

湖山池水質の数値解析について

箕 一 郎 安 田 満 夫 油 井 磊 輔
 三 田 正 之 畦 崎 俊 敬 坂 田 裕 子

はじめに

湖山池の水質汚濁機構を解明するために、COD、Total-N(以下T-Nという)、Total-P(以下T-Pという)、Chlorophyll-a(以下Chl-aという)等について重回帰分析、フーリエ解析を行ない、水質予測に関するCOD等の特性を明らかにしようとした。

水域の概要

湖山池は鳥取市の北西部に位置する汽水湖で、

湖山川、枝川を流入河川とし、湖山川を流出河川として日本海に連っている。その規模は水面積6.8km²、最大水深7m、平均水深2.8mである。池の北東岸は鳥取大学を核とする学園地区となっており、池の南方には吉岡温泉がある。

水質の現況

湖山池では、図1に示すSt.1~4の4地点の上層と下層について、月1回の常時監視調査を行っている。中央部のSt.3(深度3.8m)の昭和52~55年度の水質を表1に示した。

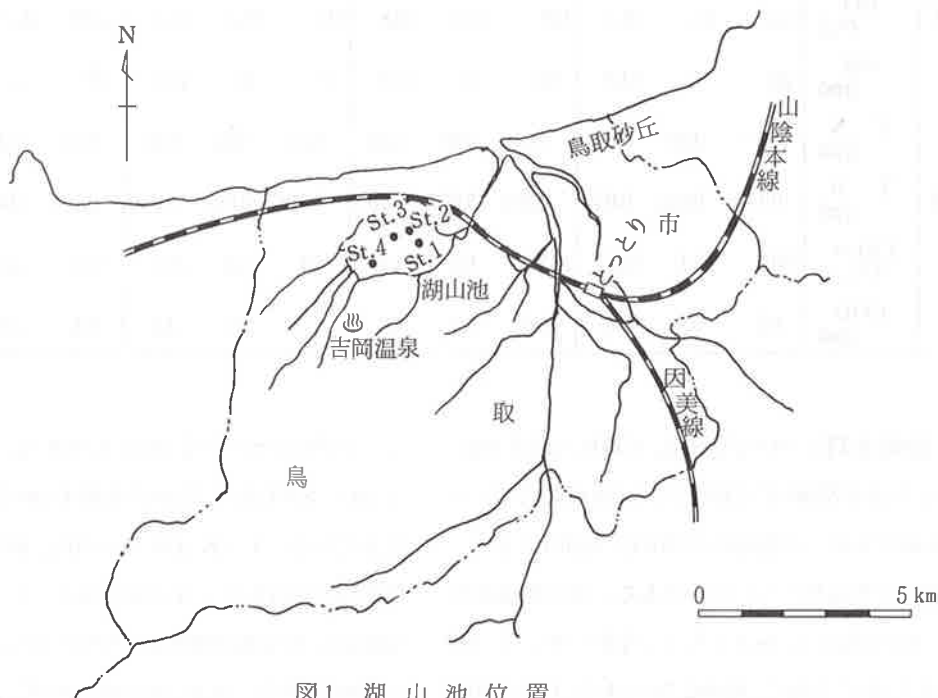


図1 湖山池位置

表1 水質の最大値・最小値・平均値 (St.3)

層	項目	昭和52年度			昭和53年度			昭和54年度			昭和55年度		
		最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値
上層	水温 (°C)	31.0	3.5	16.7	32.0	4.5	16.8	29.0	1.5	16.0	25.0	2.0	14.9
	透明度 (m)	1.8	0.5	0.8	2.5	0.6	0.9	3.5	0.5	1.0	2.0	0.3	0.8
	pH	9.7	7.0	7.8	9.2	7.1	8.0	9.1	7.1	7.7	9.2	7.1	7.6
	DO (%)	148	79	107	164	84.8	107	144	75	101	147	88.3	98.4
	SS (ppm)	22	1	11.8	34	2	13.5	81	1	8.8	47	3	17.8
	T-N (ppm)	1.17	0.35	0.70	2.07	0.26	0.77	1.16	0.31	0.55	0.77	0.31	0.54
	T-P (ppm)	0.132	0.023	0.055	0.343	0.026	0.199	0.142	0.017	0.058	0.116	0.015	0.058
	Chl-a (µg/l)	81.4	9.8	40.9	389	6.7	85.8	121	2.7	33.0	64.4	2.7	30.0
下層	COD (ppm)	10.0	3.4	6.1	16.0	3.4	7.9	9.9	2.5	5.0	11.0	2.6	4.9
	水温 (°C)	28.0	3.0	16.5	29.0	4.0	16.4	27.5	1.5	15.2	23.5	2.0	14.4
	pH	8.3	7.0	7.5	8.9	7.2	7.9	8.7	7.1	7.5	7.6	6.9	7.3
	DO (%)	108	53	91.7	106	77.9	94.8	116	71.3	89.8	99.5	43.7	80.1
	SS (ppm)	25	1	14.8	25	2	13.3	20	2	10.3	42	3	19.4
	T-N (ppm)	1.27	0.35	0.66	1.31	0.26	0.72	0.93	0.22	0.51	0.73	0.35	0.55
	T-P (ppm)	0.115	0.024	0.058	0.262	0.027	0.109	0.106	0.021	0.056	0.103	0.027	0.060
	Chl-a (µg/l)	59.4	13.1	30.8	137	6.7	53.2	49.1	4.3	25.4	66.7	3.5	26.2
COD (ppm)	9.7	3.5	5.4	10.0	3.3	6.6	6.0	2.6	4.5	6.1	2.8	4.3	

上層の水質について見れば、CODは最大16.0 ppmから最小2.5 ppmまで変化し、年度の平均は7.9～4.9 ppmである。水温は最高32.0℃、最低1.5℃で、年度の平均は16.8～14.9℃である。透明度は最大3.5 mから最小0.3 mまで大きく変動している。pHの最大は9.7と高く、最小は7.0である。DOの飽和

率(以下DO%という)は最大164%、最小75%と高い。SSは最大47 ppmから最小1 ppmと大幅に変化している。T-Nは最大2.07 ppm、最小0.26 ppmで、年度の平均は0.77～0.54 ppmである。T-Pは最大0.343 ppm、最小0.015 ppmで、年度の平均は0.199～0.055 ppmである。Chl-aは最大389 µg/l、最小2.7

4g/l と大幅に変化し、その比は 144 倍に及んでいる。

下層の水質は上層に比べて COD、水温、pH、DO%、Chl-a は若干低いが、SS、T-N、T-P は余り変わらない。

水質の季節変化を見るために、中央部 St. 3 の上層の水温、pH、DO%、COD、T-N、T-P、Chl-a の経年変化を図 2 と図 3 にまとめた。水温は夏季の 7・8 月に高く (年度の最高は 32.0~25℃)、冬季の 1・2 月に低く (年度の最低は 4.5~1.5℃)、周期性に富んだ季節変化を示している。pH は水温ほどの変化を示さないが、夏季は 9.7~9.1

と高い数値を示している。DO% は夏期に 164~144% と高い数値を示し、平均値も 107~98.4% と高くなっている。富栄養湖では、水温が上昇し日射量の増加する夏季に、植物性のプランクトンの光合成によって DO が増加し、また pH が上昇する現象があるが、湖山池でもこの現象が顕著に現れている。

COD は夏季の 7・8 月に 16.0~9.9 ppm と高い数値を示し、冬季の 1・2 月に 3.4~2.5 ppm と低い数値を示しており、比較的周期性に富んだ変化をしている。T-N、T-P、Chl-a は 7~10 月に高く、12~2 月に低い季節変化を示している。

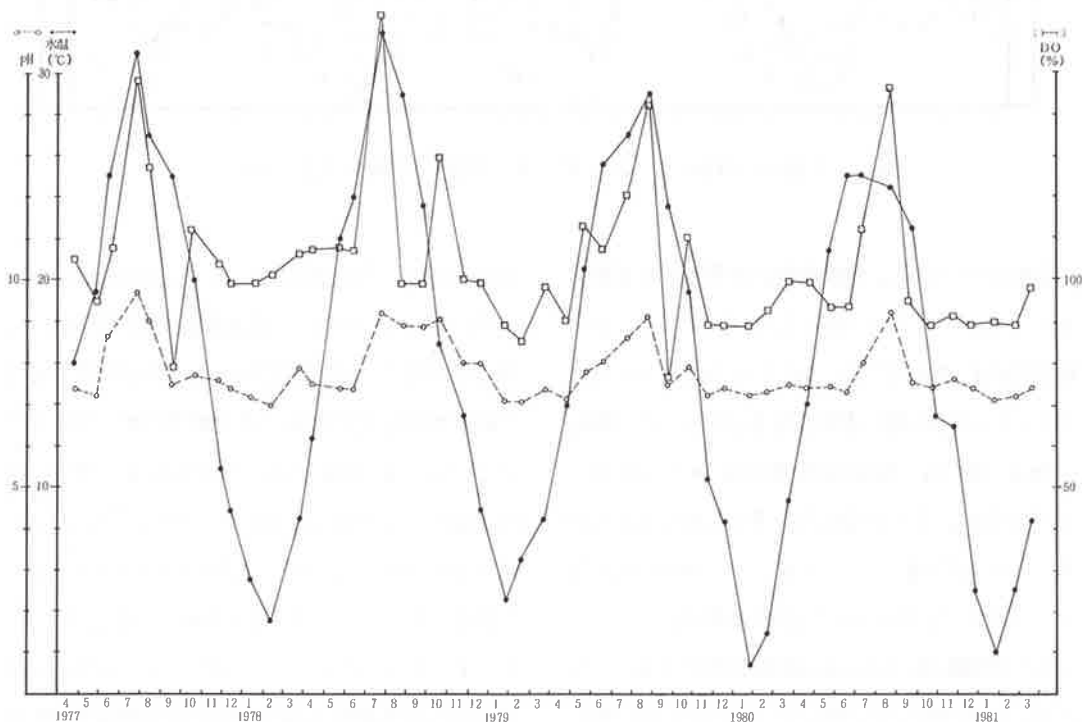


図 2 上層の pH・水温・DO (%) の経年変化 (St.3)

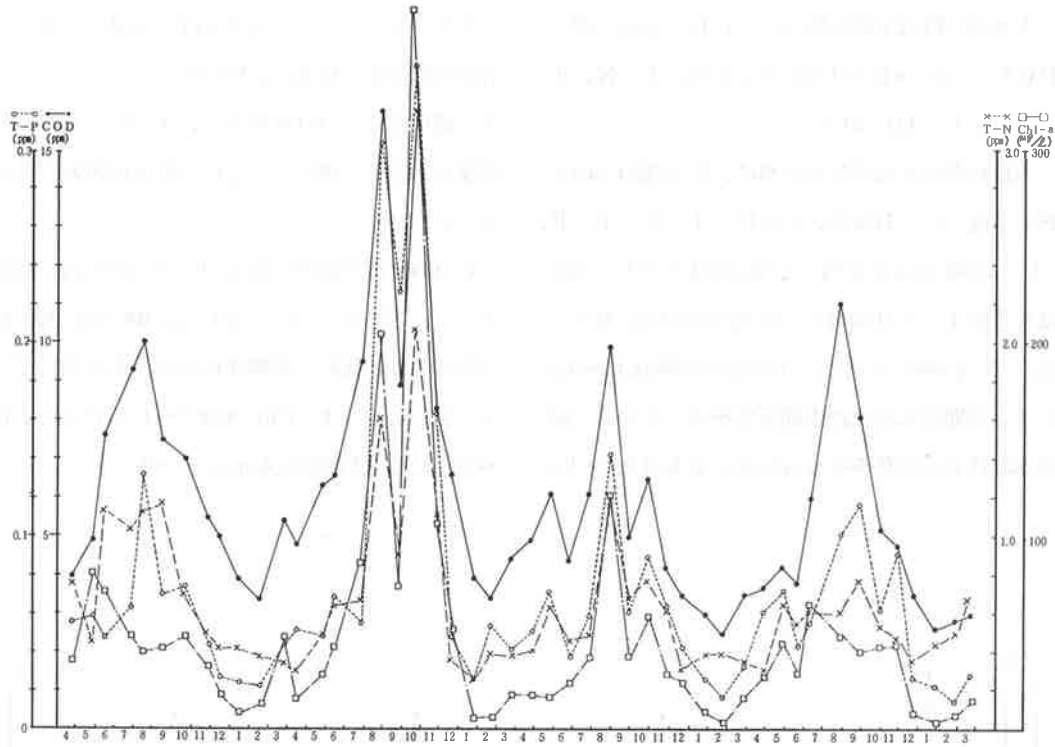


図3 上層のCOD・T-N・T-P・Chl-aの経年変化(St.3)

窒素については、形態別窒素の季節変化を観察するため、それぞれの経年変化を図4に示した。Kjeldahl-N(以下K-Nという)は6~9月に高く、1・2月に低い季節変化を示している。NO₂+NO₃-NはK-NやCODやChl-aと逆に6~9月で低く、1・2月に高い季節変化を示している。これは植物プランクトンの活動が盛んな6~9月には、Chl-aに代表される植物プランクトンにより消費されるが、その活動が低下する1・2月には、消費されないで残留するために、高い数値を示すものと考察される。

気象(鳥取地方気象台の昭和52~55年のデータ)と水質の関係を見れば、昭和53年の7・8月は

気温が高く、降水量が少なく、日照時間が長い。反対に昭和55年の7・8月は冷夏で気温が低く、降水量が多く、日照時間が短い。昭和53年と同55年の上層の最大値(St.3)を比較すれば、水温は32℃と25℃、T-Nは2.07ppmと0.77ppm、T-Pは0.343ppmと0.116ppm、Chl-aは389 $\mu\text{g}/\text{L}$ と64.4 $\mu\text{g}/\text{L}$ 、CODは16ppmと11ppmで、すべて昭和53年が大幅に高い数値を示している。また、COD、水温、T-N、T-P、Chl-aについて、昭和52~55年度の各年の最大値を比較すれば、昭和53年度はどの項目も最大を示し、昭和55年度はCODを除いて最小を示している。

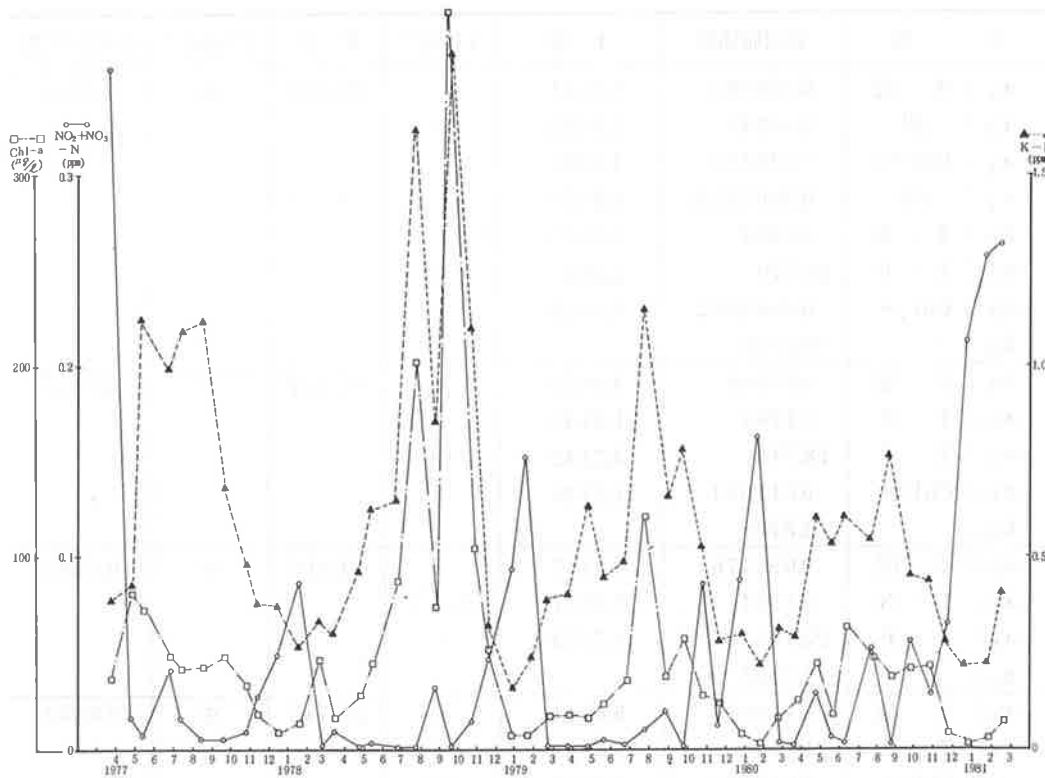


図 4 上層の K-N・NO₂+NO₃-N・Chl-a の経年変化 (St.3)

重回帰分析について

湖山池の水質の COD に関する将来予測の可能性を知るため、中央部 St. 3 の上層、下層の昭和 52 ~ 55 年度の測定結果から、目的変数 (y) を COD とし、説明変数 (x) を水温、pH、DO%、SS、T-N、T-P、Chl-a の 7 項目とした場合の重回帰分析を行い、結果を表 2 に示した。

上層の重相関係数は 0.9561 と高いが、偏回帰係数について t 検定すれば、T-P だけが 0.1% で有意であり、他の 6 項目は有意とはいえなかった。そこで最良回帰式を求めめるために、変数減少法により説明変数の数を減少させ、水温、T-P、Chl

-a の 3 項目による最良回帰式を求めた。この場合の重相関係数は 0.9262 と高く、F 値は 88.545 で、F 検定における 1% の数値 2.839 から見ても有効であると考えられる。偏回帰係数を t 検定すれば、水温と T-P は 0.1% で有意であり、Chl-a は 2.5% で有意である。

同様に、7 項目を説明変数とした場合の下層の重回帰係数は 0.9134 と高いが、偏回帰係数についても t 検定すれば、水温が 1% で有意、T-P が 2.5% で有意、T-N が 5% で有意で他の 4 項目は有意とはいえなかった。そこで説明変数を減少させると、水温、T-N、T-P の 3 項目の場合が最良回帰式として求められる。この場合、重相関

表 2-1 重回帰分析結果(上層)

変 量	偏回帰係数	t 値	t 検定 ¹⁾	F 値	F 検定 ²⁾	重相関係数
x_1 : 水 温	0.039603	1.6131	—	60.840	※	0.9561
x_2 : pH	0.85275	1.6443	—			
x_3 : DO(%)	0.025203	1.5451	—			
x_4 : SS	0.00013958	0.0079	—			
x_5 : T-N	1.2472	1.3913	—			
x_6 : T-P	20.570	3.7616	*			
x_7 : Chl-a	0.0045642	0.8029	—			
b_0 :	-6.4284					
x_1 : 水 温	0.10508	4.4620	*	67.494	※	0.9287
x_5 : T-N	1.2743	1.2145	—			
x_6 : T-P	18.718	3.2442	**			
x_7 : Chl-a	0.011094	1.7745	—			
b_0 :	1.5708					
x_1 : 水 温	0.096176	4.0411	*	81.416	※	0.9205
x_5 : T-N	2.1981	2.2357	****			
x_6 : T-P	23.705	4.7973	*			
b_0 :	1.2805					
x_1 : 水 温	0.11698	5.4341	*	88.545	※	0.9262
x_6 : T-P	21.176	3.8982	*			
x_7 : Chl-a	0.014376	2.5362	***			
b_0 :	1.8619					

注 1) *は0.1%で有意、**は1%で有意、***は2.5%で有意、****は5%で有意
—は有意であるといえない。

2) ※は1%で有意。

係数は0.8726、F値は53.845で、F検定における1%の数値2.839を大幅に上廻っていることから、有効であると考えられる。偏回帰係数についてt検定すれば、T-Pが0.1%で有意、水温とT-Nが1%で有意である。

ここで求められた重回帰式は、

$$\text{上層のCOD (ppm)} = 0.117 \text{ 水温}(\text{°C}) + 21.2 \text{ T-P (ppm)} + 0.0144 \text{ Chl-a}(\mu\text{g/l}) + 1.86 \text{ (ppm)}$$

$$\text{下層のCOD (ppm)} = 0.0517 \text{ 水温}(\text{°C}) + 2.06 \text{ T-N (ppm)} + 18.4 \text{ T-P (ppm)} + 1.84 \text{ (ppm)}$$

であった。上層と下層のCODの実測値と重回帰

式より求めた計算値を図5、図6に示した。両曲線は一覧して非常に良く合致しているが、ちなみに実測値と計算値の最大値、最小値、平均値、標準偏差を比較すれば、上層の場合、最大値は16.0ppmと16.7ppm、最小値は2.5ppmと2.6ppm、平均値は5.96ppmと5.96ppm、標準偏差は2.99と2.77であり、下層の場合、最大値は10.0ppmと10.3ppm、最小値は2.6ppmと3.0ppm、平均値は5.21ppmと5.21ppm、標準偏差は1.85と1.61であって、ともに良く類似した値を示している。

しかし、昭和52年の4~9月と昭和55年の4~8月は、上層、下層ともに実測値と計算値に差が

表2-2 重回帰分析結果(下層)

変 量	偏回帰係数	t 値	t 検定 ¹⁾	F 値	F 検定 ²⁾	重相関係数
x_1 : 水 温	0.059528	2.7564	*	28.776	※	0.9134
x_2 : pH	0.57700	1.3262	—			
x_3 : DO(%)	0.0067719	0.6135	—			
x_4 : SS	-0.0088298	0.5714	—			
x_5 : T-N	1.5552	2.2744	****			
x_6 : T-P	11.043	2.4097	***			
x_7 : Chl-a	0.013253	1.6198	—			
b_0 :	-2.7325					
x_1 : 水 温	0.051344	2.9079	**	45.596	※	0.8995
x_5 : T-N	1.9359	2.8086	**			
x_6 : T-P	11.460	2.6227	***			
x_7 : Chl-a	0.018293	2.2911	****			
b_0 :	1.7926					
x_1 : 水 温	0.065375	3.6128	*	50.932	※	0.8811
x_6 : T-P	14.906	3.3592	**			
x_7 : Chl-a	0.021650	2.5471	***			
b_0 :	2.3960					
x_1 : 水 温	0.051702	2.7964	**	53.845	※	0.8726
x_5 : T-N	2.0639	2.8689	**			
x_6 : T-P	18.371	5.5488	*			
b_0 :	1.8387					

注 1) *は0.1%で有意、**は1%で有意、***は2.5%で有意、****は5%で有意、—は有意であるといえない。

2) ※は1%で有意。

見られる。これらの期間は、これら以外の期間に比べて、COD、T-N、T-P、Chl-aの測定値の地点間(St.1~4)のばらつきが大きい現象が見られる。上述した最良回帰式は上層でT-N、下層でChl-aの項目が欠けており、これによる影響が考えられるので、これらの期間において上層はChl-aの代りにT-Nを採用し、下層はChl-aを追加した修正重回帰式により修正計算値を求めて見た(図5、図6参照)。修正重回帰式は、

$$\text{上層のCOD (ppm)} = 0.0962 \text{ 水温 (}^\circ\text{C)} + 2.20 \text{ T-N (ppm)} + 23.7 \text{ T-P (ppm)} + 1.28 \text{ (ppm)}$$

$$\text{下層のCOD (ppm)} = 0.0513 \text{ 水温 (}^\circ\text{C)} + 1.94 \text{ T-N (ppm)} + 11.5 \text{ T-P (ppm)} + 0.0183 \text{ Chl-a (}^\mu\text{g/l)} + 1.79 \text{ (ppm)}$$

である。最良回帰式のCOD算出の項目において、上層のChl-aが下層でT-Nと代っているが、上層と下層のT-NとChl-aの4年間の平均値で見ると、それぞれT-Nは0.64ppmと0.61ppm、Chl-aは47.4 $\mu\text{g/l}$ と33.9 $\mu\text{g/l}$ であり、上層に比べて下層のChl-aが低下したためと考えられる。

以上のごとく、CODが水温、T-N、T-P、Chl-aの重回帰式で表わされることが分ったが、

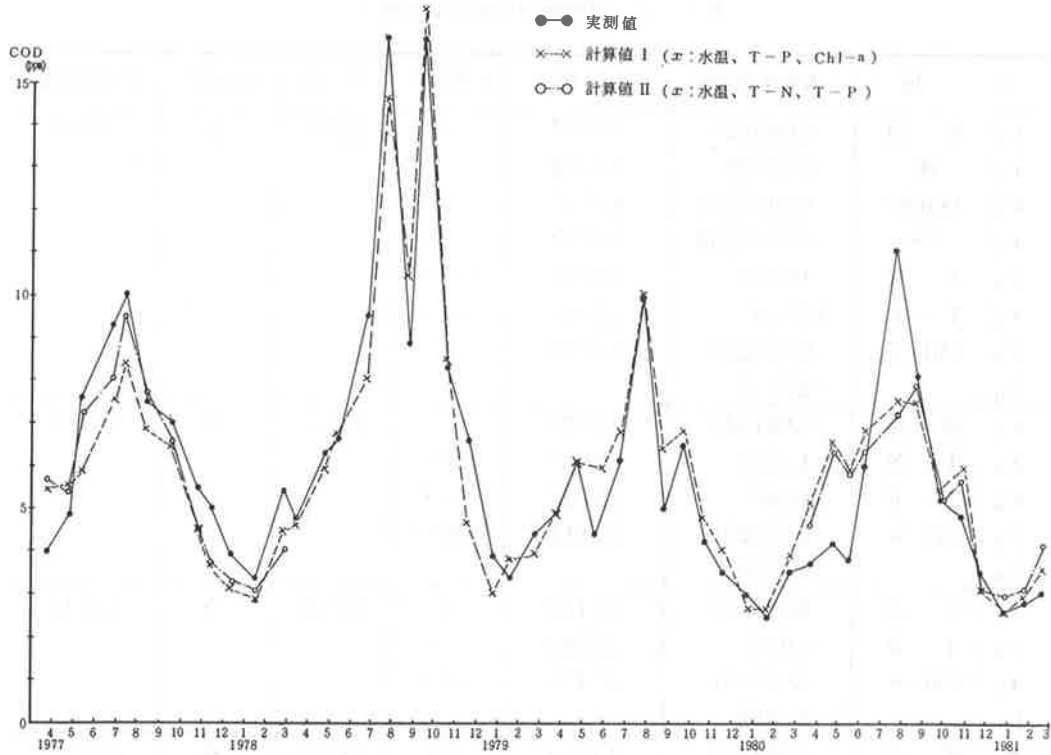


図5 上層のCODの実測値と計算値(St. 3)

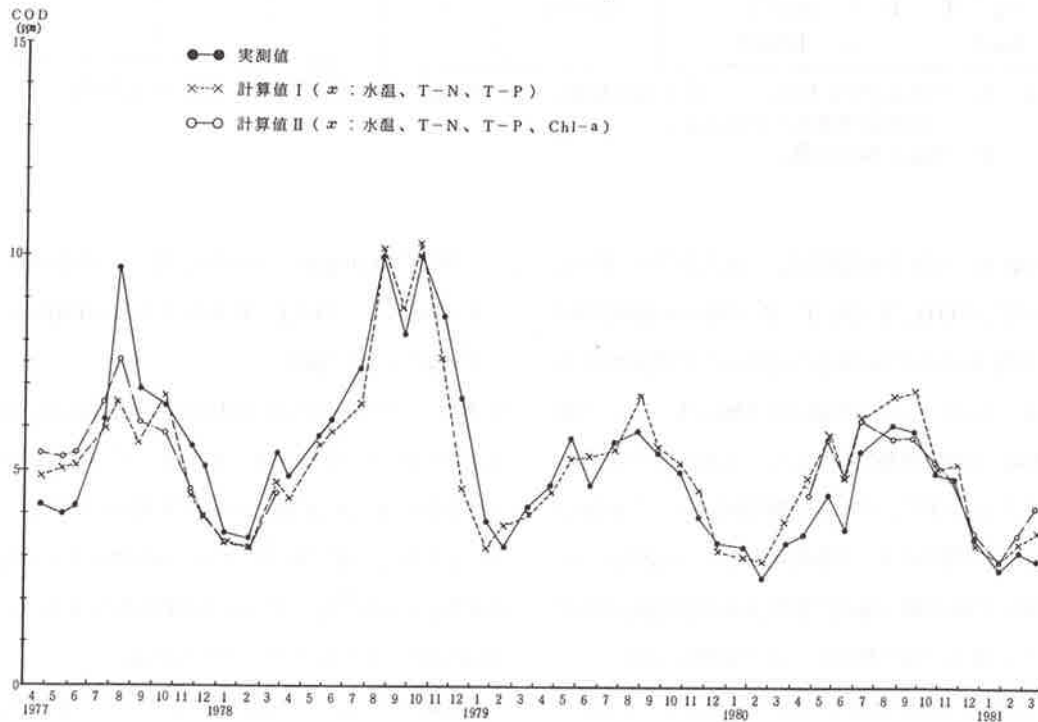


図6 下層のCODの実測値と計算値(St. 3)

COD と他の項目との相関係数を見れば、上層は水温が 0.6415、透明度が -0.4417、pH が 0.8166、DO % が 0.5851、SS が 0.4300、T-N が 0.8485、T-P が 0.8621、Chl-a が 0.8186 とすべて 1% で有意であり、特に pH、T-N、T-P、Chl-a は 0.8 以上の高い数値を示している。また下層は水温が 0.6344、透明度が -0.4600、pH が 0.7343、DO % が 0.0665、SS が 0.3501、T-N が 0.7395、T-P が 0.8224、Chl-a が 0.7689 と、DO % と SS を除いては 1% で有意である。

フーリエ解析について

湖山池の COD は、重回帰分析において上層は

水温、T-N、Chl-a の、下層は水温、T-N、T-P の重回帰式で、実測値と計算値が良く一致した。このため、COD、水温、T-N、T-P、Chl-a にどのような周期性があるか、それぞれ固有の周期が分れば COD の将来予測が可能ではないかという考えから、COD、水温、T-N、T-P、Chl-a についてフーリエ解析を行った。そのパワースペクトルを図 7、図 8 に示した。

フーリエ解析は周期性のあるデータについて、周期が T なる関数 $x(t)$ を①式のように三角関数の和として表わすもので、①式の右辺第 2 項、第 3 項をまとめた②式を用いて、フーリエ係数 a_0 、 a_n b_n を求め、その周波数特性を求めるものである。

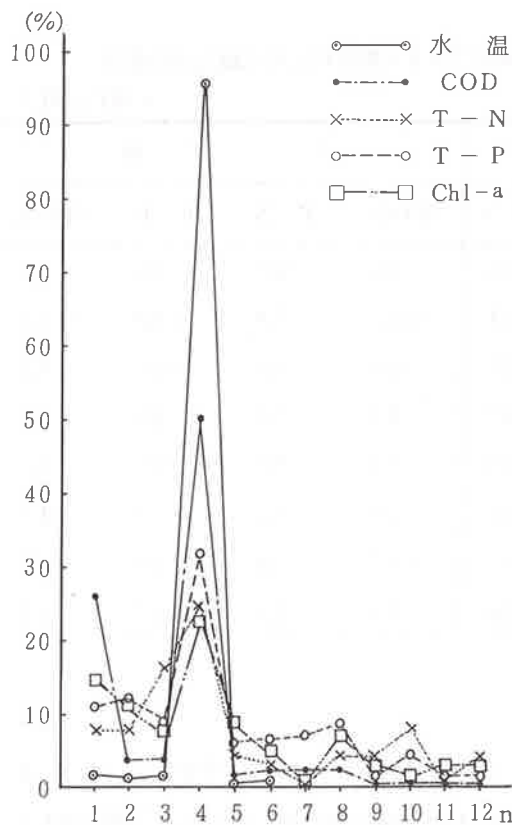


図 7 上層の COD・水温・T-N・T-P・Chl-a のフーリエ解析によるパワースペクトル

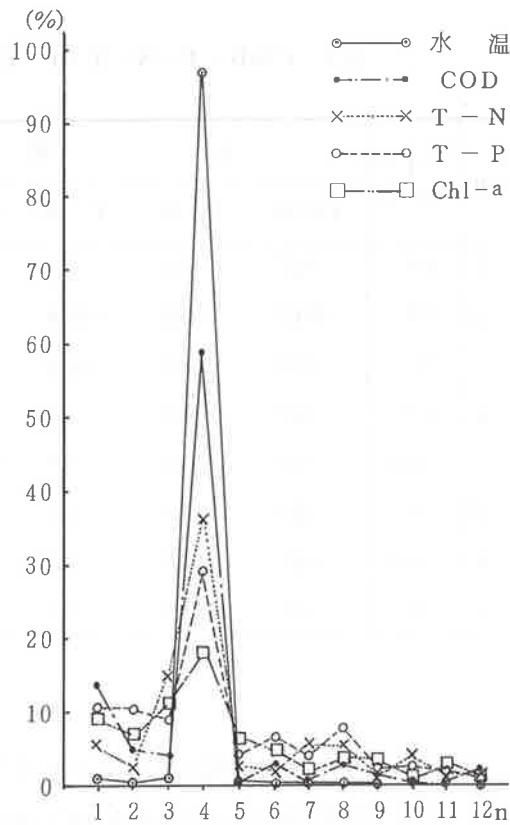


図 8 下層の COD・水温・T-N・T-P・Chl-a のフーリエ解析によるパワースペクトル

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(2\pi nt/T) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(2\pi nt/T) \dots\dots\dots ①$$

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(2\pi nt/T - \phi_n) \dots\dots ②$$

ただし $C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$, $\tan \phi_n = b_n/a_n$

COD、水温、T-N、T-P、Chl-aの周期について見れば、12か月周期(n=4)がどの項目においても一番強い周期で、その寄与率は上層では水温が96.2%、CODが50.3%、T-Nが37.7%、T-Pが31.6%、Chl-aが20.7である。下層も上層に類似した傾向を示している。12か月周期以外の主要周期としては、CODは48か月周期(n=1)、T-Nは16か

月周期(n=3)、T-Pは48、24、16、6か月周期、Chl-aは48、24、16か月周期がある。

主要周期について項目間の関係を見るため表3を作成した。表3は②式の ϕ_n (位相差)を水温を基準として求めたもので、単位は月で示した。上層のCODの12か月周期について見れば、CODの位相は水温より0.9か月遅れており、T-Nが1.0か月、Chl-aが1.3か月、T-Pが1.4か月遅れである。CODとT-Pの位相差が12か月周期のなかで、僅か0.5か月に過ぎないことから、COD、T-N、T-P、Chl-aは相互に関係しており、個々の生成過程の違いが、位相の差となっていることを示唆しているものと考察される。

表3 COD・T-N・T-P・Chl-aのフーリエ解析による水温との位相差

(単位：月)

n	T month	上 層				下 層			
		COD	T-N	T-P	Chl-a	COD	T-N	T-P	Chl-a
1	48	-0.7	-3.0	2.8	1.6	1.7	-2.1	4.6	3.8
2	24	-10.2	-5.8	-20.4	-30.4	-10.9	-7.0	-10.8	-11.4
3	16	-0.2	-0.7	-0.8	-1.1	0.5	0.0	-0.6	1.1
4	12	0.9	1.0	1.4	1.3	1.1	0.8	1.1	1.1
5	9.6	0.2	0.5	0.2	0.9	-0.3	0.1	0.5	1.6
6	8	3.9	4.2	4.0	4.1	5.0	5.5	4.0	4.1
7	6.8	-4.6	-4.6	-4.8	-4.9	-3.7	-3.8	-4.8	-4.6
8	6	-2.9	-2.5	-2.2	-1.8	-0.4	-1.0	-0.4	0.4

CODの48か月周期は、図9に示した48か月周期、12か月周期及び寄与率80%以上となるように5周期(48、24、16、12、2.4か月周期)から合成した周期の変化から見て、昭和53年のCOD値

が高いため生じたものと考察される。T-N、T-P、Chl-aの16か月については、今後検討する必要があるが、12か月未満の周期については、T-Pの6か月周期を除いては認められなかった。

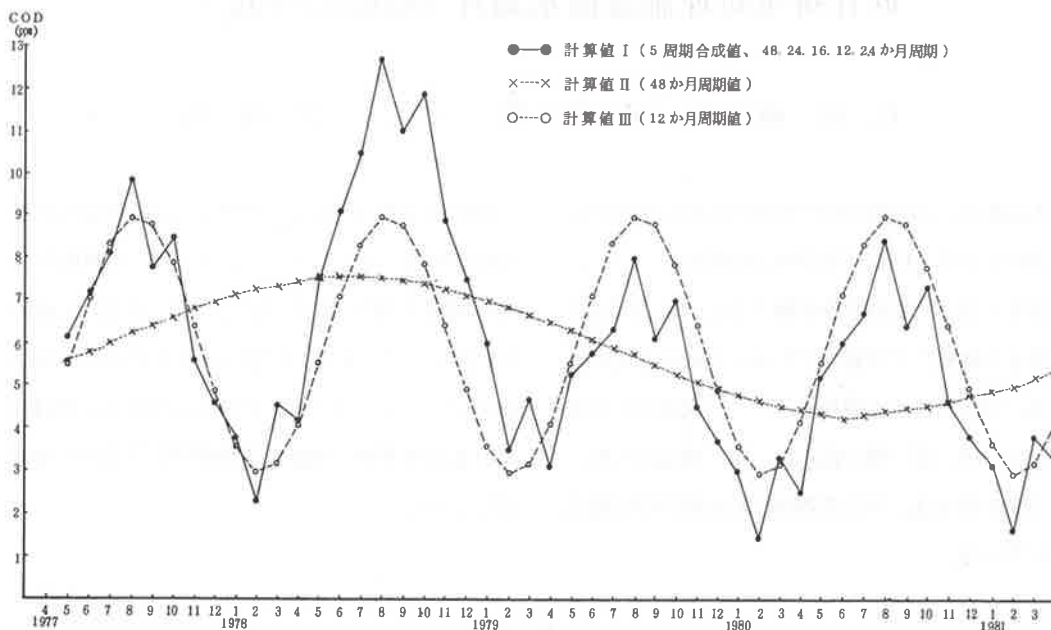


図9 上層のフーリエ解析によるCODの経年変化

ま と め

- 1 昭和52～55年度の湖山池の中央部St.3の上層の水質についてみれば、CODは最大16.0ppmから最小2.5ppmと変化し、各年度の平均は7.9～4.9ppmであり、T-Nの年度の平均は0.77～0.54ppm、T-Pの年度の平均は0.199～0.055ppmである。COD、水温、T-N、T-P、Chl-aは7～10月に高く、12～2月に低い周期性に富んだ季節変化を示している。
- 2 CODの将来予測は重回帰分析により可能であると考えられる。即ち、昭和52～55年度の測定結果から、CODを目的変数、水温、T-N、T-P、Chl-aを説明変数とする重回帰式〔上層のCOD (ppm) = 0.117 水温 (°C) + 21.2 T-P

(ppm) + 0.0144 Chl-a ($\mu\text{g}/\ell$) + 1.86 (ppm)、下層のCOD = 0.0517 水温 (°C) + 2.06 T-N (ppm) + 18.4 T-P (ppm) + 1.84 (ppm)〕は、重相関係数のF検定、偏回帰係数のt検定で極めて有意であり、その計算値は実測値と良く一致している。

- 3 フーリエ解析によれば、12か月周期が卓越しており、パワースペクトルにおける寄与率は上層では水温が96.2%、CODが50.3%、T-Nが37.7%、T-Pが31.6%、Chl-aが20.7%を占めている。また、CODの12か月周期の位相は水温より0.9か月の遅れが見られるが、T-N、T-P、Chl-aと同じような位相を示し、これらの項目間の僅かの位相差は、それぞれの生成過程の違いによるものと考察される。