

台風の影響と溶存酸素濃度の変化

熊谷道夫・青田容明¹⁾・焦春萌・石川可奈子

要 約

本研究では、2004年に琵琶湖付近を通過した台風が、琵琶湖の深水層にどのような影響を与えたのかについて考察する。2004年10月20日から23日にかけて上陸した台風23号は、特に強い影響を琵琶湖北湖深層水に与えた。これは、風速が強かったことと、湖面冷却が始まる10月に襲来したこととで、大規模な内部ケルビン波を引き起こし、深水層へ与える影響が大きかったことによる。この内部ケルビン波によって、水深40m以深の層が強く混合され、湖底付近の溶存酸素濃度は例年よりも高い数値を示したが、深水層全体では、平均水温の上昇と溶存酸素濃度の減少が見られた。このことから、強い台風の影響は、攪拌によって深水層内で上下混合を促進し、水温上昇を引き起こすが、表水層から深水層への酸素供給には必ずしも貢献しないことがわかった。したがって、湖底付近の溶存酸素濃度だけに着目するのではなく、深水層全体での溶存酸素量の増減を把握することが大切であり、そのような監視体制を早急に整備することが肝要であると言える。

1. はじめに

琵琶湖北湖の深水層における溶存酸素濃度は、主に、冬期の全循環期における溶存酸素供給と、夏期の成層期における水中や堆積物中の有機物分解など生物呼吸に伴う酸素消費によって決まる。溶存酸素供給は、冬期における湖面および湖岸の冷却や、風波による混合、河川から流入する密度流などによってもたらされるが、近年の温暖化に伴い冬期の気温が上昇し、その結果、湖底付近まで十分に酸素が供給されていないのではないかとということが指摘されている (Kumagai *et. al*, 2003)。

一方、図1に示したように、琵琶湖北湖表水層におけるpHの最大値は、1960年から1970年にかけて急激に増加したが、1980年代後半より減少に転じ、1990年以降ほぼ一定の値を保っている。沖帯のpH最大値の変化は、植物プランクトンの光合成による有機物生産量に比例すると考えられる。し



図1 琵琶湖北湖表水層におけるpHの変化
(滋賀県水産試験場定期観測の結果)
(グラビア2頁参照)

たがって富栄養化現象は1975年から1978年以降に歯止めがかかり、現在は小康状態を保っているものと思われる。

表水層における有機物生産量が増加する場合、沈降を通じて深水層や湖底の有機物量が増加し、

1) 金沢大学自然計測応用研究センター

更にそれらが分解されることで、溶存酸素濃度が低下する。

最近、表水層におけるpHの最大値がほぼ一定であることから、琵琶湖北湖において生物生産量が急増した可能性は少なく、深水層への有機物負荷も増加していないものと思われる。実際、深水層における見かけの酸素消費速度を計算しても、過去20年間に大きな変化は確認されていない。これらのことから、深水層における酸素消費量は、増えていないものと考えられる。

しかし、一方では酸素濃度は減少傾向にあることから、酸素消費という支出はほぼ横ばいであるが、酸素供給という収入が減りつつあるというのが、現在の正しい認識ではなかろうか。

地球温暖化が進行すると冬期の気温が上昇するため、湖底への酸素供給量が減少するが、一方で、台風の影響回数が増加し、強風による鉛直混合によって湖底まで酸素が供給される可能性もある。これについては、台風による強い鉛直混合が、表水層から深水層へと実際に酸素供給を行う場合と、内部波によって深水層の水が単に上下混合し、結果として酸素濃度が見かけ上増加しているだけで、総量の変化はない場合との二つのケースが想定される。

琵琶湖北湖における深い場所での環境を正確に観測することは、容易なことではない。静寂で沈黙した空間と思われがちな湖底付近だが、実は、周期的で速い水の運動があり、決して穏やかな環境ではない。したがって、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振動流の解析を可能にする計測データが必要である。

熊谷 (1986) は、3次元の超音波流速計を用いて、湖底付近に形成される境界層内での流速変動を詳細に測定した結果、湖底に働く流れの応力は $10^{-5} \sim 10^{-1} \text{Nm}^{-2}$ であり、湖底泥の巻上げに必要な応力 $10^{-1} \sim 1 \text{Nm}^{-2}$ よりわずかに小さいことを示した。したがって、通常の場合、湖底境界層に発生する振動流によって湖底泥が再浮上する可能性は低いものと思われる。

しかし、琵琶湖を直撃する台風などの強い風によって、より大きな内部振動が発生する場合、湖底に働く応力はさらに大きなものになることが予想される。特に、近年顕著になっている琵琶湖北湖の湖底泥表面の軟弱化が、巻上げに必要な臨界応力をより小さくしている可能性もあるので、底泥と湖水との相互作用を正しく評価することは、今後の琵琶湖深水層の水質変化を予想する上で重要な課題である。なぜなら、琵琶湖北湖の底泥は、すでに嫌気化しており、間隙水中にはリンなどの栄養塩が、植物プランクトンに利用されやすい形で存在するからである (Murphy *et al.*, 2002)。

本研究は、2004年の夏季に多数来襲した台風の影響を評価することによって、鉛直混合が湖内水質に及ぼす影響について考察することを目的としている。利用するデータは、サーミスターチェイン (水温計鎖) によって計測された水温変動と、深水層に設置された2台の電磁流速計による流速変動、およびはっけん号の定期観測データである。また、冬期の酸素回復を連続的に計測するために、自記式溶存酸素計も係留した。

2. 観測方法

機器を係留した場所は、安曇川沖約2500mにある最深部付近である。サーミスターチェインと自記式溶存酸素計は、ほぼ同じ場所で、北緯 $35^{\circ} 19.8176'$ 、東経 $136^{\circ} 06.3715'$ に設置しており、自記式流速計は、北緯 $35^{\circ} 19.9309'$ 、東経 $136^{\circ} 06.7673'$ に設置した。水深は、約90mである。サーミスターチェインには、Onset社のStow Away Tidbitを用いた。測定範囲は -5°C から $+37^{\circ}\text{C}$ の間で、精度は $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ である。セットした水深は、0m、1m、5m、10m、15m、20m、25m、30m、35m、40m、45m、50m、60m、70m、80m、90mの16点である。一部欠測もあるが、2003年5月21日から現在まで、10分間隔で水温を記録している。今回は、台風の影響評価を目的としているので、2004年3月24日から2005年2月17日までのデータを解析した。

流速計は、アレック電子社製のACM 8 Mを2台

用いた。測定間隔は20分毎で、湖底から1.8mと、湖底から54.5mの高さに設置した。全水深は90mなので、上の流速計は水深が35.5mに設定されていることになり、ちょうど、水温躍層の下部に位置している。なお、この流速計は、同時に水温も計測可能である

自記式溶存酸素計は、湖底上1mと10mの高さに係留した。用いたのは、シーバード社製のSBE16であり、測定間隔は10分間である。

2004年度のはっけん号による定期観測は、4月、5月、6月、7月、10月、11月の6回実施し、西オーストラリア大学製のF-Probeを用いて各水質項目の鉛直分布を計測した。

3. 気象変動

2004年は異常に多くの台風が日本列島に上陸した。琵琶湖に直接的な影響を与えたと思われる台風は、10個であった(表1)。表1および図2からわかるように、瞬間最大風速がもっとも大きかったのは台風6号で36.4m/秒だったが、平均風速、最大風速、瞬間最大風速のいずれも大きな数値を示したのは台風23号であり、この台風が琵琶湖に

表1 琵琶湖に影響を与えた台風(2004年、彦根)

号数	上陸日	最大瞬間風速(m/秒)
4	6月11日~13日	17.2
6	6月19日~21日	36.4
10	7月28日~8月2日	22.3
11	8月4日~5日	15.4
15	8月18日~20日	19.4
16	8月29日~31日	26.6
18	9月6日~8日	28.3
21	9月29日~30日	23.1
22	10月9日	10.8
23	10月20日~23日	28.5

大きな影響を与えた。

4. 水温変化と水表面における熱フラックス

サーミスターチェーンを用いて計測した水温の経時変化を図3に示す。水温の鉛直補間、線形スプラインを用いた。通年とは異なり、台風による鉛直混合がかなり強く起こっていることが伺われる。特に6月中旬の混合と10月中旬の混合が顕著である。それ以外の時期の台風は、上下混合を引き起こしてはいるが、成層を破壊するまでには至っていないようである。

次にこの水温分布から水面を通しての熱フラックスを計算した。計算の手順は以下のとおりである。琵琶湖を深さ方向に分割したときに、一番上の層から順に $j=1, 2, 3, 4, 5$ 、と番号を付ける。各層の面積を S_j とし、その面を通して熱を輸送する拡散係数を K_j とおく。また、各層の体積を V_j 、

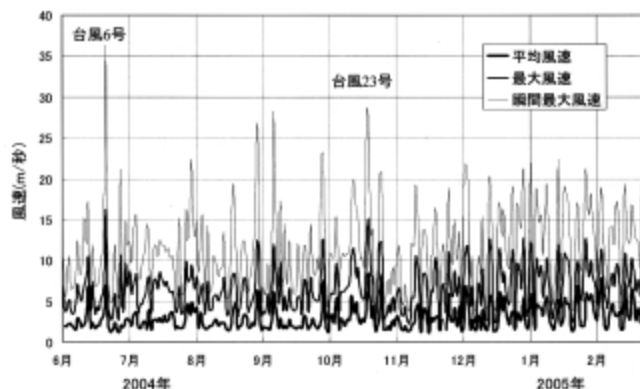


図2 2004年6月から2005年2月までの平均風速、最大風速、瞬間最大風速の変化(彦根)

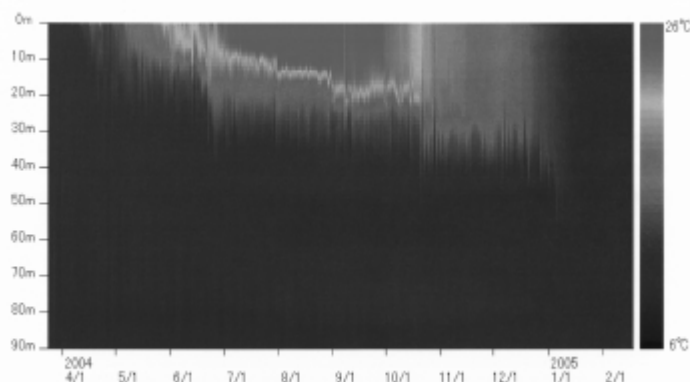


図3 2004年6月から2005年2月にかけての水温等値図(グラビア2頁参照)

水温を T_j と記述する。

このとき、 V_j は以下のように書ける。

$$V_j = \Delta z \times (S_j + S_{j+1}) / 2 \quad (1)$$

ここで、 Δz は各層の厚さを示し、今回は1mを与えた。水中の熱量の変化は、鉛直方向の流れを考えなければ、

$$\frac{\partial(VT)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K \frac{\partial(VT)}{\partial z} \right] \quad (2)$$

と書ける。ここで、 K は鉛直拡散係数である。

(2) 式を以下のように差分化する。

$$V_j \left(\frac{T_j^{n+1} - T_j^n}{\Delta t} \right) = K_j^n \frac{(T_{j+1}^n - T_j^n) S_j^n}{\Delta z} - K_{j-1}^n \frac{(T_j^n - T_{j-1}^n) S_{j-1}^n}{\Delta z} \quad (3)$$

ここで、 Δt は時間差分である。 $j=1$ を水面、 $j=N$ を湖底とし、湖底面を通した熱のやり取りがないものと考え、

$$K_N^n \frac{(T_{N+1}^n - T_N^n) S_N^n}{\Delta z} = 0 \quad (4)$$

とおける。(3) 式を、 $j=N, N-1, N-2, \dots, 2, 1$ の順に足し合わせると、各面を通しての熱フラックスが打ち消されて、最終的には、

$$\sum_{j=1}^N V_j \left(\frac{T_j^{n+1} - T_j^n}{\Delta t} \right) = -K_0^n \frac{(T_1^n - T_0^n) S_0^n}{\Delta z} = -\frac{Q_T}{\rho C_p} S_0^n = HS_0^n \quad (5)$$

のように書ける。ここで、 Q_T は湖面での熱フラックス、 ρ は水の密度、 C_p は水の定圧比熱である。

この式を用いて、計測された水温から湖面を通して出入りする熱フラックス Q_T を求めることができる。

このようにして、2004年3月から2005年2月までの湖面における日平均熱フラックスを求めた。正の値は、大気から水中に入る熱量で、負の値は水中から大気へ出る熱量である。日変動における大きな変動を消去するために、計算結果から10日間の平均値を求めて図4に示した。これによると、3月から9月頃までは水中に入る熱量が大きい、9月以降は水中から大気へと失われる熱量が多いことがわかる。時々大きな変動が見られるのは、台風による影響と思われる。

さらに、年間を通しての熱量を求めるために、10分毎のデータを時間で積算した数値を図5に示す。これによると、全てとは言えないが、台風の通過に伴って積算熱量の低下が見られる。すなわち、台風の通過は湖を冷却する傾向にあると言える。これは、強風による混合と気化熱による冷却が主な原因であると思われる。なお、風速に対する熱フラックスの増減も調べたが、明瞭な対応関係は得られなかった。これは、そのときの気温や水温、成層状態がそれぞれ異なっていることが原因であるように思われる。

また、図5から、2004年3月26日から2005年2月17日まで、ほぼ1年間にわたる熱収支を考えたとき、完全に元の状態に復帰しない様子、すなわち、熱量の残差が見られる。このことは、少しずつ

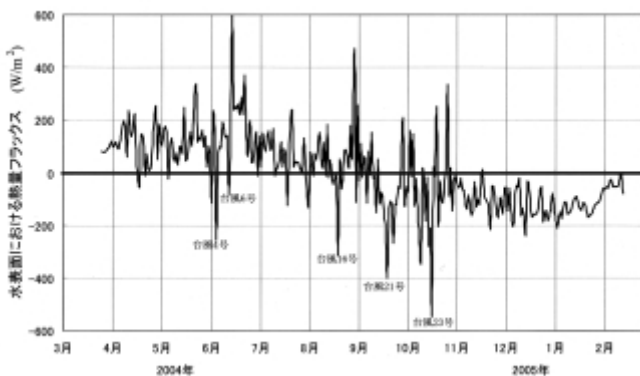


図4 10日平均した湖面での熱フラックス

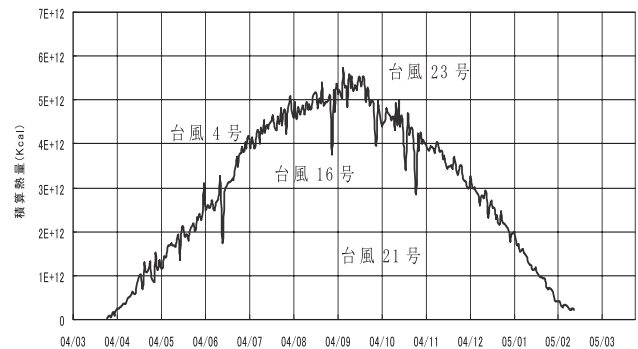


図5 2004年3月から2005年2月までに湖面を通しての熱収支の積算

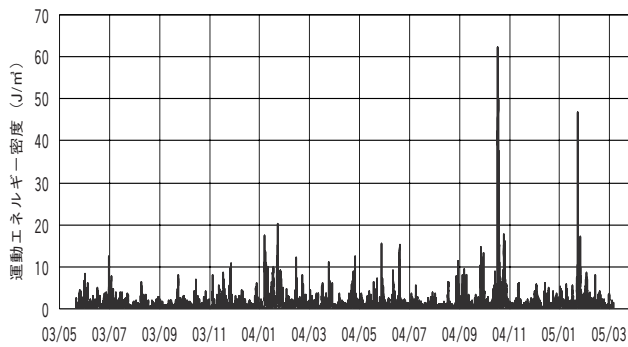


図6 水深90mの湖底上1.8mにおける運動エネルギー密度

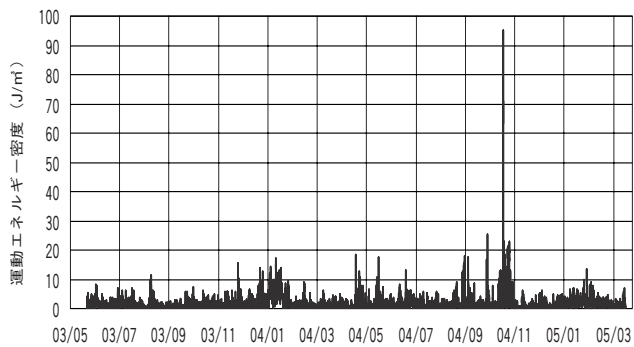


図7 水深90m地点の湖底上54.5mにおける運動エネルギー密度

つ湖が暖まりつつあることを示唆している。

5. 流速変動

図6に湖底上1.8mに設置した流速計の記録から求めた運動エネルギー密度を示す。2004年1月から2月と、2005年1月から2月の冬期にエネルギーが高くなる傾向がある。特に、1月27日に大きな運動エネルギーが観測された。また、2004年10月21日に非常に大きな値を示した。これは台風23号の影響と思われる。

同様な変動は湖底上54.5mに設置した流速計でも見られた(図7)。台風23号の影響は、上方に設置した流速計のほうが大きく、運動エネルギー密度で約5割増であった。これは、乱れのエネルギーが上から下へ供給されていることを考慮するならば当然の結果と言えよう。興味深い点は、2005年1月27日に湖底上1.8mで観測された強い運動エネルギー密度は、湖底上54.5mの流速計では観測されなかったことである。このことは、大

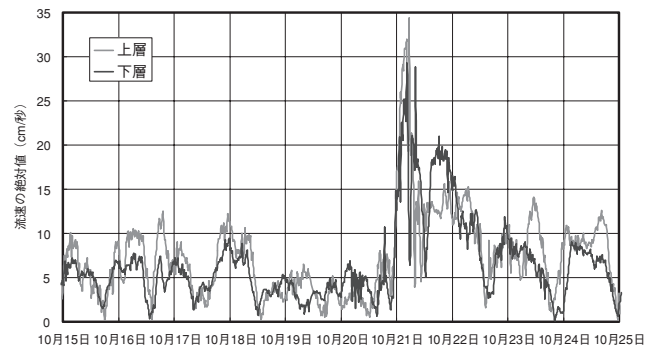


図8 2台の電磁流速計で測定した台風23号通過後の湖流(グラビア2頁参照)

きな水の流れが、上方からではなく、水平方向から密度流となって湖底沿いに到達したことを示唆している。

図8に、上層(湖底上54.5m)と下層(湖底上1.8m)の流速計で測定した流速の絶対値を示す。期間は2004年10月15日から25日までの10日間である。この図から、上層と下層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。このことは、水温躍層より下(躍層は水深が20mから30mあたりに存在する)のいわゆる深水層の水は、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、後は波動を伴って急激に減衰することがわかった。

6. 水温と溶存酸素濃度の変動

6.1 深水層における水温と酸素の関係

深水層における水温変動と、溶存酸素濃度変化の関係について述べる。水深90mから95m付近の深い場所での連続的な水温変化の記録は、まだ十分なデータが得られていないので明確なことは言えないけれども、近年、深層水の水温が上昇している傾向を示している。

冬期の水温上昇は、鉛直混合に伴うものであり、ほぼその時の気温に等しい。したがって、暖冬の年には水温が高く、厳冬の時には低くなる傾向がある。問題は、全循環が発生した後の水温低下で、これは主に密度流による冷却に依存している。こ

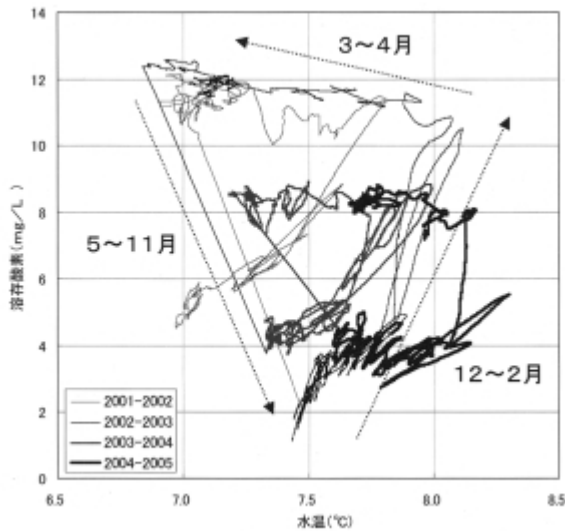


図9 琵琶湖北湖湖底直上における水温と溶存酸素濃度の関係 (グラビア2頁参照)

の時の水温低下が十分でないと、酸素供給量も少ない可能性がある。すなわち、琵琶湖深水層における溶存酸素濃度は、水温と深い関係がある。例えば、成層期に水温が高ければ有機物の分解も速く、酸素消費速度も速くなる。逆に水温が低ければ、有機物の分解も抑制され、酸素消費速度も小さくなる。また、循環期には、低温水の貫入により、酸素濃度の高い水が深水層へ供給される。しかし、水温が高い場合は酸素の飽和溶解度も低く、また、密度流として深い場所まで到達しない可能性がある。

図9に示したように、深水層の水は成層期には停滞し、酸素消費が進行する。5月から11月にかけては、深水層中の鉛直拡散が次第に大きくなるため、ゆっくりとした水温上昇が見られる。これに伴って、溶存酸素濃度も減少するが、12月～2月にかけて強い混合が発生すると、急激な水温上昇と酸素回復が起こる。これだけでは、湖底付近の水温は常に上昇することになるが、3月から4月にかけて、緩やかな水温低下と溶存酸素濃度の上昇が起こるのが琵琶湖の特徴である。これは、冬季の強い混合がおさまり、湖内に形成された酸素が豊富で冷たい水塊が、密度流としてゆっくりと湖底に沈むことにより生じるのではないかと考えられる。このようにして、水温と溶存酸素濃度

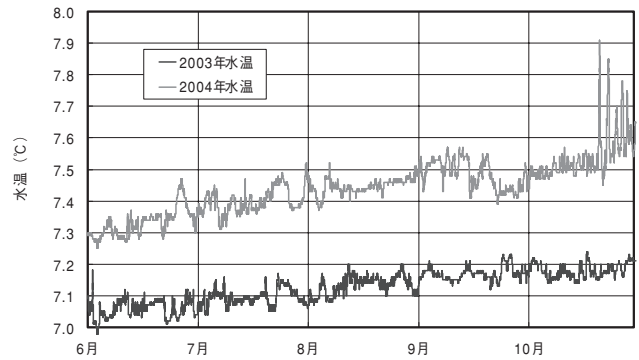


図10 湖底上2.5m (水深90m) における水温変化の比較 (グラビア2頁参照)

の間に、一年間でトライアングル状の関係が形成される。

6.2 台風が水温に与える影響

2004年の台風の影響が、湖底の水温の変化にどのように寄与したかを調べる。図10に、湖底上1.8m (水深90m) 地点に設置した電磁流速計で計測された水温の変化を示す。比較のために、2003年のデータと2004年のデータを重ね合わせた。

2004年は、暖冬も手伝って湖底の水温は春先から高めに推移し、2003年の同じ時期より約0.2°C高かった。その後、2004年のほうは2003年より相対的に約0.1°C高く推移し、台風23号が通過した2004年10月23日以降は大きな振動をしながら2003年より約0.2°C水温が高くなった。この振動は、59時間の周期が56時間、37時間、32時間、25時間というようにだんだんと短くなり、振幅も小さくなっていった。このような長周期の振動は内部ケルビン波によるものと見られるが、それが減衰する過程で深水層を混合したことを物語っている。長周期の振動は、台風23号以前の台風の場合には見られない現象であり、長周期の内部波が、湖底で反射しながら深水層に到達し、減衰する過程を示している (Eriksen, 1982)。したがって、台風による深水層への影響は、成層が発達している夏季よりも、成層が崩れ始めた秋季のほうが大きいものと思われる。

先にも述べたが、2004年は暖冬で、水温も春先から高かった。通常、春先に水温躍層が形成され

ると表層から深層への拡散が小さくなり、酸素は供給されにくくなる。一方、台風の通過に伴って鉛直混合が大きくなるので、表層から深層への酸素供給が助長されるのかもしれない。このことを明らかにする目的で、はっけん号による定期観測のデータを用いて、ヨコエビやイサザが通常生息する水深40mより深い層での溶存酸素量を求めた(図11)。計算の手法は、熱量計算と同じやりかたで、1m層ごとの酸素量を算出し、それを水深40mから湖底まで積算した。

この図からわかることは、台風23号の通過に伴って水深40より深い層の水温は上昇したが、溶存酸素量は単純に下降していたということである。これは、台風に伴う湖内攪乱が、深水層の混合を促進し、結果として水温上昇をもたらしたが、表水層から深水層への酸素供給にはそれほど貢献しなかったことを意味している。

7. 結論

2004年には多くの台風が発生した。総数で29個の台風が発生し、その内18個が日本列島に影響を与え、13個が日本本島に上陸した。その中でも、10個の台風が、琵琶湖に直接的な影響を与えた。本研究では、琵琶湖付近を通過した台風が、琵琶湖の深水層にどのような影響を与えたのかを考察した。特に、台風23号は、強い影響を琵琶湖北湖深水層に与えた。これは、風速が強かったことも原因の一つであるが、湖面冷却が始まり、表水層

と深水層の水温差が小さくなる10月に来襲したことも、大きな影響を与えた原因であった。

主な結果としては、

- (1) 台風の通過に伴って、強い振動流が深水層に生じた。これは、内部ケルビン波によるものと思われる。
- (2) これによって、水深40m以深の層が混合され、水温は上昇した。
- (3) 溶存酸素濃度は、深水層全体では減少したが、湖底付近の溶存酸素濃度は例年よりも高い値を示した。

以上の結果を通して、強い台風の影響は、深水層を攪拌することによって水の上下混合を促進するが、表水層から深水層への酸素供給には貢献しないことがわかった。したがって、深水層全体における溶存酸素量の増減を監視することが大切であり、そのような監視体制を早急に整備することが肝要である。

謝 辞

本稿の作成にあたり、総合地球環境学研究所名誉教授中西正己先生に助言を頂いたことに感謝いたします。また、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。なお、本研究は、プロジェクト研究「琵琶湖北湖無酸素化対策手法の検討」の一環で実施しました。

引用文献

- Eriksen, C. C. (1982) : Observations of internal wave reflection off sloping bottoms. *J. Geophys. Res.*, 87, 525-539.
- 熊谷道夫(1986): 琵琶湖北湖における湖底境界層流. 滋賀県琵琶湖研究所研究報告, 86-A04, 23.-28.
- Kumagai, M., K. Ishikawa, N. Ishiguro (2003): Impacts of global warming on large lakes. In: Franks, S., G. Blöschl, M. Kumagai, K. Musiak, D. Rosbjerg (eds.) *Water Resources Systems - Water availability and global change*, IAHS Red Book 280, 65-69.
- Murphy, T., M. Kumagai, K. Irvine (2002): The seasonal change in phosphorus dissolution in Lake Biwa sediments. *Verh. Internat. Verein. Limnol*, 28, 1-3.

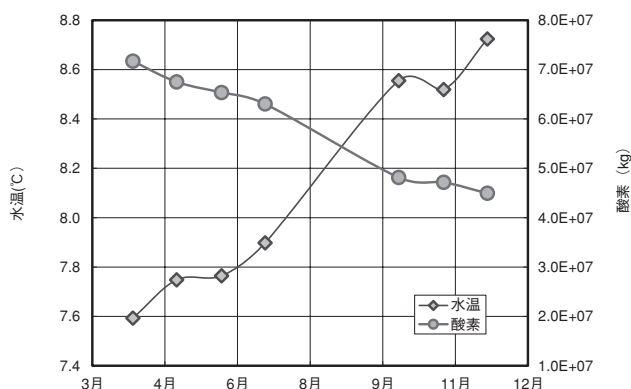


図11 2004年深水層における水温と酸素の変動
(グラビア2頁参照)