

# 猪鼻湖における貧酸素水塊の消長に及ぼす気象擾乱の影響

青木伸一\*・水野 亮\*\*・岡本光雄\*\*\*

夏期に底層で貧酸素化が著しく進行する猪鼻湖において、長期間の継続的な観測に加えて、自動昇降装置を用いて水温、塩分、DO の鉛直分布の連続観測を行った。期間中台風の影響があり、強風による密度成層の破壊と淡水流入による成層の再形成が交互に生じ、これに伴って底層の貧酸素水塊にも解消・再形成の過程が観測された。本論文では、この変化過程を示し湖水の貧酸素水塊の消長と密度構造の変化の関係について論じている。急激な鉛直混合と底層での速い酸素消費により貧酸素水塊がダイナミックに変動していることが示されている。

## 1. ま え が き

猪鼻湖(図-1)は浜名湖の湖奥部に位置するが、外洋の潮汐の侵入により塩分濃度が高く、夏期には強い密度成層が形成される。近年は流域からの栄養塩の流入・蓄積により富栄養化が慢性的に進んでおり、夏期に発生する広範囲で長期間にわたる底層水の貧酸素化が問題となっている(静岡県環境部, 2000)。著者ら(青木ら, 2001)は、猪鼻湖の最深部において 1999 年以降継続的に水質観測を行っており、1999 年、2000 年とも夏期(5 月下旬から 10 月上旬)には水深 4 m 以深はほとんど無酸素状態になることを確認した。ところが、2001 年は例年に比べて貧酸素化の程度が弱く、貧酸素水塊の規模も小さかった。この原因としては、春先から梅雨時期にかけての降水量が例年に比べて非常に少なかったこと、8 月下旬から 9 月中旬に何度か台風が接近し、例年より早い時期から気象外力の変動が大きかったことが考えられる。このように、気象変化による物理的な攪乱は、猪鼻湖のような小規模の水域の水質、なかでも密度構造と密接な関係のある貧酸素水塊の形成に大きな影響を及ぼすことが予想される。

本論文は、猪鼻湖における水質の定期観測結果および自動昇降装置を用いた水質の鉛直分布の連続観測結果をもとに、貧酸素水塊の消長と気象擾乱の関係を論じたものである。特に、短期間に降雨と強風が同時に作用する台風による擾乱をとりあげ、湖水の密度構造の変化、およびそれに伴う貧酸素水塊の挙動に着目して気象擾乱の影響を論じている。このような短期間の DO の変動特性に対する検討は、中村ら(1999)が宍道湖で行った例があるが、他にあまり実測データがない。貧酸素水塊は短時間のうちに生物に悪影響を及ぼすことから、水塊の挙動と気象擾乱の関係を明らかにすることは重要であろう。

## 2. 水質観測の概要と気象条件

水質観測は、1999 年 6 月以降夏期を中心に 10 日～2 週間に 1 度のペースで継続的に行っている。水質調査地点は猪鼻湖南東部の最深部付近で、観測点の水深は潮汐(大潮時の最大偏差で 60-70 cm 程度)の影響によって変化するが、平均的に 6.5 m 程度である。観測項目は、水温(T)、塩分(S)、クロロフィル-a 濃度(Chl-a)および溶存酸素飽和度(DO)で、毎回これらを水面から鉛直下方に 50 cm おきに水底まで測定している。また、水質観測点に設置してある浮体式のエアレーション装置(青木ら, 2001)を利用して、自動昇降装置を用いた水温、塩分、DO の鉛直分布の短期間の連続観測を不定期に行っている。自動昇降式の水質計(アイオーテック)は、水圧センサーにより水面下の鉛直位置を検出して水中で停止し、その点の水質(T, S, DO)をメモリーに記録するタイプで、鉛直方向に水面下-1 m から 1 m おきに水底付近(-6 m)まで、30 分間隔で上下に移動して測定する。すなわち、3 時間毎に鉛直分布が得られるようになった。

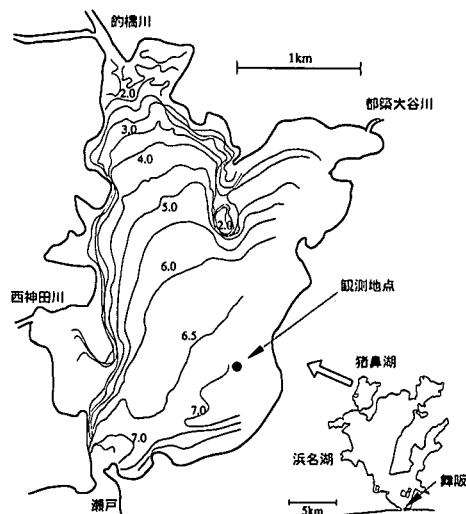


図-1 猪鼻湖と水質観測地点

\* 正会員 工博 豊橋技術科学大学助教授 建設工学系  
\*\* 豊橋技術科学大学大学院建設工学課程  
\*\*\* 岡本機械設計表

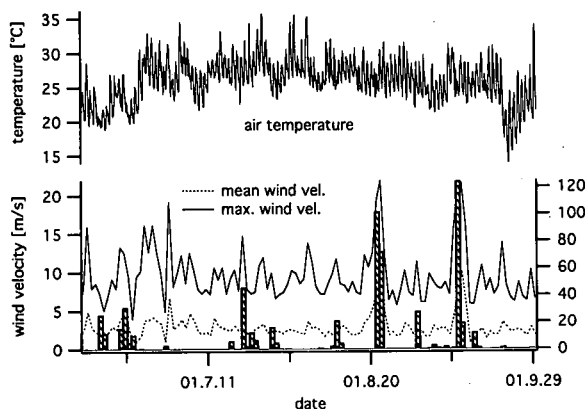


図-2 2001年夏期の気象条件(気温, 風速, 降水量)

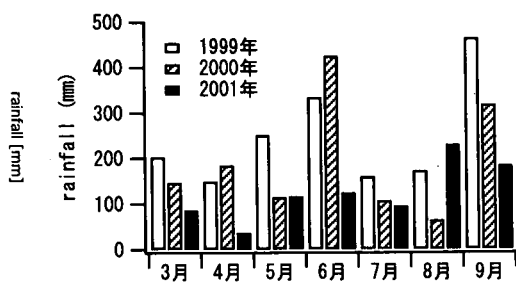


図-3 3年間の総降水量の比較

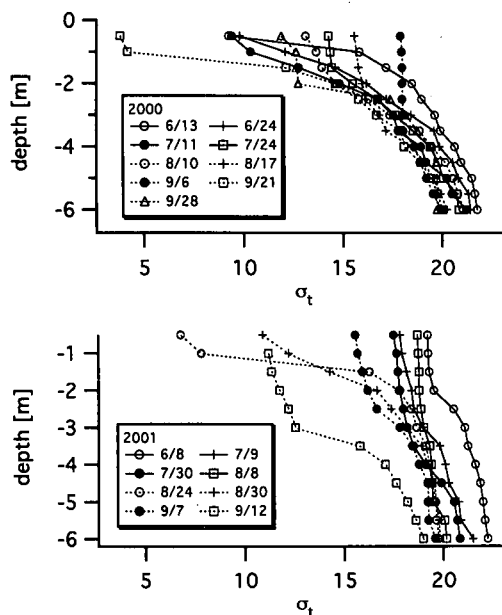
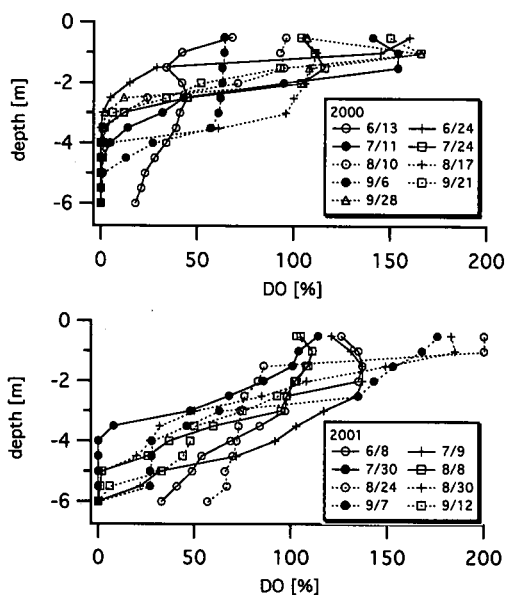
図-4 湖水密度( $\sigma_t$ )の鉛直分布の比較

図-5 DO(%)の鉛直分布の比較

ている。この自動昇降装置による観測は、2000年5月、7月、2001年6月、7月、9月に行っているが、強風による浮体の動揺や酸素計(蛍光式)への生物付着等の影響で、観測期間は長くて2週間程度に限定された。また、2001年8月には水面下約4mの地点に同一の酸素計を固定して約2週間DOの連続観測を行った。

以下では、主として2001年夏期に観測した水質データを中心に議論を進めるので、ここではまず、対象期間の気象条件についてまとめておく。図-2は、2001年6月～9月の気温、風速、降水量の観測値を示したものである。このうち、気温と風速については、湖上(水質観測地点にあるエアレーション装置上)で連続観測したものであり、気温については1時間ごとの観測値を、風速につい

ては、日最大および日平均風速を示してある。また降水量は、猪鼻湖の北西3kmに位置する静岡県柑橘試験場西遠分場で観測された日降水量である。図より、2001年は6月および7月の降水量が少なく、空梅雨であったことがわかる。また、8月21日-22日および9月9日-11日の2回、比較的大きな台風が接近し、100mmを越す降水量と20m/s以上の風速が記録されている。

### 3. 夏期の貧酸素化に及ぼす降水量の影響

ここではまず、2000年と2001年の水質観測結果を比較することにより、その違いを明らかにする。図-3は、3月から9月までの月総降水量を、1999年-2001年の3年間について比較したものである。2001年は夏期に雨が

少なかっただけでなく、3月および4月も少雨であったことがわかる。春から夏にかけての、この極端に少ない降水量は2001年の最も特徴的なものであり、風や日照時間についても3年間の比較を行ったが、各年で降水量ほど顕著な差は見られなかった。

図-4は、6月～9月期に行った水質観測で得られた水温と塩分濃度から求めた湖水密度( $\sigma_t$ )の鉛直分布を2000年と2001年で比較したものである。これより、2001年は6月から8月に入っても表層の湖水密度が非常に高い状態が続いており、夏期に顕著な密度成層が形成されていなかったことがわかる。猪鼻湖の湖水密度はほとんど塩分濃度によって決定されるため、2001年は少雨の影響で淡水流入量が少なかったことが弱い密度成層となった最も大きな原因であると考えられる。事実8月下旬の観測では、台風によってもたらされた降雨の影響で表層の密度が大きく低下していることがわかる。

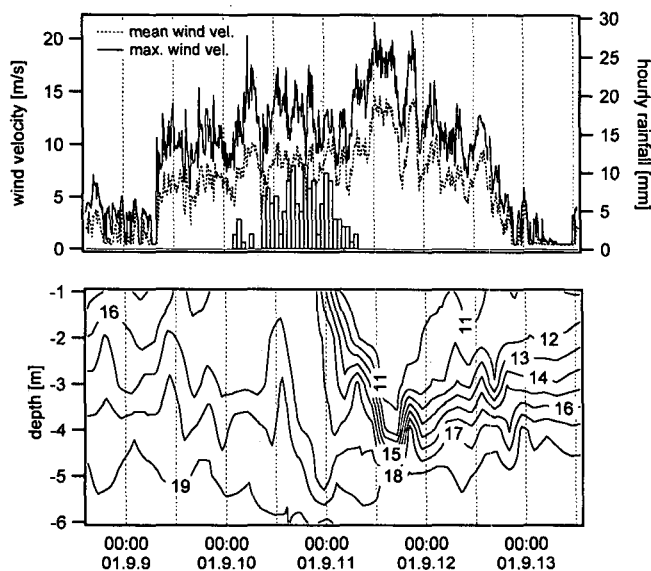


図-6 台風時の湖水密度( $\sigma_t$ )の変化

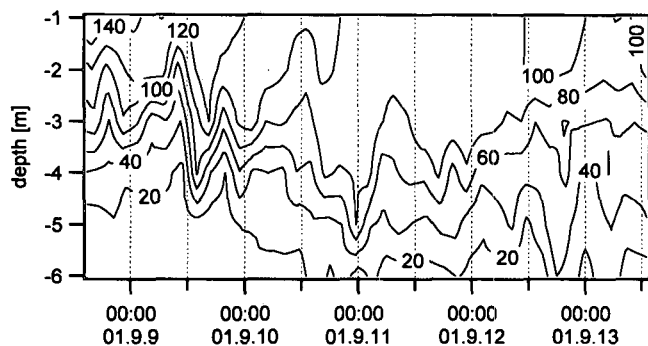


図-7 台風時のDO(%)の変化

図-5は、図-4と同様にDOについて鉛直分布を比較したものである。2000年夏期には-4m以深ではほとんど無酸素状態となっているのに対して、2001年には水底近傍でも酸素濃度が高く保たれていることがわかる。これは、弱い密度成層のために小さな擾乱でも水塊が鉛直混合しやすい状態にあり、表層の酸素が底層に供給されやすくなっていたためであると考えられる。

#### 4. 台風による擾乱に伴う密度構造の変化と貧酸素水塊の挙動

##### (1) 密度構造の変化

図-6は、2001年9月8日から9月13日の約5日間に記録された風速(10分ごとの最大値と平均値)と降水量(時間降水量)の時系列を上段に、その期間の湖水密度の変化をイソプロットとして下段に示したものである。期間中9月10日から11日にかけて、台風0115号が遠州灘

を通過して神奈川県に上陸しており、猪鼻湖上でも9月9日の午前中から風が強まり、3日間ほど風の強い日が続いた。雨は9月10日の午前中から降り始め、1日で降り止んでいるが、台風による総雨量は150mmにも及んでいる。この台風による気象擾乱によって、湖水密度の鉛直構造が短期間のうちに大きく変化していることがわかる。すなわち、風速が大きくなり始めた時間とほぼ一致してゆっくりと密度成層が崩れはじめ、鉛直混合が助長される。ところが、多量の降雨のあと半日程度の時間遅れを伴って雨水が湖内に流入してくることにより、表層の密度が急激に低下する。この密度低下は強風も手伝って一時的に-4m付近まで達するが、風速の低下とともに、台風来襲前よりもより明確な密度成層が再形成されていく様子がうかがえる。以上のように、台風による風と降雨によって、湖水密度の鉛直構造は、強風による鉛直混合の促進→多量の雨水流入による表層密度の急激な低下→より強い密度成層の再形成といった過程をたどることがわかる。

##### (2) 貧酸素水塊の挙動

図-7は、図-6と同時期のDOの変化を湖水密度と同様にイソプロットとして表したものである。台風接近時には、強風による湖水の鉛直混合により、湖水密度の変化と対応して底層の貧酸素水塊が

消滅していく様子がよく現れている。降雨後は表層の密度変化は大きいものの、底層のDOは比較的安定しており、2日間程度では濃度に急激な変化は生じていない。

底層の貧酸素水塊の挙動をもう少し時間スパンを長くして見るために、8月24日～9月8日まで水面下約4mの位置に酸素計を固定して行ったDOの観測結果を、図-7で示した自動昇降式のデータと合わせて用いることにより、台風の擾乱が顕著に見られる3週間程度の期間のDOの変動特性を調べた。図-8は、8月20日から9月15日の間の風速（最大風速）と降水量および、-4m地点でのDOの経時変化を示したものである。前述した9月10日前後の台風より20日程前の、8月21日から22日にかけても大型の台風が愛知県から静岡県に上陸しており、総降水量は175mmと9月のものよりも多くの降雨をもたらしている。また風速についても9月のものと同程度であった。

まず対象期間の密度構造の変化をみるために、図-4に示した定期観測による結果から当該期間に行われた4回の観測データを図-9の上段に再掲した。8月の台風通過2日後の8/24の密度分布をみると、台風による大量の降雨のために表層の密度が著しく低下していることがわかる。その後、8/30、9/7と表層密度は上昇しているものの、水深3m以深の密度構造は安定している。台風通過後の期間は風も穏やかであり、湖内は成層した状態で安定を保っていたと考えられる。その後、9月の台風が来襲し、図-6に示したような密度構造の変化が生じ、9月12日には中下層でも密度低下が生じている。

一方、DOの変化をまず図-9下段の鉛直分布（図-5から再掲）で見ると、8月の台風通過直後の8/24には底層のDOは高い状態にあるが、8/30には底層でDOが大きく減少しておりこの間に急激な酸素消費があったことがわかる。図-8の上段の図は-4m地点でのDOの変化を示したものであるが、8月の台風通過後の密度構造の安定期に一定の割合でDOが減少していく様子ははっきり現れている。酸素は9月2日頃には完全に消費されており、おそらく-4m以深は無酸素状態になっていたものと思われる。その後、9月の台風の接近とともに、図-7に示したようにDOが底層で回復し、台風通過後の密度構造の安定化とともに、再び酸素が消費されていくといった過程が繰り返されるものと予想される。なお図-8のDOの図で、9月8日以降のDOの変動が大きいのは、自動昇降式のDO計の値を採用しているためである。前述したように、自動昇降式では水面下の距離が一定になるようにコントロールしているため、水底から

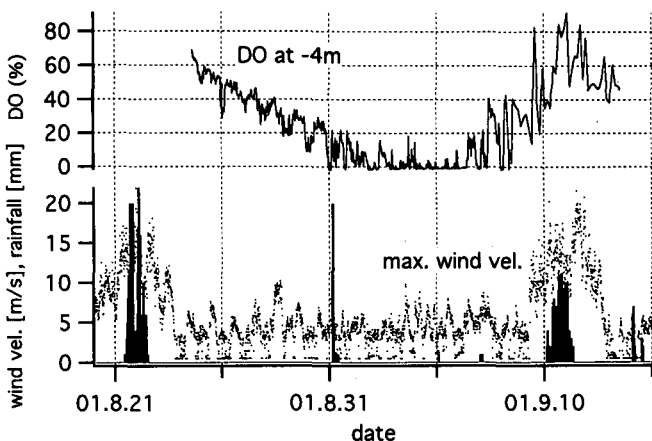


図-8 台風時期の風雨と-4m地点のDOの変化

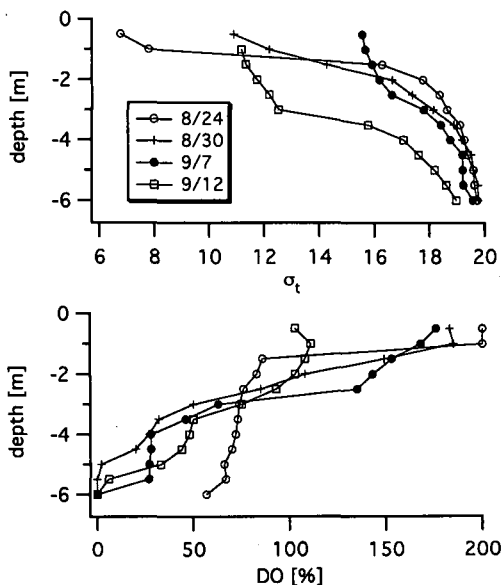


図-9 台風時期の湖水密度とDOの鉛直分布

の距離は潮位偏差分だけ変化することになる。

最後に、8月24日から9月1日まで単調にDOが減少している期間について、酸素消費速度を概算してみた。仮に酸素は-4m以深のみで消費され上層からの供給もないとすると、酸素消費速度は約0.5 mg/l/dayとなる。さらに-4m以深では酸素消費が一様であると仮定すると、単位面積あたりの酸素消費速度は1.25 g/m<sup>2</sup>/dayとなる。これは、著者ら（青木ら、2001）が2000年5月の貧酸素水塊形成期の観測結果から求めた値（1.13 g/m<sup>2</sup>/day）に近い値であった。ただし、今回は-4m地点の酸素消費速度のみから推算したこと、および底層水の水温は5月より8月の方が4～5℃高いことを考えれば、実際にはもう少し大きな値であった可能性はある。また、条

件は違うものの、この値は、中村ら (1999) が宍道湖における観測結果から求めた値 ( $1.3 \text{ g/m}^2/\text{day}$ ) や、越智・岡市 (1984) が瀬戸内海での観測から求めた値 ( $1.1 \text{ g/m}^2/\text{day}$ ) とも近い値であった。

## 5. あとがき

本研究では、猪鼻湖における3年間の定期水質観測結果、および自動昇降式水質計を用いた短期間の連続観測結果をもとに、気象変動と湖内の密度構造および貧酸素水塊の挙動について考察した。その結果、台風のような大きな気象擾乱下では、急激な鉛直混合と底層での速い酸素消費により貧酸素水塊がダイナミックに変動していることがわかった。得られた主な知見をまとめると以下の通りである。

(1) 夏期の貧酸素水塊の形成は、春から夏にかけての降水量に大きく影響される。降水量が小さい場合は、密度成層が弱く鉛直混合が維持されるため、底層での貧酸素化の進行が弱められる。

(2) 強風と多量の降雨を伴う台風による擾乱により、強風による密度構造の破壊→雨水の流入による表層の密度低下→強い密度成層の再形成という変化が生じる。

(3) 上記の密度構造の変化に伴い、底層では始め酸素が供給され貧酸素水塊が解消されるが、新たな密度成層のもとで安定した状態が続けば、速やかに酸素が消費さ

れ、数週間で無酸素状態に変化しうる。

(4) 台風通過後の安定した密度構造下での酸素消費速度は、猪鼻湖では  $1.25 \text{ g/m}^2/\text{day}$  程度であり、初夏の貧酸素水塊形成時と大きな違いはなく、他の水域と比べても同程度の値であった。

本研究を行うにあたり、井戸輝彦氏 (アイオーテック) および柴沼成一郎氏 (シーベック) には水質および気象観測で大変お世話になった。現地作業では豊橋技術科学大学海岸工学研究室の多くの学生諸君の助けを得た。また、静岡県柑橘試験場西遠分場には貴重な気象観測資料を提供していただいた。さらに、本研究は(財)鉄鋼業環境保全技術開発基金の助成を得て行ったものである。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 青木伸一・福本直樹・岡本光雄 (2001): 猪鼻湖における底層貧酸素水のエアレーション効果の検討, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 1066-1070.
- 越智 正・岡市友利 (1984): 燧灘の海洋環境の化学的特性と酸素消費, 燧灘の海洋構造と貧酸素水塊の生成機構に関する研究, 「環境科学」研究報告集, B210-R01-3, pp. 49-62.
- 静岡県環境部浜名湖保全室 (2000): 浜名湖富栄養化防止対策調査報告書.
- 中村由行・井上徹教・足立義彦・石飛 裕・嘉藤健二・山室真澄 (1999): 汽水湖沼における底層水質の急変現象と溶出の非定常過程, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 1031-1035.