

# 流動発生による富栄養化した貯水池の 水温躍層の破壊実験

## FIELD EXPERIMENT ON FLOW-INDUCED DESTRUCTION OF THERMOCLINE IN A EUTROPHIC RESERVOIR

野々村敦子<sup>1</sup>・森本茂昭<sup>2</sup>・河原能久<sup>3</sup>・野間京二<sup>4</sup>  
Atsuko NONOMURA, Shigeaki MORIMOTO, Yoshihisa KAWAHARA,  
Kyouji NOMA

<sup>1</sup>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 (〒761-0369 高松市林町2217-20)

<sup>2</sup>学生会員 香川大学大学院 工学研究科安全システム建設工学専攻 (〒761-0369 高松市林町2217-20)

<sup>3</sup>フェロー会員 工博 広島大学大学院教授 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)

<sup>4</sup>学生会員 香川大学 工学部安全システム建設工学科 (〒761-0369 高松市林町2217-20)

Oxygen levels in eutrophic water bodies can become rapidly depleted at the presence of stable thermal stratification. The anoxic condition induces the release of nutrients and heavy metals from bottom sediments, leading to water quality problems. In Goten reservoir, we installed two sets of jet flow generator. One jet flow generator transports the water near free surface and eject it near the bottom while the other discharges pumped groundwater near the bottom. Field measurement has been carried out to understand the destratification process by the induced flow and the resultant changes in water quality. It is demonstrated that the jet flow generators accelerate the destratification process considerably and that the spatial distribution of water quality in a horizontal plane shows little difference during the process. It is also found that further improvement with the jet flow generators is necessary to increase more effectively the dissolved oxygen concentration near the bottom.

**Key Words :** eutrophication, water quality, jet generator, destratification, reservoir, dissolved oxygen

### 1. はじめに

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に発生する。一方、底層部では、その死骸など、沈降した有機物の分解のために、酸素消費が進む。これに対し、水温成層の発達により底層部への酸素の供給が抑制されるため溶存酸素が欠乏し、底泥からの栄養塩類や鉄、マンガンなどの金属イオンの溶出が促進され、深刻な利水障害が生じている。

底層の水質改善対策の一つとして曝気が行われている。それらは底層曝気法<sup>1,2)</sup>と成層破壊型曝気法<sup>3,4)</sup>との2つに大別される。底層曝気法では、底層に酸素を供給することを目的としている。溶存酸素効率を上げるために、マイクロバブルを水中に放出する手法もある<sup>5)</sup>。マイクロバブルを用いた手法は貯水池の無酸素水塊の拡大を抑制した事例もあるが、一方で、送気した酸素量が内部生産による酸素消費量よりも小さい可能性もある。成層破壊型曝気法は、貯水池底層部に圧縮空気を注入し、上昇する気泡によって温度成層を破壊し、鉛直混合を引き起こすこ

とにより、成層を破壊して底層部へ酸素を供給するという手法である。この手法は、水質を一様化するとともに水中での溶存酸素を増加させ、貧酸素もしくは無酸素状態を緩和することが狙いである。しかし、この手法は、表層への栄養塩供給を行い、表層の植物プランクトンの大量発生を招く危険性もある。

本研究では夏季の富栄養化が著しい貯水池の水質改善に向けて、水流発生装置を用いて表層水を底層に送り込むことによって鉛直混合を引き起こし、温度成層を破壊するという現地実験を行った。本研究の目的は次に示す2点である。

- (1) 水流発生装置を稼動することによって水温成層が破壊する過程を現地観測データから明らかにする。
- (2) 水温成層が破壊されるのに伴う貯水池内の水質の動態を把握する。

### 2. 御殿貯水池の概要と経年変化

#### (1) 御殿貯水池の概要

研究対象とした貯水池は、香川県高松市北部の山腹に位置する御殿貯水池(図-1)で、御殿浄水場の自

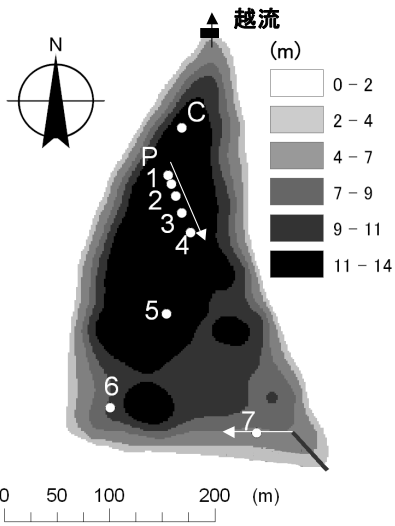


図-1 御殿貯水池（白矢印は水流方向）

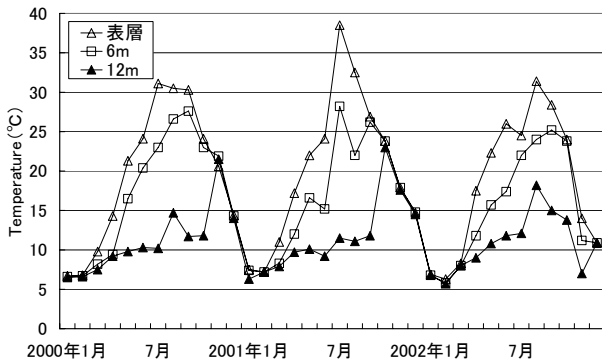


図-2 C地点における水温の経年変化

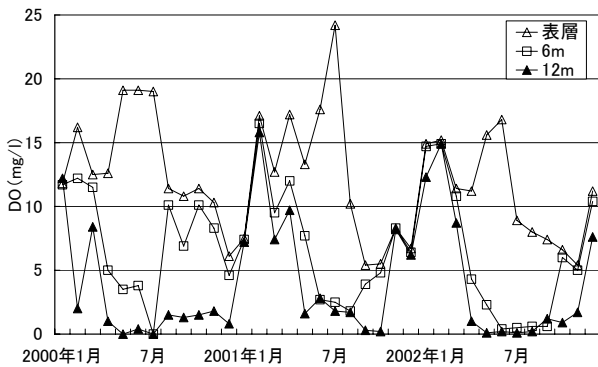


図-3 C地点におけるDOの経年変化

己貯水池として利用されている。総貯水量は524,000m<sup>3</sup>、平均水深は9.2m、湛水面積は60,000m<sup>2</sup>、回転率は4以下である。貯水池には現在、南西部（図中の地点6）と北部（地点C）から香東川の伏流水が、南東部の地点7から御殿貯水池の南東に位置する奥の池付近で揚水された地下水が流入している。また、貯水容量を超える場合は、貯水池の北端から越流させている。平成14年までは、これらに加えて、家庭雑排水が流入する本津川の表流水も流入してい

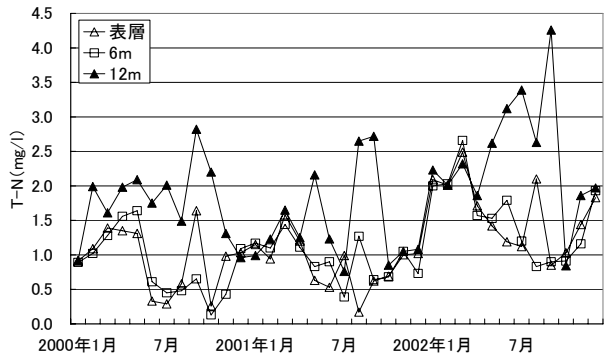


図-4 C地点におけるT-Nの経年変化

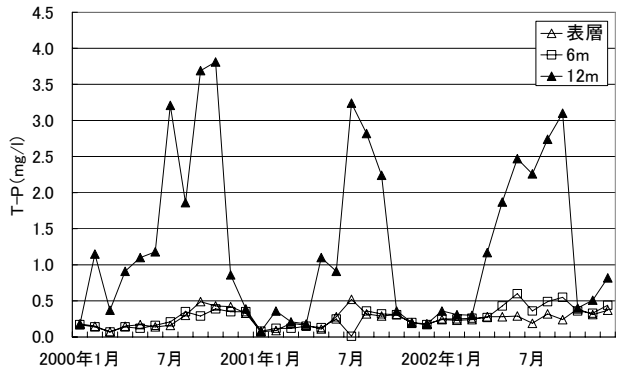


図-5 C地点におけるT-Pの経年変化

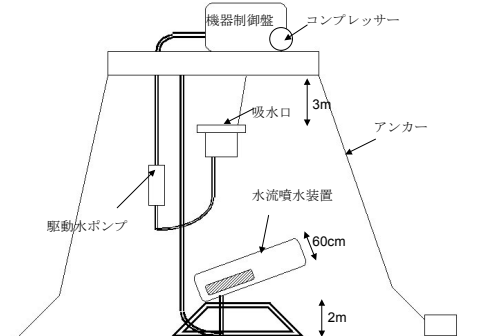


図-6 水流発生装置

た。このことが、現在の貯水池の富栄養化を招いた原因の一つであると考えられている。浄水場に送る水の取水口は、地点Cの満水時からの水深が7.4mの深さにある。また、池底にあるドレンバルブから底層部の水が排出されることもある。

## (2) 御殿貯水池の水質の経年変化

高松市水道局は毎月、図-1中のC地点で水質の計測している。そのデータを用いて2000年1月～2002年12月の3年間の水質変化を調べた。図-2に御殿貯水池の水温変化を示す。3年間に共通して、10月～12月にかけて成層が崩れて鉛直混合が起り、全層一様な温度分布となる。また、成層期に底層では貧酸素または無酸素状態となる（図-3）。

T-N、T-Pは毎年底層で高い濃度を示しており、9月頃にピークがある（図-4、5）。また、これらの

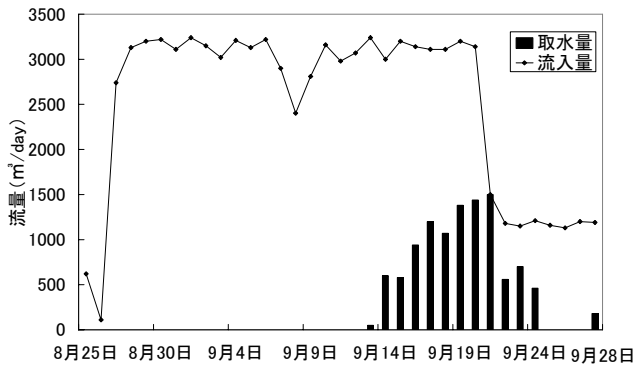


図-7 実験期間中の取水量と流入量

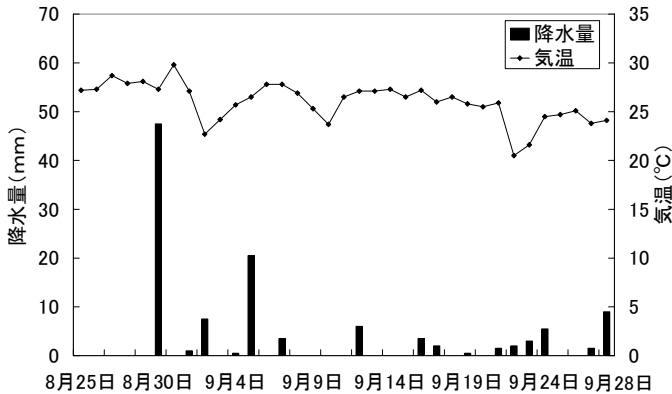


図-8 実験期間中の気温と降水量

ピークはそれぞれアンモニア態窒素とリン酸態リンのピークと一致し、それぞれの多くを占めていることが分かった(図は省略)。すなわち、栄養塩の動態から見ても、夏季には貯水池で酸素が著しく不足していることが確認された。

### 3. 水流発生装置の概要

図-6に御殿貯水池に設置された水流発生装置を示す。設置位置は図-1中の地点P及び地点7にある。地点Pでは水深は約13mである。水深3mの位置にある吸水口から取水し、底から2m、上向きに20°の角度をつけて設置された放出口から3600 m<sup>3</sup>/日で南東方向に噴出している。放出口にはイジェクター方式のノズルが装着されている。コンプレッサーで圧縮した空気を送ることで水と同時にバブルを噴出することも可能であるが、今回の実験では噴出する水量を大きくするため、バブルなしの水流(0.04m<sup>3</sup>/s)を発生させた。また、上向き20°の角度で噴出することにより、底泥の巻き上げを抑制し水をより広範囲に送ることが可能となる。また、図-1中の地点7では水深7.5mの位置に上向き15°の角度で水流発生装置を設置している。このポンプの性能は最大1400m<sup>3</sup>/日であるが、地下水の揚水量が変化するのに対応して、噴出する流量も変化する。

表-1 調査・分析項目

	水温	pH	EC	SS	クロロフィルa	濁度	DO	T-N	T-P	Fe,Mn	各種イオン
8/25	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
8/27	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
8/28	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
8/29	○	○	○	×	○	○	○	×	×	×	×
8/31	○	×	○	×	○	○	○	×	×	×	×
9/1	○	×	○	×	○	○	○	×	×	×	×
9/8	○	○	○	×	×	×	○	×	×	×	×
9/14	○	○	○	×	○	○	○	×	×	×	×
9/17	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	○
9/21	○	○	○	×	○	○	×	×	×	×	×
9/24	○	×	○	×	○	○	○	×	×	×	×
9/28	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

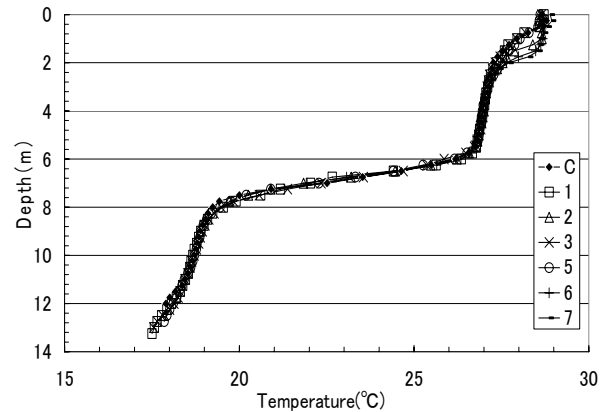


図-9 水温分布(8/25)

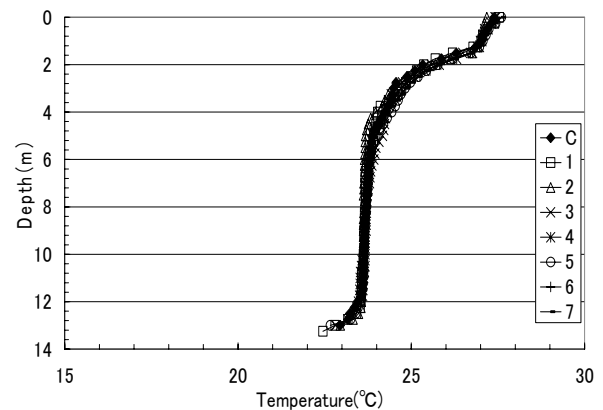


図-10 水温分布(9/14)

### 4. 流動・水質調査・分析

#### (1) 調査時期

水流発生装置は7月20日～8月2日まで予備実験を行った後、8月26日の午後8時から本格的に運転を開始した。調査は運転直前である平成16年8月25日から行った。

図-7に実験期間中の取水量と流入量の総量を示す。流入量のうち、香東川の伏流水は2000 m<sup>3</sup>/日であり、残りは奥の池付近の井戸水である。この間、流入量が取水量を大きく上回っている。8月には貯水池からの取水は行われておらず、9月13日から徐々に行われている。なお、実験期間中の貯水位は常時満水位に保たれていた。

図-8に実験期間中の高松気象台の日平均気温と日

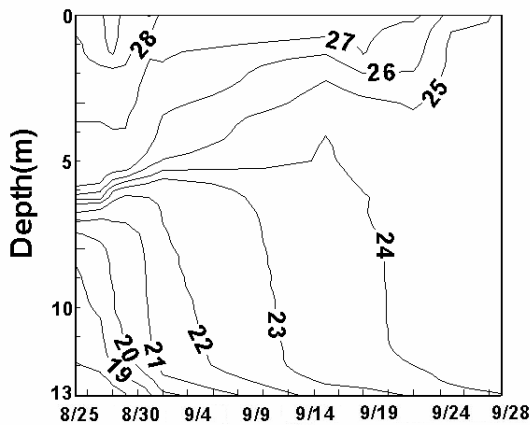


図-11 地点1における水温分布

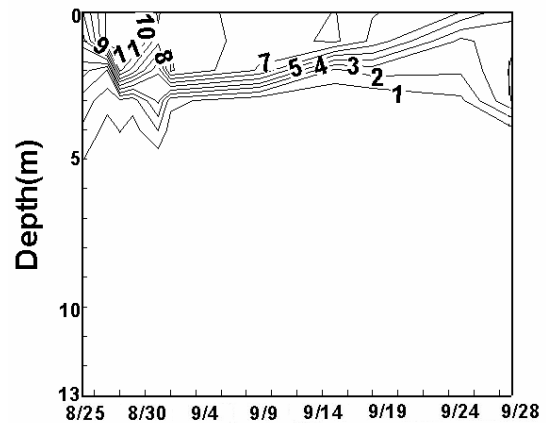


図-13 地点1におけるDOの分布 (単位: mg/l)

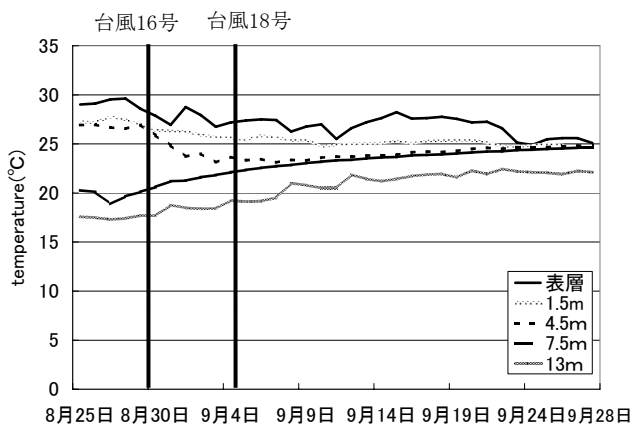


図-12 地点1における水温の連続観測結果

降水量を示す。8月30日には台風による日降水量が50mm近くあった。9月5日にも台風の影響により日降水量が20mmを超えた。しかし、貯水池には主に取水した井戸水と伏流水が流入しており、降雨による水質の変化はほとんど見られなかった。

## (2) 調査・分析項目

表-1に調査日ごとの調査項目と分析項目を示す。主要な項目と使用した機器は、水温、電気伝導度、クロロフィルa (アレック電子株式会社, クロロテックACL1183-PDKを使用), DO (ワイエスアイ・ナノテック株式会社, ハンディメータ, model 85), pH (堀場製作所, D-54Tを使用), 各種イオン ( $F^-$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_2^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Na^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ) (島津製作所, イオンクロマトグラフィ, PIA-1000), 植物プランクトン, SS, T-P, T-N, TOC, Fe, Mnである。

## 5. 調査・分析結果と考察

### (1) 水温分布の場所的变化

貯水池内の8地点において水温分布を測定した。実験を開始する直前の8月25日の水温分布 (図-9) には地点ごとの差が見られない。水温は、装置稼動直後には地点ごとの差が見られたものの、その後8

月28日以降では地点ごとの差は見られず (図-10), 貯水池全体で水平面で一様であった。

### (2) 水温分布の時間的变化

図-11に水温分布の時間的变化を示す。8月25日から9月1日には、水温躍層下部の水深6mから水深12mにおいては水温が $0.5^{\circ}C$ /日上昇し、12mから底までの水温変化は直上の層に比べて水温変化の程度が小さい。

9月14日には水深4m以深で水温が一様化し、その水温は約24度まで上昇し、その後、ほとんど変化は見られなかった。一方、表層の水温は低下し、9月28日には全層にわたって鉛直混合した水温分布が見られた。

図-12に地点1における水温の連続観測の結果を示した。表層の水温は日平均気温とよく対応しており、日平均気温の影響が大きいことが分かる。水深7.5mでは、装置起動直後の8月27日に水温が下がったが、その後は緩やかに上昇していた。水深4.5mでは、8月29日から急激に水温が下がり始め、9月10日頃には水深7.5mと同程度の水温となっていた。水深1.5mでは、装置起動後から徐々に水温が下がり始め9月24日には、表層から底層付近まで一様の温度分布となっていた。

8月30日と9月5日には台風が通過したが、水温の変動パターンが大きく変わることは無かったため、台風による影響は少なかったと考えられる。

(2) で示したように、例年では温度躍層が消滅するのは10月~12月にかけてであった。9月の平均気温が25度以下の日数を見てみると、10月に水温成層が消滅した2001年には24日であり、11月、12月に消滅した2000年、2002年においてもそれぞれ15日、16日であったのに対して、2004年は10日間と他の年に比べて日数が少ない。それにもかかわらず、9月中旬に水温躍層が消滅した。これは水流発生装置の効果であるといえる。

以降では、水温躍層の破壊に伴った水質の変化を観測データをもとに示す。

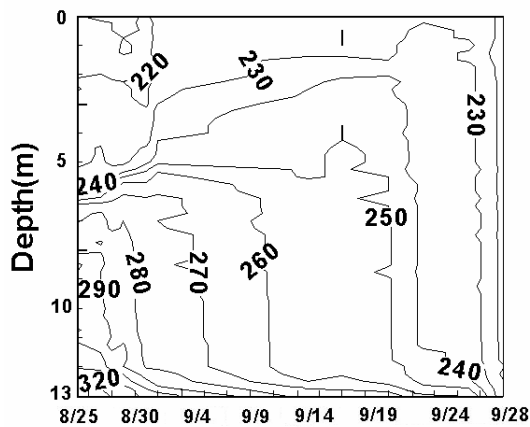


図-14 地点1におけるECの分布(単位:  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )

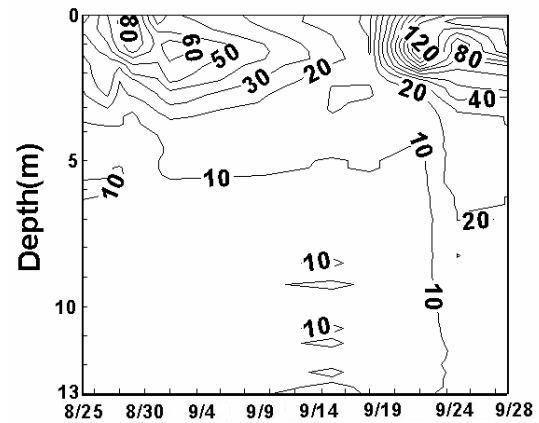


図-16 地点1におけるクロロフィルaの分布  
(単位:  $\mu\text{g}/\text{l}$ )

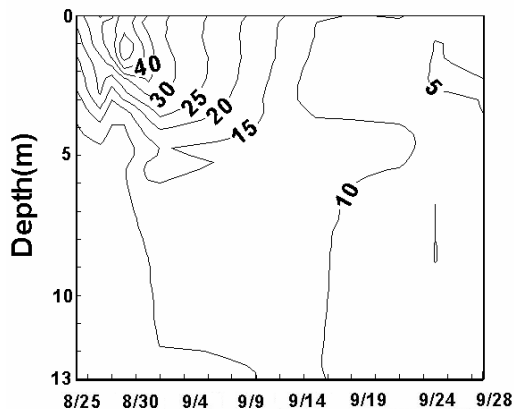


図-15 地点1における濁度の分布(単位:  $\text{mg}/\text{l}$ )

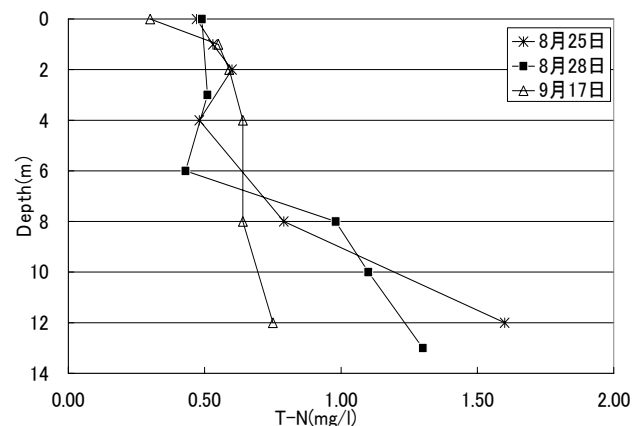


図-17 地点1におけるT-Nの分布

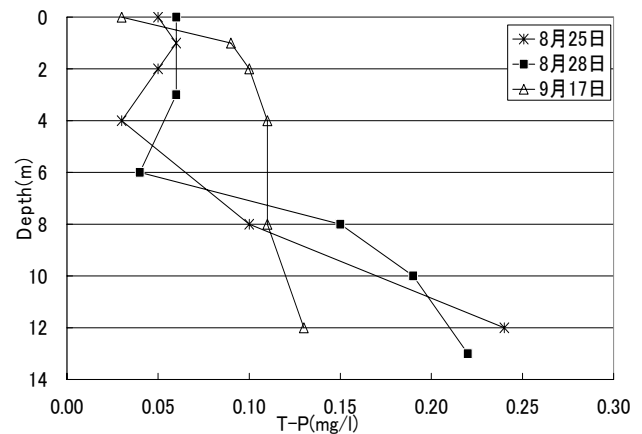


図-18 地点1におけるT-Pの分布

### (3) 水質の時間的変化

現場での水質測定と水質分析用の採水は図-1中の地点1, 3, 5, 7において行った。水温と同様, 水質の地点ごとの大きな差異は見られなかったため, 以下では地点1の値を水質の代表値として示す。

#### (a) DO (溶存酸素) の変化

水流発生装置稼動前後でDOを比較する(図-13)。装置稼動前から9月1日までは, 表層では過飽和, 表層から温度躍層の上部(水深5m)まで次第にDOが低下し, 躍層以下は無酸素である。9月1日以降では, 吸水口の位置(水深3m)以深において無酸素状態となった。このため水流発生装置から噴出される流れのDOは低く, DOの分布には変化が見られなかった。その後, 全層が鉛直混合した9月28日には表層から水深3~4mの層でDO濃度が上昇した。

#### (b) EC (電気伝導度) の変化

水流発生装置稼動期間中のECの経時変化を図-14に示す。稼動直前の8月25日には, 表層から温度躍層直上の水深5mまでは220~230  $\mu\text{S}/\text{cm}$ であり, 温度躍層の水深6m付近で濃度の勾配が大きくなり, 水深13mで320  $\mu\text{S}/\text{cm}$ を超える値が検出されている。装置稼動後は, 濃度の鉛直勾配が小さくなる傾向が見られ, 水温が全層一様になった9月28日にはECも全層で230~240  $\mu\text{S}/\text{cm}$ とほぼ一様な濃度となった。

#### (c) 濁度とクロロフィルaの変化

濁度とクロロフィルaの経時変化を図-15, 16に示す。開始後一週間は全層で濁度の増加が見られた。この間, クロロフィルaの分布にも類似したパターンが見られた。このため, 表層の濁度を決定するのはクロロフィルaであると考えられる。その後, 濁度は低下し, 9月28日には, 全層にわたって10~15  $\text{mg}/\text{l}$ と一様になった。一方, クロロフィルaは9月21日から再び表層で増加する。8月25日~9月1日は水の色が緑であり, 透明度が0.9mであったのに対して, 9月8日~9月28日は水は茶褐色で透明度は1.3m

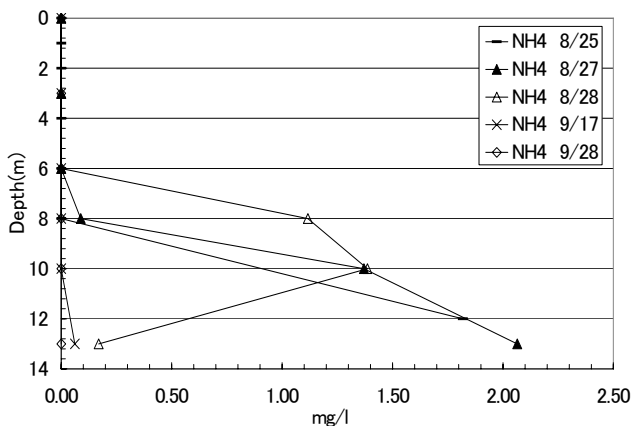


図-19 地点1におけるNH<sub>4</sub><sup>+</sup>の分布

と高くなっている。これは植物プランクトンの優先種が藍藻類から珪藻類に遷移したためであると考えられる。

#### (d) T-N, T-Pの変化

図-17, 18に実験期間中のT-NとT-Pの変動を示した。実験開始直前の8月25日と実験開始直後の8月28日では、大きな変動は見られなかった。また、水温躍層よりも上層ではT-N, T-Pともに濃度が低く、装置稼動による濃度の上昇は見られなかった。また、躍層上部でのFeとMnの濃度も上昇することなく、底泥の巻上げは確認されなかった。9月17日では、水温躍層が崩れてきているため、水深3m以降で濃度がほぼ一様になっていた。

#### (e) イオンの変化

図-19, 20に実験期間中のNH<sub>4</sub><sup>+</sup>とSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の変動を示した。水流発生装置の稼動直前の8月27日では、稼動前とほぼ同程度の値となっている。8月28日には底層でのNH<sub>4</sub><sup>+</sup>が減少し、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>は増加していた。9月17日になると、鉛直混合により濃度はほぼ一様化している。これらの結果は底層が還元状態から酸化状態に移行しつつあることを示唆していると言える。

## 6. まとめと今後の課題

富栄養化が顕著な御殿貯水池において、底部に設置した水流発生装置が形成する流れによって水温躍層の破壊を加速させる実験を行い、水質に及ぼす影響を測定した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 水流発生装置を稼動し、表層から3mの水を吸水し水深11mに噴出することにより、33日間で水温成層が完全に破壊された。
- 2) 水流発生装置による影響は池全体に均一に及んでおり、発生装置からの距離にはほとんど依存しない。
- 3) 水流発生装置の影響が顕著に表れた水質項目はECと濁度であり、両項目において全層均一になり、濃度の低下が見られた。
- 4) DOの濃度は水温成層が破壊される過程ではほとんど変化がなかった。これは底層に送った

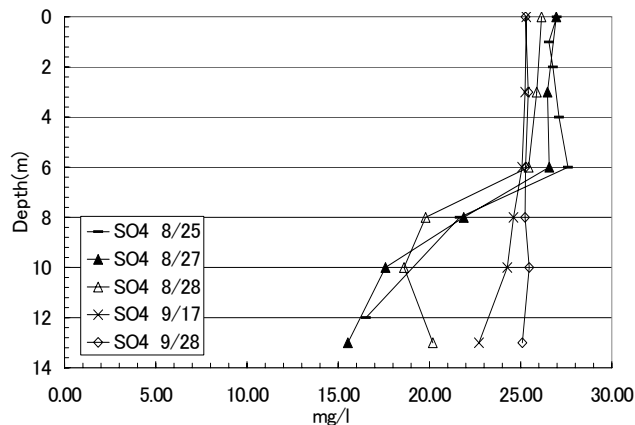


図-20 地点1におけるSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の分布

水（表層から3m深さ）のDO濃度が低下していたことによる。全層にわたる鉛直混合に伴い、表層から水深3~4mの層でDOの上昇が見られた。

- 5) 水流発生装置の稼動に伴って、底層ではNH<sub>4</sub><sup>+</sup>が減少し、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>は増加していた。このことから、底層は還元状態から酸化状態へ移行していたことが示唆された。

貯水池の水質を改善するためには、底層に酸素を供給し、底泥からの溶出を抑える必要がある。今後、底層のDO濃度の上昇を効率よく行うために、吸水口の高さや噴出角度を検討し、運転方法の改良を試みる予定である。さらに、富栄養化モデルを用いて水温成層破壊における水質変化のメカニズムを明らかにすることが必要である。

**謝辞:** 本研究は高松市水道局との共同研究の一部である。今回の調査・分析では、株式会社マリン技研、株式会社建設技術研究所、株式会社エス・イー・エイから援助を受けた。記して感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 天野邦彦, 藤原正好: 成層破壊型曝気循環による貯水池水質変化の現地観測とその評価, 環境工学研究論文集, 第39巻, pp. 191-200, 2002.
- 4) 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.
- 5) 有田正光編, 池田裕一, 中井正則, 中村由行, 道奥康治, 村上和男著: 水圏の環境, 東京電機大学出版局, 404p., 2003.

(2004. 9. 30受付)