

曝気形態と貯水池深層水質との関係について

CORRELATION BETWEEN HYPOLIMNIC WATER QUALITY AND OPERATION MANNER OF AERATION SYSTEM

道奥康治¹・神田徹¹・大成博文²・森口昌仁³・松尾昌和⁴・松尾克美⁵
Kohji MICHIOKU, Tohru KANDA, Hirofumi OHNARI, Masahito MORIGUCHI,
Masakazu MATSUO and Katsumi MATSUO,

¹正会員・フェロー 工博 神戸大学教授 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

²正会員 工博 徳山高専教授 土木建築工学科 (〒745-8585 徳山市久米高城 3538)

³正会員 兵庫県県土整備部 (〒650-0011 神戸市中央区下山手通 5-10-1)

⁵学生員 神戸大学大学院自然科学研究科前期課程 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

⁵正会員 中電技術コンサルタント環境調査部 (〒734-8510 広島市南区出汐2-3-30)

An in-situ experiment on hypolimnic aeration has been carried out in a eutrophic reservoir. Micro air bubbles were discharged into the anaerobic hypolimnion to supply oxygen and improve water quality. The system has been in operation since March in 1999. The aerator unit was so designed that the hypolimnic water is aerated without disturbing thermal stratification. At the beginning of the experiment, however, because of unsuitable design of nozzle structure, the aerator generated unexpectedly large bubbles and promoted vertical mixing. Although the hypolimnic water was aerated due to aerobic water entrained from the epilimnion, this was not the hypolimnic water aeration what we expected. The aerator structure was then modified to prevent macro-bubble generation and the hypolimnic water was successfully aerated without destratification. After all, in the course of the experiment the reservoir has experienced three different dissolved oxygen regimes, i.e. (1) no aeration, (2) aeration with vertical mixing, (3) aeration with little vertical mixing. The present study is to discuss how the dissolved oxygen affects hypolimnic water quality by comparing the field data from the three different DO regimes. The results provide useful information in designing an aeration system as a countermeasure against hypolimnic water eutrophication.

Key Words : reservoir eutrophication, aeration, water purification, micro-bubbles, hypolimnion

1. はじめに

富栄養化・有機汚濁を軽減するための貯水池内の対策として、様々な曝気循環が試みられてきた^{1,2)}。それらは、(a) 表層循環と(b)深層曝気に大別される。(a)は、藻類の生長を抑制するために、表層混合層を循環させて水温や光の条件を制御する浄化方式である。(b)は、貧酸素化した深層に酸素を供給して有機物の分解を促進するとともに栄養塩・金属類の溶出など嫌気条件下で発生する水質障害を阻止する方策である。この場合、水質の悪い深層水が拡散浮上しないように水温成層を維持することが前提となる。(a)は発生源での有機物生産の抑制対策、(b)は有機物生産によって汚濁が進んだ深層の水質浄化対策である。いずれの方式を採択するかは、貯水池の水質特性、使用目的、運用形式に応じて判断されなければならない。そのために各種の曝気装置に関して、混合効率な

ど性能評価に関する実証的・実験的研究が行われてきた(例えば、文献3) ,4)など)。しかし、その多くは鉛直混合をとまなう間欠揚水塔方式あるいは散気管方式の曝気装置に関するものであった。

本研究で対象とする貯水池では、藻類増殖による表層懸濁化の他に、深層の貧酸素化が顕著であり、底泥からの溶出によって安定な高塩分層が形成されているため全水深スケールの水質循環が阻まれていた。このことから、水温成層を破壊することなく深層を曝気することが必要である。成層を維持しながら深層曝気を達成するシステムはいくつかの貯水池で稼働しているが⁵⁾、いずれも大がかりで管理・運営の費用が少ないとは言えない。以上の背景より、著者らは廉価で高い浄化効率のシステムを開発するために、1999年3月よりマイクロバブル・エアレータを用いて深層曝気の現地実験を行ってきた⁶⁾。本実験によって、対象貯水池の酸素環境は以下のように変遷してきた。

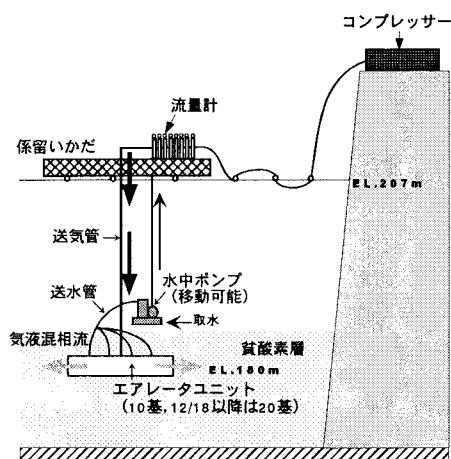


図-1 水質浄化システム

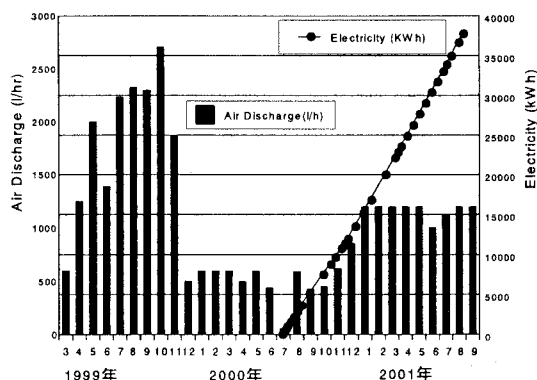


図-2 送気量と電気量の累積値

〔第Ⅰ期〕実験開始前、受熱期において貧酸素層が拡大し、放熱期においても比重の大きな高塩分層が滞留するため貧酸素層が周年にわたり残存していた。

〔第Ⅱ期〕実験開始後の約1年間、ノズル構造の問題によりマクロ・バブルが発生し、鉛直循環が促進された。表層水との混合によって深水層にまで酸素が行き渡り高塩分層が消失した。

〔第Ⅲ期〕ノズルを改造し、現在に至るまで、発生気泡のほとんどがマイクロバブルからなり、鉛直混合を誘起することなく水温成層が安定に維持されたまま深層が曝気された。

このような水温成層と溶存酸素分布の変化に応じて深水層の水質は様々に変遷した。本研究では現地観測に基づいて、酸素環境が水質に及ぼす影響を考察し、有機汚濁を軽減するために必要な曝気循環方式を検討する。

2. 水質浄化実験の概要

図-1のように貯水池の最大水深地点(32m)で深層曝気を実施する。エアレータは常時満水位(EL.207m、これ以深の実質貯水容量は65万 m^3)から27m下方(EL.180m)に設置され、マイクロバブルを発生させる。仮に補償深度を10m(EL.197m)としてそれ以深を曝気対象の分解層とすれば、その容量は約20.4万 m^3 である。

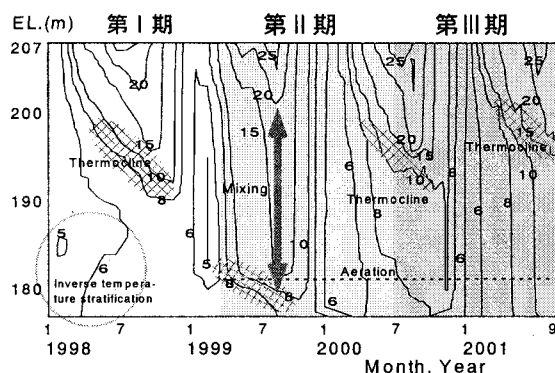


図-3 水温の季節変化

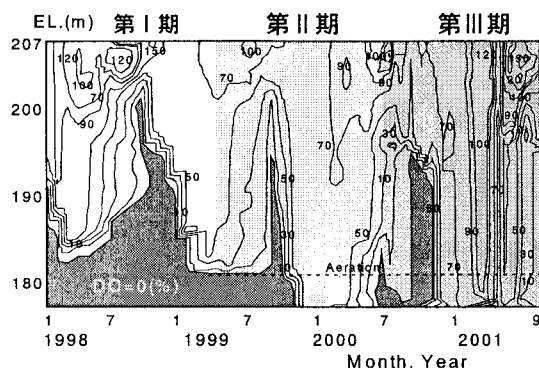


図-4 溶存酸素DOの季節変化

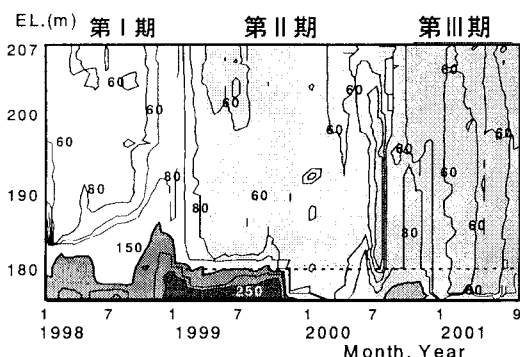


図-5 電気伝導度ECの季節変化

曝気実験は1999年3月より開始した。図-2にはこれまでの総送気量の変遷を示す。開始当初、予想外に大きな気泡が発生して鉛直循環が生じたため、2000年7月にノズルを改良し成層構造を維持したまま深層曝気を可能な構造とした。同時に、システムの稼働効率を計測するために電力計を設置した。積算電力量は図-2に併記されている。最近では総送気量が1200l/hrに設定されている。

3. 酸素環境にともなう水質分布の変化

(1) 水温成層、溶存酸素飽和度DO、電気伝導度EC

図-3,4,5に水温、DO、ECの季節変化を示す。曝気実験開始前の第Ⅰ期においては、放水口が位置する標高195m付近に強い水温躍層が発達しているが、曝気開始後の第Ⅱ期においては鉛直循環によって水温成層が弱まり、底層の逆転水温層が消滅した。第Ⅲ期には再び水温

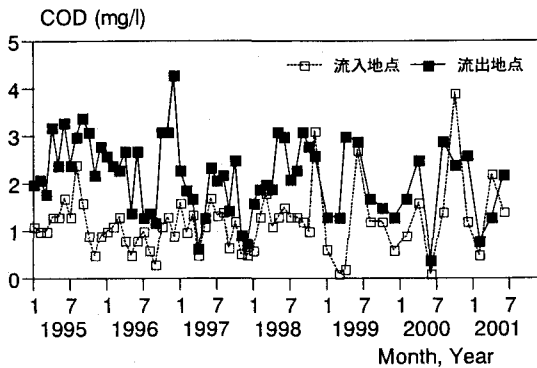


図-6 CODの季節変化（流入・流出）

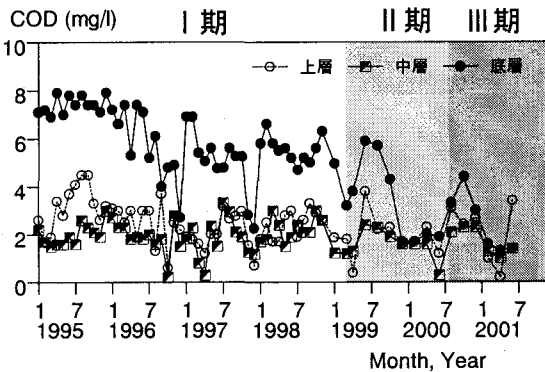


図-7 CODの季節変化（貯水池内）

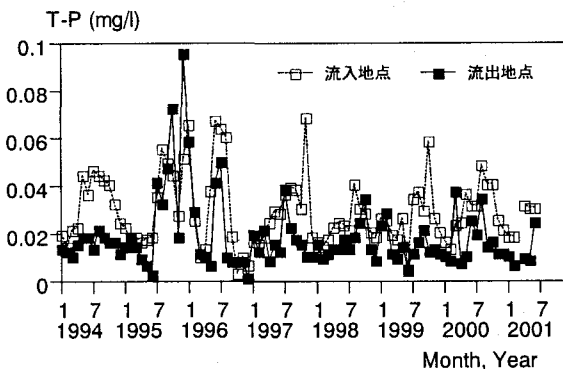


図-8 T-Pの季節変化（流入・流出）

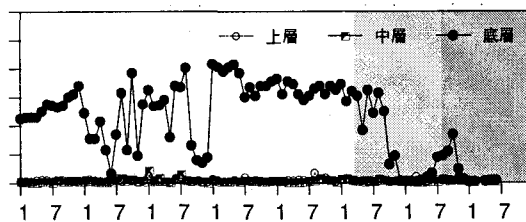


図-9 T-Pの季節変化（貯水池内）

成層が形成されたが、逆転水温層は形成されなかった。

曝気を行わない第Ⅰ期においては、通常9月をピークに無酸素水塊が拡大していたが、第Ⅱ期には貧酸素層はエアレータの設置高さまでに抑制された。これも2000年1月には大循環により消滅している。同年9月以降に再び貧酸素化が進行しているが、これは、内部生産の活発化

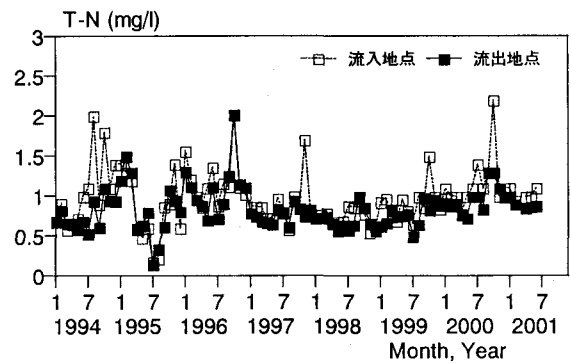


図-10 T-Nの季節変化（流入・流出）

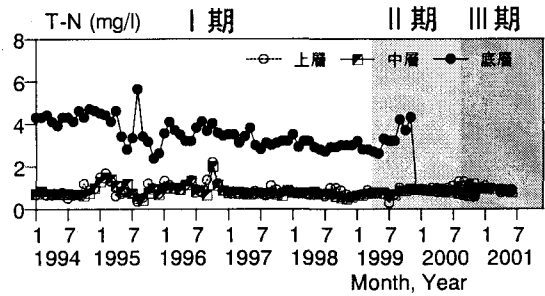


図-11 T-Nの季節変化

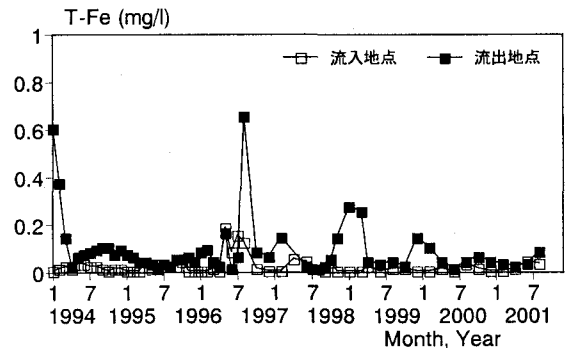


図-12 T-Feの季節変化（流入・流出）

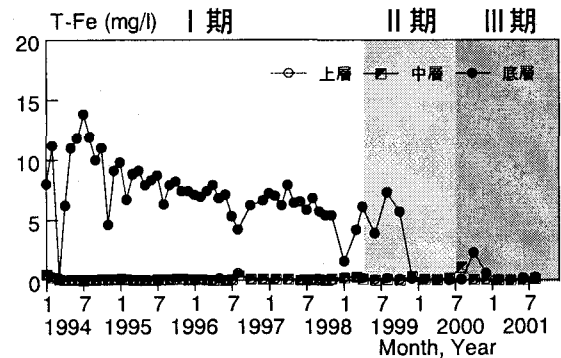


図-13 T-Feの季節変化（貯水池内）

によるばかりではなく、コンプレッサの不調が大きな要因の一つであった。

溶存物質濃度の指標である電気伝導度ECに着目すると、第Ⅰ期に中層から底層にかけて発達していた高塩分層は第Ⅱ期後期に鉛直循環によって消滅した。第Ⅲ期の受熱最盛期において一時的に再生されるが、後期には再び消失した。

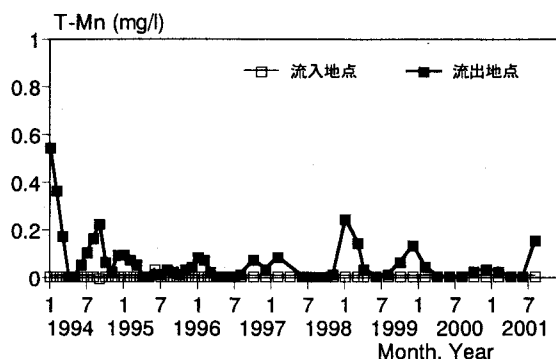


図-14 T-Mnの季節変化（流入・流出）

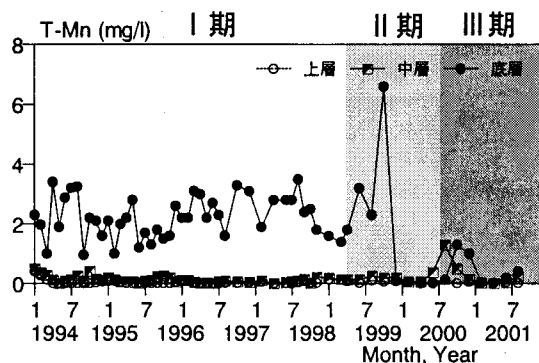


図-15 T-Mnの季節変化（貯水池内）

(2) 有機物, 栄養塩

図-6には河川の流入・流出水, 図-7には貯水池の各層から検出されたCODの時系列を示す。図-6からわかるように, 全観測期間を通して流出水のCODは流入水のそれよりも大きな値を示しており, 貯水池が内部生産による有機物供給のthroughputとして作用していることが確認される。図-7を見ると, 上中層より高いCODを維持していた底層水は, 第Ⅱ期の後半以降, その濃度を減少させ始め, 2000年1月には一様化して上中層と同じ濃度を有するに至った。2000年8月以降, 表層からの有機物降下量とともに増加していた底層のCODは再び循環期に至って減少し, 曝気開始前とは明らかに異なるCOD挙動を示している。

図-8～11には全リン濃度T-P, 全窒素濃度T-Nの時系列を示す。第Ⅰ期の99年3月までは, 底層においてT-N, T-Pともに高い濃度を示すが, CODの場合と同様, 2000年1月の全層循環によって一様化し減少している。2000年9月以降, T-Pにやや増加傾向が見られる。

この時期の河川水温と貯水池成層の状態を考えれば, 河川流入水が底層に到達して栄養塩を供給したとは考えられず, 貧酸素化にともなう底泥からの栄養塩溶出によってT-Pが増加したものと思われる。底層のCOD濃度が増加した時期はこれと一致しており, 栄養塩とともに有機物が溶出していることがわかる。

(3) 金属イオン

図-12,13には全鉄濃度T-Fe, 図-14,15には全マンガン

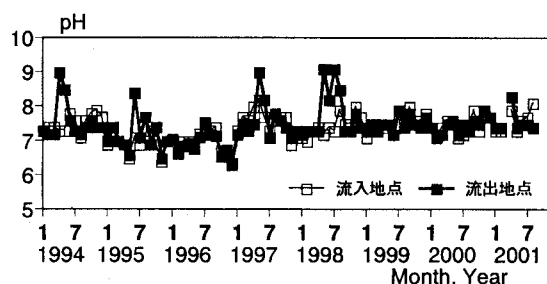


図-16 pHの季節変化

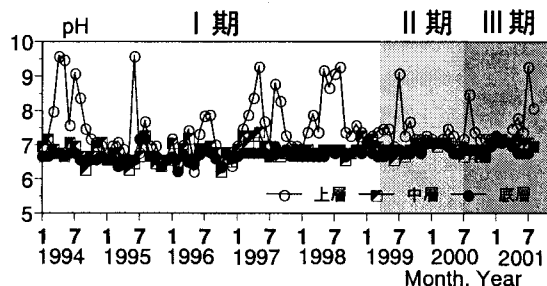


図-17 pHの季節変化

濃度T-Mnの季節変化を示す。曝気開始前（第Ⅰ期）においては, T-Fe, T-Mnともに底質からの溶出が顕著であるが, 底層のT-Feは曝気開始前から漸減傾向にある。第Ⅱ期の曝気実験によって全層が循環し, 底層のT-Fe, T-Mnは上中層と同程度にまで減少した。第Ⅲ期の曝気開始直後の2000年8月に底層のT-Fe, T-Mnが微増しているが, 送気量を増加した2001年の同時期にはそれほど大きな濃度を検出していない。

(4) pH, 透明度

図-16,17にpH, 図-18には透明度の時系列をそれぞれ示す。曝気実験を開始した99年3月以降, 透明度の増加が認められる。第Ⅱ期において, 鉛直循環は生じたものの表層水温の低下はそれほど顕著ではなかった。したがって, 鉛直混合にともなう躍層低下の光制御効果によって藻類発生が抑制された可能性がある。一方, 第Ⅲ期においては, 水温成層が安定に維持されており, 光制御によって透明度が増加したとは考えられない。この期間において高い透明度が検出された原因としては, 深層曝気によって栄養塩溶出が抑制されたことが考えられる。

4. 第Ⅱ期と第Ⅲ期の比較

鉛直混合をとめないながら曝気が行われた期間（第Ⅱ期）と成層を維持しつつ深層曝気が達成された第Ⅲ期について水質特性を比較する。図-19,20,21には, 成層期を中心に第Ⅱ期と第Ⅲ期の曝気状態における水温, DO, ECの鉛直分布を示す。第Ⅱ期では鉛直混合によって酸素を豊富に含む表層水が底層へ供給されているにも関わらず, 9月において無酸素水塊が一時的に形成されている。しかし, 深層曝気が達成された第Ⅲ期においては水

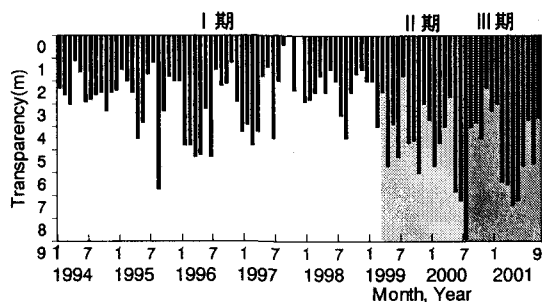


図-18 透明度の季節変化

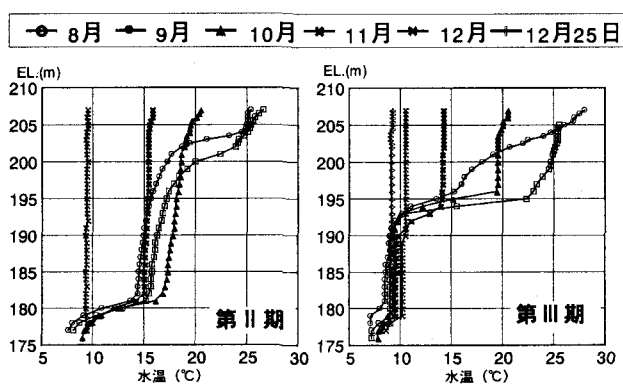


図-19 水温の鉛直分布

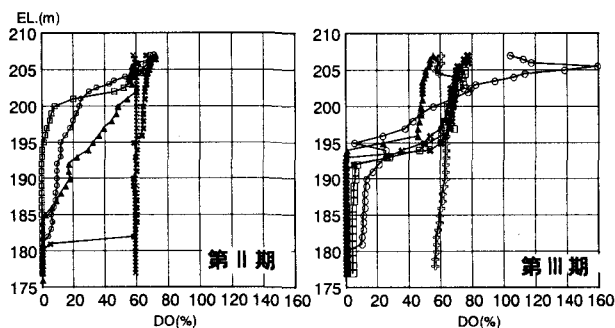


図-20 DOの鉛直分布

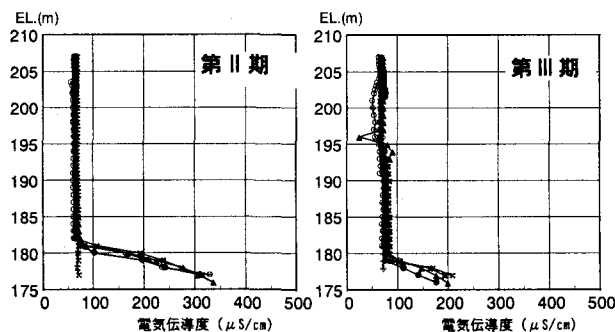


図-21 ECの鉛直分布

温成層が破壊されないまま、酸素消費が大きな2000年8、9月においてさえも無酸素状態は回避された。ECの分布からも、第III期において底泥からの嫌氣的溶出が抑制され、深層水質はかなり改善された。

以上のように、無酸素期間が相当程度短縮されるとともに深層水が浄化されているが、夏から秋にかけての溶存酸素低下をくい止めるまでには至っていない。2000年の酸素消費実績をもとに必要送気量を概算して、2001年

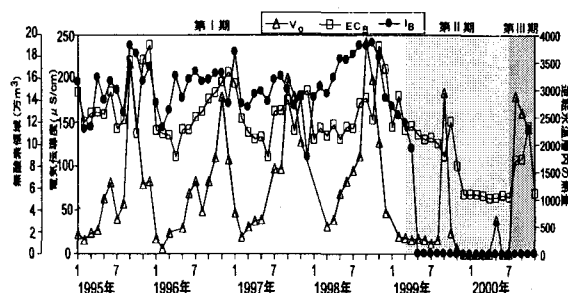


図-22 底層水質の時系列

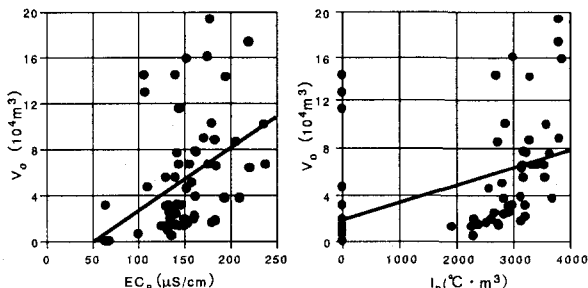


図-23 EC_B と V_0 の相関

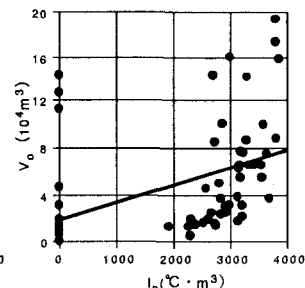


図-24 I_B と V_0 の相関

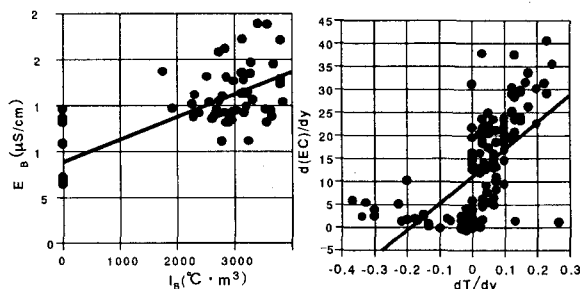


図-25 I_B と EC_B の相関

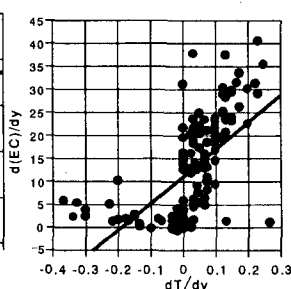


図-26 水温勾配 dT/dY とEC勾配 $d(EC)/dY$ との相関

からは送気量を1200l/hまでに倍増して現在に至るが、酸素供給の増加分だけ有機物分解も促進されるため、秋期に再び酸素の減少が見られる。水質浄化の観点からは、溶存酸素を飽和状態にまで引き上げ維持することが必ずしも求められるわけではないが、施設容量を決定するためにも送気量と溶存酸素濃度の関係を事前に把握することは必要である。現在、CODに基づいて潜在的酸素要求量を概算し必要送気量を推定することを検討している。

5. 溶存酸素変化に対する深層水質の応答特性

(1) 深水層における水質時系列

深水層の水質特性量として、無酸素領域の体積: V_0 、池底の電気伝導度: EC_B 、逆転水温成層内の熱容量: I_B を考える。図-22にこれらの時系列を示す。第I期（曝気開始前）においては、 V_0 と EC_B は毎年同様の季節変化挙動を示している。図-5で見たように、曝気開始後の第II、III期においては、底層からの物質溶出が抑制され、 EC_B は低下する。同様に、曝気によって V_0 は減少し、 I_B は0

に至った。以上のように、酸素環境変化に連動して深層水質が顕著に変化することから、(V_0, EC_B, I_B)には密接な相互関係が介在していることがわかる。

(2) 深層水質の相互相関特性

図-23, 24, 25には第Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ期の時系列から得られる(V_0, EC_B, I_B)間の相関関係を示す。いずれにおいても正の相関が確認される。 EC_B と V_0 との関係からは、無酸素領域が拡大するほど貯水池底からの塩分溶出量が増大し、高塩分層が底層に発達することがわかる。 EC_B と I_B との相関関係は必ずしも明瞭ではないが、少なくとも逆転水温成層の形成が高塩分層の消長と密接に関係していることは明らかである。

水質相互の関連性を見るために曝気開始前の1994年における(V_0, EC_B, I_B)間の時系列から求められた各水質組み合わせの相互相関係数を図-27に示す。横軸は二つの時系列のずらし時間をあらわす。

EC_B と V_0 の相関係数より、無酸素水塊が最大となった約2ヶ月後に底層への塩分集積は最も大きくなることがわかる。そこで、 EC_B の時系列を2ヶ月分だけずらして V_0 の時系列との相関をプロットすると図-28のようである。図-23よりも高い相関が得られており、貧酸素化から2ヶ月遅れて底層の塩分集積が生じていることがわかる。一方、図-27における I_B と EC_B の相関係数からは、両者の季節変化にほとんど時間差がなく、高塩分層の挙動とほぼ同期して逆転水温成層が増減していることがわかる。 I_B と V_0 の相関係数は0.1~0.5の範囲にあり、逆転水温成層の形成と無酸素領域の拡大との間には特に有意な相関が認められない。

6. まとめ

マイクロバブル・エアレータによる曝気実験を通して、酸素環境の変化にともなう深層水質の応答特性を考察した。ノズルの改良によって、水温成層を変形することなく効率的な深層曝気が可能となり、深層水質の改善に対しては鉛直循環をとともなう曝気形式よりも有効であることが実証された。深水層における逆転水温成層、無酸素水塊の大きさ、電気伝導度の時系列に対し相互相関解析を実施した。その結果、無酸素水塊が最も発達した約2ヶ月後に底層の電気伝導度がピークをとり、深水層の高塩分水が最も多く滞留すること、高塩分水と逆転水温成層の貯熱量はほぼ同時に連動して消長することが明らかになった。

謝辞：本研究は平成12, 13年度文部省科学研究費補助金、基盤研究(B)(2)（代表：道奥康治，課題番号: 12555148）の援助のもとに実施された。観測調査にあたり兵庫県県土整備部、兵庫環境創造協会の関係各位にご協力を得た。

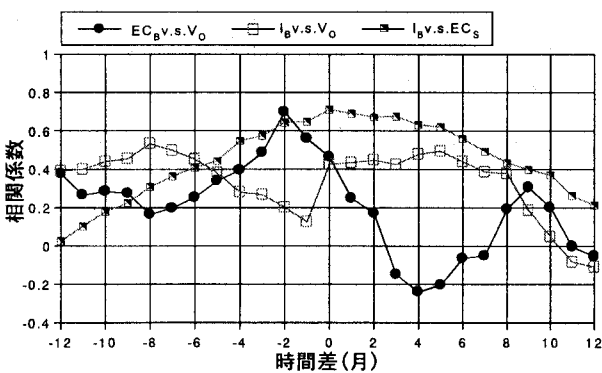


図-27 底層における水質諸量間の相互相関係数

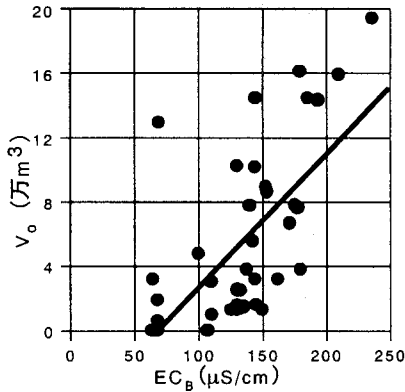


図-28 二ヶ月時間差を補正した場合の EC_B と V_0 の相関

記して謝意を表する。

参考文献

- 1) ダム水源地環境整備センター：曝気循環装置計画集報, WRETC, 1991.
- 2) 土木学会編：水理公式集, 1999.
- 3) (例えば) 松梨史朗・宮永洋一：曝気を考慮した水質予測モデルの実貯水池への適用, 第32回水理講演会論文集, pp.251-256, 1988.
- 4) Asaeda, T. and Imberger, J.: Structure of bubble plumes in linearly stratified environments, *J. Fluid Mech.*, Vo.249, pp.35-57, 1993.
- 5) 森川七生・道奥康治：“一庫ダム貯水池”の深層水エアレーションシステム, 土木学会誌, 第77巻, pp.12-15, 1992.
- 6) 道奥他: マイクロバブルによる富栄養貯水池の水質改善工と浄化効率, 水工学論文集, 第45巻, pp.1201-1206, 2001.

(2001. 10. 1受付)