

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

青木 伸一*・福本 直樹**・岡本 光雄***

1. ま え が き

閉鎖性の強い内湾や汽水湖では、慢性的な富栄養化とそれに伴う底層水の貧酸素化により、夏から秋にかけて水質が著しく悪化することが知られている（例えば、石田・原, 1996；鈴木ら, 1998）。図-1 に示すように、浜名湖の湖奥（湖口から北西へ約 12 km）に位置し、浜名湖と狭水路（最小幅 75 m, 最大水深約 17 m）でつながっている猪鼻湖（面積 5.4 km²）においても、夏期の底層水の急激な貧酸素化が大きな水質問題となっており、浜名湖全体の水質に影響を与えているともいわれている。静岡県（2000）では、湖内の水質改善策として、底泥の処理を中心に検討しているが、底層の貧酸素水を直接エアレーションする方法も 1 つの有効な水質改善策と考えられる。貧酸素化したダム湖や湖沼および内湾におけるエアレーションについては、これまでに種々の装置や方法が検討され（例えば、マリノフォーラム 21, 1997）、現地で効果を挙げている例も少なくない。エアレーション装置は、水流や気流により密度躍層を破壊し、底層水と酸素の豊富な表層水の混合を促進するタイプのものと、表層水や空気を底層に送り込むことによって直接酸素を供給するものの 2 つのタイプに大まかに分類できよう。静岡県では、1994 年～1997 年にわたり、水中から間欠的に気泡弾を打ち上げて密度躍層を破壊するエアレーション装置（レイクリフター）を猪鼻湖に設置し、水質改善効果を検討したが、顕著な効果を上げるまでには至らなかった（三ヶ日高校科学部, 1996）。これまでの研究例を見ると、一般に塩分成層が顕著な汽水湖や内湾では、夏季の密度成層が安定で、それを破壊するには大規模な装置や多大なエネルギーが必要になることが指摘されている。このように、水質改善に多くの継続的なエネルギーや予算を要する方法は好ましい方法とはいえない。著者らは、気泡を低圧で水面付近に供給することによって底層水を揚水し、同時にエアレーションを行う低エネルギー型の装置を新しく開発し、1998 年秋に猪鼻湖南東

部（図-1 参照）に設置した（写真-1）。その後、装置の揚水能力および曝気能力を調べるとともに、湖内の水質・流動観測を継続的に実施してきた。本研究はこれまでの実測結果をもとに、猪鼻湖における貧酸素水の形成メカニズムについて考察すると同時に、エアレーションによる水質改善効果について、特に貧酸素水の形成過程における効果に着目して論じるものである。

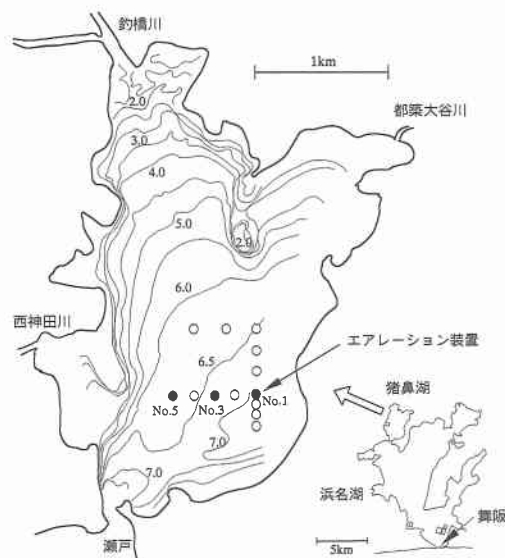


図-1 猪鼻湖



写真-1 猪鼻湖に設置したバブルストリーマー

* 正会員 工博 盛橋技術科学大学助教授 建設工学系
** (株)森組
*** 岡本機械設計代表

2. 湖内の流動および水質

(1) 調査の概要

流動観測については、1999年5月下旬～8月下旬の期間、エアレーション設置位置(図-1のNo.1地点、装置は稼働していない)における上下層(水深2.5mおよび6m)での流速および水圧の連続観測を行った。また瀬戸(水深17m)では、同年6月に水底での水圧と流速を、8月にADCPによる流速の鉛直分布を測定した。さらに、2000年8月および12月には、図-1に示すNo.1, 3, 5の点で投げ込み式流速計を用いて上下層の流速を短時間観測した。また、漂流ブイを用いて湖内の上下層の流れをラグランジュ的に追跡することも数回行った。

水質観測については、1999年6月～2000年12月の1年半にわたって、猪鼻湖内数点において計38回、水温、塩分、DO、クロロフィル濃度を、表層から水底(約6m)まで50cmおきに鉛直分布を測定した。水質の観測点は当初は装置の効果を把握するために図-1に○印で示す13地点で行っていたが、地点ごとの水質の違いがほとんどなかったため、2000年からはエアレーション装置近傍のみを対象とした。また、装置近傍での流動の連続観測と同時期に、水温と塩分の連続観測も行っている。さらに、2000年5月、7月には、水質の短期変動をみるために、エアレーション装置から自動昇降式の水質計(アイオーテック)を降ろし、水質(DO, S, T)の鉛直分布を1mおきに6mまで、30分間隔で連続測定した(3時間で一往復)。これまでのところ、エアレーション装置が連続的に稼働していたのは、1999年8, 9月の日中晴天時のみであり(太陽光発電のみ用いたため)、実質の稼働時間はごく短期間となっている。したがって、上記の水質観測結果には、エアレーションの影響はほとんどないものと考えられる。

なお、潮位データについては、舞阪(浜名湖内)での潮位記録を浜松測候所から、降雨、風、日射量などの気象データについては、静岡県柑橘試験場西遠分場(猪鼻湖の北西1.5km)から、釣橋川の河川水位については静岡県土木部からそれぞれデータを提供していただき、考察に使用した。

(2) 湖内の潮汐と流れ

水圧の連続観測記録をもとに猪鼻湖内の潮汐特性を調べた。また、これを舞阪における潮位記録と比較することにより、振幅低減率および位相差を調べた。その結果、猪鼻湖内の潮位偏差は大潮時で0.6-0.7m程度と比較的大きく、舞阪と比べると潮位振幅は50%～60%に低減し、位相は約3時間遅れていることがわかった。なお、外洋(赤羽根)と舞阪の潮位変動を比較すると、振幅は

10%程度舞阪が小さく、位相差はほとんどないことがわかった。また、エアレーション装置設置位置と瀬戸では、潮位変動はほぼ同一であった。図-2は、猪鼻湖と舞阪の潮汐を、その振幅比と位相差のスペクトルで比較したものである。ただし、いずれもいくつかの時系列から求めた計算値を平均して表示している。12時間～24時間に対応する周波数領域で振幅比が0.5程度になっているが、これより低周波数側および高周波数側の成分は逆に増幅されていることがわかる。

潮汐によって瀬戸を通して出入りする水量は、潮位偏差を大潮時の最大値に相当する0.7mとすると、6時間で概略380万 m^3 程度になる。したがって、瀬戸の狭窄部では平均的に15cm/s程度の流速が必要であり、潮位変動が大きい時期には、瀬戸では潮流が支配的となる。8月のADCPによる観測では、瀬戸でも密度成層は形成されているものの、潮流成分の変動特性は水深方向に大きな変化はなく、全水深で潮流成分が卓越していた。ただし、25時間移動平均した残差流成分を見ると、躍層上(水深0-3m)で猪鼻湖から流出する向きに、躍層下(水深5-8m)で猪鼻湖に流入する向きに流れる鉛直構造がみられた。この構造は、浜名湖との物質交換を議論する上で重要であろう(藤村・松田, 1983)。猪鼻湖内の流動については、上層では潮流成分および残差流成分ともに数cm/sで、両者が同程度の大きさで存在していた。7月の

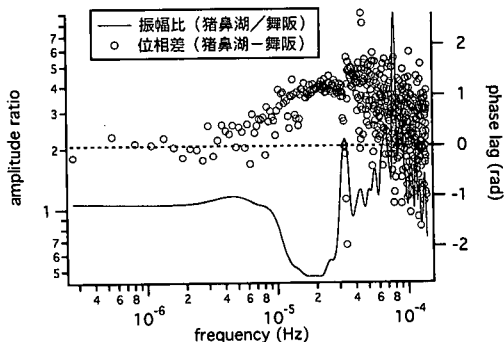


図-2 猪鼻湖と舞阪の潮汐の比較

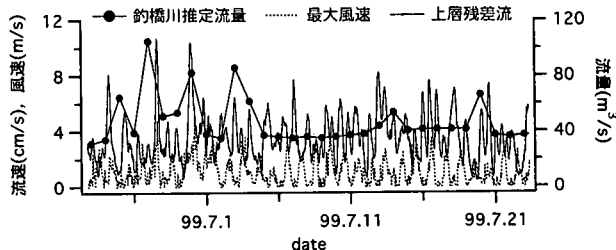


図-3 湖内上層での残差流と流量、風速との比較

観測では、瀬戸と同様に上層で南向きの恒流が観測された。以上のように湖内では、特に上層で残差流成分が相対的に大きく、密度構造が流れに強く影響していることがわかった。残差流成分の原因としては、河川からの淡水流入とそれに伴う密度流、風による吹送流などが考えられる。図-3は、装置設置地点(図-1のNo.1)での上層(2.5 m)の残差流成分の絶対値の変動を、風速および釣橋川からの流量(H-Q曲線で水位から換算したもの)と比較して示したものである。残差流成分はいずれとも明確な対応関係はみられず、湖内の表層での残差流的流れは、淡水流入と風および地形の影響を受けながら、複雑な流れとなっていることがわかる。潮流成分についても、湖内の平面的な流動特性は複雑で、図-1のNo.1, 3, 5の測点での流向・流速のスポット観測および装置近傍から流した漂流ブイの追跡結果からわかった特徴的な点として、水深の深い南東部では、下げ潮時に湖岸沿いに回り込むような流れが強く、上げ潮時と流路を異にしている様子が観測された。このことは、エアレーション装置の影響範囲を考える上で重要であろう。

(3) 水質の季節変化

図-4は、装置設置地点(No.1)での湖水密度の季節変化を、日降雨量とともに示したものである。図中には、水深1 m~6 mにおける密度変化が示してある。これより、夏季には表層3 m付近まで湖水密度は大きく低下し、密度成層が顕著になる。成層は5月から形成されはじめ、10月頃まで続くが、その大きさは降雨量に大きく影響されており、淡水流入による塩分低下の影響が大きいことがわかる。冬季には、塩分は表層でも30 psuを越えて安定し、湖水密度の鉛直構造は消滅する。この密度成層の消滅のきっかけとなるのは秋の強風である。

図-5は、図-4と同時期のDOの変化を、縦軸に水深をとってイソプロット(等濃度線)として描いたものである。夏季には水深3.5 m以深ではほとんど無酸素の水塊が形成されており、冬季には全水深で酸素が豊富に存在する。この変化は密度成層の形成とよく対応していることがわかる。

(4) 貧酸素水塊形成時のDOの変化と酸素消費速度

図-6は、自動昇降式の連続観測結果をもとに、貧酸素水塊の形成時期のうちの一週間(2000年5月17日~23日)におけるDOの変化をプロットしたものである。この時期は密度成層の形成初期に当たるが、同時に記録した水温と塩分から求めた湖水密度の鉛直分布みると、この

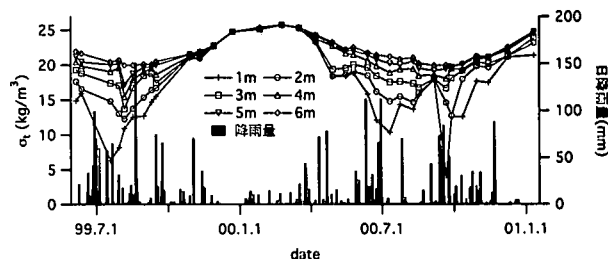


図-4 湖水密度の季節変化と降雨量

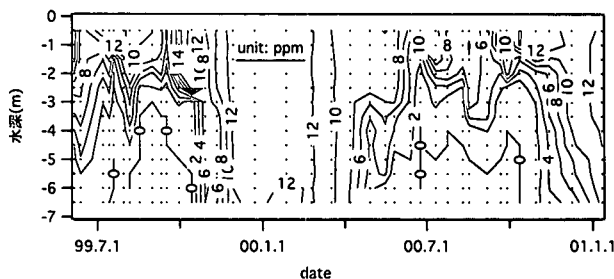


図-5 DOの季節変化

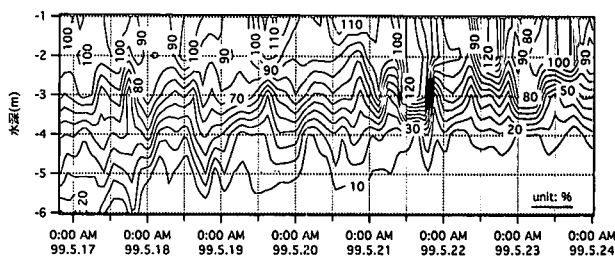


図-6 貧酸素水塊形成過程におけるDOの短期変動

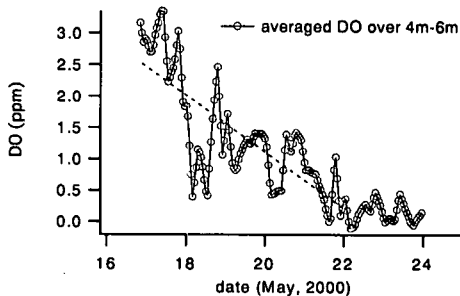


図-7 底層の平均DOの変化と酸素消費速度

期間は降雨が少なく、密度成層は安定していた。図より、この一週間に底層で貧酸素化が急激に進み、水底から4 mまで濃度10%以下の水塊がひろがっていく様子が明確にとらえられている。表層では植物プランクトンの光合成の影響で午後酸素濃度が上昇し、下方に拡散している様子がうかがえるが、その影響は4 m以深にはあまり

伝わらず、貧酸素化が進行している。図-7は、水深4m～6mで平均したDOの時間変化を示したものであるが、これを直線回帰(図中の直線)すると、およそ0.45 ppm/dayとなる。仮に-4m以浅の上層からの酸素供給がないものと仮定すると、単位面積あたりの酸素消費速度は、およそ47 mg/m²/hr (1.13 g/m²/day)となる。これは瀬戸内海で観測された値(1.1 g/m²/day)と近い値になっている(越智・岡市, 1984)。一方、静岡県環境部(2000)が猪鼻湖湖央の底泥を1999年8月にサンプリングして行った酸素消費速度の実験では、酸素消費速度は底泥直上の酸素濃度に影響されるが、直上水の濃度が1.5 ppmの場合にはおよそ40 mg/m²/hr (0.96 g/m²/day)程度であることが示されている。これより、貧酸素水塊の形成過程においては、底泥の酸素消費が大きく寄与しているものと考えられる。

3. エアレーション装置とその効果

(1) 装置の概要

本研究で新しく開発したエアレーション装置の構造を図-8に示す。本装置は、水面直下に沈めた曝気槽内に空気を送り込むことにより、曝気槽から水底に延びたダクトを通して底層水を揚水するとともに、揚水した水を曝気して表層に放出する仕組みになっている。曝気槽は、長さ4m、幅1mで、空気は槽内に設置した内径4.2cm、長さ50cmの1664本のパイプ下部から送り込まれる。送り込まれた空気によってパイプ内に上昇する水流が生じ、これによって底層水が揚水される。表層に気泡を送入するため、消費エネルギーが小さいのが特徴であり、運転時の消費電力は2.2 kW程度であり、このときの空気流量はおよそ4.5 m³/min (6,500 m³/day)である。曝気槽、ブローアおよびソーラーパネル等は鋼製の浮体上に設置されており、浮体はロープで海底のシンカーに係留されている(写真-1)。

(2) 揚水能力

本装置の揚水能力について、計3回の現地実験を行っ

た。図-9に実験当日の湖水密度の鉛直分布を示すが、計測日ごとに分布の状況が異なっている。揚水量は、曝気槽の吐き出し口での流速を測定することにより概略値を計算した。図-10は、3回の測定における揚水量をプロットしたものである。横軸には、測定日の表層と底層の密度差をとっているが、密度差が大きくなるほど揚水量が減少していることがわかる。最も密度差の小さな11月には40,000 m³/day程度の揚水が可能であったが、密度差の大きな8月には10,000 m³/dayにまで減少した。これは、本装置が気泡の送入によってパイプ内に生じる水頭差を駆動力としているため、密度差が大きいほど水底の重い水を吸い上げにくくなるためである。細いパイプの中に空気を送入して揚水する方法は気泡ポンプとして知られており(日本機械学会, 1989)、理論的な検討も行われている。今回の理論に密度差の影響を考慮し、エネルギー損失係数を適当に変化させて計算した結果(福本, 2001)を図中に破線で示している。ほぼ実測結果と対応しており、揚水量の変化が密度差によるものであることが確認できた。

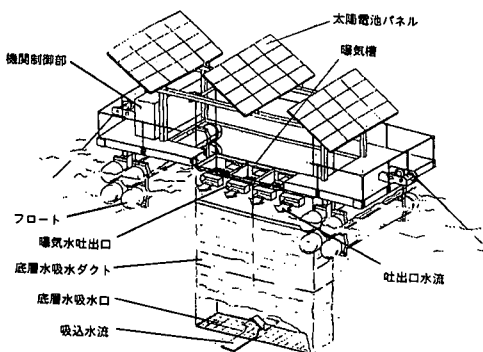


図-8 底層水揚水型エアレーション装置の構造

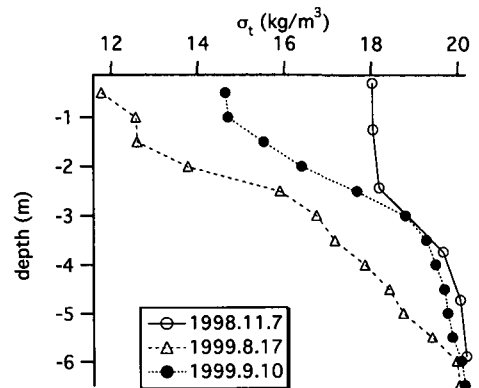


図-9 揚水量測定時の湖水密度の鉛直分布

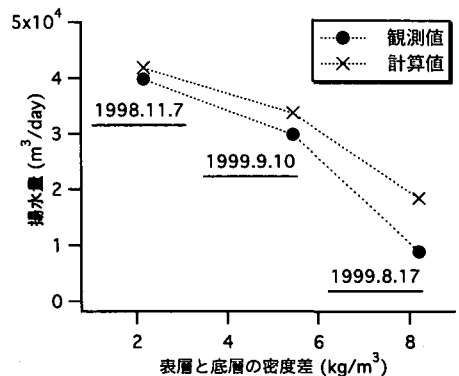


図-10 密度差による揚水量の変化

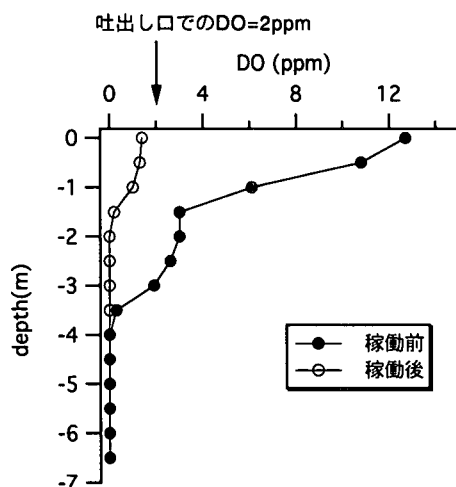


図-11 装置稼働前後の DO の鉛直分布

(3) エアレーション能力

底層水がエアレーション装置によってどの程度曝気されるかについて、1999年9月16日に調査を行った。まず、装置の運転前と稼働中に DO メーターを曝気層のすき間（センサーに気泡には当たらない）から降ろしてダクト内の DO の変化を調べた。図-11 は、装置稼働前後のダクト内の DO の鉛直分布である。稼働前はダクト外と同じ状況で、表層で DO が非常に高く、水深 3.5 m 以深ではほとんど無酸素状態となっていたが、稼働後は底層水が上昇し、硫化水素臭とともにダクト内上部まで貧酸素水が充満した。この時、ダクト内の表層での DO は 1.4 ppm にまで減少した。これより、確かに無酸素の底層水が揚水され、曝気槽内で酸素を供給されていることが確認できた。また、曝気槽の吐し口で DO を測定したところ、2 ppm まで上昇しており、本装置により、無酸素状態の底層水に 2 ppm 程度の酸素供給能力があることがわかった。

(4) 水質改善の可能性

最後に、以上の結果をもとに、本装置を用いたエアレーションによる猪鼻湖の水質改善効果について検討する。猪鼻湖の水質は、今回の観測によれば 5 月末から 6 月の密度成層形成期に底層での酸素消費が進み、貧酸素水塊が形成されて安定する。また、強い密度成層ができた後では、揚水能力を十分発揮させることが難しくなる。これらの点を考慮すると、できるだけ貧酸素水塊の形成初期に装置を稼働させ、その形成を遅らせて水底が好気的な状態を保つのが効果的であると思われる。今、装置の揚水能力を 30,000 m³/day、曝気能力を 2 ppm と仮定すると、単位時間あたりの酸素供給量は、2.5 kg/hr となる。貧酸素水塊形成時の酸素要求量を 47 mg/m³/hr とし

て、エアレーション装置で好気の状態を維持することのできる水域面積を計算すると、約 53000 m²/台となる。

4. あとがき

本研究では、猪鼻湖の流れや水質の動態を調べるとともに、新しく開発した装置を用いて底層貧酸素水のエアレーションの現地実験を行った。現在のところ装置の実働時間が短く、装置の運転に伴う周囲水の水質変化からその効果を議論できるまでには至っておらず、本論文では湖内の水質の変動特性と装置単体の揚水・曝気能力からその効果を類推するにとどまっている。今後は、さらに動力を補助的に用いて昼夜連続運転を実施し、さらに水質改善効果について検討を進める予定である。また、装置の揚水能力についても、密度差が大きい場合にも機能が低下しない方法を現在検討中である。

最後に、本研究を行うにあたり、現地作業を厭わず協力してくれた、太田陽子君、造田修君をはじめとする豊橋技術科学大学の多くの学生諸君に感謝いたします。また、多大なご援助をいただいた山本茂雄氏（アジアの干潟と浅瀬を守る会）、大谷真弓氏（元三ヶ日高校）、井戸輝彦氏（アイオーテック）に謝意を表します。また、貴重な資料を提供していただいた静岡県柑橘試験場西遊分場、環境部、土木部の方々に感謝致します。さらに、本研究は静岡県地域活性化創造技術研究開発補助金、(財) 東海産業技術振興財団および (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り、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 石田基雄・原 保 (1996): 伊勢・三河湾における水質変動と富栄養化について、愛知県水産試験場研究報告, 第 3 号, pp. 29-41.
- 越智 正・岡市友利 (1984): 燐の海洋環境の化学的特性と酸素消費、燐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。
- 鈴木輝明・青山裕晃・甲斐正信・今尾和正 (1998): 底層の貧酸素化が内湾浅海底生生物群集の変化に及ぼす影響、海の研究, Vol. 7, No. 4, pp. 223-236.
- 日本機械学会 (1989): 気液二相流技術ハンドブック, コロナ社, pp. 218-221.
- (社) マリノフォーラム 21 (1997): 平成 8 年度自然エネルギー利用型増殖等高密度化システムの開発に関する報告書, 228 p.
- 三ヶ日高校科学部 (1996): 猪鼻湖浄化対策～レイクリフターと浄化実験～, p. 130.
- 福本直樹 (2001): 潮汐の影響を受ける内陸汽水湖の水質・流動特性とエアレーション装置の水質改善機能について、豊橋技術科学大学修士論文。
- 藤村昌彦・松田義弘 (1983): 浜名湖の海水交換 (II), 東海大学紀要海洋学部, 第 17 号, pp. 1-12.