

琵琶湖水質の12年の変遷*

松 井 由 廣**

緒 言

滋賀県立衛生環境センターでは、琵琶湖水質調査を昭和41年度から継続して実施している。本調査の特徴は、琵琶湖の数多く(48)の定点の表層水を、春夏秋冬の年4回ないし春秋の年2回、化学分析を中心として調査していることであり、その測定結果を、「琵琶湖水質調査報告書」として報告している。しかし、その報告書は測定結果の平均値を求めることに主眼があり、琵琶湖の陸水学的な考察はほとんどなされていない。最近の琵琶湖は、プランクトンの異常発生に見られるように大きく変動し、前途を不透明なものにしている。筆者は、このような琵琶湖の状態を記述するために、「琵琶湖水質調査報告書」の測定結果の活用を試み、若干の知見を得たので報告する。

1. 調査方法

(1) 調査回数および時期

南湖、瀬田川は春夏秋冬の年4回、北湖は春秋の年2回で、それらの時期は次のとおりである。

春季	5～6月
夏季	8月
秋季	10～11月
冬季	1～2月

(これと平行して、3定点について水深別水質調査を年4回実施している)

(2) 調査定点

北湖28定点、南湖19定点、瀬田川1定点、合計48定点で、定点の設定は、琵琶湖図面上に東西に横断する16ラインを、主な河川河口と都市沿岸とが含まれるようにして、ほぼ等間隔に引き(北湖9ライン、南湖7ライン、そのライン上に東岸、中央、西岸の3定点を設けた。ただし、北湖の今津一長浜ラインのみ4定点、南湖の粟津および瀬田川の定点は中央部に一定点を設けた。なお沿岸からの距離は、北湖では約500m南湖では約100mである。

(3) 調査項目

天候、水色、気温、水温、水深、透明度、色相、臭気、pH、溶存酸素、生物化学的酸素要求量(BOD)、化学的酸素要求量(COD)、浮遊物質(SS)、大腸菌群数、アンモニア性窒素、亜硝酸性窒素、硝酸性窒素、ケルダール法による総窒素、全窒素、リン酸イオン、全リン、塩素イオン、メチレンブルー活性物質、クロロフィルa, b, c

これらの調査方法は、12年間に少しずつ変遷し、現在のような形態をとるに至っている。

2. 調査結果と考察

(1) 主要項目の12年間の変化

調査項目は、調査開始当初より行なった項目と、数年前に新たに加わった項目とに分けられる。12年間継続して調査した項目を主要項目とし、表1にその各年次別の平均値を示す。

これらの平均値の変化は、琵琶湖水質の変化と、密接に対応している。一般に、昭和46～48年に水質は悪化し、49年以降回復し、昭和52年度に再び悪化したといわれている。このような動きは透明度、COD、およびBODの平均値の変化によく表われている。これらの項目は昭和46～48年にピークに達し、昭和52年に再び増加(透明度は低下)した。

しかし、このように数値を表面的に取扱うことには、問題点が多い。透明度、COD、BOD、SSなど、多くの水質調査項目は、水の状態を知る上で有効であるため、古くから採用されている。だが、その指標の真の意味を理解しなければ、誤まった水質の認識しかできないことになる。透明度は表層における光の透過性を測定するものであり、CODは過マンガン酸カリウムなどの酸化剤

* The Transition of Water Quality in Lake Biwa for Twelve Years

** Yoshihiro MATSUI(滋賀県立衛生環境センター) The Environmental Pollution Research Center of Shiga Prefecture

表1 年次別主要項目平均値(41~52年度)

水 域	項目 年次	PH	透明度 m	COD ppm	BOD ppm	SS ppm	大腸菌群数 MPN 100ml	NH ₃ -N ppm	cLイオン ppm	DO飽 和率%
総平均	41	7.81	4.3	0.87	0.82	3.7	860	0.011	7.9	99
	42	7.94	3.7	0.91	0.97	3.8	100	0.015	7.6	101
	43	7.75	3.9	1.04	0.77	3.6	370	0.020	7.6	99
	44	7.93	3.2	1.01	1.08	2.4	450	0.026	8.1	101
	45	7.70	3.3	1.03	1.08	4.7	340	0.028	7.7	103
	46	8.18	2.8	1.28	1.41	4.8	460	0.029	7.9	107
	47	8.21	2.9	1.22	1.18	4.7	690	0.045	8.3	108
	48	7.98	3.1	1.11	1.16	4.6	440	0.041	—	104
	49	8.03	3.6	1.03	1.16	5.5	360	0.059	8.3	103
	50	7.88	3.7	1.02	1.21	3.3	180	0.015	7.9	104
	51	8.06	3.8	1.01	1.22	2.9	720	0.011	8.0	107
	52	8.02	3.1	1.21	1.34	3.2	990	0.025	8.2	104
北湖	41	7.89	5.8	0.67	0.59	1.1	800	0.002	7.7	99
	42	8.07	5.1	0.73	0.69	2.1	37	0.000	7.4	102
	43	7.93	5.4	0.83	0.45	1.6	96	0.000	7.1	102
	44	8.17	4.1	0.77	0.58	0.9	27	0.004	7.7	102
	45	8.02	5.8	0.74	0.47	1.3	28	0.006	7.2	104
	46	7.98	4.3	0.93	0.95	1.9	45	0.017	7.8	106
	47	8.39	4.2	1.08	0.78	2.1	17	0.003	7.8	100
	48	8.07	5.1	0.86	0.68	1.5	60	0.002	—	104
	49	7.95	5.5	0.87	0.74	1.4	56	0.037	7.9	105
	50	7.81	5.7	0.88	0.86	1.2	100	0.002	7.4	103
	51	7.95	5.7	0.77	0.84	1.4	250	0.006	7.6	107
	52	7.97	4.6	1.18	0.99	1.9	980	0.000	7.4	104
南湖	41	7.68	1.9	1.19	1.18	6.0	980	0.025	8.1	99
	42	7.77	1.8	1.15	1.33	6.2	190	0.035	7.9	101
	43	7.50	1.6	1.32	1.22	6.6	780	0.049	8.2	96
	44	7.76	1.9	1.19	1.52	3.1	780	0.042	8.4	101
	45	7.47	1.9	1.24	1.53	8.0	570	0.044	8.1	102
	46	8.32	1.8	1.55	1.76	6.9	760	0.038	8.0	108
	47	8.10	2.0	1.33	1.45	6.7	1,100	0.077	8.7	107
	48	7.91	1.8	1.30	1.51	6.8	710	0.070	—	105
	49	8.11	2.2	1.14	1.44	8.4	570	0.075	8.6	102
	50	7.93	2.3	1.12	1.46	4.7	220	0.025	8.2	105
	51	8.15	2.5	1.18	1.47	4.0	820	0.014	8.3	107
	52	8.06	2.0	1.32	1.58	4.1	1,000	0.043	8.8	102

により酸化される水中の被酸化性物質の量を要求酸素量で表現するものである。このような指標を、たとえば「透明度の低い水は汚ない。」とか、「CODの低い水は美しい。」と一義的に思い込むのは適切でない。そのように信じている者が、透明度とCODがともに低い水に遭遇した場合、説明に苦慮することになる。CODの過マンガン酸カリウム法では、水中の全有機物が酸化されるわけではなく、比較的酸化されやすい一部の有機物のみが酸化される。ゆえに、酸化されにくい有機物がほとんどを占める水、つまりプランクトンが大繁殖した水などでは、このようなことはよく起こる。透明度とCODを例に引いたが、あらゆる指標の間でこのようなことは起こりうる。

たとえば、CODとBODの経年変化を表1の数値を使って図1にグラフにして示す。この図より、CODとBODは、北湖では一貫して右上りの増加を示しているのに対し、南湖では昭和46年までやや増加の傾向であったが、その後安定している。つまり、年度ごとに数字の増減を見て水質の良し悪しを判断せずに、全体的な流れ

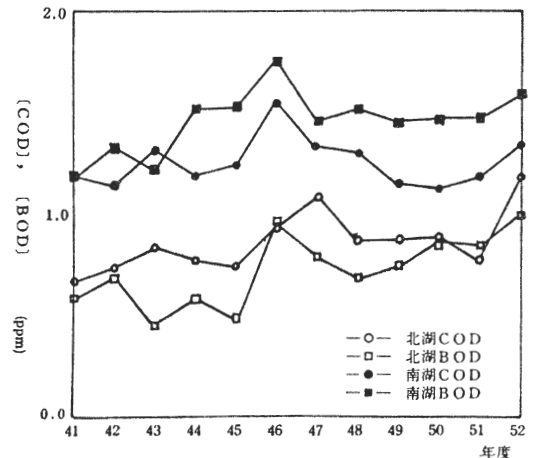


図1 COD, BODの経年変化

を把握することが大切である。次に、CODとBODの関係を図2に示す。この図より、CODが増加すればBODも増加するという関係は、北湖の水と南湖の水と

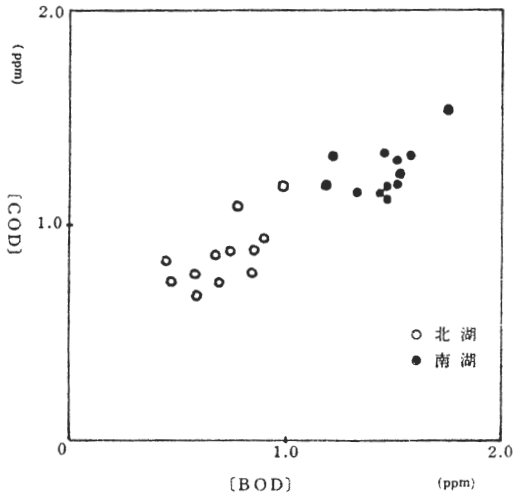


図2 CODとBODの関係

を比較する場合には有効であるが、北湖あるいは南湖それぞれの水域内で比較する場合成立が困難となる。このような関係は、あらゆる調査項目の間で存在する。再び

表1の平均値の変遷を考察してみる。これらの項目のなかで春夏秋冬の平均値を求めることが無意味なのは、pH、大腸菌群数、DO飽和率、Clイオンである。これらの項目は、変化の速度が大き過ぎるとか、ほとんど変化がないなどの理由により、琵琶湖のおおよその値はこの程度であるという意味しか持たない。なかでも、pHとDO飽和率は季節変化と生物活動に密接な関係にあり、これらの項目は水質の個々の事象について考察するためのものである。水質の良し悪し(有機物濃度の増減)を過去と比較して計るには、透明度、COD、BOD、SSなどが有効である。

(2) 窒素およびリンの変化

琵琶湖の富栄養化の程度を知るために、昭和44年度から窒素とリンの測定が開始された。表2に、それらの測定結果を示す。表2より、北湖では、窒素が少しずつ増加の傾向にあり、それはケルダール法総窒素の増加でなく硝酸性窒素の増加によるものであることがわかる。北湖の全リンは、約0.01ppmで安定している。また南湖

表2 年次別富栄養化項目平均値(44~52年度)

		NO ₂ -N	NO ₃ -N	Kj法総N	全N	無機リン酸		全P
		ppm	ppm			PO ₄ ³⁻ として	Pとして	
北湖	44	—	—	—	—	—	—	—
	45	0.001	0.05	0.14	0.19	0.006	0.002	—
	46	0.002	0.05	0.18	0.23	0.004	0.001	0.012
	47	0.002	0.05	0.18	0.23	0.003	0.001	0.010
	48	0.002	0.07	0.15	0.22	0.008	0.003	0.010
	49	0.004	0.07	0.16	0.24	0.004	0.001	0.010
	50	0.003	0.10	0.19	0.29	0.009	0.003	0.008
	51	0.008	0.12	0.16	0.29	0.003	0.001	0.011
	52	0.001	0.12	0.15	0.27	0.003	0.001	0.009
南湖	44	—	0.02	0.31	0.34	0.023	0.008	—
	45	0.004	0.10	0.35	0.45	0.018	0.006	—
	46	0.005	0.09	0.36	0.45	0.020	0.007	0.027
	47	0.003	0.08	0.40	0.48	0.039	0.013	0.031
	48	0.002	0.09	0.33	0.42	0.012	0.004	0.027
	49	0.003	0.09	0.38	0.47	0.015	0.005	0.023
	50	0.005	0.14	0.38	0.53	0.023	0.008	0.027
	51	0.003	0.12	0.34	0.46	0.019	0.006	0.025
	52	0.002	0.10	0.33	0.42	0.022	0.007	0.025

表3 窒素・リンの年次別季節変化

年度 季節	47			48			49			50			51			52			53						
	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬	春				
N, P	0.06	0.10	0.04	—	0.12	0.01	0.01	0.16	0.10	0.02	0.05	0.12	0.13	0.03	0.08	0.14	0.17	0.00	0.08	0.19	0.15	0.00	0.09	0.18	0.10
NO ₃ -N (ppm)	0.24	0.09	0.08	0.19	0.07	0.02	0.05	0.21	0.03	0.01	0.09	0.22	0.18	0.05	0.12	0.22	0.14	0.00	0.10	0.23	0.05	0.00	0.08	0.26	0.08
Kj-N (ppm)	0.23	0.17	0.13	—	0.16	0.16	0.14	0.14	0.16	0.23	0.16	0.12	0.17	0.26	0.21	0.09	0.18	0.24	0.15	0.11	0.13	0.13	0.18	0.14	0.28
T-N (ppm)	0.29	0.27	0.17	—	0.50	0.27	0.28	0.27	0.57	0.32	0.30	0.31	0.63	0.35	0.28	0.24	0.32	0.43	0.33	0.27	0.38	0.31	0.37	0.25	0.43
T-P (ppm)	0.75	0.43	0.31	0.41	0.56	0.29	0.33	0.48	0.61	0.33	0.39	0.53	0.82	0.40	0.42	0.46	0.47	0.43	0.43	0.50	0.26	0.13	0.27	0.31	0.38
	0.012	0.008	0.008	—	0.011	0.009	0.009	0.009	0.011	0.011	0.008	0.011	0.010	0.012	0.005	0.012	0.011	0.015	0.011	0.006	0.007	0.009	0.011	0.005	0.008
	0.062	0.023	0.021	0.018	0.035	0.027	0.025	0.021	0.024	0.024	0.023	0.023	0.028	0.034	0.021	0.026	0.018	0.028	0.019	0.034	0.027	0.026	0.035	0.014	0.039

では、北湖と異なり窒素・リンとも安定な結果が得られ、硝酸性窒素は約 0.1ppm、ケルダール法総窒素は約 0.35ppm、全窒素は 0.45ppm、全リンは約 0.25ppm である。以上を要約すれば、この平均値で見ると、ここ数年の琵琶湖の窒素・リンの動きは、北湖における硝酸性窒素の増加のみが特徴的であり、他にきわだった変化はないといえる。

このことを詳しく調べるために、窒素・リンの年次別季節変化を表 3 に示す、この表より、一般に硝酸性窒素は夏と秋に低く、冬に最も高くなるのがわかる。同様に、ケルダール法総窒素は春と夏に高く、冬に低下する。また全窒素は、春と冬に高くなる。全リンは、一年を通じてほぼ安定であるが、50年の秋と51年、52年の冬にきわめて低い値を示している。北湖におけ窒素の増加は、すべての季節で少しずつ増加していると考えられ、特にある季節に集中しているわけではない。

窒素とリンは水中の生物活動と密接な関係があり、それらの濃度は湖沼の富栄養化の基準として重要な意味を持つ。貧栄養湖と富栄養湖の境界は窒素で 0.2ppm、リンで 0.02ppm とされている²⁾が、琵琶湖北湖がリンについて境界値以下であり、他はこれを上まわっている。

だが、水中の生物活動を支配する因子を調べるために窒素やリンの濃度のみ注目するのは誤っている。生物学の理論で、何種類かの栄養塩のうちある一種が生物の必要量を下まわる場合、その生物の成長がそこなわれることが知られている。しかし、栄養塩の必要量は個々の生物ごとに異なり、琵琶湖のように 100 種類以上のプランクトンが存在する湖沼では、このような理論はあてはまらない。この意味で、富栄養化の限界因子は、窒素かリンかという議論は無意味である。窒素が多くリンが少なければ、そのような環境を好むプランクトンが増殖し、窒素が少なくリンが多い場合も、なんらかのプランクトンが増殖するであろう。このことは、自然界でゆるされる範囲内でのアンバランスであれば、十分に起りうる。

窒素とリンはその濃度のみでなく、その比率を調べる必要がある。図 3 に、窒素とリンの比の年次別季節変化を示す。この図より、窒素とリンの比は、昭和49年度まで安定しているが、昭和50年以降大きく上昇する現象が見られることがわかる。これは、表 3 より、窒素の増加も少し関係しているが、比を増加させる効果はリンの減少によるところが大きい。このように窒素とリンの比率の上昇は、プランクトン相に大きな影響を与えるものと考えられる。琵琶湖では、昭和52年と53年の春にウログレナというプランクトンの異常発生が起こった。このプランクトンは集積して赤潮現象を引き起こす。このプラ

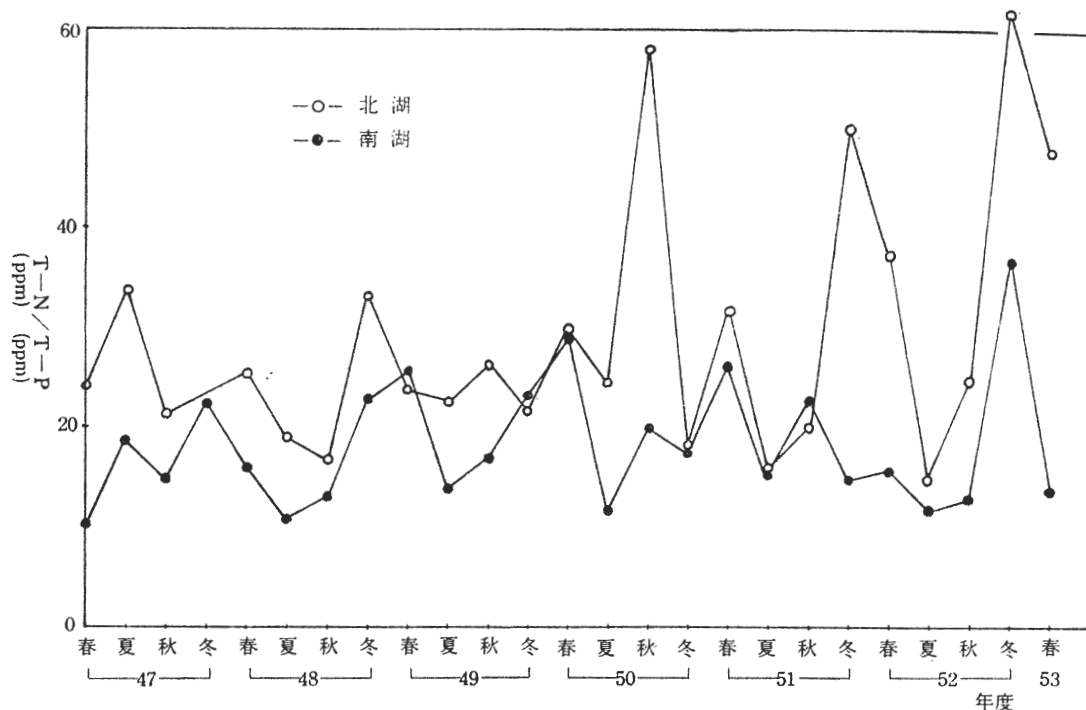


図3 窒素とリンの比の年次別季節変化

ンクトンが多量（1cc 中数百群体）に存在する水は、リンが約0.01~0.02ppm、窒素は0.5~1ppmを含んでいる³⁾。この値は、通常北湖の値と比較して、リンで1~2倍、窒素で2~4倍の量である。このことは、で1グレナが窒素過多の環境を好み、かつ、ウログレナ自身の窒素とリンの比率が高いことを意味する。ウログレナは、異状繁殖する約一週間のうちに、水中の硝酸性窒素（0.15ppm程度）を0にする³⁾。硝酸性窒素の還元力が非常に強いといえる。赤潮現象の水は、なまぐさ臭を発生し、アンモニア性窒素を多量（0.1ppm以上）に含む。このプランクトンは、窒素過多の環境に適合しているものと考えられる。さらに、ウログレナは、琵琶湖水中の脱窒能力を持っていると考えられる。これはウログレナが繁殖して消えた後の湖水は窒素とリンの比率が琵琶湖の平常値を取り、リンと比較して窒素が大きく減少していることを見れば推定できる（表3、図3参照）。

このように、琵琶湖水中の窒素とリンは、その濃度のみでなく、比率を調べるにより有効な知識を得ることができる。比率の大きな上昇が窒素の増加よりもリンの減少であることは先に記したが、この原因は不明である。ただ琵琶湖は、元来リンを不溶解性にする作用が強く、その作用がなんらかの原因でさらに強められた結果であることが推定できる。冬季の水の循環を詳しく調

べればわかるかも知れない。

(3) 琵琶湖水質の変遷とその原則

琵琶湖の水質は、さまざまな調査項目において、以上のような経過をたどっている。この変遷は、一定の自然界のルールに従っている。このルールは、質量・エネルギーの保存則とかエントロピー増大の原則とかの熱力学の基本的な原則に従っている。琵琶湖水について言えば、物質が流入した場合、それが流出（沈殿・揮散を含む）しないうちは湖水中にとどまっておき、太陽光線が入射すれば、植物性プランクトンが繁殖し水温も上昇し、寒くなれば熱を放出して湖水は冷える。これは極めて常識的な事ばかりである。しかし、このような常識的な事でも、少し表現方法が異なれば、われわれの理解を超えたような気にさせられる。琵琶湖水質の12年間の測定結果、あるいは琵琶湖で起こったさまざまな事象を見て、「予期せぬこと」とか「考えられない」とか言うのは誤りである。どのような事象でも、原因があり、結果がある。そして、それらは自然の原則から一歩も外へは出ていない。「系は安定な方向に進む」という自然の原則から見れば、自然界で起こったすべての現象は、系が安定を保つためにとった行動なのである。琵琶湖でのプランクトンの異常発生は、この意味では別に異常でもな

んでもなく、琵琶湖でそのようなプランクトンが大繁殖することが、琵琶湖水質を安定にするために必然的な現象で、そうなるのが当然であるといえる。

琵琶湖水質の測定結果を見る場合でも、このような思考方法で見べきである。あらゆる測定結果を先入観を持たずに受けとめ、その測定を行なった時点では、その値が琵琶湖にとって最も安定であると考えなくてはならない。なぜそのような状態が安定なのかを考えることが、水質を正確に認識することと同一である。その安定の位置を変えるのは、物質の出入と、気象条件などのエネルギーの出入と時間の流れしかない。これを注意深く調べる必要がある。

琵琶湖水質の12年間の変遷は、物質的には、北湖を中心として、窒素の増加とそれともなう有機物の増加が代表しているように、富栄養化の道を少しずつたどってきた歴史である。エネルギー的には、この間に、気象の変動が例年になく激しく、さまざまなインパクトを水質に与えているものと考えられる⁴⁾。

結 言

以上の琵琶湖水質調査は、表層水のみのもので、しかも年4回という限られた回数での測定データを基にしている。しかし、活用方法を考えれば、少しでも琵琶湖水質の理解は深まる。COD や BOD さらに窒素やリンの変遷の

考察から、琵琶湖は、特に北湖において有機物濃度の上昇が引き続き起こっている。琵琶湖はその自浄作用が強い。われわれが琵琶湖を守るためになにをすれば良いかを考える時間はかなりあるというものの、すでにそのほとんどを消費している。プランクトンの異常発生は、われわれに積極的に行動を起こすことを促がしているようである。

琵琶湖を守るには、下水道の整備などと合わせ、琵琶湖の自浄作用を研究し、人間の手でそれを助力する方法を追求する必要がある。琵琶湖の水中や底泥では最も理想的な自浄作用が働いている。その解明を少しずつでも前進させることが、琵琶湖水を保全することにつながる。何十年先をも見通した琵琶湖水の保全の問題は、どうしても解決せねばならないのである。

—引用文献—

- 1) 「琵琶湖水質調査報告書」(昭和52年度): 滋賀県立衛生環境センター
- 2) 「湖沼学」: 吉村信吉
- 3) 未発表データ: 前河孝志, 大野達雄, 松井由廣, 中村敏博
- 4) 琵琶湖水質のエネルギー論的解析「滋賀環境セ所報」71~94, 1976, 松井由廣, 野村潔