

琵琶湖の富栄養化と低酸素化

京都大学化学研究所
宗林由樹

琵琶湖は、面積 674 km² の日本最大の湖である¹⁾。東西幅が狭い堅田-守山間を境に、北湖と南湖に分けられる。大きな北湖は最大水深 104 m、平均水深 43 m に達するが、小さな南湖は平均水深 4 m である。琵琶湖は、断層によって形成された地溝湖である。四百数十万年前に伊賀盆地あたりで古琵琶湖が生じ、次第に北に移動したと考えられている。現在の琵琶湖は、およそ 40 万年前に現れた。琵琶湖の生物は、植物 491 種、動物 595 種に及び、このうち 54 種は固有種である。このようにきわめて豊かな生物多様性は、琵琶湖の大きさと歴史の長さゆえに生じたと考えられている。

富栄養化

琵琶湖の水質汚染と富栄養化は昭和時代に急速に進行した。1960 年代に農薬汚染による魚の大量死、富栄養化が原因と考えられる水道のろ過障害と異臭味、コカナダモの繁茂などが発生した。1977 年に淡水赤潮、1983 年にアオコ(水の華)、1989 年にピコプランクトンの異常繁殖が初めて観察された。現在、北湖は中栄養湖、南湖は富栄養湖となっている。

水質のデータで最も古くから記録があるのは、透明度である。北湖の透明度は、1920 年代までは 8~10 m であったが、その後徐々に低下し、現在では 4~6 m ほどである。南湖では 2 m くらいである。1960 年代、化学的酸素要求量(COD)と生物化学的酸素要求量(BOD)が顕著に増加した。これらの結果は、富栄養化の進行による植物プランクトン現存量の増加を反映していると考えられる。

富栄養化の原因物質である窒素とリンが湖水中でどのように変化したかを見ることは、実は難しい。その原因の一つは、これらの元素がさまざまな化学種として存在することである。窒素は、硝酸、亜硝酸、アンモニアなどのイオンのほか、溶存有機化合物、粒状有機化合物などとして存在する。リンも、リン酸イオンのほか、溶存有機化合物、粒状有機化合物などの形をとる。もう一つの原因は、窒素やリンの溶存無機化

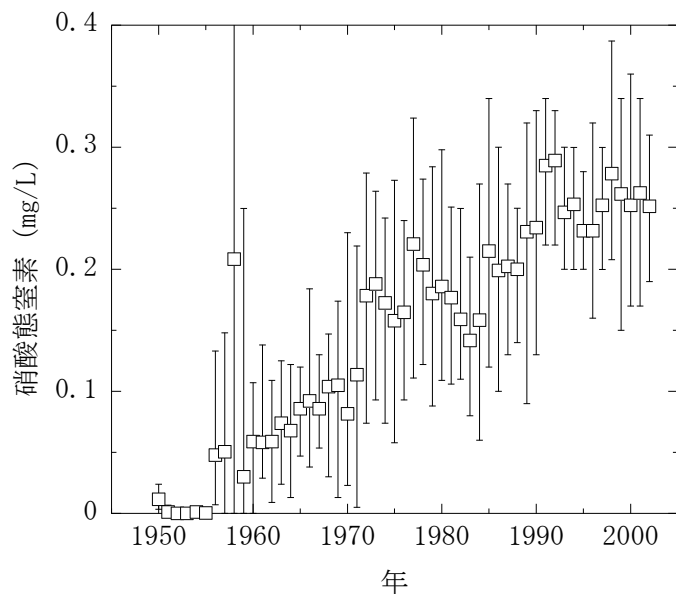


図1 北湖の高島-彦根線上水深 80 m 地点の湖底上 1 m における硝酸態窒素濃度の経年変化。□は各年の平均値、エラーバーは最大値と最小値を示す。滋賀県琵琶湖・環境科学研究センター熊谷道夫博士のご厚意による。

表1 琵琶湖の溶存元素収支

	Mg	Al	Si	P	Ca	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Zn	As	Sr	Y	W	U	
現存量																	
mol	2.5E+9	1.8E+5	7.6E+8	1.8E+6	7.9E+9	5.2E+4	1.9E+4	1.0E+5	1.8E+5	9.2E+4	6.2E+4	2.6E+5	1.4E+7	3.2E+3	1.1E+3	1.8E+3	
供給量																	
雨	mol/y	3.1E+6	5.2E+5	9.5E+5	4.9E+5	1.0E+7	1.1E+4	1.8E+3	1.1E+5	2.7E+5	9.1E+3	2.5E+5	3.7E+3	2.0E+4	4.0E+2	1.2E+2	1.6E+1
河川	mol/y	3.1E+8	1.7E+6	4.1E+8	3.1E+6	9.4E+8	3.8E+4	7.4E+3	1.9E+6	1.2E+6	5.4E+4	6.7E+4	4.2E+4	1.8E+6	1.8E+3	4.7E+2	4.2E+2
雨+河川	mol/y	3.1E+8	2.2E+6	4.1E+8	3.6E+6	9.5E+8	4.9E+4	9.2E+3	2.0E+6	1.5E+6	6.3E+4	3.2E+5	4.6E+4	1.8E+6	2.2E+3	6.0E+2	4.4E+2
流出量	mol/y	4.5E+8	1.2E+6	1.2E+8	5.6E+5	1.4E+9	2.0E+4	3.7E+3	1.6E+5	3.7E+5	2.3E+4	2.8E+4	5.7E+4	2.8E+6	1.4E+3	4.7E+2	8.2E+2
供給量-流出量	mol/y	-1.4E+8	9.9E+5	2.9E+8	3.0E+6	-4.8E+8	2.9E+4	5.5E+3	1.8E+6	1.1E+6	4.0E+4	2.9E+5	-1.1E+4	-9.8E+5	8.2E+2	1.3E+2	-3.9E+2

E+n は $\times 10^n$ を意味する

学種は、有光層の植物によって速やかに取り込まれるので、表層水には蓄積されないことである。窒素やリンの長期的な変動は、むしろ北湖の深層水で見出される。図 1 は、北湖の高島-彦根線上水深 80 m 地点の湖底上 1 m における硝酸態窒素濃度の経年変化を示している。これは、滋賀県水産試験場が半世紀以上にわたり、原理的に同じ方法で一貫して測定した貴重なデータである。酸化的な北湖深層水では、硝酸イオンは熱力学的に安定であり、窒素の主要な化学種である。1950 年代前半の異常に低い値、1958 年の異常に高い値は別として、平均濃度が 50 年代末の 0.05 mg/L から 1990 年代の 0.26 mg/L まで増加したことがはっきりと読み取れる。リンについては、1963 年から 81 年にかけて、北湖水柱の全リン濃度が継続観測された²⁾。この結果に基づいて、琵琶湖全体での湖水中総リン量は、この間 7.0 t/y の割合で増加したと推定された。

1990 年以降、上で述べたような水質のパラメータは、琵琶湖表層水で顕著な増加を示していない。しかし、琵琶湖の環境変動は、現在も密かに進行している。例えば、次のような結果が報告されている。1994 年から 2000 年の間に、琵琶湖水、琵琶湖への 14 の流入河川水、および大津市で採取された雨水について、16 の溶存元素の動態が調べられた。この観測結果に基づいて、琵琶湖における各溶存元素の収支が推定された(表 1)³⁾。ケイ素、リン、バナジウム、クロム、マンガン、鉄、ニッケル、亜鉛については、流出量は供給量の 40%以下である。これらの元素の大きな部分は、湖における生物による取り込み、化学的な吸着・沈殿生成などにより粒子化され、粒子として流出したか、湖底に堆積したものと考えられる。溶存リンの供給量と流出量の差は、 $3 \times 10^6 \text{ mol/y} = 93 \text{ t/y}$ に達する。これは、そのうちの 8%が湖水に蓄積されれば、上述の琵琶湖全体での湖水中総リン量の増加率と等しくなるほどの莫大な量である。

低酸素化

琵琶湖環境における懸念の一つは、北湖底層水における酸素濃度の低下である。図 2 は、高島-彦根線上水深 80 m 地点の湖底上 1 m における溶存酸素濃度の測定結果である。北湖底層水の年最低溶存酸素濃度は、過去 50 年間、減少傾向にある。北湖は、毎年 12 月から 3 月に冬季循環期を迎える。このとき、表層の湖水が冷却され、また冷たい雪解け水が流入することによって、表層水の密度が大きくなり、水柱全体での水の混合が起こる。酸素は、この循環によって北湖底層へ供給される。夏季成層期には、底層への酸素の供給はなく、酸素は有機物の分解と呼吸のため消費される一方である。北湖底層水における酸素濃度の低下は、富栄

養化の進行による底層への有機物供給量の増加, ならびに温暖化の影響を受けた冬季循環の弱まりによって引き起こされていると考えられる。

酸化的な堆積物には, マンガンや鉄の酸化物が多く含まれる. これらは, さまざまな元素を吸着・共沈させ, 湖水から除去・固定する働きがある. 現在, 北湖深部湖底の堆積物では, 表面酸化層はわずか2~3 mmの厚さしかない. この酸化層に, マンガン, ニッケル, 亜鉛, リン, ヒ素, アンチモンなどが濃縮されている²⁾. 北湖底層水が無酸素状態になれば, マンガンや鉄の酸化物が溶解し, 濃縮されていた元素が放出され, 湖水水質は大きく悪化するであろう。

無酸素状態による湖水水質の変化は, 南湖では1994年にすでに観測されている. この年, 記録的な異常渇水により, 琵琶湖の水位は-123 cmまで低下した. その結果, 南湖のあちこちで多量の藻類が枯れ, 湖底直上に無酸素水が出現した. この年の表層水中溶存リン, ヒ素の濃度変化を図3に示す^{4,5)}. 特に8月30日に, 南湖全体でリンとヒ素の濃度が著しく高くなった. リンの濃度は例年より1桁高く, ヒ素の最大値は環境基準の18%にまで達した. これらのリンやヒ素は, 湖外から供給されたものでは

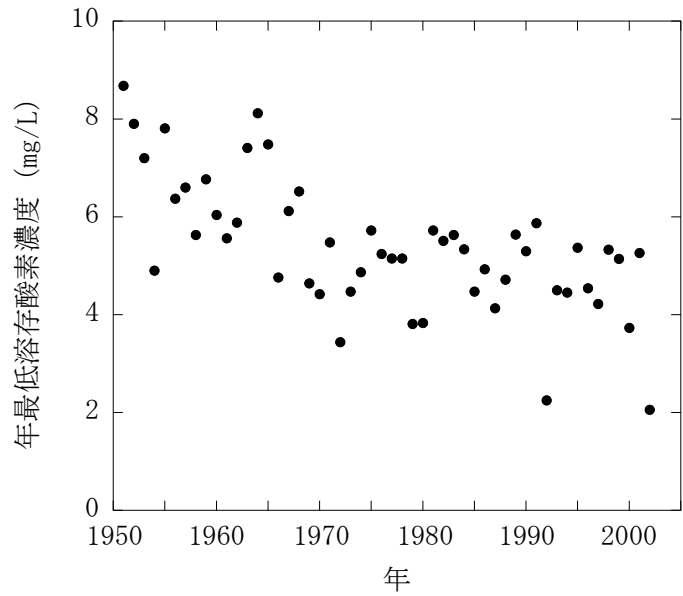


図2 北湖の高島-彦根線上水深80 m地点の湖底上1 mにおける年最低溶存酸素濃度の経年変化. 滋賀県琵琶湖・環境科学研究センター一熊谷道夫博士のご厚意による。

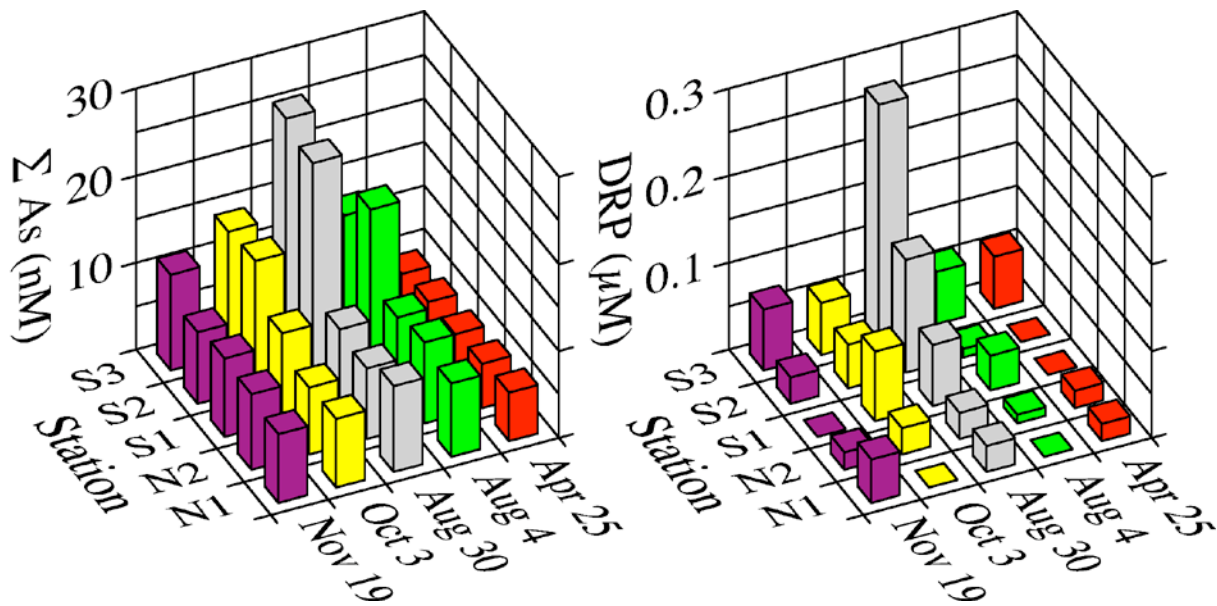


図3 1994年琵琶湖表層水中溶存ヒ素とリンの濃度変化. ΣAs は全ヒ素, DRPは溶存反応性リンを意味する. N1は北湖近江舞子沖, N2は北湖和邇沖, S1は南湖堅田沖, S2は南湖坂本沖, S3は南湖矢橋帰帆島沖の測点である。

なく、湖底堆積物から溶出したものである。その量は、湖水質を大きく変えるには十分であったが、毎年琵琶湖に蓄積されている量と比べれば、1%にも満たないものであった。北湖底層水の無酸素化は、これとは桁違いの影響を水質に及ぼすおそれがある。

文献

- 1) 宗宮功編, “琵琶湖—その環境と水質形成”, 技報同出版(2000).
- 2) 藤永太一郎監修, 宗林由樹, 一色健司編, “海と湖の化学—微量元素で探る”, 京都大学学術出版会(2005).
- 3) S. Mito, Y. Sohrin, K. Norisuye, M. Matsui, H. Hasegawa, M. Maruo, M. Tsuchiya, M. Kawashima, *Limnology* **5**, 7 (2004).
- 4) Y. Sohrin, T. Tateishi, S. Mito, M. Matsui, H. Maeda, A. Hattori, M. Kawashima, H. Hasegawa, *Lakes & Reservoirs: Research and Management* **2**, 77 (1996).
- 5) Y. Sohrin, M. Matsui, M. Kawashima, M. Hojo, H. Hasegawa, *Environ. Sci. Technol.* **31**, 2712 (1997).