

# 酸素マイクロバブルを用いた 貯水池の水質浄化システム

## RESERVOIR PURIFICATION BY USING MICRO-BUBBLE OXYGEN

道奥康治<sup>1</sup>・酒谷祐輔<sup>2</sup>・松尾克美<sup>3</sup>・尾田敏範<sup>4</sup>・原義晴<sup>4</sup>

Kohji MICHIOKU, Yuhsuke SAKATANI, Katsumi MATSUO, Toshinori ODA and Yoshiharu HARA

<sup>1</sup>フェロー会員 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)

<sup>2</sup>学生会員 学(工) 神戸大学大学院自然科学研究科 (同上)

<sup>3</sup>正会員 (株) 中電技術コンサルタント (〒734-8510 広島市南区出汐2-3-30)

<sup>4</sup>非会員 (株) 中電技術コンサルタント (同上)

In order to purify reservoir hypolimnion most efficiently, a new system was developed by using an oxygen micro-bubble aerator. Since the oxygen micro-bubbles show much higher solubility than the air micro-bubbles, dissolved oxygen in the hypolimnion was tremendously recovered and even over-saturated. In addition the micro-bubble oxygen scarcely agitated water and thus the thermal stratification was well preserved without generation of predominant vertical mixing. While the reservoir was suffered from serious deoxidation and contamination in the hypolimnion before the water purification, concentrations of nutrients, manganese and iron significantly decreased right after starting the hypolimnetic aeration. The hypolimnion is now almost free from contamination and the system successfully shows high performance of water purification.

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

### 1. はじめに

富栄養水域の水質を改善するためにとられる池内対策は、①表層または全層の鉛直混合を促進し、有光層の内部生産抑制・貧酸素化した深水層の水質交換をはかる曝気循環と②成層を維持したまま深水層に酸素を補給する深層曝気に分類される。前者は有機物生産の根源を断つ方法、後者は生産された有機物を分解する方法である。いずれの対策がより適切かは、水域の水理・水質特性を見極めて判断することが重要である。

湖盆地形が急峻な場合には、貧酸素化した深水層に栄養塩や金属の溶存成分が滞留して汚濁が進行していることが多く、①の鉛直混合方式の水質改善においては深層汚濁水を表層に浮上拡散させ、富栄養化をかえって促進することが懸念される。著者らは、微細気泡(マイクロバブル)発生技術(図-1)を利用して成層構造を維持しながら深層を曝気する水質改善システムを開発した<sup>1)~3)</sup>。これにより深水層の無酸素化は軽減され、深水層における電気伝導度とマンガン・鉄・栄養塩の濃度が飛躍的に減少することを実証した。しかし、酸素消費がピークを

迎える9,10月頃において、短期間ながらもなお深水層が無酸素状態になる時期が出現した。したがって、酸素消費の大きな水域や貯水容量の大きな水域を対象とする場合には、より高い効率で溶存酸素を回復させるための技術改善が必要である。

空気を用いて深層を曝気した場合には、酸素分圧が全体の約1/5であり、窒素は難溶解性であるため送気量の

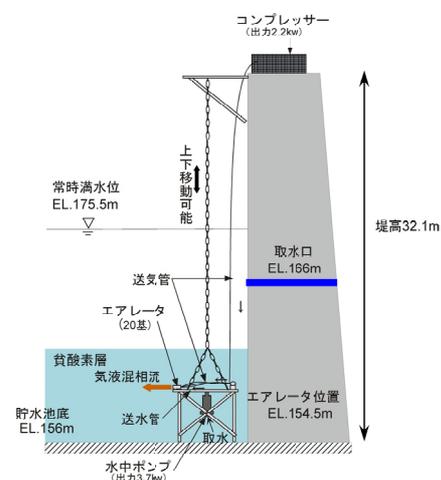


図-1 水質浄化システム

何割かは水面まで浮上し浄化効率や深層水の一部を浮上させるなどの問題が残る。本研究では、深層水の汚濁が見られる別のダム貯水池において、純度70~90%の酸素マイクロバブルを深層水へ供給し水質浄化を試みた。

## 2. 対象貯水池の概要と水質浄化の背景

調査対象は堤高32.1mの重力式ダムによって形成された総貯水容量375,000m<sup>3</sup>の多目的ダム貯水池である。同貯水池は円山川水系に属し、集水面積は3.1km<sup>2</sup>である。越流標高はEL.175.5m、貯水池底の標高はEL.156mである(図-1参照)。出水時には常用洪水吐からの自然越流方式によって流量が調節され、調査期間においてはEL.166mから上水などの目的で取水されていた。貯水池の年交換率 $\alpha$ (年間総流入量/総貯水容量)は $\alpha=6\sim9$ 程度と低く成層型貯水池である。

例年、受熱期において深層水の貧酸素化が著しく、底泥からの金属塩類が溶出し高い電気伝導度が検出される。対象貯水池は、当該地域の水源を供給する生活貯水池としても位置づけられており、溶出マンガンに起因する「黒水」や原水の貧酸素化の浄水工程への影響が懸念され、酸素マイクロバブルによる水質浄化を実施するに至った。

## 3. 水質浄化システム

2004年3月からマイクロバブル・エアレータ<sup>1), 2), 3)</sup>を用いて深層曝気を開始した。これまでの水質観測に基づいて曝気対象となる貧酸素水塊の最大容量を78,000m<sup>3</sup>(≒堆砂容量)として、観測したDO濃度の時間的変化率から酸素消費速度の最大値を0.1g/m<sup>3</sup>・dayと概算した。高い溶解効率を得るために、供給気体として酸素を採用した。

図-2に示すダム中央天端から写真-1のエアレータを吊下し、湖底上1.5mのEL.157.5mに設置した。深層水の貧酸素水は水中ポンプで吸入され、地上の酸素発生器で生成された酸素とエアレータ・ユニットの中で混合し、気泡径約数十 $\mu\text{m}$ の酸素マイクロバブルを含む気液混相流として再び深層水へ噴出される。本システムでは20基のユニットを設置した。地上から水中への酸素は、コンプレッサーの送気力と水中ポンプが生成するエアレータ内の負圧が駆動力となって送気される。コンプレッサーを稼働させない場合には、約15mの水深までエアレータ・ユニット内の負圧により大気を自吸することができる。噴出気泡がマイクロバブルとなるためのエアレータ・ユニット1基あたりの適正送気量は1L/min=60L/hr以下である。これ以上の送気量になると気泡径が数mm以上になり、気泡の浮上攪乱によって深層水の上層への拡散が顕著となる。

水中ポンプの諸元は吐出流量：200L/min、揚程：30m、



写真-1 エアレータ (設置前の2004年3月に撮影)



写真-2 地上機器 (ゲートハウス内)

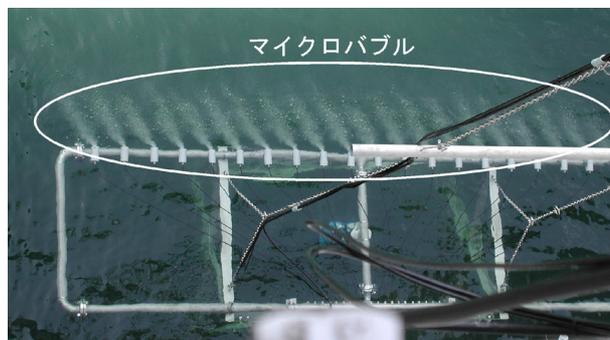


写真-3 マイクロバブル発生状況の確認

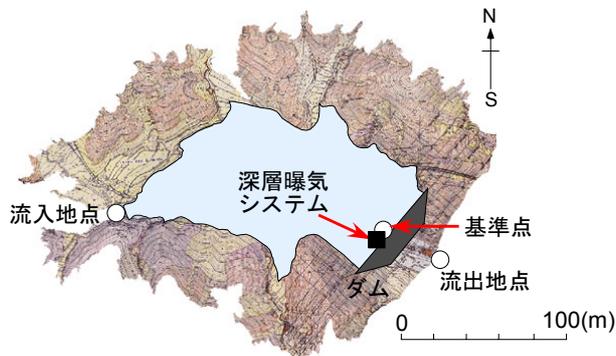


図-2 対象貯水池における曝気システムと水質計測点の位置

出力：3.7kW，酸素発生器の最大供給量と所要電力はそれぞれ1,200L/hr，6.1kW，コンプレッサーの出力は2.2kWである。コンプレッサー，酸素発生器，電源と操作盤はダム天端のゲートハウス内に写真-2のように設置された。写真-3には，設置前に水面直下で確認したマイクロバブルの発生状況を示す。エアレータ・ユニット内の構造によってユニット内には気液混相のらせん流が生成される。そのためエアレータから吐出された混相噴流は写真-3のように左へ偏向する。

システムの「必要酸素供給速度(kg/day)」は，前述の「最大酸素消費量」と「取放水により流出する酸素量」の合計として推算され，深層曝気システムの諸元を設計した。2004年3月2日より，酸素供給量1,000L/hrでシステムの運転を開始した。運転開始後の水質観測に基づき，速やかに溶存酸素が全層で飽和状態にまで回復していることを確認したため，5月14日には全送気量を運転開始時の約1/3に相当する300L/hrにまで絞り込んだ。現時点では供給量を設定するための客観的根拠がないため，試行的に設定したが，後述のように，これでも酸素供給は結果として過大であった。11月9日には自然対流による全層循環状態に至ったため，深層曝気を中止した。図-4にシステムの運転実績を示す。

#### 4. 水質観測

2002年7月から2004年の12月の間，毎月1回，水質観測を実施した。貯水池の水質はダム中央の天端より多項目水質計とバンドン採水器を用いて計測した。水温，電気伝導度（EC），溶存酸素濃度(DO)，酸化還元電位(ORP)，濁度，クロロフィルa濃度(Chl-a)，水素イオン濃度(PH)については多項目水質計により水深方向1m間隔で計測した。全窒素(T-N)，全リン(T-P)，全鉄(T-Fe)，全マンガン(T-Mn)の濃度，CODについては上層（水面より下方0.5m），中層（水深の1/2の高さの位置），下層（EL.157mの位置）より採水し，水質分析で求めた。

貯水池の流入点と流出点においても，以上の水質項目を計測した。

#### 5. 水温構造への影響

マイクロバブルを用いた場合には，気泡噴流による擾乱が小さいため成層構造をほとんど破壊することなく深層水が曝気されることを確認している<sup>1)~3)</sup>。本研究において酸素マイクロバブルを用いたねらいは，空気よりも酸素分圧を高くして溶解・曝気効率を向上させることと，溶解促進により浮上気泡を減少させ成層構造を維持することにある。以上のことから深層曝気が水温構造におよぼす影響を確認する必要がある。

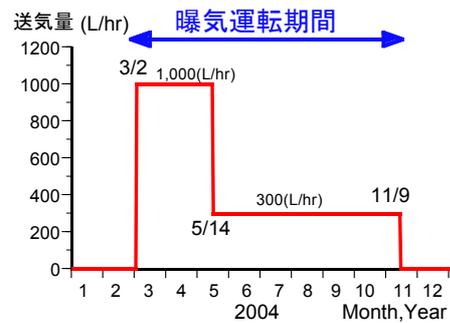


図-4 総送気量の時系列

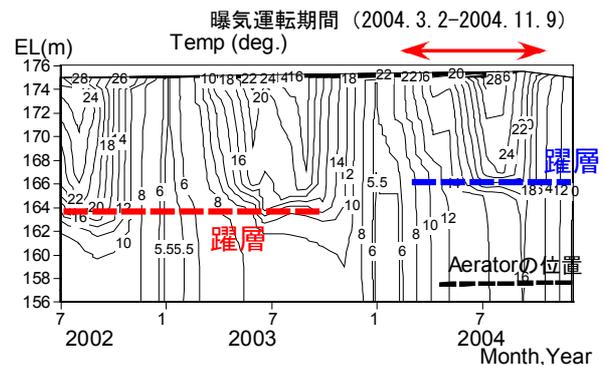


図-5 水温(°C)の季節変化

図-5に実験開始前の2002年7月から2004年12月までの水温分布の季節変化を示す。同図にはEL.157.5mに設置されたエアレータの標高を太破線で併記している。

深層曝気が行われる以前（～2004年2月）においては，取水によって形成された二次躍層がEL.163～165mの付近で推移しながら発達し（取水口位置はEL.166m），それより下方の深水層では緩やかな水温勾配をともなう弱い成層が形成されている。

曝気開始後の2004年3月以降においても，受熱期における安定な水温成層が維持されている。しかし，曝気開始前の水温躍層（図中の赤破線）よりも1～2m程度上層側へ水温躍層（図中の青破線）が移動しており，深水層の乱れによって表層水が深水層へと連行されたことが示唆される。このことは，深層水温が曝気以前よりも一様化し擾乱が存在する間接的証拠となっていること，熱源がないにも係らず深層水温が曝気開始以前よりもやや上昇していることなどから裏付けられる。

以上のように，深層曝気中も水温躍層が維持され，深層水の表層への顕著な浮上拡散は生じないが，深層水質の均質化と表層水の深水層への連行など部分的な鉛直混合もともなうことが確認された。

#### 6. 溶存酸素濃度(DO)，酸化還元電位(ORP)

溶存酸素濃度（DO）の分布を図-6に示す。深層曝気以前（～2004年2月）には，深水層の貧酸素化が受熱期に顕著であり，同図の水色領域で示すようにDO=0mg/l

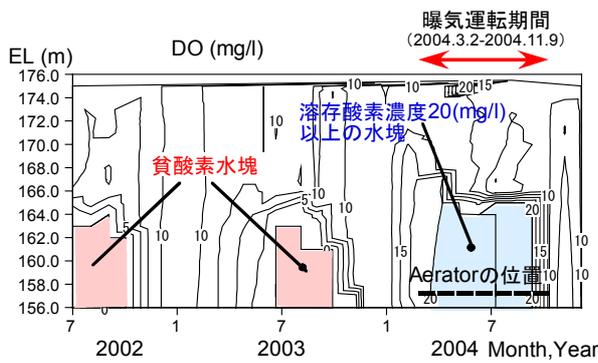


図-6 溶存酸素濃度(DO[mg/l])の季節変化

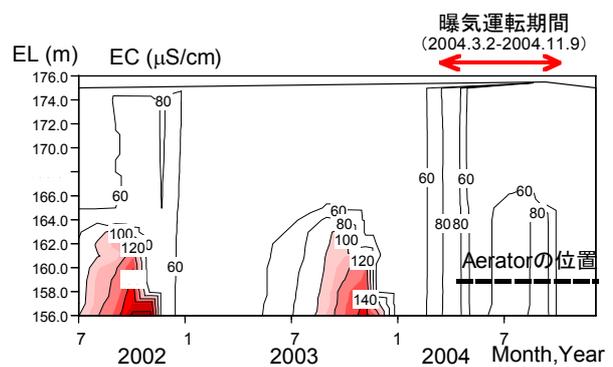


図-8 電気伝導度(EC)の季節変化

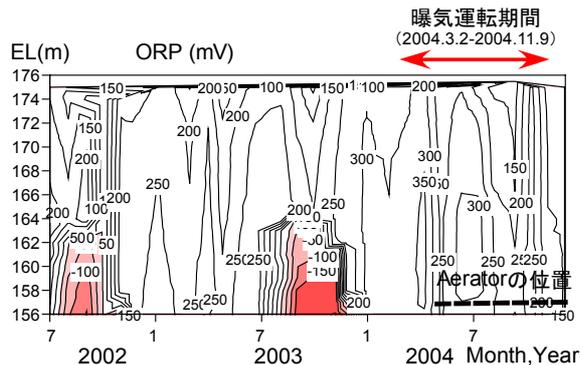


図-7 酸化還元電位(ORP[mV])の季節変化

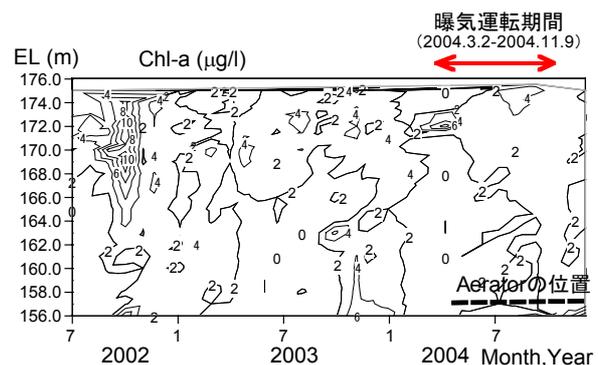


図-9 クロロフィルa(Chl-a)の季節変化

の無酸素水塊が7月から9月にかけて発達していた。2004年3月に開始した深層曝気により、深水層の溶存酸素は飛躍的に回復し、開始直後の同年4月には溶存酸素計で検出不可能な過飽和状態（DO飽和度>200%、DO濃度>20mg/lにまで至った。ただちに酸素供給量を1,000L/hrから300L/hrまで絞り込んだが、過飽和状態は維持された。受熱期後半に急増する内部生産に備えて、さらにその後も300L/hrを維持した。結果的には、同図に見られるように、秋の全層循環期に至るまで深水層の過飽和状態は継続し、酸素が過剰に供給されたことがわかる。過飽和状態の深層水を採水すると、微細な酸素気泡が多量に発泡し、きわめて高濃度に酸素が溶解していることがわかった。一般に、安定な密度成層が形成された貯水池では、成層効果によって鉛直方向の物質の拡がりや抑制され、物質は水平方向へより広範囲に拡がる。実際に、溶存酸素の水平方向への拡がりを確認するために、ダム軸方向に約100mの範囲で計測点を移動しながら水質の水平分布を計測した。その結果、DOなどの水質諸項目は常に水平方向に均一であったことから、溶存酸素はエアレータ付近に偏在することなく速やかに水平方向へ拡がっていると考えられる。曝気対象である深水層の水平スケールは数百m程度であるため、この範囲であれば供給されたDOは短時間にほぼ一様に配分されると考えられる。

図-7に酸化還元電位ORP(mV)の季節変化を示す。曝気開始前の受熱期に大きな負のORPをとり、著しく還元状態にあった深水層では、曝気開始後、表層程度あるいは

それより大きな正のORPが検出され、完全な酸化的環境へと改善されている。

## 7. 電気伝導度 (EC) に見られる水質改善効果

図-8には、電気伝導度EC( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )の季節変化を示す。DOとORPで見られたように、深層曝気以前（～2004年2月）には、受熱期に深水層が還元状態に維持されるため、栄養塩・金属成分などが高濃度に溶解し、高い電気伝導度ECとしてあらわれている。

2004年においては、曝気により深水層が受熱最盛期においてさえ高い酸化状態に維持され、高塩分水塊は消失した。深層曝気によって底泥からの嫌氣的溶出は相当程度抑制され、表層からの沈降有機物も十分に分解されているものと考えられる。

## 8. クロロフィルa(Chl-a)、水素イオン濃度(pH)、濁度におよぼす深層曝気の影響

図-9～11にクロロフィルa (Chl-a)、水素イオン濃度(pH)、濁度の季節変化を示す。

図-9のChl-a分布では、2004年3月の前後において特に顕著な違いは見られない。曝気循環によって栄養塩濃度の高い深層水が表層へ拡散浮上した場合には、内部生産の増加をもたらす恐れがあるが、深層曝気が誘因となるようなChl-aの増加は見られない。水温分布（図-5）にも

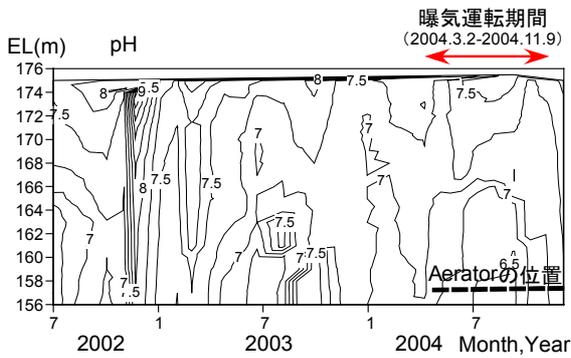


図-10 水素イオン濃度(pH)の季節変化

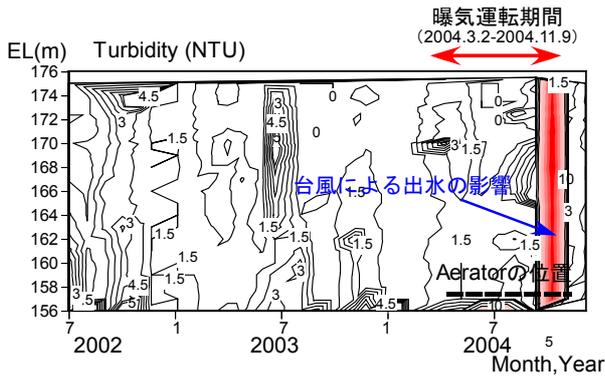


図-11 濁度(NTU)の季節変化

見られたように、深層曝気は水温躍層を破壊しておらず、深水層の均質化や表層水の深層側への連行など微弱な鉛直混合しか生じていないようである。

図-10のpHにも深層曝気による顕著な影響は見られない。曝気開始後の受熱期においてpHの成層が弱いように見えるが、曝気前後の差は顕著ではない。

図-11の濁度を見ると2004年11月において全層スケールで高い濁度が検出されている。これは、台風0423号による出水の影響である。貯水池容量を上回る流入によって全層にわたり水質が一樣に混合し、高い濁度が滞留した。その他の水質にも台風の影響が顕著にあらわれている(後述)。一般的には、栄養塩濃度の変化にともなう内部生産の増減、金属イオンの酸化と酸化物の沈降促進など、濁度変化に反映される水質項目に対しては深層曝気の影響が多少あらわれる。しかし、池内の水質反応以上に流域から供給される物質負荷の方が濁度に対して大きく影響しており、深層曝気に直接起因するような濁度変化は見られない。

## 9. 酸素曝気による金属イオンの低減

### (1) 全マンガン(T-Mn)への影響

図-12に示すように、曝気開始以前(～2004年2月)には、受熱期一特に9月において、下層(EL.157m:水温躍層より下方で深水層に位置する)で上層・中層よりも高い全マンガン濃度(T-Mn)が検出される。2002年には、中層の位置においても下層の約半分程度に相当する高濃

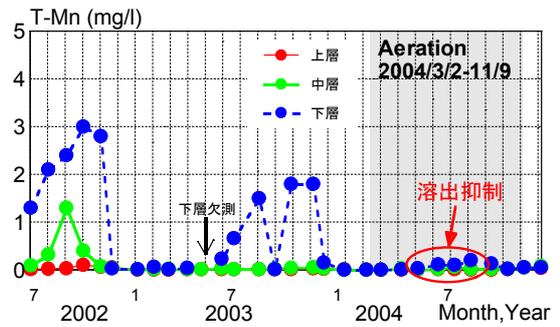


図-12 全マンガン(T-Mn)の季節変化

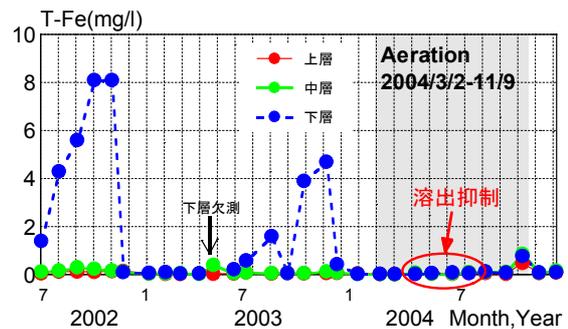


図-13 全鉄(T-Fe)の季節変化

度のT-Mnが9月に検出されている。

このように深層曝気が行われる以前においては、受熱期に貧酸素水塊が拡大し、深水層が嫌気的環境に至ると底泥からマンガンが溶出し、高いT-Mn濃度がもたらされた。これは、「黒水」を生成し浄水障害の一因にもなる。放熱期には全層循環によって貧酸素層が消失し、溶存態マンガンの酸化にともなう沈降と全層への拡散希釈によって、下層のT-Mn濃度は減少する。

これに対し2004年3月以降では、9月においてさえ下層のT-Mnが上・中層なみの低濃度レベルに維持されている。これらのことから、深層曝気によって還元的環境が解消され、底泥からのマンガン溶出を相当程度抑制していること、溶存態マンガンの酸化によって湖底面への沈降が促進され、下層の水質汚濁を抑制していることなどがわかる。

### (2) 全鉄(T-Fe)への影響

図-13に見られるように、全鉄についても曝気開始前後において全マンガンと同様の分布特性が見られる。曝気前においては、全マンガンと同様に2002年よりも9月の下層における全鉄濃度が大きく、貧酸素水塊の成長が鉄の溶出に影響をおよぼすことがわかる。曝気後はマンガンと同様に鉄の溶出が相当程度抑制され、溶存態鉄の酸化と湖底面への沈降を促進して、高い水質浄化機能を発揮していることが認められる。

## 10. 酸素曝気による栄養塩濃度の低減

### (1) 全窒素(TN)への影響

図-14に上層、中層、下層で計測された全窒素(TN)濃度の季節変化を示す。上・中層のTN濃度には特に特徴的な季節変化は見られないが、下層のTN濃度が曝気開始前(～2004年2月)の9月に大きな濃度を示すことはT-Mn、T-Feに見られた特徴と同様である。また、2002年における下層のピーク濃度の方が2003年のそれよりも高く、下層内のTNは金属と類似の挙動を示している。深層曝気によって底泥からの窒素成分の溶出抑制、硝化、有機態窒素の分解が促進されていると思われる。その結果、下層での大きなピーク濃度は消失し、上・中層と同程度の濃度レベルで推移している。このことから、金属イオンと同様、TNに対しても深層曝気の水質浄化機能を発揮していることがわかる。2004年11月の観測値においては台風0423号がもたらした出水の影響と思われるTN濃度の一時的な増加が全層にわたって見られる。

### (2) 全リン(TP)への影響

図-15の全リンの季節変化を見ると、全層を通して比較的濃度が低く、各層間の濃度レベルにはT-Mn、T-Fe、TNの場合ほど顕著な差異は現れていない。しかし、2004年のTP濃度は2002～2003年に比べると全体的に低減している。酸化還元状況にともなう「水-堆積層」間の物質交換においては、リンと鉄の挙動が密接に連動することから、図-13のT-Feの挙動を考慮すると、2004年におけるTP濃度のわずかな減少は深層曝気によるリンの溶出抑制を反映している可能性がある。

なお、2004年11月において全層のTP濃度が急増しており、台風0423号の出水がT-Mn、T-Fe、TNの場合以上に顕著に現れている。このことは、他の物質の場合よりも貯水池内のリンの挙動に対して流域負荷の影響がかなり大きいことを示唆している。

## 11. まとめ

酸素マイクロバブルを用いた深層曝気システムを開発し、貧酸素化が顕著な貯水池深水層の浄化実験を実施した。主な結果は以下のように要約される。

- (1) 深層曝気を開始する以前の水温分布と比較すると、深層曝気によって深水層が一様化し水温躍層が1-2m程度上昇するなど弱い鉛直混合が認められた。しかし、水温躍層は安定的に維持され、深水層の水質浄化が良好に達成された。
- (2) 同規模の他の貯水池で実施した空気マイクロバブルを用いた深層曝気においては、貧酸素化が最も顕著な9月において無酸素水がなお残留したのに対し、本実験では、無酸素水が完全に解消され、9月にお

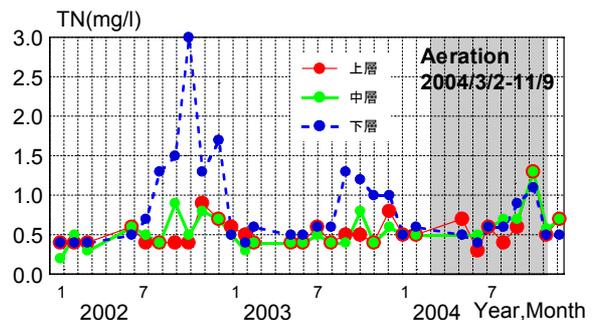


図-14 全窒素(TN)の季節変化

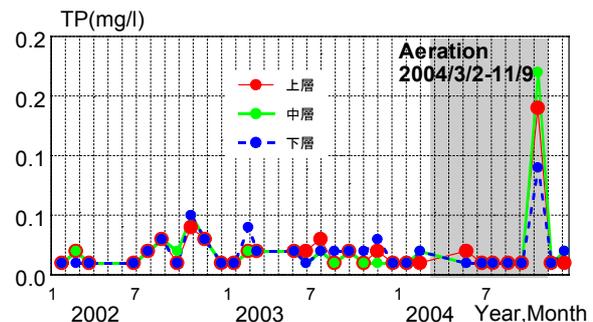


図-15 全リン(TP)の季節変化

- いても深水層の溶存酸素が過飽和状態に維持された。
- (3) クロロフィルa、濁度、栄養塩などの水質分布から、マイクロバブル噴流が汚染の進んだ深層水を表層にまで浮上拡散させ富栄養化を促進することはないと判断される。
- (4) 深層曝気によって下層のマンガン・鉄・栄養塩の濃度は相当減少し、本システムの高い水質浄化機能を確認した。
- (5) 2004年度の実験より、現状では溶存酸素の供給は過度であると判断される。システムの構造上、出力を下げることは難しいため、一定出力での間欠運転など、システム運用の効率化をはかる必要がある。

謝辞：本研究を遂行するに際しご協力頂いた兵庫県県土整備部河川整備課、但馬県民局八鹿土木事務所の関係各位、神戸大学技術職員前田浩之氏に謝意を表す。

### 参考文献

- 1) 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年
- 2) 道奥・神田・大成・森口・松尾・白澤・松尾：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年
- 3) 道奥・神田・大成・森口・松尾・松尾：曝気形態と貯水池深水層水質との関係について，水工学論文集，第46巻，pp.1091-1096，2002年。

(2005.9.30受付)