

マイクロバブル・エアレータによる 貯水池の水質浄化実験

A PRELIMINARY EXPERIMENT ON RESERVOIR WATER PURIFICATION BY USING A MICRO-BUBBLE AERATION SYSTEM

道奥康治¹・神田徹²・大成博文³・西川孝晴⁴・松尾克美⁵・木戸崇博⁶
Kohji MICHIOKU, Tohru KANDA, Hirofumi OHNARI, Takaharu NISHIKAWA,
Katsumi MATSUO and Takahiro KIDO

¹正会員 工博 神戸大学助教授 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 神戸大学教授 工学部建設学科 (同上)

³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)

⁴正会員 兵庫県土木部河川開発課 (〒650-0011 神戸市中央区下山手通 5-10-1)

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)

⁶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)

A water purification system was developed and installed in the lower layer of a eutrophic reservoir. A preliminary test was conducted in order to examine its performance. The aerator generates fine air bubbles of several ten micro millimeters, so-called micro-bubbles. Dissolved oxygen, temperature, electric conductivity and other water quality items have been measured in every two weeks after starting the micro-bubble aeration in March 1999. Despite continuously operating the system, total amount of dissolved oxygen in the reservoir has decreased so far, from which the air discharge is estimated to be less than oxygen consumption due to decomposition. Nevertheless, DO concentration in the lower layer is higher than that observed in the last four years, while DO in the surface layer has been kept less than that in the last four years. These results suggest that the system functions for aerating water body to some extent, except that the air discharge is not sufficient for complete aeration, yet.

Key Words : *aeration, water purification, reservoir eutrophication, micro bubbles, dissolved oxygen*

1. はじめに

富栄養化した貯水池では春先から受熱期後半にかけて、内部で生産された有機物の分解が進み下層が無酸素状態になる。嫌気条件下では底に堆積した有機物の分解が進まず、栄養塩・金属イオン・硫化水素・メタンガスなどが発生する。有機汚濁による水質障害のほとんどは、底層水の貧酸素化が原因であることから、これまで様々な方法で貧酸素水の曝気循環にともなう水質浄化が試みられてきた。間歇式揚水塔は水質の鉛直混合効果を期待して用いられる方式である。多数の細かい気泡を発生させる散気管式は鉛直混合よりも空気泡による曝気効果に重点をおいた方式である。底層水の富栄養化がかなり進行している場合には、曝気循環による深層水の浮上拡散はかえって好ましくないため、循環水が表層水と混ざらな

いように底層水を曝気する必要がある。

対象とするA-貯水池は、底層から溶出した塩分濃度が非常に高いために冬季にも成層が維持される部分循環湖である¹⁾。底層には金属イオン、栄養塩などが高濃度に溶解し、しかも無酸素状態に保たれているため、曝気循環によって底層水が浮上拡散することは絶対に避けなければならない。従来型の散気管方式であっても気泡径は数mm～数cmであり、これを底層に直接設置すると底層水を気泡噴流とともに表層まで再浮上させ、水質障害をさらに進行させる。気泡噴流を表層水と触れさせることなく底層を曝気するためには、気泡流の導流装置や循環系²⁾など付加施設が必要になるので、より大きな施設費・維持点検費を要する。

本実験では、直径数十 μ m程度の極小気泡（マイクロバブル）を発生させることができるエアレータを用いた水質浄化システムを貯水池に設置し、貧酸素層の曝気・

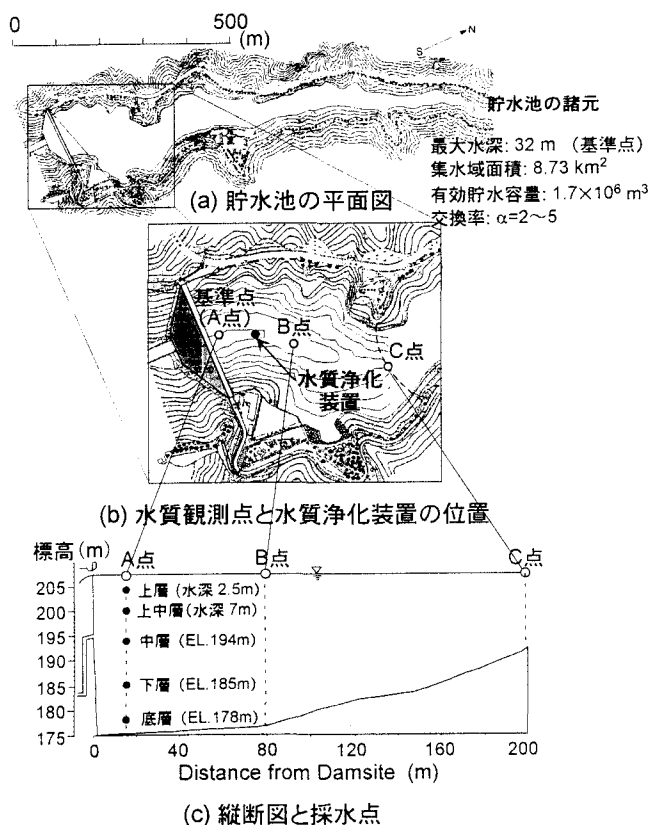


図-1 A-貯水池の諸元と水質浄化装置の設置位置

水質浄化実験を実施した。本報ではシステムの概要、1999年3月に曝気を開始してからこれまでの水質変化について報告し、本システムの浄化効率を考察する。

2. 貯水池の概要と背景

図-1 にA-貯水池の諸元や水質浄化装置の設置位置などを示す。貯水池は水深（最大32m）のわりに湛水面積（0.134km²）が小さいV字谷地形であり、交換率（ $\alpha=2\sim5$ ）が低い。したがって、水質が成層化しやすく鉛直混合が生じにくい地形的・水文的条件にある。これまでに報告した貯水池の水質的特徴は以下のように要約される¹⁾。

- 無酸素層は中層から底層にかけて分布しており、晩夏から初冬（9月～11月）にかけて最も大きくなる。
- 底層には金属成分や栄養塩などの溶存態が高濃度に集積しており、電気伝導度（塩分）が大きい。
- 底層水は高塩分のために比重が大きく、水温、溶存酸素、電気伝導度の成層は冬季においても消失しない（部分循環湖である）。
- 本水質浄化実験の開始直後（1999年5月）までは、長年にわたって底層に逆転水温層が維持されていた。

現在までのところ、溶解物質を高濃度を含む汚濁水は底層に停滞したままであり、表層まで浮上して大きな水質障害をもたらすことはなかった。しかし、特異な気

象・水文条件や何かの要因によって底層水が拡散・浮上すると、藻類の大増殖や腐臭の発生などトラブルを引き起こすことが懸念される。何らかの方法により底層水質を浄化し、部分循環状態を解消することが望ましい。底層水が表層と交換されずに滞留する原因として、底質から溶出する各種塩分により比重の大きな水塊が形成され、湖底面に沿って底層へと質量・栄養塩・金属成分などを輸送し、底層水の比重を増加させていることが考えられる。したがって、水温成層を維持しながら貧酸素層のみを曝気すれば、底層への栄養塩や塩分の集積を低減し、水質が浄化されるものと期待できる。

3. 水質浄化システム

(1) システムの概要

図-2 に水質浄化システムの概要を示す。水中ポンプから吸入された貯水池の水は、パイプAによって10基のエアレータ・ユニットに分岐送水される。図-3 はエアレータの構造・諸元を示す。水は流入口aからエアレータ本体に流入する。一方、空気は図-3 のパイプBによって水面上から10基のエアレータに分岐送気される。通常、水深が大きくない場合には、エアレータ内に生ずる高速流の負圧により流入口bから空気が自吸される。本実験では、曝気層の水深が20～30mであり、その水压に打ち勝つために、イカダに搭載したコンプレッサーによる強制送気を行った。設置工事において、エアレータを徐々におろしたところ、水深約15mまでは負圧による自吸を確認した。それ以深では強制送気が必要であった。aから流入する貯水池水とbから流入する空気はエアレータ内でせん断されて直径10～30 μ m程度の極小気泡（マイクロバブル）を含む気液混相流を生成し、流出口cから貯水池内へ噴出する。

気泡が水平に発進するように、エアレータは内径210mm×長さ600mmの円筒フード内部に装着されている（写真-1）。このようなユニット10基はイカダからの係留と着底したおもりによって所定の水深に固定される。水中ポンプ、エアレータともに任意の水深に移動可能である。

(2) エアレータの特徴

エアレータは以下のような特徴を有する。

- 発生する気泡が微小なため、成層破壊を引き起こすような擾乱はなく溶解効率が高い。
- 気泡上昇速度が0.01～0.05cm/sと非常に遅く、曝気層に長くどまって曝気効率が高い。
- エアレータ内の負圧による自吸作用があるので、貯水池底層のような大水深においても、水压と負圧の圧力差だけをコンプレッサーから送気するだけでよい。従来の曝気装置のように（水压＋送気量）に

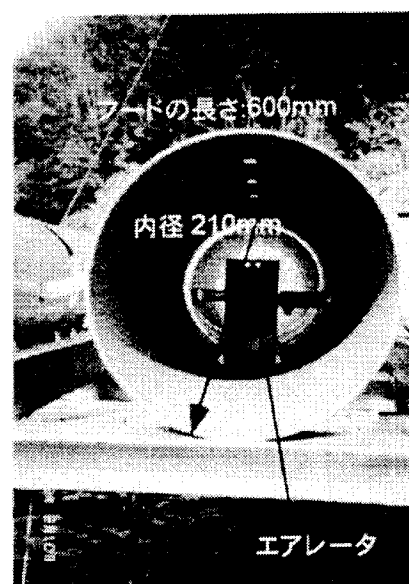
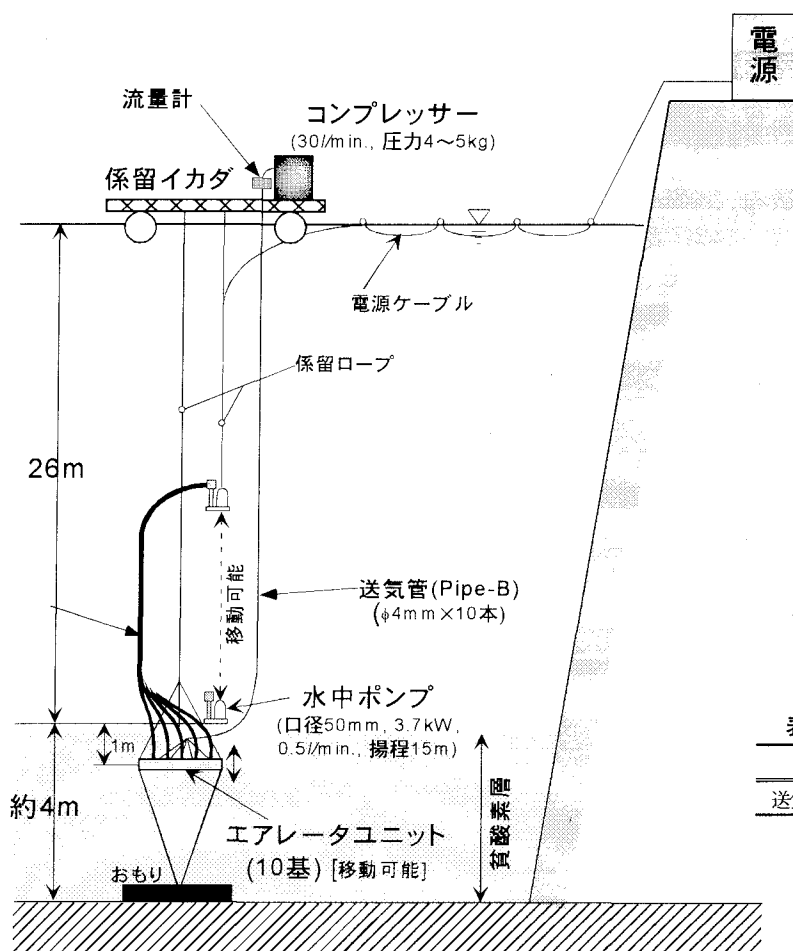
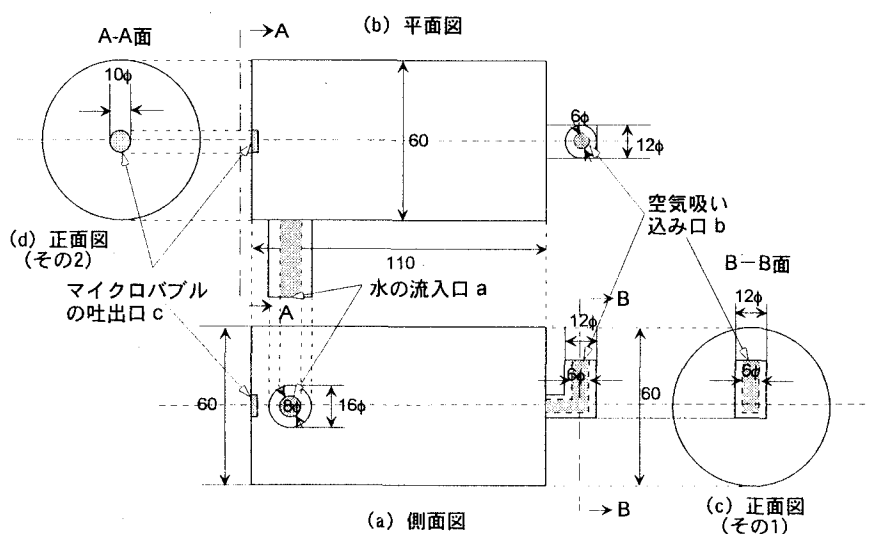


写真-1 フードに装着された
エアレータ

表-1 コンプレッサーからの送気量 (10基分の合計)

期 間	3/11-4/8	4/8-4/22	4/22-4/30	4/30-6/3
送気量(l/hr)	600	1,240	1,800	2,000
	6/3-6/24	6/24-7/8	7/8-8/9	8/9-9/9
	1,240	1,660	2,400	2,300



相当する大きな圧力をかける必要はないので施設が小さくてすみ、工事費、維持費が非常に低廉になる。

4. 曝気実験の概要

曝気運転は1999年3月11日に開始した。本実験では、

底泥を巻き上げない程度に無酸素水を曝気するために水中ポンプを水深26m(EL.181m)に、エアレータを27m(EL.180m)に設置した。水中ポンプの流量は0.5l/min(揚程15m)である。コンプレッサーによる送気量は表-1のようである。発生した気泡のうちの何割かは直径数mmの大きな気泡として直ちに浮上し、残りがマイクロ

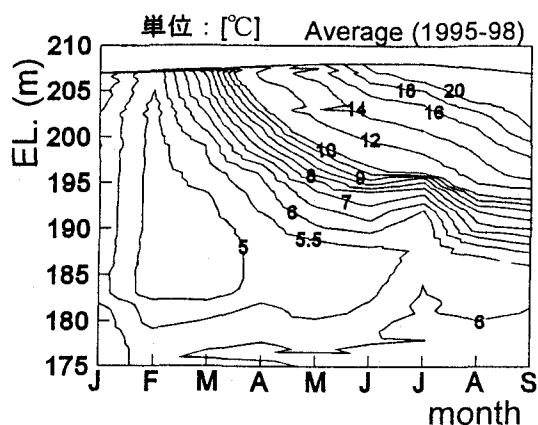


図-4 水温の季節変化(1995～98年の平均)

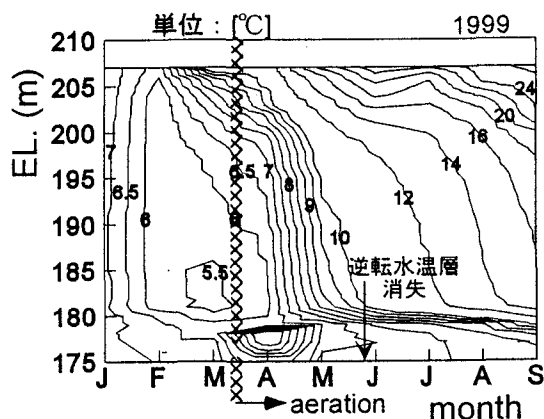


図-5 水温の季節変化(1999年)

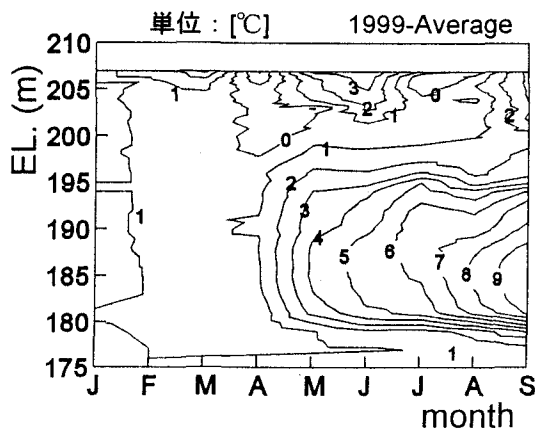


図-6 1999年の水温の1995～98年の
平均値からの偏差

バブルとして水中に溶解し池水を曝気する。

水温、電気伝導度(EC)、溶存酸素(DO)、濁度の鉛直分布は、図-1(b)に示すA,B,C点ならびにイカダ地点において二週間毎に観測される。基準点であるA-点の各層(図-1(c)の黒丸)と河川の流出入点では、2ヶ月毎に採水し、COD、窒素、リン、鉄、マンガンなどを計測する。

なお、観測地点毎に水質分布にわずかな違いが見られたが、ここでの表記方法ではその差が視認し難い程度に小さいので、以降では基準点での計測値だけを表示する。

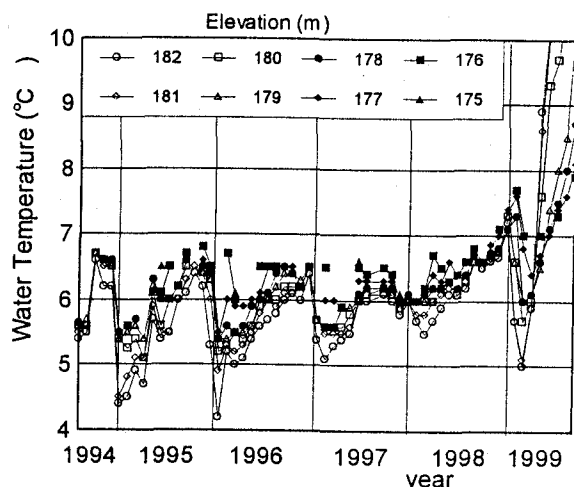


図-7 逆転水温層における水温の経年変化(1994～99年)

5. 曝気による水質変化

(1) 水温

基準点(A-点)における実験開始以前の4年間(1995～1998年、1994年は渇水年のため除外)の平均水温分布を図-4に、1999年1～9月の水温分布を図-5に、それらの水温の4年間平均水温からの偏差を図-6に示す。

1999年1月～3月においては、例年の水温構造と大きな違いは見られない。しかし、3月11日の運転開始後、エアレータの設置水深であるEL.180m以上では水温が例年よりも一様に分布し、曝気にもない鉛直混合が生じていることが推察される。マイクロバブル自身は水質混合をもたらすほど大きな駆動力を持たないので、曝気の際に副次的に発生する大きな気泡群が、底層の低温水を連行・浮上させたものと考えられる。このような鉛直混合現象は当初の見通しとかなり異なるものである。

一方、特筆すべきは、少なくとも5年以上EL.185m以深で継続的に維持されてきた逆転水温層が、1999年5月27日の観測以降に消滅したことである。より詳細にこれを見るために逆転水温層に相当するEL.175～182mの各水深における水温時系列を図-7に示す。底付近の高温層より上層に位置するEL.181,182mでは1997年頃から水温が経年的に上昇しはじめ、曝気開始前から逆転水温勾配が弱まる傾向がすでに見られていた。その後、曝気によって予想外に鉛直混合が進み、前年までにある程度弱体化していたEL.181,182m付近の逆転水温層に表層水が供給された。結果的にその部分で水温が上昇し、逆転水温層が消滅したものと考えられる。

もともと逆転水温層は貯水池底へ暖かい水塊が供給されることによって形成されたと考えられる。1999年の底層では例年より大幅な水温低下が見られるわけではない。よって、1999年5月における逆転水温層の消滅は、底層

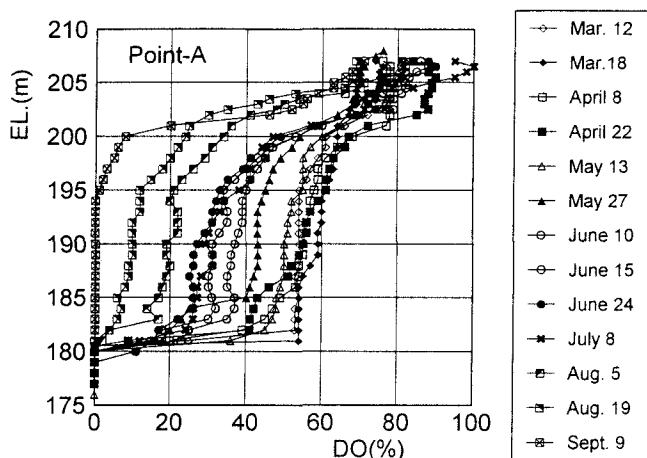


図-8 曝気開始後のDO飽和度(%)の変化

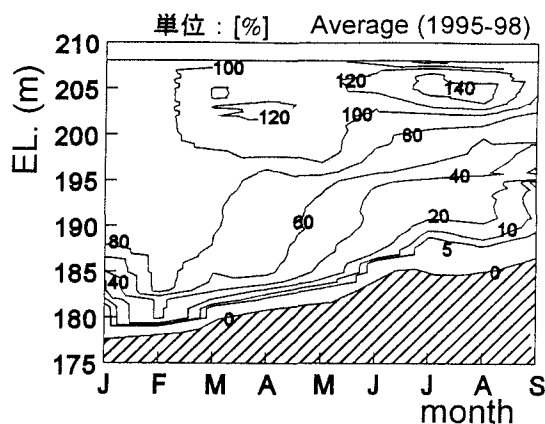


図-9 DO飽和度の季節変化(1995～98年の平均)

水温の低下よりも、鉛直混合による底層直上の水温上昇に起因すると考えられる。

(2) 溶存酸素 (DO)

図-8は基準点 (A-点) において曝気運転開始以降に観測されたDO飽和度(%)の鉛直分布である。エアレータの設置位置(EL.180m)より下層は曝気以前と同じくほとんど無酸素状態に保たれている。EL.180m以上の層においても、曝気に関わらず溶存酸素が減少し続け、有機物分解による酸素消費が曝気による酸素供給量を上回っている。特に9月9日においてはEL.195m以下で無酸素状態になった。例年、無酸素水の領域は9月から11月にかけて急激に拡大していることから、1999年9月においても有機物の分解量が増大し、曝気量を上回ったと考えられる。

DO分布の季節変化について例年との比較を図-9, 10に示す(基準点)。また、図-11は1999年のDO飽和度の4年平均値からの偏差である。これらの図から以下の特徴が観察される。

- 1999年3月～8月の期間、EL.180mの上方では例年より大きなDOを呈する層が発達し、ある程度の曝気効果が見られる。
- 夏期においては例年、内部生産により表層のDO過飽和層が発達するのに対し、1999年は水表面近くにおいてもDO飽和度が100%を下回っている。
- 曝気層以下の無酸素水塊は、曝気開始後も大きな変化が見られない。つまり、本システムでは浄化装置より下層へ酸素がほとんど供給されていない。

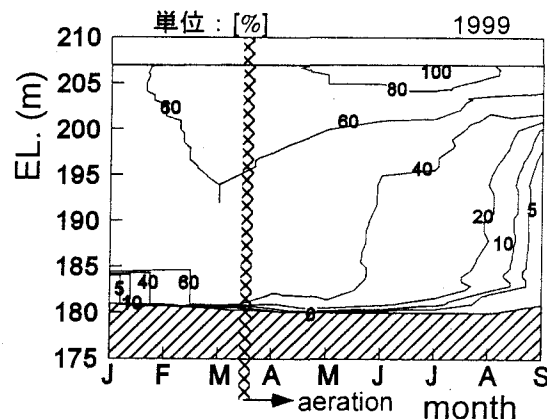


図-10 DO飽和度の季節変化(1999年)

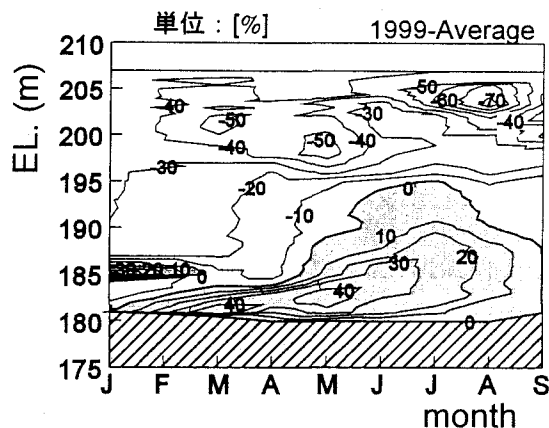


図-11 1999年のDO飽和度の1995～98年の
平均値からの偏差

様である。

- 1999年4月以降、底近傍のECが例年よりも増加傾向にある。

鉛直混合によってEL.180～195mの層では、水温が上昇し密度が減少した。底泥から嫌氣的に溶出した塩分は傾斜プルームを貯水池斜面に沿って発達させ、最深部への熱塩輸送をもたらしていると考えられるので、EL.180～195m層の密度減少によって傾斜プルームの相対重力は増加し、より多くの熱塩を輸送することになる。底近

(3) 電気伝導度 (EC)

図-12～14に基準点で観測された電気伝導度ECについて、4年平均値、1999年の観測値、両者の偏差をそれぞれ示す。以下のような特徴が見られる。

- EL.180mより上での鉛直混合が大きいため、高いECを示す底層が例年よりも薄くなり、180m以下に縮小した。
- 表層から中層にかけてのECの値は例年とほぼ同

傍に見られるわずかなECの増加（図-14）と、傾斜ブルームの熱塩輸送との関連性については今後検討する必要がある。

6. まとめおよび本浄化システムの課題

本浄化システムに関して、以下のような特性と課題が明らかになった。

- 送気された空気量のうち池内に溶解する空気量は内部生産による酸素消費量より小さく、全体的にDOが時間とともに減少した。
- 4～8月の期間における無酸素水領域の拡大は、例年よりも抑制された。また、EL.180mより上層では例年よりDOが増え、表層では内部生産にともなう過飽和状態が解消されるなど、ある程度の水質浄化効果が認められた。
- マイクロバブルとともに副次的に発生する大きな気泡によって鉛直混合が進み、水温構造が変化した。
- 鉛直混合によってEL.180～195mの層の水温が上昇するため、嫌氣的塩分溶出によって駆動される熱塩傾斜ブルームの輸送力を増加させている可能性がある。
- エアレータより下層は曝気されなかった。

水温成層に影響を与えることなく、底層水だけを曝気しながら貧酸素層の形成を阻止する必要がある。送気量を増加させ、送気量に占めるマイクロバブル発生率が増加するようにシステムの構造と運転方法の改良を試みたい。

謝辞：本実験を実施するにあたり、兵庫県土木部河川開発課と姫路土木事務所、徳山高専、中電コンサルタントの各位から多大なご協力を頂いた。また、本研究の一部は文部省科学研究費補助金、基盤研究(C)(2)（代表：道奥康治、課題番号：40127303）の援助のもとに実施された。以上、記して謝意を表する。

参考文献

1) 道奥康治・神田徹・伊藤達平・西川孝晴・石川勝久・東野誠：底部に逆転水温層を有する部分循環貯水池の水質構成に関する研究，土木学会論文集，第572号/Ⅱ-40，pp.33-48，1997。
2) 森川七生・道奥康治：貯水池水の蘇生をはかる；水資源開発公団“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8月号，pp.12-15，1992。
3) 大成博文：マイクロバブル発生技術と水環境蘇生，日本高専学会誌，高等専門学校教育と研究，Vol.3-4，pp.12-20，

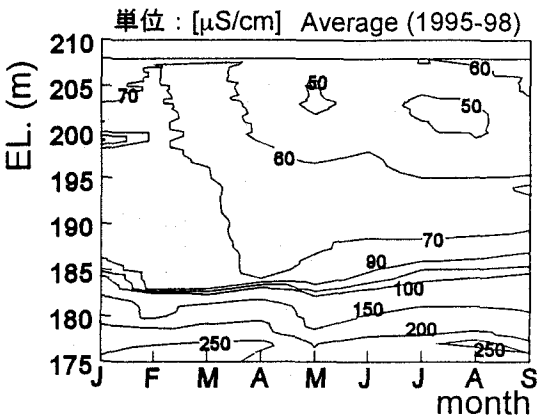


図-12 ECの季節変化(1995～98年の平均)

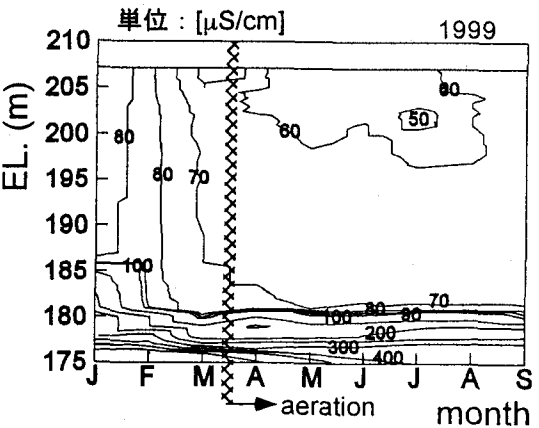


図-13 ECの季節変化(1999年)

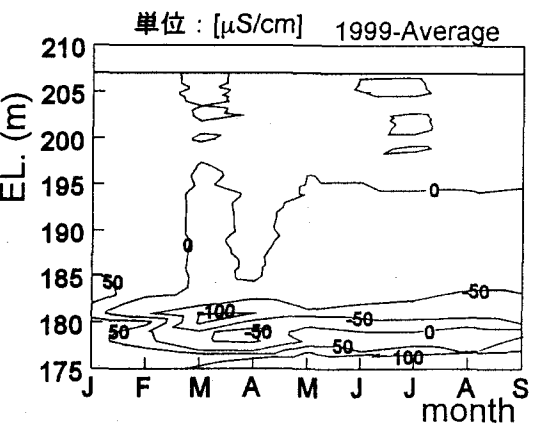


図-14 1999年のECの1995～98年の平均値からの偏差

1998。
4) 中村篤史ら：貯水池における熱塩循環の観測，第53回土木学会年次学術講演会，1998年

(1999.9.30受付)