

湖沼水質の評価方法に関する一考察

国立公衆衛生院衛生工学部

南部 祥一

○奥柄 泰基

1. はじめに

水質基準には人の健康に係る基準と生活環境に係る基準とがある。人の健康に係る基準は、わかれわかれが日常接触する「水」の中に存在してはならないという原則に立脚して、その基準項目は選択され、また基準値は設定されるべきである。生活環境に係る基準はわかれわかれが日常「水」を利用するうえで不都合のないように、その利水目的を10に区分し、PH、BOD、COD、SS、DO、 α -ヘキサン抽出物、大腸菌群数の7項目の組み合わせで河川、湖沼、海域について定められている。しかしながら、河川ではBOD、湖沼、海域ではCODと有機汚濁物を違った指標で表わしていたり、基準項目のうち1項目でも基準値を越えれば不合格ということになり、現実の「水」利用の立場から見ると合理的に「水」を評価しているとは思えない。ところが、一方で水処理あるいは環境の水質とわかれわかれは基準に定められている項目のみで評価せず、20項目以上の水質項目で行なってきた歴史的背景があり、現在もこうしたデータが集積されている。しかしこれらのデータの利用も記述的な範囲にとどまり、シエネティックにそのデータの意味を汲み取ってきたとはいえない。

そこで、本研究においては数多くの水質項目からなる水質資料と統計解析し、数多くの水質項目の中から「水」の記述に不可欠ないくつかの水質項目を選び出し、それらの組合わせによる総合的な「水」の特性値を構築し、この特性値を用いて適切に「水」を評価する方法を検討した。この方法によれば、その過程で水質基準で定められている項目の重みや今後追加しなければならない項目についても科学的な根拠がえられるものと考えられる。

2. 解析方法

調査資料は昭和47年度より環境庁自然保護局により行なわれている国立公園湖沼水質調査の結果を主として用いた。資料を収集した湖沼は表-1に示す17湖沼である。

水質資料は上記の湖沼について行なわれた春夏秋冬、年々回調査の結果であり、全資料数は57で、水質項目は気温、水温、透明度、PH、DO、DO飽和度、SS、BOD、COD、 Cl^- 、 NH_3-N 、 NO_3-N 、 $T-N$ 、 PO_4-P 、 $T-P$ 、 SiO_2 、全アルカリ度、総硬度、 SO_4^{2-} 、一般細菌数、大腸菌群数の22項目である。

資料を収集した17湖沼の水質概況を知るために、各水質項目の度数分布図および主要水質項目について順序標本を作成した。ただし度数分布図は57資料につき、順序標本は前記22項目のうち欠測項目がある水質資料を除去した155資料につき求めた。つぎに重回帰解析を行ない、各水質項目の平均値、標準偏差ならび

表-1. 調査対象湖沼

湖 沼	面 積 (ha)	水 深 (m)		標 高 (m)
		最高水深	平均水深	
A. 十和田湖	5905	326.8	71	401
B. 琵琶湖	0.16	19	8.8	1390
C. 野尻湖	385.5	37	20.8	654
D. 山下の池	—	—	—	—
E. 小田池	—	—	—	—
F. 一碧湖	0.23	7	—	—
G. 中禅寺湖	1191	172	95	1271
H. 湯の湖	53	13	—	1478
I. 尾瀬沼	184	10	—	1665
J. 芦ノ湖	209	43.5	25	723
K. 河口湖	578	218	9.8	822
L. 山中湖	650	164	—	982
M. 本栖湖	505	133	65	902
N. 西湖	230	91	35	898
O. 精進湖	0.65	11.2	—	902
P. 田貫湖	33	5.5	—	658
Q. 八丁池	5	25	—	1170

に各水質項目ごとの相関係数、回帰係数を求め、さらに各水質項目を従属変数としたときの重回帰係数、重回帰係数を求めた。

ここで行った重回帰解析は、欠測項目のある水質資料の影響を少なくする方法を検討する意味も含め、水質項目数を少なくした場合、多くした場合など表-2に示す3条件について行った。また湖沼の水質を構成する普遍的な因子を検索し、その中から総合的汚染指標となりうる因子とそれを構成する水質項目を検討するため表-2の条件および条件3について主成分分析を行った。

3. 解析結果および考察

(1) 湖沼の水質分布および順列標本

湖沼の水質分布図を求め、その結果から各水質項目はほぼ表-3に示す分布型をとることが明らかになった。その結果、人為汚染と関連しないと思われる項目は正規分布としてあり、関連すると思われる項目は、対数正規分布にしたがうことがわかった。主要水質項目ごとに調査湖沼の順序を求めると表-4のようになった。富栄養化の指標とされている透明度、窒素、リン、(ただし、ここでは資料の数の関係で $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ を用いた)の順序標本はおおむね同じ傾向を示し、相互に関連性があることを示唆しているが、 SiO_2 、総硬度は前3項目の順序標本とは異なっており、湖沼固有の性格を示す指標であり、富栄養化の指標となりえないものと思われる。

(2) 重回帰解析

表-2に示す条件について重回帰解析を行った

表-2. 重回帰解析の条件

条件	項目数 資料数	水質項目
1	6 358	条件1の項目のうち、COD、SS、大腸菌群数、透明度については対数変換した値を用いた。
2	9 42	水温、透明度 [*] 、PH、DO、SS [*] 、COD [*] 、T-N [*] 、T-P [*] 、大腸菌群数 [*] 、(*対数変換した値を用いた)
3	14 189	水温、透明度 [*] 、PH、DO、SS [*] 、BOD [*] 、COD [*] 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 SiO_2 [*] 、アルカリ度、大腸菌群数 ^{**}

**、測定値の平均値を用いた。

表-3. 湖沼水質の分布様式

正規分布 する項目	PH、DO、総硬度
対数正規分 布する項目	透明度、SS、BOD、COD、 Cl^- 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 SO_4^{2-} 、G.Bact、E.Coli
ナシ	SiO_2 、総アルカリ度

表-4. 水質による湖沼の順序標本

透明度	$\text{NH}_3\text{-N}$	$\text{PO}_4\text{-P}$	SO_4^{2-}	総硬度
琵琶池 ($<1\text{m}$)	精進湖	湯の湖	琵琶池	琵琶池
湯の湖 ($<2\text{m}$)	尾瀬沼	琵琶池	湯の湖	河口湖
精進湖 (2.5m)	琵琶池	中禅寺湖	中禅寺湖	山中湖
河口湖 (3.5m)	河口湖	尾瀬沼	河口湖	西湖
山中湖 ($<4.5\text{m}$)	山中湖	精進湖	本栖湖	湯の湖
尾瀬沼 ($4.7\sim5.2\text{m}$)	本栖湖	河口湖	西湖	尾瀬沼
中禅寺湖 ($25\sim10\text{m}$)	西湖	山中湖	山中湖	精進湖
西湖 ($8.5\sim12\text{m}$)	中禅寺湖	本栖湖	尾瀬沼	本栖湖
本栖湖 ($8.5\sim14\text{m}$)	湯の湖	西湖	精進湖	中禅寺湖

表-5. 重回帰解析結果

条件	項目数	資料数	重回帰解析で寄与率が3%位までに出現する項目とその回数	透明度に対する寄与率の高い水質項目とその寄与率	重回帰係数 F比
1	6	358	透明度(4)、E.Coli(4) DO(3)、SS(3)、COD(3)	SS(57%)、E.Coli(14%)	0.844、175
2	9	42	水温(5)、透明度(4)、PH(4)、 SS(4)、DO(3)、COD(3)、T-P(3)	SS(72%)、T-P(11%)、T-N(5%)	0.941、45
3	14	189	透明度(8)、SS(4)、水温(4)、PH(6) $\text{NO}_2\text{-N}$ (4)、 $\text{NH}_3\text{-N}$ (3)、 SiO_2 (3)、Bx(3)	SS(43%)、E.Coli(15%)、Bx(7%)、 $\text{PO}_4\text{-P}$ (6%)、 $\text{NO}_3\text{-N}$ (3%)	0.976、49

結果をまとめると表-5のようになる。表-6に示すように、重回帰解析で寄与率が第3位までに出現する頻度が高い水質項目はわが湖沼の水質を評価するうえで重要な指標たる水質項目は透明度、PH、COD、DO、SS、大腸菌群数、BOD、リン、チッ素、アルカリ度である。このうちPH、COD、DO、SS、大腸菌群数はすでに環境基準項目で指定されているが、汚濁発生源あるいは湖沼の栄養塩の多寡を示すチッ素、リンについての重要性が統計的に指摘されたので、今後環境基準にチッ素、リンの追加が考慮されなければならぬと考えられる。透明度の頻度が高いことは透明度が湖沼の水質を総合的に表わすものであることを示している。その他水温、アルカリ度など湖沼の基本的な性状や季節変化を示す指標も重要である。

湖沼の水質を総合的に表わす透明度に対しては、SSによる寄与率が最も高く、例えば条件-2の結果では寄与率は42%となるが、次のような重回帰式で高い有意をもってあらわすことができる。

$$\log(\text{透明度}) = -0.334(\log SS) - 0.291(\log T-P) - 0.234(\log T-N) + 0.0956 \quad (r=0.936, n=42)$$

ここで、透明度に対する寄与率はT-NよりT-Pが高いことから、調査対象の水質レベルにある湖沼におい

表-6. 環境基準値と実際値との関係

	COD (PPm)	SS (PPm)	DO (PPm)	PH	E. coli
AA 級	1	1.7 (1)	8.7 (75)	7.5 (6.5~8.5)	60 (100)
A "	3	4.9 (5)	9.8 (75)	7.7 (6.5~8.5)	900 (1000)
B "	5	8.1 (15)	13.6 (5)	7.9 (6.5~8.5)	3500 (-)
C "	8	12.8	(2)	8.0 (6.5~8.5)	—

ては富栄養化の制御因子として、T-Pの方が有意であるものと考えられる。

現行の環境基準項目で設定されている基準値の関係を検討するために条件-1で得られた単相関係数を用い、現行のCOD規制値との関係を求めると表-6が得られる。この結果、現行の基準値は湖沼で得られた推定水質値とほぼ一致する。ただしDOについては全く逆の関係がみられる。これは富栄養化が進行すると、プランクトンによる光合成が盛んになり、DOが増加することを示しており、現行の基準では水質階級が低位になるにつれて、DOも減少するようになっているが、これは実態と全く逆の関係になっている。また条件-2の平均値による解析結果から、T-N、T-Pの各水質階級における値を求めると、AA級ではT-N 0.25 PPm、T-P 0.015 PPmとなる。この栄養塩の濃度は富栄養化によるトラブルが発生する限界といわれている濃度にほぼ匹敵する。さらに条件-2で得られた透明度に関する重回帰式を用いて、AA級に相当する透明度を求めると49%となり、これらの結果からみれば、現行環境基準のAA級は富栄養化現象が顕著に見られるようになる限界付近の湖沼を表わしていることになる。

表-7. 主成分分析結果

主成分	固有値	累積寄与率	水質項目	固有ベクトル			
				Z1	Z2	Z3	Z4
Z1	4.05	45%	水温	0.208	0.627	0.140	0.086
Z2	1.77	65	透明度	0.469	-0.085	0.115	-0.077
Z3	1.13	77	PH	-0.170	0.122	0.809	-0.026
Z4	0.99	86	DO	-0.134	-0.647	0.195	-0.206
Z5	0.46	91	SS	-0.456	-0.136	-0.063	-0.038
Z6	0.40	96	COD	-0.361	0.099	0.332	0.148
Z7	0.20	98	T-N	-0.364	0.124	-0.375	0.319
Z8	0.12	99	T-P	-0.420	0.180	-0.015	0.112
Z9	0.08	100	大腸菌群数	-0.207	0.301	-0.142	-0.898

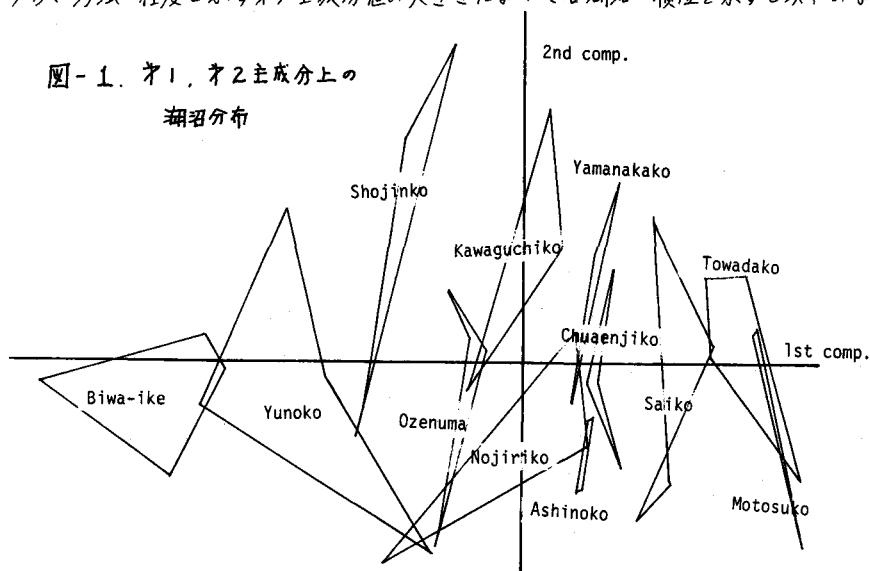
(3) 主成分分析

多量のデータを取り

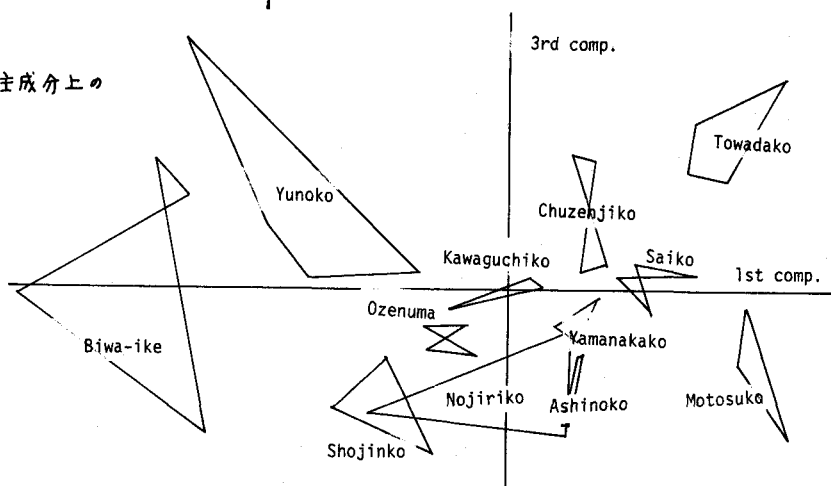
扱う場合、各々の変量がどのように影響を及ぼしあっているかを解析することは難しい問題であるが、ここでは主成分分析によってこの問題への接近を試みた。主成分分析とは、多数の因子を総合的な少数の無相関の主成分で表示しようとするものである。今回の水質データの解析においては、各水質因子が何らかの形で湖沼の水質特性を表わしていると考えられるので、主成分分析の計算結果より得られる情報は、水質を総合的に評価する際に有効に利用できるものと予想される。条件一ノと同一資料を用いて主成分分析を行なった結果の概略は、表一七のようになる。同表から明らかのように、湖沼の総合的な水質特性を、主成分分析で得られた主成分までに約8割まで記述することができる。

主成分1は、透明度、水温の固有ベクトルが正で、残りはすべて負であることや、汚濁に関連する透明度、SS、COD、TP、TNのベクトル値が大きいところから、湖沼の水質特性のうち汚濁あるいは清浄さの程度を示しているものと考えられる。主成分2については水温、DOのベクトル値の大きいところが特徴であり、湖沼の位置や標高を加味した季節変化の影響に関連するものと考えられる。主成分3はpHのベクトル値のみが高いところから、湖沼の水質特性のうち、湖沼固有の水質性状を示しているものと考えられる。このような観点に立って調査した主要湖沼について、その主成分値を2成分ごとにプロットすると図一ノ～二のようになった。このうち、汚濁の程度を示す主成分1の大きさによって各湖沼の順位を示すと以下のようになる。

図一. 主成分1, 主成分2上の湖沼分布



図二. 主成分1, 主成分3上の湖沼分布



汚濁 ← → 清潔

琵琶湖、湯の湖、精進湖、尾瀬沼、(野尻湖) (山中湖) 西湖 (本栖湖)
(河口湖) (中禅寺湖)
(芦ノ湖)

上記の順列は、表-7に示した湖沼の透明度に関する順列とおおむね一致している。主成分については各湖沼ともほぼ同じ程度に分散しており、湖沼ごとの差異は見られぬ。また主成分については、十和田湖、湯の湖、中禅寺湖のグループと、その他のグループとに別けられるようである。いずれにしても主成分2, 主成分3の寄与率が低いことから、主成分1つまり人為汚濁が湖沼の水質特性を支配的に決定していることがうかがわれる。条件-2と同一資料を用いて主成分分析を行なった結果の概略は表-8のようである。この分析結果によると、湖沼の総合的な水質特性成分を主成分分析で得られた主成分まで考慮すれば約6割まで記述されることが明らかになった。この場合においても、主成分1はCOD、透明度の固有ベクトル値が高く、順次、SS、 PO_4 、 SiO_2 、BODの順になっており、透明度、水温が正で、あとは負であるところから、湖沼の水質特性のうち汚濁あるいは清潔さの程度を示しているものと考えられる。主成分2、主成分3についても(i)と同様に考えることができるが、主成分2について、この例では NH_4-N 、 NO_2-N 、アルカリ度の固有ベクトルが高いのが注目される。前述したように主成分は季節変化に関連するものと想定したが、観光地の湖沼の利用度と季節変化があることを考えれば、こうした結果も以上の想定を否定するものではないと考えられる。

表-8. 主成分分析表(14項目)

主成分	固有値	累積寄与率	水質項目	固有ベクトル			
				Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄
Z ₁	4.29	31%	水温	0.225	0.447	0.284	0.021
Z ₂	2.45	48	透明度	0.399	-0.211	-0.046	0.014
Z ₃	1.36	58	PH	-0.166	-0.127	0.561	-0.364
Z ₄	1.00	65	DO	-0.195	-0.466	0.000	-0.218
Z ₅	0.90	71	SS	-0.380	-0.054	-0.040	0.003
Z ₆	0.81	77	BOD	-0.290	-0.031	-0.252	0.015
Z ₇	0.75	83	COD	-0.401	0.077	-0.098	0.100
Z ₈	0.58	87	NH_4-N	-0.135	0.376	-0.196	0.502
Z ₉	0.53	91	NO_2-N	0.013	0.239	-0.481	-0.196
Z ₁₀	0.42	94	NO_3-N	0.065	0.196	0.470	-0.563
Z ₁₁	0.33	96	PO_4-P	-0.344	-0.022	0.040	0.293
Z ₁₂	0.28	98	SiO_2	-0.337	-0.044	0.105	-0.257
Z ₁₃	0.16	99	アルカリ度	-0.037	0.494	0.117	-0.160
Z ₁₄	0.12	100	大腸菌群数	-0.280	0.172	0.102	-0.154

4. おさひ

17湖沼の水質調査資料を収集し、それを用いて統計解析した結果、次のことが明らかになった。湖沼の水質のうち、人為汚濁と関係する項目は対数正規分布する。水質相互で相関関係が高いのは、汚濁発生源の排水にみられる関係と類似した関係を示すグループ(COD 、 Cl^- 、 PO_4^{3-} 、 NH_3-N 、一般細菌、大腸菌群数)、湖沼内における水質変化に対応するグループ(NO_2-N 、 NO_3-N)および湖沼の水質特性に関連のあるグループ(透明度、SS、

T-P, T-N)である。CODとDOは正の相関関係にあり、CODが増加するとDOも増加する関係を示す。現行の環境基準では水質階級が低位なるにつれて、DOも減少するようになっているので、これは実態と全く逆の関係になっている。重回帰解析より湖沼水質を知る上で重要な水質項目は透明度、pH、COD、DO、SS、大腸菌群数、BOD、リン、チッ素、アルカリ度である。湖沼の清浄度の指標である透明度は湖沼の水質を総合的に表現するものと考えられる。透明度に対する寄与率が高いのはSS、T-P、T-Nであり、またT-Pの寄与率がT-Nより高く調査の対象とした湖沼の水質レベルでは、富栄養化の制御因子としてT-Pの方が有意である。

現行の環境基準の水質階級におけるCOD、SS、pHの値はDO値を除いて、調査の対象とした湖沼の推定水質値とほぼ一致する。また、AA級に対するT-N、T-Pの推定値は富栄養化によるトラブルが発生する限界といわれているT-N 0.25 PPM、T-P 0.015 PPMのオーダーであった。重回帰解析によりAA級に対応する透明度の値を求めると、4.9mとなっており、現行の環境基準のAA級は富栄養化現象が顕著に見られる限界付近の水質レベルに相当することになる。したがって、透明度の高い貧栄養湖を保全するためには、さらに高度の水質基準を設定することが必要である。主成分分析法を用いて湖沼の水質特性を探索したところ主成分分析で得られた第3主成分までによって約8割記述することができた。また第1～3主成分については次のように考えられる。

第1主成分：湖沼の清浄さあるいは汚濁の程度

第2主成分：湖沼の位置や標高を加味した季節変化の影響

第3主成分：湖沼固有の水質性状

ここで第2、第3主成分は調査対象とした湖沼では相互に大きな差異が見られなかったことから、第1主成分をもって湖沼の水質を総合的に評価することであると考えられる。

あわりに、本研究は環境庁水質保全局水質管理課より、土木学会が委託を受けた「水質変化予測調査」研究の一部である。