

マイクロバブルによる富栄養貯水池の 深層水の水質改善に関する現地試験

FIELD EXPERIMENT ON HYPOLIMNIC AERATION USING MICRO OXYGEN
BUBBLES IN A EUTROPHIC RESERVOIR

河原能久¹・竹内豊²・野々村敦子³・松尾克美⁴

Yoshihisa KAWAHARA, Yutaka TAKEUCHI, Atsuko NONOMURA and Katsumi MATSUO

¹フェロー会員 工博 広島大学教授 大学院工学研究科社会環境システム専攻 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

²正会員 修(工) 岡山市水道局 (〒760-8544 岡山市鹿田町1-1-1)

³正会員 博(学) 香川大学助手 工学部安全システム建設工学科 (〒761-0396 香川県高松市林町2217-20)

⁴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 was carried out in Fuchu reservoir, which has been suffering from severe eutrophication, from mid-August to early December in 2004. Micro oxygen bubbles were injected into the anaerobic hypolimnion to improve water quality without disturbing the thermal stratification. Before the destratification due to big typhoons in the late September, some fundamental information was obtained which is useful in designing and maintaining an aeration system applied to eutrophic reservoirs. The operation of the micro-bubble aeration system increased the dissolved oxygen concentration to 1~3mg/L together with the decrease in electric conductivity, but within a limited area. This was explained by the very high consumption rate of dissolved oxygen in hypolimnic water and by bed materials. And the necessity was recognized to prevent the aerator nozzles from clogging accompanied by the oxidation of dissolved iron.

Key Words : *micro-bubble aeration, eutrophication, hypolimnion, dissolved oxygen, thermal stratification, field experiment*

1. 序論

多くの湖沼や貯水池において富栄養化問題が顕在化している。富栄養化した貯水池では、表層で植物プランクトンが大量発生する一方、深層部ではデトリタスなど沈降した有機物の分解のために酸素が消費される。これに対し、水温躍層の発達により深層部への酸素供給が抑制されるため、深層水は貧酸素化し、それに伴って底泥から栄養塩や鉄、マンガン等の溶出が発生し、利水障害をもたらす。本研究が対象とする香川県の府中湖においてもこのような問題が起きており、早急な水質改善対策が必要となっている。

富栄養化問題や有機汚濁を軽減するための貯水池内の対策として、全層循環、躍層低下、表層循環や深層曝気等¹⁾²⁾が試みられてきた。府中湖では、表層での藻類の増殖が顕著であり、深層水が春先から無酸素化し、栄養塩濃度が高い。このため、水温躍層を破壊することな

く深層を曝気することが必要であり、マイクロバブルによる曝気方法の有効性を検討する必要があると考えられた。

これまでもマイクロバブルを利用した事例がいくつか報告されている。一例として、道奥ら³⁾⁵⁾は、H県Sダム貯水池(水深約30m有効貯水容量 $1.7 \times 10^6 \text{m}^3$ 、年間回転率 $\alpha=2 \sim 5$)において、水温成層を破壊することなく深層曝気を実現するとともに、深層の無酸素水塊の解消と深層水質(COD, 全窒素, 全リン, 電気伝導度), 金属塩類(鉄, マンガン)の大幅な改善を実現している。

府中湖は、上記の貯水池と比較すると、水深も浅く、年間回転率は高い。また、富栄養化の進行はさらに著しいと推察される⁶⁾⁷⁾。このため、マイクロバブルによる深層曝気の優れた特性をどの程度活用できるかについて不明な点が残されている。特に、長期間の稼働に伴う課題として何があるのかを明らかにする必要がある。

そこで、本研究では、マイクロバブルの水質改善効果と問題点を明らかにすることを目的とし、曝気による

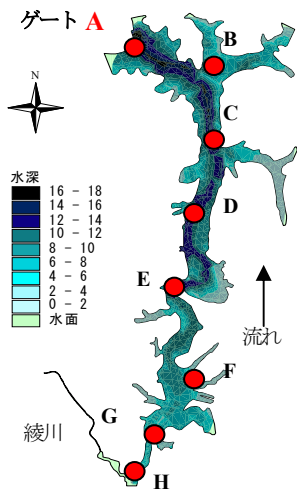
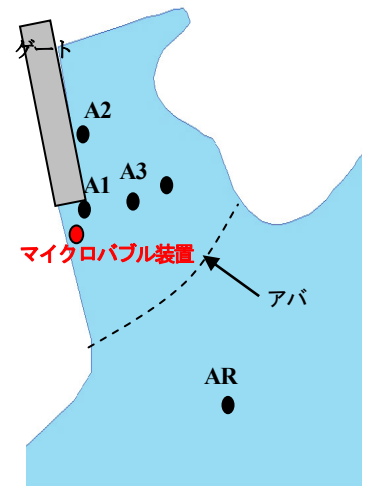


図-1 府中湖と水質観測地点



(a)外観



(b)観測地点の平面位置

図-2 ゲート前での観測地点

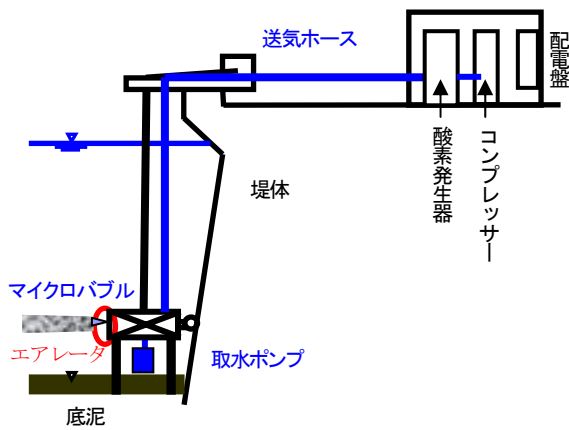


図-3 マイクロバブル曝気システム

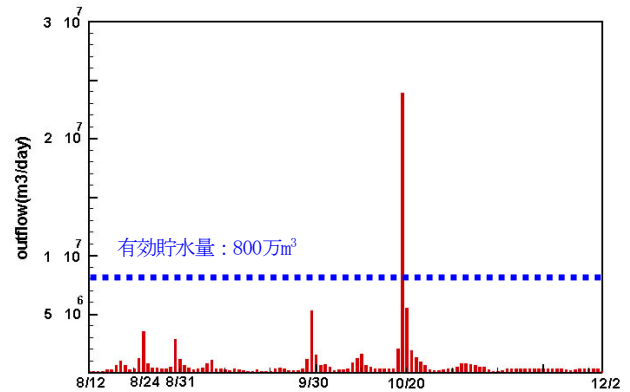


図-4 実験期間中の府中ダムからの放流量

深層水の水質の時間的、空間的变化を実測することを行った。以下では、府中湖の概要、マイクロバブルを利用した曝気システムの概要、観測結果と水質改善効果を順次説明し、最後に結論を述べる。なお、実験期間中に台風による出水がたびたび発生し、貯水池の水質は多く変化した。そのため、結果的に限られた期間のデータから、マイクロバブル曝気装置の設計、管理に役立つ情報を報告する。

2. 対象地域と調査内容

(1) 府中湖の概要

府中湖は香川県坂出市に位置し、昭和42年に綾川をせき止めて造られた細長い平地ダム湖である(図-1)。総貯水量850万 m^3 、有効貯水量800万 m^3 、貯水池面積1.21 km^2 、平均水深7.0m、回転率10.2(2002年)という特性を有する。利水目的は工業用水と農業用水である。

府中湖ではアオコの大量発生など富栄養化が顕在化している。毎年、春先から初秋にかけて水温躍層が形成さ

れ、深層部では無酸素状態になり、底質から栄養塩、鉄、マンガンなどが溶出し、水質汚濁が進行している^{6,7)}。

(2) 調査場所、調査時期

マイクロバブルの水質に与える影響や範囲を求めるために以下の要領で水質調査を行った。

水質調査は、図-1のA~Hの8地点における定期観測と図-2に示すゲート前(図-1の地点A)で行ったマイクロバブルの影響評価のための調査の2つからなる。本論文ではゲート前での調査結果のみを説明する。図-2のAR地点は旧河道上に位置し水深が深く、マイクロバブルの影響が及んでいないと推定される地点であり、マイクロバブルの影響を比較により検討するために設けたものである。

調査時期はマイクロバブル装置の稼働直前から終了時までであり、2004年8月13日~2004年12月上旬である。

(3) 水質観測項目

観測項目は水温、電気伝導度、濁度、クロロフィルa(アレック電子株式会社、クロロテックACL1183-

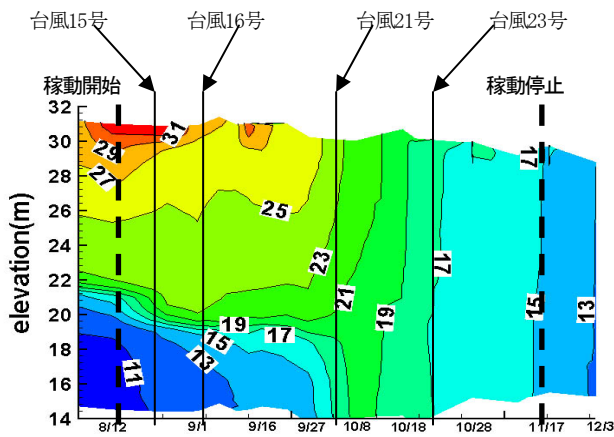


図-5 A1 地点での水温の変化 (単位: °C)

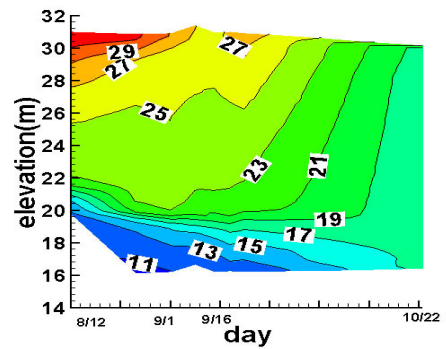


図-6 AR 地点での水温変化 (単位: °C)

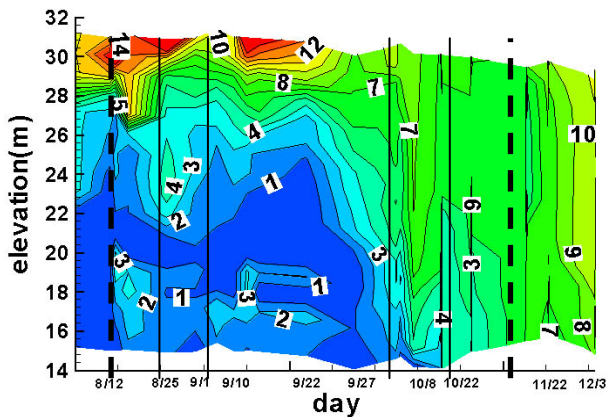
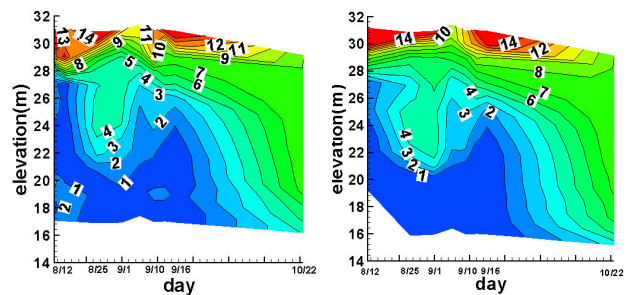


図-7 A1 地点での DO の変化 (単位: mg/L)



(a) A3 地点

(b) AR 地点

図-8 A3, AR 地点での DO の変化 (単位: mg/L)

PDK), DO (YSIナノテック株式会社) 陽・陰イオン (島津製作所, イオンクロマトグラフィー, PIA-1000), SS, 藻類指標, 全リン, TOC, POC, DOC, 全鉄, 全マンガンである。

3. マイクロバブル曝気システムの概要

本実験で使用した曝気システムの構成を図-3に示す。本研究では、空気ではなく酸素を生成し利用した。装置下部の取水ポンプで取水した深層水と酸素発生器から送られた酸素を混ぜ合わせてマイクロバブルを発生させ、50個のエアレータから噴出させている。噴出水量は $0.5\text{m}^3/\text{min}$ 、酸素生成能力は $2.0\text{m}^3/\text{h}$ である。本装置1基を下流側のゲート横 (図-2) に設置した。稼働水深は水温躍層よりも深い約14mである。2004年8月12日に稼働を開始させた。11月17日に一度、稼働停止させ、11月26日に再稼働させた。なお、それ以外にも一時的に装置を停止させ、点検を行った。

4. 水質調査・分析の結果

(1) 観測期間中の放流量

実験期間中のダムからの放流量を図-4に示す。台風の

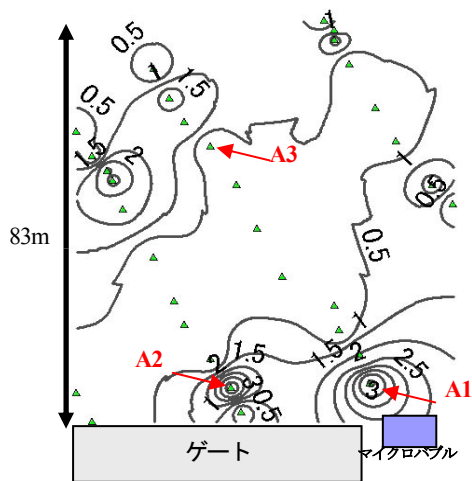
影響により大規模な出水が起き、大量の放流を行った。特に、台風21号時 (9月末) の放流量は有効貯水量の約半分、台風23号時 (10月下旬) の放流量は有効貯水量の約3倍という量であり、水温躍層は破壊され、鉛直混合が起こった。このため、マイクロバブルの水質に及ぼす影響を検討は9月下旬までのデータに基づいて行う。

(2) 水温

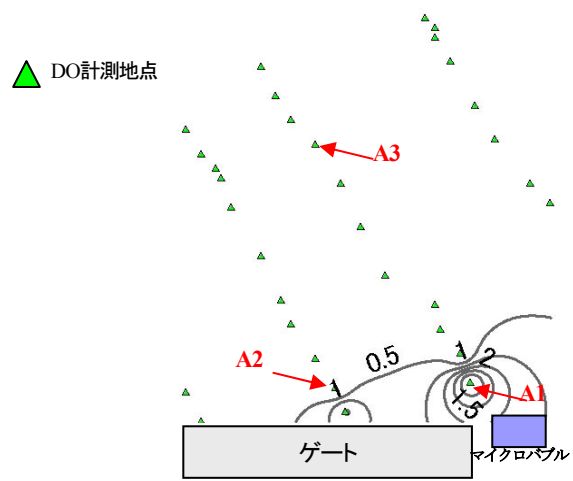
A1, AR 地点での水温を図-5, 6 に示す。横軸が日付、縦軸に水位 (m) をとり、等温線を描いたものである。各地点ともに稼働開始後から1年半程度の期間では水深約12m付近に形成された水温躍層は維持されており鉛直分布にはあまり差は見られない。台風15, 16号による出水に対しては、水温分布に各地点ともにあまり変化は見られない。しかし、台風21号による大規模の出水により9月29日~10月1日にかけて水温躍層は破壊され鉛直混合が生じている。

(3) 溶存酸素

A1, A3 および AR 地点での溶存酸素の分布の時間的変化を図-7, 8 に示す。なお、AR 地点では9月16日から10月22日までのデータが欠測であるため、この期間中の等値線は内挿により描いているため、注意を要する。これらの図から次のことが観測される。



(a) 水面下 12m



(b) 水面下 14m

図-9 DO の平面的な拡がり (9月22日測定) (単位: mg/L)

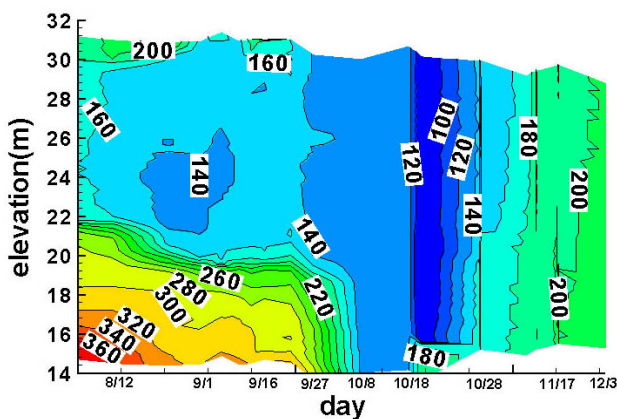
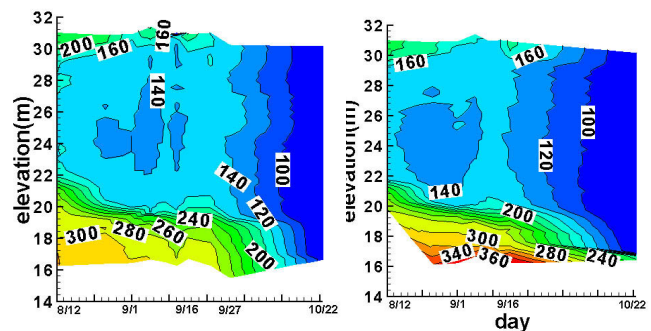


図-10 A1 地点での EC の変化 (単位: $\mu\text{S}/\text{cm}$)

表層では各地点ともに過飽和状態になっている。これは植物プランクトンによる光合成の影響である。A1 地点の中層あたりに見られる DO 濃度 3~4mg/L 程度の水塊は AR 地点でも見られることから、8月24日前後に起きた出水の影響であると考えられる。このときの藻類指標の値が高くないことから光合成の影響ではないと判断できる。

マイクロバブル曝気装置の稼働後、深層水の DO は A1 地点では 1~3mg/L 程度まで改善されている。A3 地点では稼働開始後 10 日程度は DO の増加が認められる (図-8(a))。しかし、それ以降、無酸素状態に戻っている。また、エアレータ以深の無酸素水塊の DO はわずかに上昇したものの大きな増加は見られない。DO の増加範囲が限られているのは、深層水や底泥の酸素消費速度が大きいと考えられる。これについては後述する。台風 15 号、16 号の影響は深層には及んでいないが、台風 21 号の出水による水温躍層の破壊に伴って、DO も一様化した。

マイクロバブルの空間的な広がりを計測した。観測は 9月22日と 9月27日の 2 回実施した。計測水深は水温躍層より下方の水面下 12~15m である。9月22日の



(a) A3 地点

(b) AR 地点

図-11 A3, AR 地点での EC の変化 (単位: $\mu\text{S}/\text{cm}$)

水深 12m と 14m の観測結果を図-9 に示す。深さ 12m において、DO はゲートの直前だけでなく、ゲートから 80m 程度離れた地点においても 0.5mg/l の値を示している。一方、深さ 14m では DO が 0.5mg/l 以上の値をとる範囲は発生装置から 30m 程度以内である。図-8 と比較して考えると、DO の拡がりについて次のように推測できる。すなわち、発生装置の稼働後から台風 15 号の襲来までの期間では、酸素を供給した影響は A3 地点付近まで及んだ。その後、度重なる出水に伴う放流によって、マイクロバブルの供給による DO の増加範囲はゲート周辺に限定されるようになった。図-9 にみられるゲートから離れた地点でのゼロでない DO は、マイクロバブルよりむしろ上流側からや水面側からの DO の供給によるのではないかと考えられる。換言すれば、今回のように水量や水質の変動の大きい条件下において、マイクロバブルの供給の効果は供給地点から 30~40m のゲート側の範囲に及んだものと推測される。

(4) 電気伝導度

A1, AR 地点の電気伝導度を図-10, 11 に示す。AR 地点では 9月16日から 10月22日の間は観測データが

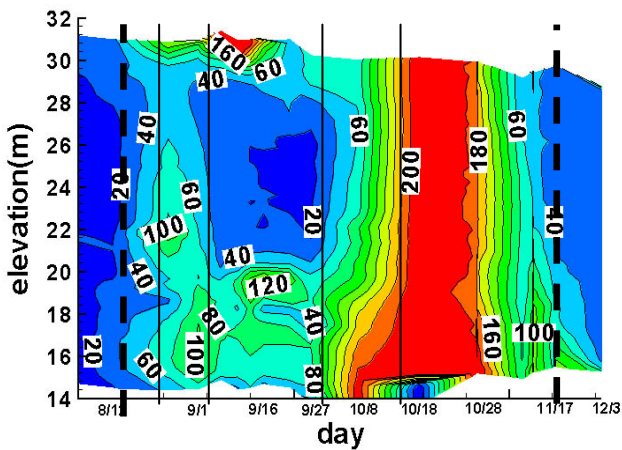


図-12 A1 地点での濁度の変化 (単位 : mg/L)

ないため、内挿により等値線図を作成していることに留意する必要がある。図から次のことが認められる。

水温躍層より上層では 2 地点間で電気伝導度に差は見られない。深層では、A1 地点ではマイクロバブル装置の稼動開始直後から値が低下している。A3 地点においてもマイクロバブルが行き渡っていた期間では EC の減少傾向が見られる。

なお、各地点ともに稼動開始から中層での電気伝導度が低くなっている。これは台風 15、16 号による出水の影響と考えられる。台風 21 号時の出水では鉛直混合が生じている。

(5) 濁度

図-12、13 に A1、A3、AR 地点での濁度の測定結果を示す。A1、A3 地点では稼動開始直後から底面付近で濁度が若干上昇している。これは水中ポンプが底泥を巻き上げたためではないと考えられる。各地点ともに台風 15、16 号、21 号、23 号時には出水によって全層で濁度が高くなっている。

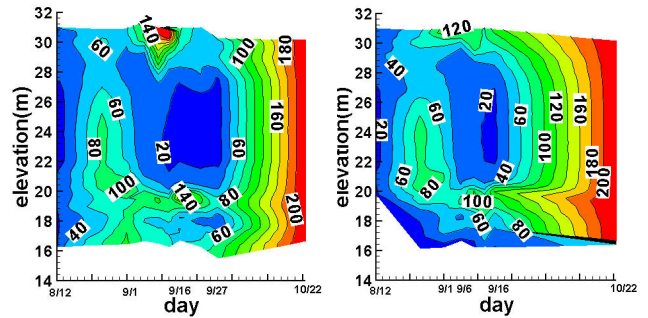
なお、度重なる出水により府中湖に流入した土砂等がゲート前に堆積した。水中ポンプが湖底付近の細かい土砂を巻き込んだか否かは明らかではないが、水中ポンプにより濁水化を助長することがないように留意することが必要である。

(6) その他の水質項目

図には示さないが、DOの増加に伴い、アンモニア性窒素濃度は減少し、硫酸イオン濃度は増加した。全鉄、全マンガンについては顕著な変化は見られなかった。

5. 溶存酸素消費速度の計測

純酸素のマイクロバブルで曝気したにもかかわらず、DOの濃度が上昇した範囲に限られた原因を理解するために、府中湖の深層水と底泥をA1地点で採取した。深



(a) A3 地点

(b) AR 地点

図-13 A3、AR 地点での濁度の変化 (単位 : mg/L)

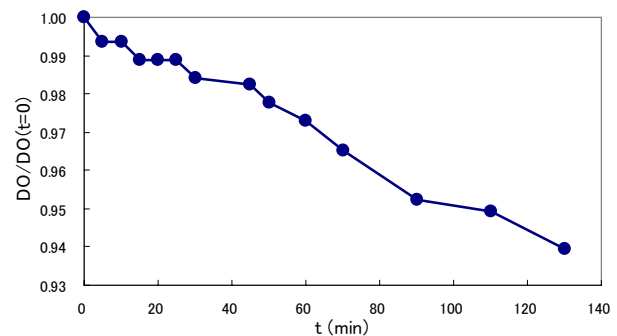


図-14 DOの時間的变化 (9月10日の深層水)

層水は水深14mで採取した。2004年9月～2005年1月までの毎月1回、深層水と底泥を実験室(15℃の恒温室)に持ち帰り、酸素消費速度を計測した。

底泥の酸素消費速度の計測は、次の手順で行った。①コアサンプラー(直径4.5cm)を用いて採掘し、②攪拌させないようにしてゴム栓をして実験室に持ち帰る。③コアを立てて安定した状態で泥の上の水を抜き、④水を抜いたコアに蒸留水を泥の表面を攪拌させないように満水まで水を注入する。⑤DOメーターを入れ、ゴム栓をしてテープで密栓にし、遮光板で遮光する。⑥計測を開始する。

一方、深層水の酸素消費速度の計測については次のように行った。①採水した深層水を遮光して実験室に持ち帰る。②ビンに深層水を詰め、DOメーターを入れて密閉する。③完全に遮光した状態で、水中のSSが沈降しないよう、スターラで攪拌しながら計測を開始する。

上記の方法によってDOの逓減曲線を求めたところ、測定開始直後での曲線の勾配が最も大きくなり、次第に逓減した。一例として9月20日の実験結果を図-14に示す。ここでは、曲線の最大勾配を最大消費速度とよぶこととする。表-1、2にそれぞれ底泥と深層水の計測結果を示す。なお、表中のDO(t=0)は実験開始時のDOの値であり、表-2中の水温とCODは採水地点での値である。実験時の水温は約15℃であった。表より、いずれの月においても府中湖での消費速度が極めて大きいことがわかる。ただ

表-1 底泥の溶存酸素消費速度

採取日	DO($t=0$) (mg/l)	最大消費速 度(g/m ² /day)
2004/09/10	7.04	9.1
2004/11/22	8.28	6.1
2004/12/21	9.30	6.0
2005/01/14	4.71	7.6

し、この実験データはDO濃度が高い状態で行われたものであり、実際の場合と異なっていることに注意する必要がある。すなわち、DO濃度の低い状態、あるいは嫌気的な状態ではDOの消費速度は大幅に低くなるものと推測される。なお、これまでのマイクロバブルの適用事例³⁾⁵⁾と比較して、本実験でのDOの上昇範囲が狭いことや濃度の上昇が小さいことからDOの消費速度が大きいたことが確認される。

底泥とともに深層水自体の酸素消費速度が大きいたことは、深層の水質改善、特に貧酸素化への対策を検討する上で大きな意味を持つ。すなわち、浚渫は底泥でのDO消費や底泥からの栄養塩等の溶出を抑制するために必要であるが、それのみでは効果は限定的にとどまる。深層水自体が多量のDOを消費するため、水中の有機物量を減らすことが求められるが、すなわち、それは植物プランクトンの増殖を抑制することに他ならない。

6. 結論

富栄養化が進行している府中湖の深層水の水質改善をはかるために、酸素を用いたマイクロバブルによる深層曝気システムを稼働させ、DOを含む水質項目の測定を行った。また、底泥や深層水を採取し、酸素消費速度を測定した。本実験より、マイクロバブル利用に関して以下のような特性と課題が明らかになった。

- ・ 装置稼働開始から9月29日の台風21号による大規模出水が起きるまでは深層ではDOが増加し、電気伝導度、アンモニア性窒素が低下し、ある程度の水質浄化効果が認められた。
- ・ マイクロバブルによる曝気装置の稼働によって水温躍層の破壊、底泥の巻上げ、鉄・マンガンの上昇等の障害は生じなかった。
- ・ 供給された酸素量は深層水の溶存酸素消費量に追いつかず、DO濃度が改善された範囲は装置から数10m程度に限られた。
- ・ マイクロバブルによる曝気装置を設計するためには事前に溶存酸素の消費速度に関するデータを整備することが必要である。府中湖での深層水、底泥の溶存酸素消費速度はいずれも大きく、それがDOの上昇

表-2 深層水の溶存酸素消費速度

採水日	水温 (°C)	COD (mg/l)	DO($t=0$) (mg/l)	最大消費速 度(g/m ³ /day)
2004/09/10	13.8	10.0	6.84	11.5
2004/10/18	17.5	8.9	8.50	33.1
2004/11/22	14.6	4.4	9.30	19.2
2004/12/21	10.6	3.9	9.61	20.2
2005/01/14	6.5	4.4	9.63	23.0

範囲を限定したものと考えられる。

- ・ 本文中では説明しなかったが、本装置は鉄やマンガンを含んだ深層水に酸素を供給するため、酸化反応が急速に進み、酸化鉄等がエアレータのノズルに付着し、目詰まりを起こした。長期の自動運転を行う場合には、目詰まり対策を施すことが必要である。
- ・ マイクロバブルの噴出高さをより底面に近づけ、底面付近の薄い層の水塊のDOを増加させる改善が必要である。一方で、出水に伴い流入する土砂に水中ポンプが埋もれないこと、また細粒分をエアレータから噴出させない対策も求められる。

謝辞：本研究の遂行にあたり、香川県水道局から多大な支援を得た。また、調査・分析において香川大学の末永慶寛助教授、久保尚紀君、秋山達君の協力を受けた。記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会編：水理公式集，pp. 658-659, 1999.
- 2) 豊島靖，天野邦彦，田中康泰：ダム貯水池における曝気循環による成層破壊状況の現地観測と評価，水工学論文集，第47巻，pp.1243-1248, 2003.
- 3) 道奥康治，神田徹，大成博文，西川孝晴，松尾克美，木戸崇博：マイクロバブルによる貯水池の水質浄化実験，水工学論文集，第44巻，pp. 1119-1124, 2000.
- 4) 道奥康治，神田徹，大成博文，西川孝晴，松尾克美，木戸崇博：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.
- 5) 道奥康治，神田徹，大成博文，森口昌仁，松尾昌和，松尾克美：曝気形態と貯水池深層水質との関係について，水工学論文集，第46巻，pp.1091-1096, 2002.
- 6) 田中陽二，河原能久，竹内豊：府中湖における成層期と循環期の水質特性，土木学会第 58 年次学術講演会講演概要集，II 部門，2p, 2003.
- 7) 安田健，竹内豊，野々村敦子，河原能久：府中湖における水質および植物プランクトンの変動特性，平成 16 年度四国支部技術発表会講演概要集，pp. 428-429, 2004.

(2005. 9. 30受付)