

琵琶湖の富栄養化について

京都大学理学部 藤永太一郎

緒 言

琵琶湖のうち南湖（副湖盆）が富栄養湖の範疇に入った事を最初に指摘した（1970年）のは筆者である。われわれの研究室は名誉教授石橋雅義先生の御偉業海洋化学の研究を継ぐ一方名誉教授宮地伝三郎先生の琵琶湖生物資源調査研究に参画して陸水化学の研究を開始した。従って前者については36年、後者については14年の研究背景がある訳である。1960年頃の琵琶湖は透明度が10mをこえ、典型的な貧栄養湖であった。既に木浜の埋立が始まり、また大中湖干拓計画が進むなど今日の激しい環境破壊が緒についた時期であったが未だ湖水の汚染など考えられない美しい湖水であった。丁度木浜の埋立のために南湖が著るしく濁った事があったのを利用してチッ素とシリカを指標として湖水の循環の追跡する事ができた。その結果、南湖に存在する物質の3分の1は北湖にもどること、またその移動は比較的速やかであって南湖の汚染が全湖に行きわたるには半年しかかからない事などを明らかにした。

尚、これらの事実を基礎として当時企画されていた堅田湖峡ダム建設の危険を指摘したのであったがその後この計画は中止され、又調査も終了したので研究費は打ち切られた。筆者らの研究室ではダムが建設されればなおさらであるし、建設されなくても、5年にわたる総合調査を打切るべきでないとの研究室会議の総意にもとづいて最小限Ie-1（北湖）とNb-3（南湖）の2地点の春夏秋冬の4季における垂直分布分析は継続することとしたのである。

然るところ1969年春、京都市のほぼ全市の水道水にカビ臭が発生し市民からしきりに苦情がよせられるという事態が生じた。京大臨湖実験所、根来博士らはこの臭い水はシネドラ・ルンペンスなど湖水中の植物プランクトンの異常発生と関連していると述べられた。その後異臭の発生源はより小さい生物である放線菌が分泌するジオスミンによるものと同定されたが多分シネドラの大発生とジオスミン生成とは関連していると思われる。上述したようにこの間も定期観測を続けていた筆者らはたまたまこの時期の分析値を追跡しているうちにリンの異常増加に気付いたのであった。周知のように富栄養湖と貧栄養湖の境界はチッソ0.2 ppm, リン0.02 ppm（吉村信吉著 湖沼学）といわれている。チッソについては0.15 ppmとする人もあるが、いずれにしてもチッソについては南湖は常時0.2をこえており、北湖についても時折この値をこえる事があるにも拘らず、リンについては南北湖とも0.02をこえる事はかつてなかったのである。いいかえれば南北湖とリンが制限因子として働らいて貧栄養湖であったのが1969年を境に南湖は屢々富栄養湖の範疇に入ったとみてよい事象がみられるようになったのである。筆者はこの事を指摘すると共に、従って臭い水やプランクトンの異常増殖は一時的現象ではなくて今後も屢々おこり得るのではないかと述べた。不幸にしてこの予測は適中しその後引続いて生じたのである。1974年以降、然しながら、臭い水のおこることが少なくなり、水質もよくなったかのように主張する向も出てきた。中には水質の規制が効果をあらわしてきたと早計にものべる人も出ている。大自然の変化はそうのように簡単ではない。放線菌やプランクトンに移った栄養素は続いて水藻による吸収の結果、一時的に水質が小回復したかにみえる。然し南湖全体のチッ素、リンの蓄積は、僅かの濃度の上下を示しつつ、確実に増加の一途をたどっている、といってよいと思われる。いつの日か経常的に南湖は富栄養化し、従って上述の理由によって北湖もその運命を共にするという事になる。

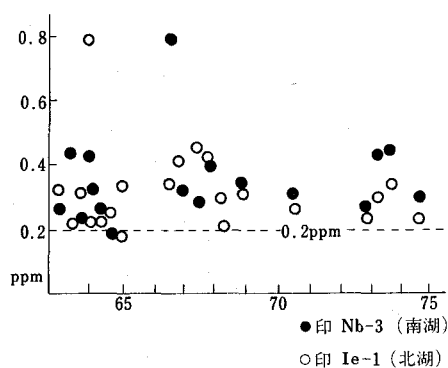


図1 チッ素の経年変化

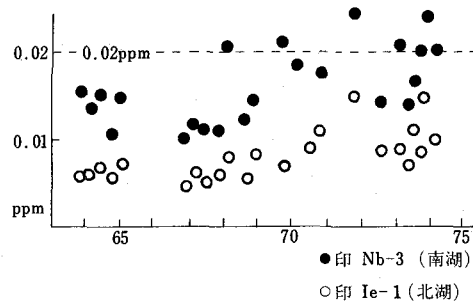


図2 リンの経年変化

さてチッ素とリンの経年変化は図1と図2に示すようなものである。これらの観測結果から次のような事がほぼ確実に結論される。

- (1) 何れの成分においても常に南湖の方が多く、より富栄養化が進んでいる。
- (2) チッ素に限って言えばここ10年間に目立って増加したとはいえない。
- (3) チッ素はむしろ干拓などの湖岸工事に対応して急増している。
- (4) リンは年と共に増加している。
- (5) 特に1968年以降階段的に増加し南北湖ともほぼ2倍になった。これによって南湖は富栄養湖となった。

ところで1968年頃から我が国のリンの輸入量は急増するが、それは合成洗剤の中にビルダーと称して多量のトリポリリン酸ナトリウムが加えられるようになったからであり、その為の輸入量は1970年に10万トンを超えている。琵琶湖の臭い水、富栄養化と時期を同じくして、瀬戸内海に赤潮が頻発することになった、これも同じ理由と考えられる。リンは肥料として農家が使うので農薬や肥料に由来すると主張する向もあるがチッ素が増えないでリンのみが増えること、田畑が少なく人口密度の高い背後地をもつ南湖に先ず著増すること、などから農薬や肥料が主役とは考えられない。

自浄作用機構と富栄養化

琵琶湖の周辺からカドミウム、水銀、クロム、ヒ素、アンチモンなどが多量に流入する。PCBもかつて多量に流入した。従って湖は間もなく死湖と化すだろうとよく言われる。その通りである。適切かつ早急に対策をたてなければ必ずその時がくる事は明らかである。ところが湖水を分析してみても重金属やPCBは極めて少ない。先述したようにリンや塩素などが漸増しているがこれらは毒成分ではないのでそれだけで汚染をいう事はできない。従って意図的な人は、科学者といわれる人達でも一部の人は心配はない、このままでもいいと死湖になるなど当分は考えられないと言う理由に使われる。そうでない事を知って頂くために以下にいわゆる自浄作用の一部機構を紹介して警告したい。この指摘は筆者が先日の国際環境保全科学会議（昭和50年11月20日京都宝池）で行ない Dr. Ohle も賛同のコメントを述べてくれたものである。結論的に言えば、重金属などによる湖水の汚染は漸増するのではなくて、自浄作用が急減すると共に画期的におこるものであるからである。

琵琶湖の水は驚くほど美しい。総溶存物質が今も北湖では50 ppm 前後である。数多くの河川が流入するが流入河川の水より湖水の方が美しい。つまり湖に入るとより美しくなる。この差はつまり沈積す

るのである。(実際にはそう簡単ではない)。

さて河川水には石灰岩や花崗岩の風化によって生じるカルシウム、ケイ素、アルミニウム、カリウムなどが溶け、或いはコロイドとして懸濁し湖に入るが、実験によってこれらは簡単には沈積しない事が明らかになった。ところで琵琶湖の湖底には鉄塩が湧出しているらしく、それが水酸化第二鉄の塊となって湖底に多数見出され、湖成鉄といわれているが、その生成は比較的新しく、現在も生成しつつあるようである。鉄は最初第一鉄イオンとして湖底に湧出するが底部でも70%以上の酸素飽和度を有する琵琶湖では直ちに溶解度の小さい水酸化第二鉄となって析出し沈殿しはじめる。この水酸化第二鉄は無機イオンをよく吸着し、カルシウム、アルミニウムはもとよりカドミウムや鉛なども吸着して共同沈殿するし、また、ケイ素もこの第二鉄、マンガ、アルミニウムなどの沈殿を楔として重合沈積する。

一方、リン、チッ素、ケイ素など栄養成分が増加し湖が富栄養湖化するとプランクトンが著増し、また湖辺よりヘドロなどが入って有機物が増加するとその分解過程において酸素を吸収し、湖水殊に湖底水において酸素飽和度が減少し遂には無酸素状態となり酸化電位が著るしく低下する。この状態になると上述の水酸化第二鉄の沈積がおこらなくなり、従ってアルミノシリケートの沈殿も生じ難くなるばかりでなく、むしろ沈積物が再溶解し吸着重金属をすべて放出するようになる。なお、有機物の分解によって酸性になると共に生成する有機酸やアミン、アンモニアなどの錯形成のためにさらに溶出を促進する事になる。すなわち湖沼河川は富栄養化や汚染が進行すると、ある限界において突然自浄作用が停止するのみでなく反対に再溶出まで促進するような効果を生む、その際透明度も減少するので光作用も減少しこの死滅過程は突然といってよい程急激に現われる。つまり富栄養化はその過程への移行を示す最初の階段であるといつてよい。この意味において琵琶湖はこのまま放置すれば死への途を歩んでいる事になるのであり、富栄養化を単純に看過できぬ所以であるという事ができる。

本講においては富栄養化と汚染急進の機構を評論する。

参 考 書

- (1) 藤永太一郎編「琵琶湖の動態」時事通信社(1974)
- (2) 藤永太一郎編「琵琶湖の開発と汚染」時事通信社(1975)
- (3) 「びわ湖生物資源調査団中間報告」(1966)

附録図表〔参考書(1)のうち藤永著「琵琶湖の静態」より抄録〕

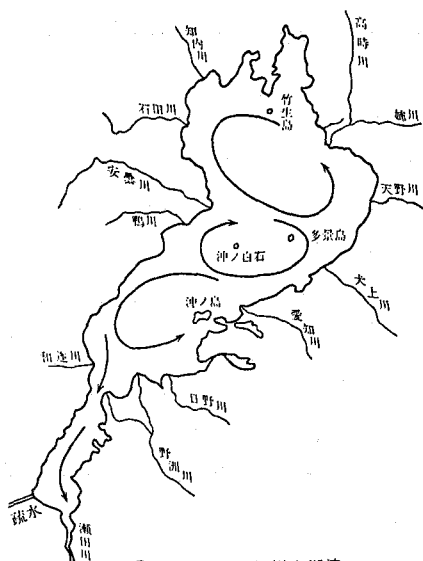


図3 琵琶湖の河川と湖流

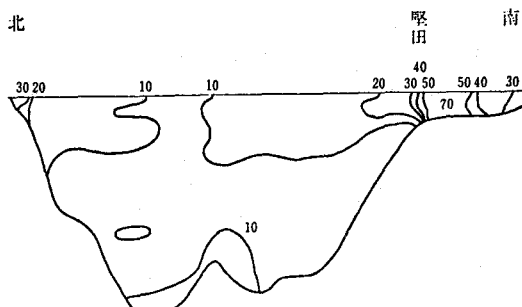


図4 南湖から北湖へのケイ酸の移動
(1963年7月・単位はマイクロモル濃度)

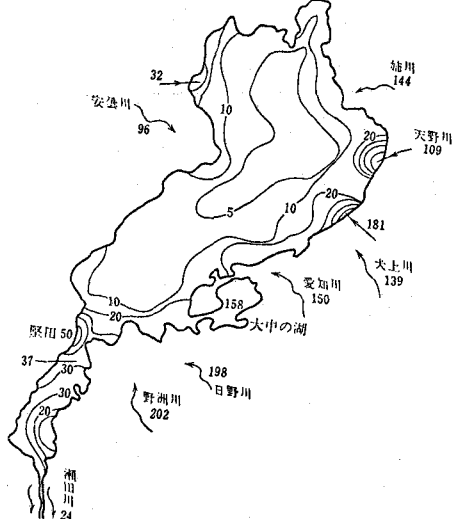


図5 ケイ酸の表面水分布
(1963年5月・単位はマイクロモル濃度)

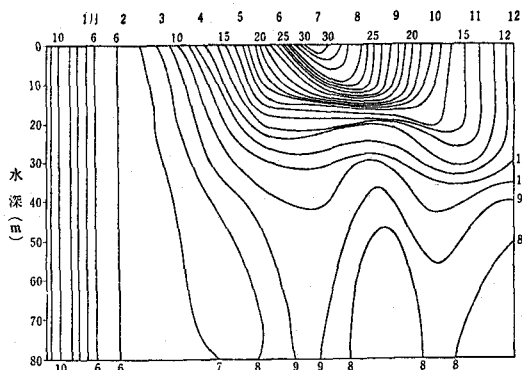


図6 琵琶湖の水温の季節変化
(森川光郎博士ら・1966年)

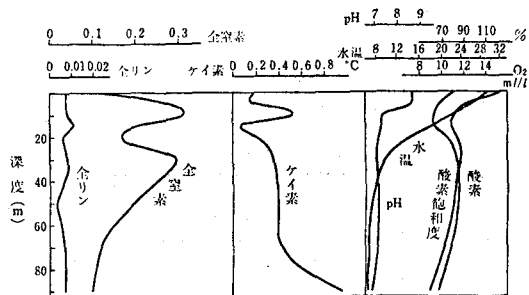


図7 夏季における化学成分の垂直分布
(1964年7月25日・全リン、ケイ素の単位: ppm)

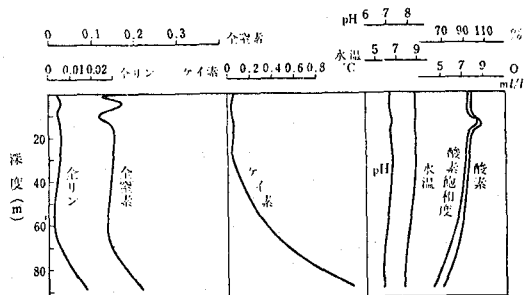


図8 冬季における化学成分の垂直分布
(1965年1月16日・全リン、全窒素、ケイ素の単位: ppm)

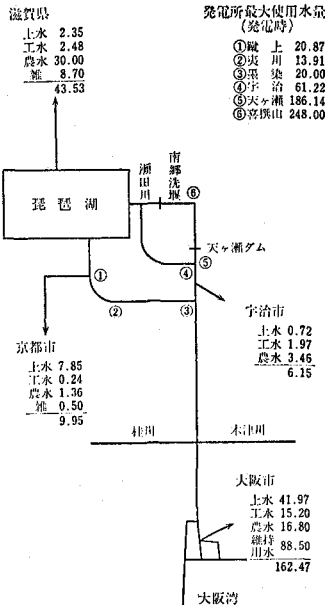


図9 琵琶湖・淀川水系の水利状況(単位:トン/毎秒)

表1 世界の主な湖

湖名	大きさの単位	面積 (km ²)	最深 (m)
スベリオル湖	1	83,300	307
ミシガン湖	4	57,850	265
ヒューロン湖	3	59,510	223
エリー湖	10	25,820	64
オンタリオ湖	12	18,760	225
ビクトリア湖	2	68,800	79
バイカル湖	5	33,000	1,523
琵琶湖	?	681	104

表2 代表的な湖の水質 (単位:ppm)

湖名	総塩分量	塩素
琵琶湖	34	7
グレート・ソルトレイク	203,490	55,480
死海	192,150	68,180
カトグエー湖	310,000	36,670
諏訪湖	93	6
野尻湖	54	10
田沢湖	29	9
海洋水	34,480	18,970

(注) 海洋水は塩素=19.0% (パーミル=千分比) のときの値。

表3 河川水の水質 (単位:ppm)

名称	蒸発残渣	カルシウム	ケイ酸	塩素
野洲川	57.5	7.1	11.2	4.8
日野川	72.3	8.5	14.5	6.0
愛知川	47.5	7.8	10.0	3.1
大上川	63.2	13.6	8.9	3.4
芹川	106.2	31.0	6.8	4.0
天野川	112.8	30.1	8.1	5.0
姉川	52.1	9.5	9.5	2.2
知内川	42.2	4.0	11.8	5.4
石田川	37.8	4.3	7.1	5.3
安曇川	39.5	4.4	8.1	3.7
鴨川	37.2	3.2	13.2	3.1
和邇川	54.7	7.7	14.7	2.9
琵琶湖水	50.8	8.2	4.2	5.0
宇治川	50.7	8.1	2.8	5.5
宇治川	46.5	7.0	4.5	4.4

(注) 小林純博士の好意による。琵琶湖は大津市での値。ケイ酸はSiO₂の値。

表4 琵琶湖の水質

(単位:指定以外はppm)

	北湖		南湖	
	夏	冬	夏	冬
水温 (°C)	30→7.0	7.0→7.0	25	5
pH	8.5→7.0	7.0→7.0	8.5	8.0
溶存酸素 (mg/l)	7.5→6.5	7.5→6.5	6.0	8.5
酸素飽和度 (%)	120→70	90→70	110	95
全窒素	0.25→0.10	~0.15	0.25	0.30
アンモニア窒素	0.07→0.04	0.10→0.08	~0.10	~0.08
硝酸窒素	~0.025	0.02→0.04	~0.02	~0.02
亜硝酸窒素	~0.002	0	~0.002	0
有機窒素	~0.10	~0.02	~0.10	~0.20
全リン	~0.008	~0.008	~0.01	~0.01
リン酸リン	0.006	0.006	0.008	0.008
有機リン	0.002	0.002	0.002	0.002
ケイ素	0.3→0.5	0.1→0.5	0.5	0.6
カルシウム	11→9	~10	10	10
塩素	5.5	5.0	6.0	6.0
CO ₂	1.0	1.0	1.5	1.5
鉄	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
アルカリ度 (mmol/l)	0.55	0.55	0.55	0.55

(注) 1962年から65年までの平均値。→印は表面から深部への変化を示す。

表5 海水の平均組成 (単位:ppm)

塩素	18,980	リチウム	0.05
ナトリウム	10,556	バリウム	0.05
硫酸	2,649	モリブデン	0.015
マグネシウム	1,272	ヒ素	0.015
カルシウム	400	アルミニウム	0.01
カリウム	380	亜鉛	0.005
重炭酸	140	鉄	0.005
臭素	65	銅	0.003
ホウ素	26	マンガン	0.003
ストロンチウム	13	鉛	0.002
ケイ素	2	ウラン	0.002
フッ素	1	銀	0.0003
		カドミウム	0.00008
窒素	0.5	クロム	0.00006
ルビジウム	0.2	水銀	0.00003
リチウム	0.12	金	0.000001
ヨウ素	0.05	ラジウム	10 ⁻¹⁰

(注) この表は塩素=19.0%の海水成分を示している。石橋雅義ほかによる。