

## 第11回助成研究ワークショップ

### 湖沼の水質

開催日時：平成8年12月3日(火)9:45~17:00

会場：京大会館

<主催>財団法人 日本生命財団

### プログラム

|       |  |                        |       |
|-------|--|------------------------|-------|
| 9:45  | 開会挨拶                                   | 日本生命財団 理事長             | 小林 玉夫 |
|       | 報告                                     | コーディネーター 滋賀県琵琶湖研究所 所長  | 中村 正久 |
| 9:50  | ①「環境同位体による湖へ流入する地下水の流動系に関する研究」         | '94 助成 大阪教育大学教育学部 助教授  | 小林 正雄 |
| 10:40 | ②「懸濁物を媒介とする湖の水質変動機構の解明と弱成層モデルによる数値予測」  | '94 助成 岡山大学環境理工学部 助教授  | 大久保賢治 |
| 11:30 | ③「風による湖水の混合と物質輸送」—琵琶湖の水質形成に関する基礎的研究—   | '93 助成 京都大学農学部研究科 教授   | 坂本 亘  |
|       |  | 京都大学農学部研究科 助教授         | 藤原 建紀 |
| 12:20 | 昼食休憩 (50分)                             |                        |       |
| 13:10 | ④「湖沼におけるアオコ毒素の化学生態学的研究」                | '94 助成 信州大学理学部 教授      | 沖野外輝夫 |
|       |  | 信州大学理学部 助手             | 朴 虎東  |
| 14:00 | ⑤「富栄養化防止のための強力な窒素およびリン除去細菌の分子育種に関する研究」 | '93・'94 助成 広島大学工学部 教授  | 大竹 久夫 |
| 14:50 | 休憩 (10分)                               |                        |       |
| 15:00 | 総合討論                                   | コーディネーター 滋賀県琵琶湖研究所 所長  | 中村 正久 |
|       |  | コメンテーター 滋賀県立大学環琉科学部 教授 | 國松 孝男 |
| 17:00 | 閉会                                     |                        |       |

### <コーディネーター>

中村 正久 (なかむら まさひさ) 滋賀県琵琶湖研究所 所長

(略 歴) 1945年3月22日生まれ。北海道大学工学部衛生工学科卒業、アメリカ合衆国ワシントン州立大学大学院土木工学科修士課程修了、アメリカ合衆国イリノイ州立イリノイ大学大学院土木工学科博士課程(工学博士取得)、アメリカ合衆国ケンタッキー州立ルイビル大学(助教授)、世界保健機構(WHO)西太平洋地域環境センター、琵琶湖研究所専門研究員、総括研究員、副所長を経て、1994年より現職

(専 攻) 環境工学・衛生工学

(所属学会) 日本リスク研究学会、土木学会

(著 書) 「途上国の環境保全技術・制度と技術協力」(ぎょうせい)、

「平成6年度琵琶湖の異常渇水の影響に関する調査報告書」(滋賀県琵琶湖研究所)

“Lake Biwa:Have Sustainable Development Objectives Been Met?”

Lakes and Reservoirs:Research and Management,Vol.1.1995.pp3-29

# 環境同位体による湖へ流入する地下水の流動系に関する研究

小林 正雄 (こばやし まさお) 大阪教育大学教育学部 助教授

(略 歴) 1943年生まれ。大阪学芸大学教育学部理学科卒業、  
大阪学芸大学助手、大阪教育大学講師を経て、1994年より現職

(専 攻) 水文学・陸水学 (地下水水文学)

(所属学会) 日本陸水学会、日本地下水学会、日本水文科学会

## 1. 研究の背景と目的

近年、多くの湖ではアオコや赤潮の発生、あるいは透明度の低下などにみられるように、湖水の富栄養化や汚濁が深刻な問題となっている。これは、人間活動の拡大のため、河川水や地下水などにより湖へ輸送される汚濁物質の量が増加したことが要因と考えられる。湖へ流入する地下水に関しては、湖岸や湖底面を通じて有意な量の地下水が湧出していることが、すでに多くの湖で明らかにされている。琵琶湖においても、これまでの筆者らによる観測によって、湖岸に沿うほぼ全域の湖底から地下水の湧出が認められ、年間の湧出量は河川水と地下水の総流入量 (45億トン) の約20% (8.5億トン) に達するものであることが明らかにされ、琵琶湖全体の収支および物質収支に占める湖底湧出地下水の寄与が無視し得ないものであることが認識された。一方、湖底から湧出する地下水は陸域の地下水と密接に関係していることは明らかであり、陸域における地下水の汚染が湖水の水質に影響を与えていると考えられる。しかし、陸域の地下水については、その供給源、流動経路、滞留時間など不明な点が多いのが実状である。湖水の富栄養化に果たす地下水の役割を明らかにするためには、地下水の供給域から流出域に至る水循環系を解明することが必要である。以上の観点から、本研究では、その手初めとして湖底湧出地下水量が比較的多い四ツ谷川流域を主な対象とし、測水調査および降水、河川水、浅層・深層地下水および湖底地下水 (間隙水) の環境同位体組成と化学組成を調べ、その地域の地下水流動系の実態把握を試みた。

## 2. 研究方法

調査地域は南湖西岸比叡山東麓一帯を対象とした。浅井戸の水位測定は、1994年と1995年の灌漑期と非灌漑期にそれぞれ2回、合計109地点で行なった。また、比叡山地 (標高630m) と低地の下阪本 (標高88m) の2地点に雨水採取装置を設置し、1994年3月から1995年8月まで毎月1回雨水を採取し、同位体比 ( $\delta^{18}O$ ,  $\delta D$ )、電気伝導度、pHおよび総降水量を測定した。また、四ツ谷川扇状地を中心として浅井戸の水 (50~80地点)、河川水 (9地点)、湧水 (15地点)、自噴井の水 (7地点)、湖底地下水 (1地点) を採取し、同位体比 (以後5値と称す)、ラドン ( $^{222}Rn$ ) 濃度、トリチウム濃度、および主要化学成分の水質測定を行った。ただし、河川水と浅井戸の水の同位体比測定はそれぞれ7と3地点である。

## 3. 結果と考察

### 1. 地下水面等高線分布よりみた四ツ谷川扇状地浅層地下水の流動系

浅井戸で観測された地下水面の形状は、扇端の河口部を除きおおむね地形面のそれとよく対応しており、時期的な変化も小さい。また、水位の分布から推定される地下水の流れは、扇頂~扇央部では河川の右岸側と左岸側で違いがみられ、右岸側では河道にほぼ平行する流れ (東向き) が、また左岸側では時期によらず河道に斜交する北東方向への卓越した流れがよみとれる。これは、本地域の浅層の地下水が、右岸側では主に山体から流下してきた水、また、左岸側では山体からの地下水に河川の伏流水が加わった水であることを示唆する。

## 2. 降水の同位体比

降水の $\delta$ 値 ( $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$ ) は、春季と夏～秋に高く、冬季と多雨期に低い、ほぼ規則的な季節変化を示す。また、それぞれの降水量による年加重平均値は、山地部 (8.4‰、-51.4‰) と低地部 (-7.6‰、-48.5‰) では明らかに異なっている。これは、高度効果によるものと考えられる。また、この地域の天水線は $\delta\text{D}$ と $\delta^{18}\text{O}$ の勾配を8として相関をとると、比叡山地では $\delta\text{D}=8\delta^{18}\text{O}+18$ 、下阪本では $\delta\text{D}=8\delta^{18}\text{O}+13$ である。一般に、降水の $\delta$ 値の季節変化は地下に浸透する過程で平均化されると考えられている (IAEA, 1981)。したがって、ある集水域内の河川水、地下水の $\delta$ 値は、周囲から $\delta$ 値の異なる水の混入がなければ、その地点の降水の年加重平均値にほぼ近い値をとると考えられる。降水の $\delta$ 値が山地部と低地部とで異なる結果は、・比叡山東麓一帯の地下水の供給源を推定する上で役立つ可能性がある。

## 3. 河川水・地下水の同位体比よりみた地下水の流動系

河川水、浅層地下水および深層地下水の $\delta$ 値は、いずれも山地部と低地部の天水線の範囲内に分布し、時期的・場所的変化も小さい。河川水と湧水の $\delta$ 値は、全般的に低地部の地下水よりも低く、山地部の降水の加重平均値に近い。これは、これらは山地性降水に由来することを示す。一方、低地部の浅井戸の水の $\delta$ 値は低地性降水より低く、標高100m付近までは、むしろ山地性降水に近い。したがって、この地域の浅層地下水は山地部から流出した水の影響を強く受けていると考えられる。また、これらの浅い井戸水は全般に下流に向かって $\delta$ 値が高くなる傾向と、四ツ谷川の左岸の水は、特に扇頂部付近で右岸に比べてやや低い傾向がみられる。この左岸地域の浅層で $\delta$ 値の低い地下水が分布することは、水位分布から推定された、河川伏流水が流動する方向と矛盾しない。

一方、自噴井戸からの水 (被圧地下水) においては、井戸の深さが浅い水は $\delta$ 値がその上部の浅層地下水 (井戸水) と同様である。これは、この被圧地下水が上部の不圧帯水層中へ浸出する、あるいはその反対に浅層の水が深層へ浸透する部分のあることを窺わせる。また、井戸深が深い被圧地下水が山地性の降水と類似した $\delta$ 値をもつことは、深層地下水の流動系が山地部に発したものであることを示唆する。

降水の観測点が2点だけであり、かつ $\delta$ 値の変動が大きいので、降水の濃度を直接的に地下水の濃度と対応づけることは難しい。しかし、浅層地下水の $\delta$ 値が全体として山地性の降水に近い値をもつものが多く、湖岸地域に至ってはじめて低地性の降水に近づく様子が窺える。これは、山地地下水による流動系が湖岸近くまで発達していて、山麓部の湧水帯から標高100m付近までの範囲の浅層地下水が (ラドン濃度が高い、後述)、山地の下層部で形成された地下水の流出の影響を受けていることを示唆する。

一方、標高の低い湖岸地帯の浅層地下水、および汀線近くの湖底地下水の $\delta$ 値は平地に降った雨とほぼ近い値を示し、また、湖岸近傍の浅井戸の水と湖底地下水の水質はよく似ていた。これは、本地域では湖岸地帯の浅層地下水が汀線近くの湖底から湧出していることを強く示唆する。また、湖岸付近の陸域の深い被圧地下水の $\delta$ 値は山地性の降水に近い値を示した。これは、流域地下水の流動系からみて矛盾なく、そのような山地由来の深部を経由した水は、さらに沖合の湖底から湧出している可能性がある。

以上のことは、南湖一帯の湖底湧出地下水の主要成分濃度が多く、地点で湖水より著しく高かったことから窺えるように、湖岸地域の人間活動が湖底湧出地下水、さらには湖水の水質に影響を与えている可能性があることを示唆する。なお、ラドン濃度については、山麓部からの湧水と被圧地下水で高い値が測定された。これは、これらの水が比較的深部の岩盤を経由し、しかも大気への散逸の経験をもたない遮断された流動系によるものであることを示していると思われる。

## 4. トリチウム濃度よりみた地下水の流動系

1995年採取した河川水、湧水および地下水のトリチウム濃度は、その時点の値として6～15TUの範囲にある。河川水と地下水とでトリチウム濃度に明らかな違いがあり、河川水のトリチウム濃度が高い。降水を直接の供給源とする浅層の地下水やそれからの流出水に適用可能と考えられている指数関数モデルを用いると、河川水の濃度はモデルの出力範囲よりも高い値を示した。これは、河川水がそういう浅層地下水から直接流出したものではなく、一度深部の岩盤の割れ目系を経由し、表層の循環系から遮断されたような水であることを示唆する。また、浅層地下水の中で、トリチウム濃度の低い水は、見かけ上7年の滞留時間に対応される。しかし、この滞留時間は、低地部の降水によって形成された浅層の流動系とみるには、地域表層の浅層地下水の層厚（掘削資料による）からみて長すぎる。

以上の結果は、安定同位体比から推定された結果と大きくは矛盾していなく、本地域の浅層地下水には山地由来でかつ深部経由の水が含まれていることを示唆すると考えられる。

# 懸濁物を媒介とする湖の水質変動機構の解明と弱成層モデルによる数値予測

大久保 賢治 (おおくぼ けんじ) 岡山大学環境理工学部 助教授

(略 歴) 1954年生まれ。京都大学工学部交通土木工学科卒業、京都大学大学院修了、  
京都大学防災研究所助手を経て、1995年より現職

(専 攻) 陸水物理学

(所属学会) 土木学会、日本陸水学会、IAHR

## 1. 研究の目的

湖水中の懸濁態粒子の沈降とそれに近い強度の小規模な対流が湖の水質に及ぼす影響について考える。成層期の琵琶湖北湖を例に挙げて水域規模の内部静振に伴う水温躍層の昇降速度を $10^{-4}\text{m/s}$ にとるとき、これを沈降速度とする鉱物粒子の粒径として $10\mu\text{m}$ という目安を得る。これより微細な鉱物粒子あるいは密度の小さな浮遊生物は一般の湖流や鉛直速度成分を伴う対流過程により実質沈降速度が著しく変化する。したがって、湖心部で見られる数 $\mu\text{m}$ のシルトの沈降過程は一様ではなく流れにより長時間浮遊し続ける。とくに深水湖で季節躍層が発達する夏から秋にかけてはこの傾向が強い。こうして淡水湖では水温が主で濁質濃度が副となって相互に作用する二重成層が形成されるが、海洋で研究されている熱塩二重拡散対流と類似の微細対流が発生する可能性については未知のまま残されていた。本研究では水温と濁度で規定される湖水密度場の温濁二重拡散対流について証拠となる観測値を収集して微細対流の発生条件を示し、懸濁物の浮上や沈降によって駆動される湖の水質変動に対するその役割を明らかにする。さらに、この物理機構を数値モデルに組み込むために室内実験を行って熱や濁質移動に伴う鉛直方向の浮力フラックスを検討し、その定量化をはかる。

## 2. 研究の背景

二重拡散対流現象では、各密度影響因子が安定もしくは不安定成層をなすとき、各々の鉛直勾配の符号により4つの場合がある。水温・濁度ともに不安定な場合は直ちに鉛直混合し、ともに安定なら成層は強化するが、水温成層に対する濁度成層の強さは淡水湖で高々数%である。特有の対流が現れるのは安定水温成層（強）と不安定濃度成層（弱）のフィンガー領域（finger regime）ならびに安定濃度成層（強）と不安定水温成層（弱）の拡散領域（diffusive regime）である。本研究を開始する前に以下の知見が得られていた。まず浅い琵琶湖南湖の観測結果では底泥の巻上げが水温成層の破壊に伴って発生しているようであり、日常の風速で破壊する程度の弱水温成層を扱う数値モデルで上記過程を検討した。浅水湖の流動系が風応力や湖面熱束に応答するため濁度も顕著な日周変動を示すことがわかった。こうして水温と濁度がともに湖水密度に影響する二重成層の存在は示されたが、踏込んで、海洋と同種の二重拡散対流が淡水湖にも存在するか否かはまだ明らかにはならなかった。

貯水池の水理学的研究では、水温躍層への濁水貫入は密度流として取扱われてきたが、浅枝・玉井（1982）は、そこに拡散領域の二重拡散対流が顕在する可能性を指摘し、松本（1996）、神田ら（1996）は貯水池における逆転水温成層を示した。琵琶湖北湖でも河川出水後の濁水層に持続的な水温逆転層が見出され、1993年夏の琵琶湖国際共同観測における隔離水塊実験では季節躍層に貫入した濁水層を捉え、その直下に特徴的な水温振動がみられた。このときの水温・濁度による密度差の比はsalt fingerの発生条件と一致し、湖にもフィンガー・領域が潜在する可能性が示唆された。北湖深水部の水温分布には定温層と跳躍層から成るステップ構造が測定されるようになると水質変動を引起こす有力な機構として二重拡散対流現象が浮かび上がってきた。

### 3. 研究の結果

二重拡散対流の各領域の現象について以下の観測・実験結果を得た。

#### (1) 躍層上部に貫入する濁水層下半部のフィンガー領域

季節躍層の発達する夏季の出水時は100mg/l以上の濁水が密度流として躍層に貫入し濃度ピークの下方にフィンガー領域を出現させる。この状況で隔離水塊を設け水平流と濁質供給を遮断した結果、fingerが明瞭になったと思われた。著者ら（1995）がカオリンを用いて行ったランダウン型silt finger実験では、水温、濁度は二重成層をなすだけでなく、輸送量比一定の関係があり、安定密度比に対する浮力束比の依存はsalt fingerの場合と同一になった。ただし、沈降性を考慮するため、濃度束は対流効果を含む実質沈降速度で評価し、熱束には水面冷却量も含めた。初期上層水に加えた微量の蛍光染料の相対濃度減少がシルトのそれと等しいことから、発生した対流により溶存態の水質まで下向きに輸送されることがわかった。実験はfingeringのみに注目したが、名合ら（1996）はfingering発生から長時間経過した水温成層内に深水性の微弱な水温ステップ構造の形成を確認している。

#### (2) 濁水層上方の定温層と安定水温跳躍層から成るステップ構造

湖岸境界部の湖底近傍では、風や小規模な内部波によって瞬間的に $10^{-2}$ m/sオーダーの鉛直流が発生する。境界混合と呼ばれるこの過程で100 $\mu$ m程度の底質まで巻上がる場合がある。細砂は速やかに沈降するが、躍層下部の水温分布にはその痕跡として定温層が残り、その下部にシルト分が残留して数mg/lの濁水貫入層を形成する。1994年の観測では厚さ0.7mの定温層が1時間以内に形成された（Okuboら、1996）。濁りが湖底起源であることは同日・同水域の濁水試料の懸濁態化学成分分析からも知られた（杉山ら、1995）。巻上げに伴う濁水貫入過程と水温ステップはカオリン斜面に内部波をかけた実験でもみられた（森川ら、1996）。その後の観測では、濁水層と定温層の形成をより詳細に捉えるようになったが、巻上げにより水温ステップが短時間に形成されることが確認されている。

#### (3) 汽水湖の水温逆転層と拡散領域の水温変動

1994年渇水で淡水流量が減少し宍道湖は例年より高塩分・高温となった。10月初旬に周期10分程度の水温変動（パルス的水温上昇）がみられたが、拡散領域の安定限界付近で発生する水温振動と同じものかどうかは確認できていない。10月中旬になって湖面冷却が進んだが、汽水湖特有の秋の水温逆転分布も常に存在するのではなく放射冷却条件とくに夜間に形成されることが知れた。拡散領域の実験は塩分または濁度でつくった安定成層を夜間放熱させて行った。10 $^{-8}$ m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>程度の冷却浮力束では水温逆転層を含む数段のステップ構造が形成されたが、温濁系の水温逆転層は、カオリンの静水沈降速度とほぼ等しい割合で下方に移動し、逆転層近傍に限って周期数分の水温振動がみられた。現在も熱塩系で水温・塩分の同時変動を計測しており、汽水湖の水温逆転層と水温変動についても結果が集まるものと考えている。

### 4. まとめ

本研究では、懸濁物を媒介とする二重拡散対流の微弱な流動により湖の水質がどのように変動するかについて、熱塩対流も含め、観測や実験で検討した。懸濁物質をシルト、溶存物質は塩分に代表させ各々二重拡散対流系に限定しているが、湖におけるフィンガー・拡散領域の存在とその現象が次第に明らかになってきた。水温躍層内の濁水層がかなりの頻度でかつ相当長期にわたって存在し、周辺の浮遊生物・溶存酸素・栄養塩などの分布に影響することをみると、湖の水質変動を考える上で二重拡散対流は無視しえない過程と考えられる。実際に水質現象を二重拡散系の物質輸送に結びつけるには熱塩・温濁問題を統合して水温と懸濁・溶存物濃度の多重拡散対流系へ一般化する必要があるが、注目するシルトや塩分濃度が他の生物・化学物質濃度より高いことが明らかであって温濁もしくは熱塩二重拡散対流がそれ以外の低濃度物質の輸送を支配すると考えられる場合には、二重拡散対流としての実質沈降速度と

浮力フラックス比を与えれば、各初期濃度に対して低濃度物質の対流効果を表現できると考えられる。ここでは、生成や消費を伴う反応や捕食などの過程とは異なる鉛直移流効果のみを考えている。水質因子を流動の数値モデルに取込むということは、対流調節の鉛直フラックスをできるだけ正確な数式で表すことである。一方、共沈やフロックは、見かけの比重・粒径変化として扱える沈降過程でありこのモデルには組みやすいが、さらに懸濁物の粒度分布を取込む必要がある。

二重拡散対流は湖流や静振のように強い流速を伴わない微弱な運動である。しかし、アオコや貧酸素水塊など強成層となる渇水時の水質変動などに強く影響する。弱い外力の現象は計算条件的に安定であり、動粘性・分子拡散係数に近い値で湖流解析は可能である。現在、観測や実験値を得ているものは大半が日周変動であるが、時間積分が可能になれば長期水質変動を数値モデルで扱えるようになると考えている。

浅枝・玉井 (1982) : 土木学会論文報告集、323、109-119

神田・道奥・西川・東野・伊達・石川 (1996) : 水工学論文集、40、601-606

松本 (1996) : 水工学に関する夏期研修会、32A-8、1-14

森川・大久保・村本 (1996) : 水工学論文集、40、607-612

名合・大久保・長井 (1996) : 土木学会中国支部、48、179、180

大久保・村本・森川・江11 (1995) : 京都大学防災研究所年報、38B-2、407-422

大久保・森川・紀本・田中 (1996) : 岡山大学環境理工学部英文紀要、1, 1, 77-89

杉山・堀 (1995) : 日本陸水学会第60回名古屋大会講演要旨集、60、A04, 4

# 風による湖水の混合と物質輸送－琵琶湖の水質形成機構に関する基礎的研究－

坂本 亘 (さかもと わたる) 京都大学農学研究科 教授

(略 歴) 1939年生まれ。北海道大学水産学部漁業学科卒業、北海道大学大学院修了、  
東京大学海洋研究所助手、京都大学農学部助教授を経て、1992年より現職

(専 攻) 水産海洋学

(所属学会) 日本海洋学会、日仏海洋学会、日本水産学会

(著 書) 「海洋環境光学」(東海大学出版会)

藤原 建紀 (ふじわら たてき) 京都大学農学研究科助教授

(略 歴) 1949年生まれ。大阪大学理学部物理学科卒業、大阪大学大学院修了、  
通商産業省中国工業技術試験場研究員を経て、1992年より現職

(専 攻) 沿岸海洋学

(所属学会) 日本海洋学会、海洋気象学会、日本リモートセンシング学会、土木学会、日本水産学会

(著 書) 「水産海洋環境論」(恒星社厚生閣)

---

## 1. はじめに

琵琶湖は浅い南湖と、広くて深く水量の多い北湖から成り立っている。南湖については従来から水質の悪化が問題になってきた。しかし、近年は最後の良質な水源である北湖についても水質・底質の悪化が問題となってきている。

一般に、海や湖では水に溶けた物質や浮遊性生物は流れとともに運ばれる。潮汐のない湖では、風は流れを起こす主要な駆動力と考えられる。特に台風などの強風時には、混合と輸送が集中して起きていると推定される。しかしながら、風の起こす現象は非定常的であること、強風時の現地観測は困難であることなどのため、その実態はよく分かっていない。

本研究では多数の日記記録式温度計および流速計を設置し、長期間にわたって流動、成層構造、物質輸送などを連続観測した。また観測で得られた結果をもとに数値実験を行い、風に対する琵琶湖全体の応答を明らかにした。これらによって、強風が吹いたときに琵琶湖内に起きる一連の現象(流動・混合機構・栄養塩輸送など)を明らかにした。

## 2. 調査および解析

調査水域の地形および測点位置を図-1に示す。観測水域は北湖南部であり、北側の水深70m水域から、水深5mの南湖入口に向かうなだらかな斜面上に位置する。サーミスターチェーンは北湖から南湖に向かう縦断線上(測点1からT)と、これにほぼ直交する横断線上(測点6から10)にならんでいる。この他に、南湖内の6測点では底上0.5mの水温を測定した。また、琵琶湖大橋においては京大地球物理学教室が鉛直水温分布を測定している。測点5にはADCPとサーミスターチェーンを設置した。また、測点Kは滋賀県の水質監視塔(湖中局)であり、琵琶湖研究所は、ここにおいて気象要素の測定を行った。

数値モデルは水平1次元・鉛直2層のレイヤーモデルである。ただしこのモデルでは、上層と下層の境界(躍層)が水面に現れることや、湖底と交わることを許している。また上層と下層の間には、摩擦力は働くが、混合は起こらない。このモデルに一定期間風を吹かせ、強風時およびその後起きる現象を再現した。現地調査水域は北湖南半分にかざられるのに対し、モデルは南湖および北湖全体を計算領域としているので、現象の全体像をとらえるためにも、現地データの理解にも役立つ。



### 3. 結果

観測期間中、台風11号（1993年8月27日）、13号（9月4日）、14号（9月9日）が通過したが、台風13号の風が一番強かった。台風13号によって、9月4日5時から強い南東風が吹きはじめ、8時には平均風速の最大値17m/sに達する。その後、風速は急速に弱まり、16時には約5m/sの西風に転じ、22時には5m/s以下となる。図-2に台風13号通過後の湖中の縦断水温分布（左）および横断水温分布（右）を示す。図中の測点BBは琵琶湖大橋、OGは雄琴沖（南湖北部）である。

秋季の琵琶湖の成層構造は、鉛直混合された上層水（水温24℃以上）と、前年冬季にできた冷水がほとんど加熱されずに取り残されている下層水（9℃以下）から成り立っており、両者を躍層部が隔てている台風に伴う南よりの風により、上層の水は琵琶湖北部に吹き寄せられ、南部では低温の下層水が上昇している（上段；4日22時）。風向きが変わると躍層は急速に低下する（下段；5日4時）。このとき、下層では斜面を滑り降りる50cm/sを越える速い流れが観測されている。このとき上層と下層の混合が進むと同時に、底泥の巻き上げも起きている。

前記の観測結果を、数値モデルで再現した結果を図-3に示す。図の左が北湖であり、右側の浅い部分が南湖である。灰色は上層水を、黒色は下層水を表わす。風の条件は、南風12時間ののち無風が続く条件となっている。計算で得られた躍層の変化を、風の吹き始めからの時間にそって順に並べている。

南風によって上層水は北に吹き寄せられ、北部の上層水が厚くなる。風が止むと、これが内部サージ（内部段波）として南へと伝搬してくる。内部サージの波高は南に行くほど増大し、北部で発生した内部サージが南斜面に衝突するのは4風が止んでから約1.5日後である。北湖の南斜面にサージが衝突するときには下層に強い流れを起こす。このことは現地観測で得られた結果をよく説明する。

### 4. まとめ

琵琶湖では、上層と下層の混合は強風によって集中的におこされる。この混合過程には、風が吹いているときに起きるものと、風が作った内部サージが湖底斜面に衝突しておきるものがある。後者は南風の後に起きるものであり、風が止んでから約1.5日後に北湖南端部でおきる。この現象は北風では起きない。これは、北で深く南で浅いという湖底地形に原因がある。

内部サージが湖底斜面に衝突したときには下層に高速の流れ（50cm/sを越える）が起き、鉛直混合Iとともに底泥の巻き上げも起きる。琵琶湖では長期的にみた場合、水深20m以浅での底泥の堆積が少ない。内部サージによる底泥の巻き上げと沖合いへの輸送は、このことを説明するかもしれない。

鉛直混合には、下層に豊富にある硝酸態窒素を上層に運ぶ効果と、上層に多い植物プランクトンを下層に拡散させ、有光層内の植物プランクトン濃度を減らす効果がある。琵琶湖の場合、植物プランクトンの増殖はリン制限下にあり、無機態リンは上層にも下層にも乏しいので、鉛直混合が起こっても植物プランクトンの増殖は起こらない。

# 湖沼におけるアオコ毒素の化学生態学的研究

沖野 外輝夫 (おきの ときお) 信州大学理学部 教授

(略 歴) 1937年生まれ。東京都立大学理学部生物学科卒業、東京都立大学大学院修了(博士課程)、財団法人資源科学研究所研究員、社団法人野村総合研究所副主任研究員、信州大学理学部附属臨湖実験所助手、助教授、教授を経て、1995年より現職

(専 攻) 陸水学、生態学

(所属学会) 日本陸水学会、日本生態学会、環境科学会、国際理論応用陸水学会

(著 書) 「富栄養化調査法」(講談社)

「自然保護の生態学」(倍風館)

「生態遷移研究法」(共立出版)

「陸水と人間活動」(東京大学出版会)

「微生物生態学2、生態系の中の微生物」(共立出版)

「湖沼調査法」(古今書院)

「諏訪湖」(八坂書房)

「水域の窒素(チッソ):リン比と水産生物」(恒星社厚生閣)

朴 虎東 (ばく ほーどん) 信州大学理学部助手

(略 歴) 1962年生まれ。江原大学自然科学部循環学科卒業、信州大学大学院修了(博士課程)、1994年より現職

(専 攻) 生態毒性学

(所属学会) 日本陸水学会、日本微生物生態学会

(著 書) 「アオコその出現と毒素」(東京大学出版会)

「Toxic Microcystis」(CRC Press)

「新・植物の生活誌」(平凡社)

---

## 1. 研究背景と目的

自然湖沼およびダム湖を水源池にしている国々では、富栄養化の進行による有毒ラン藻類の発生に頭を悩ましているのが現状である。現在のところ、飲料水中のラン藻毒素のガイドラインを設けている国はオーストラリアだけであり、日本とカナダでは検討中である。オーストラリアのラン藻毒素のガイドラインはミクロシスチンの濃度で、短期暴露(14日以上暴露)が $1.0 \mu\text{g/L}$ 、長期暴露(一生の暴露)が $0.1 \mu\text{g/L}$ (*Microcystis*の細胞数で500cells/mL)の、それぞれ二つの基準値を設けている。有毒ラン藻類が生産している毒素は大きく神経毒素(anatoxin-a, anatoxin-a(s)、aphantoxin)と肝臓毒素(microcystin, nodularin)がある。日本の湖沼で、問題となっているラン藻毒素は、主にミクロシスチン(以下MCと省略する)である。現在のところ、MCを生産すると報告されているラン藻は*Microcystis aeruginosa*, *M. viridis*, *Nostoc sp.*, *Oscillatoria agardhii*, *Anabaena flos-aquae*等である。ラン藻類の中で主に*Microcystis*が生産する毒素、MCの生態系中の分布および水生生物に及ぼす影響に関する研究はそれほど多くないことから、本研究は、諏訪湖における*Microcystis*の細胞密度・種類組成と湖水中のMC含有量の季節・経年変化(1991年から1995年まで)についての研究を土台として、水界の生態系中におけるアオコ毒素MCの挙動を明らかにすることを目的としている。その第一段階として湖水中、底泥および、

各生物群集に対するMCの分析方法の検討を行った。

## 2. 研究方法

MCの定量分析に用いた水生動物は1992年から1995年までの、6月から10月の間に諏訪湖の沿岸帯において採集した。採集した水生動物はイシガイ (*Unio douglasiae*)、ドブガイ (*Anadonta woodiana*)、カラスガイ (*Chstaria plicata*)、コイ (*Cypnnus carpio*)、ワカサギ (*Hypomesus transpacificus nipponensis*)、ウキゴリ (*Chaenogobius urotaenia*)、スジエビ (*Palaemon paucidens*)、アメリカザリガニ (*Cambarus clarkii*)、オオユスリカ (*Chironomus pulmosus*)、動物プランクトン (オナガミジンコ *Diaphanosoma brachyurum*、ヤマトヒゲナガケンミジンコ *Eodiaptomus japonicus*、ニセゾウミジンコ *Bosmina fatalis*) である。生体中のMC分析方法は、適量の生物試料を20%酢酸溶液またはBuOH-MeOH-H<sub>2</sub>O溶液で24時間3回抽出を行い、その遠心上澄液をODSカートリッジに通し、水と20%MeOHで洗い落としした後、90%MeOHで溶出する。溶出液をシリカゲルカートリッジに添加し、MeOHで洗い落としした後、70%MeOHで溶出し、高速液体クロマトグラフィー (HPLC, Photodiodearray detector, Cosmosil 5C<sub>18</sub>-AR Column, 238nm) により定量分析を行った。

## 3. 研究成果

(1) **ラン藻細胞中のMC定量**：諏訪湖におけるMicrocystis細胞中MC (1991年から1995年まで) は、1993年の乾重量当たりのMCの量が他の年と比べると非常に少なかった。1993年は冷夏の影響でアオコの発生量は少なくMCの乾重量当たり生産量は前後の年に比べて1/10以下であった。このように、MCの生産量はMicrocystisの発生状況に大きく作用されていることが分かる。1991年と1994年は乾重量当たりのMCの生産量は高く、1991年の最高量は2020  $\mu$ g/g、1994年は最高値2260  $\mu$ g/gであった。なお、同じ年でも時期により大きく変動することが分かった。それはMicrocystisの発生状況に関係している環境要因の変化によるもので、Microcystisの種組成の変化、増殖状況の変動等により大きく作用されることが予想される。その中でも有毒種であるMicrocystis aeruginosaとM. viridisが共存している時期はMCの生産量が高い。

(2) **湖水中のMC定量**：水域におけるMCの他の生物に及ぼす影響、また水源地におけるラン藻毒素の影響を評価する上で水容積当たり毒素の定量法の確立はもっとも必要なことである。1994年の水容積当たりMC量の変動はアオコ乾燥重量当たりの量の変動と似た傾向を示すが、1992年の、主に7月から10月までは大きく異なっていた。それは湖水中のMicrocystisの細胞数の多少とMCの含有量の差によるものである。湖水中のMC量の最高値は1994年の184  $\mu$ g/Lである。

(3) **湖底泥中のMCの定量**：諏訪湖から採集した底泥中のMC分析方法はまだ検討中である。今のところ、底泥にMCが吸着されることは確認できているが、底泥からMCを脱離することに再現性が少ないことから、逆に、底泥にMCを添加することで、回収率の高い分析方法を開発途中である。この方法を用いた底泥へのMCの最高吸着率は、MC-RRで1860  $\mu$ g/g、MC-LRでは640  $\mu$ g/gであり、MC-RRがMC-LRの3倍吸着量が多いことが分かった。

(4) **魚貝類の生体中のミクロシスチンの定量**：アオコが発生している水域から採集した魚貝類の分析方法の確立は食品衛生的側面、およびMCの水界生態系における挙動を解析する際に重要な役割を果たすこととなる。魚貝類の生体中のMCの定量は試料中のMC含有量が少ないことから非常に困難である。まず、貝については4つの部位に分け、部位別のMCの含有量を定量した。諏訪湖から1992年の夏に採集したイシガイからはMC-RRとL Rが検出された。イシガイの部位別の全生物体中に占めるMC含有率を見ると中腸腺に53%、鰓と筋肉に34%、生殖腺に6%、消化管に7%であった。哺乳動物を用いた急性。慢性毒性実験では、MCは強い肝臓毒性を持つことが知られており、MC投与後、その殆どが肝臓に集まることから、貝の肝臓に当たる中腸腺に全体の半分以上のMCが存在することは説明できる。1992年の7月に採集した

イシガイの中腸腺では $2.72 \mu\text{g/g}$ 、10月では7月の2倍のMCが検出された。1995年からは抽出方法の改善と解剖方法を変更したので1992年の結果との直接比較は困難であるが、鰓と筋肉で $6.8 \mu\text{g/g}$ 、中腸腺を含む内蔵では $35 \mu\text{g/g}$ 以上のMCが検出された。また諏訪湖で採集したイシガイをMCが無い条件で3ヶ月間飼育すると、1割くらいにMCが減少することが分かった。カラスガイについては全くMCが検出されなかった。ドブガイは肝臓のみ少量検出されているが、イシガイは全部位で検出されている。その中でも肝臓が一番高い含有量を示していることが分かる。更に肝臓の場合、1992年の7月より10月の方が含有量が高いことから、MCが生体中に蓄積・濃縮される可能性を示している。貝以外では、コイ、スジエビなどの水生動物からも少量のMCの存在が確認された。今後、MCの水生動物における蓄積・濃縮の有無、またMCの定量的な濃縮機構について検討したい。

# 富栄養化防止のための強力な窒素およびリン除去細菌の分子育種に関する研究

大竹 久夫 (おおたけ ひさお) 広島大学工学部 教授

(略 歴) 1949年生まれ。東京大学工学部化学工学科卒業、大阪大学大学院修了、  
東京大学応用微生物研究所 (生物工学部門) 助教授、  
米国ワシントン大学生物学科客員助教授  
米国イリノイ州立大学医学部客員研究員を経て、1989年より現職

(専 攻) 生物情報工学

(所属学会) 生物工学会、農芸化学会、環境バイオテクノロジー研究会

(著 書) 「地球をまもる小さな生き物たち」(技報堂)、「地球がよみがえる」(シーエムシー)

## 1. 研究目的

湖沼や内湾の富栄養化による環境破壊は、流域からのリンや窒素の過剰な負荷により引き起こされる。排水中に含まれるリンや窒素を除去するには、効率と経済性との釣合いから生物学的処理法に頼らざるをえない。生物学的処理法におけるリンおよび窒素除去の主役は細菌であり、生物学的処理法の脱リン・脱窒能力はこれら細菌のリン酸摂取および硝化脱窒能力に依存している。したがって、細菌のリン酸摂取または硝化脱窒能力を飛躍的に増大させることができれば、生物学的処理法による脱リン・脱窒能力を向上させ、ひいては富栄養化による環境破壊を未然に防止することに貢献できると思われる。本研究では、強力な窒素およびリン除去細菌の分子育種を目的として、遺伝子操作による細菌のポリリン酸蓄積能力の強化と、硝化プロセスにおける鍵酵素であるアンモニアモノオキシゲナーゼ (amo) およびヒドロキシルアミンオキシドレダクターゼ (hao) 遺伝子のクローニングを行った。

## 2. 研究方法

まず大腸菌のリン酸能動輸送系をコードするpst遺伝子およびポリリン酸合成酵素をコードするpsk遺伝子を持つ組換えプラスミドを作製した。いずれの遺伝子も細胞がリン酸欠乏にない状態でも発現されるようにtacまたはtetプロモーターの下流に挿入した。次に、染色体上のppk遺伝子をカナマイシン耐性遺伝子カセットを用いて破壊し、極性効果により下流に存在するポリリン酸分解酵素をコードするppx遺伝子の発現を抑制した。また、amoおよびhao遺伝子のクローニングは、住友化学工業において分離された亜硝酸菌EN I-11株から染色体DNAを調製しPCR法を用いて行った。

## 3. 研究成果

大腸菌のMV1184株を親株とし、これと組換え株を用いてリン酸の取り込み実験を行った。まず、pst遺伝子だけを増幅した株はppk遺伝子だけを増幅した株よりもリン除去能力が高かった。これは親株のリン酸除去速度がリン酸の細胞膜輸送により律速されていることを示すものと思われる。pst遺伝子と即1遺伝子を同時に増幅した場合、増殖速度は親株に較べて顕著に減少したが、リン酸の除去速度は親株よりも数倍増大した。細胞の乾燥重量当たりのリン含有率は、最大16% (リン酸として48%) にまで達した。高リン酸蓄積細菌として知られるAcinetobacter属細菌のリン含有率が高々10%程度であることを考えると、この値がいかに高い値かがわかる。また、親株のリン含有率が約1.4%であるから、この組換え株のリン含有率は親株の約10倍にあたる。

細胞内リン含有率は、いったん最大値16%に達した後約13%にまで減少した。この結果は4細胞からリン化合物が放出されたことを示している。細胞外に放出されたリン化合物をエタノール沈澱した後、ポリアクリルアミド電気泳動にかけ、ゲルをトルイジンブルーにより染色したところポリリン酸特有の

赤紫色を呈した。これらの結果から、細胞から放出されたリン化合物がポリリン酸であることはほぼ間違いない。興味深いことに、細胞が過剰のポリリン酸を蓄積した後では、細胞によるリン酸の取り込み速度とポリリン酸の放出速度はほぼ等しくなった。このことは細胞からポリリン酸が放出されることにより、細胞のポリリン酸蓄積量がほぼ一定に保たれていることを意味している。

amoおよびhao遺伝子をクローニングするためまず、低コピー数で強力なtacプロモーターを持つベクターを用いたところ、amoABの2.4kbのPCR産物のクローニングに成功した。しかし、hao遺伝子クラスターにはホストに致命的な部分が含まれているためか、この方法ではクローニングできなかった。そこで、各種制限酵素を用いてhaoA遺伝子クラスターの制限酵素地図を作成し、断片ごとにクローニングを行った。その結果、haoA遺伝子全領域を含む3.5kbのDNA断片の取得に成功した。

#### 4. まとめ

分子育種されたポリリン酸蓄積細菌には、他に見られない利点がある。まず、細胞内ポリリン酸の合成はATPを消費するから、菌体増殖は低下する。したがって、飛躍的に増大したポリリン酸合成能を持つ細菌は、排水中からリンを効率的に除去しながらも菌体の増殖はむしろ低く抑えられる。また、これまでの活性汚泥法ではリン酸除去能力を高めるために、汚泥を交互に嫌気好気ストレスに晒す必要がある。分子育種された細菌のポリリン酸蓄積機構は分子制御されており、余分なストレスをかける必要がない。また、大腸菌に頼らずとも多くの細菌がポリリン酸を蓄積することがわかっているから、より実用的な細菌を選びここで述べた手法を応用して分子育種することが可能である。また、クローニングしたamoABおよびhaoA遺伝子をPseudomonasaeruginosaなどの脱窒能力も持つ細菌で発現させることができれば、硝化から脱窒までを単一の従属栄養細菌で行わせることが可能となるので現在検討中である。

## 総合討論

### <コメンテーター>

國松 孝男（くにまつ たかお） 滋賀県立大学環境科学部 教授

（略歴）1943年生まれ。京都大学農学部農芸化学科卒業。京都大学大学院修了。  
滋賀県立短期大学講師、助教授、教授を経て、1995年より現職。

（専攻）水質化学

（著書）「都市の水環境の創造」（技報堂出版）、  
「河川汚濁のモデル解析」（技報堂出版）、  
「自然の浄化機構の強化と制御」（技報堂出版）等。

### <コーディネーター>

中村 正久（前掲）