 α -mesosaprobic zone (α -中腐水性域)、poly-saprobic zone (強腐水性域)に分けら



os—貧腐水性域 βms — β —中腐水性域
 αms — α —中腐水性域 ps—強腐水性域
 図-1 生物学的水質階級の BOD の頻度分布
 (全国河川 1975 年⁵⁾)

れるが、ここでは、これらをそれぞれ os , αms , βms , ps と略記した。以下、同様に略記する。このとき生物学的水質階級が水質環境を反映している以上、何らかの形で理化学的水質指標と生物学的水質階級は関係づけられるものといえる。生物学的水質階級は順序尺度であり、また生物には環境順応性があることなどにより、生物学的水質階級と相関のある理化学的水質指標でも、ある生物学的水質階級に対応する理化学的水質指標の値の幅は広く、他の生物学的水質階級に対応する値と重なりがある³⁾。このことは、たとえば図-1の生物学的水質階級と相関のある BOD³⁾のそれらの階級別の頻度分布にも表れている。すなわち、 os , βms , αms 階級の分布形状はよく似て、大きな違いが無く、 ps 階級のみが最頻値が大きくなっているが、4 階級とも広範囲に分布して重なる部分が多い。これは、生物学的水質階級が、指標生物から判定されるため、ある水域の、ある長い時間の平均的な水質を反映していることによると考えられる。すなわち、この場所的、時間的平均であるがゆえであることも含め、生物学的水質階級を決定する水質およびその環境因子は非常に多く、一つの水質因子と生物学的水質階級を結びつけることは困難であることを示す。したがって、このように理化学的水質指標 1 項目のみと生物学的水質階級を関連づけるよりも、生物学的水質階級はそれを決定づけるすべての因子と関係づけられるべきであり、この場合理化学的水質指標のみならず、水質以外の因子、たとえば河川の当該水域の河床の状態、流量などの水質環境因子も考慮する必要があるであろう。しかし一方、むやみに水質、環境項目を多くとつても測定、入手には困難が伴い、実際上は、出来るだけ容易に入手できる数個の項目と関係づけることが望ましいと考えられる。ここでは、次のように両指標の関係づけおよび理

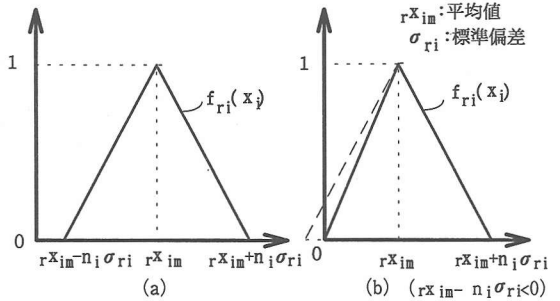


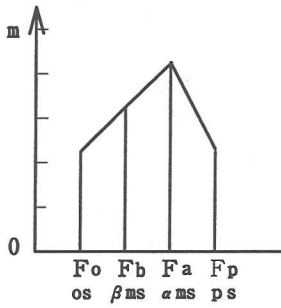
図-2 水質の密度分布

化学的水質指標からの生物学的水質階級の推定を試みた。いま、理化学的水質指標から、たとえば生物学的水質階級と相関のある指標を m 個選ぶ。これらの水質指標がそれぞれある分布、ここでは簡単のため各生物学的水質階級毎の平均値 rxi_{im} ($r = o, b, a, p$; o, b, a, p はそれぞれ $os, \beta ms, \alpha ms, ps$ を表す (以下同様)、 $i = 1, 2, \dots, m$) を中点とする底辺の長さが $2n_i\sigma_{ri}$ 、高さ 1 の二等辺三角形分布を (図-2: $n_i : n$ 値, σ_{ri} : 標準偏差, $r = o, a, b, p, i = 1, 2, \dots, m$) するとする。ここで、 n 値は実際の分布と二等辺三角形が合うように調節するために設定したものである。このとき、 $rxi_{im} - n\sigma_{ri} < 0$ の場合、分布の左端は 0 とする。(図-2 (b)) こうすることによって、実際には対数正規型の分布をする理化学的水質項目の分布もほぼ表現することができる。これら水質の密度分布と呼ぶこととする。したがって、各理化学的水質指標は、各水質項目値 x_i について各生物学的水質階級毎に、 $f_{ri}(x_i)$ ($r = o, b, a, p, i = 1, 2, \dots, m$) で表される分布形を持つ。いま、 $f_{ri}(x_i)$ を密度分布関数と呼ぶこととし、次の形で表すことができる。

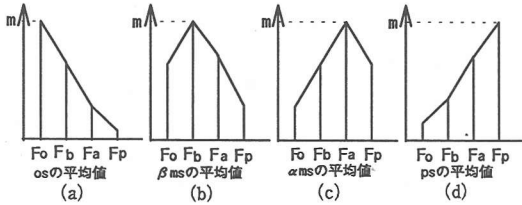
$$f_{ri}(x_i) = \begin{cases} 0 & (0 \leq x_i \leq rxi_{im} - n_i\sigma_{ri}) \\ \frac{1}{n_i\sigma_{ri}}(x_i - rxi_{im} + n_i\sigma_{ri}) & (rxi_{im} - n_i\sigma_{ri} \leq x_i \leq rxi_{im}) \\ \frac{-1}{n_i\sigma_{ri}}(x_i - rxi_{im} - n_i\sigma_{ri}) & (rxi_{im} \leq x_i \leq rxi_{im} + n_i\sigma_{ri}) \\ 0 & (rxi_{im} + n_i\sigma_{ri} \leq x_i) \end{cases} \quad (1)$$

ただし、 $rxi_{im} - n_i\sigma_{ri} < 0$ ならば

$$f_{ri}(x_i) = \begin{cases} \frac{x_i}{rxi_{im}} & (0 \leq x_i \leq rxi_{im}) \\ \frac{-1}{n_i\sigma_{ri}}(x_i - rxi_{im} - n_i\sigma_{ri}) & (rxi_{im} \leq x_i \leq rxi_{im} + n_i\sigma_{ri}) \\ 0 & (rxi_{im} + n_i\sigma_{ri} \leq x_i) \end{cases} \quad (2)$$



図—3 生物階級水質値の分布

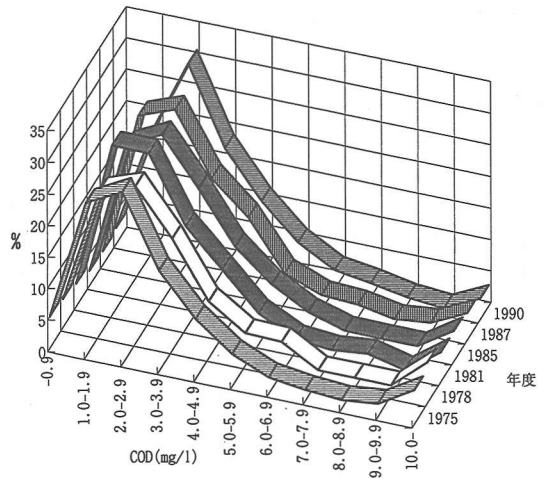


図—4 生物学的水質階級の理化学的水質指標の平均値による生物階級水質値の分布パターン

さらに、これにより一組の理化学的水質指標 (x_1, x_2, \dots, x_m) から、次式で各生物学的水質階級毎の値が算定される。

$$\left. \begin{aligned} F_o &= F_{o1}(x_1) + f_{o2}(x_2) + \dots + f_{on}(x_m) \\ F_b &= F_{b1}(x_1) + f_{b2}(x_2) + \dots + f_{bn}(x_m) \\ F_a &= F_{a1}(x_1) + f_{a2}(x_2) + \dots + f_{an}(x_m) \\ F_p &= F_{p1}(x_1) + f_{p2}(x_2) + \dots + f_{pn}(x_m) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

これらそれぞれの値 F_r ($r = o, b, a, p$; o, b, a, p はそれぞれ $os, \beta ms, \alpha ms, ps$ を表す。) を生物階級水質値と呼ぶこととし、たとえば図—3のような分布形となり、各地点の理化学的水質指標値から計算される。また、生物学的水質階級の各理化学水質指標の平均値により生物階級水質値 F_r を求めると図—4のようになり、 F_r の値が最大で m となる分布形が描かれる。このとき、生物学的水質階級の理化学的水質指標の平均値であっても、その生物学的水質階級以外の計算値 F_r は m より小さいがかなりの大きさの値をとる。これは、理化学的水質指標値は各生物学的水質階級内で広い範囲にわたり、互いの階級に重なる部分を持って分布していることによる。しかし、いま1組の理化学水質指標値から求められる F_o, F_a, F_b, F_p 値の分布形を描くと、その水域の生物学的水質階級の F_r 値が最も大きくなり、その部分が尖った分布形が得られる。すなわち、各生物学的水質階級の水域では、図—4のような、各水質階級に対応する分布形と同様な分布形が得られると考えられる。したがって、その分布形状から生物学的水質階級が判定され、



図—5 最近の全国の河川の水質変動 (CODの度数分布)

また生物学的水質階級からみた汚濁度合 (分布形の尖りが右に傾くほど汚濁度が大きい。) をみることができる。

(2) 生物学的水質階級推定計算例

2 (1) で述べた考え方にに基づき、この計算法を日本の109一級河川の水質資料⁵⁾、富山県内27河川の水質資料⁶⁾、九州地方の6河川の水質資料⁷⁾について適用を試みた。これらは、一定の広範囲の理化学的水質資料と生物学的水質資料がそれぞれ一組として得られている。そのため、やや古い1975年を中心とした時期の資料を用いて検討した。図—5は全国河川のCODの頻度分布の経年変動(1975年, 1978年, 1981年, 1985年, 1988年, 1990年)を示したものである。これは文献^{8), 9)}から河川水域の資料を選び出し、求めたものである。全体として緩やかに汚濁改善の方向に推移しているが、1975年度の値は現在の値と極端な変化はない。このことは、他の水質項目でもほぼ同様であり、ここで得られた解析結果は現在でも十分に適用されるものであるといえる⁹⁾。

まず、日本の一級河川の場合、用いた資料は、理化学的水質資料は1975年のもの⁵⁾(資料数703)、生物学的水質階級は文献¹⁰⁾から読みとったものである。ここではSS, DO, COD, BOD, 大腸菌群, pHの6水質項目について考慮した。式(1), 式(2)に従って、これらのうち生物学的水質階級と相関のあるpHを除く5水質項目³⁾について各生物学的水質階級毎に分布関数を描くと、図—6のようになる。これらの分布関数はいずれの項目も n 値は2を用い計算したものである。ここでは、各水質項目について各生物学的水質階級ごとに重なる部分が非常に大きいことがわかる。また、SSは、 αms 階級に他階級に比べ非常に大きな値を持つ資料が

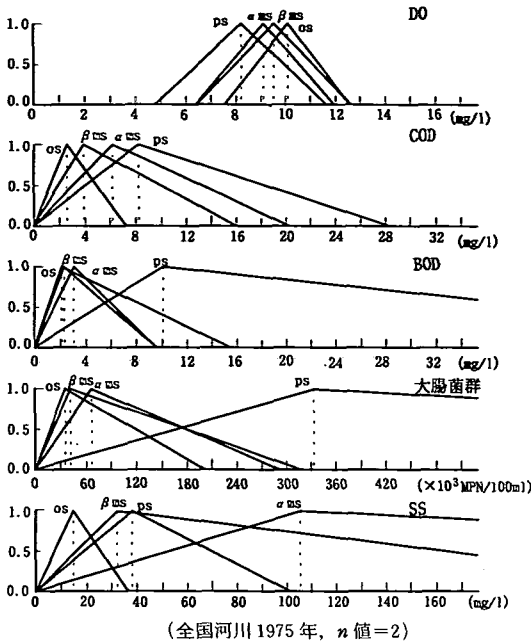


図-6 代表的な水質項目の密度分布

含まれるため、ams 階級の平均値が ps 階級の平均値に比べ大きな値となっている。各地点の理化学的水質指標より求めた F_o, F_b, F_a, F_p 値のうちもっとも大きい値の生物学的的水質階級とその地点の生物学的的水質階級が一致した場合を、生物学的的水質階級の推定ができたとする。このとき、生物学的的水質階級毎、水質項目毎の密度分布および n 値の組み合わせにより推定一致率が異なる。このため、 n 値は元来分布形状を調節するために導入したものであるが、これを変化させることにより推定一致率の最大値を求めるを試みた。そこで、 n 値を 0.5 から 2.5 まで 0.1 ずつ変化させ、項目数を増加させながら一致率を求めた。 n 値を 0.5 から 2.5 までの範囲で変化させたのは、この範囲外では、実際の分布とかけ離れすぎること、推定一致率が大きく変化しないことによる。各理化学的水質項目数別の最大一致率、その場合の項目の組み合わせ、 n 値などの計算結果の一部を表-1 に示した。水質項目数 m が 1 の場合、一致率は最大で 23.1 ~ 41.4% で、水質項目数 m を増やすと、少しずつ一致率は増加する。ここでは、全 6 水質項目と流量も含めて検討している。一致率は最大で、 $m=2$ の場合で 45.2%、 $m=3$ の場合で 48.0%、 $m=4$ の場合で 49.7% となり、 $m=5$ になって一致率はやや増加して 50.1% であった。また、 m を 6 以上にすると一致率はやや減少していく。また、生物学的的水質階級の一致率が 1 階級だけずれる場合も含めた一致率 2 は、 m を増加して適当な水質項目を選択すれば、常に 80% 以上となり最大で 90% を越え

表-1 各理化学的水質項目数、項目などに対する生物学的的水質階級の推定最大一致率(全国一級河川)

項目数 $m=1$	項目 一致率(%)	n	SS 0.5	DO 2.3	COD 1.0	BOD 2.1	大腸菌群 0.9	pH 0.5	流量 0.8
	一致率(%)	n	41.4	34.4	40.4	30.9	29.5	23.1	25.1
$m=2$	一致率(%)	一致率2(%)	SS, COD	45.2	89.3	0.5, 1.5			*
$m=3$	一致率(%)	一致率2(%)	SS, DO, COD	48.0	90.5	0.6, 2.0, 0.8			
$m=4$	一致率(%)	一致率2(%)	SS, DO, COD, pH	49.7	90.5	0.7, 1.0, 0.6, 0.8			
$m=5$	一致率(%)	一致率2(%)	SS, DO, COD, BOD, pH	50.1	91.5	0.6, 1.1, 0.6, 0.8, 0.6			

*:以下、下段の数字は n 値

表-2 各理化学的水質項目数、項目などに対する生物学的的水質階級の推定最大一致率(富山県内河川)

項目数 $m=1$	項目 一致率(%)	n	流量 0.8	気温 2.5	水温 2.5	電導度 2.5	透視度 2.5	pH 2.5
	一致率(%)	n	24.4	27.3	32.7	33.6	29.1	49.1
	項目 一致率(%)	n	酸度 0.7	7ヶ所度 1.9	DO 0.9	TSS 2.5	COD 1.4	NH_4^+-N 1.3
	一致率(%)	n	41.8	43.6	30.9	36.4	42.7	55.5
$m=2$	一致率(%)	一致率2(%)	pH, NH_4^+-N	59.1	97.3	2.4, 1.9		*
$m=3$	一致率(%)	一致率2(%)	pH, COD, NH_4^+-N	62.7	97.3	2.0, 2.1, 1.5		
$m=4$	一致率(%)	一致率2(%)	透視度, pH, COD, NH_4^+-N	63.6	95.5	1.8, 2.2, 1.0, 1.6		
$m=5$	一致率(%)	一致率2(%)	水温, pH, DO, COD, NH_4^+-N	65.5	95.5	1.9, 1.4, 0.5, 1.4, 1.4		
$m=6$	一致率(%)	一致率2(%)	水温, 透視度, pH, DO, COD, NH_4^+-N	66.4	95.5	1.9, 1.6, 2.0, 0.5, 1.1, 1.2		
$m=9$	一致率(%)	一致率2(%)	水温, 電導度, 透視度, pH, 酸度, 7ヶ所度	68.2	95.5	0.6, 1.0, 1.9, 0.6, 1.4, 0.7		
			DO, COD, NH_4^+-N			0.5, 0.8, 1.3		

*:以下、下段の数字は n 値

る。各理化学的水質項目の度数分布とここで用いた分布関数を比較すると、DO, COD は実際の分布状態をよく表しているが、他の項目は実際の分布状態と用いた分布関数に隔たりがあり、特に ps 階級の分布関数の隔たりが大きい。

富山県内の河川の場合、流量、気温、水温、電気伝導度、透視度、pH、酸度、アルカリ度、DO、TS (全固形分)、COD、 NH_4^+-N の 12 水質項目について考慮した。資料数は 125 である。表-1 と同様の計算の結果の一部を表-2 に示した。水質項目数 m が 1 の場合、一致率は 24.4 ~ 55.5% で幅が広く、特に pH のみで 49.1%、 NH_4^+-N のみで 55.1% でかなり高い一致率となる。水質項目数 m を増やすと、一致率は最大で、 $m=2$ の場合で 59.1%、 $m=3$ の場合で 62.7%、 $m=4$ の場合で 63.6%、 $m=5$ で 65.5% と上昇し、 $m=6, 7, 8$ の場合で 66.4% ($m=5$ の場合に順次透視度、酸度、アルカリ度が加わる。) と微増し、 $m=9$ の場合で 68.2% となり、ほぼ 70% の一致率となる。ただし、 m が 10 以上になると一致率はやや減少する。このように、化学的水質項目のみでなく水温や透視度などの物理的項目も加えることにより一致率が上昇することが考えられる。しかし、全国河川の場合と同様に、流量は一致率の上昇には効果がなかった。富山県の河川について、計算結果の一部を示したのが図-7 である。図で、 o, a, b, p はそれぞれ $os, \beta ms, ams, ps$ 階級を示す。各分布図で右上の文字 o, a, b, p が実測の生物学的的水質階級を示す。

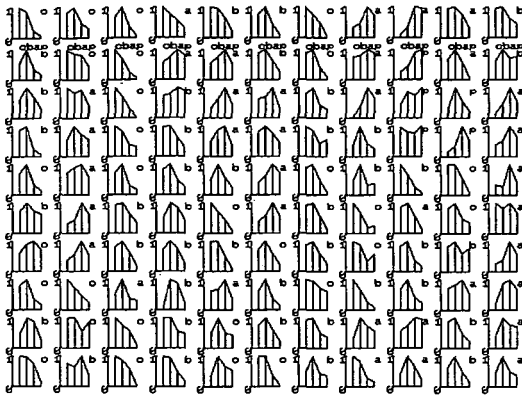


図-7 分布関数計算例(富山県内河川9水質項目)

ここでは、各資料の計算において生物階級水質値 F_i の最大値で各生物階級水質値を除し、最大値1として表している。これらは各水質項目の各生物学的水質階級に関する分布関数が決まれば簡単に計算でき、図のようにパソコンの画面にその結果を描き出すことができる。これで見るとほとんどの資料が図-4で示したような形状となり、即座にその生物学的水質階級を判定することが可能である。また、分布の凸部の形状あるいは左右への傾きの度合いにより、生物学的水質階級における汚濁度が視覚的に明らかとなる。ここで、生物階級水質値が最大の階級と実際のその水域の測定生物学的水質階級が一致すればよいことになるが、一致しなくても、図-7のように一致率が70%程度になり、さらに一致率が95%以上、すなわち生物学的水質階級の推定のずれが1階級以下である比率が95%以上であると、全体としてはこれらの水域の汚濁状況は十分によく表れていると考えられる。

また、詳細は述べないが九州地方の河川の場合(資料数は155)、DO, COD, BOD, 大腸菌群, NH_4^+-N , NO_3^--N , SSの7水質項目について検討した結果、一致率は最大で $m=5$ で57.5% (DO1.8, COD2.2, BOD1.5, NH_4^+-N 0.5, SS1.5:数字は n 値), $m=6$ で最大57.5% (DO0.9, COD2.1, BOD1.2, 大腸菌群0.5, NH_4^+-N 0.5, NO_3^--N 2.5:数字は n 値)となった。

この方法では、表-1, 表-2からもわかるように、理化学的水質項目数を増加させると、1項目で一致率が高い項目から、順に選択され、また同一項目の n 値は、項目数によらずほぼ一定している傾向があった。そして以上のように、適当な理化学的水質項目を数項目選ぶことにより、生物学的水質階級の推定がある確度で可能となっていた。

表-3 主成分分析結果(7水質項目)

主成分	Z ₁		Z ₂		Z ₃	
固有値	2.581		1.118		1.037	
累積寄与率%	36.9		52.8		67.7	
項目	e.v	s.v	e.v	s.v	e.v	s.v
1. SS	0.335	0.538	-0.559	-0.591	-0.375	-0.382
2. DO	-0.461	-0.740	0.022	0.023	-0.065	-0.066
3. COD	0.551	0.885	-0.142	-0.151	-0.203	-0.206
4. BOD	0.462	0.742	0.358	0.378	-0.099	-0.101
5. 大腸菌群	0.214	0.343	0.037	0.039	0.687	0.700
6. pH	0.174	0.280	0.728	0.770	-0.251	-0.256
7. 生物階級	0.289	0.464	-0.085	-0.090	0.519	0.528

e.v : 固有ベクトル s.v : 因子負荷量

3. 生物学的水質階級を考慮した水質総合指標

(1) 水質総合指標の導入

1., 2. で述べたように理化学的水質指標と生物学的水質階級はそれぞれに特徴を持つ。これら両指標の利点、欠点を合い補う形での指標の開発の意義はこの点にある。これら両指標を取り込んだ新しい指標を考えることにより、互いの利点、欠点を合い補う形で指標が得られる。ここでは、生物学的水質階級を数値として取り込んだ主成分分析¹¹⁾により、両指標の特性を生かした総合指標の導入を試みる。水質総合指標に関してはいくつかの考え方^{12), 13)}があるが、ここでは多くの水質指標を集約した指標という意味で考える。主成分分析の河川水質資料の解析への適用はかなり以前から行われてきた^{14), 15)}。また、主成分分析による水質の総合指標の導出に関しては、これまでいくつも行われており^{11), 16)~18)}、再現性も十分で¹⁹⁾、また一定の結果を導き出せる方法^{20)~22)}であると考えられる。

水質総合指標に関しては、指標により一般性を持たせるため、資料が日本の多くの河川について数多くそろっている、一級河川のものを対象に考えた⁵⁾。まず、理化学的6水質項目に生物学的水質階級を加えた7水質項目による主成分分析の結果を表-3に示す。この場合、生物学的水質階級の値が必要となるが、近年、生物学的水質階級の判定を数値化することにより行うために取り入れられている汚濁インデックス $S^{10)}$ を参考にした。各生物学的水質階級の汚濁インデックスの中間値をとり、 os は1.25 ($S=1.0\sim1.5$)、 β_{ms} は2.00 ($S=1.5\sim2.5$)、 α_{ms} は3.00 ($S=2.5\sim3.5$)、 ps は3.75 ($S=3.5\sim4.0$)として計算した。この場合の各主成分の解釈は以下のように、全体としてこれまでの結果と一致している¹⁾。各水質項目の因子負荷量の大きさから考えて、固有値が1以上の因子についてその解釈は以下ようになる。第1主成分では、因子負荷量はDOが負で大きいほかは、他の項目はすべて正でありCOD, BOD, SS, 生物学的水質階級が大きくなっている。したがって、第1主成分は総合的な汚濁の質的な大きさ、すなわち汚濁強度の大きさを表す因子と考えられる。第2主成分では、pH

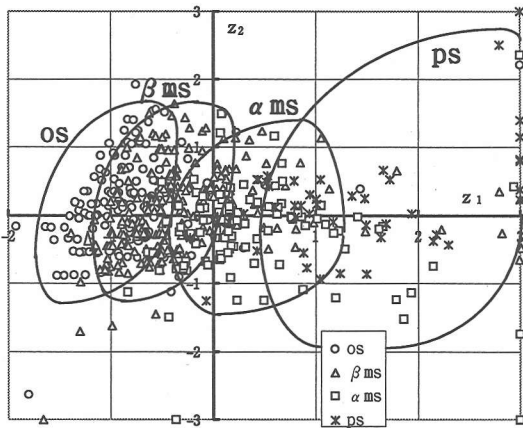


図-8 Z₁-Z₂軸上のスコア分布
(図上のZ₁=3, Z₂=-3の点はこの図の領域外の因子スコアの大きい点である.)

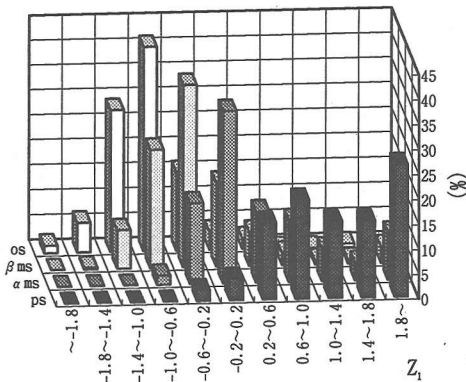


図-9 Z₁スコアの生物学的な水質階級別頻度分布
(7水質項目 各区分の数字は一以上～未満)

とSSの因子負荷量がそれぞれ正負で大きく、浮遊性汚濁を表す因子とも考えられるが解釈はやや困難な因子である。第3主成分は、因子負荷量が高いのは大腸菌群と生物学的な水質階級であり、大腸菌群による汚濁あるいは尿毒性の汚濁の大きさを表す因子となる。ここで、第2, 第3主成分は因子の解釈がやや困難であったり、あるいはそれぞれ単独の項目で表した方がわかりやすい因子であり、総合指標とはなりにくい。しかし、第1主成分は総合的な汚濁の強度の大きさを表す因子となっており、総合指標として意味があると考えられる。各生物学階級別の各資料(各地点)のZ₁-Z₂軸平面上の大まかな分布は図-8、Z₁因子スコアの頻度分布は図-9のようになる。これを見ると、資料は各生物学的水質階級に応じて、分離して分布していることがわかる。すなわち、第1主成分は生物学的な水質階級の特性が生かされた総合指標になっているといえる。このことは、ここで用いた

表-4 主成分分析結果(6項目)

主成分	Z ₁		Z ₂		Z ₃	
固有値	2.439		1.116		0.970	
累積寄与率%	40.7		59.3		75.4	
項目	e.v	s.v	e.v	s.v	e.v	s.v
1.SS	0.358	0.559	-0.595	-0.628	-0.254	-0.251
2.DO	-0.465	-0.727	0.017	0.018	-0.033	-0.032
3.COD	0.578	0.902	-0.168	-0.178	-0.080	-0.079
4.BOD	0.492	0.768	0.338	0.357	0.000	0.000
5.大腸菌群	0.208	0.324	0.083	0.088	0.901	0.888
6.pH	0.191	0.299	0.705	0.745	-0.339	-0.334

e.v : 固有ベクトル s.v : 因子負荷量

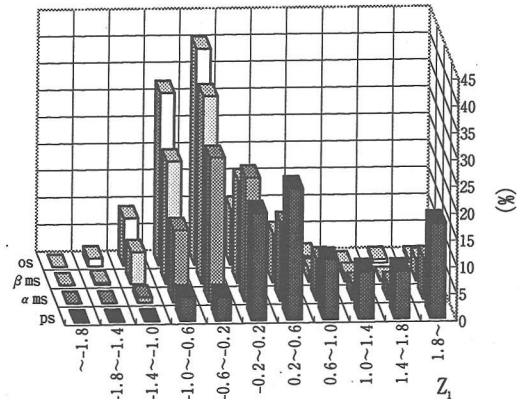


図-10 Z₁スコアの生物学的な水質階級別頻度分布
(6水質項目 各区分の数字は一以上～未満)

ものと同一の資料による生物学的な水質階級を除いた6水質項目による主成分分析の結果と比較するとよりはっきりする。6水質項目による主成分分析の結果は、表-4、図-10に示すようになる。この場合、表-4からわかるように各水質項目の因子負荷量から考えて、第3主成分まで、7水質項目の場合とまったく同様の主成分の解釈がなされる。第1主成分因子スコアの分布を見ると生物学的な水質階級の低いほどZ₁因子スコアが小さい傾向はあるが、図-9に比べZ₁因子スコアの度数分布は、各生物学的水質階級の分布にかなりの重なり部分があり、階級に応じた分布の分離度合いは7水質項目の場合に比べ、明確ではない。

また、上記の7水質項目に5つの流出負荷量項目を加えた12水質項目による主成分分析の結果を表-5に示す。各主成分の解釈は次のようになり、流出負荷量項目を加えた主成分分析のこれまでの結果とほぼ一致している¹⁾。この場合、総合特性値として、次の2つの主成分が得られる。第1主成分は、総合的な汚濁総量のレベルを表す因子、第2主成分は、総合的な汚濁の度合い(強度)を表す因子である。ここで第2主成分が、前述の7あるいは6水質項目の場合の第1主成分に相当する因子である。これら2つの主成分がそれぞれ汚濁総量のレベルと汚濁の強度を表す総合指標として意味があるものと

表一5 12 水質項目による主成分分析の結果

主成分	Z ₁	Z ₂	Z ₃
固有値	3.553	2.625	1.531
累積寄与率 %	29.6	51.5	64.2
項目	e.v. s.v	e.v. s.v	e.v. s.v
1. SS	0.067 0.127	0.258 0.418	-0.138 -0.171
2. DO	0.014 0.027	-0.463 -0.750	0.054 0.067
3. COD	0.105 0.197	0.525 0.850	-0.153 -0.189
4. BOD	0.039 0.073	0.486 0.788	-0.125 -0.154
5. 大腸菌群	0.070 0.132	0.186 0.302	0.672 0.831
6. pH	-0.063 -0.119	0.255 0.412	-0.107 -0.132
7. 生物階級	0.157 0.295	0.250 0.406	0.080 0.098
8. SS負荷量	0.455 0.858	-0.048 -0.078	-0.151 -0.187
9. DO負荷量	0.481 0.907	-0.174 -0.281	-0.080 -0.089
10. COD負荷量	0.482 0.908	-0.075 -0.121	-0.126 -0.156
11. BOD負荷量	0.491 0.926	0.010 0.017	0.010 0.012
12. 大腸菌群負荷量	0.194 0.365	0.082 0.132	0.652 0.806

e.v.:固有ベクトル s.v.:因子負荷量

考えられる。また、これら12水質項目の中から生物学的水質階級を除いた同一資料での11水質項目による主成分分析でも、第4主成分まで12水質項目の場合とまったく同じ、主成分因子が得られた。これら12水質項目、11水質項目それぞれの場合の各資料のZ₁-Z₂平面上での分布、Z₂因子スコアの生物学的水質階級ごとの度数分布をここでは示さないが、この場合も、生物学的水質階級を含む主成分分析における因子スコアの分布をみると、それを含まない場合に比べ各生物学的水質階級毎の資料がそれに応じて分布しており、その特性が生かされているものとなった。ただし、その分布は、7水質項目の場合に比べ、やや不明確となった。

(2) 水質総合指標の利用

総合指標Z₁の利用の方法について考える。まず、河川水の利用の価値を示す基準としての生活環境に関わる環境基準と総合指標Z₁を比較してみる。図-11(a)に表-6に示した河川の水質階級と各生物学的水質階級の平均値から計算されるZ₁軸上のZ₁因子スコアの分布を示した。表-6の環境基準値は環境基準項目以外については表のように仮定値を設定している。また、表-7に各水質項目について、ある変動単位を設定した場合の、それぞれに対するZ₁因子スコアの変動値を示した。各水質項目の変動単位が基準化した変数⁽¹⁾で1の場合は、当然Z₁因子スコアの変動値は表-3の固有ベクトル値となる。表-7からは、それぞれの水質項目の変動単位の数にも関係するが、DOの変動によるZ₁因子スコアの変動が大きいことがわかる。図-11(a)で、Z₁軸上の環境基準値に対応するZ₁因子スコアと各生物学的水質階級の平均値から計算されるZ₁軸上のZ₁因子スコアを比較するとわかるように、表-6で設定した環境基準に対応する生物学的水質階級からみると1~2階級下の値となっている。これは上述のように、DOの影響が大きいことから、表-6の環境基準値のDOが、実際河川、あるいは少なくともここで用いた河川の値に比べ、表-6中の各生物学的水質階級のDOの

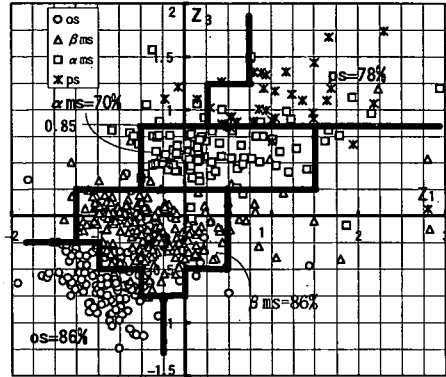
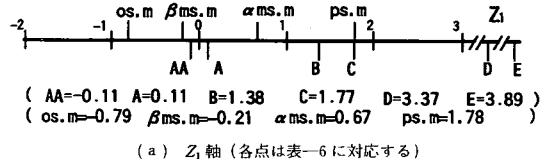


図-11 Z₁軸およびZ₁-Z₃座標軸上の因子スコアの分布 (b) 図の生物学的水質階級の百分率は太実線領域内の資料数の各階級毎の資料数に対する比率を表す。

表-6 環境基準値と各生物学的水質階級の平均値

環境基準	SS (mg/l)	DO (mg/l)	COD (mg/l)	BOD (mg/l)	大腸菌群 (×10 ³ MPN/100ml)	pH	生物学的水質階級
AA	25	7.5	(1)	1	50	7.5	(1.25)
A	25	7.5	(3)	2	1000	7.5	(1.25)
B	25	5.0	(5)	3	5000	7.5	(2.0)
C	50	5.0	(8)	5	(5000)	7.5	(2.0)
D	100	2.0	(10)	8	(10000)	7.25	(3.0)
E	(100)	2.0	(15)	10	(10000)	7.25	(3.0)
os.m	14.5	10.1	2.6	2.1	35900	7.32	1.25
βms.m	32.4	9.6	3.9	2.3	40400	7.31	2.0
αms.m	105.5	9.1	6.1	3.1	65500	7.25	3.0
ps.m	37.5	8.2	8.2	10.8	333000	7.20	3.75

()内は仮定値、pHは範囲内の中間値
 生物学的水質階級は、os=1.25, βms=2.0, αms=3.0, ps=3.75
 os.m, βms.m, αms.m, ps.mは、それぞれの階級の平均値であることを表す。

表-7 各水質項目値の変化に対するZ₁, Z₃因子スコアの変動値

変動単位	SS (mg/l)	DO (mg/l)	COD (mg/l)	BOD (mg/l)	大腸菌群 (×10 ³ MPN/100ml)	pH	生物学的水質階級
	10	1.0	1.0	1.0	20	0.1	1
Z ₁	0.017	-0.309	0.086	0.044	0.013	0.042	0.376
Z ₃	-0.019	-0.044	-0.032	-0.009	0.041	-0.061	0.507

平均値を見ても分かるように、低すぎることに由来と考えられる。一方、図-11(a)に示された各生物学的水質階級の平均値に対応する点は、各平均値とも大腸菌群値は大きい。これは、各生物学的水質階級別資料中に非常に大きな大腸菌群値をとるものがあることにより、大腸菌群の各生物学的水質階級別平均値がかなり大きな値

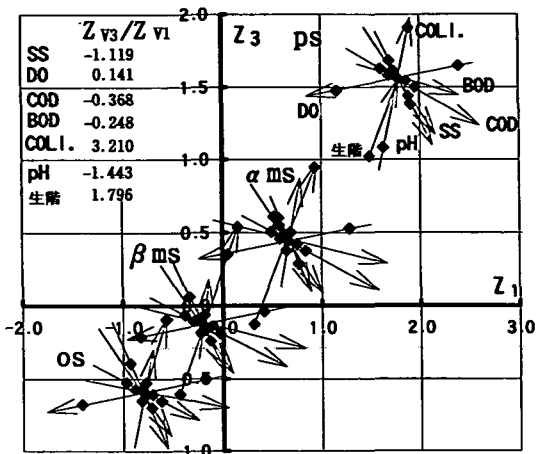


図-12 各生物学的水質階級別の水質平均値による (Z_1, Z_3) 因子スコア座標値とその周辺の変動 (coli. は大腸菌群, 生階は生物学的水質階級)

となっていることによる。このように、各水質項目により Z_1 因子の値に及ぼす影響は異なる。しかし、各水質項目の変動による Z_1 因子スコアの変動の大きさを知ることができるので、上記の環境基準値あるいは各生物学的水質階級別の平均値に対する Z_1 因子スコアを目安にして、各河川水域の水質環境の評価、比較が可能であると考えられる。

次に、各河川の水質状況を総合指標 Z_1 ともう一つの主成分 Z_3 の2つの値を使って表すことを考える。図-11 (b) は Z_1-Z_3 平面上での因子スコアの生物学的水質階級別の分布を示す。この図では、領域外にプロットされる異常に大きな値については除いてある。さらに、図の太実線は大きさ0.25のメッシュを用い、各生物学的水質階級毎に分けたものであるが、各階級毎の資料にかなりはっきりと分けられることがわかる。これは、第1主成分だけでなく、第3主成分の生物学的水質階級の因子負荷量も0.528と大きいことによる。なお、*ams* 階級と *ps* 階級の境界だけは、 Z_3 因子スコアの値が0.85を境にこの2つの階級に分かれる資料が多いことから、 Z_3 因子の値は0.85にとってある。図-12には、表-6に示した各生物学的水質階級の各水質項目の平均値から得られる (Z_1, Z_3) 座標値を中心点とした、各水質項目の変化に伴う座標値の変動を示した。矢印は、7水質項目のうち1項目のみの値を増加させ、他の項目は平均値のままとした場合の座標値の変化の方向を示す。ここで、各水質項目で矢印の方向は Z_{v1}/Z_{v3} = 第3主成分固有ベクトル/第1主成分固有ベクトルとなり、図のどの生物学的水質階級群でも水質項目ごと等に等しい。また矢印の中心の両側のプロットは、各生物学的水質階級の平均値に対して、それぞれの方向、すなわち1水質項目の値の

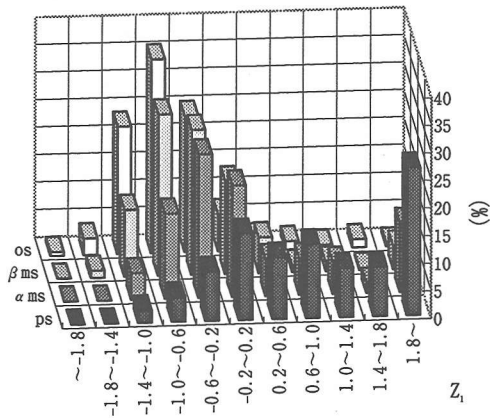
みを変化させた座標値である。この場合、どの生物学的水質階級でも平均値に対し、SSは±30 (mg/l)、DO、COD、BODは±2.0 (mg/l)、大腸菌群は±30 ($\times 10^3$ MPN/100 ml) 変化させた点を示した。生物学的水質階級はその階級の両側または片側に1階級ずらした点を示した。ただし、*ps* 階級では、SSが平均値が小さいので10 (mg/l) と100 (mg/l) の場合、大腸菌群は平均値が大きいのので100 ($\times 10^3$ MPN/100 ml) と500 ($\times 10^3$ MPN/100 ml) の場合を示した。*ams* 階級では、SSが平均値 (105.5 (mg/l)) が大きいので20, 50, 80 (mg/l) の場合を示した。pHはどの生物学的水質階級も7.0と7.5の場合を示した。この図から、どの生物学的水質階級群の点も図-11 (b) に太実線で示した生物学的水質階級の分布のそれぞれの領域内にほぼ分布していることわかる。この図でも、DOによる Z_1 スコアの変化が大きいことがわかる。詳細は述べないが、DOは各生物学的水質階級とも、広い範囲にわたり分布している。したがって、これらのことが相まって、各生物学的水質階級毎の資料の分布の境界部が重なることと関連していると考えられる。また、大腸菌群は、 Z_1 に比べ Z_3 因子スコアに強く影響するが、全体としては値が大きいため、表-7からもわかるように、10000 (MPN/100 ml) 単位の変動がないと、 Z_1, Z_3 因子スコアの変動には大きく影響しない。すなわち、環境基準のような5000 (MPN/100 ml) 以下のような範囲の変化に対しては、 Z_1, Z_3 ともに敏感には反応しない。しかし、このように (Z_1, Z_3) 座標値は、資料に生物学的水質階級値を含むことにより、極端に平均値からはずれた項目がない限り、図-11 (b)、図-12に示した生物学的水質階級別の分布領域付近の値をとり、視覚的にも明確な、総合指標 Z_1 を補完する形の、水質総合評価値となっている。

以上のように、総合指標値 Z_1 あるいは (Z_1, Z_3) 座標値で水質を評価できるということは、これらを総合指標として、もう一つの総合評価値による基準を設けることが可能であることを示す。すなわち、これらは、理化学的水質指標と生物学的水質階級の双方の特性を有し、なおかつ河川の水利用度の総合的評価基準の一つとなる総合指標値になっている。

4. 理化学的指標のみを使用した、生物学的水質階級を考慮した総合指標について

ここでは2. で試みた方法を用いて、理化学的水質指標のみより生物学的水質階級を推定し、それを主成分分析に取り込み水質総合指標を導くことを考える。この場合、理化学的水質指標のみより、生物学的水質階級も考慮された総合指標が導けることに特徴がある。

まず、次の手順で各資料より生物学的水質階級を推定



図—13 Z_1 スコアの生物学的な水質階級別頻度分布
(7水質項目, 生物学的な水質階級は推定, 各区分は以上〜未満)

する。

- 1) 各資料について, 1. で述べた各生物階級水質値 F_o, F_b, F_a, F_p を求める。
- 2) F_o, F_b, F_a, F_p を各生物学的な水質階級を大きいものから 1, 2, 3, 4 と順位付けする。
- 3) 生物学的な水質階級値 b_i は, 次式で算定する。

$$b_i = \alpha_i (0.8p_1 + 0.1p_2 + 0.05p_3 + 0.05p_4) \quad (4)$$

ここで, p_i : 順位 i の生物学的な水質階級の規定値 ($i=1\sim 4$)。規定値は, os は 1, βms は 2, αms は 3, ps は 4 として計算する。 α_i は補正值で, 順位 1 の生物階級が os の場合 0.893, βms では 0.941, αms では 1.043, ps では 1.042 である。

この計算で, 生物学的な水質階級値 b_i は順位 1 の生物学的な水質階級が os の場合で 1.21~1.29, βms では 1.93~2.07, αms では 2.92~3.08, ps では 3.70~3.80 をとることとなり, 前述の汚濁インデックス S とほぼ対応する。この生物学的な水質階級の推定値と, 先の 7 項目の主成分分析の結果を用いて計算した第 1 主成分の因子スコアの生物学的な水質階級別の頻度分布を図—13 に示す。3. で述べた原資料による主成分分析の結果とはやや異なる結果となる。これをみると生物学的な水質階級毎の分布の分離度合いは, 原資料による場合ほど明確ではないが, 6 理化学的水質項目の場合 (図—10) に比べると良くなっており, 生物学的な水質階級を取り入れた効果が現れている。このことは, 各生物学的な水質階級の値を 3. でも述べたように, os は 1.25, βms は 2.00, αms では 3.00, ps では 3.75 として Z_1 因子スコアとの相関係数をみた場合, 6 水質項目の場合は 0.300, この場合の 7 水質項目の場合は 0.350 となることにも表れている。

結論的には, 理化学的水質階級のみを用い, 生物学的

水質階級を考慮した総合的水質評価指標を得るためには, いかに理化学的水質資料から生物学的な水質階級を正確に推定できるかが重要になる。しかし, 両指標では, 理化学的水質指標が瞬時的な, 狭い範囲の水質環境の情報であるのに対し, 生物学的な水質階級は時間平均的, 地域平均的な情報であるというような違いがある。ただ一方では, 同じ水質環境に関する異なる表現法であるという側面もあるので, ここに用いた方法によるよりも, さらに大きいある確度で推定することも不可能ではないと考えられる。生物学的な水質階級の判定にも専門的知識と労力, 時間が必要であることを考えると, 理化学的水質指標のみから, 上述の方法で総合的水質評価指標が計算されれば, 生物学的な汚濁指標に関する一定の確度の情報も含んだ総合指標が, 比較的簡単に得られることになる。

5. 結 語

本報では, まずこれまでの理化学的水質指標, 生物学的な水質指標, 両指標の関連解析の知見をもとに, 以下のことについて述べた。

- 1) 理化学的水質指標から生物学的な水質階級を推定することが, ある一定の確度で可能であった。この場合, 水域の物理的環境因子を考慮することにより, 推定精度を高めることができる。
- 2) 1) の推定法では同時に, パーソナルコンピュータを利用することにより, 汚濁状況を図形化して他の水域と比較しながら見ることができる。
- 3) 主成分分析に生物学的な水質階級を数値化して取り込むことにより, 理化学的水質指標と生物学的な水質指標の両方の特性を兼ね備えた総合指標を導くことができた。
- 4) 3) で導かれる総合指標の具体的な利用法として総合指標による河川的生活環境に関わる環境基準を設定し, 水利用の観点から総合指標値を用い, 河川水の利用価値の評価を行うことなどの利用法を例示した。
- 5) 1) の推定法を利用して, 理化学的指標のみから生物学的な水質階級を考慮した総合指標を求めることが可能であることを示した。

以上のような結果が得られたが, 今後, ここで提案した理化学的な水質指標から生物学的な水質階級を推定するための手法については, 水質項目の選定, 分布関数についてさらに吟味する必要があると考えられる。また, 総合指標の利用法についても, 理化学水質項目の選定を含め, 実資料による解析を重ねることなどによりさらに有効なものにできると考えられる。

参考文献

- 1) 能登勇二, 安田正志: 河川水質の総合的評価に関する研究, 土木学会論文報告集第 338 号, pp. 79-88, 1983. 10.
- 2) 安田正志, 中村郁子: 河川における生物学的水質判定と理化学的水質調査, 土木学会論文報告集第 228 号, pp. 55-64, 1974.
- 3) 安田正志, 能登勇二, 森下郁子: 理化学的水質指標と生物学的水質指標の関連性, 日本陸水学会第 42 回大会講演概要集, 1977. 10.
- 4) 能登勇二, 天野智頂: 生物学的水質指標と理化学的水質指標の関連解析, 富山県立技術短期大学研究報告, Vol. 20, pp. 24-27, 1986. 3.
- 5) 日本河川協会: 日本河川水質年鑑 (1975 年版), 山海堂, 1976.
- 6) 2) と同じ
- 7) 3) と同じ
- 8) 日本河川協会: 日本河川水質年鑑 (1978 年版, 1981 年版, 1985 年版, 1987 年版, 1990 年版), 山海堂, 1979, 1982, 1986, 1988, 1991.
- 9) 能登勇二: 河川水質の現況と基礎的統計量による降・積雪が河川水質に与える影響に関する検討, 1995. 6, 未発表.
- 10) 森下郁子: 生物からみた日本の河川, 山海堂, 1978.
- 11) 奥野忠一ほか: 多変量解析法, 日科技連, 1971.
- 12) 原沢英夫, 石橋良信, 内藤正明: 河川水質の総合指標化に関する一考察, 衛生工学研究論文集, Vol. 24, pp. 295-303, 1988.
- 13) 合田健編: 水環境指標, 思考社, 1979.
- 14) Shannon, E. E. and Brezonik, P. L.: Eutrophication Analysis; a multivariate approach, *Proc. of ASCE SA. division*, 1972. 2.
- 15) 南部祥一, 真柄泰基: 湖沼水質の評価方法に関する一考察, 第 2 回環境問題シンポジウム講演集, pp. 61-66, 1974.
- 16) 能登勇二, 安田正志: 河川水質の総合的評価に関する研究, 富山県立技術短期大学研究報告, 第 12 巻, pp. 37-43, 1979. 3.
- 17) 岡敬一, 吉見洋, 井口潔, 関野弘子: 総合水質指標による神奈川県河川水質の解析, 水質汚濁研究, Vol. 6, No. 6, pp. 41-47, 1983.
- 18) 藤本千鶴, 広嶋昭太: 千葉県内河川水質の総合水質指標による経年変化の評価, 水質汚濁研究, Vol. 9, No. 11, pp. 724-731, 1986.
- 19) 能登勇二: 河川の水質状況と水質総合指標による評価, 富山県立大学紀要, Vol. 2, pp. 137-146, 1992. 3.
- 20) 中島重旗, 松並祐子, 小田泰史: 多変量解析法による阿蘇火山流域河川の汚濁評価, 水質汚濁研究, Vol. 10, No. 2, pp. 105-114, 1986.
- 21) Sabater, F., Sabater, S. and Armengol, J.: Chemical characteristics of a mediterranean river as influenced by Land Uses in the watershed, *Water Reseach*, Vol. 24, No. 2, pp. 143-155, 1990.
- 22) 朴永圭, 李哲熙, 鄭輝殊, 李淳和: 多変量分析による琴湖江の水質評価, 水質汚濁研究, Vol. 14, No. 1, pp. 38-46, 1991.

(1995. 10. 16 受付)

THE SYNTHETIC EVALUATION OF WATER QUALITY OF RIVERS BY BOTH THE PHYSICAL AND CHEMICAL INDEXES AND THE BIOLOGICAL INDEX

Yuji NOTO

In this report, first of all, the method to deduce the biological class (saprobic zone) from physical and chemical items of water quality of rivers was developed. Then, the synthetic evaluation of water quality or water pollution level of rivers from both the physical and chemical indexes and the biological index was done by the principal component analysis method (PCA). The first principal component of PCA was proved to be available for the evaluation of water quality or water pollution level of rivers. Using the physical and chemical variables and the biological variable deduced by the manner described above, the synthetic evaluation of water quality of rivers was done by PCA, and the first principal component was found to be the same factor as mentioned above.