

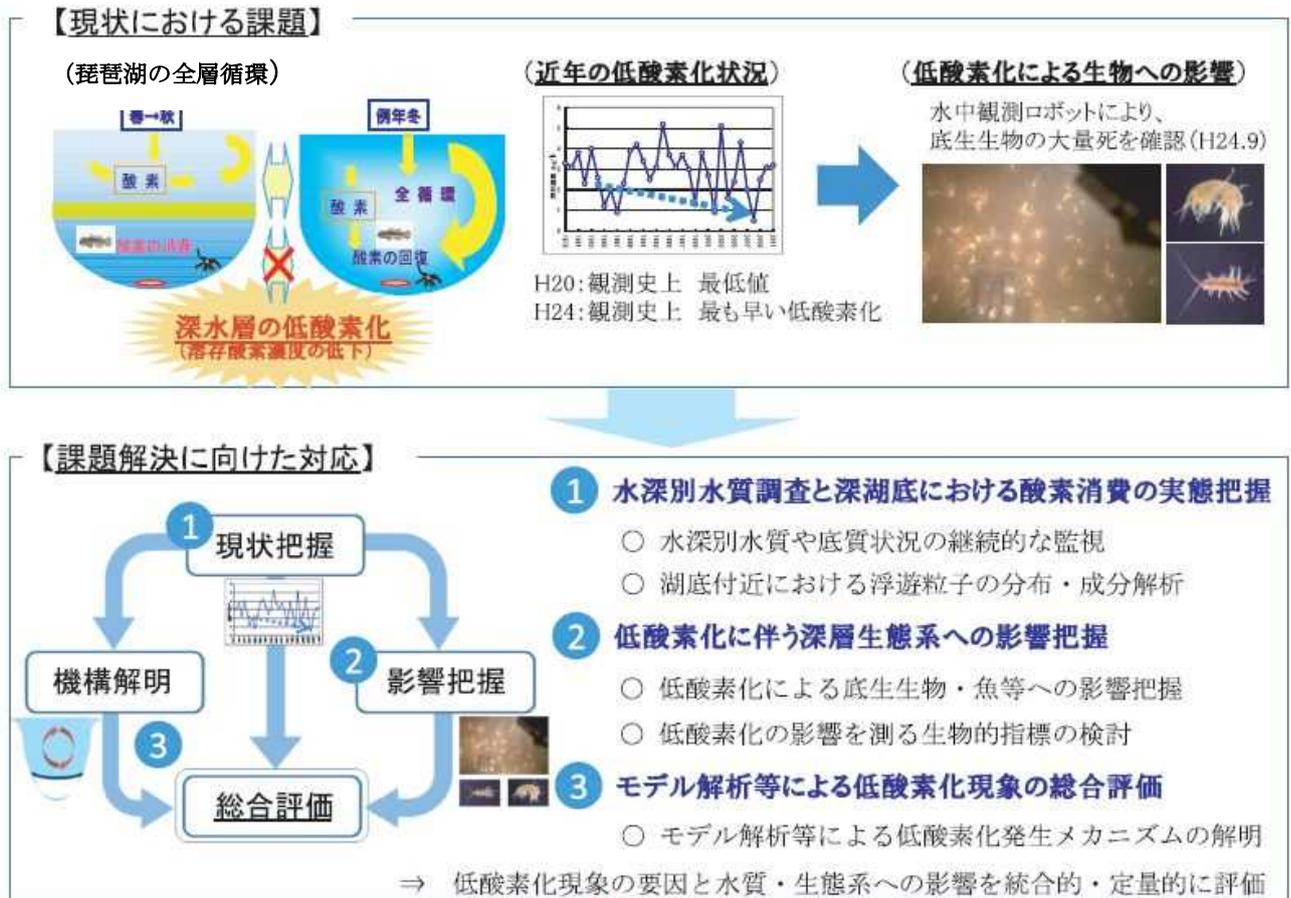
北湖深水層と湖底環境の総合評価

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。今津沖北湖第一湖盆（水深約 90m）の定点（17B）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、12 月下旬まで例年通り推移し、毎年 1 月下旬から 2 月上旬にかけて発生する全層循環を 3 月中旬に確認した。年間最低値は 1 月中旬の 2.7 mg/L であり、貧酸素状態（2mg/L 以下）は確認されなかった。

また、湖底における D0 への影響が大きいとされる底泥酸素消費量（SOD）を同地点および今津沖北湖第一湖盆中央（L）において測定したところ、両地点ともに季節間で 0.04 gO₂/m²/day 程度の変動があり、年平均で 0.25 gO₂/m²/day 程度の値であった（図 1）。

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。そこで本プロジェクトでは、湖底付近の浮遊粒子の観測と成分調査を行っている。今津沖中央に散乱光検出型の濁度計を設置し、2 年間の濁度観測を行った。その結果、2014 年には夏から秋にかけて底層の濁度層の発達があったが、2015 年度には明確な濁度層の発達は観測されなかった（図 2）。濁度層の発達は湖底付近の水塊構造の変動に由来するだけでなく、粒子の供給源にも注目する必要がある。一方で、本報告のような散乱光での検出による濁度と、他の光学測器を用いた濁度の観測では、鉛直分布などに異なる結果が得られることがあった。よって、粒子の検出方法をあらためて見直す必要がある。

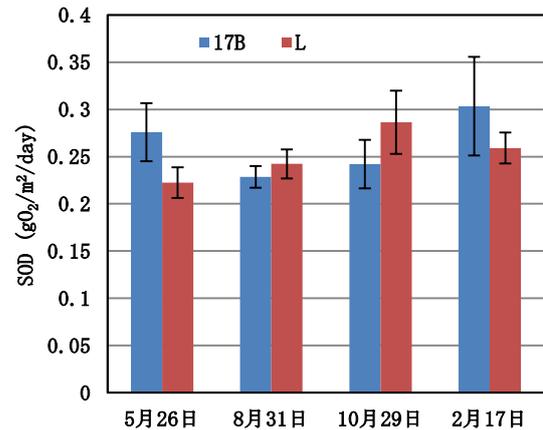


図 1 2015 年度における底泥酸素消費量(エラーバーは標準偏差を示す)

【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 期中期計画期間の 2012 年 4 月から引き続き、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）に、湖底と垂直になるよう下方カメラ、スケーラーを搭載し、湖底映像を撮影してきた。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。2016 年 3 月まで 4 年間のモニタリングになったため、琵琶湖北湖深底部 5 地点（水深>50m）における平均的な季節変化および最大、最小値を図 3 に示した。

底生生活のアナンデルヨコエビ（幼生期の浮遊個体は含まず）の平均値は、7 月に最大値 504 個体/m² 1 月に最小値 1 個体/m² となる年変動を示した。4 年間の最大値は 2013 年 6 月の 1047 個体/m² であった。

ビワオオウズムシは、深底部に周年生息することが知られており、平均値は 12 月に最大値 27 個体/m²

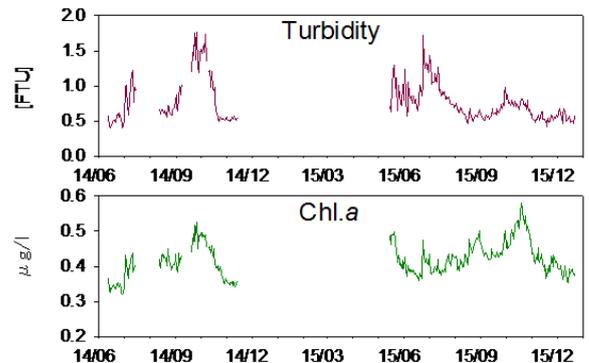


図 2 2014-2015 年の今津沖中央（湖底から 2 m）における濁度 (Turbidity, FTU) とクロロフィル蛍光 (Chl. a, μg/L) の時系列変動

、最小値 4 月に 4 個体/m²を示した。4 年間の最大値は 2013 年 9 月の 34 個体/m²であった。

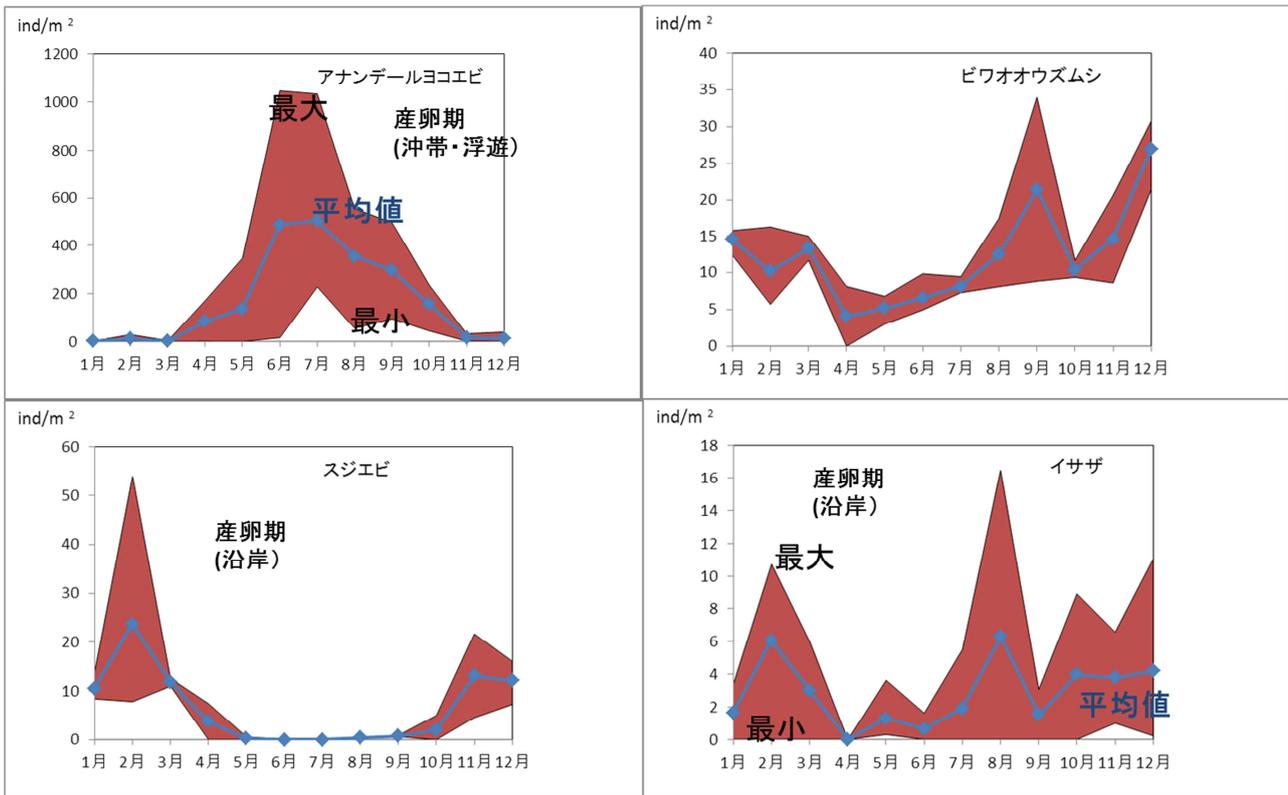


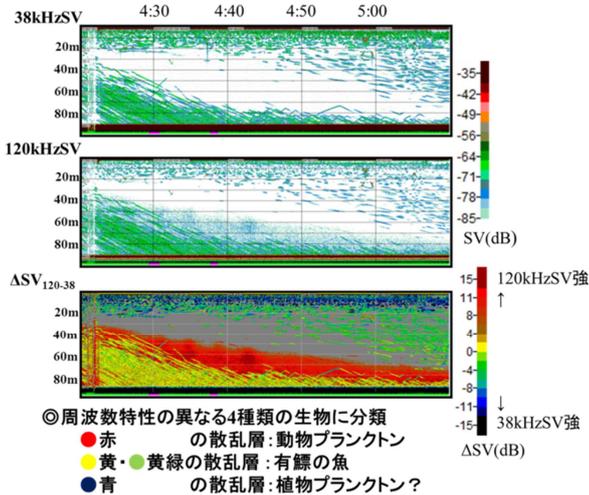
図 3 琵琶湖沖帯の絶滅が危惧されている希少種・固有種の現存量の季節変化 (2012 年 4 月～2016 年 3 月の月平均値)

スジエビは、繁殖期以外は深底部に生息していると言われている。平均値は 2 月に最大値 24 個体/m²、5～8 月に最小値 0 個体/m²を示した。4 年間の最大値は 2014 年 2 月の 54 個体/m²であった。

イサザは、春に沿岸で産卵し、繁殖期以外は深底部に生息しているため、平均値は 2 月と 8 月に最大値 6 個体/m²を示し、4 月の繁殖期に最小値 0 個体/m²になる変動を示した。4 年間の最大値は 2013 年 8 月の 16 個体/m²であった。これらの底生生物について深底部における平均的な現存量・季節変動が明らかになった。2015 年度も深刻な低酸素状況には至らなかったが、これらの個体群の季節変動を例年値とし、今後、低酸素に曝されるなど、極端な個体数の変化があった場合に比較する基準値が得られた。

また、本研究では、深層の生物群の広範囲における生息活動状況を知るため、北海道大学と共同で琵琶湖環境科学研究センターの調査船「びわかぜ」に搭載した 2 周波計量科学魚探を用いた深水層の水中生物の定量化手法の開発に取り組んでいる。2015 年 7 月今津沖水深 90m 地点において昼夜観測を行ったところ、早朝に図 4 のような結果が得られた。上 2 つの図は、早朝時に収録した周波数 38kHz と周波数 120kHz の SV (体積後方散乱強度) のエコーグラム、下の図はそれら二つの差分、すなわち $SV_{120\text{kHz}} - SV_{38\text{kHz}}$ のエコーグラムを示す。この ΔSV_{120-38} エコーグラムはプラスの値になると高周波の SV が強いことを示し、マイナスの値になると低周波の SV が強いことを示す。一般に鰾を持った魚 (有鰾魚: ゆうひょうぎょ) の場合は、周波数による散乱の違いはほとんどないため、SV の差分値は 0 前後になり、動物プランクトンのように小さい生物は高周波ほど音響散乱が大きく差分値がプラスになるため、 ΔSV エコーグラムから周波数特性の異なる 4 種類の生物に分類できた。時間の経過とともに、深度約 40m から 80m に下降していく赤で表示された散乱層は、周波数 120kHz の

SV が周波数 38kHz の SV よりも 8dB 以上大きいことや、周波数 120kHz の SV が小さいこと（約-80dB）、日周鉛直移動をしていることから、動物プランクトンである可能性が推察された。当初深度 40-80m に見られ、時間の経過とともに 80m くらいに定位する、黄色で表示された散乱層と、深度 20m から 60m くらいに下降する、黄緑で表示された散乱層は、どちらも周波数特性があまりなく（-4dB~+2dB）、単体のように表示されているエコーもあることから、有鰾の魚群である可能性が高いと推察された。ただし、黄色で表示された魚群と黄緑で表示された魚群は、単体エコーの SV の大きさの違いなどにより、別々の種であると考えられた。そして、表層付近で見られる青で表示された散乱層は低周波の SV が大きく、植物プランクトンの可能性が考えられるが、このエコーグラムで生物群を判断することは現在のところ難しい状況である。以上、調査船「びわかぜ」に搭載した 2 周波計量魚群探知機を用いて、深水層における生物群別動態の大まかな把握ができる可能性が示唆された。



以上、調査船「びわかぜ」に搭載した 2 周波計量魚群探知機を用いて、深水層における生物群別動態の大まかな把握ができる可能性が示唆された。

図 4 計量魚群探知機の周波数差を利用した各種生物の識別

本年度の調査では、底生動物の季節変化の平年値と 2 周波計量魚探を用いた大まかな生物の分類群別の動態把握ができた。今後データの蓄積を行い、計量魚探を用いたアナンデールヨコエビおよびイサザ等の識別、鉛直移動の状況を調べ、琵琶湖沖帯の絶滅が危惧されている希少種・固有種の現存量と動態把握を進め、低酸素時に個体数および動態にどのような影響が見られるかを調査していく予定である。

(2)メタロゲニウム粒子

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低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。このため、メタロゲニウム粒子を生成する BIWAKO-01 株 (*Bosea* sp.) を用いて室内実験により生成条件を明らかとした。

ねじ口瓶を用いた培養試験では pH 5.7~7.0 の部位でマンガン(Mn)酸化層が形成されていたことから、粒子生成に及ぼす pH 値の影響を明らかとした。酸化態 Mn は pH 5.0~6.5 で生成され、培養 7 日間では pH6.0、培養 14 日間では pH6.3 で最高値となった(図 5)。次に、メタロゲニウム粒子の発生は低酸素時であることから、粒子生成に及ぼす酸素濃度を明らかとするため、酸素(O₂)濃度を制御した培養を行った。酸化態 Mn 生成時の気相 O₂濃度は、2~20% (培養液中の DO 濃度: 2.0~8.8 mg/L) であり、O₂濃度を 10% (DO 濃度: 6.3 mg/L) に制限したとき最も生成量が多かった(図 6)。

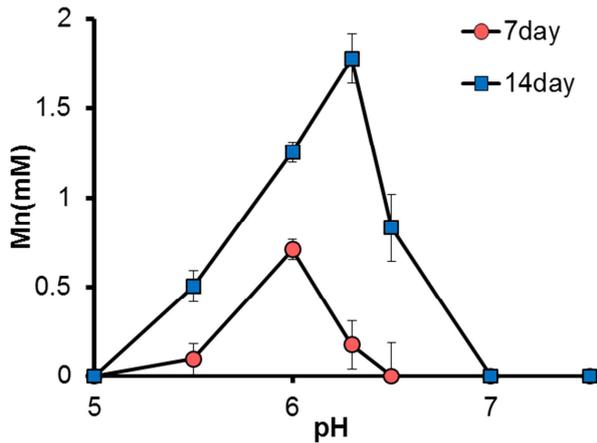


図5 BIWAKO-01株による酸化態Mn生成に及ぼすpH値の影響 (HEPES緩衝液各20mM、M3半流動培地)

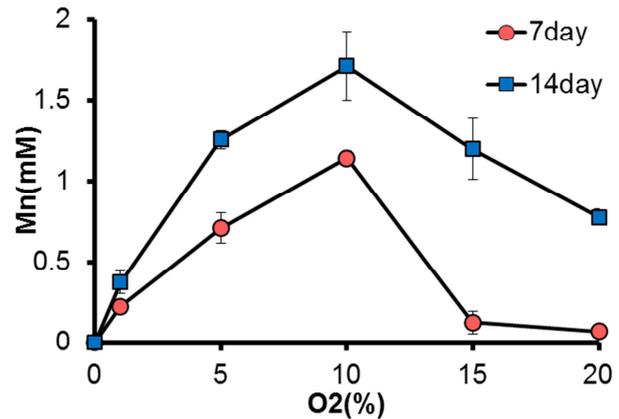


図6 BIWAKO-01株による酸化態Mn生成に及ぼす酸素濃度の影響 (M3半流動培地、pH 6.0) 平均値 ± SD (n = 3) 平均値 ± SD (n = 3)

最後に、メタロゲニウム粒子の生成には、寒天等の多糖類が必要であったため、図7に示した多糖類を添加して培養試験を行った。寒天のような多糖類の存在時に酸化態Mnが生成されるが、多糖類未添加や単糖添加時には生成されなかった。

これらの結果から、メタロゲニウム粒子生成には、弱酸性 (pH 6.3)、微好気 (DO濃度: 6.3 mg/L)、寒天のような多糖類の存在の3つの条件が必要であることが明らかとなった。

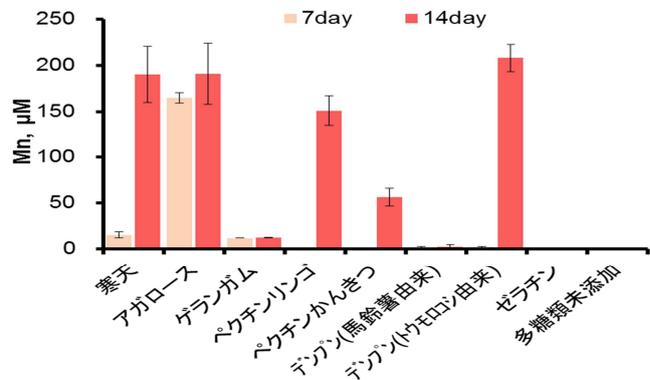


図7 BIWAKO-01株による酸化態Mn生成に及ぼす多糖類添加の影響 平均値 ± SD (n = 3、アガロース、デンプン(馬鈴薯由来)、多糖類無添加はn = 2)

【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、冬における琵琶湖の全層循環が遅くなり、秋から冬に湖底で低酸素化が生じる可能性がある。全層循環の遅れが、秋の琵琶湖の水質・生態系にどう影響するかを把握するため、北湖深水層の水温・溶存酸素を高精度で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、今研究では、冬における現地での詳しい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水温・溶存酸素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地点)で行った(図8)。第一湖盆の中心に設置したサーミスタチェーンの水温および北湖湖底地形のデータを用いて、冬における琵琶湖北湖の湖水安定度指数(シュミットインデックス)を計算した(図9)。

そこで全層循環が起こる状況を把握するため、全層循環が順調に起こった年度(2012年度)と全層循環が遅くなった年度(2015年度)の湖水の安定度を比較した(図9)。2015年度のシュミットインデックスは、2012年度のもの明らかに違うことが分かる。2012年度には、シュミットインデックスが1月中旬にもゼロになり、他のデータと合わせて全層循環が1月中旬に起こったと判断されたが、2015年度には、シュミットイン

デックスが3月上旬になって、やっとゼロになり、他のデータと合わせて全層循環が3月中旬に起こったと判断された。そして、2015年度の全層循環は、2か月ほど遅くなったことが分かった。研究によると、全層循環が発生する条件としてシュミットインデックスがゼロになることは、必要条件であるが、十分条件ではないことが明らかになった。

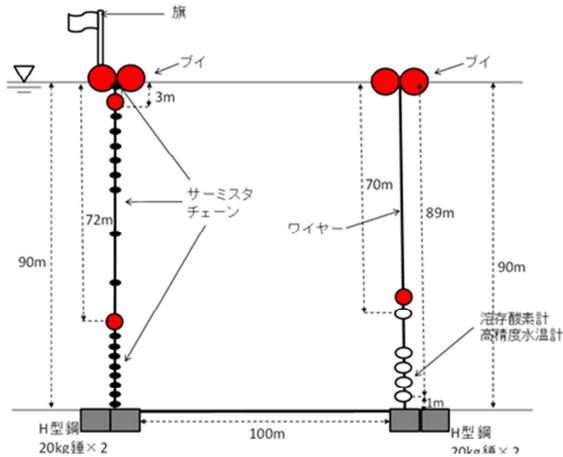


図 8 琵琶湖深湖底における自動連続観測機器の設置図。サーミスタチェーンの水温計の水深は、0m、5m、10m、15m、20m、25m、30m、46m、62m、77m、79m、81m、83m、85m、87m、89m、91mである。

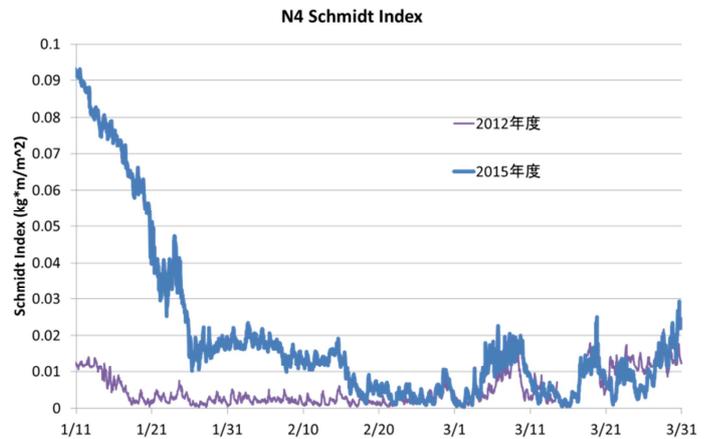


図 9 2012年度および2015年度の冬における琵琶湖北湖の湖水安定度指数（シュミットインデックス）の比較

この時期、琵琶湖深水層における低酸素水塊は、大きく移動すると考えられるので、全層循環が起こったかどうかを判断するため、この水塊を監視できる別の指標が必要であると考えられる。

3. まとめ

- 琵琶湖の全層循環は、毎年1月下旬から2月上旬にかけて発生するが、2015年度には、2か月間ほど遅くなった3月中旬に確認された。また、同地点の底泥酸素消費量(SOD)は、年平均で0.25 gO₂/m²/dayであった。
- 2014年には夏から秋にかけて底層の濁度層の発達があったが、2015年度には明確な濁度層の発達は確認されなかった。
- 深底部に生息する底生生物のアナンデルヨコエビ、ビワオオウズムシ、スジエビ、イサザについて過去4年間のモニタリングから平均的な現存量の季節変化が明らかになった。また、調査船「びわかぜ」に搭載した2周波計量魚群探知機を用いて、深水層における生物群別動態の大まかな把握ができる可能性が示唆された。
- メタロゲニウム粒子生成には、弱酸性(pH 6.3)、微好気(DO濃度: 6.3 mg/L)、寒天のような多糖類の存在の3つの条件が必要である。
- 湖水安定度指数(シュミットインデックス)がゼロになることは、琵琶湖全層循環が起こる必要条件であるが、十分条件ではないことが分かった。低酸素水塊を監視できる別の指標が必要である。