

琵琶湖の水環境

丸尾雅啓

滋賀県立大学環境科学部

2011.4.13. 受理

はじめに

琵琶湖はTVの報道などで、いまも「汚れている」、「環境が悪化している」といわれるが、どう汚れていて、どう悪化しているのか、正確に説明されているとはいえないと感じる。見た目あるいは何かの化学的成分の濃度上昇をさしているのか。あるいは、以前に湖底で魚が大量に死んでいる映像が報道されたことで話題となった無酸素化のことなのか。その「汚れて、環境が悪い？」琵琶湖へ、筆者は月に1回ほど観測に出かけ、夏場にのどが渇けば、採水時に残った深層の水を飲んでいる。研究室の学生も含め、なんらかの障害や問題が生じたことは一度もない（とはいえ、飲用に供する湖水の採水深度は、より安全と考えられるものである）。

滋賀県はこの20年あまり、下水道の普及に非常に力を入れてきた。筆者が所属する滋賀県立大学は1995年に開学したが、当時の普及率は40%程度であった。現在は全国でも有数の高さになり、2009年度は85.4%に達している¹⁾。下水高度処理の普及率でも全国首位である。琵琶湖開発に関する様々な訴訟が起きた1970-80年代^{2,3)}に比べ、窒素やリン、有機物を含む家庭排水が直接琵琶湖に流入する量は劇的に少なくなり、赤潮やアオコの発生報告も少なくなりつつある。

その点では、水はずいぶんきれいになったのだから、これくらいでいいのではないかとも思われがちだが、琵琶湖の環境には現在も様々な話題、問題が存在している。

有機物濃度の目安であるCODは下がらず、むしろ緩やかに上昇してきた⁴⁾。平均水深の浅い南湖（琵琶湖大橋よりも南の部分）では水草の繁茂が著しく、悪臭や船舶航行障害などの問題が生じている。また、外来魚の増加と食用在来魚の激減が漁業者を悩ませている。北湖（琵琶湖大橋よりも北の部分）の湖底では溶存酸素飽和度の低下傾向が見られる¹⁾。これらは人為的な要因と生態系の様々な要素の変化が絡み

合っていると考えられ、その中に水環境の変化も含まれる（これらの関係を解明することを目的として、滋賀県立大学環境科学部が設置された）。筆者はこれらの現状を念頭に置きつつ、琵琶湖の水に含まれている化学成分の由来・それらの相互作用を中心に研究を行っている。

琵琶湖の水にまつわる問題点の昔と今

これまでの琵琶湖で問題とされてきた水質面での問題は、主としてリンや窒素を含む化学物質の流入による富栄養化が中心であった。1970年頃は、水質改良剤として合成洗剤に添加されていたポリリン酸塩が流れ込み、植物プランクトンの増殖を促進、赤潮やアオコの発生につながった。湖面の見目の悪さ、水への生臭いにおいの付着など、さまざまな問題が生じた。琵琶湖の水は淀川水系へ流下し、滋賀県だけでなく京都、大阪、兵庫県などを含む1,400万人程度が利用している。1980年代に京都で学生生活を送った身として、25年ほど前に口にした水道水においては今も記憶に残っている。

当時の状況に対し、滋賀県の住民はリンを使用しない洗剤として粉石けんの利用を促進する運動を起こし、つい最近まで活動を継続していた。滋賀県としても、「滋賀県琵琶湖の富栄養化の防止に関する条例」を制定、家庭排水の河川や琵琶湖への直接流入を行わず、合併浄化槽の奨励とともに下水処理施設を建設することで対応し、琵琶湖は今の状態にまでなった。透明度は南湖では2m前後だったものが2.7mに、北湖でも5m前後から6m台に回復した。

しかし先述のように、すべての問題が解決したわけではない。滋賀県が監視している富栄養化指標の経年変化をみると、確かにリンに関する項目（リン酸、T-P）やBODは、以前に比べて低下傾向にあるが、窒素に関する項目はほとんど値が変化してない。これは、非特定汚染源としての森林、農地、道路などからの硝酸態窒素を主体とする流入が原因と

されており、削減が困難である。農業濁水という言葉で表現されているが、田植前の代掻き時に琵琶湖へ流入する“にごり水”は豊富なリンや窒素を含み、植物プランクトン増殖に一役かっていると考えられ、これの減少策が模索されている。

昭和の前半くらいまでは湖岸にヨシ原が多く茂り、懸濁物の除去や、栄養塩の吸収に寄与していたと考えられる。しかし琵琶湖の水位調節や湖岸開発により面積が減少した。以前は多くの内湖が存在し、河川から流入する栄養塩を吸収してそこにヨシが茂り、商業用に刈り取られていた。このことで内湖は河川から流入する栄養塩の除去にも寄与していた。しかしその面積は干拓事業で激減した。また、中国産の安価なヨシを使ったすだれが普及するにつれて、国産のヨシ利用が減り、刈り取られることもなくなってきた。水域への負荷は減少した一方で、琵琶湖岸や内湖が果たしてきた機能もそれよりも早くに失われてきたことも事実であり、これらの回復策を今後とも考える必要がある。

現時点で水質とは直接関係があるとはいえないが、1994年の大濁水時を境に、南湖における水草の繁茂が著しい。それまでは透明度が低かったため、南湖湖底には水草が生育できるだけの光が届かなかったが、濁水時の光条件で生育したものが増殖し、栄養塩を消費し始めたために植物プランクトンの増殖が抑制されたといわれている。実際に南湖の透明度が上昇し、水はきれいになっているように見える。しかし動植物プランクトン量が減ればこれを餌としている魚類が減少するので、漁獲等への影響が今後出ないとは言い切れない。また、水草は船の航行を妨げる。実習の際に目的地へ到達できなかったこともある。また腐敗したものが湖岸に漂着して悪臭を放つなど、必ずしも歓迎されていない。刈り取りもかなりの労力であり、肥料としての再資源化のめども立っていないようである。

北湖でも、水深90m程度の最深部では、近年の溶存酸素濃度の減少が話題になっている。2008年度の11月には、1mg/Lを割り込むなど、湖底で高等生物が生存できない数値にまで減少する頻度が高くなってきている。酸素が減少すると、酸素呼吸を行う生物が減るだけでなく、湖底堆積物に含まれていたマンガンや鉄の酸化物が、還元を受けて可溶化し、それまで取り込んでいた種々の重金属を放出する可能性がある。このため湖底生物への影響が懸念されている。先述した南湖でも、水草の繁茂していると

ころで局所的に溶存酸素の低下が見られている⁵⁾。

またCODは上昇傾向にあるが、この原因は明らかにされていない。下水処理場の普及により、処理場で微生物分解を受けたあとの残存物に含まれる腐植様物質が主成分ではないかと考える研究者もいる。また監視項目に入っていないが、塩化物イオン濃度の上昇はこの何十年間も続いており、1950年代の濃度に比べてほぼ2倍になっている。滋賀県の人口との関係を調べたところ、両方の上昇傾向は一致し、人間活動との密接な関係を示した。これを詳細に調査した報告^{6,7)}も最近なされており、工業の発達と高速道路を中心とする融雪剤の使用量増加が影響しているとされている。今すぐにはではないが、これらの因子が琵琶湖の生態系、あるいは飲料水としての湖水利用に影響を与えないとはいいきれない。水生植物では、水中の電気伝導度が生息域を決めている場合もあり、将来的に魚類のみならず、水生植物でも種の変化が起きる可能性がある。

琵琶湖を対象とする研究～生体必須の微量元素～

筆者は化学分析の手法開発に関する研究も行っているが、同じ元素であっても、その形態が異なれば、検出法に対する応答が異なることをよく経験する。金属の濃度測定に用いる原子吸光法は、原子状態になった各元素が吸収する、固有の波長をもつ光の吸収を測定するものである。原理的には同じ元素の原子は同じように光を吸収するが、その存在形態が異なると、試料に含まれる化合物から原子状態に変化する効率も異なる。酸化数が異なれば、同じ濃度でも吸光度が変わってくる場合がある。酸化数が異なる元素の化合物は、生理活性も異なってくる。たとえば猛毒であるヒ素は、+3(亜ヒ酸)の方が+5(ヒ酸)よりもより毒性が高い。逆に海産生物の合成するアルセノベタインのように、ほとんど無毒のヒ素化合物すら存在する。

鉄、銅といった生体必須の微量元素は、海水、湖水にもわずかながら溶けており、これが微量の栄養素として機能することがわかっている。

酸素のある水中で主成分となる鉄(III)の溶解度は非常に小さい。琵琶湖の水を考えた場合、pHは7.0～9.0(真夏には水質基準上限までpHが上昇することになる)である。水酸化鉄(III)の溶解度積を考えると、pH9では、鉄(III)イオンの濃度は 10^{-21} mol/Lと極低濃度になる。しかし鉄の濃度を測定すると、少なくとも 10^{-8} mol/Lの桁では、通常存在しているようで

ある^{8,9)}。このことは湖水中の鉄が、実際には鉄(III)イオンとしてだけでなく、様々な形態で存在していることに起因する。特に有機化合物との錯体形成では、天然有機化合物群である腐植物質との関連が強いと考えられる。以前に日本沿岸

域の鉄不足が漁獲の減少に効いているのではないかとということがいわれ、漁師の方が植林を始めた、あるいは製鉄スラグを海底に投下し、腐植物質の働きで鉄の供給を促した、という話を聞いたことがある。森から川、そして海や湖に様々な物質が運ばれてくる際に、鉄がそのままではなく、森林土壌で生成した、腐植物質と結びついているからといわれている。鉄は植物プランクトンにとって必須の元素であり、鉄があってはじめて十分に増殖し、魚までの食物連鎖が成立する。

一方銅(ほぼすべて銅(II)として存在)の濃度は、おおむね 10^{-8} mol/L (0.5 ppbくらい)である^{8,9)}。琵琶湖の水1トンをとってきても、その中に入っているのは0.5 mg。しかしこれでも植物プランクトンにとっては猛毒である。海産植物プランクトンでは、この十万分の一の濃度でも増殖が抑制される種もあることがわかっている。琵琶湖の植物プランクトンが同じ感受性を持つならば、琵琶湖は死の湖になっているはずだが、現実には十分に植物プランクトンが生育している。これは水に溶けている銅のほぼすべてが、なんらかの有機物と結びついており、毒性が高いとされる水和銅イオンの状態ではほとんど存在しないためである。電気化学的手法であるボルタンメトリーという方法で、これに反応する銅の濃度を測定すると、琵琶湖水に溶けているはずの銅はほとんど検出されない¹⁰⁾。これを逆用して、銅に結合する配位子となる有機化合物がどのくらい存在するかを評価することができる(表1)。実測結果によると銅の99.99%以上は有機化合物と結合した形で存在しているために、水和銅イオンを含めた無機態の銅のイオン種は、 10^{-17} mol/L位となる。必須元素としての銅は 10^{-18} mol/L以上必要といわれ、境界領域近くという結果が得られる。では、金属と結びついている

表1 琵琶湖北湖水中の溶存全銅濃度 ($Cu_{d\text{total}}$)、錯体の条件安定度定数 (K'_{CuL})、有機配位子の濃度(C_L)および水和銅イオンを含む無機態銅濃度 ($[Cu']$)

	$Cu_{d\text{total}}$ 10^{-9}mol L^{-1}	$\log K'_{CuL}$	C_L 10^{-9}mol L^{-1}	$[Cu']$ $10^{-18}\text{mol L}^{-1}$
2004年 8月 水深 5m	10.4	15.8	67	29
2004年 8月 水深 30m	8.0	15.8	122	11
2004年 10月 水深 5m	10.4	16.8	19	19
2004年 10月 水深 30m	8.0	16.9	21	7.7

海水試料分析時の定数を、琵琶湖のイオン強度に補正したものをを用いて求めた値 (K'_{CuL} 、 $[Cu']$) を示す。

相手の有機物であるが、主体は腐植様物質であると考えられている。一方で、生物はこれらの元素を摂取するために、あるいは逆にこれらの毒性の影響を軽減するために、同様の有機物を合成、放出することもわかっている¹¹⁾。琵琶湖では、生合成されている化合物が優先的に働いているのか、また河川や下水処理場からきた有機物が機能を妨げるのか、今後とも続けていきたい研究課題である。

参考文献

- 1) 滋賀県：2010年度 滋賀県環境白書. 2010.
- 2) 「琵琶湖」編集委員会編、琵琶湖 ―その自然と社会―、サンブライツ出版、1983.
- 3) 琵琶湖総合開発協議会編：「琵琶湖総合開発事業25年のあゆみ」、1997.
- 4) 琵琶湖百貨編集委員会編：一知ってますかこの湖を―琵琶湖を語る50章、サンライズ出版、2001.
- 5) 芳賀裕樹、芦谷美奈子、山根猛 ほか：琵琶湖南湖における湖底直上の溶存酸素濃度と沈水植物群落現存量の関係について. *陸水学雑誌*, **67**, 23-27, 2006.
- 6) 早川和秀、藤井滋穂：琵琶湖における塩化物イオン濃度の長期変遷とその増加要因(1) 1920年から2005年までの湖水中の塩化物イオン濃度の変動. *陸水学雑誌*, **71**, 165-183, 2010.
- 7) 早川和秀、岡本高弘：琵琶湖における塩化物イオン濃度の長期変遷とその増加要因(2) 琵琶湖の塩化物イオンの負荷量推定と過去30年間の増加要因について. *陸水学雑誌*, **71**, 285-303, 2010.
- 8) Mito S, Sohrin Y, Kawashima M, *et al.*: The budget of dissolved trace metals in Lake Biwa, Japan.

- Limnology*, **5**, 7-16, 2004.
- 9) Sugiyama M, Hori T, Matsui M, *et al.*: Geochemical behavior of trace elements in Lake Biwa. *Limnology*, **6**, 117-130, 2005.
- 10) Maruo M, Orians KJ: Determination of copper complexation in freshwaters of west Canadian lakes by electrochemical analysis, *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, **29**, 1481-1486, 2006.
- 11) Moffet JW, Brand LE: Production of strong, extracellular Cu chelators by marine cyanobacteria in response to Cu stress. *Limnol. Oceanogr.*, **41**, 388-395, 1996.

Aquatic Environment in Lake Biwa, Japan

Masahiro MARUO

School of Environmental Science, The University of Shiga Prefecture