

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

RESERVOIR WATER PURIFICATION WITH USE OF MICRO-BUBBLES AND SYSTEM'S PERFORMANCE

道奥康治¹・神田徹²・大成博文³・森口昌仁⁴・松尾昌和⁵・白澤静敏⁵・松尾克美⁶

Kohji MICHIOKU, Tohru KANDA, Hirofumi OHNARI, Masahito MORIGUCHI,
Masakazu MATSUO, Shizutoshi SHIRASAWA and Katsumi MATSUO,

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)

⁶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)

Micro-bubbles were discharged into the lower layer in a eutrophic reservoir in order to aerate and purify the contaminated waters. Water quality has been monitored in the last 1.5 year after starting the system operation. In the first one year, the water body was more mixed and overturned by the micro-bubble aerator than we expected, although the aerator was originally designed so that only the lower layer water is aerated with minimum vertical mixing. The reason of such significant mixing was that high amount of unexpected and undesirable macro-bubbles were generated at the nozzle's outlet. Nevertheless, it was found through measurements of nutrients, metals, DO, etc. that the water quality was much more improved than before and the water purification system has been running quite well. In the last July, generator's structure was modified for preventing macro-bubble generation and then micro-bubbles were generated more efficiently. Water quality change after improvement of the system were also reported.

Key Words : *aeration, reservoir eutrophication, water quality, water purification, micro-bubbles, dissolved oxygen, aerators structure*

1. はじめに

富栄養化の進行によって底層が貧酸素化し、様々な物質が池底から溶出した貯水池を対象として、マイクロバブルエアレータを用いた水質浄化実験を1999年3月より実施している。本浄化システムの特徴は、従来の曝気循環装置よりもかなり微小な直径数十 μm のマイクロバブルを用いている点である。前報では、浄化システムの構造と実験開始期の水質変化について報告した。本報では、その後約1年にわたる水質観測の結果を示し、浄化システムによる水質改善効果、曝気循環による鉛直混合、システムの成層破壊効率について考察する。また、前半期の水質浄化実験において鉛直混合が予想以上に進んだことから、混合促進の要因である大気泡の発生を抑制し、

マイクロバブルがより高い割合で発生するようにエアレータの構造を改良した。システム改良後の水質変化についても報告する。

2. 対象貯水池と水質浄化システム

(1) 対象貯水池

実験対象のA-貯水池は最大水深32m、貯水量 $1.95 \times 10^6 \text{ m}^3$ の多目的貯水池であり、富栄養化が進行している。年交換率が低い ($\alpha=2\sim5$) ことから、受熱期には安定な成層が発達して、鉛直方向の水質交換が抑制される。夏期において表層では多量の藻類が発生し溶存酸素が過飽和となる一方、底層の貧酸素化が顕著で底質から様々な物質が高濃度に溶出している¹⁾。

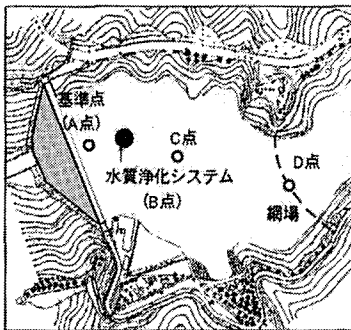


図-1 水質浄化システムの設置位置

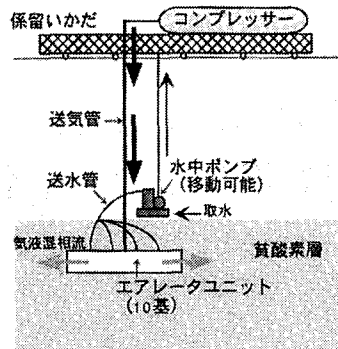


図-2 水質浄化システム

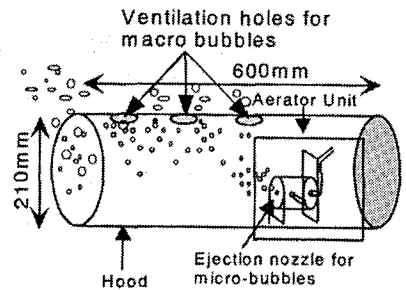


図-3 エアレータ・ユニットの構造

洪水調節は自然越流方式で行われており、1996年の濁水を経て常時満水位に達した後は、水面がEL.207m付近ではほぼ一定に保たれていた。また、前述のように池水交換率が低く、出水時においても水質構造を変化させるほど大きな流入事象は出現していない。

(2) 水質浄化システムとエアレータ・ユニット²⁾

水質浄化システムは図-1のように最大水深部に近い点に設置され、1999年3月11日から曝気運転を開始した。システムの概要を図-2に示す。エアレータは水深25～27mに設置されている。マイクロバブルの物理的性質については、文献3)を参照されたい。

エアレータ・ユニットは、図-3のようにフード内部に装着されている。フードを設置したねらいは、エアレータから副次的に発生する直径数mmの大気泡がマイクロバブルを連行浮上させないために水平方向への吐出力を促進することである。フード天端には、数カ所に穴を設けて大気泡を回収・排気する構造とした。フードの諸元は水理実験によって決定された。

図-4には実験期間における送気量を示す。'99年3月から2000年5月までの送気量は、水温や溶存酸素の分布状況を監視して、適宜変化させながら決定した。

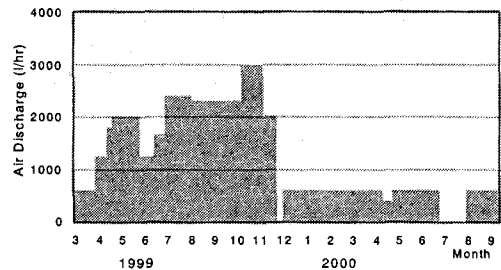


図-4 コンプレッサーからの送気量（10基分の合計）

180～195mの層の水温が曝気前よりも相対的に上昇している。これは、曝気の鉛直混合循環によって水温が均一化し、中層以深にまで熱が輸送されたためである。水温分布に関する特記事項は、①通年的に存在していたEL.185m以深の逆転水温層が、曝気によって'99年5月に消滅したこと、②'99年12月に観測以来はじめて全層が循環し、長年継続していた部分循環状態が解除されたことである。

エアレータが予想以上の水質混合をもたらしていることから、前述のように2000年8月以降は、成層破壊を極力抑えるためにフードを除去して、送気量を減じた。その結果、8、9月には'99年の同時期に比べ安定な水温成層が形成されはじめています。

(3) 水質観測

水質浄化装置の設置点ならびにA～Cの三点では、水温、電気伝導度、溶存酸素、濁度の鉛直分布を毎月2回頻度で計測した。基準点（A点）と河川の流入流出点では、この他にT-N、T-P、Fe、Mn、COD、ORPなどの水質項目を採水計量した。

2. 曝気にともなう水質変化

(1) 水温

基準点（A点）における水温の季節変化を図-5に示す。また、曝気開始時の'99年3月以前と以降の水温分布を季節別相平均して両者の差から得られた曝気前後の水温偏差 ΔT を図-6に示す。両図においてエアレータの設置標高（EL.181m）を破線で示す。5～12月においては、標高

(2) 溶存酸素（DO）

図-7に溶存酸素DOの季節変化を、図-8には曝気前後の偏差 ΔDO を示す（破線はエアレータの設置標高）。

曝気によって無酸素層の拡大は抑制され、2000年1月に至ると長年滞留していた標高180m以下の無酸素層が消滅した。しかし、前述のように送気量を減じた2000年8月以降は底層が貧酸素化し始めている。これより、この時期の有機物分解による酸素消費量は送気量600（l/h）を上回ることになる。

表層については、曝気開始以前に藻類の活動によって過飽和状態にあった溶存酸素が、曝気によってかなり低減している。

(3) 電気伝導度（EC）

図-9、10に電気伝導度ECの季節変化と曝気前後の偏

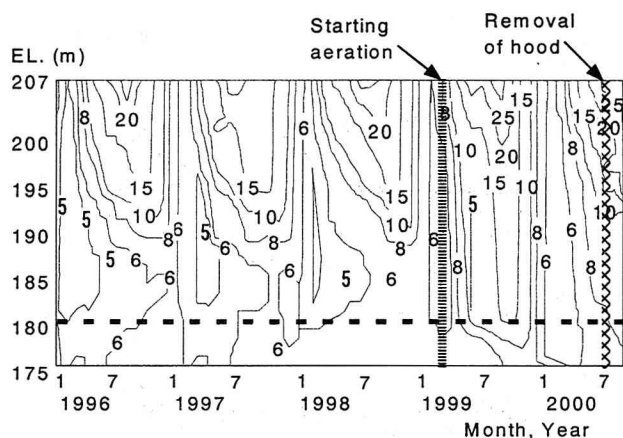


図-5 水温分布の季節変化

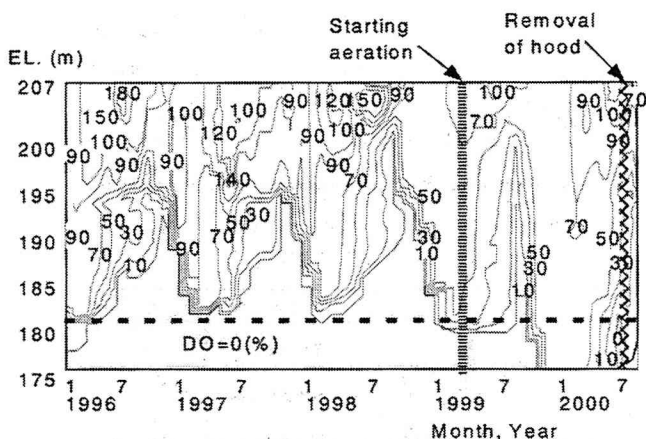


図-7 溶存酸素分布の季節変化

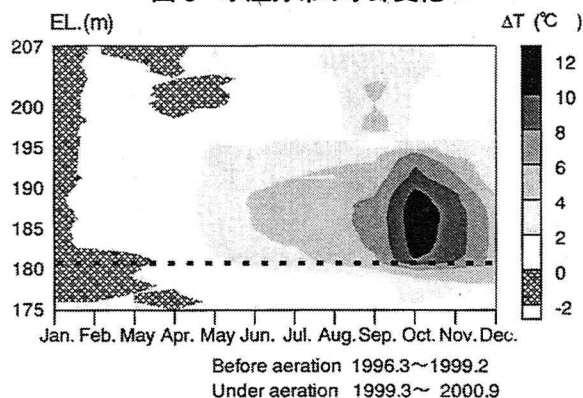


図-6 曝気開始後（'99.3～'00.9）の各月水温と曝気開始前（'96.3～'99.2）の各月水温平均値との偏差 ΔT

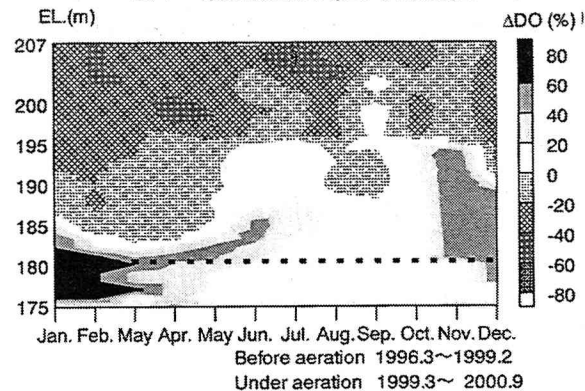


図-8 曝気開始後（'99.3～'00.9）各月のDO飽和度と曝気開始前（'96.3～'99.2）の各月平均値との偏差 ΔDO

差 ΔEC をそれぞれ示す（破線はエアレータ設置標高）。

標高185m以深の高濃度層の生長が曝気によって抑えられ、99年年12月には消滅している。図-10の偏差 ΔEC を見ると、受熱期から放熱期にかけて底層のECが曝気前より高くなっているのに対し、エアレータより上層のECは低濃度に抑制されている。底層でECが高くなる要因としては以下のことが考えられる。上層が一様に混合し、しかもECが減少することによってエアレータの標高付近におけるECの鉛直勾配が曝気前よりも大きくなる—その結果、塩分による局所的な密度勾配が増加して底層水と上層との水質交換が抑制される—しかも、この時点では底層が酸欠状態のままであるため池底から物質が嫌氣的に溶出し続け、これが高濃度に封じ込められて底層のECが上昇する。この傾向は、図-9の1999年4月～11月において顕著に認められる。

(4) 栄養塩（全窒素T-N, 全リンT-P）

図-11, 12において99年3月までは、T-N, T-Pともに底層で高い濃度を示すが、全層循環によって急減し表層・中層と同じ濃度に至っている。2000年9月にはT-Pがやや増加している。観測当日降雨による出水があり、流入水のT-Pが増加していたが、この時期の流入水は底層にまで達しないため、流入水の栄養塩供給が生じたとは考えにくい。底層の貧酸素化にともなう栄養塩の嫌氣的溶出

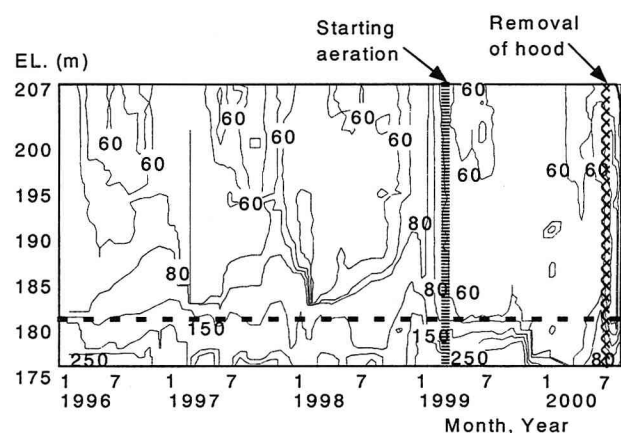


図-9 ECの季節変化

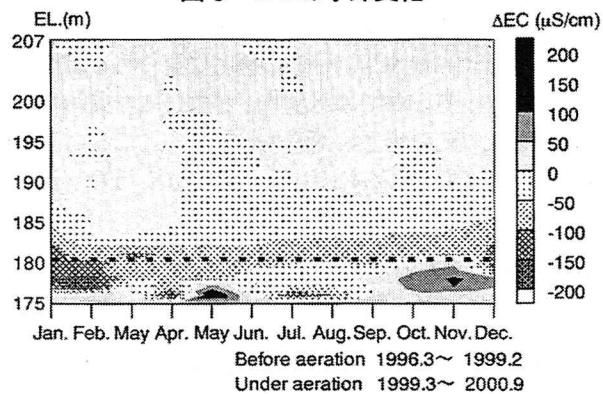


図-10 曝気開始後（'99.3～'00.9）各月の電気伝導度と曝気開始前（'96.3～'99.2）の各月平均値との偏差 ΔEC

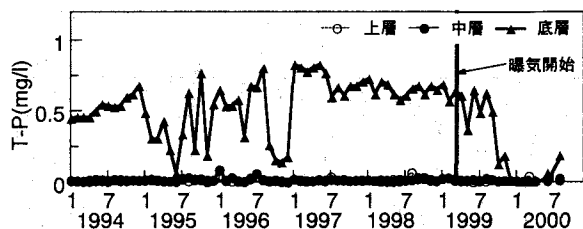


図-11 T-Pの季節変化

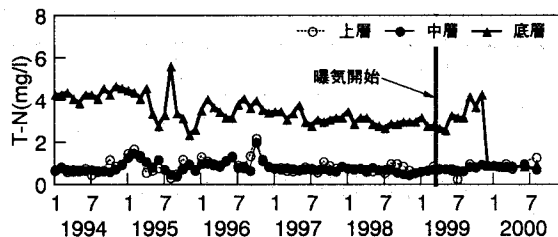


図-12 T-Nの季節変化

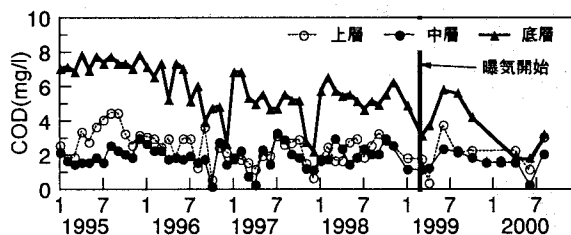


図-13 CODの季節変化

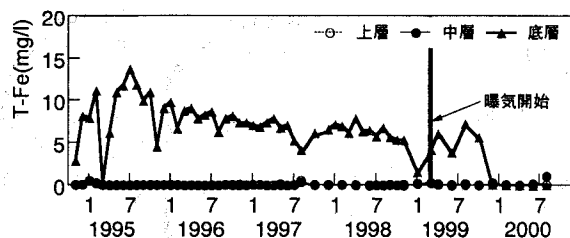


図-14 T-Feの季節変化

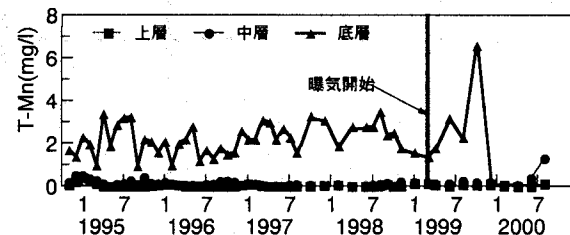


図-15 T-Mnの季節変化

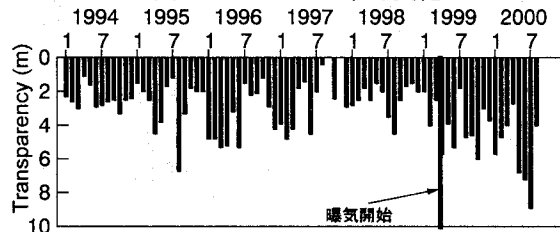


図-16 透明度の季節変化

が再び生じている可能性がある。

(5) COD (図-13)

全層循環以後は、底層で減少傾向を示しながら表層・中層より高い濃度を維持している点が栄養塩の場合と異なる。2000年8月以降、中層でも微増傾向が見られる。

(6) 金属イオン (T-Fe, T-Mn)

図-14に全鉄T-Fe、図-15に全マンガンT-Mnの季節変化を示す。底層のT-Feは曝気開始前から減少傾向にあったが、全層循環にともない表層・中層と同じ濃度にまで減少した。T-Mnも同様の様化が見られるが、2000年8月以降には中層に高い値が検出されはじめています。

(7) 透明度

図-16に透明度の時系列を示す。'99年3月以降の透明度はそれ以前より増加している。図-6に見られるように、曝気循環による表層での水温低下がないにも関わらず、藻類が曝気以前の年に比べ減少している。これは、観測時に視覚的にも認められているが原因は不明である。

4. 曝気にともなう成層破壊

(1) 成層安定度 (ポテンシャル・エネルギー, P.E.)

エアレータによる鉛直混合と従来型の (マクロ・バブル) による曝気循環との相似性を混合効率の観点から考

察する。混合効率を算定するために成層のポテンシャルエネルギーを以下のように定義する。図-17のようにある成層状態 (図-17のA) に対するポテンシャルエネルギーP.E.をP、これを断熱的に混合させた仮想的な中立成層状態 (同図のB) のP.E.をP'とする。ここでは、'99年1月の状態を初期値としてPとP'を初期値からの偏差であらわす。ここでP' > Pであり、「力学的ポテンシャルエネルギー」を $P_{dy} \equiv P' - P$ と定義する。 P_{dy} は成層を均一に混合するのに要する仕事量に相当し、成層安定度が大きいほど P_{dy} は大きくなる。これに対し、P'は熱エネルギー収支に対する水体の膨張・収縮によるP.E.の変化である。ここではP'を「熱的ポテンシャルエネルギー」と称する。対象貯水池のように水温Tと溶解物質濃度 (塩分) Sによって多重成層が形成されている場合、これらは以下のように定義される。

$$P = \rho_0 \alpha g \int_0^{H_0} \{T(z) - T_0\} (H_0 - z) A(z) dz + \rho_0 \beta g \int_0^{H_0} \{S(z) - S_0\} z A(z) dz$$

$$P' = \rho_0 \alpha g \int_0^{H_0} (T_m - T_0) (H_0 - z) A(z) dz + \rho_0 \beta g \int_0^{H_0} (S_m - S_0) z A(z) dz$$

$$P_{dy} = \rho_0 \alpha g \int_0^{H_0} \{T_m - T(z)\} (H_0 - z) A(z) dz$$

$$+ \rho_0 \beta g \int_0^{H_0} \{S_m - S(z)\} z A(z) dz$$

zは底からの距離 (0m~31m), ρ_0 は基準密度, gは重力加速度, α は熱膨張係数で $1.0 \times 10^{-4} (1/^\circ\text{C})$, β は水質分析から得られた電気伝導度から密度への換算係数で $0.745 \times 10^{-6} ([\mu\text{S}/\text{cm}]^{-1})$, T_0 , S_0 はそれぞれ基準時 (ここでは、1994年1月とする) における水温と電気伝導度, T_m , S_m は各月における水温と電気伝導度の体積平均である。

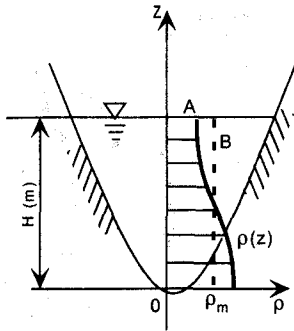


図-17 密度場の模式図

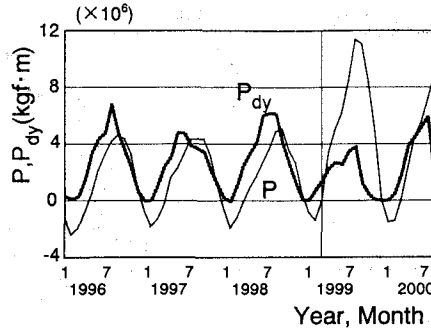


図-18 P, P_{dy} の季節変化

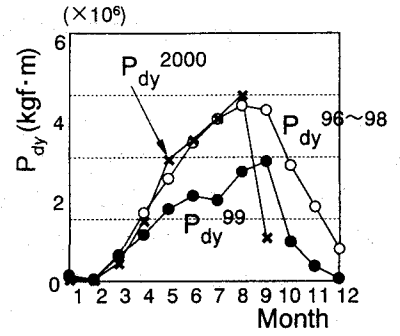


図-19 P, P_{dy} の季節変化 (各年比較)

(2) P.E.の季節変化

このようにして算定された(P, P_{dy})の季節変化を図-18に示す。

曝気開始前の期間(1996年~1998年)において、 P は2月で最小、9月で最大となる。これに対し P_{dy} は1月で最小、8月で最大となり、 P よりも先行した季節変化を示す。曝気開始後の'99年3月以降では P が高い値を示している。これは成層安定度の増加に対応するものではなく、曝気循環によって深層に至るまで水温が上昇し水体の熱的P.E.- P が例年より増加したためである。すなわち、 P の増分は力学的な成層安定度の増減に対応するものではない。力学的な成層安定度をあらわす P_{dy} は曝気開始以前よりも以後の方が低い値を示し、曝気循環によって成層安定度が減少したことを反映している。

一方、2000年夏期以降においては'99年より P_{dy} が増加する傾向を見せ始めている。これは、'99年よりも送気量を600l/hrまで減少させフード除去により大気泡の発生を抑制して、成層が安定に維持されたためである。曝気形態の P_{dy} への影響を明示するために、 P_{dy} の'96~'98年の季節平均、'99年ならびに2000年における P_{dy} の季節変化

($P_{dy}^{96-98}, P_{dy}^{99}, P_{dy}^{2000}$)を図-19に比較する。

以上のように'99年の受熱期における P_{dy} の減少は、曝気による鉛直混合の影響と考えられる。これを確認するため成層破壊効率を試算する。曝気運転のない年度('96-'98年)の P_{dy} 平均値と曝気開始後('99年3月から現在)の P_{dy} との差($P_{dy}^{96-98} - P_{dy}^{99}$)が曝気によるP.E.偏差と考えられる。

一方、曝気システムのエネルギー供給量は

$$W = \rho_r V g H_A \ln(1 + H / H_A) \quad (1)$$

で表される。ここで、 ρ_r は水の参照密度、 V は総送気量、 H_A は大気圧水頭(=10m)、 H は水深である。図-20に($P_{dy}^{96-98} - P_{dy}^{99}$)と W の累積値の履歴曲線を示す。

成層破壊効率は、曝気によるP.E.の時間変化率

$$\Delta E = d(P_{dy}^{96-98} - P_{dy}^{99}) / dt$$

と対象期間のエネルギー供給量 W との比、 $\eta = \Delta E / W$ として算定される。図-20の3~7月においては両者に正の相関が認められ、ほぼ一定の効率で

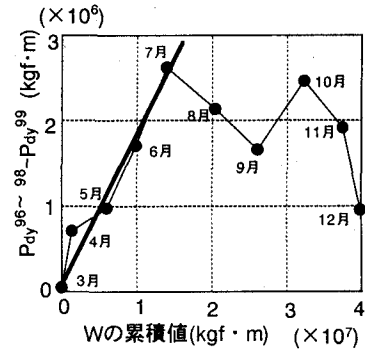


図-20 P_{dy} の偏差と W の累積値の履歴曲線

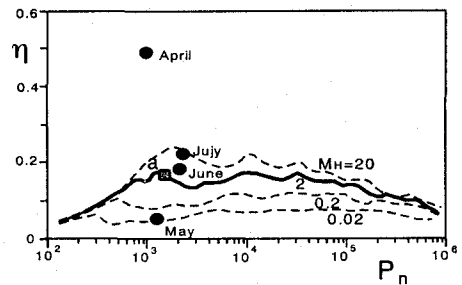


図-21 成層破壊(混合)効率

曝気循環が進行していると推察される。8月以降の放熱期においては自然対流の擾乱が付加されるので、正の相関関係からはずれる。そこで、受熱期だけを対象にして成層破壊効率 η を算定し、ブルーム数 $P_n = N^3 H^4 / Q_{g8}$ (ここで、 N は浮力振動数)とともに図-21に示す。同図には、P.E.の時間変化率 ΔE を各月毎に算定して得た η を●で示す他、4~7月を通して算定した ΔE に対する η (図-20の直線部の勾配と対応)も■(a点)で併記する。図中

$$M_H = Q_0 H_A g / [4(H + H_A) \pi \alpha^3 H u_s^3]$$

($\alpha=0.082$, Q_0 : 送気量)

は気泡のスリップ速度 u_s に関するパラメータであり、曲線群はAsaedaらによって得られた混合効率 η である。エアレータから発生する大気泡の上昇速度を $u_s=0.1 \sim 1 \text{ m/sec}$ として M_H を概算すると、おおよそ $M_H=0.5 \sim 5$ である。図-21から、本実験で得られた効率 η はこれらと同じオーダーにあり、本システムのエアレータにより同程度の混合が生じていたことが確認される。

5. フードの除去とマイクロバブル発生率の調整

鉛直混合を促進した一つの要因として、エアレータから副次的に発生する大気泡が考えられる。マイクロバブルの特質を生かして、成層破壊を最小限に抑えながら深層を曝気することが本実験の目的であるため、大気泡の発生量を削減する必要がある。新たに入手した水中カメラによってエアレータからの気泡発生状況を直接確認したところ、マイクロバブルがフード内に滞留して合体し、大気泡が多量に生成されていることが判明した。これは室内実験で得られた結果と異なる。大気泡発生の原因の一つとして水中ポンプの流量が実験の場合より小さく、フード内での水平方向への吐出力が不足したことが考えられる。そこで、フードを取り外して気泡どおしの合体を防ぐとともに送気量を調整してマイクロバブル発生率の向上を試みた。水中カメラで確認しながら、600 l/hrが最も適正な送気量であると判断し、2000年7月29日以降は送気量をこれに固定してフードを取り外した。前年よりかなり小さな送気量であるので、生産活動の顕著な夏期には酸素消費量を上回るだけ十分な曝気量でないことが懸念されるが、本実験は深層曝気を目的としていること、池水全体の溶存酸素増加が十分ではなくとも、施設拡充によって曝気効果を期待できることから、この送気量の下で今後の水質の推移を監視する。

水温とDO飽和度の鉛直分布に関して、フード除去後の2000年8、9月の観測値 (Case-B) をフード取り外し以前 ('99年) の同時期のデータ (Case-A) と比較し、図-22、23に示す。大気泡の発生が多いフード除去前 (Case-A) に比べ、フード除去後 (Case-B) は水温成層が安定に維持されている。8、9月は有機物分解量の最も多い季節であり、曝気量以上の酸素消費のためにDOはいずれのCaseにおいても減少している。しかし、図-4のようにCase-Bの送気量がCase-Aの1/3程度であるにも関わらず、Case-Bの方が飽和度は高い。これは、マイクロバブル発生率の向上によって中層から深層にかけての酸素の歩留まりが増加したためと考えられる。今後、秋期における溶存酸素の回復を監視しながら、'99年と'98年以前との曝気速度の違いを調査する予定である。

6. まとめ

マイクロバブル・エアレータによって富栄養貯水池の水質浄化実験を実施した。マイクロバブルの水平拡散を促進するために設けたフードがかえって大気泡を多く生成し、予想外の成層破壊をもたらした。これによって長年維持されてきた底層の逆転水温成層、高塩分の無酸素水塊が12月に消失し、始めて全層循環状態に至った。当初の計画通り、成層破壊を最小限に抑えてマイクロバブ

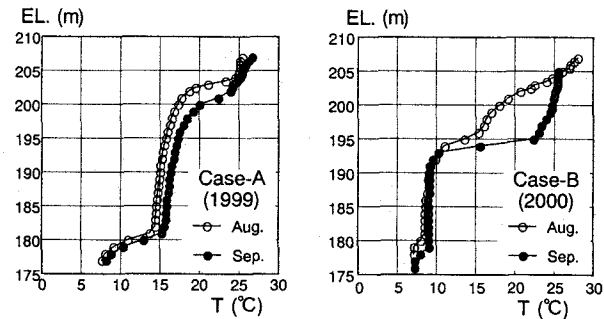


図-22 水温の鉛直分布

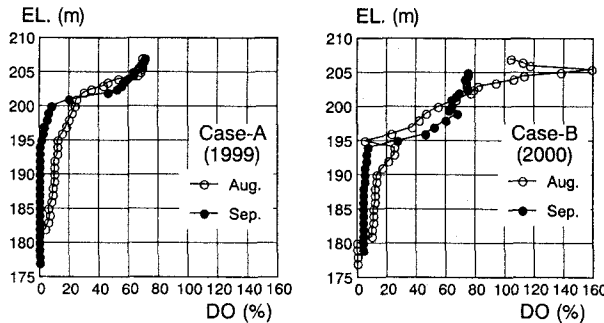


図-23 溶存酸素DO飽和度の鉛直分布

ルによる深層曝気を図るためにフードを除去し送気量を減じた。そのために酸素消費の最も大きな8、9月時点では溶存酸素量を回復するまでには至っていないが、秋期から冬季に至る酸素回復過程を調査し、曝気をしない場合の水質分布との比較から、浄化効率の向上や酸素回復に必要な施設規模を評価する予定である。

謝辞：本研究は平成12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土整備部の関係各位にご協力を得た。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 道奥・神田・伊藤・西川・石川・東野: 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) 道奥・神田・大成・西川・松尾・木戸: 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, 水工学論文集, 第44巻, pp.1119-1124, 2000.
- 3) 大成: マイクロバブル発生技術と水環境蘇生, 日本高専学会誌, 高等専門学校の教育と研究, Vol.3-4, pp.12-20, 1998.
- 4) Asaeda, T. and Imberger, J., Structure of bubble plumes in linearly stratified environment, J. Fluid Mech., Vol.249, pp.35-57, 1993.

(2000.10.2受付)