

河川水質の総合的評価に関する研究

THE SYNTHETIC EVALUATION OF WATER QUALITY OF RIVERS

能登勇二*・安田正志**

By Yuji NOTO and Masashi YASUDA

1. はじめに

水域の水質環境の評価は、その水域の水質保全を目標として行われる。そこでは人間を含む生物にとってバランスのとれた健康な生存が確保されるということが根本の原則となると考えてよいであろう。また、水質保全を実現していくための水質管理、とりわけ水質規制は、必要十分な指標と方法によらなければならない。河川の水質環境の評価に関して、従来、人の健康に関する項目、生活環境にかかわる水質項目などにみられる理化学的水質指標、あるいは生物学的水質指標などにより議論されてきた。これらは、それぞれ個別に水質汚濁に関する情報を有し、また重要な意義づけがなされる。しかし、複雑、多様化する水質汚濁現象を考慮するとき、ある水域の水質環境を総合的に、すなわち水質環境の全体像を把握することが必要となる。これにより、たとえば水域の水質環境の相互比較、時間的変動特性、水塊の流下に伴う平面的な水質変動特性等を、その全体像で検討することが可能となる。

しかし、現在のところ水域の水質環境を総合的に把握し、評価するための方法はまだ確立していない。そのような現状において、水質の総合的評価の方法を進展させるための一つの手がかりは現実に行われている多くの水質調査の中から、それぞれの指標のもっている意義とそれらの相互関係を分析することから見出されると考えられる。その検討は、水域の水質環境の時間的、地域的変動を考慮するならば統計的方法による必要がある。著者らは、このような観点からすでにいくつかの検討を進めてきており、富山県内河川および九州地方の河川を対象として χ^2 検定を中心とした統計的方法を適用して理化学的水質指標と生物学的水質階級の関連性の検討を行

い¹⁾²⁾、また富山県内河川および栃木県内河川、また九州地方河川を対象にして主成分分析を適用した解析を行ってきている^{3)~5)}。主成分分析を含めた多変量解析法の水質資料への適用は近年注目され、著者らによるほかに、これまでに湖沼⁶⁾、貯水池および流入河川⁷⁾、河川や海域の底泥⁸⁾、河川⁹⁾などに適用した報告例がある。これら一連の研究の結果、一定の成果が得られてきているが、さらに一般化しその意義を明確にしていくためには、地域特性などの影響の検討を行う必要がある。本報では、このことに鑑み、主成分分析を地域特性を考慮して適用するためケース・スタディーを行った。まず九州地方河川を対象にして主成分分析を適用し、検討すべき水質項目の種類とその数の影響について検討し、この結果をふまえてさらに全国一級河川水系の水質資料を対象にして主成分分析を行った。その結果、主成分分析の適用による河川水質の総合的評価と、その有効性についていくつかの興味深い知見が得られたので報告する。

なお、本報では使用した理化学的水質項目の測定単位が質的に異なるため、分散1、平均値0となるようにデータを基準化した相関係数行列よりの主成分分析を行った。ここで、各水質項目は正規分布していないが、各水質項目資料の分布特性が主成分分析における因子スコア分布により密接に対応するように、各水質項目の分布を正規分布に近づけるための変数変換は行っていない。また主成分の解釈については、 m 個までの主成分の累積寄与率が60%以上、第 m 主成分の寄与率が平均以上、すなわち固有値 $\lambda_m \geq 1.0$ であることを基準にして、第 m 主成分まで解釈することにした¹⁰⁾。

2. 九州地方河川の解析

(1) 使用した資料

解析に使用した資料は図-1に示す九州地方の河川の

* 正会員 工修 富山県立技術短期大学講師 衛生工学科

** 正会員 工博 金沢工業大学教授 土木工学科

うち 14 河川の 1975 年 7 月～10 月および 1976 年 7 月～10 月に著者ら、および建設省九州地方建設局により行われた水質調査結果である。

検討した水質項目は、塩素イオン (Cl⁻)、浮遊物 (SS)、溶存酸素 (DO)、COD (過マンガン酸法)、BOD、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、大腸菌群、pH の 10 項目である。解析対象河川は、筑後川、遠賀川、菊池川、緑川、矢部川、球磨川、川内川、大野川、嘉瀬川、大淀川、小丸川、大分川、山国川、肝属川である。

各水質項目間の相関係数行列、各水質項目の平均値を表-1 に示す。各水質項目間の相関係数は比較的小さ

く、BOD と COD の相関係数が 0.422 で最も大きい。

(2) 主成分分析結果

主成分分析の解釈に対する水質項目の数とその組合せの影響をみるために、表-1 に示した 10 水質項目の範囲内で、項目数との組合せを種々変えて、11 回 (PCA. 201~PCA. 211) 主成分分析を試みた。これらの結果の一部を表-2 に示す。たとえば PCA. 201 は 10 個、PCA. 211 は 6 個のケースである。いずれの主成分分析でも固有値が 1 以上となる主成分の数は 3~4 であった。

まず第 1 主成分についてみると、たとえば、PCA. 201 で因子負荷量の比較的大きい項目は、DO、COD、BOD、NH₄⁺-N 等であり、同様に PCA. 202 では DO、COD、BOD、PCA. 207 では Cl⁻、COD、BOD、NH₄⁺-N、項目数の少ない PCA. 211 では SS、DO、COD、BOD である。いずれにも共通に因子負荷量の大きいのは COD、BOD であり、かつ DO の因子負荷量はこれらとその符号が逆になっており、いずれのケースでも総合的な汚濁の程度を表わす因子と解釈できる。各ケースで、各項目の因子負荷量の大きさには若干の差異があるものの、その解釈を変えるべき要因とはなっていない。なお、本表に示した 4 例以外の 7 例においても同様のことがいえた。すなわち、第 1 主成分については、総合的な汚濁の程度を表わす因子との解釈はきわめて安定している。

また、PCA. 211 にみられるように、SS、DO、COD、BOD、大腸菌群、pH、といった 6 水質項目をベースにした主成分分析の結果でも、それ以上の数の項目を用いた解析結果とその解釈において差はみられなかった。このことは、このような 6 項目の組合せと数による主成分分析によって、十分総合的な汚濁の程度を

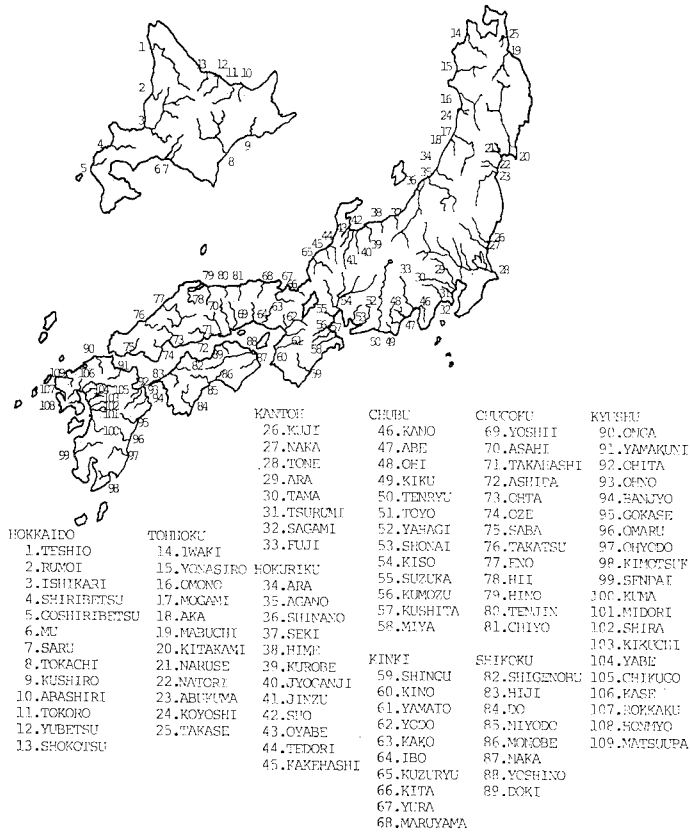


図-1 解析対象河川水系

表-1 九州地方河川の各水質項目間の相関係数、各水質項目の平均値

	Cl ⁻	SS	DO	COD	BOD	大腸菌群	NH ₄ ⁺ -N	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	pH	平均値
Cl ⁻	1.000	0.008	-0.059	0.252	0.304	0.159	0.364	-0.005	0.051	0.391	11.38 mg/l
SS		1.000	-0.232	0.262	0.148	-0.006	-0.039	0.087	-0.038	-0.037	21.19 mg/l
DO			1.000	-0.236	-0.101	-0.162	-0.134	-0.183	-0.235	0.385	8.11 mg/l
COD				1.000	0.422	0.143	0.285	0.315	-0.045	-0.092	3.33 mg/l
BOD					1.000	0.156	0.250	0.073	0.186	-0.022	1.65 mg/l
大腸菌群						1.000	0.247	0.085	0.100	-0.072	53.0 10 ³ MPN/100 ml
NH ₄ ⁺ -N							1.000	0.090	0.030	0.145	0.215 mg/l
NO ₂ ⁻ -N								1.000	0.037	-0.143	0.0194 mg/l
NO ₃ ⁻ -N									1.000	-0.353	1.208 mg/l
pH										1.000	7.33

表-2 九州地方河川の主成分分析結果（一部）

主成分	PCA. 201			PCA. 202			PCA. 207			PCA. 211		
	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₁	Z ₂	Z ₃
固有値	2.32	1.79	1.23	2.21	1.31	1.20	2.23	1.25	1.16	1.88	1.21	1.01
累積寄与率	23%	41%	53%	25%	39%	52%	28%	44%	58%	31%	52%	68%
Cl ⁻	0.485	0.609	-0.184	—	—	—	0.588	0.411	0.131	—	—	—
SS	0.317	-0.160	0.623	0.363	0.062	-0.658	0.293	-0.732	0.298	0.503	0.128	-0.624
DO	-0.518	0.498	0.015	-0.627	0.382	0.102	-0.446	0.506	0.400	-0.650	0.518	0.082
COD	0.732	0.050	0.378	0.702	0.373	-0.249	0.703	-0.197	0.364	0.727	0.365	-0.039
BOD	0.653	0.145	-0.034	0.584	0.317	0.127	0.688	0.000	0.090	0.599	0.527	0.157
大腸菌群	0.436	0.021	-0.378	0.413	0.113	0.493	0.446	0.222	-0.317	0.374	-0.010	0.769
NH ₄ ⁺ -N	0.557	0.387	-0.248	0.423	0.500	0.438	0.613	0.430	0.039	—	—	—
NO ₂ ⁻ -N	0.393	-0.232	0.319	0.459	0.012	-0.264	—	—	—	—	—	—
NO ₃ ⁻ -N	0.268	-0.443	-0.588	0.352	-0.562	0.412	0.213	-0.109	-0.807	—	—	—
pH	-0.156	0.850	0.127	-0.407	0.729	0.021	—	—	—	-0.426	0.717	-0.032

注) — はその項目を解析に含まないことを示す。

表わす総合特性値としての情報を引き出せることを示している。

第2主成分については、含む水質項目により結果に違いがみられる。第2主成分では、たとえばPCA. 201では因子負荷量の大きい項目はpH, Cl⁻, PCA. 202ではpH, NO₃⁻-N, PCA. 207ではSS, DO, PCA. 201ではpH, BOD, DOという具合であり、各ケースにより異なる解釈がなされる。ただし、これら以外のケースの結果もふまえて、pHを含む組合せの場合はpHの因子負荷量が大きく、pHを含まない場合はSSの因子負荷量が大きいという傾向がみられる。

第3主成分でも、第2主成分の場合と同様に各ケースによって因子負荷量の大きい水質項目に差異がみられる。各ケースについて、共通の傾向として、pHを含む場合にはSSあるいはNO₃⁻-Nの因子負荷量が大きい。また、NO₃⁻-Nを含むがpHを含まない場合にはNO₃⁻-Nの因子負荷量が大きく、pH, NO₃⁻-Nを含まない場合には大腸菌群の因子負荷量が大きい。

第4主成分は、表-2には示さなかったが、各ケースに共通の傾向として、NO₂⁻-Nを含む場合にはNO₂⁻-Nの因子負荷量が大きくなっている。

以上のことは、第2主成分以下については、第1主成分に比べて、そのベースとする水質項目の組合せの影響を強く受けることを意味している。また、第2主成分以下で、単一水質項目のみの分布を表わす因子や、総合特性値としてやや解釈に難のある因子が導出される可能性がある。

以上の結果、主成分分析の解釈は第1主成分では前述のような6~10項目の水質項目の数と組合せの範囲においてはきわめて安定しており、いずれも総合的な汚濁の程度を表わす因子となることが明らかとなった。一方、第2主成分以下では、その組合せによって因子負荷量の大きい水質項目に差異が生じ、その解釈にも差異が生じ

ること、また総合特性値としてやや難のある因子が導出されることがわかった。したがって、総合的に水域の水質環境を評価することにおいて、第1主成分が有効と考えられる。

3. 全国河川水系の解析

前章の結果に基づき、さらにより多くの地域の資料から総合指標を導出するために、全国一級河川水系において得られている資料による主成分分析を行った。この資料において使用できる水質項目は6水質項目であるが、前述の結果から十分に再現性が期待できる。これにより、多くの水域の水質環境の相互比較が同じ総合指標の尺度のもとに可能となり、また地域特性などの検討も可能となる。さらに、汚濁の量的大きさをも加味して検討するために各水質負荷量項目を加えた資料を対象にして主成分分析による解析を行った。

(1) 使用した資料

使用した資料は、図-1に示す全国1級河川109水系において建設省が行った水質測定結果である。これらは、日本河川水質年鑑¹³⁾に記載されているもので、各測定点の年平均値である。本報では、1976年から1979年の資料から、湖沼、海域における資料、単位や測定項目などに不備があると考えられる資料を極力除いて、表-3に示す資料数で解析した。河川水系数としては、関川、鶴見川の資料は下記の6項目の水質資料が不備のため、これらを除外し107河川水系の資料により解析した。

検討した水質項目は、SS, DO, COD, BOD, 大腸菌群, pHの6項目である。

なお、各年度の水質測定点はほぼ同一地点であるが、測定点数は経年的に増加している。また河川水系により測定点数に多少の差異がある。河川水系の地方区分は日

表-3 全国一級河川水系の地方別解析対象資料数

地方	年度	1976	1977	1978	1979	1976~1979
北海道		57 (55)	58 (53)	61 (59)	65 (64)	241 (231)
東北		80 (54)	114 (68)	105 (70)	114 (63)	413 (255)
関東		98 (82)	103 (72)	101 (81)	100 (83)	402 (318)
北陸		29 (27)	36 (27)	37 (28)	55 (30)	157 (112)
中部		86 (76)	85 (72)	82 (57)	87 (59)	340 (264)
近畿		112 (63)	95 (55)	98 (55)	103 (66)	408 (239)
中国		89 (41)	88 (44)	90 (49)	87 (35)	354 (169)
四国		24 (6)	22 (3)	22 (5)	42 (11)	110 (25)
九州		129 (72)	134 (78)	136 (77)	143 (77)	542 (304)
計		704 (476)	735 (472)	732 (481)	796 (488)	2967 (1917)

() 内の数字は流量資料のある資料数

本河川水質年鑑に従い、図-1 に示す。

全資料による水質項目間の相関係数行列および各水質項目の年度別資料の平均値、全資料の平均値、標準偏差を表-4 に示す。COD と BOD の相関係数が 0.672 で、次いで COD と SS の相関係数が大きい。また、各水質項目の平均値について、顕著な経年変化はみられない。

(2) 主成分分析結果

主成分分析の結果を各年度別資料および全資料の場合について表-5 に示す。固有値が 1 以上となる主成分の数は 3 である。第 1 主成分では、いずれの場合でも因子負荷量は BOD、COD が大きく、SS、大腸菌群などがそれに次ぎ、因子負荷量がこれらの項目と正負が逆になるのは DO のみである。したがって、第 1 主成分は総合的な汚濁の程度を表わす因子と解釈される。第 2 主成分では、各解析結果に、各水質項目の因子負荷量に若干の差異はあるが、いずれの場合も SS の因子負荷量が大きく、SS と正負が逆で因子負荷量の大きい項目は pH であった。ただし、1977 年、1978 年は大腸菌群の因子

負荷量も大きく、1977 年には SS と同符号で、1978 年には SS と異符号となり、結果の再現性はやや弱い。しかし、2 年間 (1976~1977 年)、3 年間 (1976~1978 年)、4 年間 (1976~1979 年) の資料による解析では各水質項目ともほぼ同様の因子負荷量となり、資料の蓄積により一定の解釈となる可能性もある。これらの結果から第 2 主成分は SS と pH の相対的分布を表わす因子と解釈できよう。第 3 主成分では、いずれの場合も大腸菌群の因子負荷量が大きく、大腸菌群の分布を表わす因子と解釈される。

以上のように、全国河川資料の年度別解析結果にはほぼ再現性があることは、河川資料に主成分分析を適用して、総合特性値を導出し、これらによる、河川水質の相対的比較、検討ができることを示唆している。しかし、第 2 主成分以下では、前章に示したと同様にやや解釈の困難な因子が導出されたり、あるいは単一水質項目のみの分布を表わす因子が導出されている。したがって、水質項目のみによる主成分分析の場合には、第 1 主成分が総合的な汚濁の程度を示す指標としての意義を有すると考えられる。これを「水質総合指標」とすることができよう。

(3) 負荷量項目を加えた主成分分析

水質汚濁現象の評価としては、その質的評価ばかりではなく、量的な評価も重要である。汚濁の総量的な大きさを考慮するためには、前記の各水質項目にそれらの負荷量項目を加えた主成分分析を検討してみることが有効であると考えられる。用いた資料は前述の資料のうちで流量資料のあるもので、その数は表-1 にまとめて示してあり、河川水系数は 102 である。なお、流量も各測定点の年平均値である。解析に用いた項目は、SS、DO、COD、BOD、大腸菌群、pH、SS 負荷量、DO 負荷量、COD 負荷量、BOD 負荷量、大腸菌群負荷量に流量 Q を加えた 12 項目である。

これら 12 項目の相関係数行列を表-6 に平均値とともに示した。ここでは、流量と各水質負荷量項目、各水質項目とその負荷量項目、各水質負荷量項目間の相関係数が大きな値となっている。

表-4 全国河川水系の全水質資料による相関係数、平均値、標準偏差

	相 関 係 数						平 均 値				標準偏差	
	SS	DO	COD	BOD	大腸菌群	pH	1976 年	1977 年	1978 年	1979 年	1976 年~1979 年	1976 年~1979 年
SS	1.000	-0.120	0.557	0.046	0.000	0.004	38.96 mg/l	46.88	42.28	56.54	46.46	509.06
DO		1.000	-0.418	-0.419	-0.047	-0.075	9.46 mg/l	9.67	9.53	9.51	9.54	1.59
COD			1.000	0.672	0.024	0.142	4.23 mg/l	3.91	4.62	4.58	4.34	8.70
BOD				1.000	0.038	0.245	3.19 mg/l	2.80	2.88	2.88	2.93	9.03
大腸菌群					1.000	0.024	80.00 ¹⁰ MPN/100 ml	201.36	78.20	260.39	158.02	2849.95
pH						1.000	7.27	7.25	7.31	7.33	7.29	0.45

表-5 全国河川水系の主成分分析結果

年度	1976	1977	1978	1979	1976~ 1979	1976~ 1977	1976~ 1978
第 1 主成分							
固有値	2.46	2.30	2.49	2.24	2.24	2.24	2.25
累積寄与率	41%	38%	41%	37%	37%	37%	38%
SS	0.494	0.164	0.616	0.651	0.504	0.250	0.420
DO	-0.709	-0.697	-0.655	-0.579	-0.647	-0.713	-0.683
COD	0.882	0.912	0.941	0.954	0.913	0.889	0.890
BOD	0.791	0.898	0.794	0.719	0.795	0.863	0.831
大腸菌群	0.511	0.139	0.303	0.013	0.072	0.147	0.145
pH	0.223	0.365	0.269	0.238	0.304	0.334	0.322
第 2 主成分							
固有値	1.10	1.03	1.17	1.15	1.11	1.04	1.07
累積寄与率	59%	56%	61%	57%	56%	55%	55%
SS	-0.691	0.610	0.674	0.697	-0.729	-0.663	-0.726
DO	0.032	-0.242	0.329	0.338	-0.159	0.196	-0.009
COD	-0.194	-0.047	0.285	0.220	-0.217	-0.044	-0.163
BOD	0.325	-0.167	-0.250	-0.486	0.337	0.189	0.255
大腸菌群	0.267	0.610	-0.609	-0.169	0.248	-0.278	0.146
pH	0.637	-0.441	-0.313	-0.489	0.580	0.667	0.654
第 3 主成分							
固有値	1.00	1.00	1.02	1.01	0.99	1.00	1.01
累積寄与率	76%	72%	78%	73%	72%	71%	72%
SS	0.359	-0.685	-0.166	0.178	0.108	-0.434	-0.114
DO	0.207	-0.022	0.205	0.251	-0.036	-0.077	-0.197
COD	0.142	-0.048	0.026	0.045	-0.000	-0.077	-0.078
BOD	-0.004	0.020	0.212	-0.117	-0.098	0.005	-0.052
大腸菌群	-0.593	0.723	-0.549	0.918	0.958	0.894	0.918
pH	0.673	0.061	0.779	0.246	-0.227	-0.043	-0.334

これら 12 項目のうち、流量を除いた 11 項目による主成分分析の結果を、全資料の場合について表-7 に示す。第 1 主成分では、因子負荷量の大きい項目として、COD 負荷量、BOD 負荷量、DO 負荷量、SS 負荷量などの負荷量項目が得られる。したがって第 1 主成分は総合的な汚濁の量的大きさを表わす因子と解釈される。第 2 主成分では、因子負荷量の大きい項目として、COD、BOD、次いで SS、pH があり、これらと正負が逆で因子負荷量の大きい項目は DO、DO 負荷量である。したがって、第 2 主成分は総合的な汚濁の程度を表わす因子となり、前述の水質項目のみによる場合の第 1 主成分に相当するものとなる。第 3 主成分は、因子負荷量の大きな項目として、大腸菌群と大腸菌群負荷量があり、大腸菌群の質と量を合わせた総合的な大きさを表わす因子と解釈される。第 4 主成分は、因子負荷量の大きな項目として、SS、次いで SS 負荷量があり、SS の量と質を合わせた総合的な大きさを表わす因子と解釈される。

このように、第 1 主成分と第 2 主成分で汚濁負荷量の大きさと汚濁濃度の大きさという 2 つの明確な因子が得られたことは、水域の水質環境の全体像を量と質との 2 つの総合指標で表わすことが可能であることを示してい

る。すなわち、ここでは汚濁に関する量と質の 2 つの総合指標が得られ、これを「負荷量-水質総合指標」とすることができる。

4. 河川水質の総合的評価の事例

前章の結果を活用し、日本の各地方、各河川水系の水質環境が相互にどんな状況にあるかを、総合指標により比較、検討し、これらの総合指標が河川の水質評価にどのような意義があるかを具体的に調べてみた。まず、はじめに前章(2)で述べた「水質総合指標」、すなわち水質項目のみによる主成分分析の第 1 主成分の各水質測定点の因子スコアの分布を、地方別、河川水系別にみることにより各地方、各河川水系の水質環境の比較、検討を行った。次いで、前章(3)で述べた「負荷量-水質総合指標」、すなわち負荷量項目を加えた主成分分析の第 1 主成分、第 2 主成分の各水質測定点の因子スコアの分布を、地方別、河川水系別にみることにより各地方、各河川水系の水質環境の比較をし、さらに各河川における流下に伴う水質変動を検討することも行った。

(1) 「水質総合指標」による河川水質の評価

水質項目の全資料による主成分分析結果から各水質測定点の第 1 主成分 Z_1 、第 2 主成分 Z_2 軸上の因子スコアの分布の一例を図-2(a) に 1979 年の資料について示した。各年度とも同様の分布をする。 Z_1 、 Z_2 因子スコアは次式で計算される。

$$Z_1 = 0.337 X_1 - 0.433 X_2 + 0.610 X_3 + 0.532 X_4 + 0.048 X_5 + 0.203 X_6 \dots \dots \dots (1)$$

$$Z_2 = -0.690 X_1 - 0.150 X_2 - 0.205 X_3 + 0.319 X_4 + 0.235 X_5 + 0.549 X_6 \dots \dots (2)$$

ここに

$$X_1 = \frac{SS - 46.46}{509.06} \quad X_2 = \frac{DO - 9.54}{1.59}$$

$$X_3 = \frac{COD - 4.34}{8.70} \quad X_4 = \frac{BOD - 2.93}{9.03}$$

$$X_5 = \frac{\text{大腸菌群} - 158.02}{2849.95} \quad X_6 = \frac{pH - 7.29}{0.45}$$

SS : mg/l, DO : mg/l, COD : mg/l, BOD : mg/l
大腸菌群 : $\times 10^3$ MPN/100 ml

この図では、水質総合指標 Z_1 スコアが大きいほど、総合的な汚濁の度が大きいことを示す。また Z_2 スコアが小さいほど pH と SS を比較した場合、SS が相対的

表一六 負荷量項目を加えた場合の、各項目間の相関係数、各項目の平均値、標準偏差

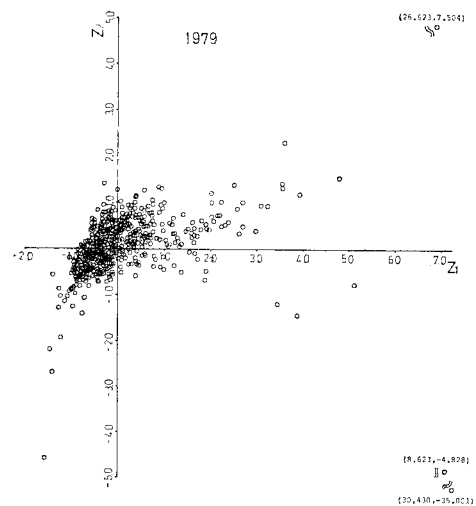
	SS	DO	COD	BOD	大腸菌群	pH	流量Q	SS 負荷量	DO 負荷量	COD 負荷量	BOD 負荷量	大腸菌群 負荷量	平均値	標準偏差
SS	1.000	-0.119	0.533	0.036	0.000	0.011	-0.023	0.598	-0.024	0.068	-0.000	-0.001	48.71 mg/l	612.42
DO		1.000	-0.437	-0.458	-0.045	-0.064	0.156	-0.038	0.204	0.015	-0.077	0.001	9.72 mg/l	1.56
COD			1.000	0.713	0.018	0.198	-0.060	0.412	-0.066	0.168	0.190	0.008	4.33 mg/l	9.46
BOD				1.000	0.029	0.297	-0.078	0.003	-0.083	0.034	0.251	0.009	3.10 mg/l	10.87
大腸菌群					1.000	0.032	-0.028	-0.011	-0.028	-0.017	-0.014	0.913	199.05 10 ³ MPN/100 ml	3 529.69
pH						1.000	-0.078	-0.056	-0.086	-0.034	0.042	0.029	7.24	0.48
流量 Q							1.000	0.481	0.994	0.814	0.768	0.043	49.57 m ³ /s	75.36
SS 負荷量								1.000	0.478	0.637	0.402	0.038	1 349.96 g/s	4 568.84
DO 負荷量									1.000	0.803	0.744	0.041	500.24 g/s	773.26
COD 負荷量										1.000	0.705	0.059	172.22 g/s	386.14
BOD 負荷量											1.000	0.063	89.75 g/s	155.26
大腸菌群 負荷量												1.000	2 296.87 10 ³ MPN/ 100 ml・m ³ /s	29 335.79

表一七 負荷量項目を加えた場合の主成分分析結果

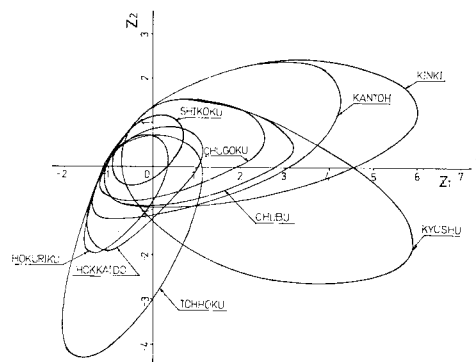
主成分	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄
固有値	3.10	2.31	1.91	1.39
累積寄与率	28%	49%	66%	79%
SS	0.392	0.377	-0.099	0.753
DO	-0.164	-0.646	0.033	0.185
COD	0.517	0.768	-0.092	0.097
BOD	0.307	0.726	-0.038	-0.460
大腸菌群	0.026	0.114	0.970	0.062
pH	0.052	0.360	0.032	-0.364
SS 負荷量	0.797	-0.021	-0.059	0.479
DO 負荷量	0.740	-0.562	0.020	-0.182
COD 負荷量	0.852	-0.350	0.007	-0.118
BOD 負荷量	0.795	-0.213	0.016	-0.388
大腸菌群負荷量	0.092	0.052	0.972	0.053

に大きいことを、逆に Z₂ スコアが大きいほど、pH が相対的に大きいことを示す。また 図一2 (b) に各地方の資料のスコア分布の概略を示す。その結果 Z₁ スコアの小さいのは、北海道、東北、北陸地方で汚濁度の小さい河川が多いことを示し、一方 Z₁ スコアの大きいのは関東、中部、近畿、九州地方で汚濁の進んだ河川の多いことを示している。すなわち、Z₁ スコアの大きい地方は都市化、工業地域化の進んだ地域の多い地方と一致している。また、すべての地方の分布の重なり部分には、北海道、東北、北陸地方の河川、あるいは各河川の上流部の測定点が多く分布している。

これらの地方による汚濁度合の大きさの違いは、各河川別の Z₁ スコア分布により、より詳細にみることができる。図一3 (a), (b) は河川別の全資料による Z₁ スコア分布図で、Z₁ スコアの最大値と最小値の範囲を示している。河川水系により測定点数に多少の差異はあるが、スコア幅の大きい河川ほど、その水系内の水質の変動が大きく、またスコアが大きい河川ほど、汚濁の度合の大きいことを表わす。これにより、各河川水系の汚濁の総合的な大きさ、変動の大きさを比較できる。地方別にみれば 図一2 と同様のことが認められ、また太平洋側流入河川と日本海側流入河川を比べると、太平洋側流入



(a) Z₁-Z₂ 軸上の各水質測定点の因子スコアの分布



(b) Z₁-Z₂ 軸上の地方別因子スコア分布の概略(全資料)

図一2

河川に汚濁の大きな河川が多いことがうかがえる。

以上のように、「水質総合指標」による各河川水域の水質環境の比較、評価が可能であり、また各地方における河川水質環境の特性をある程度明らかにできた。

(2) 「負荷量-水質総合指標」による河川水質の評価

図-4 に全資料を対象にして負荷量項目を加えた主成分分析の Z_1 - Z_2 軸上のスコア分布の一例を 1979 年の資料について示す. 各年度とも同様な分布をする. ここで Z_1, Z_2 因子スコアは次式で計算される.

$$Z_1 = 0.223 X_1 - 0.093 X_2 + 0.294 X_3 + 0.175 X_4 + 0.015 X_5 + 0.029 X_6 + 0.453 X_7 + 0.421 X_8 + 0.484 X_9 + 0.452 X_{10} + 0.052 X_{11} \dots (3)$$

$$Z_2 = 0.249 X_1 - 0.425 X_2 + 0.506 X_3 + 0.478 X_4 + 0.075 X_5 + 0.237 X_6 - 0.014 X_7 - 0.370 X_8 - 0.230 X_9 - 0.140 X_{10} + 0.034 X_{11} \dots (4)$$

ここに

$$X_1 = \frac{SS - 48.71}{612.41} \quad X_2 = \frac{DO - 9.72}{1.56}$$

$$X_3 = \frac{COD - 4.33}{9.46} \quad X_4 = \frac{BOD - 3.10}{10.87}$$

$$X_5 = \frac{\text{大腸菌群} - 199.05}{3529.69} \quad X_6 = \frac{pH - 7.24}{0.48}$$

$$X_7 = \frac{SS \cdot Q - 1349.96}{4568.84} \quad X_8 = \frac{DO \cdot Q - 500.24}{773.26}$$

$$X_9 = \frac{COD \cdot Q - 172.22}{368.14} \quad X_{10} = \frac{BOD \cdot Q - 89.75}{155.26}$$

$$X_{11} = \frac{\text{大} \cdot Q - 2296.87}{29335.79}$$

SS・Q (SS 負荷量) : g/s, DO・Q (DO 負荷量) : g/s, COD・Q (COD 負荷量) : g/s, BOD・Q (BOD 負荷量) : g/s, 大・Q (大腸菌群負荷量) : $\times 10^3$ MPN/100 ml・m³/s

この図では, Z_1 スコアの大きい点ほど, 総合的な汚濁総量が大きい測定点を, Z_2 スコアの大きい点ほど総合的な汚濁度の大きい測定点を示す. ここでは, Z_1, Z_2 スコアがともに大きく, この分布図からはみ出した点も数点ある. また, この図には 6 個の水質項目のある構成での, 流量が異なる場合の分布は直線で表わされることから, いくつかの水質構成で流量が異なる場合の分布も示してある. 6 水質項目の平均値による水質構成の場合は直線 m である. ここで, 因子軸を直線 m の傾きだけ回転すると, 第 1 主成分と第 2 主成分の解釈をより明確にすることができる. これは, 因子軸の回転¹⁰⁾に相当し, 新しい第 1 主成分, 第 2 主成分をそれぞれ F_1, F_2 とすると

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= 0.9286 Z_1 - 0.3712 Z_2 \\ F_2 &= 0.3712 Z_1 + 0.9286 Z_2 \end{aligned} \right\} \dots (5)$$

となり, Z_1, Z_2 と同様に F_1 が総合的な汚濁総量を表わす因子, F_2 が総合的な汚濁の程度を表わす因子となる.

F_1 - F_2 軸上の地方別のスコア分布の概略を 図-5 に, また河川別の F_1, F_2 スコア分布を 図-6 (a), (b) に示す. これらより, 北海道, 東北, 北陸地方には他地方に

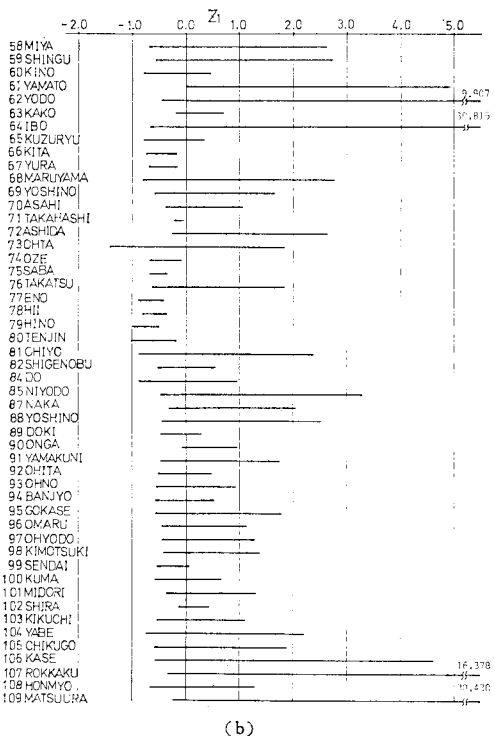
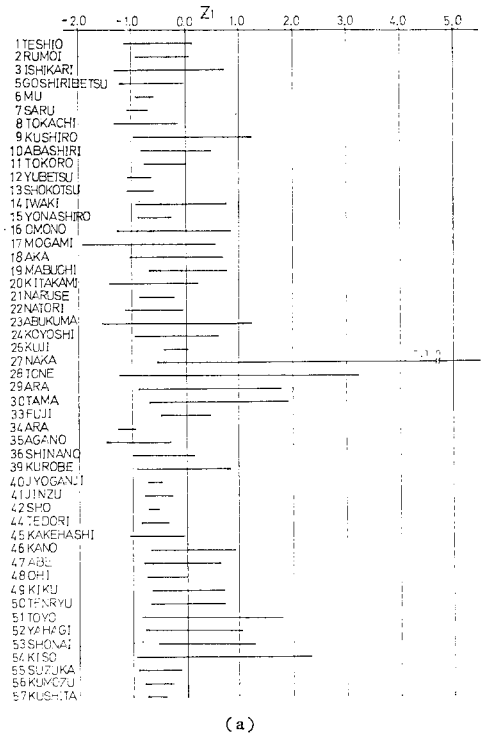
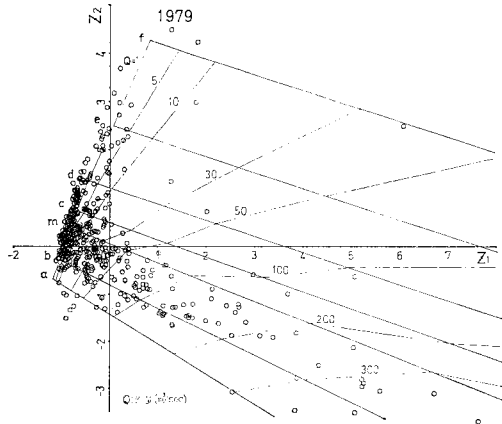


図-3 河川水系別の Z_1 スコアの分布 (全資料)

比べ汚濁度は小さいが, 汚濁総量は大きくなるような大河川が多く, 関東, 近畿地方には, 汚濁度, 汚濁総量とともに大きい河川が多いことがわかる. また, 中部地方



	SS (mg/L)	DO (mg/L)	COD (mg/L)	BOD (mg/L)	大腸菌群 10 ⁵ MPN/ 100 ml	pH
a	5.0	12.0	2.0	1.0	1.0	6.8
b	20.0	11.0	3.0	2.0	50.0	6.9
m	48.71	9.72	4.33	3.10	199.05	7.24
c	70.0	9.0	7.0	6.0	300.0	7.0
d	100.0	8.0	10.0	9.0	400.0	7.1
e	150.0	7.0	20.0	15.0	500.0	7.2
f	200.0	5.0	30.0	30.0	500.0	7.2

図-4 Z₁-Z₂ 軸上の各水質測定点の因子スコアの分布 (負荷量項目を加えた場合)

には、関東地方などと比べるとやや小さいが、汚濁度、汚濁総量が比較的大きい河川があり、中国地方には汚濁総量は比較的小さいが、汚濁度がかなり大きい河川のあることがうかがえる。さらに、九州地方では汚濁総量は比較的小さいが、汚濁度の大きい河川のあることがわかる。

次に、各河川水系においてその流下方向に沿って、F₁-F₂ 軸上で上流側測定点から順次因子スコアをプロットすると各河川水系における平面的な汚濁変動を質、量の両面からとらえることができる。いくつかの河川の流下に伴う汚濁変動の例を1979年の資料により図-7(b)~(g)に示す。その結果、ここで用いた資料の範囲で各河川の流下に伴う汚濁変動は大きく2つのパターンに分けることができ、図-7(a)に示すようになる。ここで矢印は流れの方向を表す。この図には、いくつかの水質構成でそれぞれ流量の異なる場合の分布を直線で示してあり、水質構成は図-4と同様である。これにより、図上の点の水質構成、負荷量のおおよその目安を知ることができる。パターンAの河川は流下に伴い、汚濁総量の増加に比べ汚濁度の増加の大きい河川であり、パターンBの河川は流下に伴い、汚濁度はほとんど増加しないが汚濁総量の増大する河川である。パターンA、Bの河川はさらに細かく次のように分けることができる。

パターンA

A₁: 汚濁総量は小さいが、汚濁は上流部、あるいは

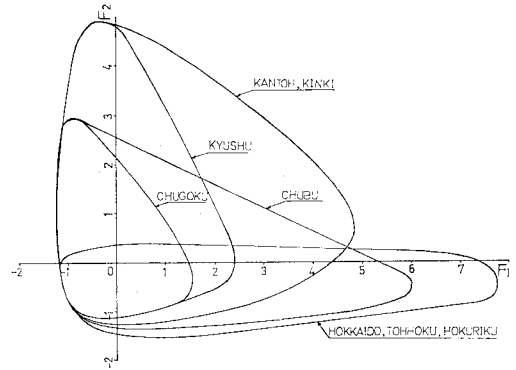
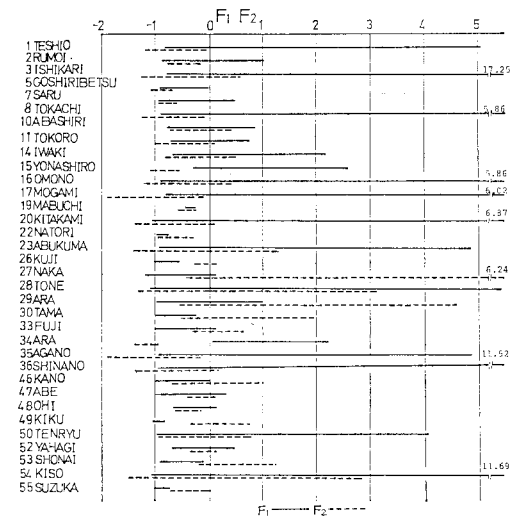
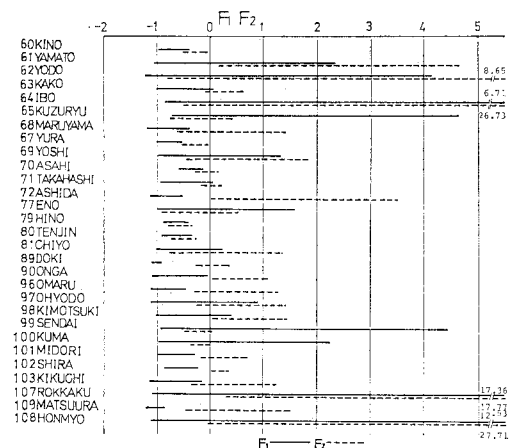


図-5 F₁-F₂ 軸上の地方別因子スコア分布の概略 (全資料)



(a)



(b)

図-6 河川水系別の F₁, F₂ スコア分布 (全資料)

中流部からかなり進行しており、流下に伴いさらに汚濁が量、質ともに増大する河川で、本明川、六角川などがこれに属する(図-7(b))。

A₂: 上流部の汚濁度は小さいが、流下に伴い汚濁総量の漸増とともに、汚濁度は急激に増大する河川で、多摩川、芦田川、菊池川などがこれに属する (図-7 (c)).

A₃: 上流部の汚濁度は平均水質以下で小さいが、流下に伴い汚濁は徐々に進行する河川で、網走川、狩野川などがこれに属する (図-7 (d)).

パターンB

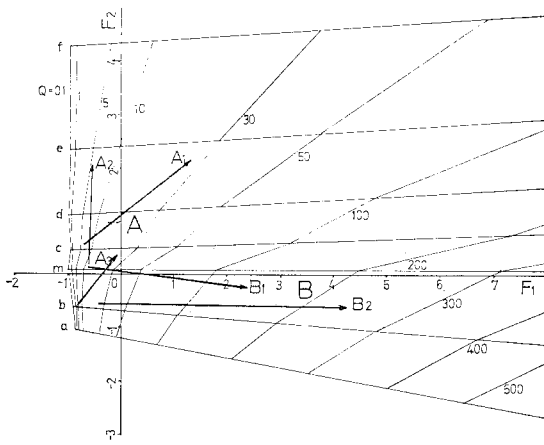
B₁: 上流部でやや汚濁が進行しているが、流下に伴い汚濁総量は増加するが、汚濁度はほとんど増大しないか、あるいは減少していく河川で、天竜川、九頭竜川、大淀川などがこれに属する

(図-7 (e)).

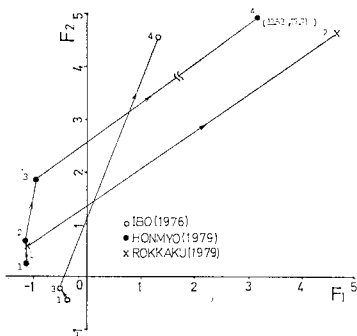
B₂: 上流部から汚濁度は比較的小さく、流下に伴い汚濁総量は増大するが、汚濁度はほとんど増大しない河川で、このパターンに属する河川が最も多く、石狩川、信濃川などの大河川、さらに天塩川、十勝川、千代川、江の川、川内川などがこれに属する (図-7 (f)).

なお、ここで上流部というのは、河川において中流部から上流側の地点で河川源流部の地点ではない。

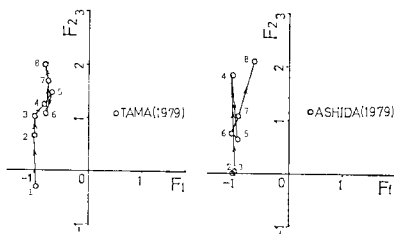
パターンAに属する河川は、年平均流量が0~50 m³/s の場合が多く、これらの中小河川は発生汚濁量が大きいと急激に汚濁しやすいことを示している。パターンBに



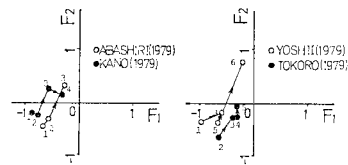
(a) 流下に伴う汚濁変動パターン



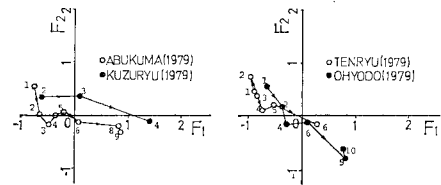
(b) A₁ パターンの河川の例



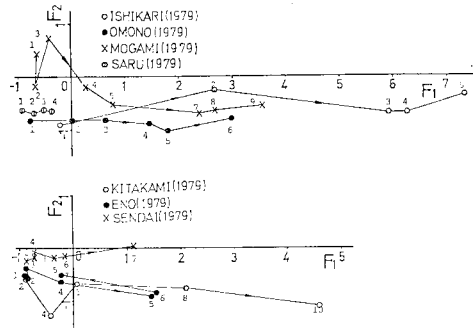
(c) A₂ パターンの河川の例



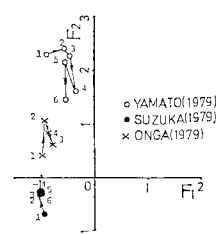
(d) A₃ パターンの河川の例



(e) B₁ パターンの河川の例



(f) B₂ パターンの河川の例



(g) A, B パターンに属さない河川の例

図-7 河川の流下に伴う F₁-F₂ 軸上の汚濁変動パターン

属する河川は流量増加に伴う希釈効果のある河川といえ、比較的大河川が多い。もちろん、これらはここで用いた資料のみから得られるおおよその分類であり、また図-7 (g) に示すようにこれらのパターンに適合せず、複雑な変動をする河川や、変動の非常に小さい河川もある。なお、各河川とも毎年ほぼ同じ変動パターンを示しており、各測定点においても顕著な経年変化はみられない。さらに長年月にわたる資料が蓄積されれば、経年変動特性をとらえることもできると考えられる。

このように、負荷量項目を考慮することにより、ある水域の水質環境の全体像を量と質の2つの総合指標でとらえることができる。これらの総合指標は、数多くの水域の資料から導出されたものであれば、より一般的な指標となり、水質管理上の総合指標にできると考えられる。

5. 結 論

九州地方の河川および全国河川の水質資料を対象にして、主成分分析を中心とした解析により河川水質の総合指標を導出した。さらに、これらの総合指標により河川水域の水質環境の相互比較を行い、これらの総合的な河川水質管理指標としての意義について検討した。以下に結果の要約を述べる。

(1) 九州の14河川の10水質項目の資料を対象に、水質項目数を変化させての主成分分析の結果、第1主成分では、総合的な汚濁の程度を表わす因子が得られた。このことは、水質項目数が少なく、SS、DO、COD、BOD、大腸菌群、pHの6水質項目の場合でも再現性があり、第1主成分が総合指標として有効であることを指摘した。

(2) 全国107の1級河川水系のSS、DO、COD、BOD、大腸菌群、pHの6水質項目による1976年から1979年の資料を対象に主成分分析の結果、九州地方河川の解析の場合と同様、第1主成分として総合的な汚濁の程度を表わす因子が得られ、第1主成分が総合指標として有効であることを指摘し、これを「水質総合指標」とした。

(3) 上記6水質項目に負荷量項目として、SS負荷量、DO負荷量、COD負荷量、BOD負荷量、大腸菌群負荷量を加えた主成分分析では、第1主成分に総合的な汚濁総量の大きさを表わす因子、第2主成分には水質項目のみによる主成分分析の第1主成分に相当する総合的な汚濁の程度を表わす因子が得られ、これらを「負荷量-水質総合指標」とした。

(4) 「水質総合指標」および「負荷量-水質総合指標」により河川の水質環境の総合的評価が可能であった。す

なわち、これらの総合指標により各河川水質環境の比較検討ができ、各地方における河川水域の水質環境の特性もある程度明らかにできた。さらに、「負荷量-水質総合指標」では、各河川水系の流下方向に沿った水質環境の全体像の変動を、その水質構成のおおよその目安をつかみながらとらえることができ、またほぼ5つのパターンに分類することができた。これらのことから、これらの総合指標が河川水質管理上の指標になり得ると考えられる。

なお、本報で使用した全国河川の資料は水質年鑑記載の年平均値であるが、これには必ずしも平均値として適当でないものも含まれており、また洪水時等の資料は少ない。したがって、今後水質測定条件の整備がなされ、洪水時等の資料が得られれば、さらに汚濁の状態をよりの確にかつ多角的にとらえることができると考えられる。

以上のような結果を得たが、主成分分析より得られる総合指標は、原資料の含む水質項目に制約される。複雑多様な水質汚濁現象を考えると、水質環境のより多面的な資料の蓄積、それらの関連解析、総合指標を導出するための資料の把握とその方法等の検討が必要である。さらに、水質汚濁の発生側の指標、たとえば工業出荷額、流域人口、流域人口密度、下水道普及率などと、結果側の指標としての各水質指標、総合指標との関連解析を行うことにより、水質管理指標としてより効力の発揮できる総合指標が得られると考える。

参 考 文 献

- 1) 安田正志・中村郁子：河川における生物学的な水質判定と理化学的水質調査，土木学会論文報告集，No. 228，pp. 54～64，1974。
- 2) 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な水質判定の関連性，陸水学会第42回大会，1977。
- 3) 安田正志・高橋邦夫ほか：河川における水質環境の評価に関する研究，第13回衛生工学研究討論会講演論文集，pp. 13～18，1977。
- 4) 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，Vol. 12，pp. 37～43，1979。
- 5) 能登勇二：河川水質の総合的評価に関する研究(第2報)，富山県立技術短期大学研究報告，Vol. 13，pp. 79～84，1980。
- 6) 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。
- 7) 海老瀬潜一・勝部利之：多変量解析法による貯水池水質の評価，土木学会論文報告集，No. 26，1978。
- 8) 中島 淳・鎗田 功ほか：底質の重金属汚濁に対する主成分分析法の適用，水処理技術，Vol. 17，No. 8，1976。
- 9) 伊藤伸一ほか：多変量解析法の水質汚濁研究への応用，水質汚濁研究，Vol. 14，No. 2，1981。
- 10) 奥野忠一ほか：多変量解析法，日科技連，1971。
- 11) 日本河川協会編，建設省河川局監修，日本河川水質年鑑，1976版，1977版，1978版，1979版，山海堂。

(1982.12.11・受付)