

<地域汚染>

海跡湖の水質汚濁機構に関する研究*

矢 鋪 満 雄**・石 田 喜 朗**・砺 波 信 一**

1. はじめに

石川県の中能登から南、福井県境までの日本海沿岸一帯には約 52 km にも及ぶ長大な砂丘が形成されており、この中に閉鎖性水域としての海跡湖が点在する。これらの海跡湖の特徴は、

①海に近く位置し、海との水位差がほとんどないことである。このため、流入河川群の全流域を集水域としており、堆積作用が大きく、また、集水域からの人為汚濁排水をすべて受入れて、汚濁が進み易い。

②水深が浅く、相対的に湖水表面積が大きいいため、とくに夏期の生物生産が大きく、風浪による底泥の巻き上げが起り易く、水質変動が大きい。また干拓が行われ、湖の面積・容積が縮小しており、これに伴って堆積作用や汚濁が相対的に大きく加速されるとともに、河川の流況変動による影響が直接湖沼水質に反映される。

③多面的な利用が複合して行われている。すなわち、農業用水、水産用水、釣り・ボート等のレジャーや観光等の保健、休養を目的とした利用等多様であり、また、湖水の塩水化の防止、湖岸の防災を目的とした防潮水門が設けられている。このことは堆積や汚濁の進行に加速的に作用する。

などである。これらのことから、湖の水質保全対策さらに集水域全体を含む環境保全対策の再検討が求められている。

そこで昭和55年度から石川県では、代表的な海跡湖である河北潟、木場潟、柴山潟を対象として水質保全総合調査を実施している¹⁻³⁾。本調査によって得られた結果について総括的にみた汚濁の特徴あるいは特異性・類似性といった面について、多変量解析手法を用いて解析するとともに、とくに柴山潟を例にシミュレーションモデルを用いて、水理・水質の現況再現と将来予測を試み、若干の知見を得たので以下に報告する。

2. 河北潟、木場潟、柴山潟の概要

図1に調査対象とした海跡湖の位置と調査地点、また表1に各海跡湖の諸元を示した。

河北潟は、金沢市の北部に位置し、農林省が行った干拓事業によって水面の約3分の2が干拓され、現在は調

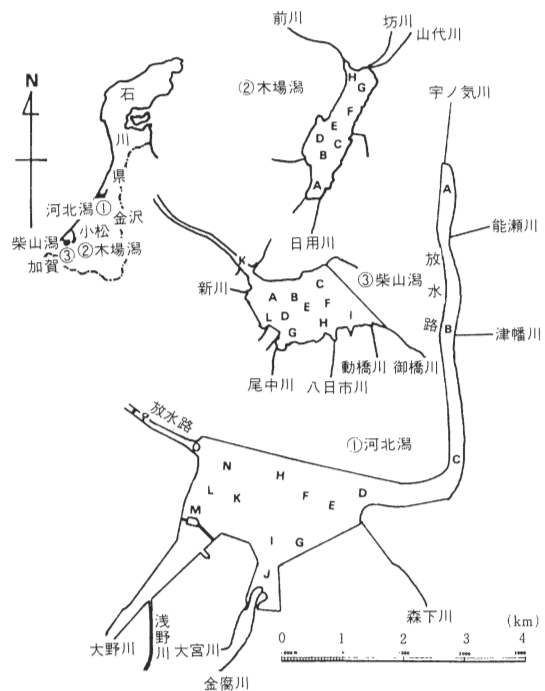


図1 調査対象海跡湖

表1 海跡湖の諸元

項目	河北端	木場潟	柴山潟
水表面積 (K m ²)	6.05	1.13	1.85
貯水量 (万 m ³)	1340	183	385
最大水深 (m)	6.0	5.2	4.8
平均水深 (m)	2.2	1.6	2.1
平均滞留時間(日)	12	14	9

* Studies on the Water Pollution Mechanism of Inland Sea-lakes in Ishikawa

** Michio YASHIKI, Yoshiaki ISHIDA, Shin-ichi TONAMI (石川県衛生公害研究所) Ishikawa Research Laboratory for Public Health and Environment

整池、承水路を残すに過ぎないが、調整池の湖水面積 6.05 km²、平均水深 2.2 m、最大 6.0 m、貯水量 1340 万 m³ の県内最大の汽水湖である。流入河川としては、宇ノ気川、津幡川、森下川等がある。また海域への流出河川としては大野川があるが、別に洪水調節用として人工的に掘削された大根布放水路がある。潟干陸部の農用地としての利用、ひいては干陸部への農業用水供給を前提として、湖水の塩水化防止のため放水路には防潮止水門が、また大野川には防潮水門が設置されている。流入河川から潟への汚濁負荷は貯水量の割には少ないものの、大野川の逆流に伴って、大野川へ流入する浅野川からの汚濁負荷が甚大となっている。なお浅野川は金沢市下水道終末処理場排水を受け入れており、今後その拡張が予定されているので大野川への汚濁負荷もますます大きくなるわけで、この点から河北潟湖水への影響が危惧される。ちなみに、干拓と同時に潟での漁業権は消滅している。

木場潟は、小松市の西南部に位置する湖水面積 1.13 km²、平均水深 1.6 m、最大 5.2 m、貯水量 183 万 m³ の湖で、かつては汽水湖であったが、唯一の流出河川である前川の中流部（今江潟）の干拓、梯川への流路変更等に伴って流路が延長され、また、ここに逆流止水門 2 基が設置されたことによって現在は淡水湖となった。流入河川としては日用川、山代川等がある。潟へは、粟津温泉街の排水の一部が流れこむほか農業排水の流入がある程度で、周辺水田の灌漑用水として利用され、干拓もされずほぼ自然の姿で残されている。そのため、木場潟とその周辺 1.8 km² の地域は、自然環境の保全を目的とした水郷公園となっている。

柴山潟は小松市の西方、加賀市に位置し、平均水深 2.1 m、最大 4.8 m、貯水量 385 万 m³ の汽水湖である。過去において農林水産省干拓事業により湖面積の約 3 分の 2 が干陸され、現在の残存面積（湖水面積）は 1.85 km² に縮小した。流入河川としては、動橋川、御橋川、八日市川などがある。また流出河川としては、人工的に掘削された新堀川が唯一のもので、その河口部には海水の侵入による湖水の塩水化防止用としての防潮水門が設置されている。利水面では、農業用水のほか潟全域に漁業権が設定され、さらに潟の南西岸に収容力 1 日約 1 万人の片山津温泉が立地し、その風致観光資源としての価値が大きく、越前加賀海岸国定公園の一部となっている等、最も多様である。片山津温泉街からの排水は、加賀市公共下水道で処理され、潟の南東に位置する浄水センターから、温泉成分（含石膏塩泉）を含む特異的な水質をもつ排水として、潟へ排出され、また集水域上流約 8 km の所には、これとほぼ同規模の収容力を持つ山代温泉が立地し、その排水は、動橋川と八日市川を介して、潟に

流入している。これらの 2 つの大きな汚濁負荷に加えてさらに農業排水の流入もあって、近年水質の富栄養化、悪化が深刻となっている。

3. 河北潟、木場潟、柴山潟の水質特性

3・1 湖沼水質と流入河川水質

各湖沼の水質は、基本的には流入河川の水質に依存して変動するが、春期から夏期にかけて旺盛な内部生産による有機汚濁物質の増加分が加わるなどかなり特異的に変動している。河北潟は森下川、宇ノ気川等 22 河川、木場潟は坊川等 12 河川、柴山潟は動橋川、御橋川等 11 河川がそれぞれの湖沼に流入している。そこで、湖沼内の水深別水塊体積と各流入河川の流量を重みとした SS、COD、BOD、T-N、T-P のそれぞれの加重平均濃度を湖沼別、調査時別（各湖沼とも 4 回）に対比して表 2 に示した。これによると SS を除いた COD、BOD、T-N、T-P の湖水中の 4 回の平均値は木場潟 > 河北潟 > 柴山潟の傾向であり、3 湖沼の中では木場潟の水質の悪化が目立つ。また、湖水と河川水との濃度比の平均値から、COD、BOD は増加、T-N、T-P は減少傾向が見られる。このことから湖内における有機性汚濁物質の生産と栄養塩の湖内蓄積に伴う見掛け上の消費の傾向の大きいことが推察される。なお、湖沼の水質を環境基準値に照合すると、COD は湖沼の C 類型に相当しており、また、T-N、T-P は類型 V をも上回る過栄養状態であり、富栄養化の加速化が危惧される状況である。

3・2 クラスタ分析

クラスタ分析⁴⁾は、P 種の属性を持つ N 個の試料を何らかの方法で定義した内在的類似性、または、その距離に基づいて、デンドログラム（樹状図）という階層構造に布置して幾つかのクラスタつまり群にまとめ上げて分類する手法である。

6 月および 12 月調査時に採水した河北潟 16 地点、木場潟 8 地点、柴山潟 11 地点の表層湖水試料についての 12 成分（SS、COD、BOD、T-N、T-P、NH₄-N、PO₄-P、Na、Ca、SO₄、SiO₂、Fe）の分析値を用いてクラスタ分析を行い、得られたデンドログラムを図 2 に示した。

その結果、巨視的には各湖沼の表層水は湖沼ごとに同一のクラスタに集約、分類されている。しかし、微視的にみると 6 月には①木場潟の全地点と河北潟承水路内の㊦、㊧地点、②柴山潟の全地点、それに③河北潟調整池内の㊨～㊩地点の 3 つのクラスタに分類され、また、木場潟と柴山潟の表層水水質の類似性は河北潟に対してよりは高いことが判る。これに対して、12 月には柴山潟は表層水水質の類似性が高いままであるが、河北潟と木場潟の試料は数種類のクラスタに混在し、歴然とした

表2 湖水と流入河川水の水質

(単位: ppm)

湖沼		SS			COD			BOD			T-N			T-P		
		湖水	河川水	比	湖水	河川水	比	湖水	河川水	比	湖水	河川水	比	湖水	河川水	比
河北	6月	26.9	24.5	1.10	9.6	7.5	1.28	7.2	4.2	1.71	1.34	1.83	0.73	0.131	0.274	0.48
	8月	20.7	27.3	0.76	8.0	6.8	1.18	5.0	2.1	2.38	1.24	1.76	0.70	0.129	0.233	0.55
	10月	23.6	21.6	1.09	8.1	5.2	1.56	5.2	2.6	2.00	1.10	1.34	0.82	0.094	0.182	0.52
	12月	43.3	25.9	1.67	5.2	5.4	0.96	1.5	3.1	0.48	1.18	1.41	0.83	0.135	0.402	0.34
瀧(昭57)	平均	28.6	24.8	1.15	7.7	6.2	1.24	4.7	3.0	1.57	1.22	1.59	0.77	0.122	0.273	0.45
木場	6月	12.5	28.8	0.43	11.1	11.9	0.93	7.3	9.4	0.78	0.97	2.07	0.46	0.166	0.280	0.41
	8月	11.8	12.5	0.94	7.5	5.7	1.32	6.7	4.9	1.34	2.88	3.29	0.88	0.139	0.148	0.94
	10月	24.9	14.3	1.74	9.9	8.8	1.13	6.5	10.6	0.61	1.61	2.80	0.57	0.133	0.275	0.41
	12月	22.2	9.8	2.27	7.0	4.9	1.43	4.6	3.2	1.44	1.28	1.59	0.80	0.097	0.175	0.54
瀧(昭55)	平均	17.9	16.4	1.09	8.9	7.8	1.14	6.3	7.0	0.90	1.69	2.44	0.69	0.121	0.220	0.55
柴山	6月	16.9	16.8	1.01	7.1	4.3	1.65	6.3	1.9	3.32	1.29	1.61	0.80	0.106	0.159	0.67
	8月	18.1	66.5	0.27	7.0	7.2	0.97	5.7	6.2	0.92	1.16	1.23	0.94	0.169	0.187	0.90
	10月	8.4	7.0	1.19	6.3	4.4	1.43	4.0	2.2	1.82	1.07	1.29	0.83	0.086	0.127	0.68
	12月	10.3	26.6	0.39	3.3	5.3	0.62	1.5	3.2	0.47	1.22	1.63	0.75	0.069	0.132	0.52
瀧(昭56)	平均	13.4	29.2	0.46	5.9	5.3	1.11	4.3	3.4	1.26	1.19	1.44	0.83	0.108	0.151	0.72

注) 比: 湖水/河川水

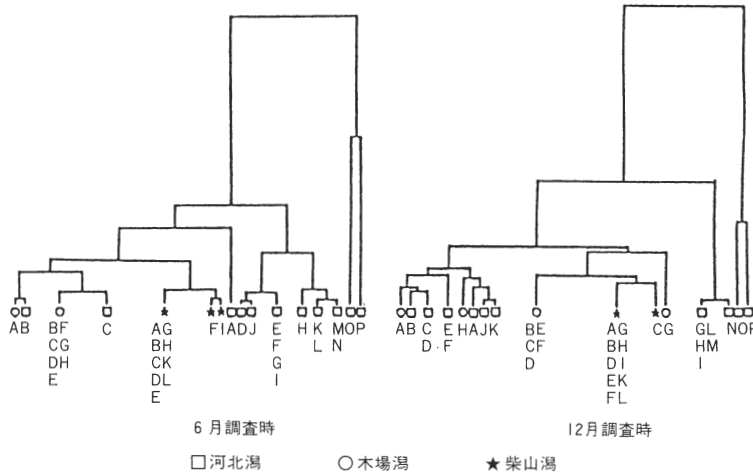


図2 海跡湖表層水の類似性(クラスター分析)

比較ができない状態である。さらに河北瀧については両時期ともにとくに大根布放水路(□, ⊞)の水質が他の表層水水質に比べて特異的であり、水質の類似性から見て調整池、承水路、大根布放水路の3つの群に分類できる。以上のように、全体的には湖沼ごとに水質の類似性の高いのは当然であり、湖盆形態の単純なものほど湖沼内に特異水塊の存在がなく均質性が高い。しかし、河北瀧における場合など形態の複雑な湖沼においては水塊構成が複雑である。

3.3 因子分析

因子分析⁹⁾は相互に関わり合いをもつ属性や事象としてのデータ群の中から冗長な情報を排除することによってデータを簡略化し、いくつかの総合指標としての成分にまとめ、成分間の背後にあって、各成分の特徴を規定している潜在因子を探索するための手法である。各成分

と個々の属性値との間の相関係数に相当するものが因子負荷量であり、ある成分について、すべての変数の因子負荷量の平方和をすべての変数にもつ分散の総和で除したものが、その成分の寄与率である。寄与率が大きい成分ほど、変数のもつ全体のバラツキの説明力が大きい。また、抽出された各成分のもつ傾向に対してそれぞれの試料がどの程度強く関わるかを示すのが因子得点である。

まず、表3にクラスター分析と同じデータに水深ごとの試料を加えたデータ群に対して因子分析を行い、因子負荷量等の諸量を表示した。

6月には、全体のバラツキの説明力が最大となった第1主成分としてはCOD, BOD, NH₄-N, T-N, T-P, つまり生物生産性関連因子が、また第2主成分としてはPO₄-P, Na, Ca, SO₄, SiO₂といった塩類因子が、そして第3主成分としてはSS, Feの濁り・底泥因子が

表3 3海跡湖水質の因子負荷量

番号	項目	6月調査時			12月調査時		
		第1主成分	第2主成分	第3主成分	第1主成分	第2主成分	第3主成分
1	SS	-0.029	-0.247	0.968	0.998	-0.049	-0.035
2	COD	0.986	-0.138	-0.092	0.733	0.009	-0.680
3	BOD	0.985	-0.018	-0.169	0.039	0.011	-0.999
4	NH-N	0.986	0.165	0.018	0.048	0.275	-0.960
5	T-N	0.985	0.028	0.165	0.047	0.918	-0.392
6	PO-P	0.348	-0.804	0.481	0.976	-0.154	0.152
7	T-P	0.814	-0.062	0.576	0.986	-0.046	-0.154
8	Na	-0.076	-0.993	-0.086	-0.130	0.991	-0.021
9	Ca	0.215	-0.855	0.470	-0.131	0.990	-0.049
10	SO ₄	-0.080	-0.996	-0.007	0.228	0.949	0.217
11	SiO ₂	-0.170	-0.930	0.325	0.471	0.493	0.730
12	Fe	-0.013	-0.119	0.992	0.994	-0.062	0.080
固有値		3.89	3.27	1.67	4.37	3.29	2.12
累積寄与率(%)		32.4	59.7	73.7	36.5	64.0	81.6

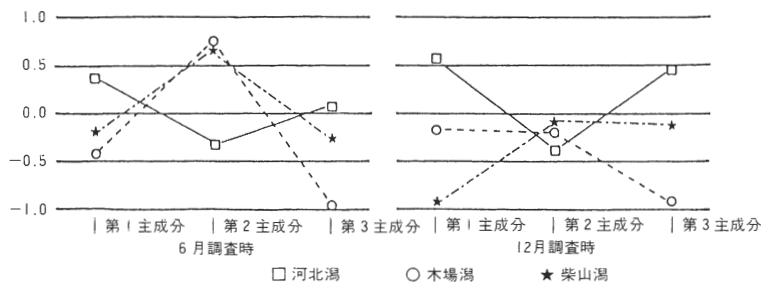


図3 各海跡湖の因子得点(平均値)

それぞれ抽出されている。ちなみに第3主成分までの累積寄与率は73.7%と、要約度としては、ほぼ満足できるものである。一方12月には、第1主成分にSS、Feなど濁り・底泥因子が、第2主成分にNa、Caなどの塩類因子、また第3主成分にはBOD、NH₄-Nなどの生物生産関連因子が抽出され、累積寄与率81.6%と高い要約度である。

以上の因子分析の結果から、6月と12月における水質規定因子の違い、つまり春期から夏期にかけては生物生産、また、冬期においては底泥巻き上げを主因とした水質構成であることが解明された。

次に、6月、12月の調査時期別に各湖水試料の因子得点をみたのが図3である。木場潟と柴山潟については潟全体、また、河北潟についてはクラスター分析の結果を踏えて、潟調整池のみを評価対象とした。6月時における各湖沼因子得点の平均値から第1主成分の生物生産関連因子について、河北潟>柴山潟>木場潟の順に関連の強さが現われている。この結果から河北潟、柴山潟に比べて木場潟では、湖沼内での富栄養化現象の進展によるものよりも、流入河川水質に依存した汚濁の発現の強いことが推測される。第2主成分の塩類因子については、6月時、12月時とも木場潟と柴山潟ではほぼ同じレベルの得点となっているが、これは両湖沼の生成過程が同じであり、串川と前川といった間接的な連絡水路のあること、また塩類が保存成分であることから当然のことと思われる。

そして、12月時の場合、濁り・底泥関連の第1主成分の得点が、河北潟>木場潟>柴山潟の順となっているが、この序列を水深、面積、地形など湖沼形状の異なる中で冬期の季節風である北西風による湖水の攪乱と、これに伴う底泥の巻き上げを受け易い順位に読み替えて評価するのが妥当であろう。

4. 柴山潟の水質汚濁機構

柴山潟は3海跡湖の中ではその利用形態が最も多様であり、潟周辺の住民にとってのみならず、国定公園の一部として多くの外来客にとっても重要な環境資源となっているが、近年水質の悪化が深刻化し、水質および潟周辺を含めた環境保全に関心が高まっている。

一方、片山津温泉から加賀市公共下水道浄化センターを通じて排出される排水は、含石膏食塩泉を主成分とした特異的な保存成分組成(表4)をもち、また山代温泉排水を受入れ潟に流入する動橋川、八日市川およびその他の流入河川についてもその構成が比較的単純であることなどから、潟への負荷量が相当大きいにもかかわらず、その把握が比較的容易である。

以上の2点に着目して、以下で柴山潟の水質についてより詳細な解析を試みた。

4・1 湖沼における物質生産性

4・1・1 流入河川の負荷影響力

湖水中で変化し易いCOD、BOD等の非保存成分の

湖生産量を推定するため、1次水質としての各流入河川の塩類等保存成分 (EC, Na, K, Ca, Mg, Cl, SO₄, Fe, Mn) の濃度比の特異性に着目して、湖水塊を構成する各流入河川水の混合割合を計算した。いわばこの混合割合は湖沼に対する流入河川の負荷影響力とでも言えよう。混合割合の計算手法にはダイナミックス法⁹⁾を採用した。

流入河川としては、湖沼水質に対する影響力の大きい、御橋川、動橋川、八日市川、浄化センター排水、1号幹線排水路の3河川、2水路を選んだ。また、計算に際し

て各河川の調査時ごとの水質変動を緩和するため、全調査平均値を用いることとした。上記3河川、2水路の項目別平均値は表4、混合割合の計算結果は表5に示した。浄化センター排水は、潟の流出河川・新堀川直近へ排出されるため潟内での混合は小さいことが判る。

4・1・2 因子分析による湖水塊構造の解析

第1主成分の生物関連因子について、6月時の柴山潟における湖水の水塊構造を各調査地点の水深別の試料ごとの因子評点散布図として図4に示した。これによれば、概ね各地点の水深0~1mの点が正值側にシフトする

表4 流入河川水質の全調査平均値 (単位: EC μ S/cm, その他 ppm)

(河川)	EC	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	SiO ₂	Fe	Mn
御橋川	148	11.1	3.1	7.3	2.5	18.4	10.5	11.9	3.38	0.21
動橋川	102	8.8	1.4	5.3	1.7	11.2	6.7	13.2	1.25	0.06
八日市川	183	13.8	2.5	8.9	2.8	20.7	14.1	11.2	2.11	0.16
浄化センター排水	1676	244.6	12.8	164.6	4.8	606.2	29.9	17.1	0.47	0.04
1号幹線排水路	354	39.7	4.6	13.3	6.1	57.2	20.8	14.8	1.99	0.29

表5 柴山潟における流入河川水の混合割合

(地点)	御橋川	動橋川	八日市川	浄化センター排水	1号幹線排水路
A-(0.1)m	0.3235	0.2555	0.4055	0.0023	0.0132
(1.0)m	0.4835	0.1955	0.2955	0.0023	0.0232
(2.0)m	0.2945	0.2855	0.3845	0.0023	0.0332
(3.0)m	0.2255	0.3155	0.4070	0.0000	0.0520
(4.0)m	0.9713	0.0287	0.0000	0.0000	0.0000
B-(0.1)m	0.2247	0.3425	0.4055	0.0019	0.0254
(1.0)m	0.3851	0.2525	0.3455	0.0020	0.0149
(2.0)m	0.1635	0.3749	0.4155	0.0021	0.0440
C-(0.1)m	0.1455	0.4135	0.4155	0.0022	0.0233
(1.0)m	0.0635	0.4355	0.4755	0.0022	0.0233
(2.0)m	0.1855	0.0098	0.5446	0.0000	0.2601
D-(0.1)m	0.1555	0.4045	0.4055	0.0023	0.0322
(1.0)m	0.0149	0.3625	0.6225	0.0001	0.0000
(2.0)m	0.2945	0.3344	0.3355	0.0022	0.0344
E-(0.1)m	0.3536	0.2455	0.3955	0.0013	0.0012
(1.0)m	0.0950	0.4275	0.4355	0.0010	0.0410
(2.0)m	0.6085	0.2755	0.1155	0.0003	0.0002
F-(0.1)m	0.1545	0.3955	0.4377	0.0000	0.0123
(1.0)m	0.1055	0.5645	0.3055	0.0023	0.0222
(2.0)m	0.1655	0.7849	0.0105	0.0011	0.0380
G-(0.1)m	0.2235	0.3855	0.3455	0.0022	0.0433
(1.0)m	0.3734	0.2944	0.2555	0.0012	0.0705
(2.0)m	0.3745	0.3035	0.2555	0.0023	0.0642
H-(0.1)m	0.0885	0.2655	0.6455	0.0004	0.0001
(1.0)m	0.2949	0.1725	0.5325	0.0001	0.0000
(2.0)m	0.0935	0.3355	0.5675	0.0013	0.0022
(3.0)m	0.1355	0.5578	0.3055	0.0011	0.0001
I-(0.1)m	0.2635	0.4255	0.2855	0.0022	0.0233
(1.0)m	0.0535	0.5145	0.4055	0.0020	0.0245
(2.0)m	0.3295	0.4655	0.2025	0.0013	0.0012
(3.0)m	0.1845	0.7575	0.0545	0.0008	0.0027
K-(0.1)m	0.6855	0.1155	0.1955	0.0013	0.0022
(1.0)m	0.3835	0.2655	0.3055	0.0024	0.0431
(2.0)m	0.6945	0.0145	0.2475	0.0078	0.0357
L-(0.1)m	0.2176	0.2043	0.5460	0.0000	0.0321
(0.5)m	0.4145	0.1545	0.4110	0.0000	0.0200
(1.0)m	0.2145	0.2255	0.5562	0.0012	0.0026
(1.5)m	0.2463	0.1925	0.5525	0.0002	0.0085
(2.0)m	0.3305	0.1805	0.4855	0.0009	0.0026
(2.5)m	0.3655	0.1555	0.4578	0.0000	0.0212

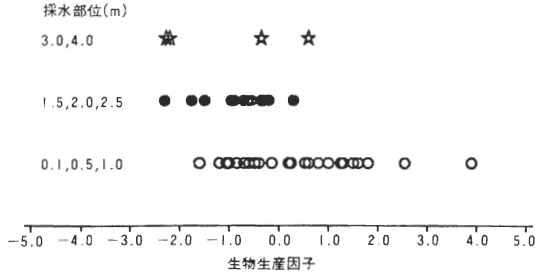


図4 柴山潟湖水の因子得点散布図

傾向であり、水表から水深1 mまでの光合成生産の旺盛なことを示唆している。

4・1・3 光合成生産量

柴山潟のL地点における明暗瓶法による光合成生産量の調査結果(表6)から、光合成の比較的盛んな層は水表から水深0.5 m位までであり、以下水深の増加とともに減衰するが、補償水深は約2 mであると見てとれる。

4・1・4 湖沼における物質生産力の推定

水表から水深1 m層までの光合成による生物生産の盛んなことに着目して、水深0~1 m層間の6月調査時におけるCOD, BOD, SS, T-N, T-Pの生産量を推計することとした。まず、この層の水塊について流入河川の混合割合に、その河川の水質を乗ずることによって各水質の平均供給濃度を求め、実測濃度の平均を現存濃度として現存濃度と供給濃度との差を平均生産濃度とした。そして、この生産濃度に水深0~1 m層の貯水量を乗じて生産量が得られる。その結果(表7)、6月調査時における潟内の平均生産濃度は、COD 3.4 ppm, BOD 5.1 ppmとなり、平均滞留時間(3.7日間)当りの生産量はCOD 6.3 t, BOD 9.4 tと推定されたのに対して、SS, T-N, T-Pは減少傾向を示している。また、SSはこれらの項目の中ではとくに変動が激しい成分で、採水時の気象状況、とりわけ雨量や風の影響を受け易く、生産性の増加とは直接かかわりない面もある。

4・2 水理・水質シミュレーション

水質汚濁現象のシミュレーションは①水域に対する外的インパクトを想定した水質の予測、②水質保全計画を策定しようとする時、その効果と予測の両面から重要視

されており、今や必要不可欠となりつつある。そして、いずれの場合ともに対象水域における現況水質を再現すること、つまり水質シミュレーションモデルを構築することが基本とされている。

4・2・1 水質シミュレーションモデル

図5に水質シミュレーションモデルのフロー・チャートを示した。このモデルは水理・拡散モデル⁷⁾をメインモデルとし、これの境界条件を与えるためのオープン・バウンダリーの潮位に関する調和解析モデル⁸⁾、流入河川由来などのメッシュ負荷量についてのタンクモデル⁹⁾をサブモデルとして構成されている。

4・2・2 水理・拡散モデル

水塊の流動を支配する系を運動量と質量保存との両面から捉え、前者はNavier-Stokesの運動方程式、後者は連続方程式として体系化されている^{10,11)}。本報では2次元平面流扱いとし、体力項に水底勾配、粘性項は水平方向に渦動粘性則を、そして鉛直方向のものにManning則を採用したのが特徴である。基礎方程式は以下に示した。

○運動方程式

$$\frac{1}{y} \left(\frac{\partial U}{\partial t} \right) + \frac{1}{y} \cdot U \cdot \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{y} \cdot V \cdot \frac{\partial U}{\partial y} + I_x + \frac{1}{\rho_x} \cdot \frac{\partial}{\partial x} (\rho_x \cdot h) + \frac{n^2 \cdot U \cdot \sqrt{U^2 + V^2}}{h^{4/3}} = 0$$

$$\frac{1}{g} \left(\frac{\partial V}{\partial t} \right) + \frac{1}{g} \cdot U \cdot \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{g} \cdot V \cdot \frac{\partial V}{\partial y} + I_y + \frac{1}{\rho_y} \cdot \frac{\partial}{\partial y} (\rho_y \cdot h) + \frac{n^2 \cdot V \cdot \sqrt{U^2 + V^2}}{h^{4/3}} = 0$$

○連続方程式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = q$$

○拡散方程式

$$\frac{\partial (hs)}{\partial t} + \frac{\partial (hUs)}{\partial x} + \frac{\partial (hVs)}{\partial y} = K_x \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial s}{\partial x} \right) + K_y \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\partial s}{\partial y} \right) + qc - khs$$

ここで、gは重力加速度、U、Vはx、y方向の流速、tは時間、x、yは距離、I_x、I_yはx、y方向の水底勾配、ρ_x、ρ_yはx、y方向の流体密度、hは水深、nは粗度係

表6 光合成生産量の調査結果(L地点) (単位: ppm/日)

水深(m)	6月		8月		10月		12月	
	粗生産量	消費量	粗生産量	消費量	粗生産量	消費量	粗生産量	消費量
0.1	5.26	2.29	4.28	2.13	4.20	2.10	0.52	0.46
0.5	3.08	2.09	1.56	2.40	2.10	1.70	0.28	0.31
1.0	0.81	2.12	0.40	2.62	1.30	1.50	0.16	0.33
1.5	0.59	2.63	0.17	2.30	0.60	1.50	0.14	0.22
2.0	0.20	2.24	0.05	1.90	0.30	1.40	0.03	0.29
2.5	0.18	1.29	0.07	2.37	0.00	1.00	0.02	0.26

表7 混合割合からの生産量の推定結果(6月調査時)

項目	供給濃度 (ppm)	現存濃度 (ppm)	生産濃度 (ppm)	生産量 (t)
COD	4.2	7.6	3.4	6.3
BOD	2.4	7.5	5.1	9.4
SS	17.5	11.6	-5.9	-10.9
T-N	1.303	1.283	-0.020	-0.040
T-P	0.152	0.098	-0.054	-0.100

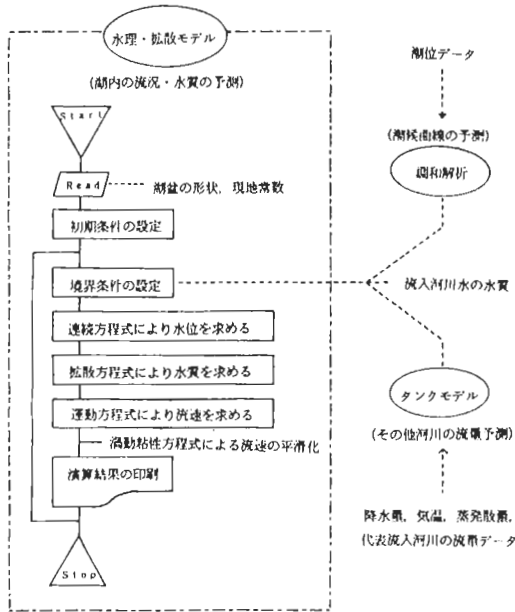


図5 水質シミュレーションモデル

表8 金沢港における4大分潮の調和常数

番号	分潮	角速度(°/h)	A(cos : cm)	B(sin : cm)
0			38.7518	
1	M 2	28.9841	-3.3480	4.2680
2	S 2	30.0000	-0.3279	2.4532
3	O 1	13.9430	0.8660	-3.8984
4	K 1	15.0411	2.4642	2.8461

数, Q_x, Q_y は x, y 方向の通過流量, q はメッシュ流入流量, s は成分濃度, K_x, K_y は x, y 方向の渦動拡散定数, c はメッシュ流入成分濃度, k は自己減衰係数を示す。

4・2・3 柴山潟水質の現況再現

柴山潟は北西方向にある新堀川によって日本海とつながっているが、このオープン・バウンダリーに採用した金沢港(河口は北東約36kmのところ)における潮候曲線を図6に、また表8にその調和常数を示した。すなわち、オープン・バウンダリーにおける潮差は20cm程度であると予想されるが、実際には防潮水門によって海水の遡上が防止されているため、水門の内側において

は、この潮候曲線とは裏腹の水位変動があるものと仮定して計算した。図7はタンクモデルにより動橋川の流量予測をした例である。また図8には、柴山潟の調査地点と100m演算正方形メッシュによる陸地境界線の略図を示した。なお、図6, 7における黒丸は実測値、白丸は計算値であるが、計算値は実測値を再現している。そして、6月および8月調査時の湖水質平均値をfitting lineとして内挿検定法によって現況再現を試み、以下のような演算パラメータ値を得た。

- 粗度係数 0.025
- 渦動粘性係数 0.086 m²/s
- 拡散係数 (X, Y方向とも) 100 m²/s

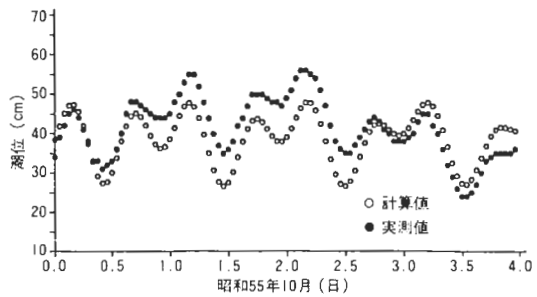


図6 潮候曲線(金沢港)

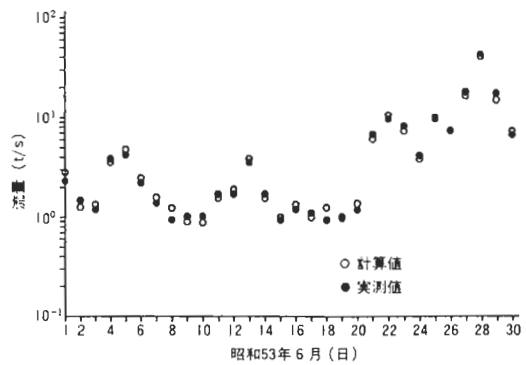


図7 タンクモデルによる流量の推計

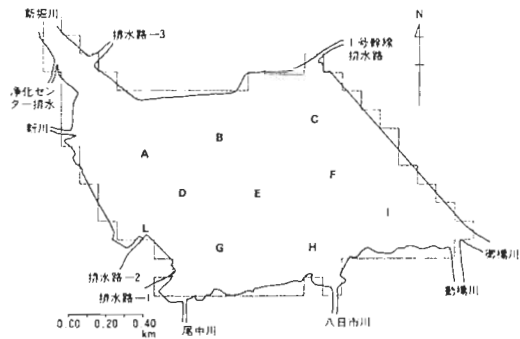


図8 柴山潟調査地点

表9 柴山潟への流入汚濁負荷量と湖沼水質

区分と項目		COD		BOD		T-N		T-P	
		現況	将来	現況	将来	現況	将来	現況	将来
流入汚濁負荷量 (kg/日)	生活系	1158	1710	2066	3108	357	460	62	72
	産業系	278	349	313	355	212	399	40	69
	観光系	124	170	170	215	63	76	9	10
	畜産系	35	35	53	53	12	12	7	7
	自然系	3259	3259	539	539	360	360	17	17
	計	4854	5523	3141	4270	1004	1307	135	175
湖沼水質 (ppm)	平均	7.0	8.0	5.9	7.8	1.24	1.49	0.14	0.16
	最小	4.7	5.6	3.3	4.5	0.89	1.02	0.10	0.12
	最大	7.7	8.6	6.9	8.7	1.75	2.25	0.20	0.24

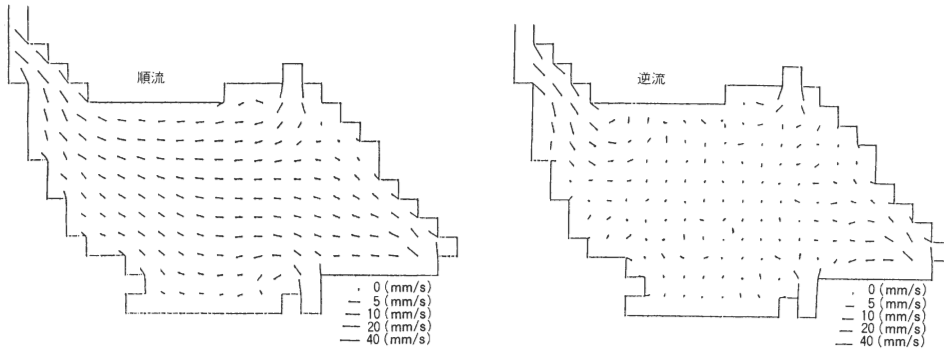


図9 柴山潟の流況

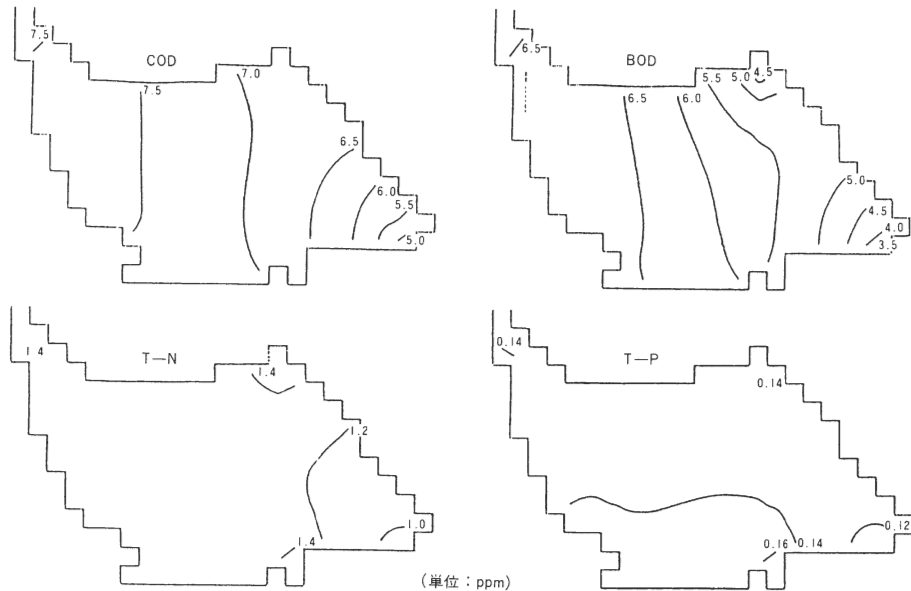


図10-1 柴山潟の水質 (現況)

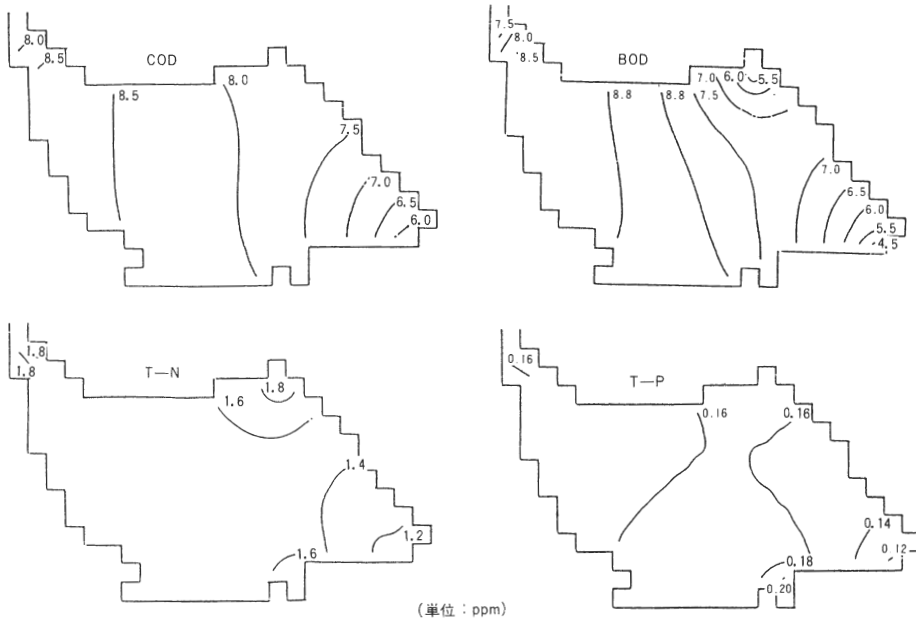


図10-2 柴山潟の水質（将来）

自己減衰係数 ($\times 10^6/s$) COD-1.07, T-N 1.20
 BOD-2.05, T-P 0.60

これらのパラメータ値は柴山潟のような規模の湖沼においては一般的で妥当な値である。現況再現結果は表9, 図10-1に示した。すなわち, COD, BOD, T-N, T-Pのfitting line値(ppm)7.1, 6.0, 1.23, 0.138に対して再現値(ppm)はそれぞれ7.0, 5.9, 1.24, 0.14と適合状況は良好である。

4・2・4 柴山潟水質の将来予測

(1) 流入汚濁負荷量

柴山潟流域における汚濁発生源を生活系, 産業系, 観光系, 畜産系および自然系に分類し, 潟への流入汚濁負荷量を算出して表9に示した。なお, 温泉旅館由来の負荷量は観光系に算入した。

昭和56年(現況)における流入河川での実測値に基づく流入汚濁負荷量は, BOD 3142 kg/日, COD 4855 kg/日, T-N 1004 kg/日, T-P 135 kg/日である。発生源別には BOD の生活系からの負荷割合が66%と高く, COD は自然系からの負荷が67%を占めている。また, T-N については, 生活系と自然系に由来した負荷がともに約3分の1を分担している。

これに対して, 昭和65年(将来)における流入汚濁負荷量は, 流入河川の流域別に人口, 製造品出荷額および商品販売額, 下水道の整備, 観光客数の伸び率, 畜産飼育頭数の推移や土地利用状況の動向などを推計して算定した。その結果, BOD, COD, T-N, T-P は現況に比

べてそれぞれ36, 14, 30, 30%の増加となった。

(2) 湖沼水質

柴山潟の昭和56年6月~8月調査時(現況)の水理・拡散現象を再現して得た演算パラメータと流入汚濁負荷量をシミュレーションモデルに適用して昭和56年6月~8月(将来)の水質を予測した結果は表9, 図9, 図10-2に示した。

COD は動橋川の近傍の水域で同河川からの負荷の影響が現出して若干低くなるものの, ほぼ湖沼の全域で顕著な濃度の増加が見られ, 平均値は現況の7.0 ppm に対して, 将来には8.0 ppm と1 ppm 汚濁が進み, とくに潟西部の湖水は湖沼類型Cすら適合しなくなり, 夏期における水質の悪化が心配される。また, BOD については将来値が平均7.8 ppm と現況値に比べて実に2 ppm も高くなるといった結果である。

T-N は1号幹線排水路, 八日市川, 浄化センター排水の流入点付近は, 高目に分布しているが, 中央部の広範囲にわたって濃度差はほとんど認められない。また, 全メッシュ平均濃度は現況の1.24 ppm に対して将来が1.49 ppm と約2割高となり, とくに等濃度線の比較から, 浄化センター排水と1号幹線排水路由来の負荷量の増大による影響が目立つ。これに対して, T-P はオーダーが低いこともあり, 目立った悪化は認められない。また, 八日市川, 動橋川, 浄化センター排水の流入点付近を除いて, ほぼ湖沼全域にわたり一定と言えるほど濃度差が小さい。

5. 考 察

湖沼等の閉鎖性水域における有機性物質や栄養塩等の動態、水質汚濁機構については、湖沼内での物質収支・循環、あるいは流入河川からの汚濁負荷量の算定など、数多くの研究が報告されている。しかし、その水域を総合的に把握して体系化することは容易ではない。一方、当該水域における水質汚濁顕在化の傾向は全国的な趨勢であり、その対策は急務とされている。とりわけ海跡湖については、汽水性、停滞性に加えて利水の多様化によって汚濁現象が非常に複雑化しており、問題はより深刻である。このような状況の下で、海跡湖における水質の変動や汚濁等について、水域全体を一つの系として捉えてその性格を明らかにし、評価しておくことも有用なのではないかと考えて、系統的に行われた調査から得られたデータ群を統計解析し、また数値計算モデルにあてはめて検討した。われわれにとっては初めての試みであり、その技法も未成熟ではあるが、3湖沼について総合的にみた特徴、あるいは特異性・類似性を描き出し、これに基づいて現況を再現し、予測することも可能であろうという目処を得た。

統計モデルは、変化のメカニズムをブラックボックスに置いたまま相関関係を明らかにし、また別にそのメカニズムを明らかにできれば、因果関係を十分推定できるところに意義があるが、そのためには質の揃った、精度の高いデータが相当量必要となる。

一方、数値計算モデルは、或る現象について、それを規定する因子をモデルに組み込むことにより、その再現に威力を発揮するが、すべての因子を考慮することは困難であり、近似的に扱わざるを得ないので、その適用には当然制約や限界がある。しかし、地方公研では、環境に関して大量の試験・検査、調査研究を行い、そのデータを蓄積しているが、これらから、その当初の目的を越えた情報を抽出し、提供していく必要があり、このためこれらのデータ群の高次利用の技法も開発し、成熟させていく必要がある。こういう考えのもとで、水質問題についても、今回試みた両モデルの特色を生かして、さらにその展開を試みたい。

6. ま と め

石川県の代表的な海跡湖である河北潟、木場潟、柴山潟を対象として水質の特異性や類似性等を解析するとともに、柴山潟を例に水理・水質シミュレーションモデルを用いて水質の将来予測を試み、以下の結果を得た。

(1) 3湖沼とも COD は湖沼の C 類型に相当しており、また、栄養塩は類型 V をも上回る過栄養状態であり、富栄養化の加速化が危惧される。

(2) 水塊構成の複雑さは湖盆形態と関わりがあり、平行四辺形といった単純な形状をした柴山潟に対して、キリン様の複雑な形をした河北潟の水塊構成が複雑であった。

(3) 水質構成の主要因は夏期と冬期において異なり、春期から夏期にかけては生物生産、また、冬期においては強い季節風による底泥巻き上げに原因したものであることが判明した。

(4) 柴山潟においては水表から水深 1 m 層における光合成生産量が大きく、6 月期で滞留時間 (3.7 日間) 当り COD 6.3 t, BOD 9.4 t と推定された。

(5) 昭和 56 年に対して昭和 56 年レベルの柴山潟の水質は COD で 1 ppm, BOD で 2 ppm, T-N でも 0.25 ppm 程度高くなり、水質は益々悪化の度が強まるであろうと考えられる。

(6) 今後は、統計モデルを用いて得られた結果を立証するとともに、統計および物理両モデルを一体化した総合モデルの設定に向けて努力を図りたい。

一 引 用 文 献 一

- 1) 石川県環境部：閉鎖性水域水質保全調査報告書(木場潟)、(1981)。
- 2) 石川県環境部：閉鎖性水域水質保全調査報告書(柴山潟)、(1982)。
- 3) 石川県環境部：閉鎖性水域水質保全調査報告書(河北潟)、(1983)。
- 4) 飯塚悦功：ぶんせき、6、354-360 (1982)。
- 5) 柳井晴夫：複雑さに挑む科学、85-149、講談社 (1981)。
- 6) 矢鋪満雄ほか：石川県衛生公害研究所年報、No. 13、119-134 (1975)。
- 7) 矢鋪満雄ほか：石川県衛生公害研究所年報、No. 16、116-129 (1978)。
- 8) 矢鋪満雄ほか：石川県衛生公害研究所年報、No. 17、185-197 (1979)。
- 9) 矢鋪満雄ほか：石川県衛生公害研究所年報、No. 15、60-69 (1977)。
- 10) 本間仁：改訂河川工学、コロナ社 (1977)。
- 11) 矢野雄幸ほか：拡散方程式入門、公害研究対策センター (1978)。