

湖沼の汚濁機構の調査

— 県内湖沼の栄養塩類の挙動と富栄養化現象について —

水質調査科

安田 満夫 ・ 山内 佳見 ・ 田中 賢之介

寛 一郎 ・ 坂田 裕子

1 はじめに

県内湖沼の湖山池、東郷池、中海における湖沼の汚濁機構のうち、栄養塩類(T-N、O-N、NH₄-N、NO₂-N、NO₃-N、T-P、PO₄-P)の挙動、窒素、リン、CODと植物プランクトン(Chlorophyll-a)の関係、水質データ(最近4年間:昭和57~60年度)の数値解析並びに湖沼の内部生産と外部汚濁について解析し、次のことが分かったので、これらについて略述する。

(1) 湖沼の内部における水質汚濁は内部生産といわれているが、これは植物プランクトンの増殖に支配されている。植物プランクトンの増殖は湖山池、東郷池では水温や光強度の影響を受け夏季に盛んで、冬季に衰えるが、中海では余り影響を受けていないと考えられる。このため湖山池ではChl-a、COD、O-N、T-Pは夏季に高値、冬季に低値の季節変化をしている。東郷池では湖山池より季節変化に乏しいがChl-a、COD、O-Nが同様な変化をしている。中海のChl-a、CODは季節変化に乏しい。

(2) 湖沼の内部生産、富栄養化現象は湖山池が盛んで、次いで東郷池、中海st.4(米子湾中央部)

で中海st.3(米子市葭津地先)ではほとんど起っていない。このことは主成分分析で、湖山池は、chl-a、COD、T-P、東郷池、中海st.4はChl-a、COD、O-Nがグループを形成しているが、中海st.3はChl-aが何らグループを形成していないこと、湖山池のT-N、T-Pは東郷池、中海st.4よりも低値であるが、COD、Chl-aはこれらより高値を示していることからもうかがえる。

(3) 湖沼の富栄養化現象をCODの内部生産の割合で見れば湖山池が上層50.0%と下層37.3%、東郷池が37.5%と42.6%、中海st.4が30.4%と33.3%そして中海st.3が10.0%と4.8%と低値である。このためCODの外部汚濁は中海st.4、東郷池、湖山池の順であるが、内部生産は湖山池、東郷池、中海st.4の順となっている。中海st.3の外部汚濁は湖山池、東郷池と余り変わらないが富栄養化現象がほとんど起っていないため内部生産は極端に低値である。

(4) NH₄-N、PO₄-Pの底泥からの溶出は、東郷池、中海st.3、中海st.4の下層で認められる。東郷池のPO₄-Pは植物プランクトンの増殖に関与している可能性は高く、次いで中海st.4であるが、中海st.3のPO₄-Pはほとんど関与していないと考えられる。

(5) 制限栄養塩類については、無機態窒素($\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$)、リン($\text{PO}_4\text{-P}$)から湖山池、東郷池、中海のいずれも冬季はリン制限で、窒素制限は、湖山池と中海st.3の夏季に見られる。

無機態の窒素、リンのいずれも植物プランクトンに利用されている状態は、湖山池が盛んである。東郷池と中海st.4の夏季では利用されていない状態が時々みられる。

2 水質の概要

湖山池、東郷池および中海は、それぞれ県の東部、中部、西部に位置しており、その規模は表1のとおりである。

湖沼の代表地点として湖山池は中央部(水深3.7m)、東郷池も中央部(水深3.1m)、中海はst.3(米子市葭津地先、水深7.9m)とst.4(米子湾中

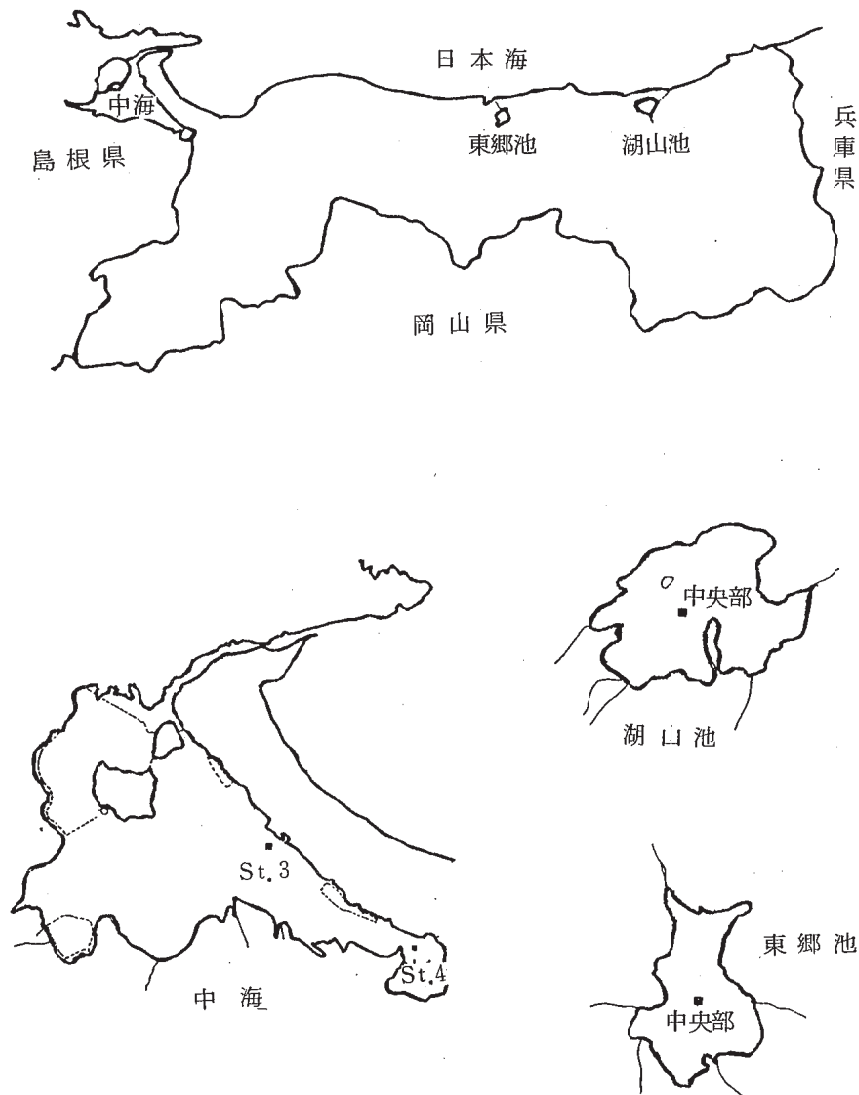


図1 調査地点位置図

表1 湖沼の規模

	水面積 km ²	最大水深 m	平均水深 m	湖容積 × 10 ⁶ m ³	流域面積 km ²
湖山池	3.8	8.9	2.8	19.0	48.75
東郷池	4.2	3.6	1.8	7.56	55.58
中海	93.5	17.1	5.4	532	2,070

(注) 理科年表、建設省鳥取県土木部による。

中央部、水深3.4m)を選定した。

最近4年間(昭和57~60年度)の平均値について、代表地点における上層(水深0.5m)と、下層(湖底から0.5m。ただし中海st.3は1.0m)の水質を比較すると次のとおりである。Cl⁻:湖山池は519と525mg/l、東郷池では1,800と2,100mg/l、中海st.3は8,390と15,100mg/l、中海st.4は8,420と9,290mg/lとCl⁻濃度を異にしている。

また塩分構造は、湖山池は上層と下層がほとんど変わらない単一構造を有しているが、東郷池では下層が若干高い。また、中海は常に複合構造で塩分躍層は3~5mに分布している。

COD:湖山池は6.2と5.1mg/l、東郷池は4.8と4.7mg/l、中海st.3が4.0と2.1mg/l、中海st.4が5.6

と4.8mg/lである。東郷池は上層と下層は余り変わらないが、湖山池と中海は下層が上層より低値で、特に中海st.3の下層は上層より大幅に低い。水温:湖山池は16.5と16.1℃、東郷池は16.8と16.5℃、中海はst.3が16.5と16.4℃、st.4が16.9と16.6℃で、いずれも上層が下層より僅かに高値である。

T-N:湖山池は0.829と0.638mg/l、東郷池は0.886と0.958mg/l、中海st.3は0.544と0.574mg/l、中海st.4は0.912と0.836mg/lである。東郷池と中海st.4が湖山池、中海st.3より高値を示し、上層と下層を比較すれば湖山池と中海st.4は上層が、東郷池と中海st.3は下層が高値である。

T-P:湖山池は0.060と0.055mg/l、東郷池は

表2 水質分析結果

	W・T (°C)	COD (mg/l)	NH ₄ -N (mg/l)	NO ₂ -N (mg/l)	NO ₃ -N (mg/l)	I-N (mg/l)	O-N (mg/l)	T-N (mg/l)	T-P (mg/l)	Chl-a (μg/l)	Cl (mg/l)	
湖山池	上層	16.5	6.2	0.028	0.002	0.057	0.086	0.743	0.829	0.060	45.3	519
	下層	16.1	5.1	0.047	0.002	0.057	0.108	0.530	0.638	0.055	23.3	525
東郷池	上層	16.8	4.8	0.024	0.005	0.286	0.315	0.569	0.886	0.063	33.4	1800
	下層	16.5	4.7	0.097	0.005	0.256	0.357	0.595	0.958	0.060	34.3	2100
中海st.3	上層	16.5	4.0	0.015	0.003	0.041	0.059	0.485	0.544	0.048	16.7	8690
	下層	16.4	2.1	0.182	0.010	0.028	0.222	0.352	0.574	0.081	9.1	15100
中海st.4	上層	16.9	5.6	0.053	0.009	0.090	0.152	0.748	0.912	0.080	35.5	8420
	下層	16.6	4.8	0.068	0.008	0.070	0.148	0.688	0.836	0.080	33.5	9290

(注) 水質分析結果は、昭和57~60年度の平均値
中海st.3、中海st.4の下層のChl-aは、昭和58~60年度平均値

0.063と0.080mg/l、中海st.3は0.048と0.081mg/l、中海st.4は0.080と0.080mg/lである。T-Nと同様に東郷池と中海st.4が湖山池、st.3より高値を示している。上層と下層を比較すればst.4はほとんど変わらないが、湖山池は上層が、東郷池とst.3は下層が高値を示し、特にst.3の下層は上層に比べて高値を示している。

Chl-a：湖山池は45.3と23.3 $\mu\text{g/l}$ 、東郷池は33.4と34.3 $\mu\text{g/l}$ 、中海st.3は16.7と9.1 $\mu\text{g/l}$ 、中海st.4は35.5と33.5 $\mu\text{g/l}$ である。湖山池が東郷池、st.4より高値を示し、st.3が低値である。上層と下層を比較すれば湖山池とst.3は上層が高値で、東郷池とst.4は同程度である。

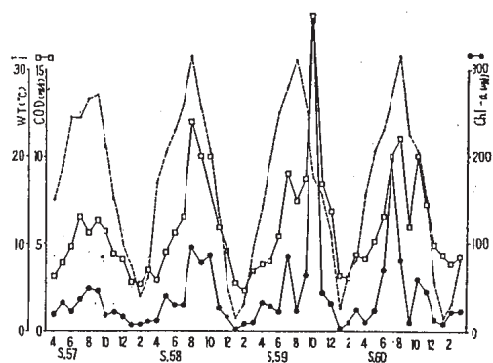
湖山池のT-N、T-Pは東郷池、中海st.4より低値であるが、COD、Chl-aは高値を示している。st.3の下層のT-Pは上層より大幅に高値で、st.4、東郷池と同程度であるが、COD、Chl-aは上層やst.4、東郷池より大幅に低値である。

3 水質の経月変化

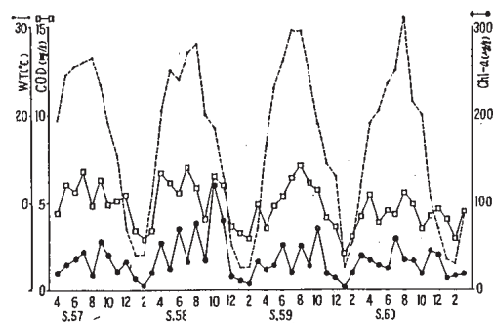
(1) COD、T-N、T-P、Chl-aの経月変化 (T-N、T-Pは図3-1、図3-2、図6参照)

湖山池：COD、T-P、Chl-aは夏季(7~10月)に高く、冬季(1、2月)に低い季節変化を示している。夏季に上層が下層より高値を示すのが特徴である。T-NはCOD、T-P、Chl-aに比べて季節変化に乏しい。

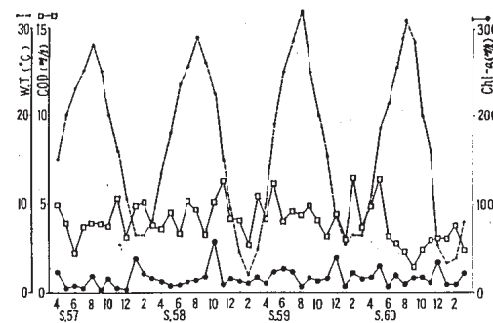
東郷池：COD、T-P、Chl-aは湖山池より季節変化に乏しいが、夏季(7、8月)に高く、冬季(1、2月)に低い。COD、Chl-aは上層と下層はほとんど変わらないが、T-Pは下層が上層より高く、特に夏季に高い。T-Nは季節変化に乏しい。



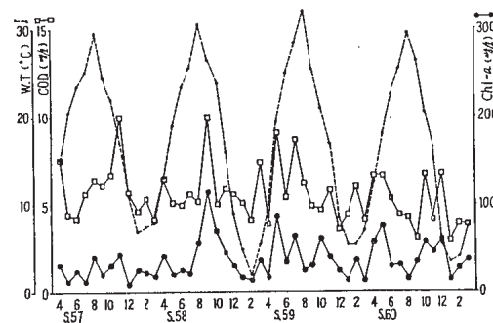
湖山池



東郷池



中海St.3



中海St.4

図2 COD、Chl-a、水温の経月変化(上層)

中海st.3: COD、T-N、Chl-aは上、下層ともに季節変化を示さず、COD、Chl-aは上層が下層よりつねに高い。T-Pは上層は季節変化を示さないが、下層は夏季(8月、9月)に高値を示す。これは底泥からの溶出のためと考えられる。冬季(2月、3月)に低値を示している。

中海st.4: COD、T-N、T-P、Chl-aは、上、下層とも不規則に変動を繰り返しており、いずれも季節変化に乏しい。

(2) T-Nと各態窒素の経月変化

T-N、O-N、I-Nの関係について考察する。

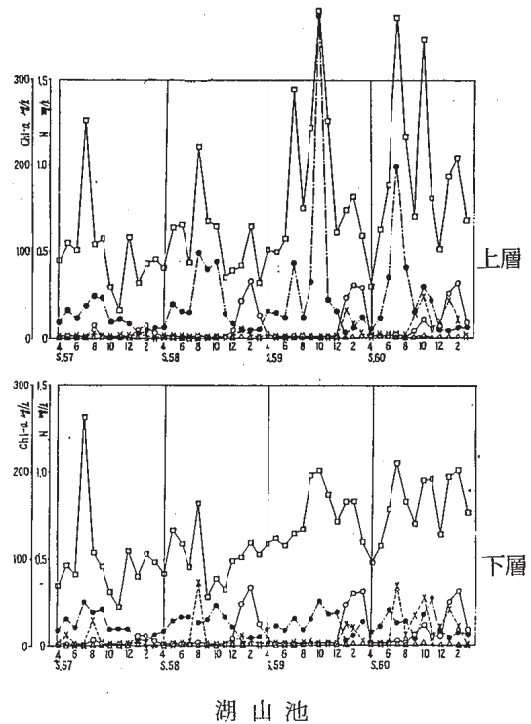
湖山池: T-Nは夏季(9、10月)と冬季(2、3月)を中心とした二峰性の経月変化を示している。O-N(上層平均値0.743-下層平均値0.530 mg/l)は夏季に高値を示し上層が下層より高値でChl-aの変化パターンとよく似ている。I-N(0.086-0.108 mg/l)はO-Nに較べて低値である。

東郷池: T-Nは湖山池と同様に二峰性の変化を示し夏季よりむしろ冬季に高値を示している。O-Nは夏季に高く、冬季に低い変化を示している。I-Nは湖山池に較べて3倍以上も高値である。中海st.3: T-Nは上・下層とも季節変化に乏しいが、上層では冬季に、下層は夏季に高値を示す傾向が見られる。O-Nは季節変化に乏しい。I-Nは下層(0.222 mg/l)が、上層(0.059 mg/l)に較べて3倍以上の高値を示している。

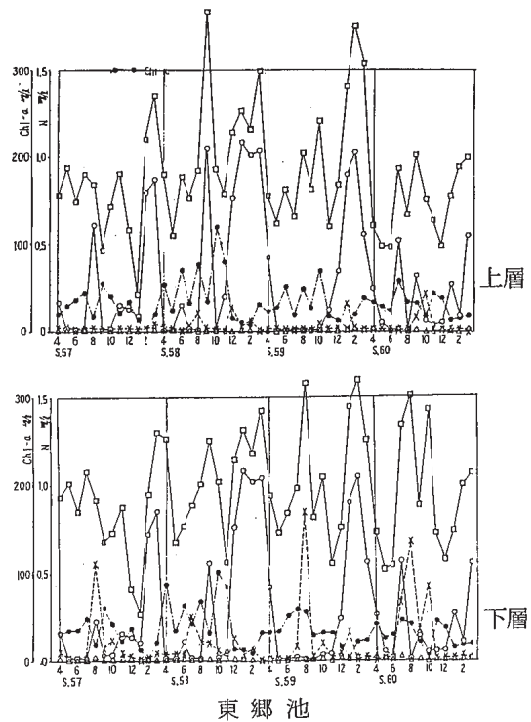
中海st.4: T-N、O-N、I-Nは上層、下層ともに不規則な変化をしており、上層より下層が著しい。全体として夏季(7~9月)より冬季(12~2月)が高値を示している。

NH₄-N、NO₂-N、NO₃-Nの変化とI-Nに占める割合について考察する。

湖山池: NH₄-Nは、夏季下層において短期間で

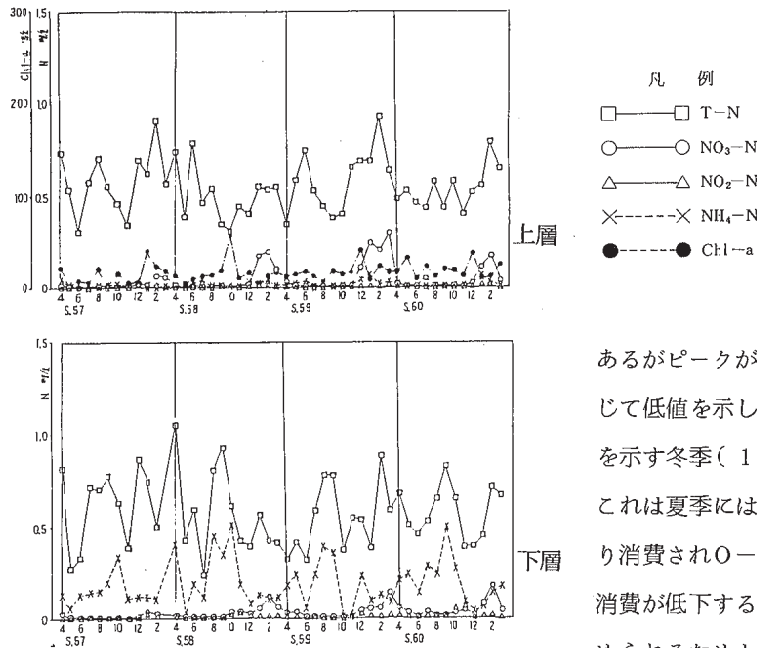


湖山池



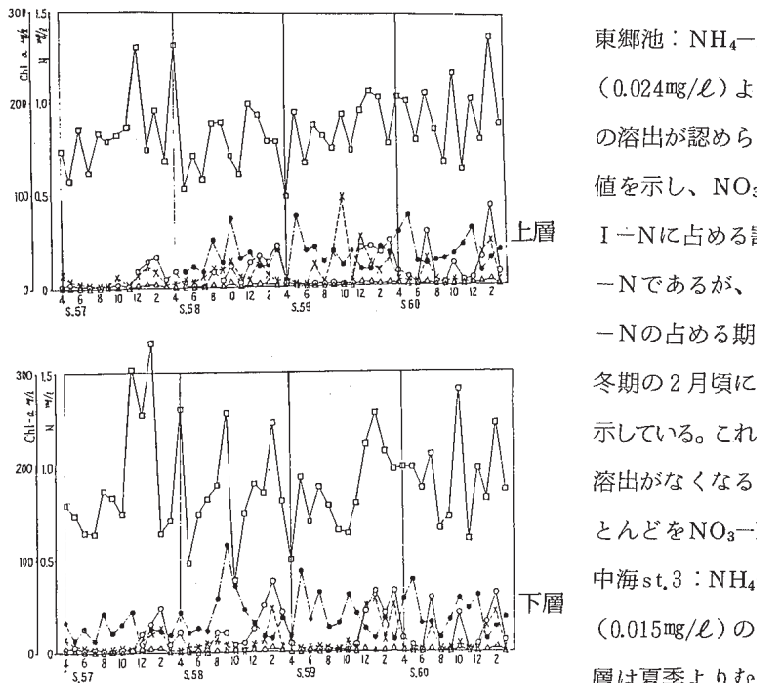
東郷池

図3-1 T-Nと各態窒素の経月変化



中海 St. 3

あるがピークが認められる。NO₂-Nは年間を通じて低値を示している。NO₃-NはChl-aが低値を示す冬季(1、2月)にピークを示している。これは夏季にはNO₃-Nは植物プランクトンにより消費されO-Nとなるが、冬季の1、2月には消費が低下するため余ったNがNO₃-Nとして認められるためと考察される。I-NにおけるNH₄-N、NO₂-N、NO₃-Nの存在割合を見れば、夏季にNH₄-Nが、冬季にNO₃-Nが殆どを占めている。



中海 St. 4

東郷池：NH₄-Nは、下層(0.097mg/l)が上層(0.024mg/l)より大幅に高値で、夏季に底泥からの溶出が認められる。NO₂-Nは年間を通して低値を示し、NO₃-Nは冬季に高値を示している。I-Nに占める割合は夏季にNH₄-N、冬季にNO₃-Nであるが、胡山池に比較して東郷池ではNO₃-Nの占める期間が長期間にわたっている。特に冬期の2月頃には95%以上を占め、しかも高値を示している。これは冬季には底泥からのNH₄-Nの溶出がなくなるとともに流入河川中のI-NのほとんどをNO₃-Nが占めるためと考察される。

中海st.3：NH₄-Nは、下層(0.182mg/l)は上層(0.015mg/l)の10倍以上の高値を示しており、上層は夏季よりむしろ冬季に高値を示している。下層は夏季にピークを示し、ときには0.5mg/lの高値を示すが、底泥からの溶出と考えられる。NO₂

図3-2 T-Nと各態窒素の経月変化

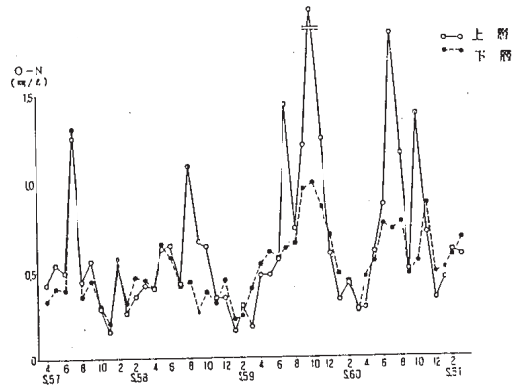
-Nは上・下層とも夏季に低値で、冬季の2月頃にピークを示している。NO₃-Nは冬季にピークを示す変化が周期的に表われている。I-Nに占めるNH₄-NとNO₃-Nの割合も上層と下層で異なったパターンを示している。上層はNH₄-Nが夏季(5~12月)に、NO₃-Nが冬季(1~4月)に殆どを占めている。下層は年間を通じてNH₄-Nが殆どを占め、冬季(1、2月)にNO₃-Nの割合が増加しており、また、割合が58年より59、60、61年と増加傾向が見られるが、これは冬季に湖水の流動がよくなったために生じたものと推定される。

中海st.4: NH₄-N(0.053-0.068mg/l)は夏季に高値を示す場合もあるが、おおむね冬季にも高値を示している。NO₂-N、NO₃-Nはともに夏季に低値で変動がほとんどないが、冬季(1、2月)にピークとなっている。I-Nに占めるNH₄-NとNO₃-Nの割合は上層と下層が類似したパターンを示しており、夏季(6~8月)にNH₄-Nが、冬季(12~3月)にNO₃-Nが優占する変化を示している。

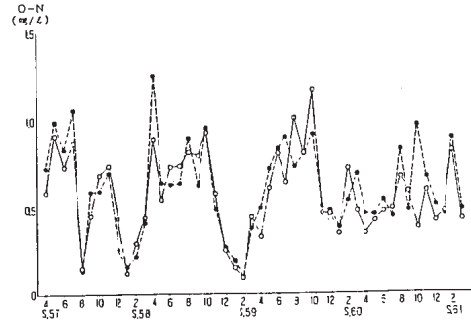
(3) T-PとPO₄-Pの経月変化

湖山池: T-Pは夏季(7~10月)にピークを、冬季(1、2月)に低値を示しCOD、Chl-aと類似した経月変化を示す。上・下層ともに似た季節変化を示すが、上層(0.060mg/l)が下層(0.055mg/l)より高値である。PO₄-Pは、下層(0.005mg/l)が上層(0.004mg/l)より若干高値で、8月に局部的なピークを有している。

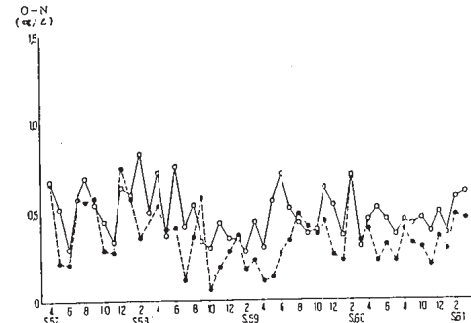
東郷池: T-Pは夏季(7~10月)に高値を冬季(1、2月)に低値で、湖山池とは逆に下層(0.080mg/l)が上層(0.063mg/l)より高値である。PO₄-Pは、下層(0.015mg/l)が上層(0.005mg/l)より



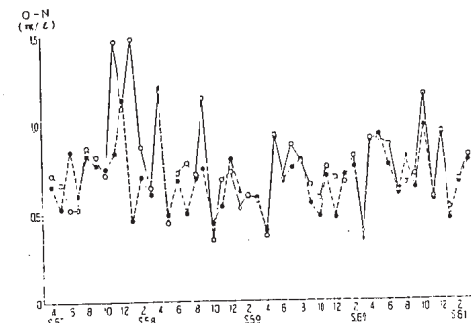
湖山池



東郷池



中海 St. 3



中海 St. 4

図-4 O-Nの経月変化

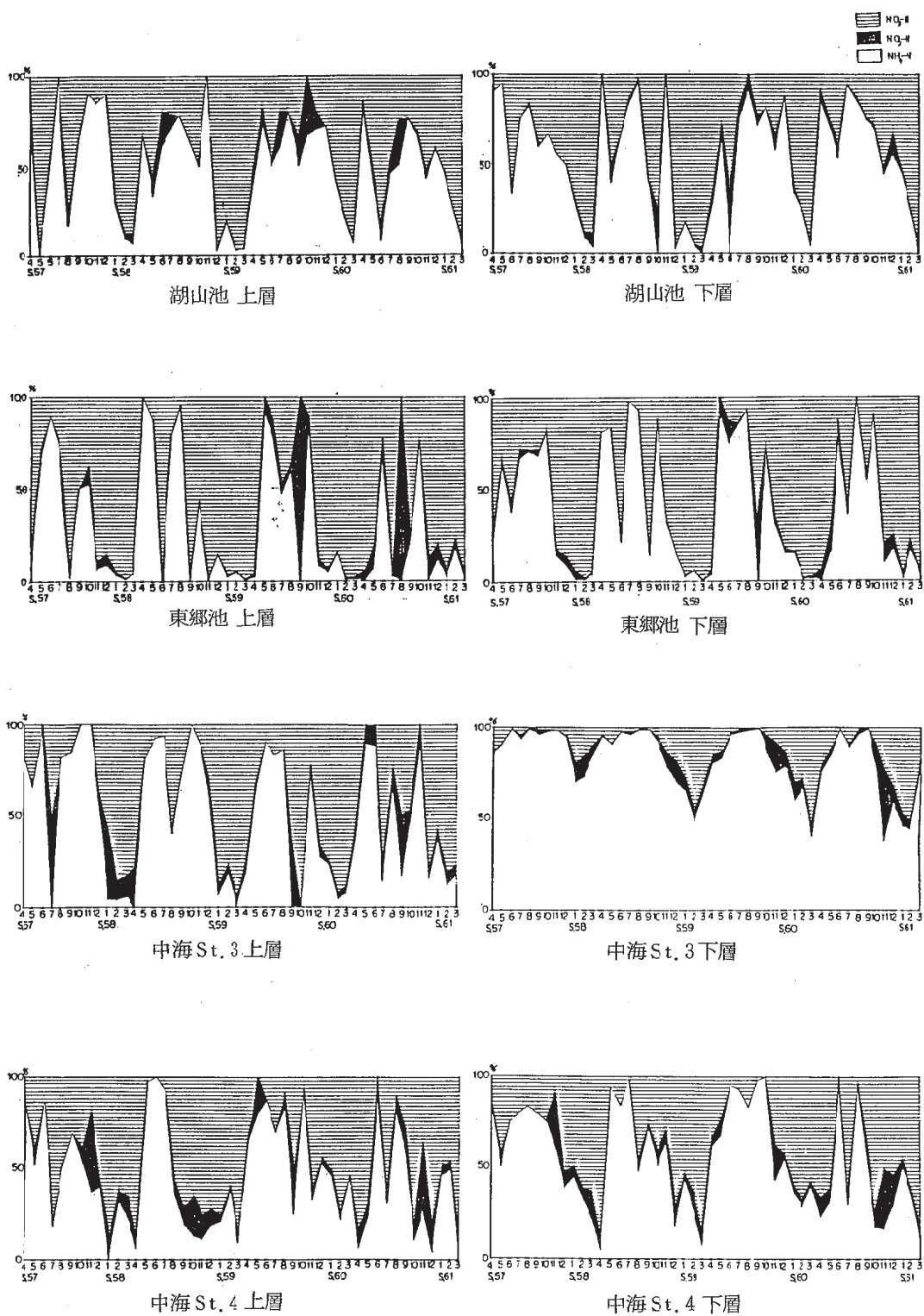


図5 無機態窒素の成分組成の経月変動

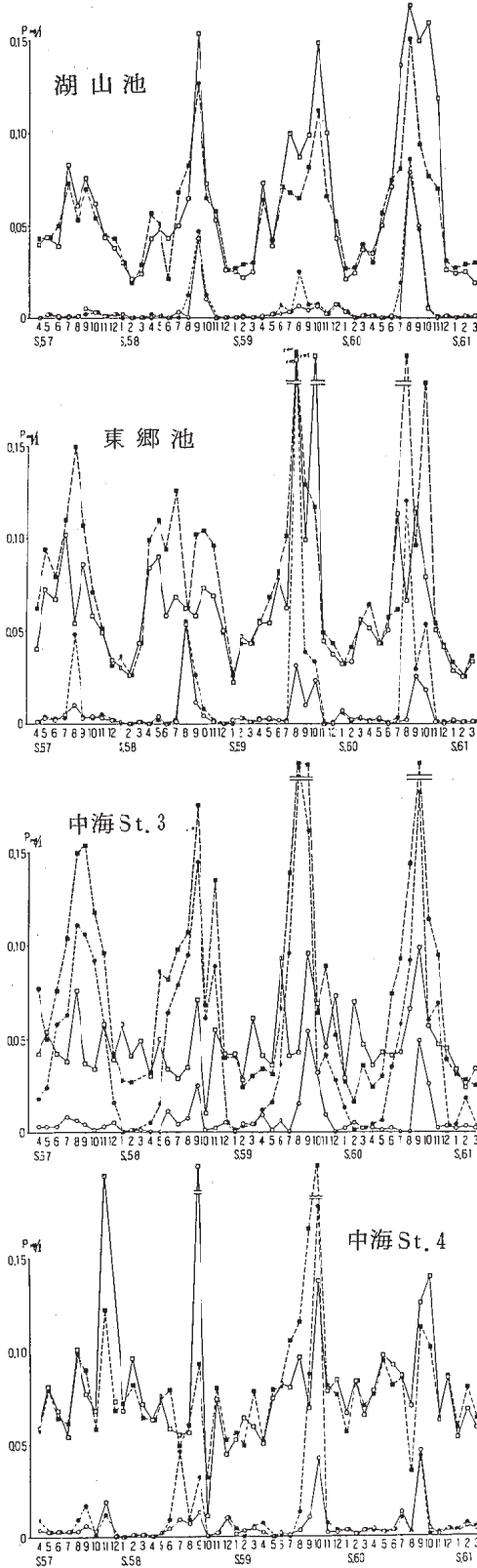


図6 T-PとPO₄-Pの経月変化

凡 例
 □——□ 上層TP
 ■-----■ 下層TP
 ○——○ 上層PO₄-P
 ●-----● 下層PO₄-P

り大幅に高値を示し下層のDOの減少する夏季(8~10月)にピークがあることから底泥からの溶出と考えられる。

中海st.3: T-Pは上層は不規則な変動を繰り返しており季節変化を示さないが、下層は夏季(7~10月)にピークを示し、冬季(1, 2月)に低値を示している。PO₄-Pは下層(0.050mg/l)が上層(0.008mg/l)の6倍以上も高値を示している。上層では、7~10月に余剰のPO₄-Pとして存在しており、時には0.054mg/lの高値を示すことがある。下層のPO₄-Pは12~2月には0.005mg/l以下の低値を示すが、7~10月には0.05mg/l以上となり59年8月には0.221mg/lの高値を示している。

中海st.4: T-Pは、1, 2月に低値で9月~11月頃にピークを有する経月変化をしており、上層と下層の比較的類似した変動をしている。PO₄-Pは12~5月頃には0.005mg/l以下の低値であるが、9月頃には短期間ではあるが0.040mg/l以上を示している。

(4) DOの垂直分布の経月変化(図-7)

湖山池、東郷池、中海におけるDOの垂直分布を湖山池、東郷池では0.5mごと、中海では1mごとに測定した。

水中の溶存酸素の飽和量は水温と塩化物イオン量に支配される。水温の影響は純水では0℃で14.16mg/lが10℃で10.92mg/l、20℃で8.84mg/lそして30℃では7.53mg/lと0℃の53%に減少して

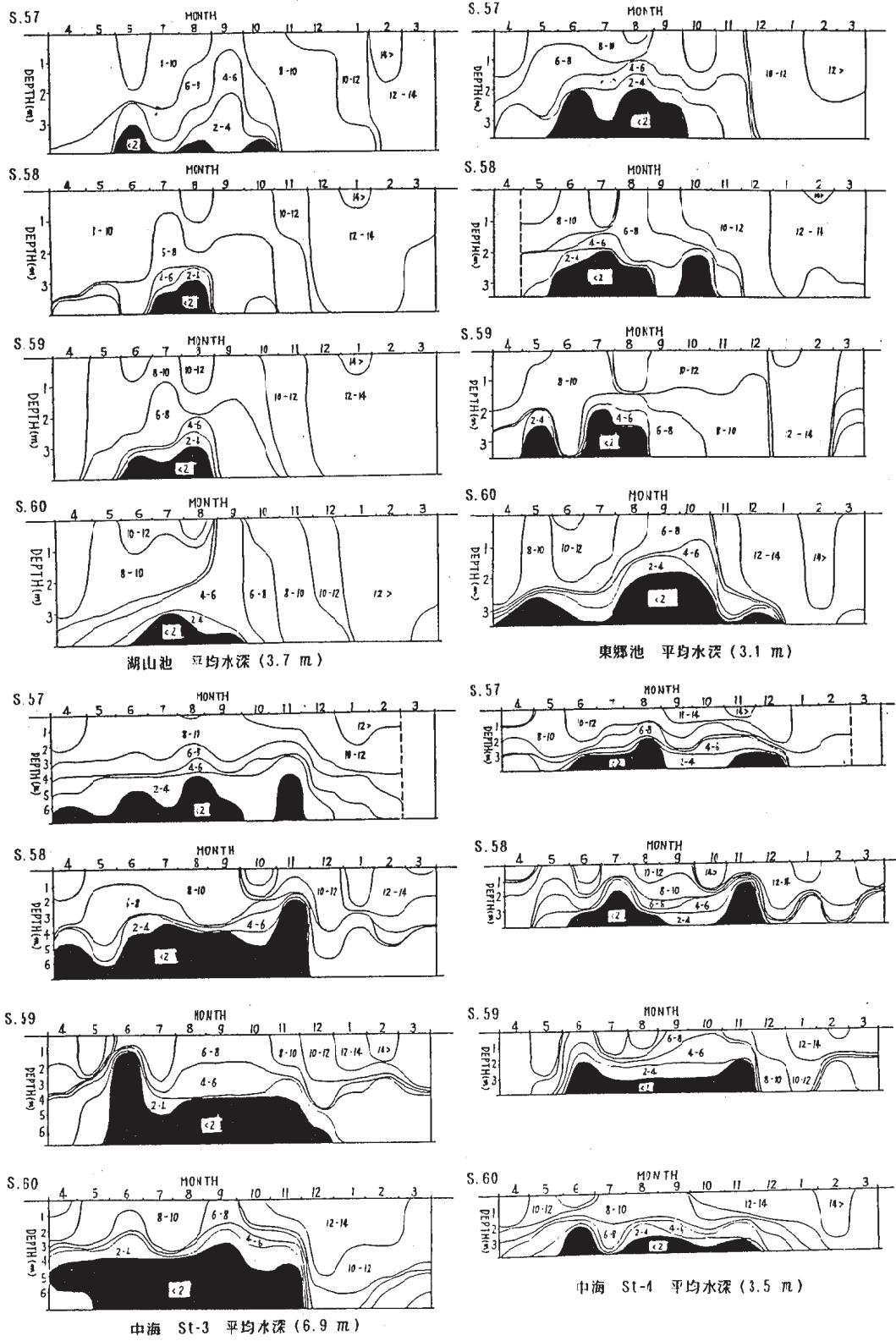


図7 DOの垂直分布の経月変化

しまう。塩化物イオンの影響は、 Cl^- 10,000mg/ℓ で純水の90%、 Cl^- 20,000mg/ℓ で80%に減少してしまう。

湖山池、東郷池、中海の水温の経月変化は8月に30℃程度で最大を、2月に2℃程度で最小となるsinカーブで表現される季節変化を示しており、DOは前述のように水温の影響を受けている。

DOは環境基準の湖沼類型Aで7.5mg/ℓ以上であるので、これを目安に8mg/ℓそして底泥からの $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出する還元状態の指標として2mg/ℓ以下について湖沼の状態について説明する。

湖山池：DOは表層、上層、中層、下層そして底層に行くに従って減少するが、表層ではほとんどの期間が8mg/ℓ以上を含有しており、底層でも11月から3月にかけては8mg/ℓ以上である。DOは夏季に減少し、底層で2～4ヶ月間無酸素に近い状態となっている。

東郷池：湖山池より8mg/ℓ以上の期間が減少し、底層では2mg/ℓ以下の期間が長くなり、3～9ヶ月間に及んでいる。

中海st.3：湖山池、東郷池と異なって表層→上層→中層→下層→底層と深度を増すに従ってDO量を減じており、水深3～5mを境にして急激に減じている。これは塩分躍層の影響を強く受けているためと考察される。表層ではほとんどの期間が8mg/ℓ以上であるが、底層ではほとんど8mg/ℓ以下で、2mg/ℓ以下の期間も5～8カ月に及んでいる。

中海st.4：st.3ほどではないが、DOの成層構造が見られる。表層では、8mg/ℓ以上あるが、底層では8mg/ℓ以上あるのは冬季の1～3ヶ月間に過ぎない。底層のDOが2mg/ℓ以下の期間はst.3ほどではないが夏季の3カ月から6カ月に比較的

長期間に及んでいる。

4 水質の数値解析

湖山池、東郷池、中海st.3、st.4の上層、下層の水温、COD、O-N、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、T-N、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、T-P、Chl-aの8項目について相関係数、主成分分析を行ったので、その概要について記述する。

(1) 相関係数

植物プランクトンの指標であるChl-aと有機汚濁の指標であるCODの季節変化を水温との相関係数で見れば、それぞれ湖山池(n=45)、は上層が0.724と0.704、下層が0.595と0.615と高値を示している。東郷池(n=47)は上層が0.423と0.745、下層が0.519と0.736と水温の影響を強く受けている。中海st.3(n=34)は上層が0.005と-0.038、下層が0.072と0.102と水温との相関関係がなく、季節変化に乏しいことが分かる。中海st.4(n=34)は上層が0.309と0.270、下層が0.041と0.112と低値でst.3と同様Chl-a、CODは季節変化に乏しい。Chl-aとCOD、O-N、T-N、T-Pの相関係数は、湖山池は上層が0.896、0.750、0.594、0.780、下層が0.706、0.509、0.255、0.535で上層が下層より高値で、COD、O-N、T-Pは高値であるが、T-Nは低値である。東郷池は上層が0.613、0.570、-0.074、0.490、下層が0.764、0.600、-0.040、0.362でT-NとT-Pが低値である。中海st.3は上層が0.255、0.089、-0.038、0.009、下層が0.179、0.213、0.097、0.222とCOD、O-N、T-N、T-Pのいずれの項目も低値である。中海st.4は、上層が0.777、0.716、0.237、0.356、下層が0.696、0.650、0.276、0.064とT-Nと下層のT-Pは低値であるが、COD、O-Nは高値である。湖山池、東郷池、中海st.4では、植物

表3 相関係数

湖山池

(r=4.5)

Table showing correlation coefficients for Lake Yamashiro. It includes two main columns for '上層' (Upper layer) and '下層' (Lower layer), with sub-columns for parameters: WT, COD, O-N, NH4-N, T-N, PO4-P, T-P, and Chl. Each parameter has a correlation value with itself (1) and with all other parameters.

真郷池

(n=47)

Table showing correlation coefficients for Lake Yamashiro. It includes two main columns for '上層' (Upper layer) and '下層' (Lower layer), with sub-columns for parameters: WT, COD, O-N, NH4-N, T-N, PO4-P, T-P, and Chl. Each parameter has a correlation value with itself (1) and with all other parameters.

中海St.3

(n=34)

Table showing correlation coefficients for Ochi no Umi Station 3. It includes two main columns for '上層' (Upper layer) and '下層' (Lower layer), with sub-columns for parameters: WT, COD, O-N, NH4-N, T-N, PO4-P, T-P, and Chl. Each parameter has a correlation value with itself (1) and with all other parameters.

中海St.4

(r=3.4)

Table showing correlation coefficients for Ochi no Umi Station 4. It includes two main columns for '上層' (Upper layer) and '下層' (Lower layer), with sub-columns for parameters: WT, COD, O-N, NH4-N, T-N, PO4-P, T-P, and Chl. Each parameter has a correlation value with itself (1) and with all other parameters.

プランクトンとCOD、O-Nとの関係があることがうかがわれる。

東郷池、st.3の下層ではNH₄-N、PO₄-Pの経月変化で底泥からの溶出が認められるが、水温とNH₄-N、PO₄-PそしてNH₄-NとPO₄-Pの相関係数で見ると、東郷池は0.409、0.407、0.869、st.3は0.601、0.832、0.679と高値でこのことが確認される。st.4は-0.087、0.303、0.692で水温とNH₄-N、PO₄-Pは低値であるが、NH₄-NとPO₄-Pは高値であること、またPO₄-PとT-Pの相関係数は0.826と高値を示すことからNH₄-NとPO₄-Pの底泥からの溶出が推定される。湖山池は0.011、0.399、0.041といずれも低値で底泥からの溶出はあまり考えられない。

上層と下層の関係は水温が湖山池0.997、東郷池0.995、中海st.3 0.913、中海st.4 0.996と高値である。中海st.3が他より低値なのは塩分躍層の影響による温度躍層のためと考えられる。上層と下層のChl-a、COD、O-N、T-Pの関係はそれぞれ湖山池が0.675、0.840、0.722、0.938、東郷池が0.866、0.927、0.875、0.728、st.3が0.250、0.226、0.427、0.449、st.4が0.625、0.765、0.819、0.502である。上層と下層の湖水の混合は湖山池、東郷池は比較的混合しており、中海st.4は若干悪く、中海st.3はほとんど混合していないと考察される。

(2) 主成分分析

各湖沼の上層と下層の項目相互間の関係を知るため水温、COD、O-N、NH₄-N、T-N、PO₄-P、T-P、Chl-aの8項目、延16項目について相関行列を用いた主成分分析を行った。

主成分分析とは変数群について、すべての観測値の変動を最も良く説明できるような少数の成分

(主成分)に要約し、これにより観測値の特徴を把握する統計的手法である。

第1主成分から第16主成分のうち、第1主成分と第2主成分の因子負荷量の累積寄与率は、湖山池が69.9%、東郷池が63.1%、中海st.3が49.9%、中海st.4が57.6%である。全変動の過半を占めており、主成分分析による解析の適用は有効であると考えられる。

第1主成分はChl-a、COD、O-Nの因子負荷量が高値を示し富栄養化による変動を、第2主成分はNH₄-N、PO₄-Pの因子負荷量が高値を示し無機栄養塩類の変動を示唆するものと考察される。

8項目を第1主成分と第2主成分により分類すれば、湖山池は、上層と下層が似た分布をしており、Chl-a、COD、T-P、水温がグループを形成し、Chl-aとCOD、T-Pが密接な関係があることを示唆している。PO₄-Pは、このグループの範囲内にあることから例えば植物プランクトンの増殖に関係のあるPO₄-Pと考えられる。

NH₄-N、T-Nがグループとして考えられるが、Chl-aのグループと余り関係がないように考えられる。O-NはChl-aのグループに若干関係がありそうである。

東郷池はChl-a、COD、O-N、水温のグループとNH₄-N、T-N、PO₄-Pのグループが考えられる。Chl-aとCOD、O-Nが密接な関係にあり、NH₄-N、PO₄-Pは下層で密接な関係にあり、これは底泥からのNH₄-NとPO₄-Pの溶出を意味していると考えられる。

中海st.3はChl-a、CODの第1主成分の因子負荷量が高値を示していることから富栄養化現象がほとんど起っていないことを意味していると考え

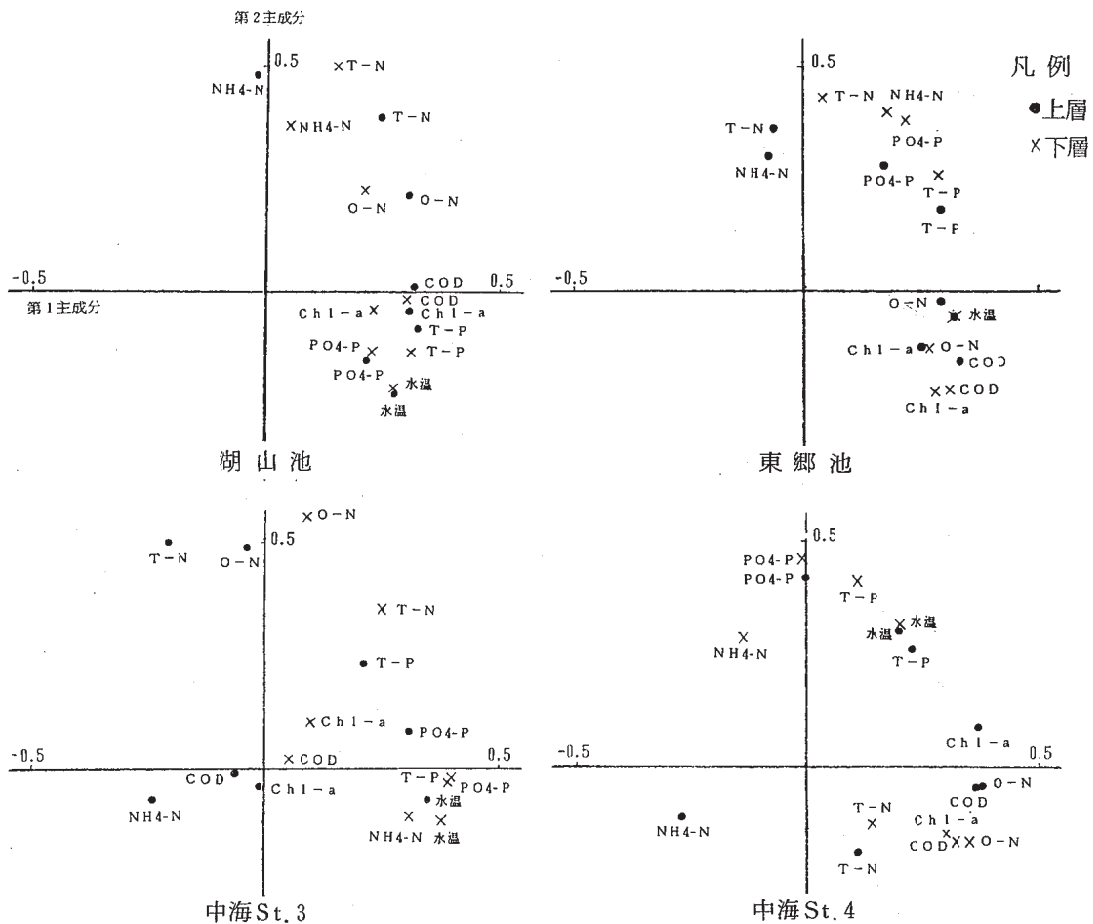


図8 第1主成分と第2主成分の因子負荷量

えられる。下層のNH₄-N、PO₄-P、水温がグループを形成しているが、これは夏季に底泥からの溶出と考えられる。

中海st.4はChl-a、COD、O-Nがグループを形成している。NH₄-Nは上層と下層でその発生源が異なっていることが考えられる。

5 富栄養化現象

(1) 富栄養化現象と内部生産

CODは湖沼における有機汚濁指標であるが、CODの原因物質には家庭下水、工場排水、水田、樹園地などから流入した外部汚濁物質と湖沼内で

二次的に植物プランクトンや動物プランクトンの増殖などにより発生する内部生産物質が考えられる。

植物プランクトンは食物連鎖の生産者に当たり内部生産物質のうち最大の寄与率を占めており、マクロには植物プランクトンが内部生産物質を代表していると考えられる。富栄養化現象の盛んな湖沼では、湖水のCODのうち、植物プランクトンによるCODの割合が大きくCODとChl-aの相関係数が高値となることが考えられる。

Chl-aとCOD、O-Nの相関係数は湖山池、東郷池、中海st.4では高値を示すが、中海st.3では

低値であり、かつ主成分分析で湖山池はChl-a、COD、T-P、東郷池、中海st.4はChl-a、COD、O-Nがグループ形成をしているが、中海st.3はChl-aがグループ形成をしていない。これらのことは湖山池、東郷池、中海st.4では富栄養化現象が起っているが、中海st.3では富栄養化現象がほとんど起っていないことを意味していると考えられる。

植物プランクトンの増殖は窒素、リンなどの栄養塩類の濃度や水温、光強度の影響を強く受けている。植物プランクトンのシュミレーションでは植物プランクトンの成長速度は光強度、水温、窒素、リンの関数として表わされ、水温の高い、光強度の強い夏季は成長速度が高値で、水温の低い、光強度の弱い冬季は成長速度は低値となる。この考えで水温とChl-aの相関係数が高値の場合は、低値の場合より水温、光強度が植物プランクトンの増殖に役立っていることとなる。

Chl-aと水温の相関係数は、上層では、湖山池(0.724)、東郷池(0.423)は高値で季節変化に富んでいるが、中海st.3(0.005)、中海st.4(0.309)は低値で季節変化に乏しく、湖山池、東郷池では植物プランクトンの増殖は水温、光強度の影響を受けているが、中海st.3、中海st.4では余り影響を受けていないのではないかと考察される。

水質の経月変化から東郷池、中海st.3、中海st.4の下層ではNH₄-N、PO₄-Pの底泥からの溶出が認められ、水温とNH₄-N、PO₄-PおよびNH₄-NとPO₄-Pの相関係数やNH₄-NとPO₄-Pの三成分分析からも東郷池、中海st.3における底泥からの溶出が推定される。上層と下層のCOD、O-Nなどの相関係数は東郷池が高値、中海st.4が若干低値で中海st.3が非常に低値であるこ

とから上層と下層の湖水の混合は東郷池では比較的混合しているが、中海st.4は若干悪く、中海st.3はほとんど混合していないと考えられる。

東郷池の塩分構造はときどき複合構造になるが、しばらくすれば単一構造になることから下層のPO₄-Pは植物プランクトンの増殖に関与している可能性は高いが、中海st.3では上・下層の混合がほとんどないことやT-Pが下層は夏季の7~10月にピークを示し、冬季の1、2月に低値を示しているが、上層は不規則な変動を繰り返しており季節変化を示していないことから下層のPO₄-Pは植物プランクトンの増殖にほとんど関与していないと考えられる。中海st.4は東郷池ほどではないが植物プランクトンの増殖に若干関与しているものと推定される。因みにCl⁻の上層と下層の相関係数(n=48)は上層水と下層水の混合の度合を表現していると考えられるが、湖山池0.999、東郷池0.920、中海st.3(n=47)0.405、中海st.40.929である。

湖沼のCODは前述のように外部汚濁と内部生産に分けられ、次の仮定により算出できる。

湖沼の外部汚濁は植物プランクトンの増殖が見られない場合には容易に分るが、実際には常に植物プランクトンの増殖が見られる。そこで植物プランクトンの増殖が少ない時、即ちChl-aが低値の時のCODからChl-aの寄与分のCODを減じたものが外部汚濁、CODの平均値から外部汚濁を減じたものが内部汚濁で、次式により算出した。

$$\begin{aligned} \text{外部汚濁} &= \frac{\text{Chl-aが低値の時のCOD値}}{\text{Chl-aが低値の時のCOD値}} - (\text{Chl-a} \times \text{C05}) \\ \text{内部生産} &= \text{COD平均値} - \text{外部汚濁} \end{aligned}$$

Chl-aが低値の時のCODは、湖山池上層が3.6と、下層が3.8mg/l、東郷池が3.7と3.4mg/l、

中海st.3が3.9と2.2 mg/l、中海st.4が4.6と4.0 mg/lである。この時のChl-a値は、湖山池が10.8と12.3 μg/l、東郷池が13.7と13.5 μg/l、st.3が6.2と4.7 μg/l、st.4が13.9と16.5 μg/lである。外部汚濁の算出は、このChl-a値に0.05(Chl-aとCODの単回帰式の係数)を乗じたものを先のCOD値から減じて求められる。

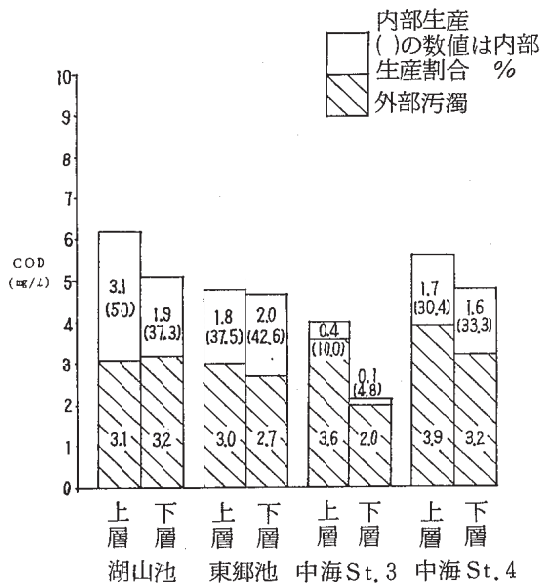


図9 CODの内部生産と外部汚濁

外部汚濁は、湖山池は上層3.1、下層3.2 mg/l、東郷池が3.0と2.7 mg/l、st.3が3.6と2.0 mg/l、st.4が3.9と3.2 mg/lとなる。COD平均値から外部汚濁を減じて内部生産が得られる。内部生産は、湖山池が3.1と1.9 mg/l、東郷池が1.8と2.0 mg/l、中海st.3が0.4と0.1 mg/l、中海st.4が1.7と1.6 mg/lである。内部生産の割合は湖山池は50.0と37.3%、東郷池が37.5と42.6%、中海st.3が10.0と4.8%、中海st.4が30.4%と33.3%である。

湖沼の富栄養化現象は湖山池が高く、次に東郷池そして中海st.4である。このため外部汚濁は中海st.4、東郷池、湖山池の順であるが、内部生産

は湖山池、東郷池、中海st.4の順となっている。中海st.3は富栄養化現象はほとんど起っておらず、外部汚濁は湖山池、東郷池と余り変わらないが、内部生産は極端に低値を示している。また、外部汚濁は下層が2.0 mg/lと上層の3.6 mg/lに比べて大幅に低値であるが、これは美保湾海水の割合(美保湾のCl⁻濃度を19,000 mg/l、河川水を20 mg/lと仮定して算出、上層は45.6%を占めている。)が79.4%も占めているためと考えられる。

(2) 富栄養化現象と制限栄養塩類

湖山池、東郷池、中海のいずれも窒素、リンに富んだ富栄養湖であるが、窒素、リンのいずれが富栄養化現象の制限栄養塩となっているかについて考察する。

植物プランクトンの増殖により、無機態窒素(NO₃-N、NH₄-N)、リン(PO₄-P)が減少し、植物プランクトンの光合成により有機態窒素、リンが増加する。一般に植物プランクトンは動物プランクトン、バクテリアと共存しており、動物プランクトンの摂食排泄活動、バクテリアの分解活動で有機態の窒素、リンは分解無機化され、そして無機化した窒素、リンは再び植物プランクトンに利用される。

前述の考え方により、例えばNH₄-N、NO₃-Nが0.009 mg/l以下でPO₄-Pが0.02 mg/l以上の場合には窒素制限、PO₄-Pが0.005 mg/l以下でNH₄-N、NO₃-Nが0.05 mg/l以上の場合にはリン制限と仮定した。そして、これ以外にNH₄-N、NO₃-Nが0.009 mg/l以下で、PO₄-Pが0.005 mg/l以下で無機態窒素、リンが富栄養化現象として利用されている場合、NH₄-N、NO₃-Nが0.05 mg/l以上でPO₄-Pも0.02 mg/l以上の無機態窒素、リンが利用されていない場合がある。

湖山池：5～11月の大部分は窒素、リンともに利用されており、1～3月の冬季はリン制限となっている。窒素制限は PO_4-P が58年9月に0.043 mg/l、60年8月に0.079 mg/lであるが、これらの前月にはChl-aが96 μg/lと197 μg/lと高値を示していることから PO_4-P は植物プランクトンの分解物と考察される。60年9月に NH_4-N 0.141 mg/l、 NO_3-N 0.044 mg/l、 PO_4-P 0.050 mg/lと無機態の窒素、リンが未利用であるが、これはChl-aが9月9 μg/lと低値なことから植物プランクトンの増殖が少ないために生じたものと考察される。

東郷池：11～4月がリン制限で、夏季の7～10月には窒素、リンが利用されていないときが時々みられる。また、あきらかに窒素制限とみられるケースはない。

中海st.3：12～3月がリン制限で、9～10月に窒素制限がみられる。

中海st.4：10～5月のほとんどがリン制限で明確な窒素制限はなく、7～10月には窒素、リンが利用されていないときが時々みられる。

無機態の窒素、リンのほとんどが利用される富栄養化現象は7～10月の夏季に起っており、湖山池で最も盛んである。

冬季は湖山池、東郷池、中海のいずれもリン制限で窒素制限は湖山池と中海st.3の夏季(8～10月)にみられる。

無機態の窒素、リンともに植物プランクトンに利用されていない状態は、東郷池と中海st.4の夏季に時々発生している。

今後、これらのメカニズムの研究が必要である。

6 ま と め

(1) Cl^- ：湖山池は上層519 mg/l、下層525 mg/lと1,000 mg/l以下の淡水湖に近い汽水湖で、東郷池は1,300、2,100 mg/lと湖山池より塩分濃度が高く、中海は8,400 mg/l、15,100 mg/lと海水に近い汽水湖である。塩分構造は湖山池はほとんどの期間が単一構造であるが、東郷池はときどき複合構造になる。また、中海は常に複合構造で、塩分躍層は3 mから5 mに分布している。

(2) 水質の経月変化

湖山池では植物プランクトンの指標であるChl-a、有機汚濁指標であるCODやO-N、T-Pが夏季(7～10月)に高く、冬季(1、2月)に低い季節変化をしている。東郷池では湖山池に比べて季節変化に乏しいが、Chl-a、COD、C-Nが類似した経月変化をしており、また、下層で水温の高い8月9月に NH_4-N 、 PO_4-P の底泥からの溶出と考えられるピークが認められる。中海st.3のChl-a、CODは季節変化に乏しいが、下層では夏季6月から10月にかけて高濃度の NH_4-N 、 PO_4-P の底泥からの溶出が認められる。中海st.4は季節変化に乏しいが、Chl-a、COD、O-Nが比較的類似した経月変化をしている。下層では8月9日に NH_4-N 、 PO_4-P の底泥からの溶出が認められる。

NH_4-N 、 NO_2-N 、 NO_3-N の変化は、各湖沼ともに NO_2-N は年間を通じて低値で、 NH_4-N は夏季に、 NO_3-N は冬季にピークを示している。I-Nに占める NH_4-N と NO_3-N の割合は、各湖沼とも NH_4-N は夏季に NO_3-N は冬季に殆どを占めているが、中海st.3の下層では、 NH_4-N が年間を通じて殆どを占めている。

DOは水温の影響を受け、夏季に低値、冬季に高値で、また、表層から底層に行くに従って減少している。表層は各湖沼ともおおむね8mg/l以上であるが、底層は夏季に2mg/l以下になっている。その期間は、湖山池が2～4カ月、東郷池が3～9カ月、中海st.4が3～6カ月、中海st.3が6～8カ月である。

(3) 富栄養化現象

Chl-aとCOD、O-Nの相関係数は湖山池、東郷池、中海st.4では高値を示すが、中海st.3では低値である。主成分分析で湖山池はChl-a、COD、T-P、東郷池、中海st.4はChl-a、COD、O-Nがグループ形成をしているが、中海st.3はChl-aがグループ形成していない。これらのことは湖山池、東郷池、中海st.4では富栄養化現象が起っているが、中海st.3では富栄養化現象がほとんど起っていないことを意味していると考察される。

水質の経月変化から東郷池、中海st.3、中海st.4の下層ではNH₄-N、PO₄-Pの底泥からの溶出が認められ、主成分分析からも東郷池、中海st.3における底泥からの溶出が推定される。また、上層と下層の湖水の混合は、湖山池、東郷池では比

較的混合しており、中海st.4は若干悪く、中海st.3は殆んど混合していないと考察される。

これらのことから、PO₄-Pは湖山池は植物プランクトンの増殖に強く関係していると考えられ、ついで東郷池、中海st.4で、中海st.3は増殖にほとんど関与していないと考えられる。

湖沼の富栄養化現象をCODの内部生産の割合で見れば湖山池が上層50.0%と下層37.3%、東郷池が37.5%と42.6%、中海st.4が50.4%と33.5%そして中海st.3が10%と48%と低値である。このためCODの外部汚濁は中海st.4、東郷池、湖山池の順であるが、内部生産は湖山池、東郷池、中海st.4の順となっている。中海st.3の外部汚濁は湖山池、東郷池と余り変わらないが富栄養化現象がほとんど起っていないため内部生産は極端に低値である。

制限栄養塩類については、無機態窒素、リンから湖山池、東郷池、中海のいずれも冬季はリン制限で、窒素制限は湖山池と中海st.3の夏季に見られる。

なお、これら制限栄養塩類については、今後研究が必要であると考えられる。