

公開シンポジウム

湖沼の長期モニタリングを考える

京大・大津臨湖創設から 100 年を経て

2S01 ～ 2S04

コンビナー：中野伸一（京都大学生態学研究センター）
花里孝幸（信州大学山岳科学総合研究センター）

日時：9月12日（木）13:00～15:30

会場：D会場（2号館220講義室）

奥田昇（京都大・生態研センター）

1. はじめに

京都大学生態学研究センターの前身である京都医科大学附属大津臨湖実験所が創設されて来年で 100 周年を迎える。本実験所は、我が国初の湖沼学の研究施設として陸水学の黎明期を担ってきた。動物生態学の祖であり、「陸水学」の名付け親でもある初代所長・川村多實二博士は当所に赴任以降、琵琶湖の生物種の分類を目的とした標本収集活動に精力的に取り組んだ。1960 年代になると、富栄養化問題を契機として、琵琶湖の生態系観測を目的とした定期生物採集調査が森主一博士の発案により開始された。その意志は多くの徒弟に受け継がれ、今なお数多くの生物標本が収集・保管されている。

学問分野が多様化し、科学技術が進歩する中、古典的な博物学や生物分類学は斜陽を迎えたといしばしば揶揄される。また、「スペース問題」を抱える生物標本は、とかく「お荷物扱い」されることが多い。しかし、地球規模の環境攪乱下で生物多様性の低下と生態系機能の劣化が著しい陸水において、生物標本は過去に起こった生態系の変動過程を知る貴重な資料としての価値があることを皆さんにお伝えしたい。



図 1. 大津臨湖実験所の初代所長・川村多實二博士（左写真の左端）と彼の遺した生物標本（右写真）。標本の多くは、現在、京都大学総合博物館に所蔵されている。

2. 事例研究

生物標本は、単に種としてのラベルが貼られ、採集場所と時間の情報が付与された生物学的資料としてのみならず、標本体そのものが経験した生息環境情報を記録するアーカイブとしての価値をもつ。標本に蓄積された環境情報を読み取り、過去の生態系の復元を試みた幾つかの研究事例を以下に紹介する。

近年、湖沼生態系の温暖化影響が問題となっている。温暖化に伴う生態系の物理・化学的な応答機構の理解が進む一方、温暖化の生物影響とそのメカニズムには未解明な点が多い。演者らのグループは、琵琶湖の沖合深底層に生息する固有魚イサザの長期所蔵標本の生殖腺の発達状況を調べることによって、本種の個体群減少が温暖化による繁殖リズムの生理的攪乱によって生じるうることを明らかにした。

イサザは過去 100 年の間に 2 度の大規模な個体群

減耗を経験している。このボトルネック効果によって個体群減少前後で集団の遺伝的多様性が変化したり、温暖化適応形質に関連した遺伝子に自然淘汰が作用したりすることが予想される。このような人為攪乱に対する「急速な進化」を検証するには、集団を対象とした長期的な DNA 解析が必要となる。従来、ホルマリン液浸標本は DNA 解析に不適とされてきた。しかし、演者らは遺伝子増幅手法の改良によって断片化された DNA から過去の遺伝情報を復元することに成功した。本手法を応用することによって、上述の進化生物学的な問いに答えることが、近い将来、可能になるかもしれない。

また、イサザは個体群の増減に伴う密度依存効果によって体サイズが変異するとともに食性に大きな個体間変異がみられる。長期所蔵標本の窒素安定同位体分析をおこなったところ、個体発生的な栄養ニッチシフトのパターンは年ごとに大きく変動することが明らかとなった。生物標本の窒素同位体分析から栄養段階を推定するには、食物網の基盤となる餌資源の窒素同位体比の情報が必須である。しかし、大学や博物館に眠っている生物標本はこの条件を満たさない場合が多い。現在、演者らは、基盤餌源の同位体情報に拠らず、生物標本から直接的に栄養段階を推定するツールとして、アミノ酸種特異的窒素同位体分析技術の確立を目指している。

琵琶湖の生態系は過去 100 年で大きな環境攪乱を経験した。1960 年代の富栄養化に始まり、外来種移入や温暖化など様々な環境問題が顕在化し、生物多様性は減少傾向にある。演者らは、臨湖実験所創設年（1914 年）より現在まで、琵琶湖から収集された様々な生物標本の窒素同位体比を測定し、食物網の長期動態の解明を試みた。20 世紀の前半に食物網の顕著な変化はみられなかったが、1960 年代から 70 年代にかけて食物連鎖長が伸長し、90 年代になると一転収縮する傾向が観察された。21 世紀の初頭になって、食物連鎖長に回復の兆しが認められたことは琵琶湖の保全を考える上で注目に値する。

3. 結論

観測・分析機器の発達した今日においてさえ、陸水生態系のモニタリング調査は、複雑なシステムの一側面を眺めているにすぎない。生態系評価は、往々にして、新たな環境問題が顕在化してから着手されるため、生態系変化の事前と事後の比較データが揃っていない場合が多い。今後、不測の環境変動が起こったとしても、生物標本さえ遺しておけば、現時点では想像もつかない新しい技術が確立することによって、生態系の変遷過程を過去に遡って復元できるかもしれない。生物標本は、陸水学の将来に遺産を引き継ぐ重要な役割を担うだろう。

*花里孝幸、宮原裕一（信州大学・山岳科学総合研）

かつて諏訪湖はアオコをつくる藍藻が大発生する湖として有名だった。その後の水質浄化の取り組みによって水質が改善し、アオコの発生が激減した。それに特に貢献したことは、下水処理場からの排水を諏訪湖に入れずに導水管を通して下流の川（天竜川）に放水したことである。

水質浄化が進んだ結果、湖内の生態系が大きく変わった。アオコの消滅の他、迷惑害虫のユスリカの大発生もなくなった。これは多くの人が歓迎した。ところが、それと同時にワカサギの漁獲量が大きく減少するようになった。また、アオコが消えて湖水の透明度が高まったため沿岸域では

湖底にまで太陽光が届くようになり、浮葉植物のヒシが大繁茂して船の航行の妨げになり、大きな問題となった。ヒシの大発生は、長年の間、そこに溜まったヘドロによって助長されていると考えられる。そのため、湖の管理は「水質浄化」だけではなく「底質改善」も必要であろう。

諏訪湖から学んだことは、環境問題には必ずあちら立てればこちらが立たずということが付随しているということである。そしてそれに対してわれわれ人間がどのように対応していくべきか、これが今後の大きな課題になるだろう。

琵琶湖におけるモニタリング結果と長期モニタリングから得られた成果

藤原直樹, 一瀬諭, 岡本高弘, 山中直 (滋賀県琵琶湖環境科学研究センター)

1. はじめに

滋賀県では、水産試験場が 1914 年から約 100 年にわたって漁場環境調査として琵琶湖北湖の横断観測を続けている。琵琶湖全域に及ぶ環境モニタリングとしては、1966 年に滋賀県が近畿地方建設局（当時）の委託を受けて、滋賀県立衛生研究所（当時）が年 4 回の水質調査を始めた。その後、1979 年に近畿地方建設局琵琶湖工事事務所（当時）と滋賀県立衛生環境センター（当時）が分担して毎月の水質調査を行うようになり、現在は、近畿地方整備局琵琶湖河川事務所、独立行政法人水資源機構、滋賀県琵琶湖環境科学研究センターで分担している。また、1977 年に琵琶湖で *Uroglana* による初めての淡水赤潮が発生したのを契機に、1978 年から滋賀県立衛生環境センター（当時）においてプランクトンのモニタリングを始め、組織改編を経て滋賀県琵琶湖環境科学研究センターで継続実施している。

2. 方法

水質調査は、琵琶湖の北湖 28 定点、南湖 19 定点の表層で 1978 年度までは年 4 回、1979 年度からは月 1 回の頻度で行い、調査項目は透明度、溶存酸素、無機栄養塩類、全窒素 (1969～)、全りん (1971～)、クロロフィル a (1979～)、有害物質等である。

植物プランクトンの調査は、1978 年から月 2 回の頻度で北湖今津沖中央地点（北緯 35° 02′ 40″，東経 135° 07′ 57″）、南湖唐崎沖中央地点（北緯 35° 23′ 41″，東経 135° 53′ 36″）等で実施している。湖水 1mL を界線入りプランクトン計数板（離合社製もしくは松浪硝子工業社製：容量 1mL、20 マス×50 マス）に取り、光学顕微鏡下で同定・計数を行っている。植物プランクトンは、一瀬ら^{1) 2)}の方法で体積換算して評価した。

3. 結果およびそこから得られた成果

北湖における全りん濃度は 1970 年代以降漸減傾向にあり、全窒素濃度は 2003 年度以降減少傾向にある（図 1）。水産試験場が行った定期観測では、プランクトン沈殿量が 1970 年代に多く、特に 1972 年に最大値となっている³⁾ことから、1970 年代に琵琶湖北湖における富栄養化はピークを迎えていたと考えられる。窒素、りんの変動からその後の富栄養化の

進行は抑制されているにもかかわらず、植物プランクトン優占種の変遷（図 2）を見ると、夏季から秋季に藍藻類の占める比率が増加傾向にある。また、富栄養化以前には珪藻主体のプランクトン組成であった⁴⁾が、現在は大型鼓藻類の *Staurastrum* 主体のプランクトン組成である。

プランクトンの長期モニタリングから、小型の植物プランクトン種⁵⁾や細胞外に粘質鞘を持つ種⁶⁾の比率が増していることが明らかになっている。

文献

- 1) 一瀬ら：滋賀県立衛生環境センター所報,30,27-35(1995)
- 2) 一瀬ら：用水と排水,41,582-591(1999)
- 3) 岡村：滋賀県水産試験場報告,52,33-41(2008)
- 4) 根来：水温の研究,25(1),15-19(1981)
- 5) Kishimoto *et.al* : Limnology,14,117-128(2013)
- 6) 一瀬ら：日本水処理生物学会誌,49(2),65-74(2013)

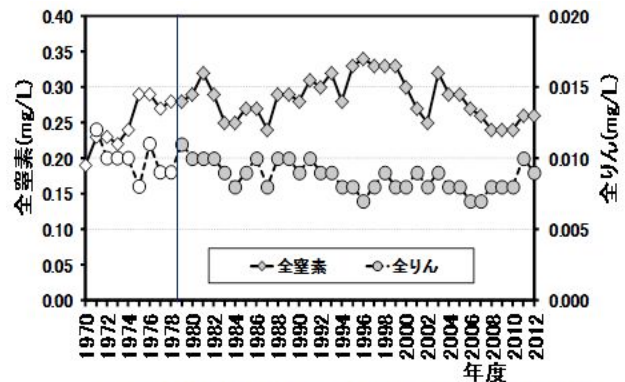


図 1 琵琶湖における全窒素、全りん濃度の変動
(北湖表層年度平均値, 1970-1978 は 4 回の平均)

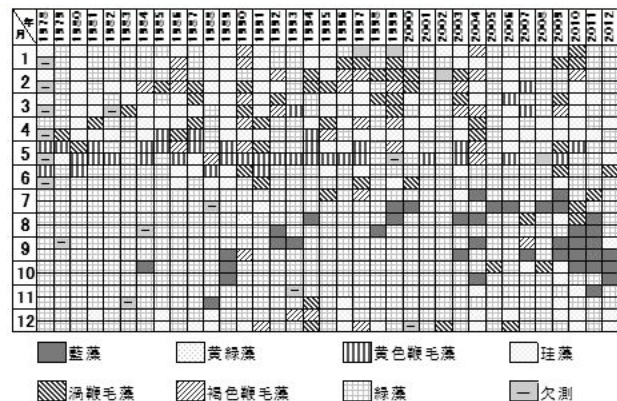


図 2 琵琶湖北湖における植物プランクトン（体積換算）の優占種の変遷（今津沖中央 0.5m 層）

*伊藤祐二（鹿児島大・農）， 梶井和朗（鹿児島大・農）

1. はじめに

近年，温暖化が湖水質の長期変化に及ぼす影響が世界各地の湖で明らかとなっている．最大水深 233 m を有する池田湖でも，近年，深層の水温上昇や貧酸素化などの水質変化が顕在化している．こうした状況は，鹿児島県による長期観測によって明らかにされ，県の水質管理計画書や研究所報などにまとめられてきた．一方，著者らは，2000 年以降に実施してきた現地モニタリングと数値シミュレーションによって，池田湖の水質変化を検討してきた．本研究では，池田湖の最近 34 年間の水質観測値を紹介するとともに，湖温暖化に関する数値シミュレーション結果に基づいて水質の変動傾向を考察した．

2. 材料と方法

1978～2011 年の気象と水質について，各々の経時変化を調べた．気象データは，池田湖から西に約 5 km 離れた指宿市で観測された気温と風速を対象とした．水質データは，鹿児島県による観測値を用いた．観測は湖の中央で実施され，水深 0, 15, 30, 100, 200 m で概ね 2 ヶ月に 1 回の頻度で測定された水温，溶存酸素（DO）濃度，溶存無機窒素（DIN）濃度，溶存無機リン（DIP）濃度を対象とした．

一方，鉛直 1 次元熱輸送モデルを構築し，同モデルによって池田湖の水温と成層強度の長期変化を調べた．計算した鉛直水温分布から湖全体の平均水温を示す容積加重平均水温を求め，その年変動を解析した．また，水温の計算値から密度を算出し，密度の鉛直分布から求めた Schmidt 安定性指数（ S ）によって池田湖の成層強度の経時変化を評価した．

3. 結果

対象期間では，気温と風速はともに上昇傾向を示した．気温は $0.028^{\circ}\text{C y}^{-1}$ ，風速は $0.0037 \text{ m s}^{-1} \text{ y}^{-1}$ の割合で上昇した．

池田湖の水温は，一般に夏季の表層で約 30°C となり，冬季に約 11°C まで低下する．水温躍層は水深 10～30 m に存在し，30 m より深い層では水温変化が小さく，特に 50 m 以深では年間を通して約 11°C の一定値である．季節変化が認められない深層（100, 200 m）の水温は上昇傾向にあり，その上昇率は約 $0.003^{\circ}\text{C y}^{-1}$ であった．

水深 0.5 と 30 m の DO 濃度は，冬に増大し夏に低下する季節変化を示した．一方，深層では季節変化は認められなかった．深層の DO は，1980 年代までは比較的高濃度で推移したが，1986 年に減少し始め，水深 100 m では 1994 年以降 $0.5\sim 7.1 \text{ mg l}^{-1}$ の範囲で変動し，水深 200 m では 1990～2010 年まで 0.5 mg l^{-1} の貧酸素状態が継続した．

DIN と DIP 濃度は，水深 200 m で大きな濃度変

化が認められた．DIN は，1992 年以前は $0.1\sim 0.3 \text{ mg l}^{-1}$ の間で推移したが，1992～2005 年に上昇し，2005 年には 0.5 mg l^{-1} に達した．DIP は，1991 年以前は 0.002 mg l^{-1} 以下の低濃度であったが，それ以降上昇し，2004～2005 年に 1991 年以前の約 35 倍となる 0.069 mg l^{-1} に達した．

数値解析の結果，水温は湖全体で上昇傾向を示した．水深 0.5, 30, 100, 200 m の上昇率は 0.020, 0.040, 0.032, $0.024^{\circ}\text{C y}^{-1}$ であり，水深 100 と 200 m の上昇率は観測値と近い値を示した．容積加重平均水温も上昇傾向を示し，回帰直線の傾き（池田湖の温暖化率）は $0.033^{\circ}\text{C y}^{-1}$ であった．

S は検討した 34 年間で上昇傾向を示した．その上昇率は，1986 年から最大値を記録した 1990 年の 5 年間で特に大きかった． S は成層が強まる 8～10 月に大きく，それが弱まる 1～2 月に小さかった．池田湖が最も冷却される 2 月では，1981, 1982, 1984, 1986, 2011 年に S が負値となり，対象とした 34 年間で特に小さかった．

4. 考察

池田湖では，深層の貧酸素化と栄養塩濃度の増大が重大な水質問題である．気温と水温の変動傾向が示すように池田湖は温暖化しており，それが深層の水質変化に影響を及ぼしていると考える．すなわち，温暖化に伴う湖水の鉛直混合レジームの変化が，水質問題と深く関係していると考え，以下に考察する．

S が小さい場合，湖の成層強度は低下し，機械的混合に対する抵抗が低下するため，湖水は鉛直混合しやすくなる．また，鉛直混合は，冬季の気温低下と混合の駆動力となる風速の増大によって強化される．池田湖では， S が小さくなる 2 月に鉛直混合が生じやすい． S が負となった 1982, 1984, 1986, 2011 年の冬季の平均気温は 9°C 以下と例年よりも低く，平均風速は 2 m s^{-1} 以上で比較的大きかった．したがって，少なくともこの 4 年間では，水深 200 m までの全循環が生じた可能性が高い．1982 年は DO 観測が欠測したものの，1984, 1986, 2011 年では実際に水深 200 m の DO 濃度が上昇しており，このことは全循環によって表層から深層に DO が供給されたことを示している．

その他の年では， S が大きく湖は安定しており，全循環は生じなかったようである．部分循環が連続した 1987～2010 年では，深層が貧酸素状態となっており，この期間内に生じた DIN と DIP の上昇は，還元状態の底質から栄養塩が溶出したためと考えられる．実際に，水深 200 m の $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ と $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ は 1990 年代に急上昇しており，DIN と DIP の濃度上昇はこれらの底質からの溶出に起因する．