

北湖深水層と湖底環境の把握

— 強風など物理要因による琵琶湖深湖底における溶存酸素濃度の短期変化の中間報告 —

焦 春萌・青木眞一・石川可奈子・井上栄壮

要約

本研究では、成層期において、2010年度および2011年度に、琵琶湖付近を通過した強風のイベントが、琵琶湖深湖底直上における一時的な酸素回復にどのような影響を与えたのかを考察するため、自動連続機器を用いて、琵琶湖深湖底直上の水温構造、溶存酸素、流向・流速などを観測した。強風のイベントにより、大きい振幅の内部ケルビン波を水温躍層で引き起こした。この内部ケルビン波は、湖底直上の水の鉛直混合によって上から下へ酸素を供給し、琵琶湖深湖底の溶存酸素の一時的な回復に貢献した(強風のイベントに伴って、強い振動流が琵琶湖深湖底直上に生じたものである)。強風のイベントが琵琶湖深湖底の溶存酸素回復に対する影響は一時的であり、その影響の程度について、強風影響指数を設定し考察を行った。

1. はじめに

世界中で進行している地球温暖化が、これまでの年ごと、季節ごとの気象変動に比べて、おそらく一方向の気候の変化であり、その変化を揺り戻すことができなくなっている(滝沢, 2012)。地球温暖化によって、集中的な豪雨や猛暑、巨大な台風の発生などの異常気象の頻度が高くなっている。これらの気象変動は、気温、湿度、降水、風向・風速、雲量といった湖の物理境界条件の変化により、湖の物理構造(水温、混合パターン・時期、成層強度)を変化させ、湖の水質、生態系への影響を及ぼす(IPCC, 2007)。

地球温暖化によって、完全循環湖が不完全循環湖へ移行する湖がある。例えば、ドイツのコンスタンス湖は、年一回循環湖であるが、気温の長期上昇に伴い、冬期湖水全循環が不完全になった年が現れたことが観測で分かった(Straille *et al.*, 2003)。また、これにより、世界の他の深水湖(フランスのレマン湖、アメリカのエリー湖など)では、深湖底の低酸素化問題が深刻になっている。この低酸素化に伴い、湖底から栄養塩や重金属が溶出し、湖底生物の生息域は縮小しており、水質も悪くなっている(長谷川, 2006) (Blumberg, A. & D. Di Toro, 1990)。

近年、地球温暖化による全循環が平年より遅れ、また、成層強化などにより、琵琶湖深湖底における低酸素化現象の発生頻度は高くなった。この深湖底での低酸素化現象が顕著になってきたのは1960年代頃であり、その要因は富栄養化に伴う表水層での有機物生産の増大とその深層への沈降であることが古くから指摘されてきた(中, 1973)。1979年に開始した琵琶湖水深別調査で水深約90mの深湖底における全循環期前の溶存酸素濃度の低下が毎年秋

季に観測され、2008年には湖底直上1mでの値が0.5 mg/Lまで低下した。

こうした環境の中、1991年には硫黄酸化細菌のチオプロローカの出現が確認された(Nishino *et al.*, 1998)。チオプロローカは、湖底泥の嫌気化が進むと溶出する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が指摘された。また、2002年11月には微生物由来のマンガン酸化物の構造体メタロゲニウムが第一湖盆(図1)の深層部で広範囲かつ多量に出現した(一瀬ら, 2006)。このメタロゲニウムの出現もまた、湖底泥の嫌気化・低酸素化の進行を示している。さらに2006年度には記録的な暖冬による冬期鉛直混合の異常がみられた。例年であれば1~2月に観察される全循環が起らず、3月下旬になって深底部の溶存酸素濃度がかろうじて回復する事象が生じた。そして2012年9月には第一湖盆の深底部で低酸素水塊が確認され、当センターの水中撮影で、第一湖盆湖底の90m以深の広範囲においてヨコエビ類の死亡個体の集積が観察され(低酸素化に強いエラミズやビワオオウズムシの生存は確認)、生物への低酸素化の影響も明らかとなってきた。例年より早く深湖底の低酸素化が進んだ原因は、7月の植物プランクトンのスタウラストルムが大量発生して湖底に沈降し、バクテリアに分解される際に酸素が消費されたことや、8月から9月にかけて表層水と深層水との温度差で生じる水温成層が強く、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と推定している。

近年、琵琶湖北湖では、水深90mを超える第一湖盆を

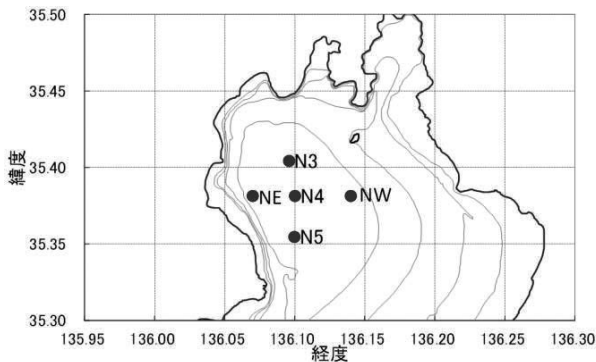


図1 第一湖盆における調査地点

中心に、9月から12月の間低い溶存酸素濃度が観測され、低酸素状態の目安とされる2 mg/Lを下回る現象が頻発しており、低酸素水塊が形成されている。この低酸素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る。

一方、先行研究において、成層期でも水平方向の水の動きは盛んであり、水塊が大きく入れ替わったことによって溶存酸素飽和度の値が大きく変わった可能性を主張する研究(奥村・遠藤、1985)がある。そして同研究では、風の影響で底層に強い流れが生じる場合があり、強風によって表層水が攪拌され、その影響が遅れて底層に及び水塊が入れ替わることによって、溶存酸素飽和度が大きくなる場合があると述べている。

琵琶湖北湖の溶存酸素濃度の変化は、長期変化(年変化)と短期変化(月変化、一時的変化)とに分けられる。その長期変化のメカニズムについて、富栄養化、地球温暖化による成層強化、雪解け水などによるものと主張する研究がある。

本研究は、成層期において強風などの物理要因の影響を解析し、深湖底の水温・溶存酸素濃度の短期変化の特徴を考察し、強風など短期気象変動が琵琶湖の湖底付近での環境に与える影響を解析するとともに、強風などのイベントが湖底付近における溶存酸素濃度回復に与える影響について考察を試みることを目的とする。

2. 方法

琵琶湖北湖の湖底付近での環境を正確に観測することは、容易なことではない。静態的な空間と思われる湖底付近だが、時には激しい運動があり、決して穏やかな環境ではない。したがって、強風など短期気象変動による琵琶湖の湖底付近で起こっている現象を正しく理解するためには、湖底境界層に発生する水温分布の変動、流れの詳しい解析を可能にする自動連続観測データが必要である。

本研究では、以下の現場調査を行った(2.1節、図2)。また、本報で使っている風向・風速データ、水温長期変化データ

(2.2節)、湖水の成層強度(2.3節)、強風の影響を評価するための強風影響指数(2.4節)は、以下のとおりである。

2.1 自動連続観測機器による現場調査

自動連続観測は、第一湖盆の中心を通した南北に湖盆を横断する線上(N3～N5)で行った(図1)。調査項目と調査方法は以下のとおり(図2)。

1) 水温・溶存酸素濃度調査

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、N3、N4、N5のそれぞれ湖底直上1m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3台を設置した。

2) 流れ・内部波調査

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(NORTEK AS社製、測定精度：流向は±2度、流速は±0.5cm/s)を設置した。この流速計で湖底から2m毎に30mの範囲の流れの鉛直分布を観測した。

3) 水温成層構造・内部波調査

第一湖盆の湖底境界層の水温成層構造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2m毎に計8個の水温ロガー(TidbiT, OnSet社製、測定精度±0.2℃)を、表水層に5m毎に計7個の水温ロガーを設置し、年間を通して5分間隔で鉛直水温分布を自動連続測定した。なお、鉛直方向に一定の空間間隔で水温ロガーを繋いだものはサーミスタチェーンと言い、水温成層構造を測るための基本的な観測機器である(図2)。

2.2 使用データ

2010年度および2011年度の風向・風速のデータは、彦根地方気象台の気象データを、また水温長期変化のデータは、本センターの環境監視部門の水深別定期調査のデータを用いた。

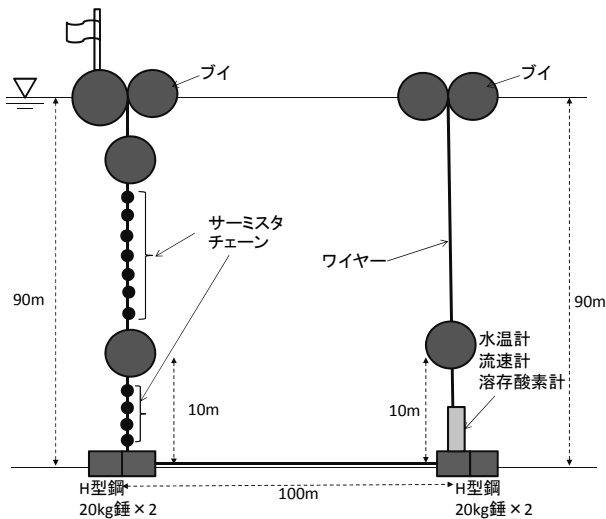


図2 琵琶湖深湖底における自動連続観測機器の設置図

2.3 湖水の成層強度 (シュミット安定度指数)

湖水の成層強度を下式で計算する (Hutchinson, 1957; Idso, 1973)。

$$SI = \int_0^{z_m} (z - z^*) (\rho(z) - \rho^*) A(z) dz / A_0 \quad (1)$$

ここで、 A_0 は湖の表面積、 $A(z)$ は水深 z における湖の面積、 ρ^* は湖の重心における密度 (水温長期変化データを利用して算出)、 z^* は湖の重心における水深、 z_m は最大水深である。この SI は、シュミット安定度指数 (Schmidt's Stability Index) で成層状態から密度均一分布まで混ざるため必要な仕事を表すものである。

2.4 強風影響指数 (Wind Impact Index)

強風の影響を評価するため、風と成層強度を総合的に考え、本研究では、以下の強風影響指数を提案する。

$$WII = KW^2 / SI \quad (2)$$

ここで、 K は比例常数で、 W は風速、 SI は式 (1) のシュミット安定度指数を示す。風が湖面に与える風応力は、 $F = KW^2$ であるので、強風影響指数 = 風応力 / シュミット安定度指数とした。

3. 結果と考察

3.1 強風などの短期気象変動

2010年度および2011年度に、琵琶湖に直接的な影響を与えたと思われる強風のイベントがあった。2010年度には、台風9号 (9月8日)、台風12号 (9月25日)、台風14号 (10月30日) があり、また低気圧による強風の日 (10月26日) もあった。2011年度には、台風6号 (7月19日)、台風12号 (9月3日)、台風15号 (9月21日) や強風 (10月1日) があった。この中で、2010年度の低気圧による強風は平均風速・最大風速・最大瞬間風速のいずれも大きな数値を示し、琵琶湖に大きな影響を与えた。

3.2 湖底付近の水温分布に与える影響

サーミスタチェーン (図2参照) を用いて計測した、2010年7月から11月にかけての N5 (図1) における水温の経時変化を図3に示す。水温の鉛直補間は、線形スプラインを用いた。

低気圧による強風 (10月26日) が大きく、これにより大きい振幅の内部ケルビン波が水温躍層で引き起こされ (図3上図参照)、湖底直上の鉛直混合がかなり強く起こっていることが分かる (図3下図参照)。ただし、この低気圧強風は成層を破壊するまでには至っていない。また、台風12号 (9月25日) においては、水温分布への影響はそれほどなかった。

一方、2011年7月から11月にかけての N5 (図1) における水温の経時変化を図4に示す。台風6号 (7月19日) の影響が大きく、これにより大きい振幅の内部ケルビン波が水温躍層で引き起こされ (図3の上側参照)、湖底直上の鉛直混合が強く起こっていることが分かる (図3下図参照)。

3.3 湖底付近の流れの分布に与える影響

図5は、2010年8月から11月までの台風が来る季節に深湖底の湖底直上 (水深85m~90mの0.5mの間隔で10層) で測定した流れの図である。この図から、湖底直上の水深85m~90mの流速値がほとんど同じであるということが分かる。また、流向についてもほとんど違いがなかった (図5B)。このことは、深湖底の湖底直上の水は、台風などのイベントで同じ方向に、同じ程度の速さで流れることを示唆している。また、その流れはほとんど一過性で、後には、波動を伴って急激に減衰することがわかった。

また台風9号 (9月8日)、台風14号 (10月30日) は、深湖底の湖底直上の水の流れの分布への影響があまりなかった。台風12号 (9月25日) は深湖底の湖底直上の水の流れ分布への影響が若干あったが、台風14号 (10月30日) が来る前の低気圧による強風 (10月26日) の影響の方が強かった (図5B,C)。

図6は、2011年7月から10月までに深湖底の湖底直上 (水深85m~90mの0.5mの間隔で10層) で測定した流れの図である。2010年の図5と同じように、湖底直上の水の流速値と流向ともがほとんど同じで、強風などのイベントでできた強い流れはほとんど一過性であり、波動を伴って急激に減衰する (図6B)。

また、台風6号（7月19日）、台風12号（9月3日）、強風（10月1日）の深湖底の湖底直上の水の流れの分布への影響が強かったことに対し、台風15号（9月21日）は、深湖底

の湖底直上の水の流れの分布への影響があまりなかった（図6B,C）。

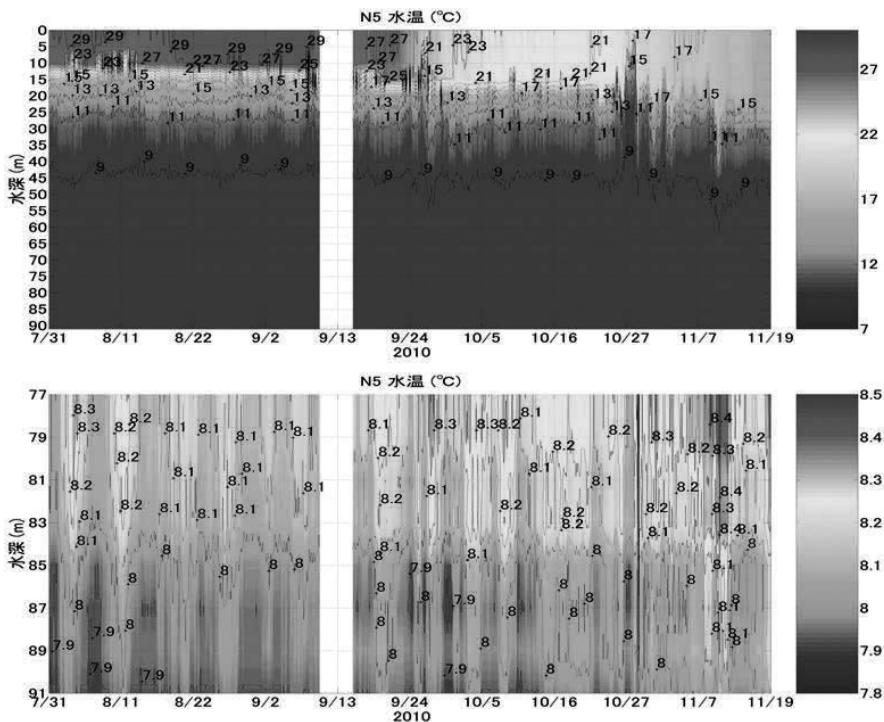


図3 N5における水温等値線図（2ページにカラー掲載）

2010年7月～11月：上側は水深0mから91mまでの水温分布、下側は水深77mから91mまでの水温分布

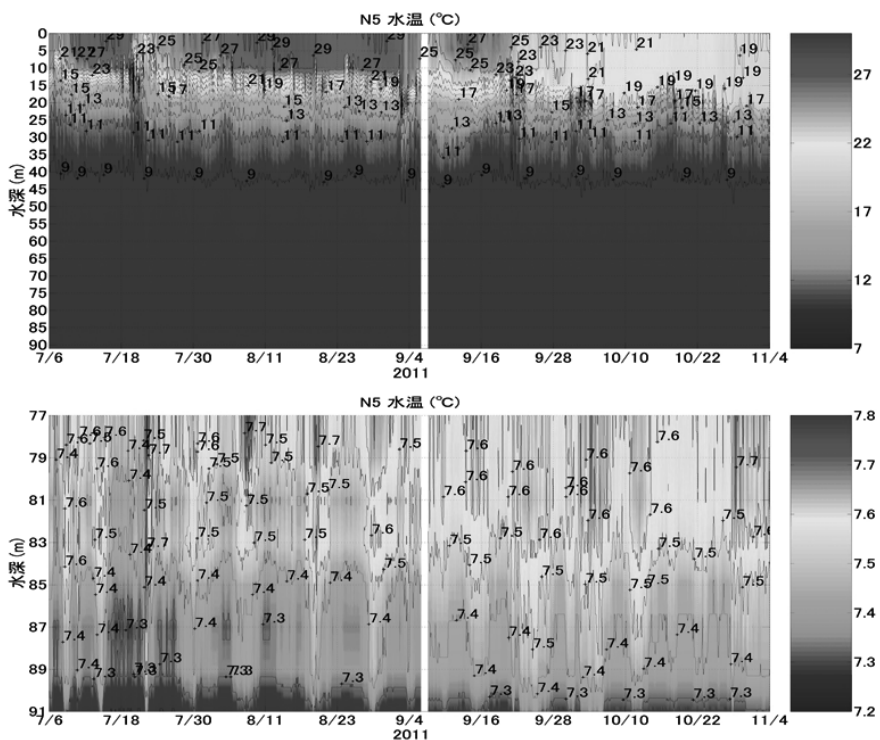


図4 N5における水温等値線図（2ページにカラー掲載）

2011年7月～11月：上側は水深0mから91mまでの水温分布、下側は水深77mから91mまでの水温分布

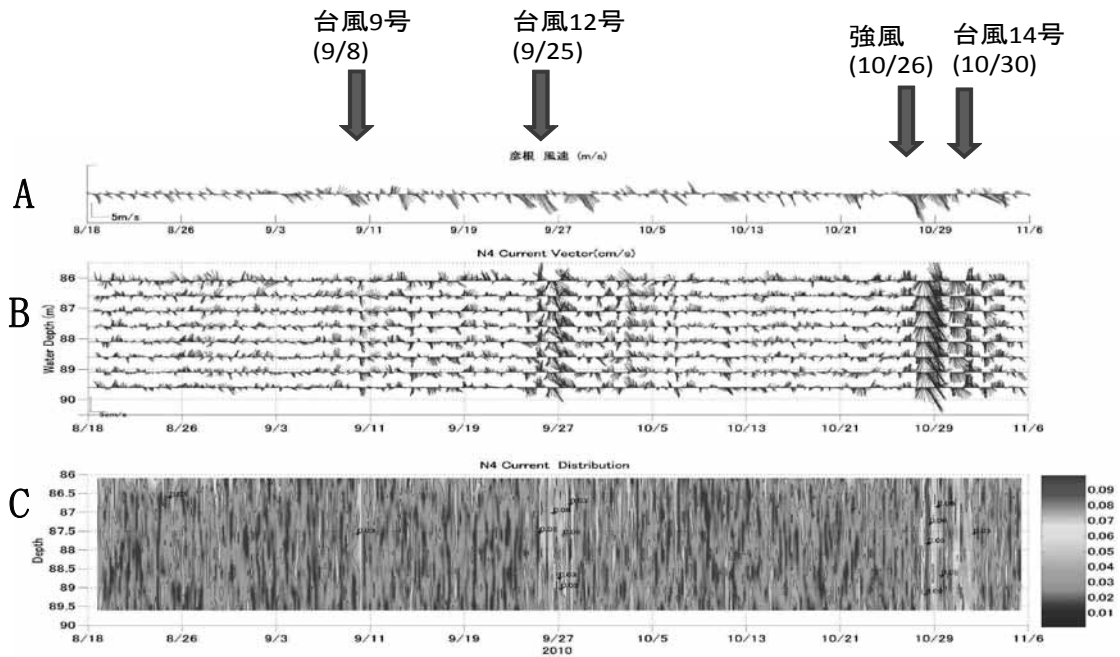


図5 N4におけるADCP流速計で測定した流れの図(3ページにカラー掲載)
 2010年8月～11月：Aは風のベクトルの図、Bは水深85m～90mの流れのベクトルの図、
 Cは水深85m～90mの流速の絶対値の等値線の図 ※矢印は台風到来日を表す。

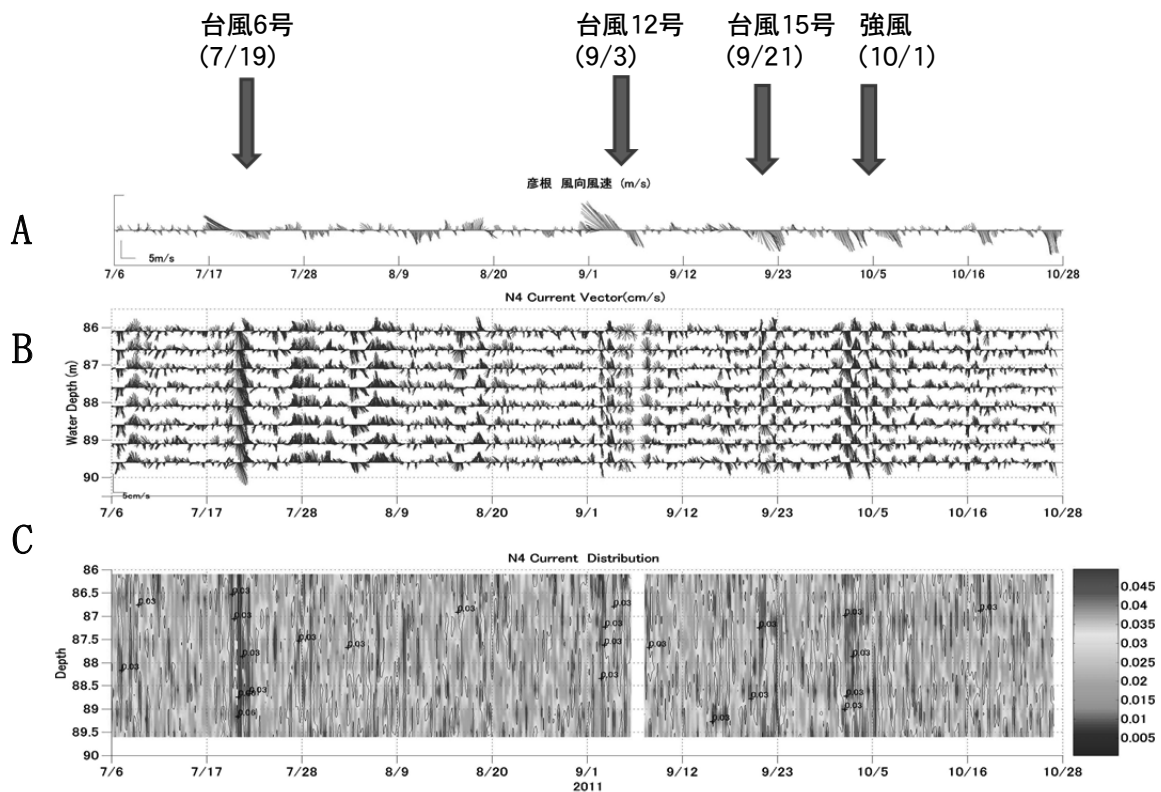


図6 N4におけるADCP流速計で測定した流れの図(3ページにカラー掲載)
 2011年7月～10月：Aは風のベクトルの図、Bは水深85m～90mの流れのベクトルの図、
 Cは水深85m～90mの流速の絶対値の等値線の図 ※矢印は台風到来日を表す。

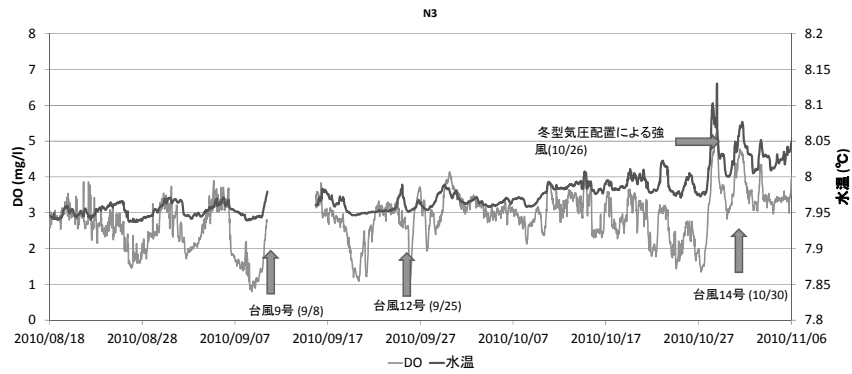


図7 N3における自動連続観測機器で測定した水深90mの湖底直上1mの水温・溶存酸素濃度の図
2010年8月～11月：矢印は台風到来日を表す。

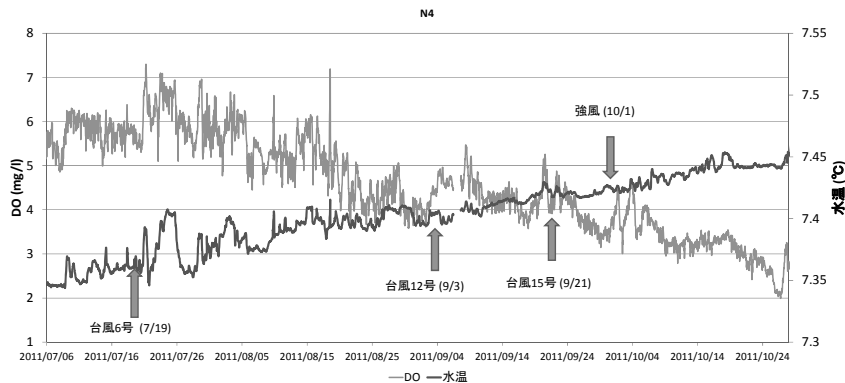


図8 N4における自動連続観測機器で測定した水深90mの湖底直上1mの水温・溶存酸素濃度の図
2011年7月～10月：矢印は台風到来日を表す。

3.4 湖底直上の水温・溶存酸素濃度を与える影響

図7に示したように、2010年8月から9月にかけては、深水層の湖底直上の溶存酸素が消費され、溶存酸素濃度が徐々に低くなっていき、9月には、溶存酸素濃度が一定の水準を持つが、10月に入ると、再び徐々に低くなっていく。一方、湖底境界層の乱流拡散により、湖底直上の上層の水温のより高い水が下へ拡散され、ゆっくりとした水温上昇が見られる。成層期にこのプロセスで、湖底付近の水温は緩やかな上昇傾向にあり、溶存酸素濃度が緩やかに低下する傾向にあるのが琵琶湖の特徴である。強風など短期気象変動がくると、深水層の湖底直上の水の強い混合が発生し、急激な水温上昇と溶存酸素回復が起こる。しかし、このような溶存酸素の回復は一過性である。

2010年の場合、台風9号（9月8日）・台風12号（9月25日）・台風14号（10月30日）では、溶存酸素はあまり回復しなかったが、台風14号の前の低気圧による強風（10月26日）の影響が大きく、急激な水温上昇と溶存酸素回復がみられた（図7）。

また、2011年7月から11月にかけては、溶存酸素濃度が徐々に低くなっていき、湖底境界層の乱流拡散により水温がゆっくりと単調に上昇していく。台風15号（9月21日）では溶存

酸素回復が起こらなかったが、台風6号（7月19日）、台風12号（9月3日）によって、溶存酸素回復が回復した（図8）。

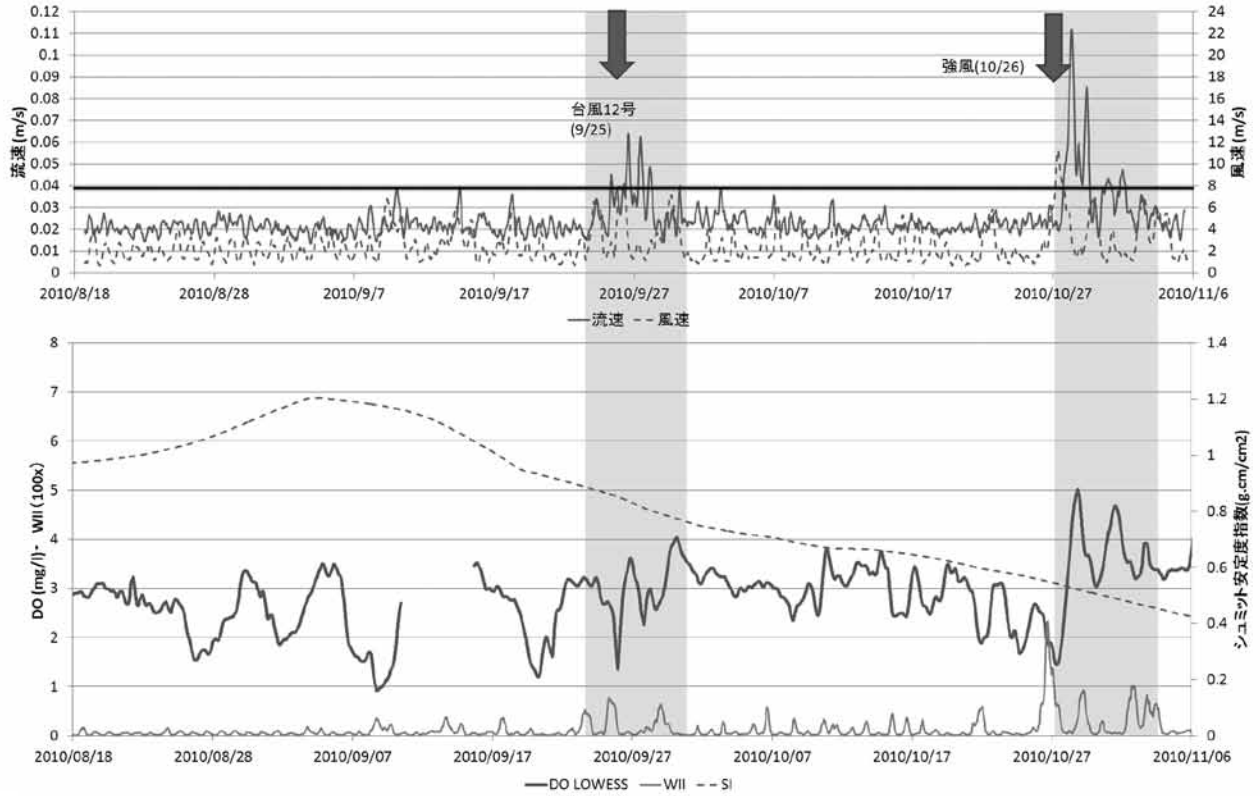
3.5 強風影響指数を用いた考察

強風のイベントが琵琶湖深湖底の低酸素水塊内における溶存酸素濃度の一時回復に及ぼす影響を考察する。

まず2010年および2011年における風速の6時間移動平均が8.0m/s以上であり、かつ水深86m～90mにおける鉛直方向の流速平均値から算出した6時間移動平均について、強風の影響があったと考えられる4cm/s以上のケースを抽出した…①。次に溶存酸素濃度については、実測値をもとに局所重みづけ回帰法（LOWESS）による平滑化をおこなった上で、強風の通過前後において、流速が安定かつ小さくなったと判断した時期の値の差（図9 網掛け部分の始端と終端の値の差）を計算した（強風通過後は観測機器周辺の低酸素水塊のゆれが大きく、水塊外の値を測定する可能性があるため）…②。さらに式（2）により強風影響指数を計算した…③（図9）。この上で、①のケースにおける、②と③との関係を求めた（図10）。その結果、強風影響指数と溶存酸素濃度の変化の間には一定の相関がみられたことから、強風影響指数が大きいほど、溶存酸素濃度の一時回復に対する影響が大きいことが示唆される。

※ ②においては、湖底地形波の影響を除外していないため、今後の検討を要する。

2010年



2011年

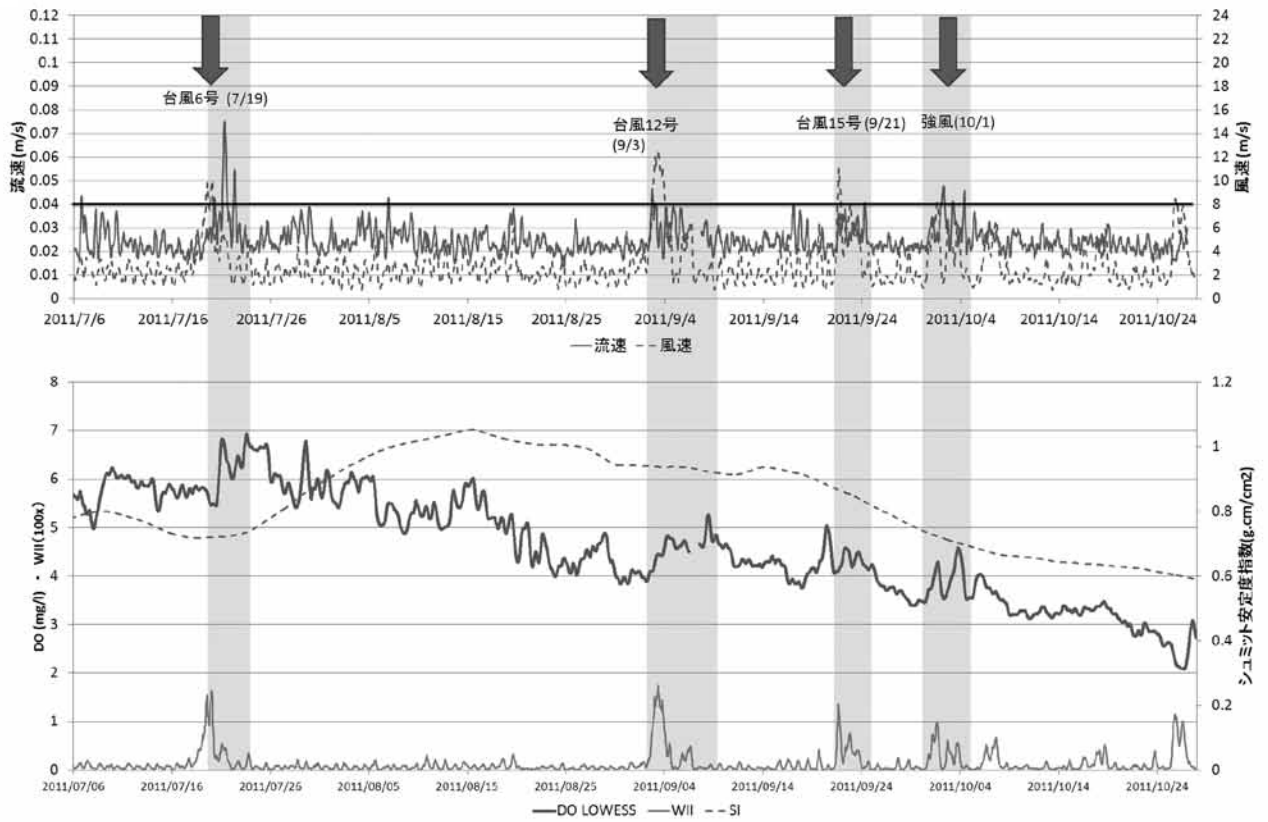


図9 2010年および2011年の流速(上図実線:6時間移動平均)、風速(上図点線:6時間移動平均)、溶存酸素濃度(下図太実線:LOWESS)、強風影響指数(下図細実線:数値は軸の値の100倍)、シュミット安定度指数SI(下図細点線)

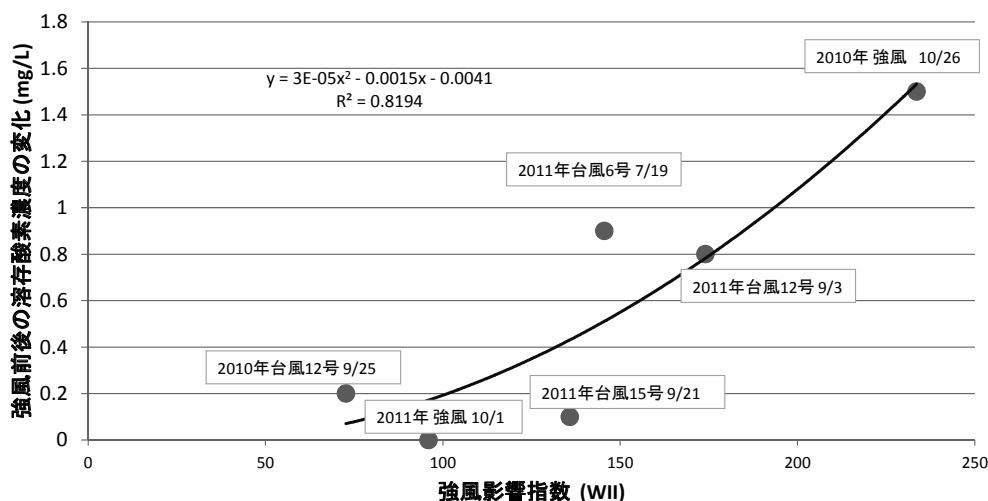


図 10 強風影響指数と強風前後の溶存酸素濃度の変化

4. まとめ

本研究では、琵琶湖付近を通過した強風のイベントが、琵琶湖の深湖底の湖底直上の一時酸素回復にどのような影響を与えたのかを考察した。

主な結果としては、

- ① 水温躍層においては大きい振幅の内部ケルビン波を引き起こした (図3の上側参照)。
- ② 一方で深層部においては、内部ケルビン波によるものと思われる強い振動流が琵琶湖の深湖底の湖底直上に生じた (図3の下側参照)。
- ③ 強風のイベントが琵琶湖深湖底の溶存酸素の一時回復に対する影響は、この大きい振幅の内部ケルビン波で湖底直上の水の鉛直混合が起き、湖底直上の上の層から下の層への酸素が供給される作用によるものである。つまり、この酸素供給は表水層から湖底への供給ではない。
- ④ なお台風などの強風による琵琶湖深湖底の溶存酸素濃度回復への影響は一時的であり、また、台風の影響の程度は、風の強さと時期 (成層強度に関連する) による。
- ⑤ 強風影響指数が大きいほど、溶存酸素濃度の一時回復に対する影響が大きいことが示唆される。

今後も引き続きデータの収集に努め、サンプル数を増やすとともに、解析手法 (特にデータの処理方法) についても検討を行い、強風が深湖底の溶存酸素濃度の一時回復に及ぼす影響に関する解析を推進することとする。

5. 謝辞

本研究を遂行するにあたり、実験調査船「はっけん号」の乗組員に多大な協力を得たことに感謝します。

6. 引用文献

- Blumberg, A. and D. Di Toro (1990) : Effects of climate warming on dissolved oxygen concentrations in Lake Erie, Transactions of the American Fisheries society 119: 210-223
- 長谷川直子 (2006) : レマン湖の低酸素化、「世界の湖沼と地球環境」: 59 - 72.
- Hutchinson, G. E. (1957) : A treatise on limnology. I. Geography, physics, and chemistry. John Wiley and Sons, New York, USA.
- 一瀬諭・若林徹哉・岡本高弘・藤原直樹・井上健・加賀爪敏明・宮島利宏 (2006) : 琵琶湖深層部の微生物由来マンガン酸化物構造体 Metallogenium の発生. 用水と排水, 48: 439-447.
- Idso, S. B. (1973) . On the concept of lake stability. Limnology and Oceanography 18: 681-683
- IPCC (2007) : Climate change and water, IPCC Technical paper VI.
- 熊谷道夫, 青田容明, 焦春萌, 石川加奈子 (2004) : 台風の影響と溶存酸素濃度の変化。滋賀県琵琶湖環境科学研究センター試験研究報告 : 44-50.
- 中賢治 (1973) : びわ湖深層の全循環期前の溶存酸素量の永年変化について. 陸水学雑誌, 34:41-43.
- 西野麻知子・中島拓男・辻村茂男・大高明史・杉原夕華 (2002) 北湖深底部の低酸素化に伴う生態系変化の解明 - チオプロークと底生動物の変化が訴えるもの - 琵琶湖研究所所報 19:18-35.
- Straile, D., K. Jöhnk and H. Rosknecht (2003) : Complex effects of winter warming on the physicochemical characteristics of a deep lake. Limnology and Oceanography, 48: 1432-1438.