

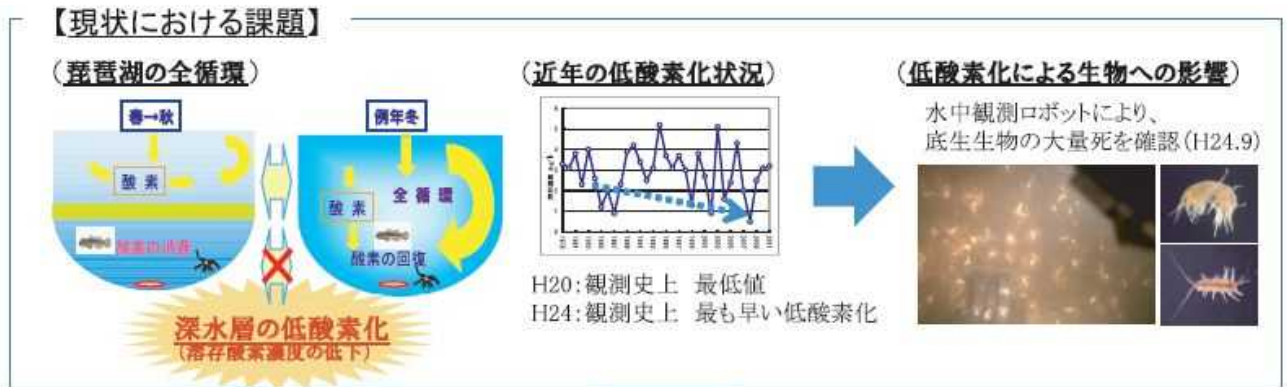
# 北湖深水層と湖底環境の総合評価

焦 春萌・早川和秀・奥居紳也・石川可奈子・古田世子

## 1. 目的

北湖第一湖盆の溶存酸素濃度(DO)は、2008年に観測開始以来の最低値を記録し、2012年9月には、最も早く低酸素状態になり、湖底における底生生物のへい死も確認された。また、近年の地球温暖化の進行等の影響により、今後も低酸素化が生じる頻度が増える可能性があることから、北湖深水層の水質や生物の状況を継続的に監視するとともに、低酸素化メカニズムの全体像および水質や生態系への影響を把握する必要がある。

そのため、深水層における水質の長期変動を把握するとともに、水質や底質の状況変化を高精度で把握する。また、低酸素化が生物に及ぼす影響、底泥や水質が湖底付近での酸素消費に及ぼす影響を把握する。これらの研究成果を総合的に解析・評価し、低酸素化現象の要因・影響等を提示する。



研究全体のイメージ

## 2. 研究内容と結果

### 【サブテーマ(1) 水深別水質調査と深湖底における酸素消費の実態把握】

北湖深水層での低酸素化の動向を把握するため、鉛直方向の水深別水質調査を行った。琵琶湖の最深地点である今津沖の北湖第一湖盆（水深約 90m）において、定期的に水温、D0 等の測定をした。湖底直上 1 m における D0 は、8 月初旬までは例年通り推移し、その後は 10 月初旬の 4.5 mg/L まで例年より緩やかに低下した。その後、台風 19 号や季節風の影響により 6.0 mg/L まで回復したが、12 月初旬に年間最低値である 4.3 mg/L を記録した。以降は翌年 1 月中旬まで横ばいで推移し、2 月初めには、北湖全循環が確認された。湖底直上 1m において 2001 年から 2013 年の間で D0 が 2 mg/L を下回る貧酸素状態となった年が 5 回あったが、2014 年は年間最低値が 4.3 mg/L であり、貧酸素状態は確認されなかった。

また、同地点において泥の酸素消費速度（SOD）の季節変動について検討するため、室内実験をし、泥の SOD を算出したところ、4 回の実験で  $\pm 0.03 \text{ gO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{day}$  の変化があった（図 1）が、これは、季節変動かどうかを確認し、モデル開発に応用したい。

さらに、湖底付近では高濁度層があることが知られているが、その実態が明らかとなっていない。湖底付近の浮遊粒子は酸素消費にも関係すると考えられ、粒子の分布や挙動、その特性や起源を推定することが必要である。そこで湖底付近の浮遊粒子の観測と成分調査および、今津沖中央にて、定期的に鉛直方向の濁度の測定を行った。高濁度層は夏から秋にかけて発達する傾向がみられた（図 2）。同時期に湖底付近に水温の等温層が観測されたことから、高濁度層は湖底付近の水塊構造の発達に関係すると考えられた。高濁度層内の粒子は 20  $\mu\text{m}$  以下の粒度が多いのに対して、湖底堆積物の粒子には 20-63  $\mu\text{m}$  の粒度が多く、粒子に含まれる有機炭素濃度をみると、湖底堆積物（3-4%、5-20  $\mu\text{m}$  画分）よりも高濁度層粒子（5-14%、5-20  $\mu\text{m}$  画分）の方が高く、異なる成分であることが明らかとなった。よって、高濁度層は湖底堆積物の単純な巻き上がりではなく、上層から沈降した植物プランクトンを含む粒子が蓄積しているなどの可能性が示唆された。

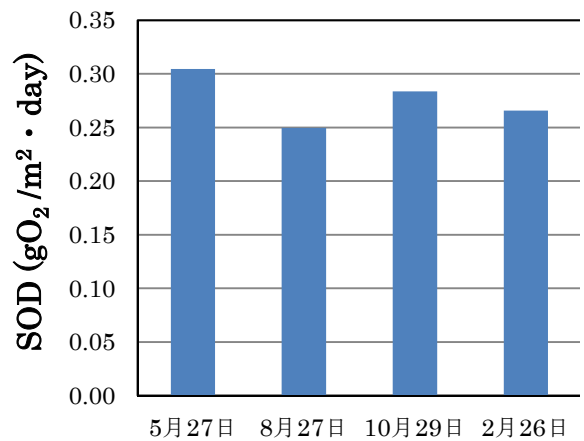


図 1 酸素消費速度の年間変動（2014）

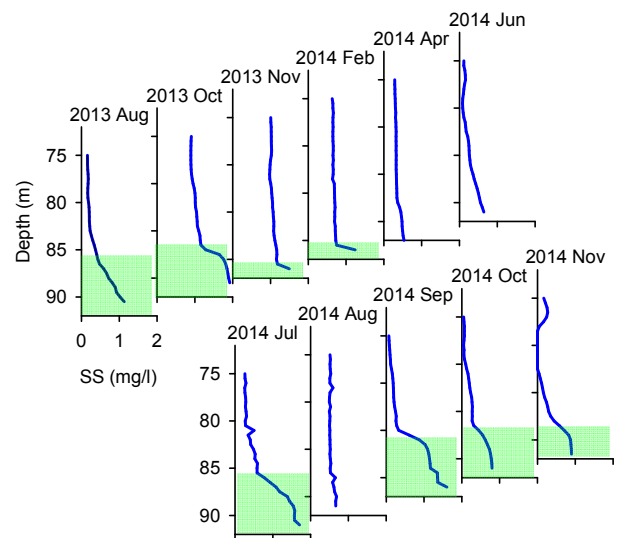


図 2 2013-2014 年の今津沖中央における濁度 (SS) の鉛直分布の変動. 着色部分が高濁度層に相当

### 【サブテーマ(2) 低酸素化に伴う深層生態系への影響把握】

#### (1) 底生動物

第 3 期中期計画から引き続き、琵琶湖の水深 70m~90m における 3 地点、さらに 2014 年 4 月からは 1~2 か

月に1回の頻度で水深50mを含む合計5地点においてROV（キューアイ社製 DELTA 150LZ）で湖底映像を撮影し、それぞれの映像から目視で底生生物の同定および計数を行った（図3は水深90m地点(N4)における底生生物現存量の季節変化を示す）。

底生生物のアナンデルヨコエビ（幼生期の浮遊個体は含まず）は、深底部全体として0~1971個体/m<sup>2</sup>の範囲で変動した。2012年9月に深湖底で貧酸素水塊の発生により水深90mの湖盆でアナンデルヨコエビの大量の死亡個体がみられたが、2013年6月の個体数は2012年の2倍あり、2012年9月の貧酸素による翌年の個体群現存量への影響は見られなかった。ただし、2014年は年最大時期および地点でも164個体/m<sup>2</sup>となり3年間で最も少なかった。

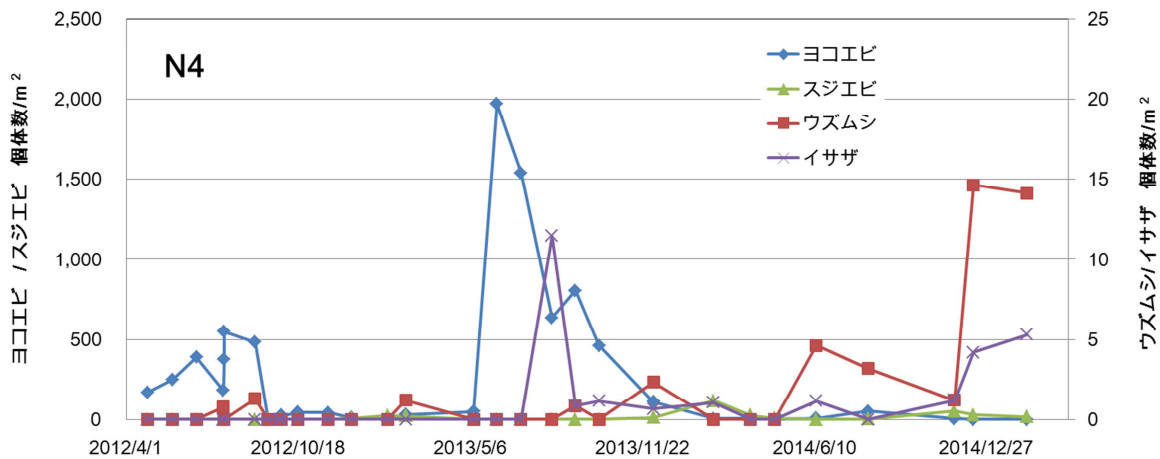


図3 地点 N4 における底生生物現存量の季節変化(2012 年 4 月～2015 年 2 月)

ピワオウズムシは、深底部に周年生息することが知られており、現存量は0~75個体/m<sup>2</sup>の範囲で変動した。貧酸素になりやすい地点(N4)では常に個体数が少なく、ピワオウズムシにとって生息しにくい環境になっていると懸念されていた。

スジエビは、繁殖期以外は深底部に生息している（原田, 1966）。現存量は0~119個体/m<sup>2</sup>の範囲で変動した。貧酸素になりやすい地点(N4)に冬期に集まる傾向がみられ、貧酸素水塊が形成される時期と重なると個体数が激減するかもしれない。

イサザは、繁殖期以外は深底部に生息している。0~31個体/m<sup>2</sup>の範囲で変動した。2013年8月に急激に大きなピークが見られ、その後も増加傾向がみられた。調査地点5地点の中では水深50mの地点で2015年2月に最大値30個体/m<sup>2</sup>を示した。

2013年~2014年の期間、貧酸素にならなかったが、2014年のアナンデルヨコエビは過去2年よりも明らかに少なかった。イサザとアナンデルヨコエビは、捕食-被食の関係にあるため(中西・名越 1984)、お互いの影響を検討する必要がある。

(2) メタロゲニウム粒子

また、2002年に初めて琵琶湖北湖の今津沖中央地点で発生したメタロゲニウム粒子は底層部が貧酸素化する成層湖において出現することが広く知られているが、粒子生成をもたらす環境因子など、粒子の生成機構に関してはほとんど明らかにされていない。2002~2013年度の12年間の今津沖中央地点水深約90mにおけるメタロゲニウム粒子数とDOの調査結果から弱い負の相関関係(r=-0.46, p<0.05)にあることがわかっている。

また、メタロゲニウム粒子の発生と無機溶存炭素濃度（ΣCO<sub>2</sub>）との関係についても指摘されているものの、これが溶存CO<sub>2</sub>濃度の影響によるものかについてはわかっていない。そこで、2014年4月～2015年3月のメタロゲニウム粒子と溶存CO<sub>2</sub>濃度等のモニタリング調査を実施しその関係性について検討を行った(図4)。溶存CO<sub>2</sub>濃度とpHは、負の相関( $r=-0.78, p<0.05$ )があることがわかった。

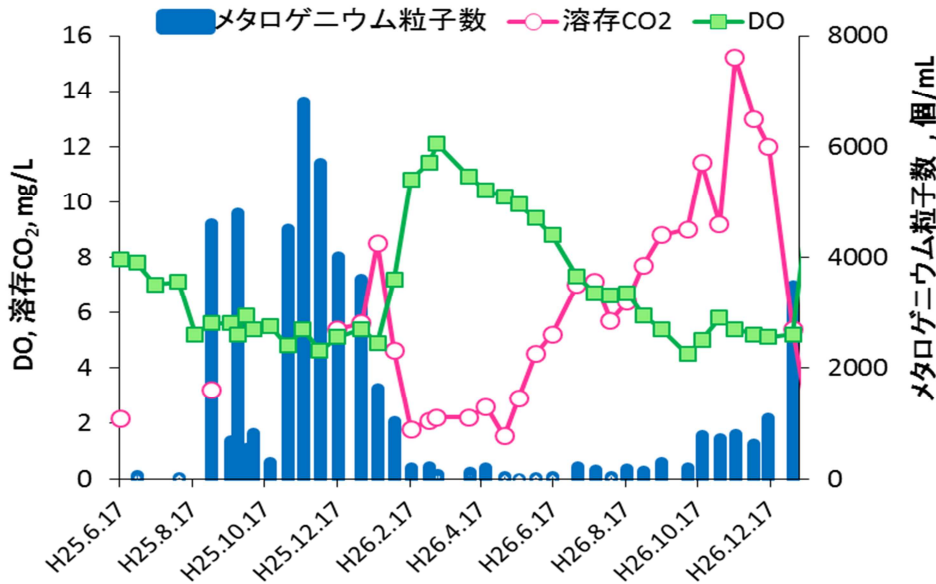


図4 琵琶湖今津沖中央地点水深約90mにおけるメタロゲニウム粒子数とDOおよび溶存CO<sub>2</sub>濃度の月別変化

【サブテーマ(3) モデル解析等による低酸素化現象の総合評価】

近年の地球温暖化の進行等の影響により、今後も低酸素化が生じる頻度が増える可能性がある。高精度で北湖深水層の水温・溶存酸素を継続的に監視するとともに、低酸素化メカニズムの全体像を把握する必要がある。そこで、本研究では、現地調査結果等をもとに数理モデルを構築し、低酸素化現象の発生メカニズムを解明するため、第一湖盆の中心における鉛直方向の溶存酸素・水温の自動連続観測を行った。

自動連続観測は、第一湖盆の中心を通した南北に湖盆を縦断する線上(N3～N5)で行った(図5)。調査項目と調査方法は以下のとおりである(図6)。

第一湖盆の水温・溶存酸素濃度の時間・空間変化の詳しい構造を把握するために、N4に湖底直上の1m、4m、7m、10m、13m、20mにおいて測定精度±0.002℃の水温計(RBR社製の高精度水温計)、測定精度±1%の溶存酸素計各1台を設置し、水温・溶存酸素濃度の調査を行った(図5、図6)。

また、第一湖盆の深水層の流れおよび内部波を把握するため、N3、N4、N5のそれぞれ湖底直上1mにADCP流速計(NORTEKAS社製、測定精度:流向は±2度、流速は±0.5cm/s)を設置した。(図5、図6)

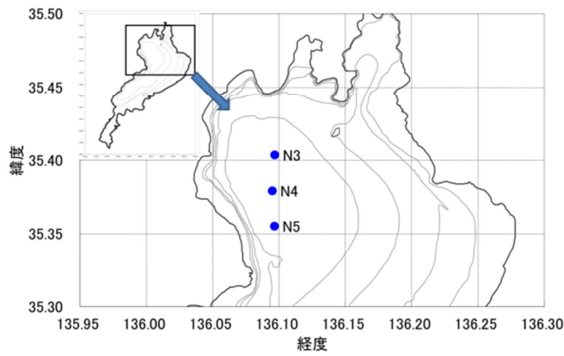


図5 第一湖盆における自動連続観測機器の調査地点

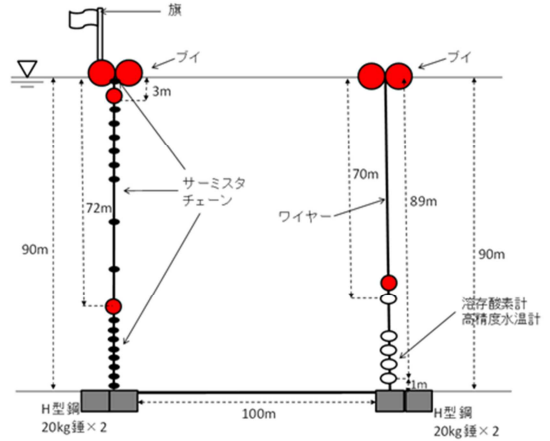


図6 琵琶湖深湖底における自動連続観測機器の設置図。溶存酸素計・高精度水温計  
水深：1m、4m、7m、10m、13m、20m

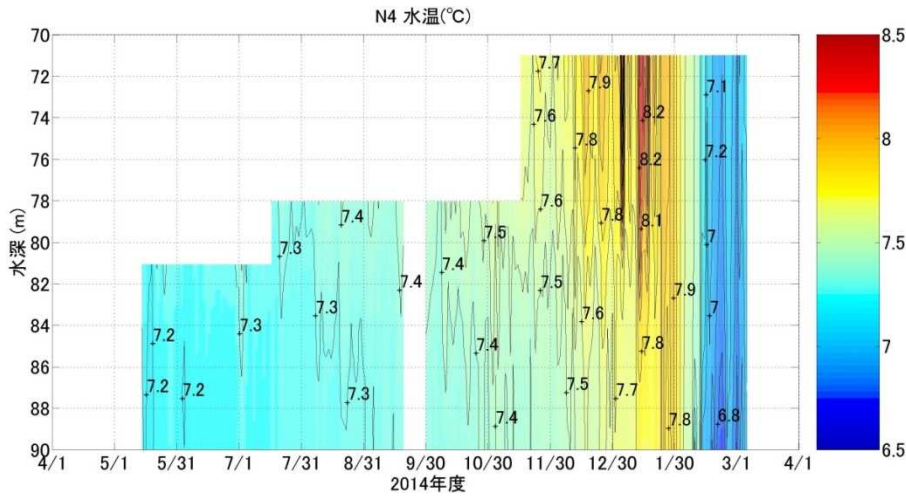


図7 2014年5月から2015年3月にかけてのN4における水温等値線図  
(水温の鉛直補間は、線形スプラインを用いた。等温線間隔：0.1°C)。

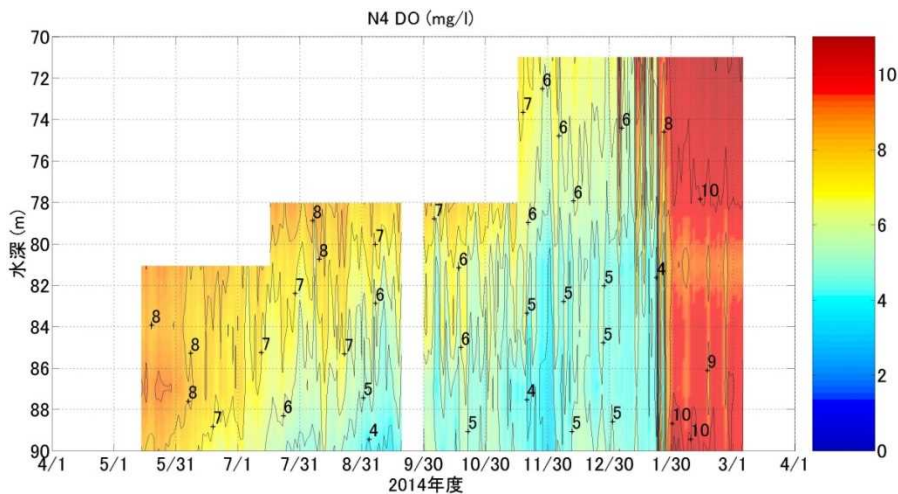


図8 2014年5月から2015年3月にかけてのN4における溶存酸素の等値線図  
(溶存酸素の鉛直補間は、線形スプラインを用いた。等値線間隔：1mg/l)。

図7に示したように、湖底直上(水深90m)水温は、5月から1月までの7か月間に7.2°Cから7.8°Cにゆっくりと上昇した。また、7月20日に水深80mで7.3°Cであった水温は、1か月間以上後の8月30日には、湖底直上においても同じ水温となった。これは、湖底境界層の乱流拡散によるものであると考えられる。また、図8に示したように、湖底直上の水のD0は、湖底の有機物の分解により、5月から11月まで徐々に低くなっていく。しかし、12月からは徐々に回復され、1月下旬に琵琶湖全循環により、完全に飽和状態まで回復された。成層期にこのようなプロセスで、湖底付近の水温は緩やかな上昇傾向となり、D0が緩やかに低下する傾向にあるのが琵琶湖深湖底の特徴である。

このように、北湖第一湖盆における鉛直方向の溶存酸素・水温の自動連続観測を行うことにより、鉛直方向の溶存酸素・水温のグラディエントの時系列が分かるようになり、現場の泥のSODの計算が可能になる。この現場の泥のSODの解明は、低酸素化現象の発生メカニズムを解明するための3次元流動・生態系モデルの開発に必要不可欠である。

### 3. まとめ

- 北湖深水層での低酸素化の動向を把握するため、鉛直方向の水深別水質調査を継続的に行った。湖底直上1mにおいて2001年から2013年の間でD0が2 mg/Lを下回る貧酸素状態となった年が5回あったが、2014年は年間最低値が4.3 mg/Lであり、貧酸素状態は確認されなかった。
- また、湖底高濁度層は夏から秋にかけて発達する傾向がみられ、同時期に湖底付近に水温の等温層が観測されたことから、高濁度層は湖底付近の水塊構造の発達に関係すると考えられた。高濁度層内の粒子は20 μm以下の粒度が多いのに対して、湖底堆積物の粒子には20-63 μmの粒度が多かく、粒子の粒度が異なっていることなどから湖底高濁度層は湖底堆積物の単純な巻き上がりではなく、上層から沈降した植物プランクトンを含む粒子が蓄積しているなどの可能性が示唆された。
- 底生生物のアナンデールヨコエビは、2014年は年最大時期および地点でも164 個体/m<sup>2</sup>となり3年間で最も少なかった。イサザは、調査地点5地点の中では2014年度から開始した水深50mの地点が最も多く2015年2月に最大値30 個体/m<sup>2</sup>を示した。イサザとアナンデールヨコエビは、捕食-被食の関係にあるため、お互いの影響を検討する必要がある。また、低酸素化の進行により深底部に生息する固有種の消失が懸念される中、これらの生物を保全する上で、定量的な現存量把握は欠かせない。継続的な季節変化および分布調査を行い、環境変化による影響や湖内生態系における生物間の相互関係の解析が必要である。
- また、水深約90mの今津沖中央地点におけるメタロゲニウム粒子数とD0については、弱い負の相関関係( $r=-0.46$ ,  $p<0.05$ )にあることがわかっていたが、メタロゲニウム粒子の発生と無機溶存炭素濃度( $\Sigma\text{CO}_2$ )との関係については、2014年のメタロゲニウム粒子の発生数が非常に少なかったため明らかにすることが出来なかった。
- 成層期に湖底境界層の乱流拡散のプロセスで、湖底付近の水温は緩やかな上昇傾向にあるのが琵琶湖深湖底の特徴である。また、北湖第一湖盆における鉛直方向の溶存酸素・水温の自動連続観測を行うことにより、現場の泥のSODの計算が可能になり、そのため、低酸素化現象のメカニズムを解明するための3次元流動・生態系モデルの開発が可能になった。