

## 深湖底の溶存酸素濃度減少

### 溶存酸素濃度とは？

みなさんは「溶存酸素濃度」という言葉を聞いたことがあるでしょうか？琵琶湖や河川には多くの生物が暮らしています。その中にはホンモロコイやイサザ、ビワマス、ニゴロブナなどの固有種も多く存在しています。また、動植物プランクトンや水生昆虫類、沈水植物（水草）なども生息・繁茂しており、多種多様な生物が集まって一つの生態系を構成しています。そして、これらの生物（一部のバクテリアを除く）が水中で暮らしていくためには酸素が必要であり、この水中に溶けている酸素の濃度を表した数値が「溶存酸素濃度」です。

### 生物にとって必要な溶存酸素濃度

生物にとってどの程度の溶存酸素濃度があれば生きていくことができるのでしょうか？海洋生物での調査によると、比較的low酸素に強い貝類を除くと、溶存酸素濃度が約 4mg/L 以下になると、底層に生息する生物に何らかの影響が出てくることが考えられるとしています（丸茂ら（2012）、社団法人日本水産資源保護協会（1989））。また、低酸素耐性は生物の種類によって異なり、同じ種であっても 発育段階によって異なるとの研究結果も示されています（山元ら（1988）、藤原ら（2011））。

滋賀県では、琵琶湖北湖において溶存酸素濃度の低下に伴うバクテリアや底生生物への影響を調査しており、底生生物の貧酸素耐性実験にも取り組んでいます。また環境省でも、湖沼などの底層において、溶存酸素濃度の低下により水生生物が生息不可能となる状況が見られることから、底層における溶存酸素濃度（底層 DO）の環境基準の設定に向けて作業が始まっています。

なお、溶存酸素濃度が低下する現象は、主に世界の水深の深い湖で報告されています。例えばスイスとフランスの国境に位置するレマン湖などでも、溶存酸素濃度の低下が顕著になっています（石黒（2002））。

### 琵琶湖での酸素の消費・供給と低酸素化

湖水の溶存酸素濃度は、湖内での酸素の消費と供給のバランスで決まります。湖内での酸素は、魚類やプランクトン、水草、底生動物など、湖に生きる生物の呼吸によって使われています。さらに、流域から流れこむ汚濁物質、また湖底に沈んだ魚やプランクトンの死骸・排泄物が微生物により分解されるときにも酸素が消費されます。

一方、湖内への酸素供給についてですが、表層部については大気中から酸素が溶け込むほか、植物プランクトンや水草による光合成によって行われます。それらは同時に呼吸によって酸素を消費していますが、光合成による酸素の生産が呼吸による消費を上回るため、見かけ上酸素を生成していると言えます。

それでは、太陽光の届かない深層部への酸素の供給は、どのように行われているのでしょうか。この深層部への酸素供給の鍵を握るのが、冬季の「琵琶湖の全循環」です（2ページ参照）。この発生要因としては、酸素を多く含む表層水が冬季の冷たい季節風により冷やされて深層へ輸送されたり、湖岸が冷えることによって斜面に沿って沈み込んだりするほか、雪融けなどにより河川からの冷たい水が湖に入ってくるなどがあげられます。

しかし、近年の異常気象などにより、この酸素供給がうまく機能していないのではないかとされています。滋賀県では、この低酸素化を「琵琶湖が抱える大きな問題」ととらえており、当センターでもこの現象がどのようにして起きているのかを解明するための研究を行っています。これらの研究を通して、どのようなことがわかってきたのでしょうか？これについては、次のページで詳しく紹介します。

管理部 永里 淳



写真 水深別水質調査でのサンプル採取風景

貧酸素水塊の形成および貧酸素の生物影響に関する文献調査．丸茂恵ら．海生研年報 2012; 15: pp.1-21

漁場環境容量策定事業報告書（第1分冊）．（社）日本水産資源保護協会 1988 淡水産魚類 11 種の低酸素下における鼻上げおよび窒息死．山元憲一ら．水産増殖 1988; 36: pp.49-52

琵琶湖沿岸のヨシ帯におけるニゴロブナ *Carassius auratus grandoculis* の初期生態とその環境への適応．藤原公一ら．日本水産学会誌 2011; 77(3): pp.387-401

レマン湖の湖底の溶存酸素の増加とその要因．石黒直子．お茶の水地理 2002 43: pp.33-40

## 琵琶湖の全循環とは？

琵琶湖の全循環とは、真冬に湖水が鉛直方向に深湖底まで十分に混ざり、水温が表水層から深水層まで同じになる現象をいいます。琵琶湖の全循環は、酸素を十分に含んだ表層の水を深湖底まで供給し、湖底に暮らす生物にとっても、また湖底付近の水質にとっても大変重要な意味を持っており、「琵琶湖の深呼吸」とも呼ばれています。

## 世界の湖の循環型の変化と「琵琶湖の深呼吸」の遅れ

世界中で進行している地球温暖化によって、集中豪雨や熱波などの異常気象の頻度が高くなっています。これらの気象変動は、気温、湿度、降水、風向・風速、雲量と影響している外部条件の変化により、湖の水温、鉛直混合のパターンと時期、成層強度（表水層と深水層の温度差）などを変化させました。ドイツのコンスタンツ湖などでは、全循環型から、深湖底まで完全に循環が起こらない部分循環型へ移行しました。琵琶湖では、2006年度の記録的な暖冬により、全循環の時期が遅くなり、例年なら1～2月に生じる全循環が3月下旬になってやっと起こり、そして、2007年の秋には深湖底で非常に低い溶存酸素濃度が確認されました。

## 琵琶湖の低酸素化

琵琶湖では、1960～70年代頃から、深底部の湖底直上層水で溶存酸素濃度の低下が顕著になってきました。そして、1991年には湖底付近において硫酸化細菌のチオプローカの出現が確認されました。湖底付近の酸素濃度がゼロに近くなった時には湖底から重金属類や硫化物が溶け出すのですが、チオプローカはその硫化物を酸化してエネルギーを得る細菌であることから、琵琶湖の深底部において低酸素化が進行してきたことを意味します。

また、2002年11月には微生物が重金属の一種であるマンガンを酸化したときに生み出されるメタロゲニウムという構造体が北湖第一湖盆（図1）の深層部に広範囲に多量に出現しました。メタロゲニウムの出現もまた、湖底泥の嫌気化を示しています。

2007年秋季には北湖第一湖盆内の深底部で溶存酸素濃度の極めて低い水塊が確認され、12月には当センターの水中撮影で北湖第一湖盆湖底の広範囲においてイサザやエビ類が死亡している様子が観察されました。これは生物への低酸素化の影響とも考えられます。

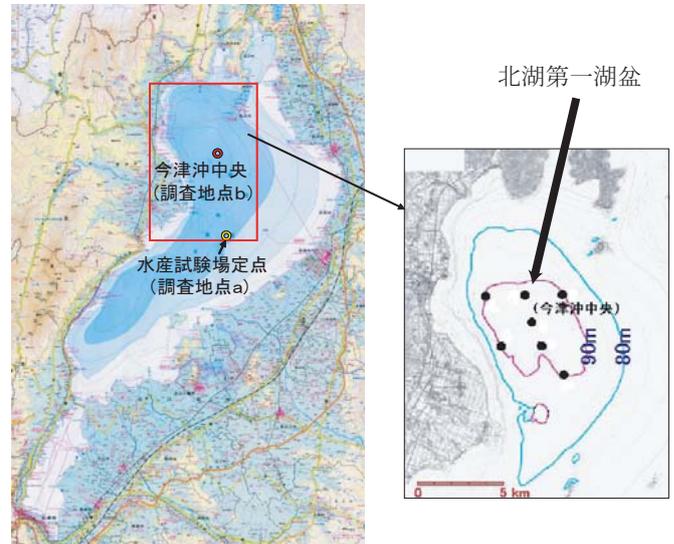


図1 北湖第一湖盆

## 低酸素水塊の形成

本研究の現場調査によると、琵琶湖の低酸素化問題は、近江今津沖の北湖第一湖盆（図1）の90m以深の限られたところで起こっていることがわかってきました。さらに、水温、溶存酸素濃度、流れの自動連続観測機器による調査により、夏に深湖底に「低酸素水塊」と呼ばれる酸素濃度の低い水のかたまりが形成されていることが分かってきました。この水塊の溶存酸素濃度は空間分布が不均一で時間的にも変化していて、その動きは水温や流れに依存します。そしてこの水塊の北端の溶存酸素濃度が高くなった時、水塊の南端の溶存酸素濃度が低くなり、その逆も発生していることが分かりました。さらなる研究によると、この水塊は湖底付近での内部波（湖の中に存在する波）の特徴を持ち、5日の周期で反時計方向で回っていることが分かりました（図2）。

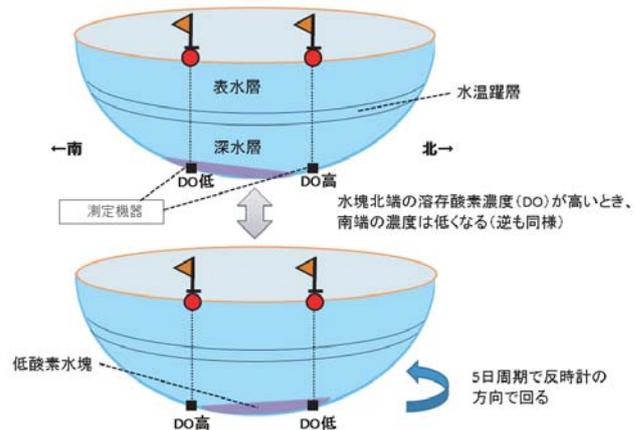


図2 低酸素水塊の動きのイメージ図

## 琵琶湖の低酸素化はどのようにして起こるのか？

図3は、調査地点a,b(図1)における年間溶存酸素濃度の最低値の年次変化を表したものです。60年間の長期で見ますと、北湖深水層の溶存酸素濃度は顕著な減少傾向にありますが、近年のデータをみると、傾向として必ずしも溶存酸素濃度が減少に向かっているとはいえないものの、低酸素化の発生頻度は高まっています。2008年11月17日に湖底直上1mの溶存酸素濃度は過去32年間の最低値となる0.5mg/Lを記録した一方、年によっては年間最低値が4mg/Lを超えることもあります。この溶存酸素濃度の年間最低値の変動については、さまざまな研究者から富栄養化(有機物増加)仮説、台風影響仮説、底泥の曝気(ばっき:酸素にさらされること)時間影響仮説などが出ています。

北湖深水層における溶存酸素濃度の低下は様々な要因によって起こりますが、当センターで研究を行った結果、①深湖底における12月の水温と3月の水温の差、②3月の溶存酸素濃度、③成層開始日に目を向けることで、次の晩秋の溶存酸素濃度を推測することができることがわかりました。

①については、12月と3月の深水層の水温の差が大きいほど、深水層においてより十分な鉛直方向の水循環が行われたことを意味します。②については、全循環が起こった後である3月の溶存酸素濃度は、1年間の溶存酸素濃度のストックとなるため、これが高いほど成層期の溶存酸素濃度も高くなる傾向にあります。そして③については、成層の開始が遅いほど、深水層での溶存酸素濃度低下の開始が遅くなる傾向にあります。

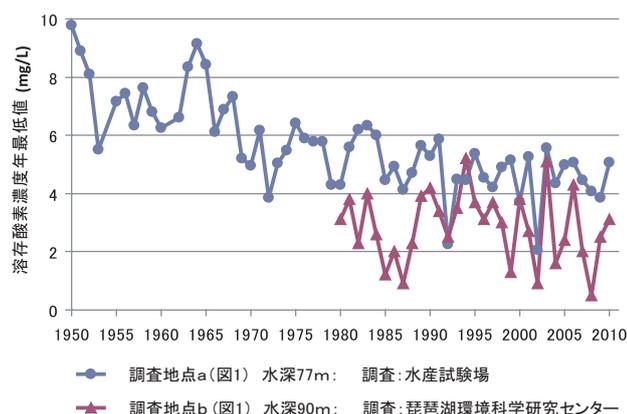


図3 琵琶湖深湖底の溶存酸素濃度年最低値

そしてさらなる研究により、琵琶湖深水層の溶存酸素濃度の季節変化は、まず地球温暖化が冬季の北極大気振動に影響を与え、これによって生じる全地球的な冬季の気候変動を受けて冬季の全循環状況および春期の成層開始日が変化し、これが晩秋の低酸素化状態に大きな影響を及ぼすことがわかってきました。つまり、琵琶湖深水層の低酸素化問題は、琵琶湖自身の問題というよりも、全地球規模の気候変動に強く影響されると考えられます。このため、これから地球温暖化が進んだ場合には、全循環が抑制されることにより再び低酸素化が進行することが危惧されます。

## 琵琶湖北湖の溶存酸素分布予測

当センターではこの研究結果を踏まえて、春先の水温と溶存酸素濃度および成層開始日に着目し、半年以上先の長期的な溶存酸素分布の予測を試みました。図4は2011年の4月の時点で、4月の観測データを用いて2011年4月~12月の北湖の溶存酸素濃度分布の季節変化を予測したものです。この予測はその後実施した現地調査データで検証されました。

なお、2012年8月後半から、北湖第一湖盆の水深約90m地点の湖底直上1mにおいて、急激な溶存酸素濃度の低下が見られ、これまでの調査で最も早い時期での低酸素状態となったことが確認されました。これは同6月から7月に大量増殖した植物プランクトン(スタウラストルム)が湖底に沈降し分解される際に酸素が消費されたことや、同8月から9月にかけて成層が強くなり、深層水が上層の水と混合しにくい状態にあったことによるものと推定しています。今後はより浅い水深を含む広範囲での水質モニタリング調査や、底生生物の生息状況調査を進めていきます。

総合解析部門 焦 春萌

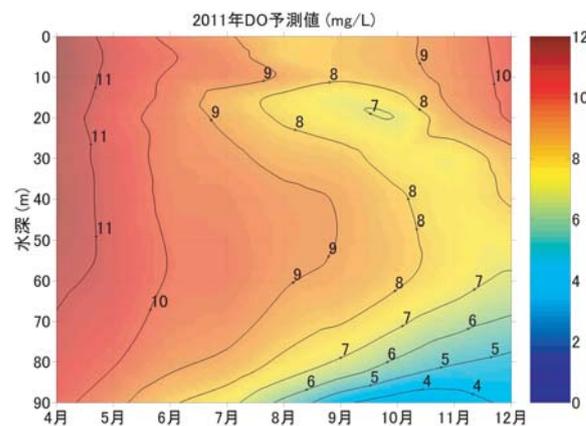


図4 調査地点b(図1)での2011年4月~12月の溶存酸素分布予測

# びわ湖 視点 論 点

## プランクトンがわたしたちに物語るもの

### はじめに

水質を調べ評価するときの一つの見方として、窒素やリン、COD や BOD といった理化学的な数値を通してみる方法があります。

一方、プランクトンに目を向けてみると、これらとは別の尺度からも湖の水質状態を評価できます。ここでは各プランクトンがどんなメッセージを出しているのか、そしてそのメッセージに耳を傾ける意味について考えてみたいと思います。

### 五感で感じるプランクトンからのメッセージ

琵琶湖ではプランクトンが異常発生すると、色や臭気や触感など人間の五感に訴えるような説得力で私たちに湖の健康状態を知らせてくれます。

視覚に訴える面では、まず、プランクトンはそれぞれ独特の形をしており、生物顕微鏡で観察することにより種類を特定することができます。また、植物プランクトンは緑色のクロロフィル色素のほかにも個々に特有の色素を持っており、たとえば、カロテノイドのカロテン類やキサントフィル類などは黄色を呈し、フィコエリスリンは紅色を呈しています。これらの色素が増加することによって水質の変化を知らせてくれますし、植物プランクトンの異常発生であるアオコ（緑色）現象や淡水赤潮（赤褐色）現象も、色によってその水域の異常を訴えているのではと考えられます。

次に、嗅覚に訴える面では、アナベナ（藍藻）やウログレナ（黄色鞭毛藻）は増加すると、水道水にカビ臭や生ぐさ臭をつけることから、その湖の状態を評価することができると考えられます。

また、触覚に訴える面では、アオコが集積すれば水面がぬるぬるとしたスカム状になるため、その触感から水域の異常さを知ることができます。そして糸状藻類に属するアオミドロやサヤミドロなどが湖底の石や水生植物に存在する場合には、種類によって手ざわりや足ざわり等の触感が異なるため、その糸状藻類の発生を知ることができます。

ある種類の植物プランクトンの異常発生は、同水域で共存する他の植物プランクトンにとっては棲みにくい環境ともなり、プランクトンの多様性の減少を招きやすいと考えられます。さらにその水域では、捕食する動物プランクトン群集にも影響し、

生食連鎖構造も変えてしまう恐れがあります。このようにプランクトンの異常発生などからもたらされる私たちの五感に訴えるメッセージは、「琵琶湖の叫び」と捉えることもできるのではないかと考えています。

### 「琵琶湖の气象台」をめざして

これからの琵琶湖の水質を考えた時に、近畿 1,450 万人の水がめとして、「アオコ」や「淡水赤潮」などの単一種類の植物プランクトンによる異常発生が起きないように水質改善や環境政策の推進が望まれています。さらに生態系保全の観点からも、第一次生産者である植物プランクトンの動向と、これらを捕食する原生動物やワムシ類やミジンコ類の動向、さらにはそれらを捕食するような魚貝類などの動向についても同じ期間での時系列レベルでデータを解析して評価することが重要です。

このように水質や生態系を的確に評価し、水環境の改善や環境政策の推進につなげていくためには、「継続は力なり」をモットーに、最も基礎となる「調査」を継続することが重要です。

滋賀県では 30 年以上の長きにわたり、プランクトンから発せられる水質異常のメッセージに目を向け続けています。地球温暖化などによって水質や生態系が変化している中で、この貴重なプランクトンのデータベースを「琵琶湖の气象台」として、継承し活用していくことが大切だと考えます。この气象台に目を向けることで、琵琶湖にかかわるすべての人々が正しい知識・情報を得て、よりよい判断をし、そして、琵琶湖を利用するすべての人が安心して暮らしていくことが可能になるのではないのでしょうか。

環境監視部門 一瀬 諭



写真 琵琶湖で見られるプランクトン

スタウラストルム（左上）・ピワクンショウモ（右上）  
ミジンコ（左下）・ミクラステリアス（右下）