11. 三方五湖の富栄養化に関する研究（第１報）

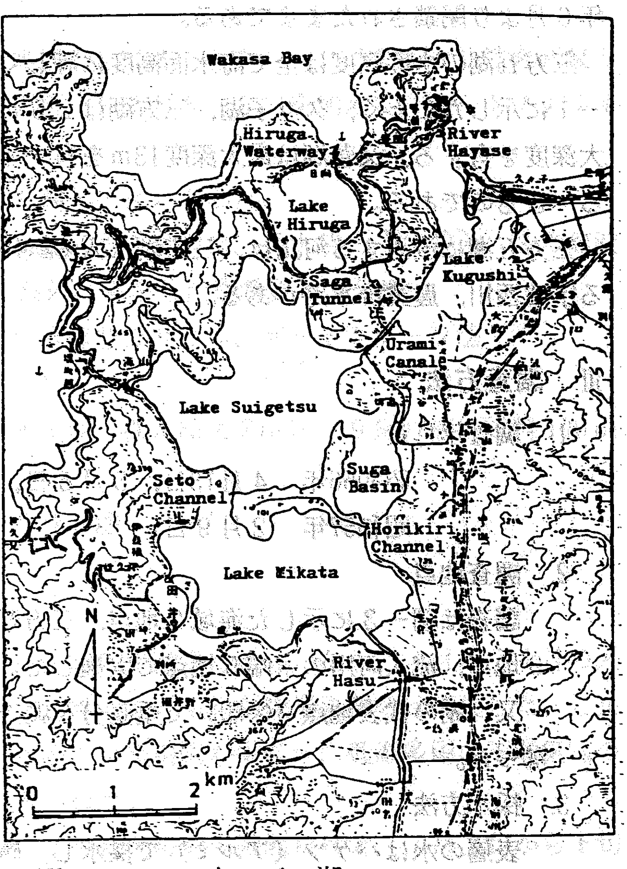
― 三方五湖の水質 ―

田川　専照・沢田稔之佑・白崎　健一・前川　勉・宇部宮高栄
植山　洋一・山口　慎一・青木　啓子・伊藤希一郎

Ⅰ　緒　言

三方五湖は日向湖，久々子湖，水月湖，菅湖，三方湖の５つの湖から構成される湖沼群であり，互いに水道，河川を通じて連結し密接な関係がある。しかし，湖盆の大きさ，深さ，又水質的にも，かん水，汽水，淡水とそれぞれ異なっており，湖沼学的にも性格を異にした湖沼である。三方五湖でも富栄養化の現象を呈し『クレ[1]』と呼ばれる硫化物の浮上による魚類の斃死や，アオコと呼ばれる藻類の異常繁殖の現象がみられ，その富栄養化の解明が要望されている。

1926年に菊地[2]によって三方五湖の１つである水月湖に，湖沼学的な研究のメスが加えられてから，特質的な性格を持つ湖沼として陸水学者から注目され，現在も調査，[3~15]研究が続けられている。福井県でも昭和48年より環境基準のあてはめ，常時監視等調査を実施し，又55年には水理構造把握を目的とした湖沼水質管理指針策定調査（環境庁委託[16]）を行ってきたが，56年度より当センターは，福井県北部の北潟湖の富栄養化調査[17~18]に次いで，これまでの諸先輩のすぐれた業績を踏まえて，三方五湖の富栄養化機構解明の調査に取り組んでいる。本報告は，三方五湖水質環境調査結果の一部である。



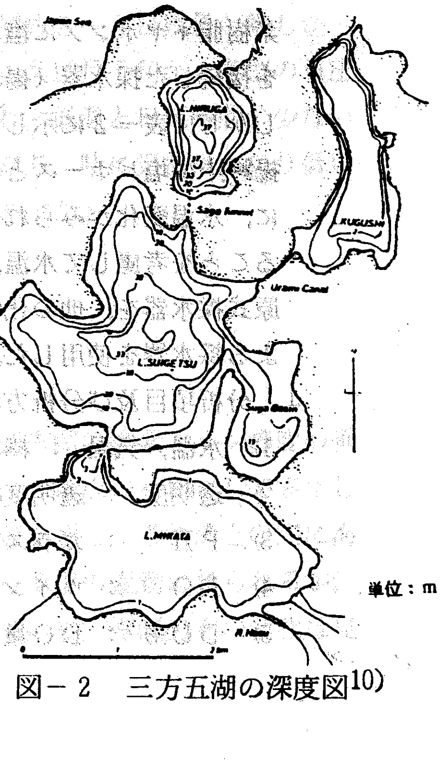
図－1　三　方　五　湖

Ⅱ　三方五湖水質の概要

三方五湖は図－１に示すように若狭湾に面して日向，久々子，水月，菅，三方の五湖より湖沼群を形成し，全湖面積は約11㎢である。（表－１）その起源は約100万年前，新第三紀鮮新世の地殻変動により沈降した断

表－１　各 湖 の 性 状[8]

湖＼項目	湖の状況 周囲（㎞）	面積（㎢）	最大深度(m)	平均深度(m)	流域面積（㎢）	容積量（万㎥）
日　向	4.2	0.9	40.0	14.3	2.2	4,085
久々子	7.7	1.4	2.5	0.8	15.8	117
水　月	10.3	4.1	34.0	14.3	4.3	7,165
菅	1.5	0.9	13.0		1.3	
三　方	10.2	3.6	5.8	1.3	60.3	484



図－２　三方五湖の深度図[10]

層盆地に湛水された湖であり，日向，水月，菅，三方の各湖は始めは淡水湖であったと言われている。その後，洪水の氾濫を防止する為に，日向水道が1630年に，浦見川が1655年に，又嵯峨随道が1801年に開削された為に，海水の流入がおこり塩水化が進み，更に，嵯峨随道が1933～1936年に浚渫，拡張工事で多量の海水が水月湖に流入し，現在の様な塩分密度による成層が定着してきたと言われている。一方，久々子湖は砂州によりふさがれて生じた湖と言われている。

三方五湖における湖水相互及び海洋への連絡は図－1に示すように，日向水道，早瀬川，浦見川，嵯峨随道，瀬戸，堀切川でおこなわれており，水理的に五湖は密接な関係にある。しかし，嵯峨随道は昭和53年6月より閉鎖されたままである。

三方五湖の水面高度は全て海水面高度に等しく，湖盆は海面下であり潜窪を形成しており，図－2，表－1に示したごとく，久々子湖，三方湖は2.5 m，5.8 mと浅く，一方日向湖は38m，水月湖は34mの最大深度を有する。又菅湖は最大深度13mを有する湖であるが，地形的に水月湖の一部である副湖盆と考えるべきものである。

三方五湖に流入する河川は，三方湖に入る鰣川が主であるが，他に別所川，観音川，久々子湖に流入する宇波西川，農業排水路がある。

Ⅲ　調査方法

1. 調査年月日

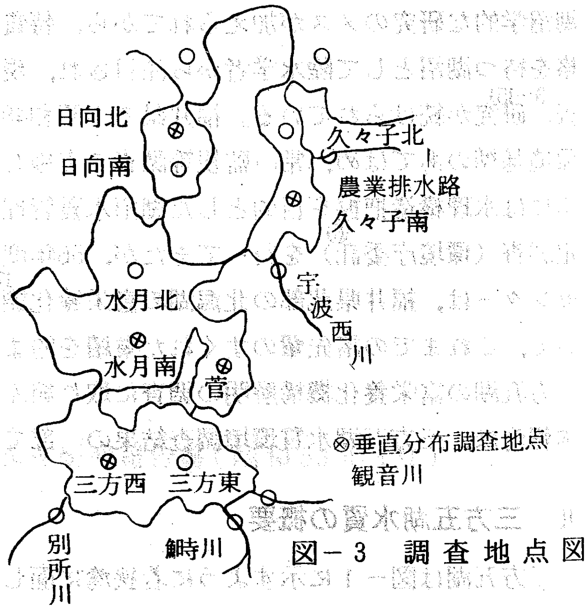
昭和56年　4月13日，5月6日，6月16日，8月5日，9月16日，11月10日

昭和57年　2月9日

2. 調査地点

調査は図－3に示した海域2地点，三方五湖内9地点，流入河川の末端5地点で実施した。

又，湖の代表地点（⊗印）で垂直分布調査も行なった。



図－3　調査地点図

3. 採水方法

表層の水はバケツ（アルミ）で採水し，層採水は，北原式採水器（B型）と当所が製作したフッ素樹脂ギヤポンプに塩化ビニールホース（40m）を接続した採水器（揚水量1 ℓ／min）を使用した。しかし，表－2に示した様にポンプによる採水は，揚程中に塩ビホースと外の水との熱交換がある為に，水温変化がみられること，又，やや陰圧になることを考慮して水温，DO，H_2Sの測定には北原式採水器を，他の化学成分の測定にはポンプによる採水器を使用した。

表－2　採水器による相違点

	気温℃	水温 ℃		DO	
		ポンプ式	北原式	ポンプ式	北原式
日向湖5 m		11.7	10.9	8.57	8.99
15m	15.2	10.5	9.4	7.22	7.22
25m		9.6	8.5	6.42	6.38
水月湖5 m		12.3	12.3	11.26	11.59
15m	12.0	13.4	14.0	0	0
25m		13.5	14.0	0	0

4. 分析項目及び分析方法

1) 水温，気温 ： 棒状水銀温度計
2) 透明度 ： 透明度板（セッキー板）法
3) ＰＨ ： ガラス電極法
4) ＤＯ ： ウインクラーアジ化ナトリウム変法（ＪＩＳ K0102，32）
5) ＤＯ％ ： ＤＯ量を水温，塩素量で補正して算出

6) COD ：酸性過マンガン酸カリウム法 （JIS K0102 17）

7) SS ：グラスファイバーフィルター法（JIS K0102 14－1）

8) 大腸菌群数 ：最確数による定量

9) 塩素イオン ：モールの銀滴定法（海洋観測指針）

10) NH_4－N ：オートアナライザー（テクニコンAAⅡ）による測定，[19] H2Sの存在する試料は，100倍に希釈して分析（NH_4－N，濃度が高い為）

11) NO_2－N，NO_3－N ：オートアナライザーによる測定，H_2Sのある試料は$CdCl_2$(15%）で硫化物を沈澱させ，3液を分析

12) T－N ：オートアナライザーによる測定，前処理としてオートクレーブでアルカリ性過硫酸カリウムで分解し，ろ過後中和し，ホウ酸緩衝液（4％ PH 8.5）5 mlを加えて，オートアナライザーでNO_3－Nとして分析

13) 有機態－N ：T－N－（NH_4－N＋NO_2－N＋NO_3－N）とした。

14) PO_4－P ：オートアナライザーによる測定，[20] H_2Sある試料は，採水時にNa_2SO_3 2％溶液になるように調整し，測定時にPH4にし，H_2Sを系外に除去した後希釈して分析

15) T－P ：オートアナライザーによる測定，酸性過硫酸カリウム，オートクレーブ法

16) クロロフィル ：吸光光度法（SCOR／UNESCO法）

17) H_2S ：メチレンブルー吸光光度法及びヨウ素滴定法，採水時に$ZnCl_2$（9％）液を試料100 mlに1 ml加え，H_2Sを固定した。

18) SO_4 ：$BaCl_2$ による重量法及びクロム酸バリウム法

Ⅳ 調査期間の気象概況[21]

昭和56年は敦賀で積雪196 cmを記録するなど，昭和38年をしのぐ豪雪で始まったが，3月から4月の天候は一時的な低温があったがほぼ順調に経過し，深かった積雪も3月中旬に嶺南東部では消失した。しかし5月は寒気が南下し変動の大きい天候となり，寒い日が多く日照時間が少なく，低温多雨の不順気味の天候により，水稲をはじめとする農作物等に生育停滞がみられた。

梅雨前線の活動が強かったつゆの最盛期は6月下旬から7月初旬の約半月間だけで，7月上旬から下旬にかけて晴天の日が続き暑さが厳しかった。この暑さも7月下旬半ば前から太平洋高気圧は早くも衰えはじめ，8月は低温の日が多く盛夏は短かく，早い秋の訪づれとなった。9月初め2～3日残暑が厳しかったが，9月中旬末まで気温の低い涼しい日が続き秋の移りかわりは早かった。又10月下旬から冬型の気圧配置をみせはじめ，11月，12月としぐれ模様の寒い日が続き，早い冬が訪ずれ，低温と日照時間の少ない現象がみられた。以上の様に56年の気候は平年からの偏りの大きい天候が目立ち，時に気温はかなり低い年であった。昭和57年の1～3月は気温，降水量，日照時間とも平年並みであった。

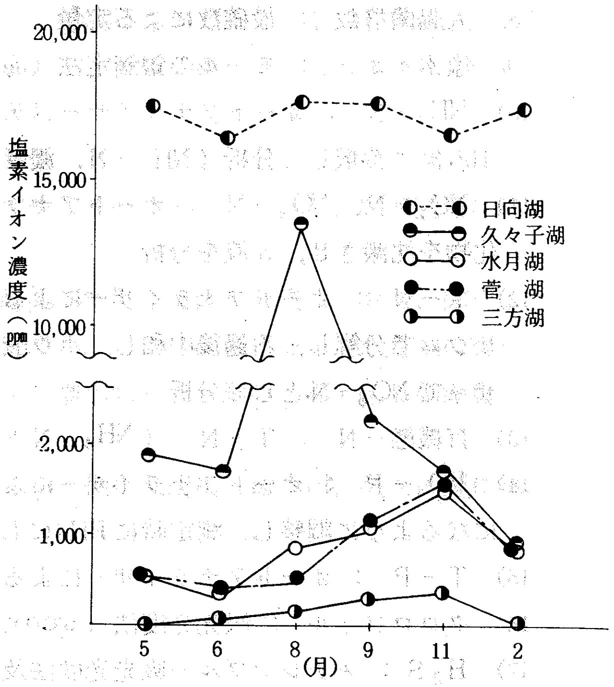
Ⅴ 調査結果及び考察

1. 各測定項目からみた三方五湖の水質

1) 塩素イオン濃度

三方五湖の表層の塩素イオン濃度の季節変化を図－4，久々子湖，三方湖の塩素イオン濃度の垂直分布を図－5，図－6に示した。表層の塩素イオン濃度については，2地点の平均として表示している。日向湖については，嵯峨墜道が閉鎖されているため，日向水道を通じて若狭湾との間に海水の流入，流出があるだけである。このため，表層の塩素イオン濃度は多少の変動は見られるが，16000～18000ppmとほぼ一定している。下層は18000ppm前後で一定しており，垂直分布の変化は見

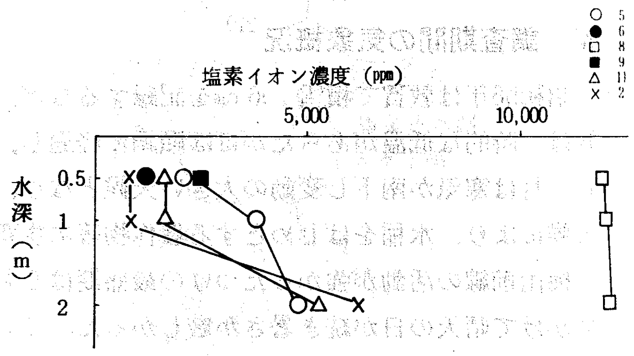
られない。水月湖と菅湖についてはほぼ同じ挙動を示し，表層の塩素イオン濃度は350～1500ppmであり，11月に最も高くなっている。また，ここでは塩素イオン濃度の垂直分布は示していないが，5～10mの間に塩分躍層が見られる。下層の塩素イオン濃度は水月湖で8000ppm前後，菅湖で約7000ppmである。三方湖については，五湖のうち最奥部に位置するため，表層の塩素イオン濃度30～350ppmと最も低い。季節変化では11月に最も高くなっているが，垂直分布の変化は見られない。久々子湖については，早瀬川を通じて若狭湾と直接，海水の流入があるため，海水の影響を受けやすく，表層の塩素イオン濃度1000～14000ppmと変動が大きい。季節変化では，他の湖と異なって8月に最も高くなっている。垂直分布では8月には全層12000ppmで一定しているが，他の時期では表層に比べ下層は2～7倍大きい。このように，日向湖を除き各湖の塩素イオン濃度は夏から秋にかけて高くなるが，これは日本海の潮位が夏に最も高くなるのと対応していると思われる。また，久々子が8月にピークにしているのに対し，水月，菅，三方湖では11月にピークとなり，ピークの位置が遅れている。これは，久々子湖と水月湖は浦見川を通じて，水月湖と三方湖は瀬戸を通じて各湖の湖水が移動しているが，この交換量が湖水容量に比較して小さいため，ピークの位置が遅れるのであると考えられる。（表－3）



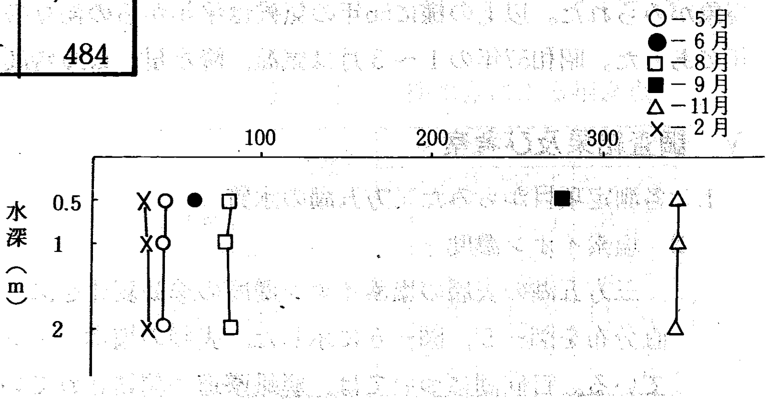
図－4　各湖の塩素イオン濃度（表層）の季節変化

表－3　湖水量と流入量[16)]

	流入量(万m³/月)			容積量
	8月	11月		(万m³)
浦見川	571	165	水　月	7,165
瀬　戸	201	216	菅	
			三　方	484



図－5　久々子湖の塩素イオン濃度の垂直分布

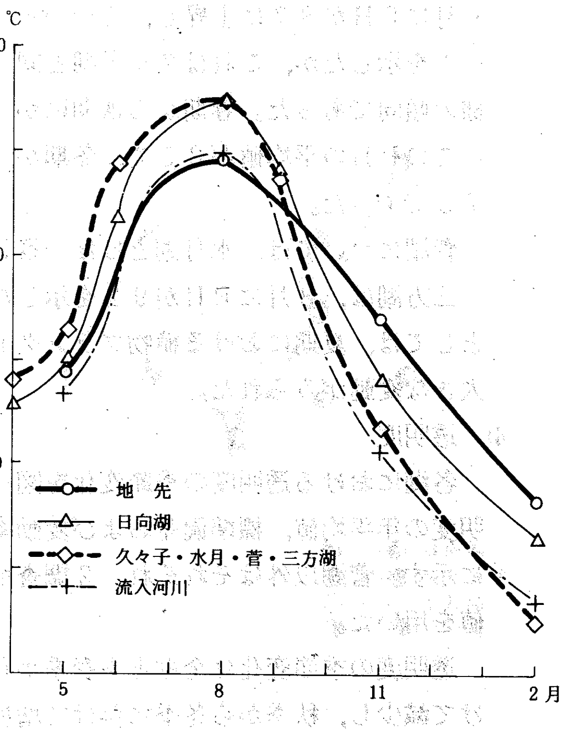


図－6　三方湖の塩素イオン濃度の垂直分布

2) 水　温

水温は水の流れや成層に関する重要な因子であり，また，変温動物である魚貝類の生息環境の決定因子である。

表層の測定結果は図－7に示した。日向および早瀬地先は夏24.8℃，冬8.4℃で年較差が16.4℃であった。三方五湖について見ると，夏期はいずれの湖も27.5℃前後で，地先に比べて3℃高かった。太陽の輻射熱が表層に集積したものと思われる。冬期は日向湖が6.6℃前後，久々子湖，菅湖，三方湖は2.5℃前後で地先に比べて，それぞれ2℃または6℃低かった。日向湖は陸性の放射冷却に対して，潮汐現象により地先海域から熱が供給されるが，他の四湖は放射冷却に加えて，河川の冷却水の流入が大きく寄与していると思われる。



図－7　三方五湖の表層温度の季節変化

垂直分布について見ると，水深の小さい三方湖と久々子湖においてはあまり温度差がないが，ただ海水の浸入のためか，久々子湖の底層でごくわずか高かった。水月湖は5～10mのところに水温躍層がみられ，下層では季節変動もあまりなく，12～14℃に収れんしている。これは上層が淡水，下層が塩水の状態に対応し，上層と下層との季節変化による循環は生じていないことを示している。菅湖も同様である。一方，日向湖は夏期には水温躍層が見られたが，上層，下層の密度差がないためか，5～25mと層が厚く，湖底近くで9℃に収れんしている。

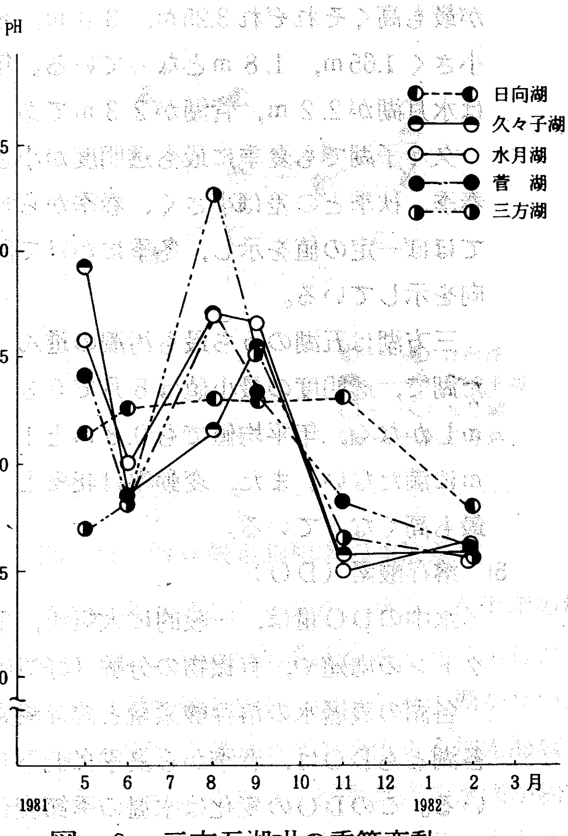
3) PH

各湖におけるPHの季節変化を図－8に，PHの年平均値，標準偏差を表－4に示した。三方五湖表層のPHの年平均は，8.1～8.2の弱アルカリ性を示しており，春期および夏期から秋期にかけて上昇する傾向がみられた。

日向湖は，嵯峨墜道が閉鎖しているために水月湖との連絡がなく，日向水道を通じて日本海の海水が流入し，一つの湾のようになっている。このため，PHは8.2付近で安定している。冬期にPHが7.8と低いが，この時の日向地先海域も7.9であった。

久々子湖は，海水の流入量及び植物プランクトン，藻類の発生量と関連して，5月にPHが8.9の最高値を示した。また，9月にもPHが8.5を示して，2つのピークを示した。冬期には，PH7.5に下がるが，春期から秋期にかけてのPHの平均値は8.4であった。

次に，水月湖については，5月にPHが8.6，



図－8　三方五湖pHの季節変動

9月にＰＨが8.7に上昇し，２つのピークを示したが，これは久々子湖と同様の傾向であった。春期から秋期にかけてのＰＨの平均値が8.5で，冬期が7.5であった。

表－４　ＰＨの年平均値，標準偏差

項目＼地点	日向湖	久々子湖	水月湖	菅　湖	三方湖
年平均（ppm）	8.2	8.1	8.2	8.1	8.1
標準偏差（ppm）	0.17	0.45	0.45	0.39	0.64

菅湖については，水月湖とほぼ一致した結果であった。

三方湖は，８月にＰＨが9.2を示したが，これは，今回の調査では五湖中最高値であった。原因としては，夏期における植物プランクトンの増殖が考えられる。季節変動についても五湖中，最も大きな変動がみられた。

4)　透明度

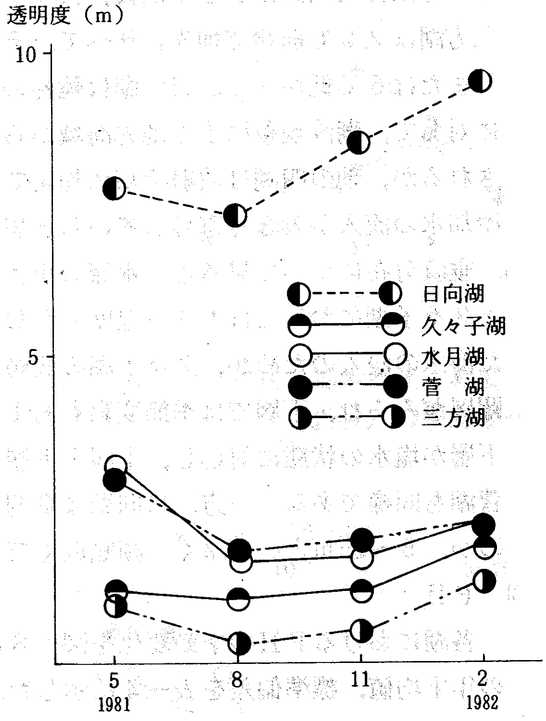
各湖における透明度の季節変化を図－９に，透明度の年平均値，標準偏差および変動率を表－５に示す。菅湖以外はそれぞれ，２調査地点の平均値を用いた。

透明度の季節変化は全湖とも春季から夏季にかけて減少し，秋季から冬季にかけて増加する傾向を示している。これは夏期における内部生産の影響を強く受けるためと思われる。

日向湖は他の湖に較べて著しく透明度が高く，最大値は9.5ｍに達し，変動率も10％と小さく五湖のうち最も汚濁の少い湖となっている。

水月湖と菅湖はほぼ同じ季節変化を示し，５月が最も高くそれぞれ3.25ｍ，3.0ｍ，８月に最も小さく1.65ｍ，1.8ｍとなっている。年平均値では水月湖が2.2ｍ，菅湖が2.3ｍであった。

久々子湖でも夏季に最も透明度が小さくなるが，春季，秋季との差は小さく，春季から秋季にかけてほぼ一定の値を示し，冬季にかけて回復する傾向を示している。



図－９　透明度の季節変化

三方湖は五湖のうち最も汚濁の進んだ湖で，透明度の最小値は８月で0.3ｍしかなく，年平均値でも0.8ｍと１ｍに満たない。また，変動率は48％と最も高くなっている。

表－５　透明度の年平均値，標準偏差および変動率

項目＼地点	日向湖	久々子湖	水月湖	菅　湖	三方湖
年平均（ppm）	8.3	1.3	2.2	2.3	0.8
標準偏差（ppm）	0.83	0.32	0.64	0.46	0.38
変　動　率	10	24	29	20	48

5)　溶存酸素（ＤＯ）

水中のＤＯ量は，一般的に大気圧，水温，塩素量によって異なるが，湖沼では更に，植物プランクトンの増殖や，有機物の分解（好気的又嫌気的）等，複雑な機構がからんでＤＯ量を律している。

各湖の表層水の溶存酸素量と溶存酸素飽和率（ＤＯ％）の季節変化を図－10，図－11に示したが，各湖ともＤＯは，春季から夏季に低下し，極小値を持ち再び秋～冬季に高くなるパターンを示している。このＤＯの変化は水温の季節変化と逆のパターンを示しており，一見富栄養化した湖沼の特長である春～夏季時のＤＯの増加という現象は認められない。又日向湖は他の湖に較べてＤＯ量が

小さいのは，海水湖の為，ＤＯ溶解量が塩素量により制限されていることを示している。

富栄養化した湖沼で観察される植物プランクトンの増殖の指標としてのＤＯ増加現象は，図−11に示したＤＯ飽和率の変化が，その傾向をうかがうことができる。

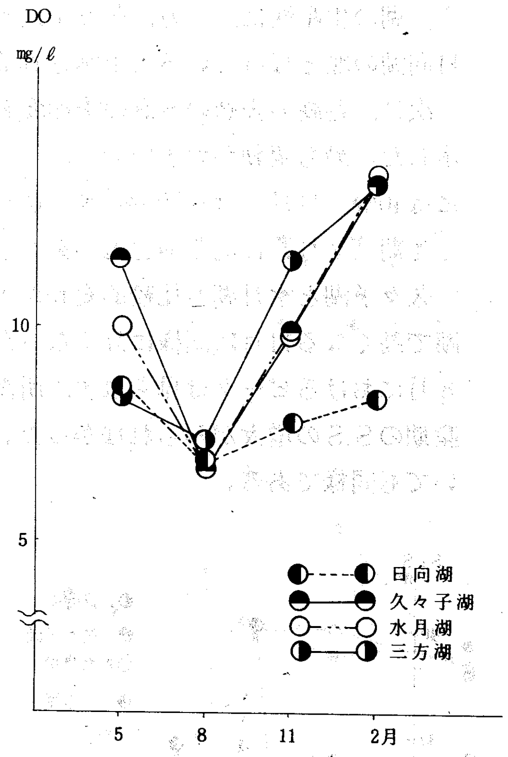
久々子湖では春季にＤＯ％が124％と過飽和の状況を示し，夏〜秋季に低下し冬季上昇しているこのパターンはクロロフィル量の動向と一致し，植物プランクトンの増殖によるＤＯ量の増加を暗示している。

水月，菅湖では夏季クロロフィル，ＣＯＤの増加がみられ，植物プランクトンの増殖があるにもかかわらず，ＤＯは最小値（90％）を示していた。これは，採水時に強風が吹いていた為，下の低溶存酸素層との撹拌がみられ，ＤＯ量が低かったのではないかと推測される。

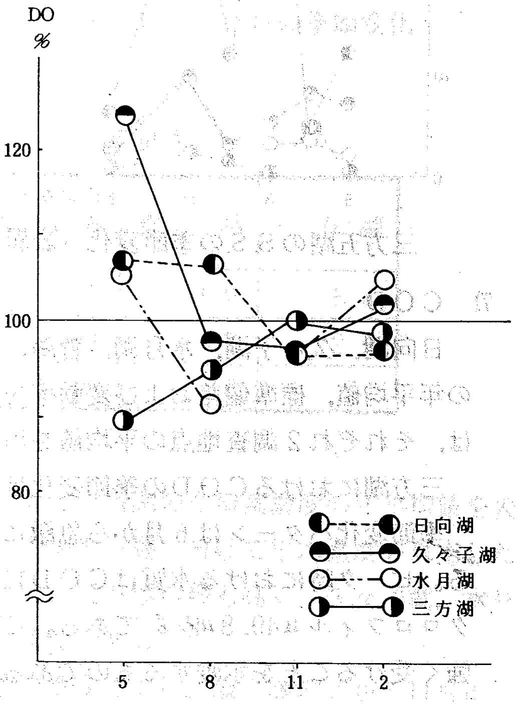
三方湖は，栄養塩濃度も高く夏〜秋季にかけて植物プランクトンの増殖がみられ，ＣＯＤ，ＳＳ，クロロフィルがその状況を示しているが，ＤＯの増加は小さい。このことは，浅い湖の為，植物プランクトンの増殖と同時に水中及び底質で，その有機物の分解も盛んにおこなわれているためと推測される。

一方，日向湖は春〜夏季植物プランクトンの影響でＤＯは100％をやや超えているが，秋〜冬季湖水の循還期となる為，下層の影響によりＤＯ％が低下している。

以上，三方五湖は日向湖を除き富栄養化の様相を呈しているが，ＤＯからはその傾向を把握することは困難である。このことは，ＤＯには植物プランクトン増殖との関係以外に，底泥との関係等三方五湖では複雑な機構がかかわっていることを暗示している。



図−10　溶存酸素量の季節変化



図−11　溶存酸素飽和率の季節変化

6)　Ｓ．Ｓ

一般に湖の懸濁物質ＳＳは，湖水中のプランクトンに由来するものであり，湖の一次生産の状況を反映する指標の一つと考えられる。五湖および地先海域のＳＳの平均濃度を表−６に示した。

ＳＳの濃度は，湖によって大きく異なり，最も奥部の三方湖が最も高く，次に久々子湖が高い。水月と菅湖はほぼ同じであり，日向湖が最も低い。日向湖と久々子湖の湖水が流出する地先海域では，日向地先，早瀬地先のいずれも日向湖の値より高値を示した。これは，採水地点の水深が約10ｍ程度で，波浪等のため水域の安定性が，日向湖内よりも悪いためと考えられる。ＳＳの大きさか

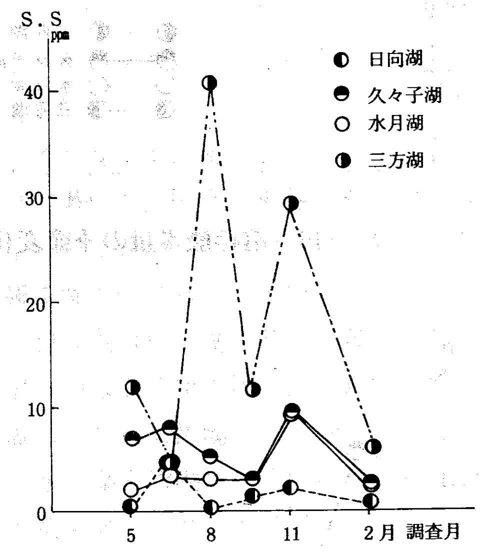
ら，湖の生産性は，三方，久々子，水月（菅），日向湖の順となっていると予測される。

次に，各湖の表層のS.Sの季節変動を図－12に示した。最も変動が大きいのは，三方湖で，８月には40ppm，11月には約30ppmと高い値を示し，６月と冬期（２月）に約５ppmと低い値を示した。

久々子湖と水月湖も比較的変動が大きく，三方湖で高くなる11月に同様に高くなった。しかし，８月におけるピークは見られず，所謂，夏期の生産期のS.Sの増大がみられなかった。日向湖においても同様である。

表－６　三方五湖のS.S濃度（mg/ℓ）

	S．S
日向湖	0.7
久々子湖	5.8
水月湖	3.2
菅　湖	2.9
三方湖	21.6
地先海域	1.5（日向地先　1.2 早瀬地先　1.8



三方五湖のS.S.の季節変化（表層）

一方，三方湖の８月の非常に高い値を示した時には，水の華等の異常繁殖をした状況もなく，また，後述のように，クロロフィルａ量が比較的低いことから，この時のS.Sがそのまま全部，一次生産に寄与している活性なプランクトンとは認められない。

日向湖や水月湖の下層におけるS.Sは，表層とほぼ同じ値であるが，水月湖において塩分躍層の付近で，溶存酸素のほとんどない層で，数ppm以上の高い値を示すことがある。これが，松山[11]らの報告した化学合成細菌の存在と類似しているが，水の色や，窒素化合物等の分析結果からは裏付けられなかった。

7)　ＣＯＤ

日向湖，久々子湖，水月湖，菅湖，三方湖の表層におけるＣＯＤの季節変化を図－13に，ＣＯＤの年平均値，標準偏差および変動率を表－７に示す。日向湖，久々子湖，水月湖，三方湖については，それぞれ２調査地点の平均値を用いた。

三方湖におけるＣＯＤの季節変化は他の湖に較べて著しく，ＣＯＤの変動率は54％を示している。

季節変化パターンは６月から急激に上昇し，８月にピークに達した後に下降する１ピーク型である。ピーク時における水質はＣＯＤ11.5ppm，ＰＨ9.3，ＳＳ39ppm，Ｔ－Ｎ1.03ppm，Ｔ－Ｐ0.156ppm，クロロフィルａ49.8μg/ℓである。これらの結果は夏期におけるＣＯＤの増加か内部生産の影響を強く受けることを示唆するものである。

三方湖は最も内陸部に位置し，比較的海域の影響を受けにくいことから水の移動が少なく，また，河川からの流入負荷が多いため，三方五湖では最も汚濁が進行しやすい状況にある。

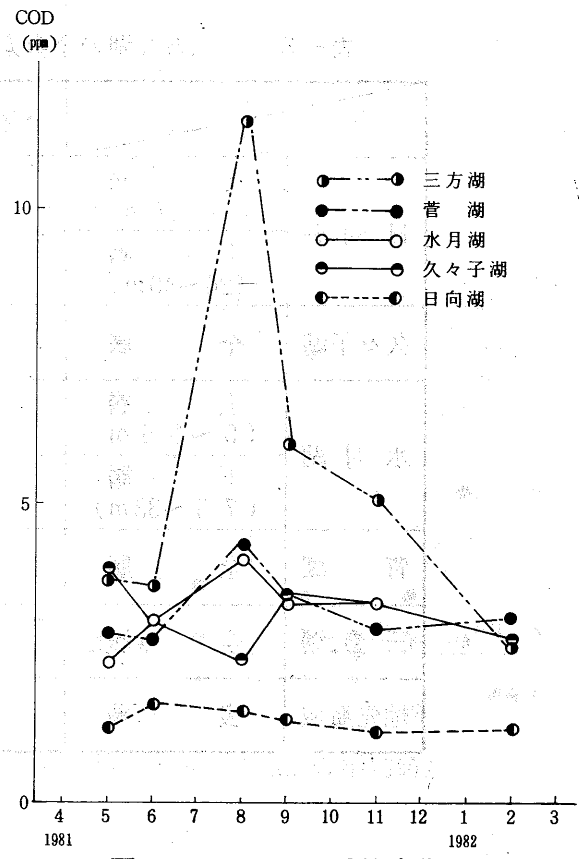
水月湖，菅湖について，ＣＯＤの季節変化は三方湖と類似したパターンが認められるが，変動率は低く，19％，16％である。ＣＯＤのピークは８月に観測され，それぞれ4.1ppm，4.3ppmである。

一方，久々子湖におけるＣＯＤの季節変化は５月から徐々に低下する傾向を示し，８月に最低値2.4ppmを記録した後上昇して，９月に最大値3.4ppmを示している。このパターンは前述の３つの湖のパターンとは明らかに異なるものである。

この湖は水月湖と海域の中間に位置するため，湖水の移動は両者の影響を受けて複雑である。塩素イオンを海域からの影響の指標として，ＣＯＤとの関係を求めると，負の相関が認められた。

塩素イオンの季節変化は８月以外では0.9～2.3％に分布しているのに対し，８月は13.4％と特異的に高い値が記録されている。この結果から，久々子湖におけるＣＯＤの季節変化パターンが他の湖と異なるのは，夏期における海水の流入量の増加によるものと考えられる。

日向湖は水月湖と連絡する嵯峨隧道が閉鎖されているため，湖水の移動は日向水道を通じて若狭湾との間で行なわれ，その移動量は他の湖に較べて大きい。一方，流入河川が無いことから流入負荷が小さいため，ＣＯＤ値は低く，1.2～1.6を推移する。



図－13　ＣＯＤの季節変化

表－７　ＣＯＤの年平均値，標準偏差および変動率

項目＼地点	日向湖	久々子湖	水月湖	菅　湖	三方湖
年平均（ppm）	1.3	3.1	3.1	3.2	5.4
標準偏差（ppm）	0.21	0.50	0.59	0.53	2.9
変動率（％）	15	16	19	16	54

8) 窒　素

窒素化合物は，リンとともに湖の生産の重要な因子である。各湖の全窒素濃度の年平均値を表－8に示した。日向湖と水月湖については，濃度分布から上層と下層に分けて平均濃度を算出した。

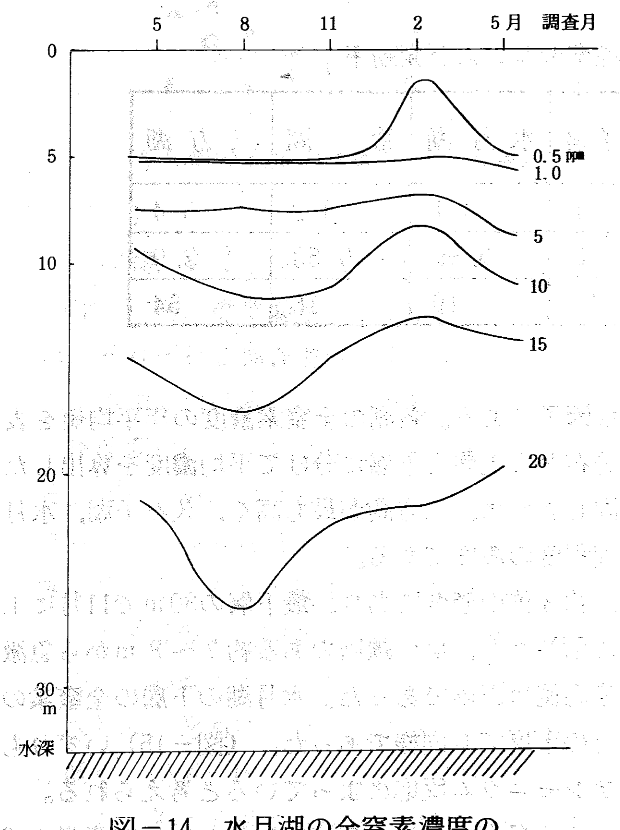
上層部分の全窒素の濃度は，ＣＯＤやＳＳと同じように，三方湖が最も高く，久々子湖，水月，菅湖，日向湖の順に低い。地先海域は日向湖と同程度の濃度である。

下層は，日向湖では約20ｍ以深で濃度が高く，約３倍の濃度であり，最下層の30ｍで11月に1.1ppmを記録した。水月湖の全窒素の変動を図－14に示したが，塩分躍層のある約７～８ｍから急激に高くなり，下層の平均濃度16ppm，最下層25ｍの最高値は23ppmであった。水月湖の下層の全窒素のほとんどがアンモニア態窒素であり，日向湖の11月の下層でも同様であった。（図－15）いずれも下層の滞留による嫌気性化と，これにともなう脱アンモニウム反応によっていると考えられる。

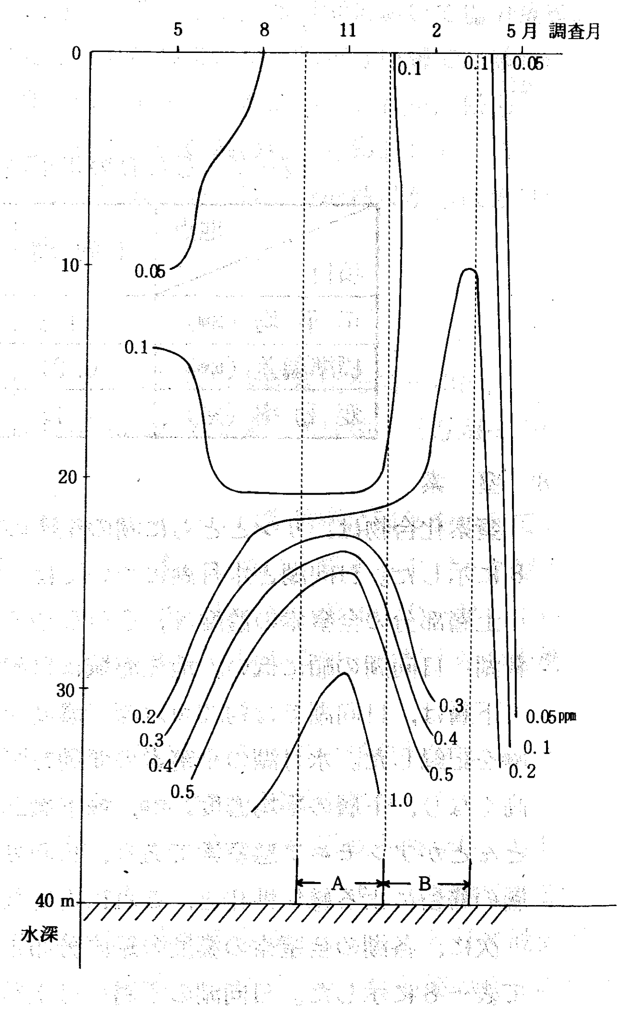
次に，各湖の全窒素の濃度の鉛直分布と水深から，各湖の単位面積（m²）あたりの窒素量を求めて表－８に示した。日向湖の下層には上層の約３倍量の窒素，水月湖の下層には上層の50倍以上の量が蓄積している。これに各湖の面積を考慮しても，水月湖の下層には，他の全部の湖の全窒素量

表－8　　三方五湖の全窒素濃度と全窒素の量

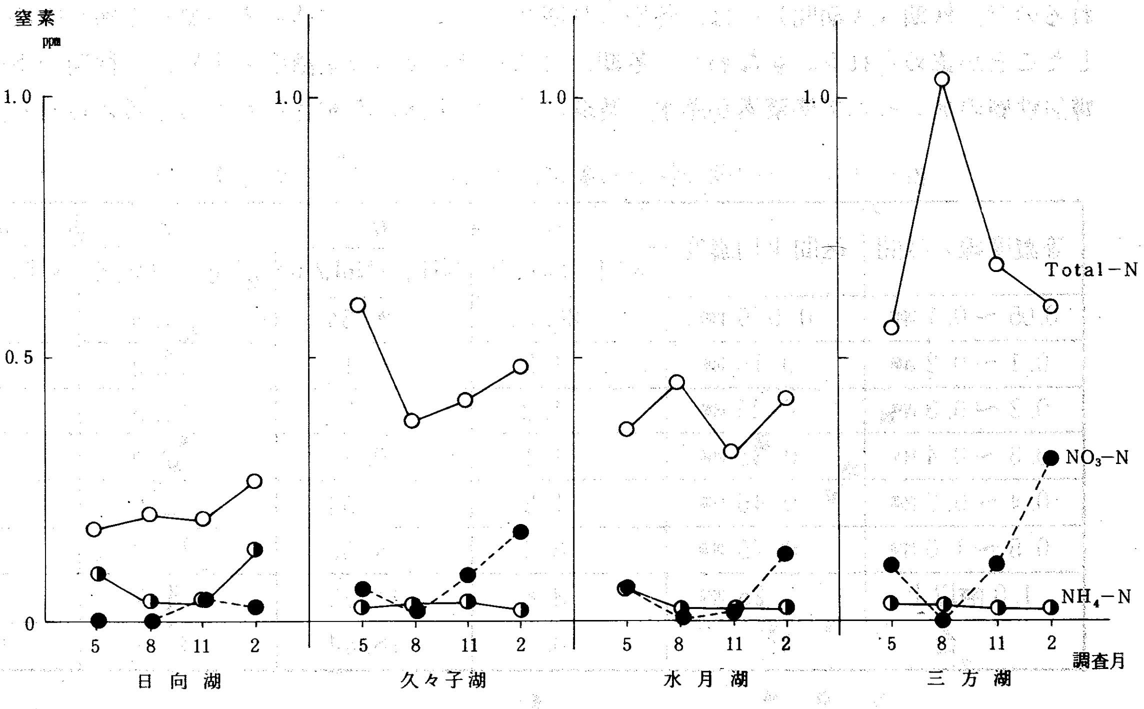
		全窒素濃度（s.d）	単位面積あたりの量
日向湖	上　　層（0～20m）	0.20（0.04）ppm	4.0 g/m²
	下　　層（20～40m）	0.69（—）	12.4
久々子湖	全　　層	0.48（0.02）	1.1
水月湖	上　　層（0～7.5m）	0.40（0.01）	8.4
	下　　層（7.5～33m）	16.2（4.8）	445
菅　湖	全　　層	0.38（0.02）	4.2
三方湖	全　　層	0.75（0.04）	1.4
地先海域	表　　層	0.20（0.01）	—



図－14　水月湖の全窒素濃度の季節変動（水月南）



図－15　日向湖のアンモニア態窒素の季節変動（日向北）



図−16　三方五湖の窒素化合物の季節変動（表層，2地点の平均値）

よりはるかに多量の窒素が蓄積していることになる。

次に，窒素およびその化合物の季節変動について，図−16に各湖の表層の変化を示した。

湖群の最奥の三方湖では，全窒素は夏期に大きく増大し，その後低下する。硝酸性窒素は逆に8月に検出されず，2月に最高値を示し，アンモニア態窒素は殆んど変動がみられない。全窒素濃度は本来湖水中では変動は少ないと考えられるので，調査以前に流域からの大量の負荷があったことと，当日の悪天候（台風が接近していた）による湖面の攪乱があったためであると考えられる。硝酸性窒素の冬期の上昇は，秋以降に増加する雨水の流入によっていると考えられ，久々子湖や水月湖でも同様の傾向がみられ，我々が北潟湖の調査で確認したことと一致している。

久々子湖においては全窒素が5月に最高値を示し，8月に他の湖とは逆に低下しているが，5月には農業排水路から高濃度のアンモニア態窒素が負荷されること，又，8月には濃度の低い海水が大量遡上したことによると考えられる。

水月湖の表層は，ほぼ三方湖と久々子湖の中間的な変動を示している。下層では図−14に示したとおり，8月に濃度が少し低下したが，上層に回帰した状況は認められない。冬期には，躍層の上で等濃度線が表層に向ってわん曲し，湖水の一部が混合した状況がみられる。

日向湖については，他の湖とは異なり，全窒素が冬季に増大し，アンモニア態窒素も8月と11月の約4倍に増大した。そこで，日向湖のアンモニア態窒素の季節変化を検討し，図−15に示した。これから日向湖の湖底部に，夏から秋にかけて高濃度の水塊が現れ，これが冬に表層まで急激に循環し，更に翌春にはほとんど消費されてしまっている状況が認められる。秋から冬にかけての変化を量的に計算するために，図−15中のAとBの期間の水柱のアンモニア態窒素含量を求めた。すなわちAとBの期間の各等濃度線で囲まれた面積と，その区間の平均濃度の積を積算して求めた結果

A期間（11月を中心とした3ケ月）のアンモニア態窒素量	18.4 g/m²
B期間（2月を中心とした3ケ月）のアンモニア態窒素量	13.1 g/m²

（表－9）となり，冬期にはアンモニア態窒素がプランクトンに取込まれる速度も小さいと考えられるので，秋期（A期間）には，冬期（B期間）のアンモニア態窒素の量が下層を中心に十分存在したことが認められる。すなわち，冬期における日向湖の窒素濃度の上昇は，秋期の下層における嫌気性層のアンモニア態窒素が湖水の循環によって全体に希釈されたものと考えられる。

表－9　日向湖の秋から冬にかけてのアンモニア態窒素の量

等濃度線の区間	区間平均濃度	A期間		B期間	
		区間平均水深	NH_4－N量g/㎡	区間平均水深	NH_4－N量g/㎡
0.05～0.1 ppm	0.075 ppm	20.5	1.54	1.5	0.11
0.1～0.2 ppm	0.15 ppm	1.2	0.18	15.2	2.28
0.2～0.3 ppm	0.25 ppm	1.2	0.30	12.5	3.12
0.3～0.4 ppm	0.35 ppm	1.1	0.38	2.0	0.70
0.4～0.5 ppm	0.45 ppm	1.2	0.54	2.0	0.90
0.5～1.0 ppm	0.75 ppm	6.0	4.50	5.2	3.90
1.0 ppm以上	1.25 ppm	8.8	11.00	1.7	2.12
合計		40.0	18.44	40.1	13.13

9) リン

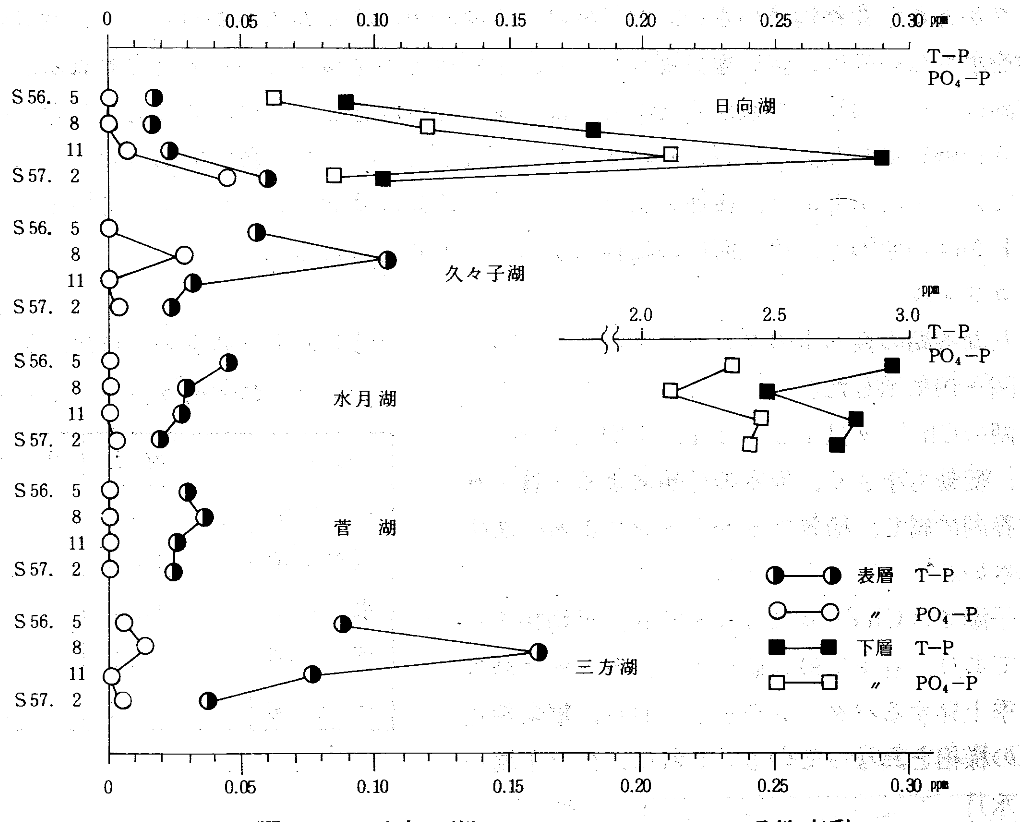
リン化合物は，湖における富栄養化の原因となり，発藻や植物プランクトンの増殖を支配する重要な因子である。各湖の表層部および日向湖，水月湖最深部のT－P，PO4－Pの年平均値を表－10に，季節変化を図－17に示した。また，T－Pに占めるPO4－Pの割合を図－18に示した。

各湖における表層水の年平均は，T－Pが0.03ppm～0.09ppm，PO4－Pが0～0.01ppmであり，富栄養化するリンの限界濃度といわれる0.01～0.02ppmを越えている。特に，三方湖ではT－Pが0.09ppmで五湖中最も高い結果であった。T－Pの季節変化をみると，久々子湖，水月湖，菅湖，三方湖は，春・夏に高く，冬は低い傾向を示している。日向湖は冬に高く，夏に低い傾向を示した。PO4－PはT－Pの変動とほぼ一致している。T－Pに対するPO4－Pの割合は，図－18に示したように冬期に上昇する傾向がみられた。

下層では，リン濃度が表層の10～100倍の高値となり，日向湖でT－Pが0.09～0.29ppm，PO4－Pが0.06～0.21ppmであった。水月湖ではT－Pが2.46～2.93ppm，PO4－Pが2.10～2.44ppmであっ

表－10　T－P，PO4－Pの年平均値，標準偏差およびPO4－Pの割合

地点＼項目		T－P $\bar{x}$ ppm	T－P σ ppm	PO4－P $\bar{x}$ ppm	PO4－P σ ppm	PO_4－P／T－P %
日向湖	表層	0.032	0.016	0.012	0.018	38
	下層	0.17	0.08	0.12	0.06	71
久々子湖	表層	0.055	0.030	0.007	0.011	13
水月湖	表層	0.030	0.009	0.001	0.001	3
	下層	2.73	0.17	2.32	0.13	85
菅湖	表層	0.028	0.005	0	0	0
三方湖	表層	0.089	0.043	0.004	0.004	4
地先海域	表層	0.023		0.007		30

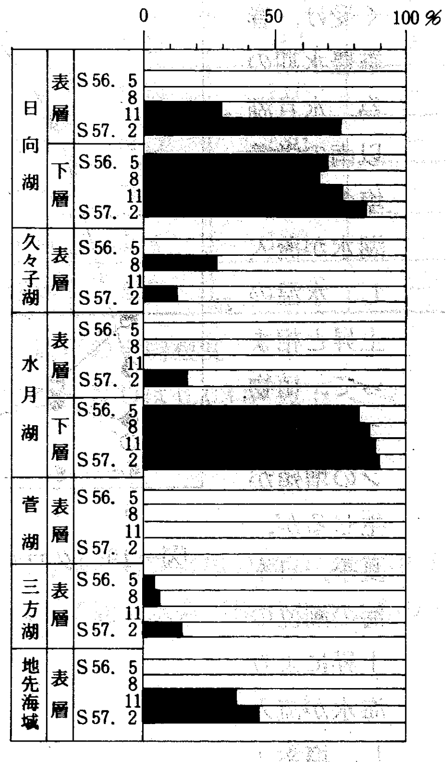


図−17　三方五湖のT−P、PO_4−Pの季節変動

た。T−P中に占めるPO４−Pの割合は70〜90%であった。このように，PO４−Pが高いのは，下層が還元状態になっていて，底質中からリン酸が溶出しやすくなっているためと思われる。

日向湖はT−Pの年平均値が0.03ppmで，夏は0.02ppmと低く，冬は0.06ppmに上昇する。PO４−Pも同様の傾向を示していて，冬に高値を示し，T−Pの75%を占めた。このように，PO４−Pが冬期に高くなる原因としては，日向湖が水深40mの深い湖であり，下層のPO４−Pの濃度が高く，秋から冬にかけて成層が崩れて下層水との混合がおきるためと思われる。

久々子湖のT−Pは，８月に0.10ppmの高値を示しており，PO４−Pは約30%を占めた。この時期のCℓ⁻が13.000ppmと高いので，海水の流入があったものと思われる。一般に底質中からのリン酸の溶出は，嫌気性化することにより起こるが，海水と有機物が混合した地帯の堆積物からは，海水中の硫酸イオンの作用によって，リン酸の溶出が促進されるといわれている。[22)] このことから，８月にT−Pが高かった原因として，海水が流入して底質からのリン酸の溶出が促進されたことや，農業排水など流域からの負荷が考え



図−18　T−Pに占めるPO_4−Pの割合

られる。

水月湖，菅湖の表層部は，ＰＯ４－Ｐはほとんど存在しない。また，季節変動をみると，春・夏にピークがあるが変動幅は小さい。水月湖は，水深30ｍの深い湖にかかわらず，日向湖のような季節変動を示さないのは，強い塩分躍層があり，下層水との循環がないためと思われる。

三方湖はＴ－Ｐの年平均値が0.09ppmで，他の湖に比べると２～３倍の高値を示した。特に夏期に高く，0.16ppmを示した。この時のＰＯ４－Ｐは0.01ppmで，Ｔ－Ｐの数％であった。　川は三方湖に流入している主河川であり，後述のようにＴ－Ｐの負荷は夏期にピークを示しているので，三方湖のＴ－Ｐが高い原因が，流入河川の負荷によるものと考えられる。

10）クロロフィル

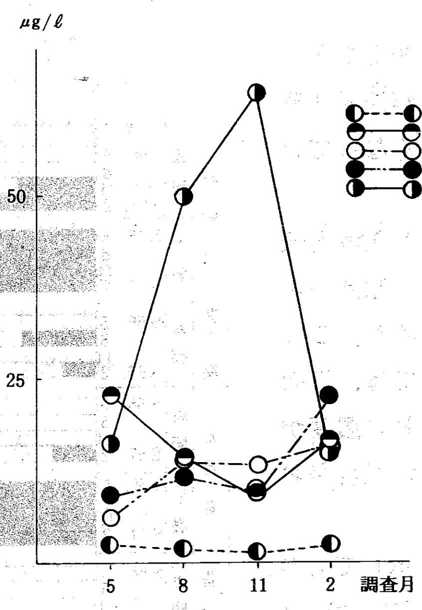
三方五湖各湖の表層水のクロロフィル a（Chℓ－ a）の濃度の平均値を表－11に，又，その季節変化を図－19に示した。

表－11　各湖のクロロフィル a 濃度

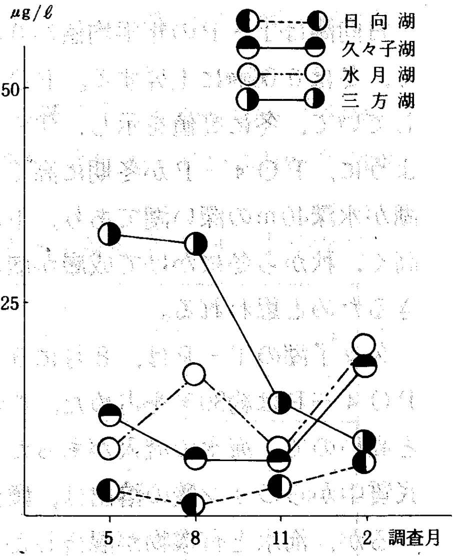
湖沼名	$\bar{x}$ μg/ℓ	σx μg/ℓ
日向湖	1.8	0.55
久々子湖	16.5	4.78
水月湖	13.2	3.87
菅　湖	12.3	5.41
三方湖	32.4	20.6

日向湖のChℓ－ a は1.3～2.4，平均1.8 μg/ℓ であり，変動も小さく，坂本の分類によると貧栄養～中栄養湖に属し，植物プランクトンによる一次生産は小さい。

久々子湖ではChℓ－ a は8.6～22.9，平均16.5 μg/ℓ であり，春季に最大値を示し，夏～秋に減少し，冬季上昇するパターンを示しており，富栄養化の湖沼の様相と異なっている。これは，久々子湖が内陸の水月湖と日本海の影響を強く受け，春季豊水期の為，水月湖以南の栄養塩の豊富な湖水が流入し，水温の上昇と相まって，植物プランクトンの増殖が生じるが，夏季，日本海の潮位の上昇により海水が流入し，塩素イオン濃度は14‰と高濃



図－19　クロロフィル－ａ
の季節変化



図－20　昭和53～55年の３ケ年の
クロロフィルａの季節変化（平均）

度になり，淡水性，又は汽水性の植物プランクトンの増殖に影響を与えたか，あるいは海水の流入により，湖水の流れ等水環境が不安定となった為か，植物プランクトンの増殖が抑えられ内部生産が低下していると推測される。水月湖では6～15，平均12.3 μg/ℓ であり，夏と冬にピークが見られるが季節変動は小さかった。又，坂本の湖沼の分類から考察すると，N，P，Chℓ－a濃度とも中富栄養湖に属している。又菅湖のChℓ－aも水月湖と同じレベルであり，同様な季節変化をしていた。一方，三方湖ではChℓ－aは16.2～64.2，平均32.4 μg/ℓ であり，夏～秋季にかけて植物プランクトンの増殖－光合成による一次生産が著しく，冬季に減少する典型的な富栄養湖のパターン'を呈している。但し，例年は図－20に示す様に春～夏季にChℓ－aのピークがみられたが，56年の異常気象の影響でパターンがズレたと考えられる。

以上，三方五湖におけるChℓ－aの季節変化が地形的，水理的状況を異にする為，湖によってパターンが異なっていることは注目される。

久々子，水月，菅の各湖に於いてChℓ－aは，冬季水温の低下にもかかわらず増加する傾向がみられるが，これは一般的湖沼ではみられない現象である。過去3ケ年（53～55年度）の三方五湖のChℓ－aの季節変化の平均値を図－20に示したが，これも冬季にChℓ－aが増加する傾向を示しており，この機構について今後の検討課題である。

11) 硫化水素

水層での硫化水素の存在は，嫌気性状態を意味し，そこでは魚貝類は生息不可能である。

硫化水素は，日向湖，水月湖，菅湖の下層で検出された。(表－12) 久々子湖，三方湖は水深が2mと小さく，表層の酸素が下層に供給され，嫌気性状態にはならないものと思われる。日向湖，水月湖，菅湖は水深が大きく，海水が存在し，水温または塩分により下層に停滞層が存在している。

この様な状態では次の様な事がいわれている。

① 表層と下層が循環せず，下層は有機物の好気的分解にともない無酸素層になる。

② 湖底の底質の表層あたりでは，硫酸還元菌により，塩水中の硫酸根は硫化物に変えられて，湖の下層に硫化物が蓄積する。

③ 下層と表層との境界では，紅色硫黄細菌が繁殖し，硫化水素を酸化して硫黄または硫酸根にかえる。

表－12 湖水の硫化水素濃度（ppm）

水　深	日向湖	水月湖	菅　湖
1～7 m	ND	ND	ND
8 m	ND	0.30	2.4
10 m	ND	61	61
15 m	ND	110	—
20 m	ND	130	—
25 m	ND	160	—
30 m	1.4	180	—
35 m	5.9	—	—

通年の平均濃度

NDは0.03 ppm以下

以上の理由により，季節によって変化することもあるが，水月湖と菅湖は塩分躍層のために8m以下で，また日向湖は夏～秋季，水温躍層が形成されて30m以下で硫下水素が検出されたものと思われる。

2. 測定項目間の関連について

三方五湖の水質の特性を把握するために，各湖の表層水の項目ごとの相互関係について検討することとする。表層水は，底層の影響が少ない層と考え，久々子，三方湖は，水深1ｍ迄，日向，水月，菅の各湖は5ｍ以浅の水層とした。

1）日向湖

日向湖の表層水の項目間の一次回帰式と相関係類を求め，その濃度相関マトリックスを表－13に示した。

表－13　濃度相関マトリックス（日向湖）

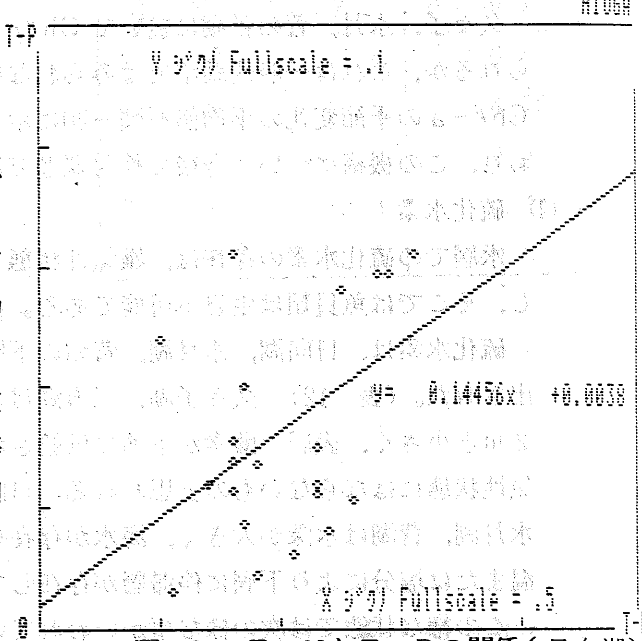
HIUGA　　n = 35

	PH	DO	COD	SS	DO%	T-N	Org-N	T-P	ｸﾛﾛﾌｨ
ﾄｳﾒｲﾄﾞ	-.567	0.090	-.176	0.023	-.677	0.576	-.161	0.637	0.728
PH		-.533	-.060	0.297	0.691	-.593	0.244	-.785	-.306
DO			-.256	-.258	-.105	0.003	-.518	0.481	-.313
COD				0.230	-.237	0.157	0.129	0.145	0.042
SS					-.126	0.042	0.110	-.030	0.061
DO%						-.734	-.143	-.735	-.562
T-N							0.565	0.468	0.434
Org-N								-.170	0.160
T-P									0.340

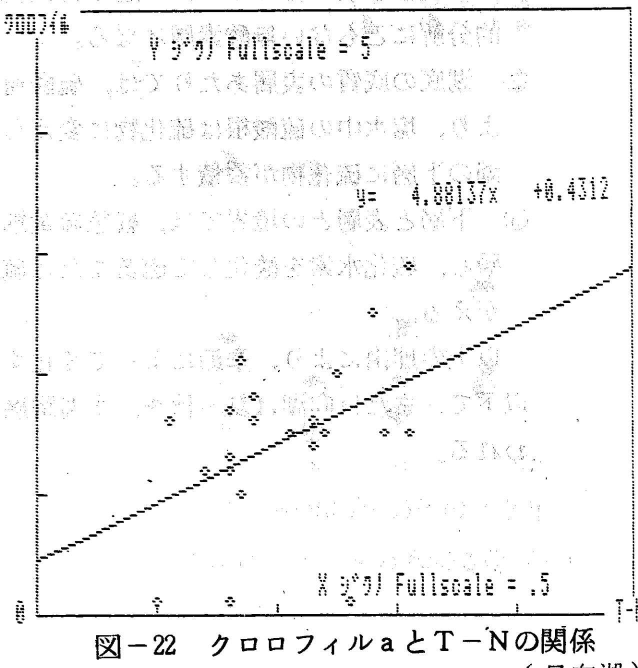
この結果，透明度とpH，ＤＯ％に負の相関，Ｔ－Ｎ Ｔ－Ｐ，Chl－ａに正の相関がみられた。又富栄養化の制御因子と言われるＮ，Ｐでは，Ｔ－ＮとＴ－Ｐ（図－21），Ｔ－ＮとOrgN，Ｔ－ＮとChl－ａ（図－22）に相関があったが，ＣＯＤ，ＳＳとは相関が認められなかった。

これらの結果，特に透明度と他の項目の関係は富栄養湖の現象と逆の現象であり，又，栄養塩と生物（植物プランクトン）現存量の関係も明白でなかった。これらのことから，以前，日向湖は，嵯峨随道と日向水道を通じて，日本海の干満，潮位の変動等により，海水と，水月湖の栄養塩及びＣＯＤの高い湖水が流入し合い，この塩分の異なった水魂が複雑な動きを成し，又，水色が変る富栄養現象を呈していたが，嵯峨随道が閉鎖されてから，日向水道を介しての海水との交換だけとなり，流域からの汚濁負荷も小さいことから水質が改善され安定してきたことを示している。日向湖は，T－N 0.23 ppm，T－P 0.03 ppmで，富栄養湖であるが，透明度8ｍ，ＣＯＤ1.3 ppm，ＳＳ1.3 ppm，Chl－ａ1.6 ppb と清浄であり，貧栄養湖の現象を呈していた。しかし，冬季に水温躍層がくずれ，湖水の循環がみられ，底質からの溶出と思われるＮ，Ｐ特にNH_4－N，PO_4－Ｐの拡散が表層水に影響を与えており，以前，汚濁のなごりが残存していることがうかがわれた。

又，冬季，湖水へ回帰したＮ，Ｐが春季には減少し，平常値にもどっていることは，春先（水温10～15℃）に植物プランクトンに取り込まれ，その後沈降することや，あるいは日本海へ流出したことが考えられるが，本調査では分からなかった。



図－21　Ｔ－ＮとＴ－Ｐの関係（日向湖）



図－22　クロロフィルａとＴ－Ｎの関係（日向湖）

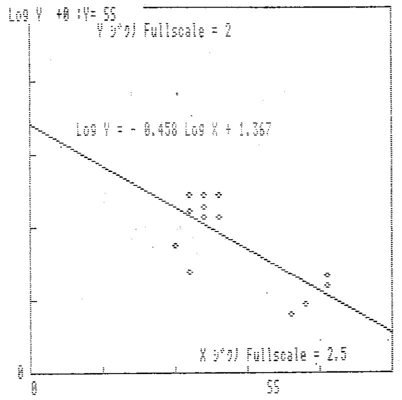
2) 久々子湖

久々子湖表層水の項目間の一次の濃度相関マトリックスを表−14に示した。負の相関が認められたのは，透明度−SS（図−23），透明度−T−Pであり，正の相関は，PH−COD，PH−DO%，PH−Org−N，PH−Chl−a，COD−SS，COD−DO%，COD−T−N，COD−Org−N，（図−24）SS−Org−N，DO%−Chl−a，T−N−OrgN，T−N−Chl−a，Org−N−T−P，OrgN−Chl−a（図−25）に認められた。

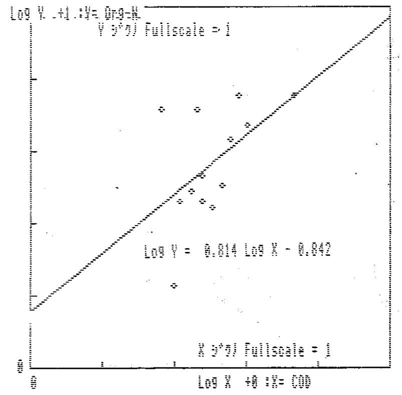
表−14 濃度相関マトリックス（久々子湖）

KUGUSIKO　　n = 21

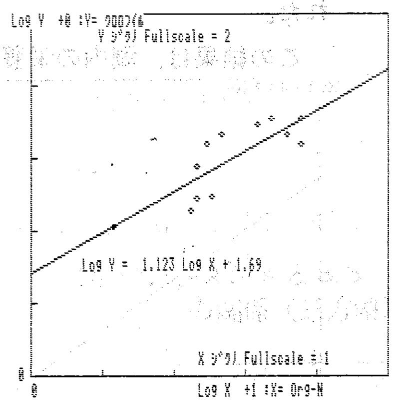
	PH	DO	COD	SS	DO%	T-N	Org-N	T-P	ｸﾛﾛﾌｲ
ﾄｳﾒｲﾄﾞ	-.113	-.144	-.025	-.694	-.165	0.022	-.286	-.681	0.015
PH		0.230	0.628	0.391	0.762	0.442	0.670	0.413	0.595
DO			0.482	0.220	0.416	0.230	0.224	-.315	0.346
COD				0.537	0.627	0.615	0.545	-.200	0.317
SS					0.347	0.400	0.528	0.185	0.093
DO%						0.552	0.632	0.030	0.776
T-N							0.874	0.068	0.686
Org-N								0.428	0.791
T-P									0.246



図−23 透明度とS.Sの関係（久々子湖）



図−24 Org−NとCODの関係（久々子湖）



図−25 クロロフィルaとOrg−Nの関係（久々子湖）

これらの結果は富栄養湖の特長，つまり栄養塩と植物プランクトンの増殖等，光合成による一次生産の関係を示している。しかし，透明度とCOD，Chl−a，T−Pや，SSとT−P，Chl−a等，富栄養化の湖沼で観察される現象がみられないことが，久々子湖の特性と考える。久々子湖は，最大水深2.5mの浅い湖であり，又内陸部の水月，三方湖の流出水と日本海の海水の二つの水魂により直接影響を受け，潮汐による日変化に加えて，潮位の変化により湖水の塩素量が1〜15‰と一年周期で変動する特性を持っている為，春季，栄養塩の豊富な農業排水と豊水期の為，押し出し効果で水月湖の水魂が久々子湖に流入し，水温の上昇にともない植物性プランクトンの増殖が生じている。しかし，夏季，日本海の潮位の上昇により海水の流入が大となり，塩素量が15‰高濃度となり，この海塩（SO_4）と多量の有機物を含有する底泥との間接的影響によるPO_4−Pの底泥からの溶出により湖水のP濃度も上昇し，又水温の上昇と相まって，植物プランクトンの増殖しやすい条件にもかかわらず，植物プランクトンの現存量は小さく，COD，SS，Chl−aが裏付けている。これより，久々子湖の淡水性或いは汽水性の植物プランクトンは，夏季，塩分による阻害を受けていると推定される。又，T−NとCOD，Org−N−Chl−a等，富栄養化の指標とN成分に相関がみられるが，T−P，PO_4−Pとには相関が認められなかったことから，久々子湖では，窒素が富栄養化の制限因子となっていると推測できる。

このように久々子湖は，栄養塩の動向と植物プランクトンの関係，湖水の塩濃度の関係及底泥からの栄養塩の回帰，底泥のまきあげ，湖水の動き等，複雑な機構が混在していると考えられる。

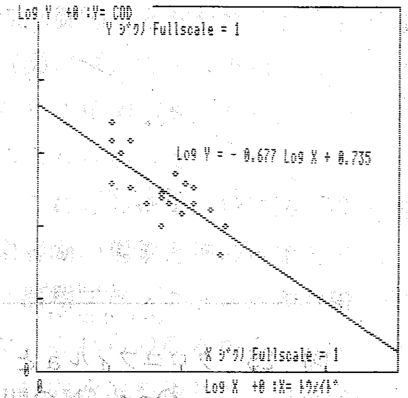
3) 水月湖，菅湖

菅湖は地形的に水月湖の副湖盆を形成しており，水質的にもほぼ同様な様相を呈している為，水月湖に菅湖を含めて考察することとする。表−15に，水月湖，菅湖の表層水の各項目間の一次の相関マトリックスを示した。これより，透明度−COD (図−26)，透明度−Org−N，透明度−Chl−a，DO−T−P，SS−T−Nで，負の相関がみられ，DO−DO%，DO−T−N，PH−T−P，DO−Chl−a，COD−Org−N(図−27)，DO%−T−N，T−N−Org−N，T−N−Chl−a，Org−N−Chl−a (図−28)に正の相関が認められた。

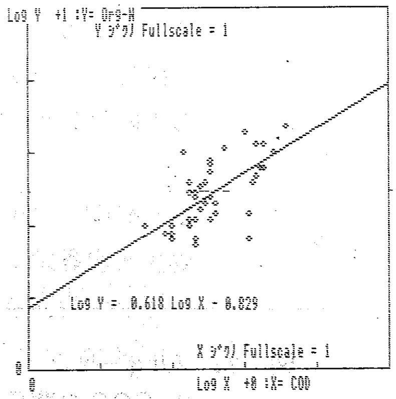
表−15　濃度相関マトリックス（水月湖，菅湖）

SUIGETSUKO-SUGAKO　　n = 63

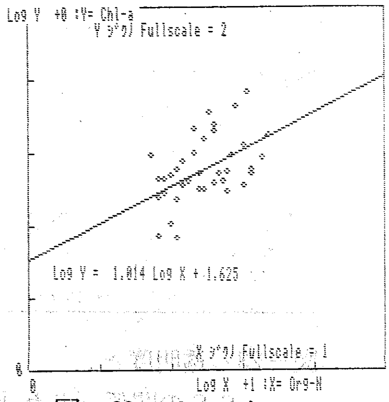
	PH	DO	COD	SS	DO%	T-N	Org-N	T-P	Chl-a
ﾄｳﾒｲﾄﾞ	0.293	0.013	-.737	-.407	0.374	-.104	-.629	0.080	-.562
PH		-.428	0.468	-.265	0.181	-.183	0.145	0.507	-.480
DO			-.333	-.049	0.729	0.511	-.075	-.513	0.555
COD				-.027	-.112	0.041	0.649	0.282	0.169
SS					0.006	-.402	-.144	-.160	-.173
DO%						0.431	0.049	-.267	0.207
T-N							0.660	-.052	0.672
Org-N								0.121	0.455
T-P									-.198



図−26　透明度とCODの関係（水月・菅）



図−27　Org−NとCODの関係（水月・菅）



図−28　ChlaとOrg−Nの関係（水月・菅）

この結果は，湖内の栄養塩と植物プランクトンの現存量とに関係があることを示し，特に窒素成分はCOD，Chl−aとに相関がみられ，光合成による一次生産と密接であることがうかがわれる。しかし，湖沼の富栄養化の因子と言われるリンには，他の項目とに相関関係が認められないことから，水月，菅の富栄養化の制限因子とはなっていないと推測される。

水月，菅湖への，窒素，リン等の栄養塩の負荷は，流域からの負荷が小さい為，三方湖，久々子湖からと考えられるが，湖の窒素，リンの挙動が三方湖の変化と同じ挙動を示しているので，三方湖の影響が大であると推定される。しかし，三方湖と異なり，水深が深く塩分躍層がある為，表層で増殖した植物プランクトンは，死滅後沈降し，表層から系外除去される為，栄養塩の回帰少なく，三方湖ほど富栄養化の現象は著しくないと考えられる。しかし，8〜10mに存在する塩分躍層が，何らかの原因で乱されると下層の豊富な栄養塩（NH_4−N，PO_4−P等)が表層に拡散し，植物プランクトンの異常増殖，アオコの発生という現象が生じる危険性はありうるし，過去にもアオコの発生の例が時々みられた。又，水月，菅湖では，塩分躍層を介しての栄養塩の表層水への移行がどのようになっているかを今後検討する必要があろう。

4) 三方湖

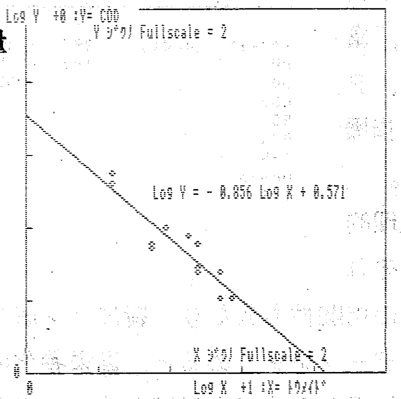
三方湖の表層水の各項目間の一次の濃度相関マトリックスを表−16に示した。この表より，透明度，DO，COD，SS，T−N，Org−N，T−P Chl−a 各項目間によい相関が認められた。(図−29〜35)，特に水月，久々子等，他の湖でみられなかったT−PとT−N，Org−N，Chl−a，COD，SS等，他の富栄養化の指標との間に非常によい相関がみられたことは興味深い。三方湖では，栄

養塩の負荷（流域の負荷及び底泥からの回帰）により植物プランクトンの増殖，現存量の増大がCOD，SS，Chl−aの増加をきたし，その為に透明度が悪化するという典型的な富栄養化の現象をかいまみることができる。又，三方湖は，窒素，リン濃度が高く，北潟湖と同程度であるが，Chl−a量は小さく約$1/2$程度であった。Chl a−T−Pより得られた回帰式（図−34）Log（Chl−a）＝0.77 Log（T−P）＋1.54 は坂本が示す一般湖沼での関係式Log（Chl−a）＝1.583 Log（T−P）＋3.615 より傾が小さく，三方湖のChl−a量はリン濃度に較べて小さいことを示していた。

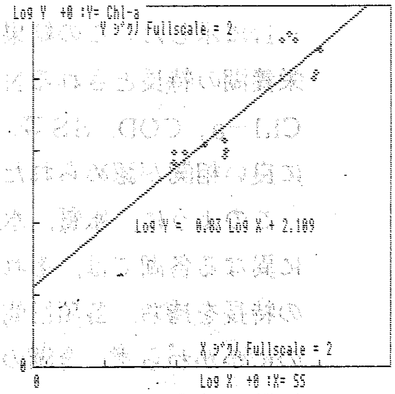
表−16　濃度相関マトリックス（三方湖）

n = 21

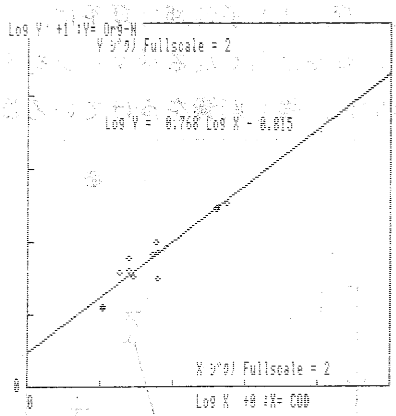
	PH	DO	COD	SS	DO%	T-N	Org-N	T-P	Chl-a
トウメイド	-.696	0.403	-.825	-.924	-.091	-.712	-.885	-.838	-.831
PH		-.545	0.913	0.676	0.132	0.646	0.844	0.838	0.252
DO			-.556	-.368	0.466	-.440	-.726	-.841	-.195
COD				0.873	-.054	0.832	0.965	0.930	0.472
SS					-.073	0.812	0.936	0.881	0.791
DO%						-.232	-.241	-.463	0.268
T-N							0.898	0.832	0.483
Org-N								0.957	0.566
T-P									0.436



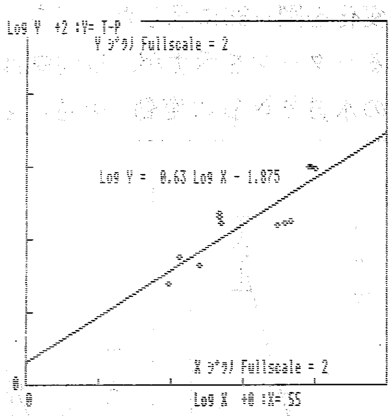
図−29　透明度とＣＯＤの関係（三方湖）



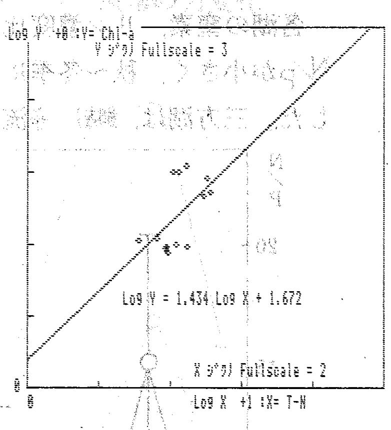
図−30　Chl−aとS.S.の関係（三方湖）



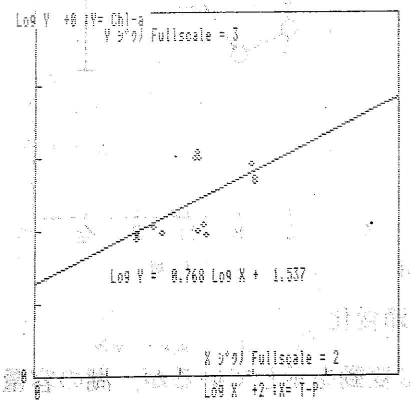
図−31　Org−NとＣＯＤの関係（三方湖）



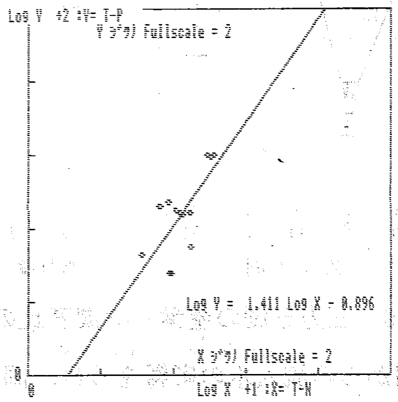
図−32　T−PとS.S.の関係（三方湖）



Chl−aの関係（三方湖）



図−34　Chl−aとT−Pの関係（三方湖）



図−35　T−PとT−Nの関係（三方湖）

しかし，T−NとChl−aの関係に於いて得られた一次回帰式（図−33）Log（Chl−a）＝1.434 Log（T−N）＋1.672 は，坂本が富栄養湖である霞ケ浦，琵琶湖，諏訪湖の調査（52〜53年）より得られた関係式 Log（Chl−a）＝1.431 Log（T−N）＋1.699 と一致している。これより三方五湖での内部生産に於いて，リンは充分に湖内に存在するが，それが充分に植物プランクトンの生産に利用されておらず，窒素が湖内の生産を制限していると推定する。

5）三方五湖全湖

三方五湖全湖の表層水の特性をながめる目的で各項目間の濃度相関マトリックスを表−17に示した。この結果，富栄養湖の特長とされるN．P．Chl−a，COD，SS等，指標に良い相関が認められた。

表−17　濃度相関マトリックス（全湖）

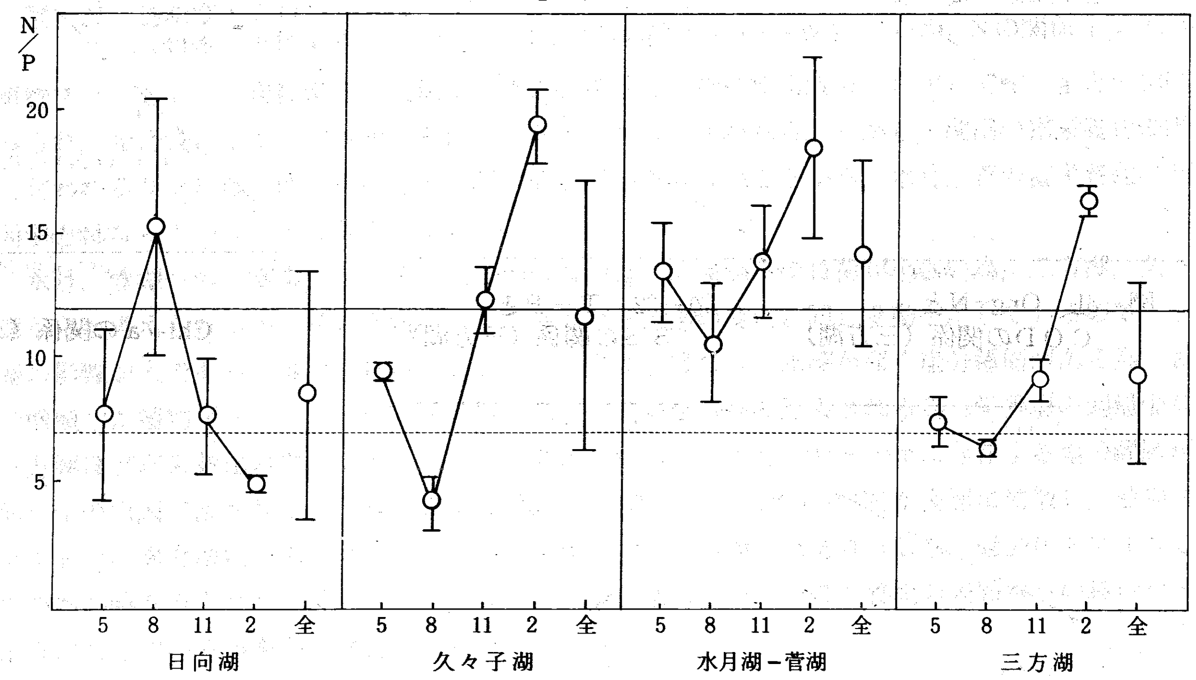
n = 54

	PH	DO	COD	SS	DO%	T-N	ORG-N	T-P	CHL-A
ﾄｳﾒｲﾄﾞ	0.013	-.293	-.598	-.475	0.049	-.675	-.642	-.372	-.587
PH		-.405	0.456	0.269	0.357	0.279	0.483	0.462	0.139
DO			-.050	-.013	0.342	0.176	-.092	-.373	0.158
COD				0.877	-.123	0.852	0.934	0.767	0.734
SS					-.115	0.829	0.862	0.797	0.859
DO%						-.028	-.026	-.225	0.062
T-N							0.916	0.739	0.813
Org-N								0.806	0.808
T-P									0.636

このように，水質，水理的に異なる各湖では，それぞれの特長を持ち，各項目間の相関性も異なり，特にリン成分には他の項目間とに相関が認められないのにかかわらず，全湖のデータをまとめると，富栄養化の指標に相関が認められるという，奇妙な結果が得られたが，この結果から，三方五湖全体の富栄養化の状況を論ずることは危険である。

3．窒素，リンの濃度比

各湖の窒素，リン濃度比の季節変化を図−36に示した。三方，水月，菅，久々子各湖は夏季に，N/Pが小さく，秋〜冬季に高くなるパターンを示すが，日向湖は，逆に夏季に高くなるパターンを示した。三方湖は，鰣川等流入河川の水質のN/Pの変動（後述）を直接的に，強く影響をうけている為



図−36　三方五湖の窒素リン濃度比の季節変化

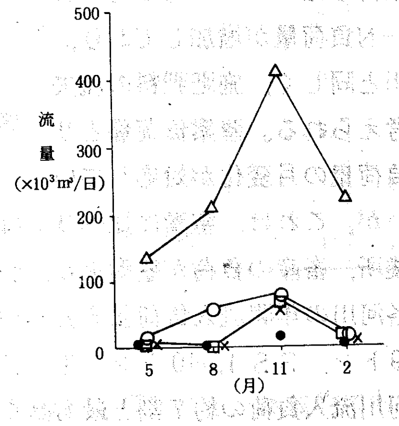
と考える。又，水月湖は，三方湖からの流入水の影響をうけ，同様な変動を示しているが，湖の容量による緩衝力や塩分躍層の存在により，N，Pを取り込んだ植物プランクトンの表層水からの系外除去等によりその変動は小さい，一方，久々子湖では，夏季海水の流入による影響で底泥からのリンの

流出，又，流入河川の影響でN/Pは，夏季約4～冬季約20と大きく変動するものと推定される。

湖沼では，一般的に植物プランクトンの窒素，リンの構成比は7（北潟湖では5.4）と言われ，又，坂本は栄養バランスのとれた湖は，N/Pが12以上～25であり，リンとChl−a と相関が良いと述べている。しかし，三方五湖ではN/Pは，水月，菅を除いて12以下であり，又，Chl−a：COD等，植物プランクトンの現存量の指標と窒素は良い相関が認められるが，リンとは相関がなかったことから，リン過多と推測される。又，三方湖でリン濃度が高いにもかかわらず，Chl−a が春～秋季にそれほど高くならない理由の1つとしてN/Pが小さいことが，原因となっているかもしれない。

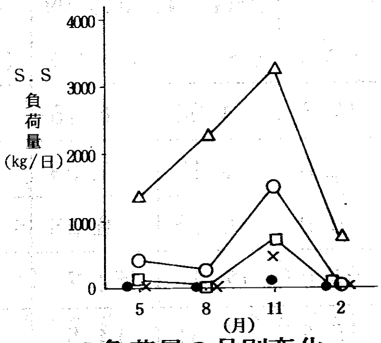
4. 流入河川の負荷量

久々子湖には，農業排水路，宇波西川が流入し，三方湖には，観音川，鰣川，別所川が流入し，河川による負荷が湖の水質に影響している。そこで河川ごとに流量，COD，SS，総窒素（T−N），アンモニウム態窒素（NH_4−N），硝酸態窒素（NO_3−N），総リン（T−P），オルトリン酸態リン（PO_4−P）の負荷量の月別変化を図−37～図−44に示した。流量，COD，SS，NO_3−Nの月変化については，いずれの河川についても11月に増加するといった同じパターンを示しているが，これは降雨による影響と考えられる。T−N，T−Pについては，宇波西川，観音川，別所川では11月に増加する同じパターンを

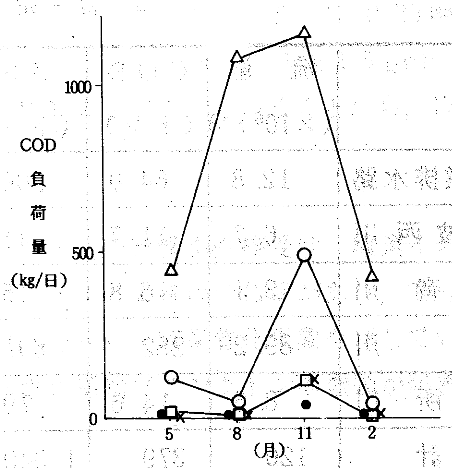


図−37 流量の月変化

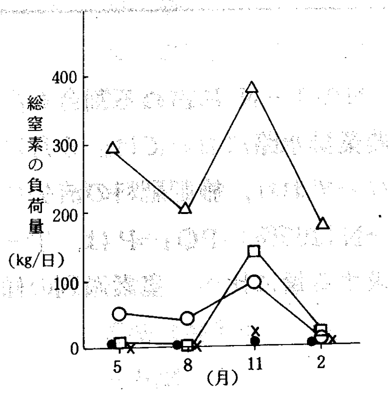
○ 農業排水路
△ 鰣　川
● 観　音　川
× 宇 波 西 川
□ 別　所　川



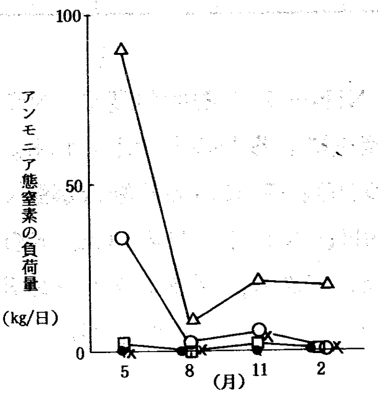
図−38 S.S.負荷量の月別変化



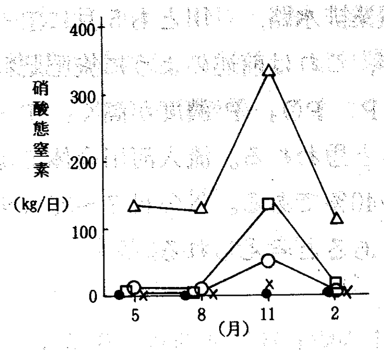
図−39 COD負荷量の月別変化



図−40 総窒素の負荷量の月変化

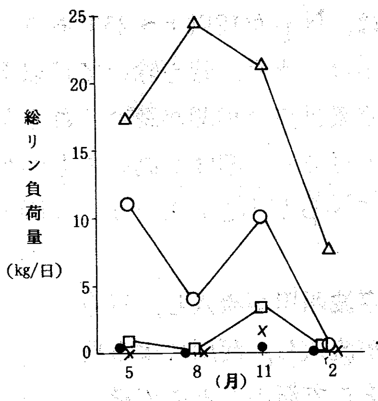


図−41 NH_4−N 負荷量の月変化

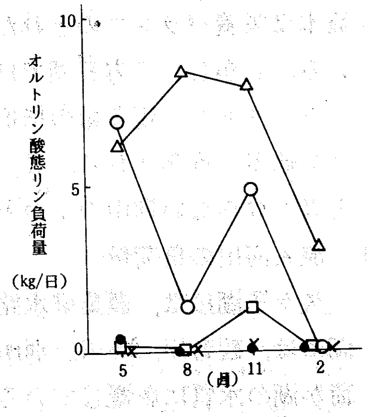


図−42 NO_3−N負荷量の月変化

示すが，農業排水路，鰣川については，この傾向と異なっている。鰣川では５月にT－Nが増加しているが，NH_4－Nの負荷量の月変化に見られるように５月にNH_4－Nが増加するのと対応しており，施肥肥料の一部の流失によると考えられる。また，農業排水路についても５月にNH_4－N負荷量が増加しており，鰣川と同じく，施肥肥料の流失と考えられる。窒素負荷量とリン負荷量の月変化が対応していないが，これは，窒素に比べリンは，流域の負荷の占める割合が負荷の発生に断続的な要素を含む人，事業所，畜産の負荷が窒素より，かなり大きいためと思われる。



図－43　総リン負荷量の月変化



図－44　オルトリン酸態リン負荷量の月変化

各河川の年間流入負荷量を表－18に示した。全河川の流入負荷量は，流量１億２千万トン，COD 379トン，SS 1,040トン，T－N 131トン，T－P 9.5トンである。このうち，　川の流入負荷が全河川流入負荷の約７割と最も高く，農業排水路が１～２割となっており，この２つの河川で全体の８～９割を占める。この２つの河川について濃度の月別変化を表－19に示した。

表－18　各河川の年間流入負荷量

	流　量 (×10^6トン)	COD (トン)	SS (トン)	T－N (トン)	NH_4－N (トン)	NO_3－N (トン)	T－P (トン)	PO_4－P (トン)	T－N/T－P
農業排水路	12.8	64.0	206	17.5	4.04	6.15	2.32	1.20	7.6
宇波西川	6.7	11.7	41	2.6	0.43	1.59	0.18	0.03	14.4
観音川	3.1	6.8	15	0.9	0.15	0.58	0.10	0.04	8.9
川	89.2	282	698	95.0	12.6	62.7	6.43	2.32	14.8
別所川	8.6	14.6	79	15.3	0.51	14.5	0.44	0.16	34.8
計	120	379	1,040	131	17.7	85.5	9.47	3.75	13.8

農業排水路，　川とも５月にT－N，NH_4－N の濃度が高く，NH_4－NのT－N に占める割合も高いが，これは前述のように施肥肥料の流失によるものと考えられる。農業排水路においては，５月にT－P，PO_4－P 濃度が高く，T－PのPO_4－P に占める割合が高くなっており，施肥肥料の流失によると思われる。流入河川全体では，NH_4－NはT－Nの14%，NO_3－Nは65%，PO_4－Pは，T－Pの40%である。N/Pは７～35（平均14）であり，プランクトンの要求する量に比べ，窒素過剰の傾向にあると考えられる。

表－19　川，農業排水路の水質の月変化

	月	流量 ×10³ (トン/日)	COD (ppm)	SS (ppm)	T－N (ppm)	NH_4－N		NO_3－N		NO_2－N		T－P (ppm)	PO_4－P		T－N/T－P
						(ppm)	(%)	(ppm)	(%)	(ppm)	(%)		(ppm)	(%)	
農業排水路	5	14.8	8.4	28.2	36.2	2.31	63	0.58	16	0.03	1	0.740	0.467	63	4.9
	8	31.7	1.5	8.6	1.22	0.09	7	0.13	11	〈0.01	－	0.128	0.040	31	9.5
	11	77.9	**6.3**	19.5	1.13	0.08	7	0.64	56	〈0.01	－	0.128	0.061	47	8.8
	2	15.5	2.4	3.1	0.70	0.06	8	0.30	42	〈0.01	－	0.033	0.011	33	21.2
鰣川	5	134	3.3	10.0	2.16	0.66	30	0.96	44	0.03	1	0.128	0.046	35	16.9
	8	212	5.1	10.7	0.94	0.04	4	0.57	61	〈0.01	－	0.116	0.039	33	8.1
	11	410	2.8	8.0	0.92	0.05	5	0.80	86	〈0.01	－	0.051	0.019	37	18.0
	2	221	1.9	3.4	0.78	0.09	11	0.49	62	〈0.01	－	0.034	0.014	41	22.9

Ⅵ　結　論

三方五湖は，日向，久々子，水月，菅，三方の５つの湖から成り，水理的にも，水質的にも密接な関係を有しているが，栄養度は異なる湖沼群であった。

1.　日向湖

かん水湖で，春～秋季，水温躍層が形成されるが，冬季循環する湖であり，T－N 0.23㎰，T－P 0.03㎰で富栄養湖であるが，透明度８m，COD 1.3㎰，SS 1.3㎰，Chl－a 1.6 ppb，と貧栄養湖の現象を呈し，清浄であった。しかし，下層に夏季，無酸素層が生じていることから，以前の汚濁のなごりが残っている。

2.　久々子湖

久々子湖は，平均水深約１mであり，日本海の湖汐及び湖位の変化の影響を直接受け，塩素イオン濃度が１～15％と大きく変動する汽水湖であり，河川，農業排水からの栄養塩の負荷があり，T－N 0.48㎰，T－P 0.055㎰，COD 3.1㎰，SS 5.8㎰，Chl－a 16.5 ppb と富栄養化現象を呈している。しかし，夏季，海水の流入の影響により，淡水性或いは汽水性の植物プランクトンの増殖が阻害されると推測され，栄養塩濃度に比して生物現存量は小さい。

3.　水月湖

水月湖は，水深34mと深い湖であり，８～10mに塩分躍層を有する部分循環湖であり，流域からの栄養塩の負荷は少なく，大部分は三方湖から流入される。透明度2.2 m，COD 3.1㎰，SS 3.2㎰，Chl－a 13.2 ppb，T－N 0.4 ㎰，T－P 0.03㎰ であり中栄養湖に属する。しかし，塩分躍層下に栄養塩の高い水層が存在している為，躍層の乱れが一挙に植物プランクトンの増殖，アオコの発生という現象を起す危険性を持っている。

4.　菅湖

菅湖は地形的に，水月湖の副湖盆を形成し，水質も水月湖と同じ挙動を示している。

5.　三方湖

三方湖は淡水湖であり，平均水深1.3 mで浅く，流域からの栄養塩の負荷も三方五湖の中で一番大きく，透明度0.8 m，COD 5.4㎰，SS 21.6㎰，Chl－a 32.4 ppb，T－N 0.75㎰，T－P 0.089㎰

と三方五湖の中で最も富栄養化した湖沼であり，特に夏〜秋，植物プランクトンの増殖現象がみられ，pH 9.2と上昇し，SS 40ppm，COD 12ppm，Chl−a 50ppbと生物現存量も最大を示した。又，この湖内での内部生産は，リンよりも窒素により制限をうけていると考える。

以上，三方五湖の水質において，日向湖は貧栄養湖の現象を示して清浄であるが，他の四湖は富栄養化現象を呈しており，菅，水月，久々子，三方湖の順にこの傾向は著るしかった。

又，富栄養湖である，水月，菅，久々子，三方湖の内部生産の制限因子は窒素と推測された。

三方五湖の富栄養化機構の解明には，海水の流入，淡水の流出機構，躍層の挙動等，複雑な水理構造の解明，又躍層を介しての栄養塩の移行，湖内への負荷量，底泥からの回帰等，栄養塩の挙動及びプランクトンの動向，湖内の内部生産量等を検討しなければならないと考える。

Ⅶ 文　献

1) 川名　武　三方湖群の異常現象に就きて（第一報）水産研究誌　31　395（1936），（第二報）同誌 31　424（1936），（第三報）同誌 31　486（1936）

2) 菊地　健二　1926−1927年に於ける水月湖の水質の周年変化について　陸水誌　8，297（1931）

3) 川名　武　三方湖群の異常現象調査　福井県水産試験場事業報告　10，1（1938）

4) 山本　荘毅編　「陸水」　233　共立出版

5) 菊地　健三　水月湖に於ける植物性プランクトンの垂直分布に及ぼす溶存酸素の影響　陸水誌　1，32（1931）

6) 中村　充　etal　閉鎖性内湾における溶存酸素の収支機構について　農業土木試験場報告　12，185（1974）

7) 三方諸湖の観測結果と三方湖の鰻筒漁業について　福井県水産試験場報告書　昭和31年12月

8) 米谷　宏　湖水および底質中のガス分布　地質調査所月報　18(11)　731（1967）

9) 日向湖漁場環境調査報告書　福井県　昭和48年

10) 松山　通郎，西条　八束　Limological Studies of the Mikata Lake Group　陸水誌　34　165（1973）

11) 松山　通郎，西条　八束　Studies on Biological Metalbolism in a Meromictic Lake Suigetsu　J. Oceanog. Soc. Japan　27(5)　197（1971）

12) 松山　通郎　Organic Substances in Sediment and Settling Matter during Spring in a Meromictic Lake Suigetsu　J. Oceanog. Soc. Japan　29．53（1973）

13) 松山　通郎　Changes in Limnological Features of a Meromictic Lake Suigetsu during the Years，1926−1967　J. Oceanog. Soc. Japan　29．131　1973

14) 松山　通郎　Vertical Distributions of Some Chemical Substances in Surface Sediments of a Meromictic Lake Suigetsu　J. Oceanog. Soc. Japan 30　209　1974

15) 辻川　利雄　三方五湖の自然環境と水質変化動態について　仁愛女子短期大学紀要　7，103，1975

16) 環境庁委託業務結果報告書（湖沼水質管理指針策定調査）昭和56年　福井県

17) 前川　勉．etal　北潟湖の水質について　第1報　福井県公害センター所報　3，112（1973）（第二報）同誌　4　107（1974）　第3報　同誌　5，146（1975）　第4報　同誌　9，231（1979）

18) 前川　勉　etal　北潟湖の富栄養化に関する調査研究　未発表

19) Technicon Autoanalyser Ⅱ, Industrial Method, No 154 71W Feb 1973
20) Technicon Autoanalyser Ⅱ, Industrial Method, No 155 71W Jan 1973
21) 福井県気象年報（昭和56年） 福井地方気象台 福井県
22) 小山忠四郎 「生物地球化学」 P 230 東海大学出版会
23) 川上 誠一 etal 「宍道湖の汽水湖としての水質特性」 水質汚濁学会講演集, 188, 1982
24) 合田 健 編 「水環境指標」 227 思考社
25) 洞沢 勇 湖水の生産限界とクロロフィルa PPM 20, 6, 1977
26) 「湖沼の燐に係る水質目標について検討結果」 窒素，燐等水質目標検討会報告 昭和55年6月
27) 「湖沼の窒素に係る水質目標についての検討結果」 窒素，燐等水質目標検討会報告 昭和57年5月