

(3) 河川における水質環境の評価に関する研究

富山県立技術短大

安田正志

日本水道コンサルタント

加藤善盛, 白潟良一

○高橋邦夫, 向井松正

1. はじめに

一般にいう環境問題は、主として経済性に主眼をおいた人間活動の増大に全て起因している と考えてもよいだろう。大気汚染、公共水域の汚濁、さらに騒音、振動、日照問題等は、近年にみる住民意識の高揚もさることながら、おこるべくしておこった問題といえる。そして、これら問題に対処しようとするとき、重要なことは、対象とする問題の補まえ方であり、その基準となる評価についての議論である。例えば、水質汚濁問題を考えていくとき、一般に、水質環境基準という制約条件のもとで、人間活動の規制（汚濁発生の制御）を行なうというやり方が取られているが、実際は、汚濁発生の制御というよりはむしろ、発生汚濁の制御に終始している場合が多い。このため、このような制御方式のもとでは、発生汚濁物質質量が、何んらかの方法で把握できればよいということになり、現行の水質基準は、この趣意において確かに意味を持つ。

しかし、環境保全の目的は、環境を構成する幾多の要素間における共存システムの確立にある、という認識をベースとすれば、重要なことは、人間を含めた生物と、それらの活動の場の物理システムとのレスポンスを明らかにすることであり、さらに、その均衡点を見出すことである。

とすれば、例えば水質の評価は、人間を含めた生物環境に与える影響の把握があつてはじめて評価となり得、ひいては適切な汚濁発生の制御に結びつく。しかし、現行の水質評価は、理化学指標による一面的環境の把握しかなされていないといつてよい。

すなわち、水質評価は、理化学指標による定量化と、これに対応する生物相との因果関係の把握があつてはじめて行なえるものであり、強いていえば、現行の理化学調査は、生物相に対するすでに明確な、あるいは、はっきりと予想されるような「影響」と結びつけてはじめて、適切なものとなりうるわけである。以上をフローにまとめたのが図-1である。

本稿は上記の立場にもとづき、河川における水質評価を、「影響」の分析という観点から、理化学指標に生物学的指標を対峙させ、地域に無関係な共通因

子と地域に関連する因子の抽出を目的として地域特性の異なるA、B2地域を対象とし、指標相互間の関連性、周辺状況（河床状況など）との関連分析を試みたものである。

なお、本論文の構成は、以下2.において、理化学指標と生物学的指標について特徴を明らかにし、3.では周辺状況と生物学的指標の関連を、4.では、A、B2地域における分析結果（主成分分析法等による統計的方法による）について述べ、5.でこれらを総括する。（分析フローを図-1に示す）

2. 理化学指標と、生物学的指標について

理化学指標と、生物学的指標の各々の特性は、前者は、水質変化の微分的すなわち瞬時瞬時の特性を表わし、後者は、積分的効果を表わしている。また一方が、定量的把握であるのに対し、他方は定性的であることから、定量的汚濁度に対する生物相の反応を調べるというアンケート調査的な意味を持っている。環境問

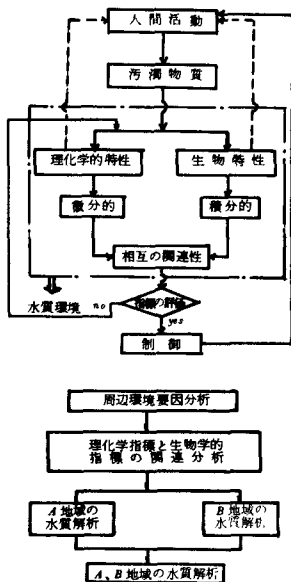


図-1 水質評価及び分析フロー

題の把握には、定量的尺度と定性的尺度の関連分析は、必要不可欠な事項であり、本稿はその一環と位置付けられる。

したがって、このとき特にデータのサンプリングの問題が生じてくる。地域における流域特性は無論のこと、季節変動等を考慮した理化学データの取扱いか、サンプルサイズ、及び精度等の諸問題がある。また、生物学的データについても、判定種、およびそれらの交代タームなどの問題が残されている。

しかし、現状において、水質評価データは、個別に採取されており、仮りに両者が得られているにしても測点が異ったり、あるいは測定時期の異なる場合がほとんどであるといつてよい。

本事例は、A、B2地域におけるデータに基づいたもので、両指標とも、ある1時期の、ある点における1回限りの調査である。生物学的階級はOS, β_m , α_m , β_p , α_p であり、表-1に、理化学的水質項目を総括する。

3. 周辺状況と生物学的指標について

環境に生息する生物は、その生物にとって好ましい場を欲求し、その結果、場を所有することになる。したがって、生物相の動態を記述するためには、水質との対比もさることながら、彼らの活動の場を把握しておく必要がある。

このため、河川における流れの場を基礎とし、水質物質の挙動を把握する必要があるが、本稿ではこれらについて適確なデータを得ておらず、とりあえず流況、底質物質等の定性的河川状況、さらに色相、水色、臭気、肉眼生物の有無等の視覚的、臭覚的要因をとり上げ、これを周辺状況と呼ぶことにし、これと生物学的指標の対応を試みた。

このとき、上記の定性的周辺状況項目の定量化のため、表-2に示すようなウェイト付け $\{E = \frac{1}{N} \sum \alpha_{ij}\}$ (α_{ij} ; 各階級におけるi地点のj項目におけるウェイト, N; 各階級におけるi地点数) を行ない各生物階級毎に評価点を求め、これら定量化したデータの相関分析を行なった。結果を表-3に示す。

これより特に、生物学的指標と相関を持つ項目は、底質物質、色相、肉眼生物、臭気であり、河川にはりついている人間活動の状況を明確に裏付けている。特に河床の底質物質では、コンクリートのような人工河川の環境では、強度の汚濁が示されている。ただし、流水状況データはある項目に集中しており、生物学的指標との関連は得られていない。こうした結果は、河川の水質評価に対する直覚的判断基準となり得る可能性を示しており、有効な情報と考えられる。

表-1 水質指標項目

1 DO	1 流量	1 電導度
2 TS	2 酸度	2 pH
3 COD-Mn	3 アルカリ度	3 DO
4 COD-Cr	4 DO	4 酸度
5 CE^{-}	5 TS	5 アルカリ度
6 NO_3-N	6 COD-Mn	6 TS
7 NO_2-N	7 COD-Cr	7 SS
8 全硬度	8 CE^{-}	8 NO_3-N
9 電導度	9 NO_3-N	9 COD-Mn
10 pH	10 NO_2-N	10 COD-Cr
11 酸度	11 NO_2-N	11 BOD
12 アルカリ度	12 全硬度	12 CE^{-}
13 水質データ項目 (A流域)	13 流量	13 全硬度
	14 NO_3-N	14 NO_2-N
	15 PQ	15 大腸菌
	16 流量	16 流量
	17 水質データ項目 (B流域)	

表-2 周辺状況項目のウェイト付け

流水状況	底質	色相	水色	臭気	肉眼生物
源	1 岩	1 無色	1 無	1 なし	1 魚虫
滝	2 レキ	2 透明	2 黄	2 土臭	2 産卵
フタ	3 砂	3 判透明	3 緑	3 水草	3 イトミミズ
セキ	4 泥	4 明	4 青	4 泥	
	コンクリート	5 黄	5 アイ	5 コグ	
		6 灰	6 乳	6 魚	
		7 濁	7 灰	7 腐臭	
		8 色つき	8 濁	8 し	
			9 黒	9 下水	

表-3 周辺状況の相関分析結果

項目	1	2	3	4	5	6	7
1 生物階級	1.00	0.09	0.58	0.13	0.49	0.47	0.55
2 流況		1.00	0.40	0.50	0.10	-0.01	-0.15
3 底質			1.00	0.02	0.37	0.29	0.37
4 水色				1.00	0.24	0.22	0.05
5 色相					1.00	0.31	0.30
6 臭気						1.00	0.30
7 肉眼生物							1.00

4. 理化学指標と生物学的指標の関連について

ここでは、水質の生物相に対する「影響」の把握という立場から、まずA、B2地域各々ごとに主成分分析法を適用し、各々の水質構造の特性を整理し、しかる後、2地域の水質構造の共通性の検討のために、両データを併わせ主成分分析をほどこし特に、生物学的指標に対する理化学的水質項目の分類という観点から考察を進めることにする。

4.1 A地域における分析

A地域は、富山県内水系であり、そのうち代表的28河川、測点94について、理化学的、及び生物学的な水質データを得ている。調査年度は、1972年夏期である。すでに筆者らは、本結果に対し、両指標間の関連を X^2 検定による相関分析を行ない、生物学的階級における理化学的水質指標との個別の対応、および濃度範囲を明らかにした。以下では理化学指標と生物学的指標の総合的な対応を通して、水質項目の分類を行なう。

まず、全水質データ(94サンプル、OS…29ヶ、 β_m …39ヶ、 α_m …26ヶ)に主成分分析を適用した結果を図-2に示す。

図に示すごとく、第1主成分では、正で大なる項目としてDO、負で大なる項目として、TS、COD-Mn、COD-Cr、全硬度、電導度、 NH_4-N であり、汚濁の度合(サイズ)を示す因子と解釈しうる。

第2主成分では、正で大なる項目は、COD-Mn、Cr、 Cl^- 、負で大なる項目としてTS、全硬度、電導度である。したがって、これは、汚濁の内容が有機性汚濁によるものか、あるいは、溶存イオン性を示すものかを規定する汚濁形態の因子と考えられる。

また、第3主成分では、正で大なる項目としてDO、 Cl^- 、負で大なる項目は、アルカリ度、 NO_3-N 、 NH_4-N が挙げられる。したがって、DO、 NO_3-N 、 NH_4-N に注目すれば、硝化反応を表す因子、もしくは、Nの流下過程を示す因子という解釈もできる。

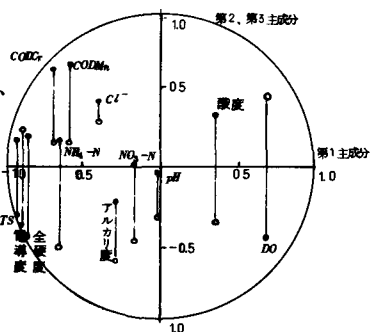


図-2 A流域水質データの主成分分析

このように、第1～第3主成分において、各々、汚濁のサイズ、汚濁の形態、汚濁の経過という解釈で整理した。次に、第1～第3主成分までの因子スコアによる各生物階級の度数分布を図-3に示す。本来ならば、各地点と因子スコアを対比させるべきであるが、ここでは因子スコア軸上における生物学的階級の出現頻度の大きな把握と、理化学水質項目の分類を意図している。したがって、図-3では、全データ94ヶの因子スコアの大きい順に10ヶずつを1グループとし、グループ内における度数分布を描いたものである。

まず、第1主成分因子スコア軸上では、スコアの左端にOSの出現度数が大きくあらわれ、スコアの減少とともに小さくなっていく。一方、 α_m は、OSとは逆のパターンを示し、 β_m では、スコア全域に渡って、ほぼ一様の分布をしている。これらは、第1主成分の解釈と一致している。

つぎに、第2主成分でも同様の結果が得られている。すなわち、汚濁形態のうち、COD-Mn、COD-Cr、 Cl^- 等の有機性汚濁指標が α_m の説明に大きく寄与している一方、電導度、全硬度等の溶存イオン性指標は、OSの説明に寄与していることを示している。したがって、これら結果より、DO、COD-Mn、COD-Cr、全硬度、電導度等の代表指標が生物階級の説明指標群として、有用であるといえる。また、第3主成分においては、こうした傾向は得られていない。

一方、 α_m 、 β_m 、OS各階級における各々の主成分分析の結果は、第3主成分において多少の差異はでてくるものの、全体の傾向は変わらなかったと判断し省略する。

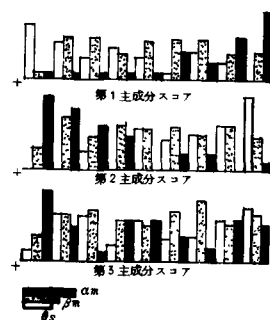


図-3 主成分スコア度数分布図

つぎに、主成分分析による結果の考察をもとに生物学的階級区分のための有効理化学指標群（階級分けのための判別指標）の選択という観点から、同データに対し、判別関数法を適用した。結果を表－４に示す。

ここでは、理化学水質項目として１２ケを採用した場合および、主成分分析結果をもとに３項目（*DO*、*COD－Cr*、全硬度）を１セットとしたときの２ケースについて行なう。

このとき、原データの基準化等は行なっておらず、各項目間における比較は困難であるが、各階級間における係数の挙動に注目し考察を進めることにする。

まず、全理化学項目を採用するとき、特に *COD－Mn*、全硬度、電導度において係数比が大きく、これらが、階級の判別に大きなウェイトを持っていることになる。

一方、３因子による結果では、係数間の有為差は明確ではないが、判別結果は、ほとんど全理化学項目を採用した場合と同等である。そして結局汚濁度としての *DO*、有機性汚濁指標としての *COD*、溶存イオン性指標としての全硬度、あるいは電導度が、主成分分析、判別関数法による分析結果からも生物階級と密接に関連し、有効な説明因子を構成している。

また、ここには示さないが、負荷量データに対する主成分分析では、流量に代表される量の中に各水質特性が埋没し、項目間の内部構成については、新たな情報は得られなかったことをことうわておく。

4.2 B地域における分析

B地域の調査データは、栃木県内主要河川のうち６９河川、１３７点において、昭和４５年度夏期に理化学調査を、４６年度冬期に生物学的調査を行ったものである。ここで、両指標間の時期的ずれの問題があるが、地域に関係もしくは無関係な因子を抽出する事を目的とするためA地域と同様の分析を行なう。また、以下では、A地域の結果を考慮し、水質項目についてのみ、各生物階級との対比を行なう。

まず主成分分析の結果を図－４に示し、以下に総括する。

第１主成分では、負で大なる項目として *DO*、正で大なる項目として、*TS*、*COD－Mn*、*COD－Cr*、*BOD*、伝導度が得られており、有機汚濁の程度を表わす因子と解釈される。

また、第２主成分では、正で大なる項目として NO_3-N 、 NO_2-N 、負で大なる項目は *DO* であり、硝化反応を表わす因子と解釈される。また、本因子は、間接的に、流下に伴なう水質変化を表わす因子ということもできよう。

第３主成分では、正で大なる項目として NO_2-N 、 NO_3-N 、*PH*、負で大なる項目として流量、酸度が得られ、第２主成分と何んらかの相関があると考えられる。また流量に注目すれば、希釈効果を表わす因子と考えることも可能ではあるが、本来、積分的機能を有する生物指標と希釈効果を対応づける時、存用な情報とはなりにくいと考える。

一方、第４主成分では、大腸菌、 PO_4^{3-} 等が大きく関与し、人畜活動による汚濁形態を表わす因子と解釈しうる。

以上は、１７ケの水質項目を対象に、汚濁の著しい α_p 、 β_p を含めた分析結果であるが、 α_p 、 β_p においては、*BOD*、*COD－Mn*、*COD－Cr*、電導度といった有機汚濁項目の変動が大きく、主成分分析の結果は、これらに左右されることが多い。したがって上記の結果は、 α_p 、 β_p という特定の水質階級における理化学的水質データに主に左右されていることも考えられる。そこで、つぎに、 α_p 、 β_p に属するデータを除き、

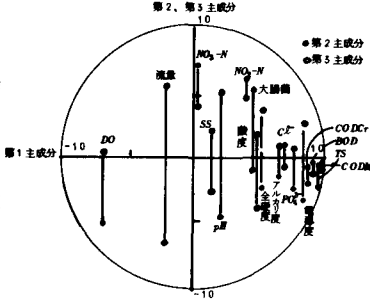
表－４ 判 別 関 数

項 目	α_m	β_m	θ_m
1 <i>DO</i>	18.97	18.40	18.930
2 <i>TS</i>	0.015	0.018	0.019
3 <i>COD-Mn</i>	0.590	0.507	-0.223
4 <i>COD-Cr</i>	0.746	0.606	0.844
5 <i>CE</i>	0.409	0.257	0.256
6 NO_3-N	40.281	33.090	33.270
7 NO_2-N	19.21	1.601	1.880
8 全 硬 度	-0.113	-0.176	-0.145
9 電 導 度	0.024	0.038	0.025
10 <i>pH</i>	-0.246	-0.205	-0.238
11 酸 度	1503	1330	1282
12 <i>大腸菌</i>	0.889	0.914	0.959
定 数	-9.7900	-9.0400	-9.4900

判別関数 その１（１２変数）

1 <i>DO</i>	1.1810	1.1780	1.2060
2 <i>COD-Cr</i>	0.851	0.740	0.740
3 全 硬 度	0.050	0.043	0.045
	-5.0100	-4.9300	-5.1600

判別関数 その２（３変数）



図－４ B流域の主成分分析結果

A地域と同様OS, β_m , α_m の3階級について主成分分析をほどこした結果について考察を加える。結果を図-5に示す。

また、各水質項目の因子負荷量から、各主成分毎に主要な項目をまとめ、表-5に示した。

まず第1主成分においては、先の結果と比較すれば、電導度、全硬度、 Cl^- といった溶存イオン性を表わす項目の寄与が大きくなっているのが特徴であるが、大略、汚濁の程度を表わす因子と解釈できる。また、第2、第3主成分では水質構造の変化がみられ、先の第2主成分が今回では第3主成分の中に表われてきている。

以上の結果から、生物環境に与える影響因子を抽出するためには、生物指標から決定される各生物階級内での水質構造を把握しておく必要がある。即ち、ある階級内における水質データの地点毎のばらつきの程度が、如何なる水質項目で左右されているかを調べなければならない。階級内での水質のばらつきは、さらに階級内の生物構造との関連で分析していくことが必要であるが、ここではまず、4つの生物階級内での水質構造を調べるにとどめる。結果を表-6に示す。これは各主成分に対する因子負荷量の大きい水質項目をまとめたものである。

これより、第1主成分はOS $\rightarrow$ $\beta_m \rightarrow \alpha_m \rightarrow \alpha_p$, β_p と汚濁階級が進むにつれて電導度、全硬度に代表される溶存イオン型から Cl^- が加わる人為汚染の中間型に変わり、 α_p , β_p では、BODに代表される有機汚染型に水質構造は進んでいくことが明瞭に示されている。また、共通因子は、OSを除いてCOD-CrとDOとなっている。

生物環境に与える影響因子としては、各階級内の変動の説明を小さく、各階級間の変動を大きく説明しうる水質項目が情報として有効であり、この観点から項目を選択すると、COD-Mnであり、共通項目も含めると、この他に電導度、DOとなる。

以上、B地域を対象とした場合を考察したが、結論的に、生物学的階級に対比しうる理化学水質項目として、COD、DO、電導度の有効性を指摘し、これは、A地域を対象とした場合と一致する。また、ここには示さないが、判別分析の結果、特に、COD、伝導度において有為差が見られ、上述の結果を裏付けていると見なすことができよう。

4.3 A、B両地域の分析

前節まで、A、B地域のそれぞれについて分析を進めてきたが、それらの考察の結果、汚濁構造に係わる水質項目の分類の一致性を考慮し、ここでは、A、B両地域を重ね合わせ、主成分分析を行なうことにする。なお、理化学項目として両方に共通な11項目を、生物階級としては、 α_m , β_m 、OSの3階級に限定する。分析結果を図-6に示す。

図に示すごとく、第1主成分は、有機汚濁の程度を表わす因子、第2主成分は、汚濁形態、特に有機性汚濁指標と、溶存イオン性指標による分類を表わす因子、第3主成分では、 Cl^- 、COD-Crに代表される人為汚濁を表わす因子と解釈でき、これら11項目の理化学項目に関する限り、DO、COD、電導度、全硬度の5因子の寄与が大きいといえ、4.1、4.2に述べた結果の要約となっている。

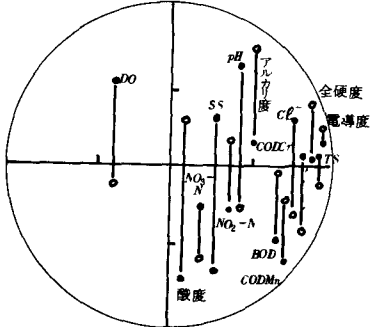


図-5 B流域 α_p , β_p を除く主成分分析

表-5 B流域、 α_p , β_p を除く主成分分析

主成分	正で大きな項目	負で大きな項目
Z ₁	(第一グループ) 電導度 TS、全硬度、 Cl^- (第二グループ) COD-Cr BOD	DO
Z ₂	DO、pH	酸 度
Z ₃	アルカリ度、全硬度	NO_3-N 、SS

表-6 B流域における各階級毎の主成分分析結果

主成分	全体(97ヶ所)	OS	β_m	α_m	$\alpha_p + \beta_p$
Z ₁	① TS、COD-Mn、 BOD、COD-Cr 電導度	電導度、TS、全硬度	Cl^- 、電導度、 COD-Cr	Cl^- 、BOD、 COD-Cr、電導度	TS、COD-Mn、 BOD、COD-Cr
	② DO	酸 度	DO、流量	DO	DO
Z ₂	① NO_3-N NO_2-N	COD-Mn、Q	PO_4^{3-} 、大腸菌	pH	流量、 Cl^- 、 SS
	② pH	PO_4^{3-} 、DO	アルカリ度、SS	アルカリ度、 NO_2-N 酸度	アルカリ度、 PO_4^{3-}
Z ₃	① pH、 NO_2-N NO_3-N	アルカリ度	酸 度	SS、COD-Mn	NO_2-N
	② 流 量	NO_3-N	DO、pH	全硬度、pH	アルカリ度 PO_4^{3-}

5. おわりに

本報は、水質環境の評価が、従来、理化学指標による一面的評価であったことに対する批判に立脚し、それが生物への影響を無視しては本来の水質環境の評価にはなりえないという認識のもとで、物理的周辺状況と生物学的指標の関連を考察し、さらに、理化学指標と生物学的指標の関連を総合的に把握することを目的に特に、生物指標に対する理化学指標の分類、整理という形で考察した。以下にこれらを総括し、今後の問題点について述べる。

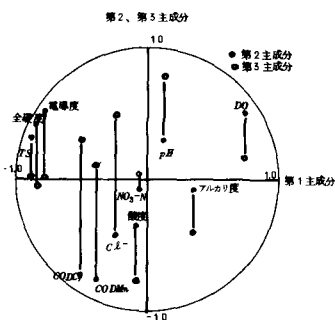


図-6 (A+B)流域の主成分分析結果

1) 周辺環境要因分析の結果、生物階級の判定において、視覚的、臭覚的定性データに強い相関がみられ、特に底質との関連性はきわめて強い。汚濁現象解析においてこうした知見は有用であり、水質調査においてこの様な周辺環境の把握は重要である。また現行における生物階級判定のための有力な情報となりうる可能性も十分にあると考えられる。

2) 主成分分析を用いた結果、A地域、B地域の水質構造の共通因子として、有機汚濁の程度が抽出され、各生物階級毎の因子スコア軸上の傾度分布から、生物学的階級と理化学水質指標の間には、特に有機汚濁の程度について明瞭な関連のあることを裏付けすることができた。

3) 第2、第3主成分については、A地域とB地域とは異なった解釈が得られ、特に第2主成分がA地域では、溶存イオン型有機汚濁型かという汚濁形態を表わしているのに対し、B地域では、硝化反応を含む窒素系汚濁を表わすファクターとなっており、地域特性によって異なる因子と考えられる。

4) B地域における各階級毎の水質構造分析の結果、OS → β_m → α_m → α_p 、 β_p という生物的汚濁階級が進むにつれて、電導度に代表される無機イオン型から、 Cl^- に代表される中間汚染型、さらに有機汚染型へと移行することが明らかとされ、各階級を区分する影響因子として、DO、電導度、COD-Mnが抽出された。

5) A、B両地域を併わせて主成分分析をほどこした結果、有機汚濁指標であるCOD、溶存イオン性指標である電導度、全硬度、汚濁の程度を示すDOの3要因が生物階級区分に大きく寄与していることが明らかとされた。したがってこれら指標の間に、生物階級構成への可能性が示されているといえるかも知れない。

6) B地域は、測点が同一で測定時期が異なっているにも係わらず、結果の解釈においては、明瞭にA地域との類似性を指摘し得た。これは生物指標の積分的特性と判断できる可能性を示しており、更に検証を要するところである。

以上は、あくまで数少ないデータからより多くの情報を引き出すという立場で分析を進めたものであり、当然のことであるが、今後、事例の積み上げ、結果の検証、解釈の拡張、方法論の改良を逐次進めなければならない。さらに、水質構造の把握のため、生物構造との対応が肝要であり、相互の影響度合を明らかにしなければならない。また今後、水質管理のため、水質評価はより広い角度から総合的に補まえていく必要があり、水質環境に注目した地域の係りを分析していく必要がある。

最後に、本報作成に当たり、熱心な討議をいただいた当社データ解析プロジェクトの各位、ならびに、終始理解を示された取締役専務海淵養之助氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 安田正志、中村都子；河川における生物学的な水質と理化学的水質調査、土木学会論文報告書、№228，PP55～64，1974
- 2) 安田正志、中村都子；河川の水質評価における理化学的水質と生物の関連性、土木学会論文報告集、№236，PP71～80，1975
- 3) 高橋邦夫；河川における水質評価としての生物学的指標と理化学指標の関連性について、N S C研究年報 Vol.4，№1，PP334～350，1976
- 4) 白潟良一他；水環境計画ならびに技術のためのデータ解析(1)、N S C研究年報 Vol.3，№2，1975
- 5) 津田松苗著；水質汚濁の生態学、昭和49
- 6) 日本生態学会環境問題専門委員会編；環境と生物指標2 - 水界編 - 、共立出版 昭和50