

中海の水質構造と富栄養化現象について

— 特に Cl^- との関連 —

安田 満夫 山内 佳見 田中 賢之介
 笈 一郎 三田 正之* 山根 一祐
 坂田 裕子

まえがき

中海の湖水は塩分の成層構造が発達しており、低塩分層、中間層、高塩分層からなる。低塩分層は地点による濃度差は殆どなく、水質が汚濁しており、高塩分層は水深4~8m以深に分布し、低塩分層よりCODが2mg/l程度低値を示し、夏季に

は底層部のDOが3mg/l以下になっている。湖水の混合は水平方向が殆どで、垂直方向は殆どないこと、また、リンは低塩分層は、富栄養化現象に関与しているが、高塩分層では関与していないことなど、水質汚濁機構について若干の知見を得たので報告する。

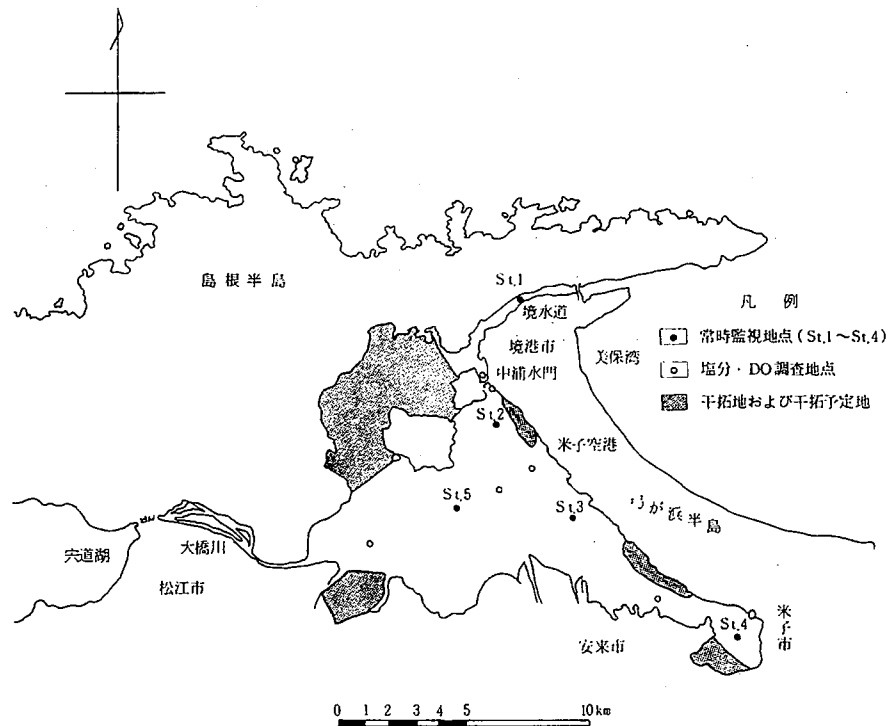


図1 調査地点位置図

* 現在、倉吉保健所

1. 水質の概要
 中海は、鳥取県と島根県の県際水域で、斐伊川に源を発し、宍道湖(水面積79.7km²、最大水深6m)とは大橋川で、美保湾とは境水道でつながり、水面積69.8km²、最大水深17.1m、貯水量4.3億m³を有している。(図1参照)

中海の水質については、公共用水域の常時監視調査として図1に示すSt. 1~4の4地点(St. 1:

境水道中央部(水深10m前後)、St. 2:境港市小篠津町地先(水深11m前後)、St. 3:米子市葭津地先(水深8m前後)、St. 4:米子湾中央部(水深3.5m前後))の上層と下層について、月1回の調査を実施している。昭和50年4月から昭和58年3月までの水温、DO飽和率(以下DO%)、COD、T-N、T-P、Cl⁻の最大、最小、平均、標準偏差を表1にまとめた。

表1 水質測定結果(昭和50年4月~58年3月)

項目	St. 1				St. 2				
	最大	最小	平均	標準偏差	最大	最小	平均	標準偏差	
上層	水温(℃)	29.0	2.5	16.68	7.59	29.5	2.5	16.52	7.95
	DO(%)	133.0	71.4	102.39	10.20	163.0	83.8	110.60	12.90
	COD(mg/l)	13.0	1.4	4.32	1.63	10.0	1.6	4.95	1.64
	T-N(mg/l)	1.532	0.213	0.520	0.211	1.770	0.240	0.558	0.214
	T-P(mg/l)	0.122	0.017	0.048	0.021	0.242	0.015	0.052	0.029
	Cl ⁻ (mg/l)	18,100	2,290	11,356	3,035	15,400	1,320	9,289	2,662
下層	水温(℃)	28.0	6.5	17.55	5.91	28.5	4.0	17.12	6.39
	DO(%)	116.0	75.2	94.87	7.32	103.0	0.0	71.22	21.42
	COD(mg/l)	4.3	0.6	2.08	0.87	8.9	0.6	2.46	1.24
	T-N(mg/l)	1.151	0.100	0.344	0.167	1.640	0.170	0.448	0.219
	T-P(mg/l)	0.060	0.006	0.030	0.011	0.267	0.011	0.050	0.035
	Cl ⁻ (mg/l)	20,200	12,700	17,574	1,486	19,200	3,090	16,053	2,050

項目	St. 3				St. 4				
	最大	最小	平均	標準偏差	最大	最小	平均	標準偏差	
上層	水温(℃)	30.0	2.0	16.49	8.03	32.0	3.0	17.02	8.26
	DO(%)	169.0	74.1	110.96	15.69	196.0	61.2	121.35	25.86
	COD(mg/l)	12.0	1.9	5.19	1.86	41.0	2.3	7.16	4.10
	T-N(mg/l)	1.610	0.260	0.612	0.233	4.883	0.240	0.983	0.503
	T-P(mg/l)	0.201	0.020	0.055	0.027	0.273	0.028	0.095	0.039
	Cl ⁻ (mg/l)	14,500	1,090	8,722	2,592	14,400	828	8,554	2,666
下層	水温(℃)	28.5	5.0	16.78	6.50	29.5	3.5	16.67	7.76
	DO(%)	114.0	0.0	39.02	29.12	158.0	0.0	91.21	34.16
	COD(mg/l)	7.6	0.7	3.15	1.38	12.0	2.7	5.69	1.86
	T-N(mg/l)	1.500	0.220	0.619	0.272	2.154	0.300	0.829	0.284
	T-P(mg/l)	0.274	0.011	0.093	0.072	0.208	0.010	0.090	0.041
	Cl ⁻ (mg/l)	17,800	8,740	15,120	1,797	15,100	1,990	10,065	2,655

Cl⁻ St. 1, 2, 3, 4における上層の平均値は、それぞれ11,400^{mg/l}、9,290^{mg/l}、8,720^{mg/l}、8,550^{mg/l}で、下層のそれは、それぞれ17,600^{mg/l} (採取水深9m前後)、16,100^{mg/l} (10m前後) 15,100^{mg/l} (7m前後)、10,100^{mg/l} (2.5m前後)と、上、下層ともにSt.1からSt.4に行くに従って低値を示し、上層が下層より低値を示している。

COD St.1~4の上層の平均値は、それぞれ4.32^{mg/l}、4.95^{mg/l}、5.19^{mg/l}、7.16^{mg/l}で、下層のそれは、それぞれ2.08^{mg/l}、2.46^{mg/l}、3.15^{mg/l}、5.69^{mg/l}と、Cl⁻とは逆にSt.1からSt.4に行くに従って汚濁し、いずれの地点とも上層が下層より2^{mg/l}程度汚濁している。つぎにSt.1~4における上層の最大値は、それぞれ13^{mg/l}、10^{mg/l}、12^{mg/l}、41^{mg/l}で、下層のそれは、それぞれ4.3^{mg/l}、8.9^{mg/l}、7.6^{mg/l}、12^{mg/l}と、いずれの地点とも上層が下層より汚濁し、特にSt.4の上層で赤潮発生時ではあったが41^{mg/l}と極端に高値を示している。

T-N St.1~4の上層の平均値は、それぞれ0.520^{mg/l}、0.558^{mg/l}、0.612^{mg/l}、0.983^{mg/l}で、下層のそれは、それぞれ0.344^{mg/l}、0.448^{mg/l}、0.619^{mg/l}、0.829^{mg/l}と、上、下層ともにCOD同様にSt.1からSt.4に行くに従って高値を示している。

T-P St.1~4の上層の平均値は、それぞれ0.048^{mg/l}、0.052^{mg/l}、0.055^{mg/l}、0.095^{mg/l}で、下層のそれは、それぞれ0.030^{mg/l}、0.050^{mg/l}、0.093^{mg/l}、0.090^{mg/l}でSt.3の下層を除いてはSt.1からSt.4に行くに従って高値を示している。

DO% St.1~4の上層の平均値は、それぞれ102%、111%、111%、121%で、下層のそれは、それぞれ94.9%、71.2%、39.0%、91.2%

を示している。上層は100%以上の過飽和を示すが、下層は100%未満で、特にSt.3は39.0%と低値を示している。最小値は、St.2,3,4の下層が0.0%と無酸素状態を示すことがある。

2. 塩分、DOから見た水質構造

(1) 中海水域の概要

中海全域の水質の概要を把握するため昭和55年11月11日、56年6月17日、57年6月15日に調査を行った。中海の東西方向として大橋川河口から弓が浜半島の米子空港地先までと、南北方向として境水道中央部から米子湾までの塩分とDOの水質断面を図2に示した。

昭和55年11月調査

塩分 表層は大橋川河口は8‰であるが、中央部、境水道、米子湾にかけては13~14‰と殆ど変わらない濃度を示している。表層から水深2~3mまでは殆ど変わらず、水深2~3mから8mまでは段々と高濃度になり、特に水深3mから5mまでが顕著である。また、境水道から中浦水門にかけての水深8m以深には28~29‰の高塩分層が分布している。

DO 表層は10^{mg/l}以上を含有しているが、水深3m以深で急激に減少している。境水道から中浦水門にかけてみられる高塩分濃度(28~29‰)を示す底層水は、美保湾からの流入直後のためかDOは5~6^{mg/l}を示している。これに較べて、潮盆部の底層水は流動が殆どないためか3^{mg/l}以下である。

昭和56年6月調査

塩分 表層は大橋川河口部で10‰と低く、境水道中央部で20‰と高いが、中海の殆どは15‰前後を示している。水深5mまでは塩分が増加を示し、特に水深3m付近で著しい。水深5m以深では26‰以上の高塩水が分布している。

DO 表層は9 mg/l程度であるが、高塩分水が分布する水深5 m以深では3 mg/l以下を示している。

昭和57年6月調査

塩分 昭和55年、56年の調査では、20~25‰の塩分層が中海から境水道にかけて水深3~5 mに水平に分布していたが、今回はそれがみられない。

このことは下層の25‰以上の高塩分水が消失したためかも知れない。また、大橋川河口、米子湾を除いた地点では表層から水深3~4 mまでは塩分の増加は見られない。

DO 水深3 m以浅は6 mg/l以上を含有しており、境水道、中浦水門の水道部では底層水でも5 mg/lを示すが、湖盆部のそれは3 mg/l以下である。

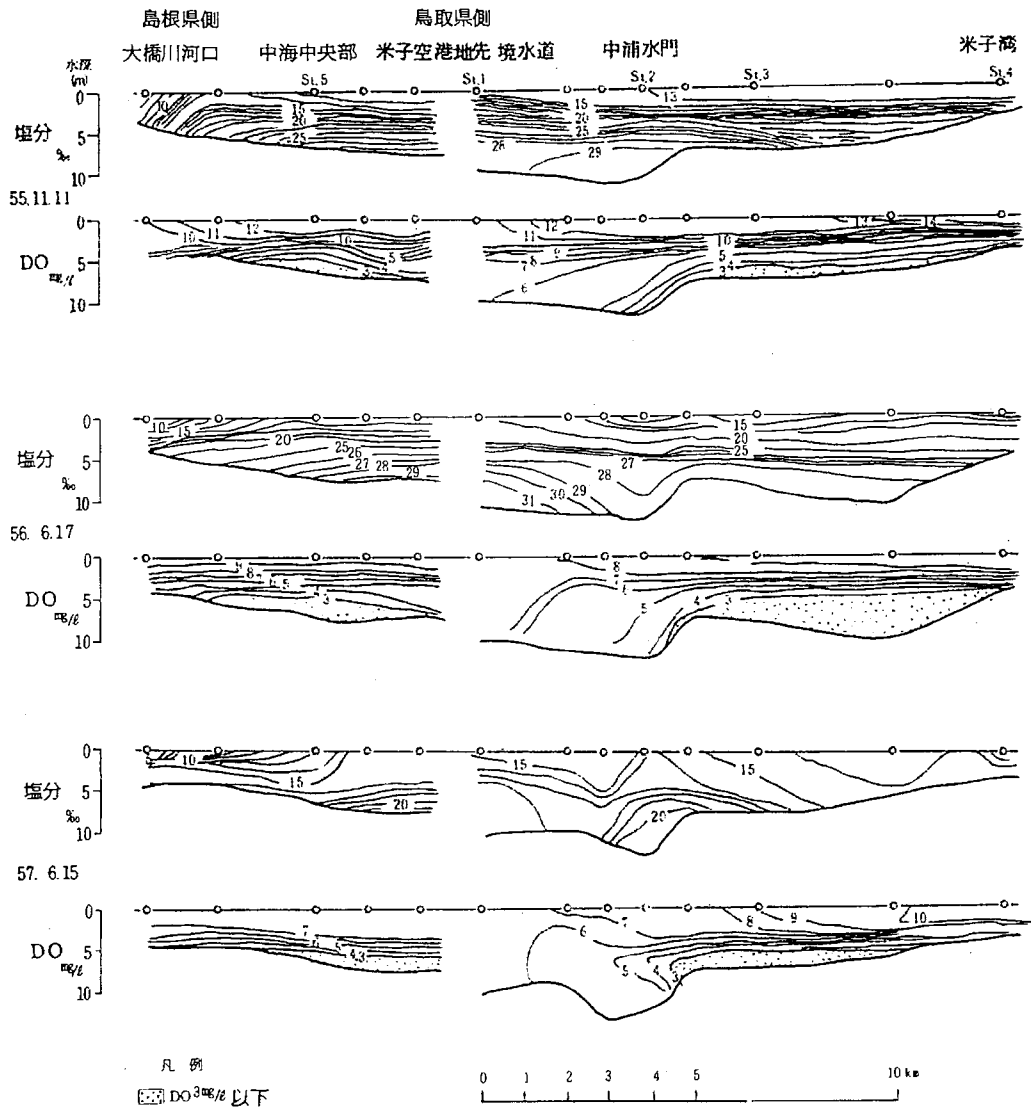


図2 中海全域水質断面図

(2) 経月変化

境水道中央部(St.1)から米子湾(St.4)までについて、昭和57年4月から昭和58年2月までの月別の塩分とDOの水質断面図を図3に示した。

美保湾海水の影響を受け易いSt.1からSt.2までの水道部とSt.2からSt.4までの湖盆部とは明らかに塩分の挙動が異なっている。

水道部 6月、8月、10月、11月は中浦水門付近の底層水より高い塩分濃度を示し、しかも8月、11月の中浦水門付近の底層水は流動がないためかDOは $3\text{mg}/\ell$ 以下を示している。4月、5月、7月、12月、1月、2月は境水道中央部の底層水が中浦水門付近の底層水より高い塩分濃度で、等濃度線も中海側に傾斜しており、底層水が流動して

いるためかDOも $6\sim 9\text{mg}/\ell$ を示している。

湖盆部 塩分の等濃度線は5月、6月を除いて水平に分布し成層構造が発達している。4月は表層と底層の濃度差があり、等濃度線は密であるが、12月、1月、2月は疎である。また、その勾配は年間の大半が水平であり、勾配の見られる5月、6月でも $1/1000\sim 2.5/1000$ である。DOは表層部で $8\sim 13\text{mg}/\ell$ を示すが、深くなるに従って減少し、6月から11月にかけては底層部は $3\text{mg}/\ell$ 以下を示している。DOの等濃度線は水平に成層構造を形成して分布している。

塩分とDOの挙動から湖水の混合は水平混合によるもので、垂直混合は殆どないものと考えられる。

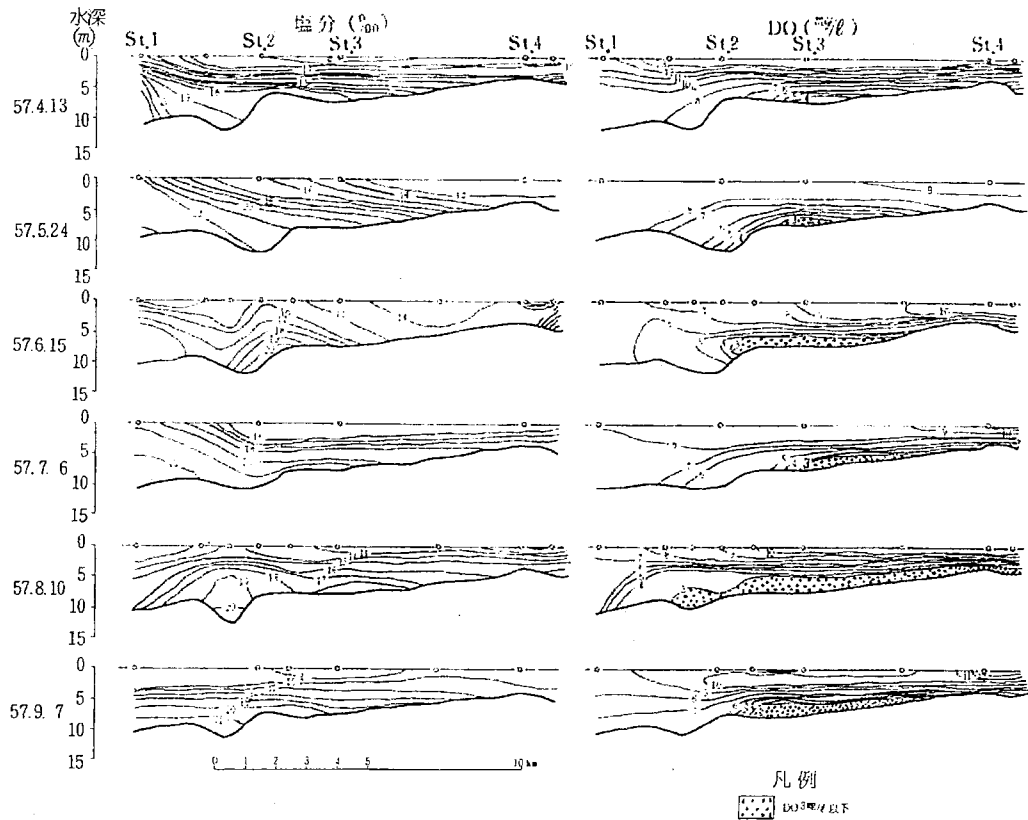


図3 月別水質断面図(その1)

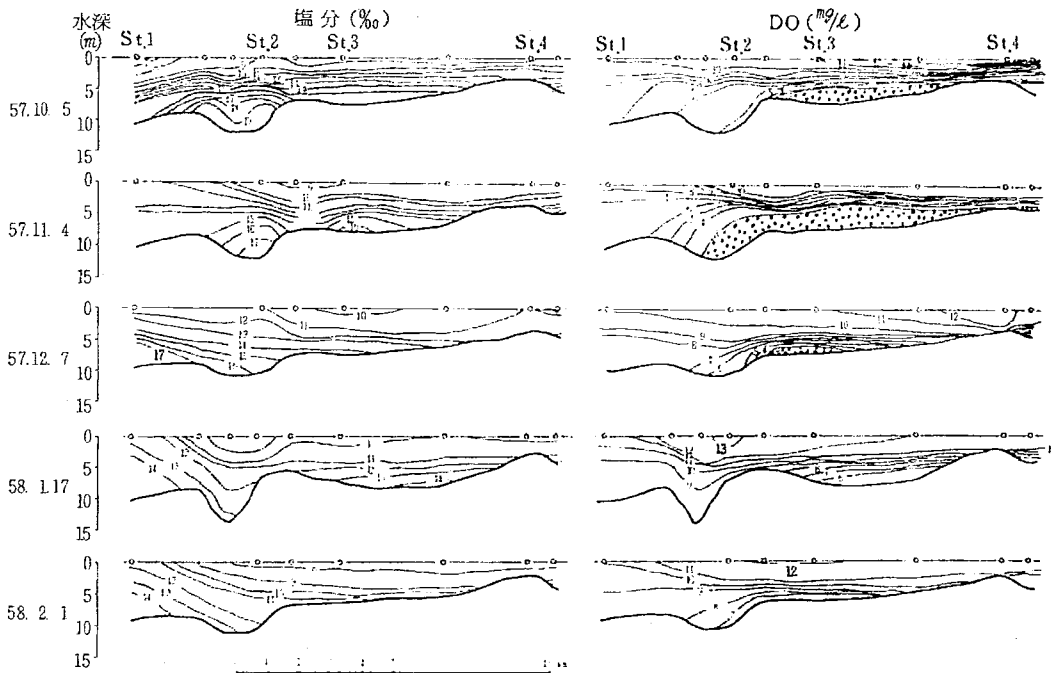


図3 月別水質断面図(その2)

(3) 水質構造

湖盆部における塩分の成層構造の詳細を知るため St.2, 3, 5 の塩分、DO の垂直分布を図4にまと

めた。塩分の垂直分布は類似の変化を示しており、大別して低塩分層、高塩分層、中間層の3層に区分される。

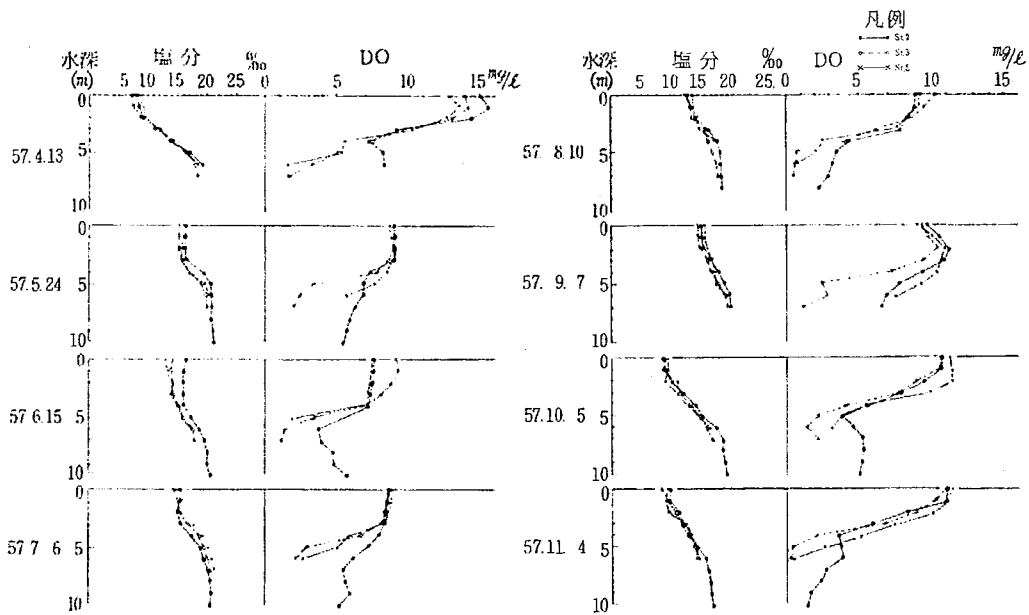


図4 月別塩分・DOの垂直分布(その1)

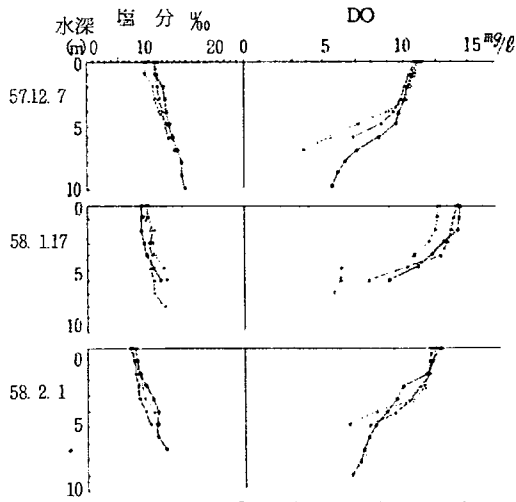


図4 月別塩分・DOの垂直分布(その2)

低塩分層は、主として大橋川(尖道湖)、飯梨川、伯太川、新加茂川、旧加茂川の影響を受けており、高塩分層は主として美保湾海水の遡上に支配されている。中間層は低塩分層と高塩分層の間にあり、塩分濃度が水深により急激に変化するいわゆる塩分躍層がある。

低塩分層は通常は厚さ1~2mであるが、6月は3~4mと増している。また、塩分は7‰から17‰まで変化しているが、地点間の差は殆ど見られない。DOは7~14mg/lと高値を示している。

高塩分層は湖盆の深部に主として分布しており、浅い場合は水深4m以深、深い場合は8m以深であり、塩分は21‰から11‰まで変動している。DOは6mg/l以下である。DOは一般に低塩分層から中間層さらに高塩分層の順に減少しているが、6、10月には高塩分層は清浄な美保湾海水の影響を受けたためかSt.2のDOは中間層のそれよりも高い。

中間層の厚さは、低塩分層と高塩分層の影響を受けて発達した場合が7m程度、衰退した場合が2m程度と変化している。低塩分層や高塩分層との境界は時に判別しがたい場合もある。

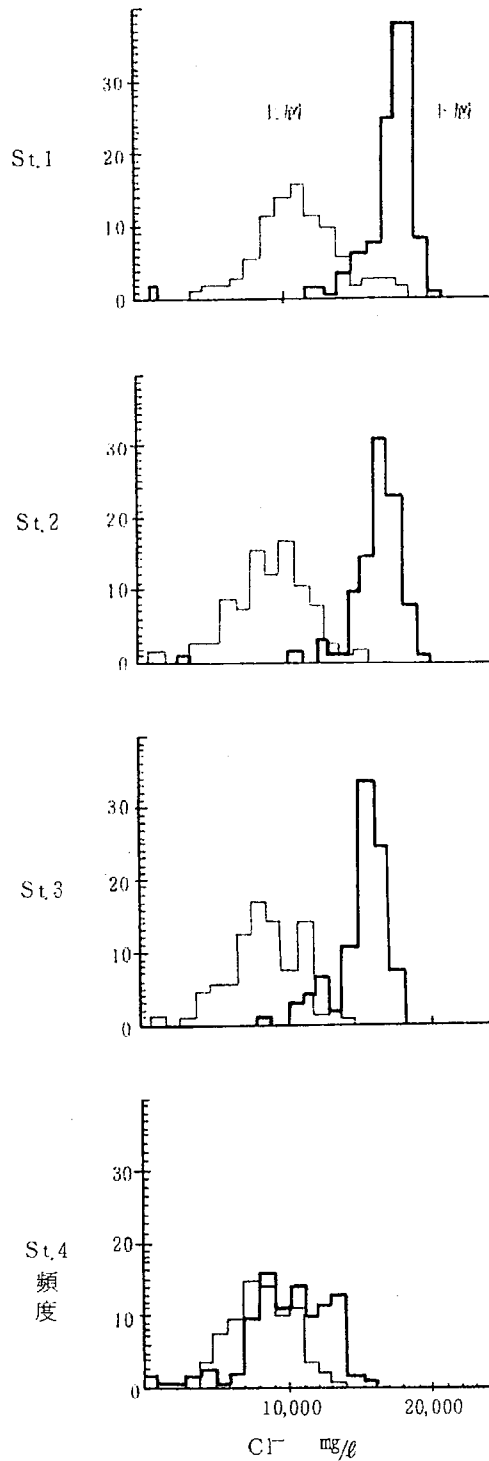


図5 Cl⁻の度数分布図

3. Cl⁻の数値解析

(1) Cl⁻の度数分布と地点間相関

昭和50年4月から昭和58年3月までのSt.1~4の上、下層におけるCl⁻の度数分布を見たのが図5である。St.1~4の上層とSt.4の下層は平均値11,400~8,550 mg/l、標準偏差3,040~2,590 mg/l、St.1~3の下層は平均値17,600~15,100 mg/l、標準偏差2,050~1,490 mg/lであり、低濃度塩素イオン層と高濃度塩素イオン層の2つのグループに分けられる。低濃度塩素イオン層は平均値は低いが標準偏差は大きい。高濃度塩素イオン層は平均値が高く標準偏差は小さい。前者は河川水、後者は海水の影響を強く受けていることが考察される。また、中海のCl⁻濃度は、河川流量の増減、美保湾海水の潮汐、しかも、中海の波浪、湖流の影響を受けてCl⁻の変動が周期性に乏しくなり、St.1~4の上、下層のCl⁻の度数分布が、図5に見られるように、おおむね正規分布の形状を呈したものと考察される。

そこで、Cl⁻の変動の周期性の有無を検証する

ためフーリエ解析を試みたが、St.1~4の上、下層のすべてに明らかな周期は見いだせなかった。参考のためにCODについても行なったが同様の結果を得ている。

また、Cl⁻とCODの昭和50年4月から昭和58年2月までの経月変化を図6、図7に示した。

Cl⁻、CODともに増減が激しく周期性に乏しい。

Cl⁻の地点間の関係を知るため地点間相関係数(n=95)を表2にまとめた。上層間の相関係数はSt.1とSt.2が0.850、St.2とSt.3が0.924、St.3とSt.4が0.892と高値を示している。それに較べて下層間の相関係数はSt.1とSt.2が0.508、St.2とSt.3が0.511、St.3とSt.4が0.447と1%で有意であるが、上層間より低値である。また、上下層間の相関係数はSt.1が0.368、St.2が0.307、St.3が0.323、St.4が0.820であり、St.4を除いて上層間、下層間の相関係数より低値を示している。これらのことより、中海のCl⁻は水平方向に挙動しており、湖水が水平方向に混合していることは明らかである。

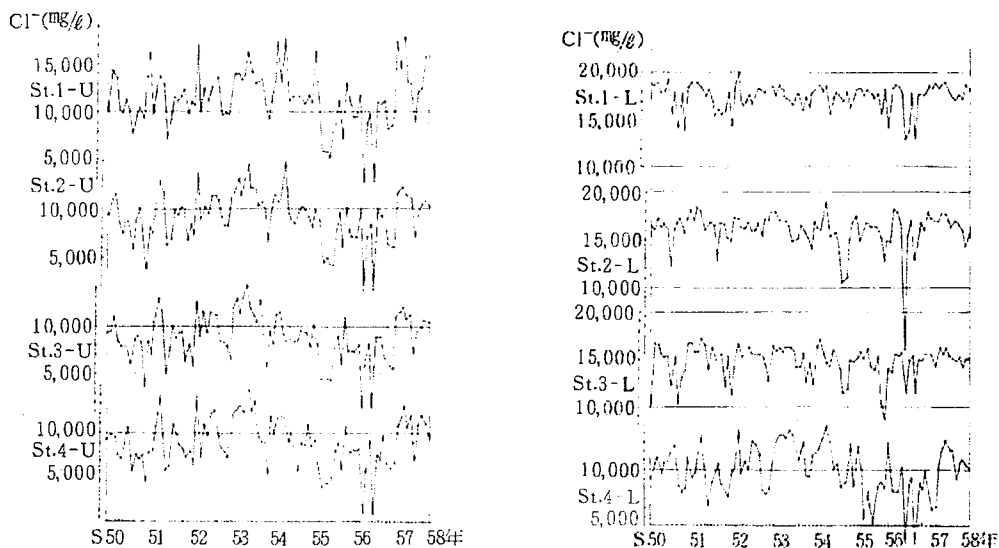


図6 Cl⁻の推移

表 3 各 項 目

上 層

項 目	水 温	DO %	COD	T-N	T-P	Cl ⁻
St. 1 (n=96)	水 温	1.000				
	DO %	-0.179	1.000			
	COD	0.033	0.286**	1.000		
	T-N	-0.087	0.099	0.505**	1.000	
	T-P	0.454**	-0.127	0.374**	0.365**	1.000
	Cl ⁻	0.089	-0.249*	-0.340**	-0.322**	-0.054
項 目	水 温	DO %	COD	T-N	T-P	Cl ⁻
St. 2 (n=96)	水 温	1.000				
	DO %	0.136	1.000			
	COD	0.104	0.444**	1.000		
	T-N	-0.125	0.138	0.430**	1.000	
	T-P	0.329**	0.113	0.503**	0.535**	1.000
	Cl ⁻	0.142	-0.205*	-0.122	-0.227*	0.121
項 目	水 温	DO %	COD	T-N	T-P	Cl ⁻
St. 3 (n=95)	水 温	1.000				
	DO %	0.135	1.000			
	COD	0.103	0.408**	1.000		
	T-N	-0.184	0.208*	0.352**	1.000	
	T-P	0.323**	0.043	0.450**	0.429**	1.000
	Cl ⁻	0.105	-0.207*	-0.095	-0.219*	0.209*
項 目	水 温	DO %	COD	T-N	T-P	Cl ⁻
St. 4 (n=96)	水 温	1.000				
	DO %	0.229*	1.000			
	COD	-0.045	0.211*	1.000		
	T-N	-0.229*	0.105	0.813**	1.000	
	T-P	0.299**	0.152	0.589**	0.567**	1.000
	Cl ⁻	0.119	-0.068	-0.220*	-0.275**	0.079

脚 **：1%で有意、*：5%で有意

相 関 係 数

下 層

項 目	水 温	DO %	COD	T-N	T-P	Cl ⁻
St. 1 (n=96)	水 温	1.000				
	DO %	-0.102	1.000			
	COD	0.075	-0.172	1.000		
	T-N	-0.250*	-0.239*	-0.035	1.000	
	T-P	0.147	-0.238*	0.334**	0.159	1.000
	Cl ⁻	0.050	0.192	-0.392**	-0.175	-0.131
St. 2 (n=96)	水 温	1.000				
	DO %	-0.479**	1.000			
	COD	0.080	-0.279**	1.000		
	T-N	0.035	-0.349**	0.244*	1.000	
	T-P	0.520**	-0.745**	0.389**	0.500**	1.000
	Cl ⁻	0.137	-0.070	-0.087	-0.189	0.026
St. 3 (n=95)	水 温	1.000				
	DO %	-0.745**	1.000			
	COD	0.368**	-0.368**	1.000		
	T-N	0.407**	-0.324**	0.442**	1.000	
	T-P	0.824**	-0.700**	0.463**	0.614**	1.000
	Cl ⁻	0.394**	-0.522**	0.027	-0.052	0.272**
St. 4 (n=96)	水 温	1.000				
	DO %	-0.273**	1.000			
	COD	0.081	0.198	1.000		
	T-N	-0.312**	0.090	0.347**	1.000	
	T-P	0.482**	-0.308**	0.224*	0.297**	1.000
	Cl ⁻	0.250*	-0.444**	-0.194	-0.317**	0.255*

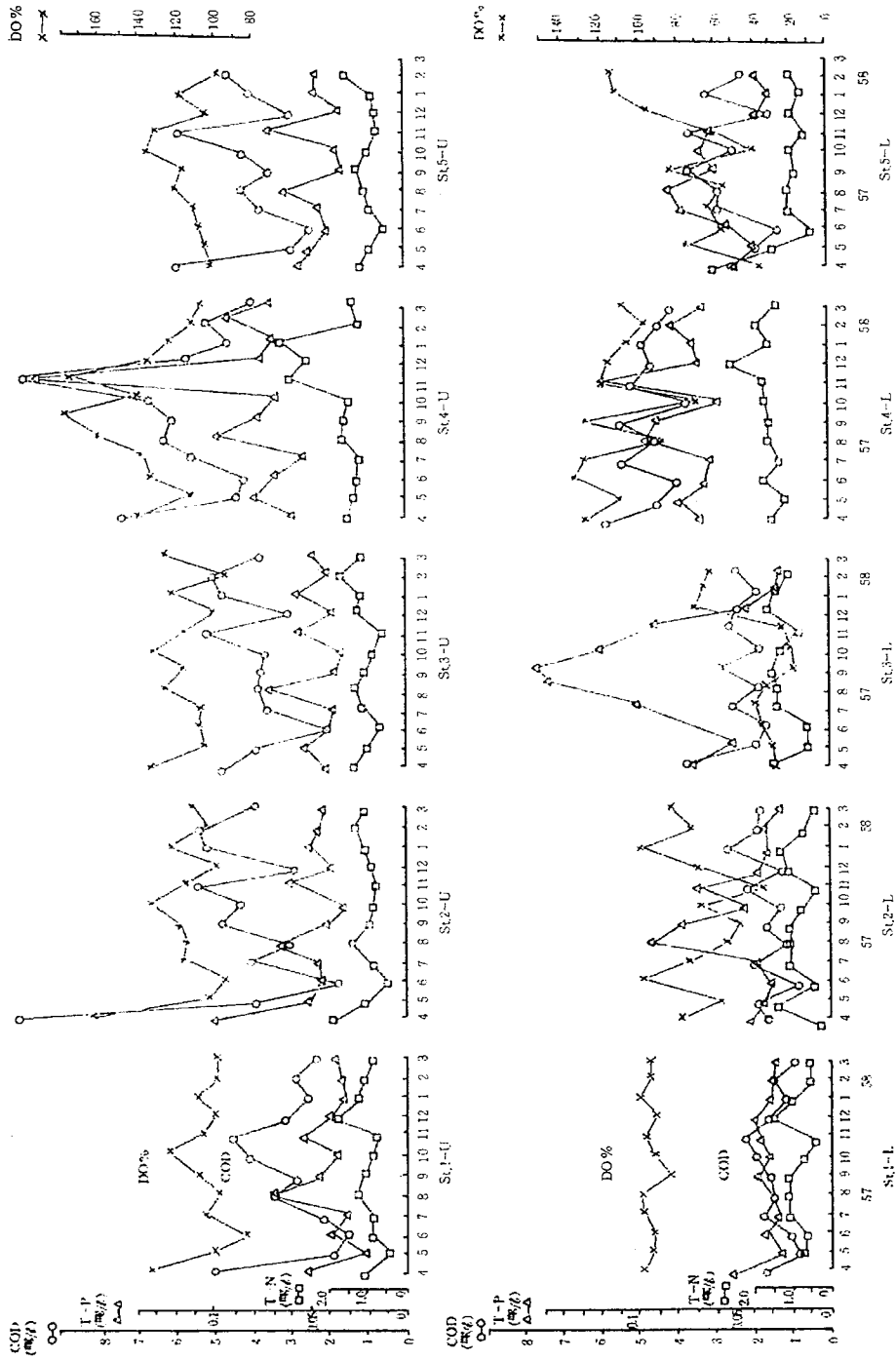


図9 水質の経月変化

(3) 主成分分析と富栄養化現象

地中海の富栄養化現象を知るため、昭和53年11月から58年3月までのSt.1~4の上層水の水温、DO%、COD、T-N、T-P、Chlorophyll-a(以下Chl-a)、Cl⁻の7項目について主成分分析を行った。

主成分分析の第1主成分と第2主成分の累積寄与率は、St.1が60.9%、St.2が60.4%、St.3が63.0%、St.4が71.2%を占めている。第1主成分と第2主成分の因子負荷量を図10に示したが、各項目の分布から第1主成分は富栄養化による変動を、第2主成分は季節変動を示唆するものと考察される。

7項目は「COD、Chl-a、T-N、T-P」「水

温」「DO%」「Cl⁻」の4つのグループに分けられる。CODとChl-a(植物プランクトン)とT-N・T-P(栄養塩)が比較的密接な関係にあり、CODとChl-aの相関係数はSt.1 0.806、St.2 0.660、St.3 0.703、St.4が0.902と高値を示すことから地中海の上層では顕著ではないが富栄養化現象が生じていることが推察される。富栄養化現象の指標としてのChl-aとCl⁻との関係は、やや対称的な位置にあり、相関係数はSt.1 -0.173、St.2 -0.120、St.3 -0.088、St.4が-0.210の逆相関の関係にあることから、Cl⁻が富栄養化現象の負因子として挙動している可能性が考察され、美保湾海水による中海水質の浄化が想定される。

【 上 層 】

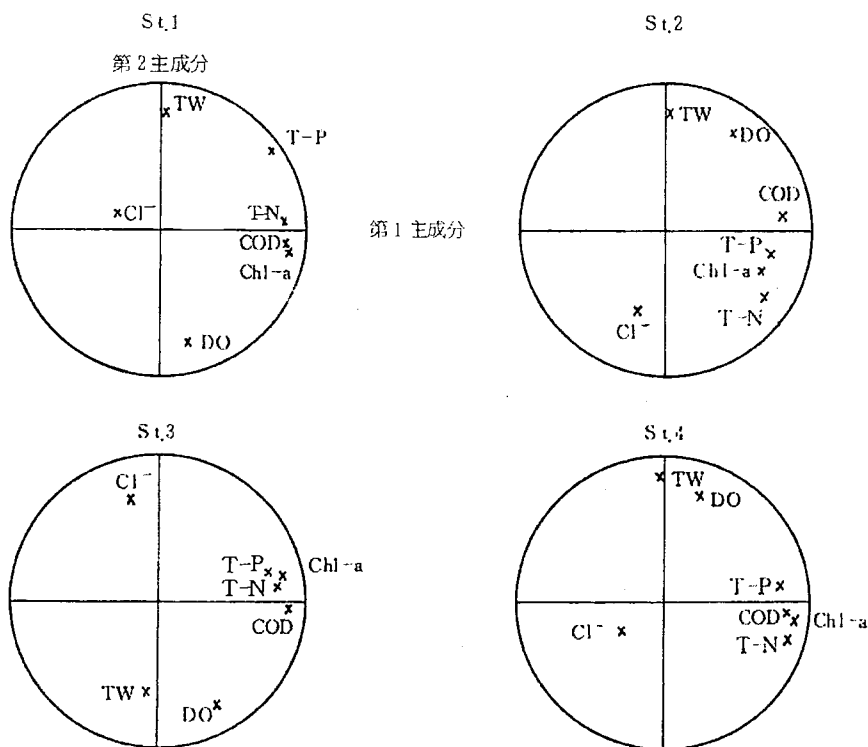


図10 第1主成分と第2主成分の因子負荷量

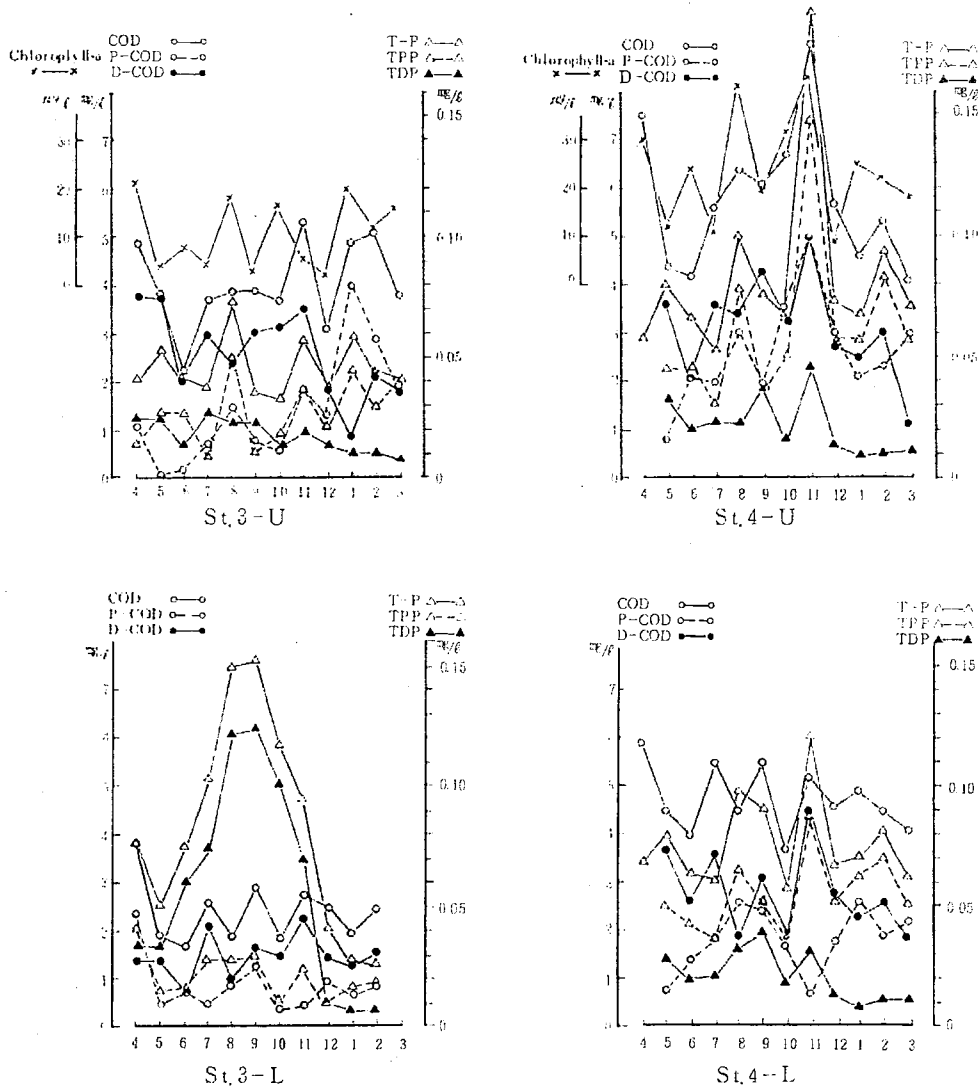


図11 COD、P-COD、D-COD、T-P、TPP、TDPの経月変化

(4) リンの挙動と富栄養化現象

CODとリンの関係を知るために、昭和57年4月から58年3月までのSt.3、4の上、下層のCOD、P-COD、D-COD、T-P、TPPおよびTDPと上層のChl-aの経月変化を図11にまとめた。

St.4上層のCOD、T-Pはいずれも11月にピークを示し、COD 10 mg/l、P-COD 5.0 mg/l、D-COD 5.0 mg/l、T-P 0.194 mg/l、TPP 0.149 mg/l

およびTDPが 0.045 mg/lを示している。TPPがT-Pの77%を占めており、Chl-aが42.7 μg/l、P-CODが5.0 mg/lと、ともに高値であることから、上層のリンは富栄養化現象に関係しているものと考察される。

St.3の下層はT-Pが8月0.150 mg/l、9月に0.154 mg/lと高値を示している。うちTDPが8月に0.121 mg/lの81%、9月に0.123 mg/lの80%と、上層とは

逆にT-Pの殆どがTDPで占められており、底質から溶出したものと考察される。一方CODは8月に1.9 ㎎/ℓ、9月に3.0 ㎎/ℓと低値を示していることから、St.3の下層のリンは富栄養化現象に関与していないものと考察される。湖水の垂直混合は、塩分の挙動で見られたように殆どないこと、また、St.3の上、下層のCOD、T-P等の経月変化からも垂直混合が起っていないと考えられることから、高塩分層中のリンは富栄養化現象に関与する可能性は殆どないものと考察される。

ま と め

中海の水質構造と富栄養化現象について以下に述べる知見が得られた。

1. Cl⁻は上、下層ともにSt.1からSt.4に行くに従って低下し、上層が下層より低値である。

CODはCl⁻とは逆にSt.1からSt.4の順に高値を示し、どの地点も上層が下層より2 ㎎/ℓ程度高値である。

2. 中海の湖盆部の湖水は、塩分の成層構造が発達しており低塩分層、中間層、高塩分層からなる。低塩分層は地点間の濃度差が殆どなく、一方、塩分濃度は低いながら変動が大きい。その厚さは通常1~2 mで厚い場合は4 m程度のことがある。高塩分層は変動が小さく水深4~8 m以深に分布しており、特に底層部は6月から11月にかけてはDOが3 ㎎/ℓ以下になっている。中間層は塩分濃度が水深により急激に変化する塩分躍層で、その厚さは2 mから7 mまで変化し、上層や下層との境界が判別しがたい場合が見られる。

St.2,3,4の上層が低塩分層、St.1の上層とSt.4の下層は中間層の性状に近い低塩分層、St.1,2,3の下層は高塩分層に該当するものと考えられる。

3. 中海の湖水の混合は水平方向が殆どで垂直混合は殆どないものと考えられる。Cl⁻についてフーリエ解析を試みたが明瞭な周期性は見いだせず、CODについても同様であった。

4. St.1~4の上、下層のCl⁻とCODの相関係数はSt.3の下層の0.027を除いてすべてマイナスで、特にSt.1の上層は-0.340、下層は-0.392と1%で有意であり、美保湾海水による中海水質の浄化が想定される。また、CODが周期性に乏しいのも海水の影響を強く受けているためと考えられる。

5. 主成分分析によりSt.1~4の上層は、「COD、Chl-a、T-N、T-P」「水温」「DO%」「Cl⁻」の4つのグループに分けられ、富栄養化現象の指標であるChl-aとCl⁻が逆相関の関係にあることから、Cl⁻が富栄養化現象の負因子として挙動している可能性が考えられる。

6. St.4の上層は、昭和57年11月にCODが10 ㎎/ℓ、全リン(T-P)が0.194 ㎎/ℓと高値を示し、懸濁物質状のリン(TPP)が77%を占め、懸濁物質状のCOD(P-COD)も5 ㎎/ℓと高いこと、またクロロフィルaも42.7 μg/ℓと高値を示すことから、上層のリンは富栄養化現象に関与しているものと考察される。

St.3の下層は全リンが昭和57年8月に0.150 ㎎/ℓ、9月に0.174 ㎎/ℓと高値を示し、上層とは逆に溶解性リン(TDP)が、それぞれ、81.80%を占めており底質から溶出したものと考えられる。一方、CODは8月に1.9 ㎎/ℓ、9月に3.0 ㎎/ℓと低値を示していることから、リンは富栄養化現象に関与していないものと考察される。また、塩分の挙動から湖水の垂直混合は殆どないことを合わせ考えれば、高塩分層中のリンは富栄養化現象に関与する可能性は殆どないものと考えられる。