

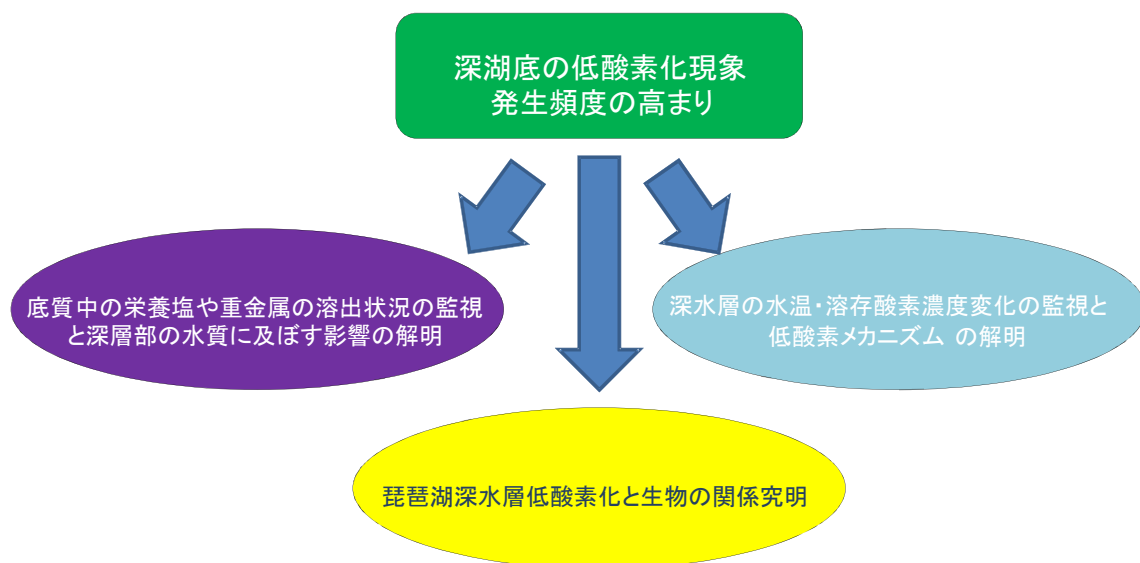
北湖深水層と湖底環境の把握

焦 春萌・石川 可奈子・桐山 徳也・井上 栄壮・永田 貴丸

1. 目的

湖底の溶存酸素濃度（水中に溶けている酸素の濃度）が低下すると、底質からの栄養塩や重金属が溶出することや、底層に生息する生物への影響が考えられる。北湖第一湖盆の溶存酸素濃度は2008年に観測史上最低値を記録したが、水温上昇等の影響により今後頻繁に低酸素化が起こる可能性が高まってくると考えられる。

本研究では、北湖深層部における溶存酸素濃度の季節変動（春から秋にかけての低下、秋冬から春にかけての回復）の要因および、夏から秋の短期的な気象変動要因の影響を解析するとともに、今後どのような低酸素状況が予測されるのかというシナリオを整理する。このシナリオに応じて、底質からの栄養塩・重金属の溶出と、水質や生物群集への影響を解析する。



2. 研究内容と結果

【サブテーマ(1) 琵琶湖水深別水質調査と湖底環境の把握】

■内容

○琵琶湖北湖の深水層では、例年春から徐々に底層の溶存酸素濃度（底層 D0）が低下し、10月～12月に最低値となり、その後、冬の表層水温低下等により水が鉛直混合し、翌年1月～2月頃、表水層から深水層の全層で D0 が同程度になる。

○しかし、年によっては、底層 D0 が十分に回復しない状況（2007 年）や底層 D0 が 2mg/L を下回る低酸素状態となる状況（2008 年）を観測しており、D0 の変化を継続的に把握する必要がある。また、D0 の変化には、有機物など様々な因子が関係しており、D0 以外の水質の変化も把握する必要がある。

○このほか、底泥には金属類や栄養塩類等が含まれており、底層 D0 の低下には底泥における酸素消費が影響していることから、底泥の酸素消費に関する情報や底泥からの金属類等の溶出状況を確認する必要がある。

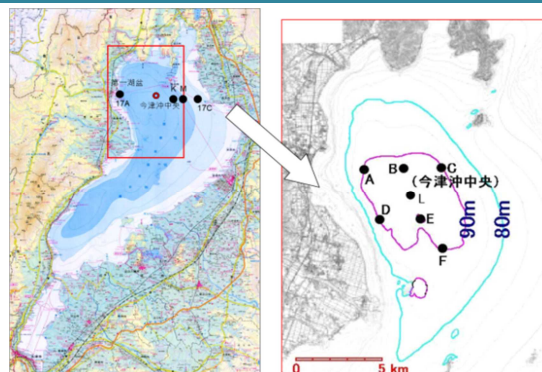


図 1 北湖第一湖盆における調査地点

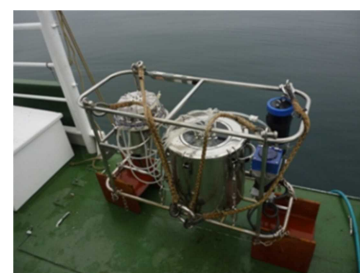


図 2 自動採水器

このため、以下の調査および実験を実施した。

◇水深別水質調査

調査概要：水深別に湖水を採取し、水質分析を実施した。

地点・頻度：今津沖中央点（C 点、北湖第一湖盆内、水深約 90m）

ほか 3 定点（図 1：調査水深は 0.5、5、10、15、20、30、40、60、80、85、湖底直上 1m の 11 水深）において、2 回／月（24 回／年）

◇自動採水器水質調査

調査概要：自動採水器（図 2）を設置し、採水および水質分析を行った。

地点・頻度：C 点の湖底直上 0.5m において、1 回／週

◇溶存酸素補足調査

調査概要：北湖第一湖盆内における低酸素水塊の水平・鉛直分布を把握するため、水深ごとの D0 を測定する。

地点・頻度：北湖第一湖盆の水深 90m の 6 地点（図 1）



図 3 不攪乱柱状採泥器による採泥（左）と底泥を用いた実験の様子

◇底泥を用いた酸素消費実験および溶出実験

調査概要：湖底付近における酸素消費速度、底泥からのマンガン等の金属類、栄養塩等の溶出状況を把握するため、北湖第一湖盆で不攪乱柱状採泥器にて採取した底泥を用いて、カラム内の底泥直上水の金属類等の D0 の変化や濃度変化を確認した（図 3）。

■結果と評価

◇水深別水質調査等（深水層）

○2012 年度は、2008 年度以来 4 年ぶりに D0 が 2mg/L 未満となる低酸素の状態が確認されたが、2013 年度は低酸素の状態は確認されなかった（図 4）。

○低酸素の状態となった 2012 年度の D0 は、4 月から 8 月まで過年

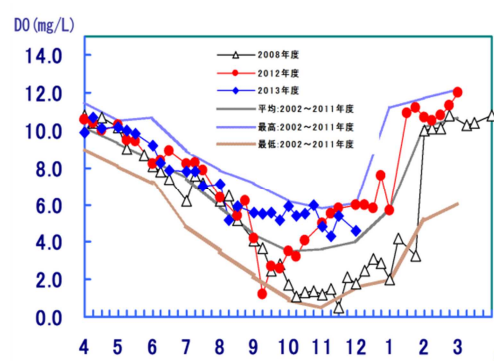


図 4 C 点における底層 D0（湖底直上 1m）の経月変化

度平均並みに低下し、8月27日には6.2mg/Lであったが、9月に入り急激に低下し9月3日に4.2mg/L、9月10日には年度最低値の1mg/Lとなった。北湖第一湖盆内の他の調査地点においてもD₀の低い地点が確認された。

○2012年におけるC点での早期の底層D₀の低下は、夏季の成層が例年よりも安定していたため深水層に酸素の供給がなかったことに加え、7月に琵琶湖で大量に繁殖した大型緑藻類 *Staurastrum* の一部が湖底まで沈降し、湖底付近での酸素消費が一時的に上昇したことが影響しているものと考えられる。

○C点で2012年9月18日に採取した自動採水器による湖底直上0.5mの水では、マンガン濃度が0.54mg/L、アンモニア態窒素濃度が0.17mg/Lと、同年8月および9月の湖底直上1mにおけるマンガン濃度0.17~0.2mg/L、アンモニア態窒素濃度<0.01mg/L(報告下限値未満)~0.03mg/Lと比べると高い値となった。またヒ素については、湖底直上0.5mおよび1mにおいて年間を通じて<0.005mg/L(報告下限値未満)となり、変化は認められなかった。

○2013年は9月19日以降、C点における底層D₀は2.6~2.7mg/Lと低い値で推移したが、9月末に台風17号が本州を通過した後は3.5mg/Lに上昇した。その後、9月の観測値を下回ることなく推移し、翌年1月21日には表水層から深水層において10.6~10.9mg/Lとなり、底層D₀の回復(全循環)がみられた。

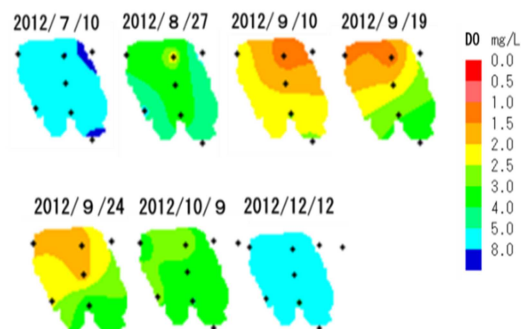


図5 北湖第一湖盆における底層D₀(湖底直上1m)の平面分布

◇底泥を用いた酸素消費実験および溶出実験

底泥を用いた酸素消費実験、溶出実験を実施した結果、その概要は以下のとおりであった。

○実験開始からカラム内の底泥直上水のD₀は急激に低下した。

○マンガンのについては無酸素状態となる前から溶出が始まったが、鉄、ヒ素、りんについては無酸素状態となった後から溶出が始まった(図6)。

○形態別窒素については、実験開始直後は硝酸態窒素濃度が卓越していたが、D₀の低下とともに硝酸態窒素濃度が低下し、無酸素状態となった後はアンモニア態窒素濃度が上昇した(図7)。

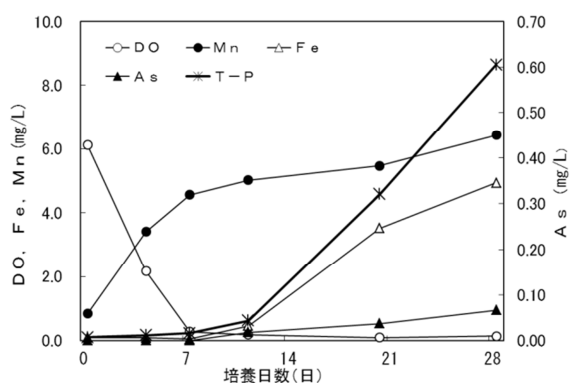


図6 D₀およびマンガン濃度、鉄濃度、ヒ素濃度および全りん濃度の経時変化

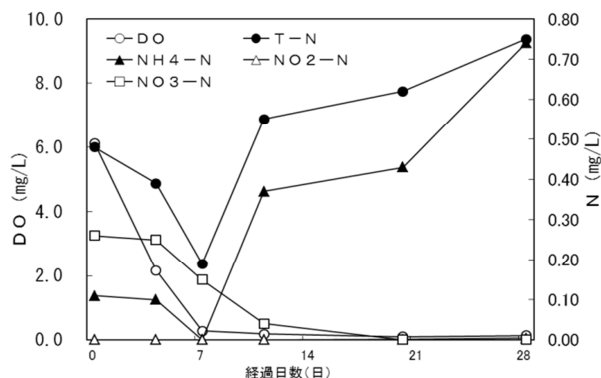


図7 D₀および形態別窒素濃度の経時変化

○また、2013年5月にK点、C点、L点で採取した底泥を用いた酸素消費実験を実施したところ、カラム内

の底泥直上水の D0 が、10.0～10.5mg/L から 10 日間程度で 1mg/L 未満となり、調査を実施した地点間では酸素消費の状況に変化がないことを確認した。

◇まとめ

○2012 年 8 月末から 9 月にかけて北湖深水層の底層 D0 が急激に低下し、例年よりも早く年度最低値を記録するとともに、2008 年度以来 4 年ぶりに 2mg/L を下回る低酸素状態となった。

○底層 D0 の低下に伴い、湖底直上 0.5m ではマンガン濃度、アンモニア態窒素濃度が上昇したが、湖底 1m ではその濃度が半分以下となっており、濃度変化は限定的であった。また、ヒ素については、年間を通じて <0.005mg/L（報告下限値未満）であり、無酸素状態が顕在化していない現時点においては特に問題はないものと考えられる。

○北湖深水層の底泥を用いた室内実験では、ヒ素は、無酸素状態となった後に溶出した。りん、アンモニア態窒素も同様であり、今後無酸素状態が生じ長期化する場合は、底泥からの溶出の影響が懸念される。

【サブテーマ(2) 気象変動が湖水の動態および深水層低酸素状態に与える影響のメカニズム解明】

■内容

○琵琶湖北湖深湖底では、近年低酸素化現象の発生頻度が高まっている。北湖深水層の成層期の水温と溶存酸素濃度の季節変化は様々な要因によって決定されるが、その中でも地球温暖化によって生じる全地球的な気候変動による①3 月の水温と溶存酸素濃度、②成層開始日の変化による影響がもっとも大きく、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分かってきた。

○しかし、これらの要因で決定されるのは、その年の溶存酸素濃度の長期変化（年変化）であり、溶存酸素濃度の短期変化（一時的変化）の要因は明らかになっていない。

○そこで、本研究では、気象状況の短期変化（強風、台風など）に着目し、北湖第一湖盆に設置した自動連続観測機器による水温、溶存酸素濃度、流向・流速のデータ、および当センターの定期調査による水温、溶存酸素濃度のデータ、また彦根気象台の気象データ（風力データ）を解析し、北湖深湖底における溶存酸素濃度の短期変化の要因を検討するとともに、北湖深湖底における溶存酸素濃度の短期変化の一要因と考えられる強風の影響を評価するため、風と成層強度を総合的に考慮した以下の「強風影響指数」を提案した。

$$(\text{WII: 強風影響指数}) = (\text{K: 比例常数}) \times (\text{W: 風速})^2 / (\text{SI: 成層強度 (シュミット安定度指数)})$$

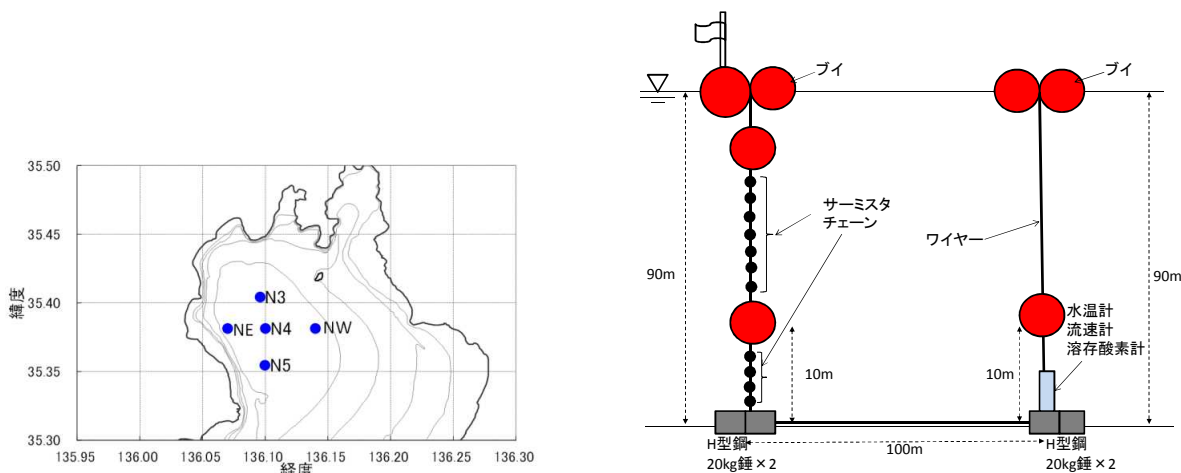


図 8 第一湖盆における調査地点および自動連続観測機器の設置図

■結果と評価

- 強風影響指数と強風前後の D0 の変化が正の相関にあることが判明し、「浅い呼吸」とでも言うべき、強風による湖底付近への酸素供給の影響度を、強風影響指数を設定し評価できるようにした（図 9）。
- この溶存酸素濃度の回復は、強風により生じた内部波（湖内の波動）が深水層を揺らすことにより、周囲の水と低酸素水塊が混合することによる一時的なものであることがわかった（この強風は、表水層から深水層への酸素供給には貢献しないことが判明した）。
- なお 2012 年に発生した深湖底の低酸素化は、植物プランクトンの異常発生などに起因するものと推定している。このような深湖底における短期的な酸素消費についての詳細はまだ明らかになっていないため、琵琶湖深湖底の低酸素化問題の全体像を解明するため、さらなる研究が必要である。

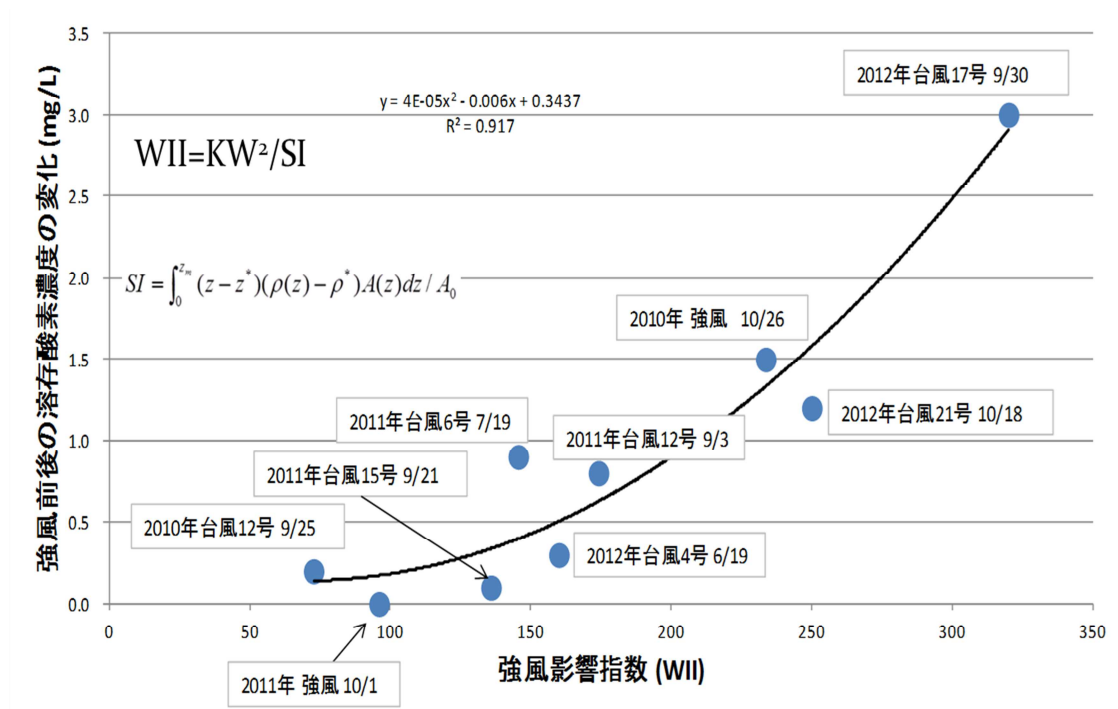


図 9 強風影響指数と強風前後の D0 の変化

【サブテーマ(3) 北湖深水層の低酸素化と生物の関係解明】

■内容

- 北湖深底部における主な底生生物の生息量を把握するため、水中有索ロボット（ROV：写真 1）を用いた湖底観測や底泥採取による底生動物の分布調査、動物プランクトンの鉛直昼夜移動調査および底生動物の低酸素耐性実験を行った。

【調査研究】

- ・底生動物の生息量を把握するために、ROV による映像観測、底曳網と底泥サンプル採取調査を実施した。
- ・低酸素耐性を把握するために、4 種の底生動物（ミズムシ、ビワオオウズムシ、アナンデールヨコエビ、スジエビ）について室内実験を実施した。
- ・湖底の細菌組成を把握するために、底泥コアサンプルの採取調査を継続（月 1 回）、硫酸還元菌の分析を行った。

- ・底生動物の活動状況を把握するために、湖底観測予備調査を実施した。
(3回:9月、1月、3月)
- ・ヨコエビの鉛直昼夜運動を把握するために、24時間調査を実施した。
(3回:7月、9月、12月)
- ・低酸素シナリオにもとづく生物への影響評価の方法を検討した。

■結果と評価

- 2012年度は8月下旬から9月に急激に深湖底が貧酸素状態になったため、ROVロボットを用い、その影響を調査した。その結果、9月にはヨコエビの死骸の集積が見られ(写真2)、底曳網でも多くの死骸が採集されたが、10月以降は生物が回復してきている状況が観測された。
- また、2013年7月頃から、主な個体群が底生生活を始めるヨコエビ群集の観察を行ったところ、2012年の貧酸素状態が翌年の個体群密度に影響を及ぼさなかったことが確認できた。
- 毎月の継続的な観測、調査を行い、映像とサンプリングにより個体数の変化を定量的に把握することができた(写真3)。
- 底生動物の耐性実験から、ビワオオウズムシは完全な無酸素状態になっても5日程度は生存することが分かり、これにより、2012年9月の深湖底におけるヨコエビの死骸が観察された際にもビワオオウズムシの生存が確認された理由が説明できるようになった。
- また、その他の種も含め、予想される低酸素化シナリオにおける底生動物への影響を検討するために必要な基礎的データが得られた。
- 今後、これまでの調査・実験結果をもとに、予想される低酸素化シナリオに応じた生物への影響について整理していく。

3. まとめ

- 今津沖中央定点湖底上1mにおける溶存酸素濃度(底層D0)は、2012年夏、急激に低酸素化が進行し、35年間の観測史上9月としては初めて2mg/Lを下回った。これについては、①同年6月から7月に大量に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、バクテリアに分解される際に酸素が消費されたこと、②8月から9月にかけて表層水深層水との温度差で生じる水温躍層が強く、深層水が上層の水と混合しにくい安定した状態にあったことが原因と推定されている。
- 2012年度の今津沖中央定点(17B)湖底から0.5m上(自動採水器による)および1m上の湖水のマンガン濃度は9月に高くなったが、ヒ素濃度は定量下限値(0.005mg/L)未満であった。このことから、深湖底の無酸素になるまで、ヒ素の底泥からの溶出はほとんどなく、現状では問題はないものと考えられる。
- 2013年度における同時点での溶存酸素濃度は4~7月は過年度並み、8~10月は過年度よりも高く推移している(10月7日5.4mg/L)。特に9月16日の台風18号通過後、底層D0の回復が見られた。



写真1 ROV ロボット

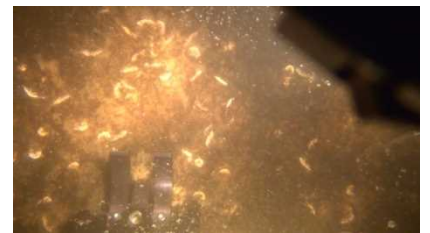


写真2 貧酸素時に発見された大量のヨコエビの死骸(2012年9月13日 水深90m地点)



写真3 平常年のヨコエビ(2013年9月5日 水深90m地点) 雌雄がペアになって繁殖活動を行っている。

- 2013年度の今津沖第一湖盆における底層D0は、2mg/Lを下回る低酸素化は生じなかった。また、湖底上には台風による豪雨がもたらしたとみられる堆積物を確認しており、これらの影響の有無も踏まえながら、底層D0の変動を観測した。
- 底泥を用いた室内での酸素消費実験において、北湖第一湖盆内の3地点で酸素消費状況を比較したところ、地点間では大きな差がなく、2週間程度で溶存酸素濃度がゼロになることを確認した。また、溶出実験でも、溶存酸素濃度がゼロになった後にヒ素の溶出が始まることを確認した。
- 気象状況の短期変化が、深湖底の低酸素水塊への影響を明らかにし、風速の短期変化の影響の程度は、強風影響指数で評価できるようになった。
- また、琵琶湖の深湖底の溶存酸素低下は様々な要因が関与する（気候変動や成層開始日、強風や台風、堆積物の溶存酸素速度など）が、これら個々の要因の寄与率については解明できていないほか、これらの要因は相互に影響し合っていると考えられる。このため、低酸素化現象の全体像の解明のためにはさらなる調査・研究が必要だと思われる。
- 2012年8月～9月における低酸素化によりヨコエビの死骸の集積が確認されたが、この貧酸素状態は翌年の個体数密度に影響を及ぼさなかったことを確認した。
- ビワオオウズムシは完全な無酸素状態になっても5日程度は生存することが分かり、得られたデータをもとに、他の種も含め、予想される低酸素化シナリオに応じた生物への影響について整理していく。