

## 曝気法による湖沼の水質浄化及び藍藻類増殖の抑制

## Improvement of Water Quality and Control of Blue-Green Algae Growth by Aeration

岡井 隆\*      笹田 康子      小菘 幸代      田中 さと子\*\*  
Takashi OKAI    Yasuko SASADA    Sachiyo KOMINO    Satoko TANAKA

## 要旨

香川県内における富栄養化の進んだ比較的小規模のため池に、水中へ酸素を供給する機能に加え、水流の発生により系内の水を循環させる機能を有する曝気循環型の水質浄化機器を設置し、実証試験を実施した結果、水質浄化効果及び藍藻類増殖の抑制効果が確認された。本試験は、環境省の環境技術実証モデル事業<sup>1)</sup>「湖沼等水質浄化技術分野」として平成17年度及び平成18年度に実施したものである<sup>2)</sup>。

キーワード：富栄養化 水質浄化 曝気 鉛直混合 藍藻類

## I はじめに

香川県は、年平均気温が16℃前後、日照時間が年間2,000時間前後と比較的温暖的な気候であるが、年平均降水量は約1,100mm前後と非常に少なく、河川の水量も乏しいため、県内には大小14,600余りのため池が築造され、主に農業用水として利水している。ため池のような閉鎖性水域は、窒素、りんなどの栄養塩類の流入と蓄積により富栄養化が進行しやすいため、植物プランクトンの異常増殖により水質が汚濁しやすく、透明度の悪化、悪臭の発生、アオコの発生、魚類のへい死などの深刻な事態を招いている<sup>3)</sup>。

閉鎖性水域の水質浄化技術には、凝集剤や水生植物の利用により水域内の栄養塩類を除去する技術<sup>4)</sup>や、水を曝気したり、人為的に循環することにより、植物プランクトンの増殖抑制や底層への酸素供給などを目的とする技術<sup>5)</sup>がある。

本試験では、比較的小規模のため池に、水中へ酸素を供給する機能に加え、水流の発生により水域内の水を循環させる機能を有する、曝気循環型の水質浄化機器を設置し、水質浄化効果及び藍藻類増殖の抑制効果について実証試験を実施した。

## II 方法

## 1 試験実施場所の概況

試験実施場所は香川県高松市牟礼町に位置し、農業用水及び防火用水として利水されている長池及び羽子池である(図1)。

長池の面積は1,350m<sup>2</sup>、最大貯水量は2,000m<sup>3</sup>、最大水深は1.6mであり、羽子池の面積は1,000m<sup>2</sup>、最大貯水量は1,400m<sup>3</sup>、最大水深は1.4mであるが、両池とも越流口に設置している板の取り外しにより、貯水量を任意に変えることが可能である。

両池ともに工場排水や生活排水の流入はないが、平常時のおもな流入源は、上流域の水田からの農業用排水や雨水である。



図1 試験実施場所

\*環境森林部環境政策課

\*\*香川県立中央病院中央検査部

なお、両池とも上流に位置する川骨池から取水可能であるが、調査期間中において目立った取水は確認されていない。よって流入汚濁負荷源は農業用排水や雨水であるが、防火用水としての利水上、年間を通じて落水することはなく、浚渫や池干の機会を得ないため、いずれの池も中央部において底質が約40cmの厚みに堆積しており、これら底質中から水中への栄養塩類の回帰も汚濁負荷源であると考えられる。

水質浄化機器稼動前の平成17年5月18日から同年7月27日までの期間において、10時から13時までの時間帯に実施した長池、羽子池の中央部における水質調査結果を表1に示す。

水深は平均して長池で1.4m、羽子池で1.2m、両池の表層と底層の水温差は約2℃であった。

両池ともpHが高くアルカリ性を示したが、このことは植物プランクトンの活発な光合成作用により、二酸化炭素が消費されているためと考えられる。底層水は表層水よりもpHが低いが、底層では水中の光が少なくなり、光合成作用が低下して二酸化炭素の消費が減少することと、沈降してくるプランクトンの遺骸などの有機物の分解や動物等の呼吸により二酸化炭素が増加しているためと考えられる。

表1 試験実施場所の水質調査結果

調査年月日	H17.5.18, 6.3, 6.16, 7.1, 7.15, 7.27			
	長池		羽子池	
調査地点	表層水	底層水	表層水	底層水
水温 (°C)	21.3~29.4 (26.5)	19.5~28.0 (24.8)	21.0~29.9 (26.9)	20.3~27.9 (25.2)
pH	9.5~10.2 (9.8)	7.8~9.1 (8.4)	9.1~10.1 (9.7)	8.0~8.9 (8.5)
DO (mgO/L)	5.4~17.8 (10.9)	0.7~5.3 (2.4)	6.3~16.8 (12.8)	2.2~9.1 (5.1)
透視度 (度)	12~50< (22)	—	11~24 (16)	—
COD <sub>Mn</sub> (mgO/L)	10~38 (27)	11~40 (20)	14~60 (35)	16~26 (24)
溶解性COD <sub>Mn</sub> (mgO/L)	8.1~20 (14)	8.5~21 (13)	7.2~20 (14)	8.6~21 (14)
T-N (mg/L)	1.0~4.6 (2.5)	1.5~3.0 (2.1)	2.0~4.6 (3.3)	2.1~2.9 (2.5)
T-P (mg/L)	0.23~0.81 (0.59)	0.37~1.0 (0.60)	0.31~1.6 (1.0)	0.50~1.4 (0.94)
PO <sub>4</sub> -P (mg/L)	0.066~0.38 (0.25)	0.18~0.51 (0.33)	0.092~0.80 (0.36)	0.14~0.79 (0.40)

( )内は平均値、H17.7.1の長池底層水は欠測  
分析方法：工場排水試験法 (JIS K 0102)

両池の表層水の平均DOは約11mgO/Lであり、最大で約17mgO/Lと著しく過飽和となる場合が見られたが、底層水の平均DOは羽子池で5.1mgO/L、長池で2.4mgO/Lと低く、特に長池では0.7mgO/Lの貧酸素状態が確認された。COD<sub>Mn</sub>は両池ともに10mgO/L以上とアオコの発生に伴う汚濁の進行が見られた。

平成17年5月18日及び同年7月27日に、長池及び羽子池の中央部において、エクマンバージ型採泥器(縦15cm×横15cm×高さ19cm、本体重量4.75kg)により採取した底質試料の調査結果を表2に示す。

長池及び羽子池のT-Pを比較すると、それぞれ1.1mgP/g、2.1~2.3mgP/gであり、羽子池が約2倍高い値であるが、その他の項目は同程度であった。石原らの報告<sup>6)</sup>によれば、香川県内のため池(八丈池、籠池、田村池)の底質の成分含有量は、強熱減量8.8~16.8%、TOC36~90mg/g、T-N4.4~9.2mgN/g、T-P0.50~1.1mgP/gであり、霞ヶ浦湖心ではT-N5~6mgN/g、T-P1mgP/g前後と報告<sup>7)</sup>されており、両池の値はこれらの値とほぼ同等であった。

水質浄化機器の効果を調査するにあたり、試験の比較対照を得るためには、自然の影響や地域特性等の影響を除去する必要があるが、長池及び羽子池は、上述のようによく似た特性を有することから、両池を調査対象池として選定し、長池を水質浄化機器の浄化効果を検証する実証池とし、羽子池を対照池とした(以下、実証池、対照池)。

表2 試験実施場所の底質調査結果

調査年月日	H17.5.18, 7.27			
	長池		羽子池	
調査地点				
含水率 (%)	64.1	63.1	61.7	58.3
強熱減量 (%)	13.5	12.9	14.1	12.5
COD <sub>sed</sub> (mgO/g)	80	84	72	82
TOC (mg/g)	45	49	53	49
T-N (mgN/g)	5.9	6.0	5.5	5.4
T-P (mgP/g)	1.1	1.1	2.3	2.1

分析方法：底質調査方法(環境省、平成13年3月)

## 2 水質浄化機器の概要及び稼働条件

試験に用いた水質浄化機器(以下、機器)の構造を図2に示す。機器は、水中ポンプ、エカローマシン(ポンプから輸送された水に空気を溶解させる装置)、ゴミ除け籠及び防音カバーからなり、ポンプにより下部から湖沼水を吸引し、加圧した水に空気を溶解させ、ノズルから噴流水として吐出する仕組みである。

機器の浄化原理は、ポンプで汲み上げた水にエジェクターの原理により空気を供給し、水面に叩きつけることで溶存酸素濃度を上昇させるとともに、噴流水により発生する水流の効果で系内の水を循環させることにより、好気性微生物を活性化させ、有機物の分解を促進させるものである。

平成17年7月28日、実証池の東側堰堤付近に機器を2台設置した(写真1、図3)。浮体を含めた機器の大きさは長さ2,300mm、幅2,300mm、高さ1,500mmである。

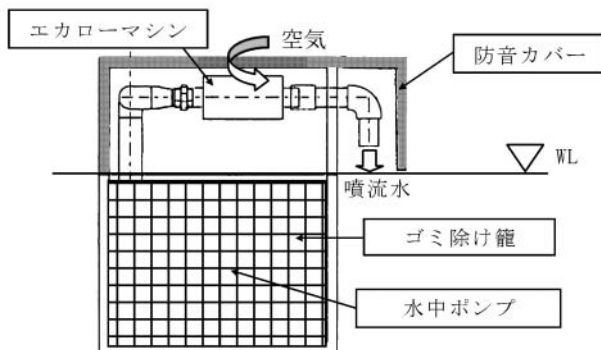


図2 水質浄化機器の構造



写真1 水質浄化機器の設置状況  
(平成17年9月2日撮影)

ポンプの流量は、実証池の最大貯水量の約1.4倍に相当する $2,880\text{m}^3/\text{日}$  ( $1,440\text{m}^3/(\text{日}\cdot\text{基})\times 2\text{基}$ )に設定し、24時間の連続運転とした。

機器の稼働期間は、設置した平成17年7月28日から同年12月22日までの約5ヶ月間及び平成18年4月27日から同年11月29日までの約7ヶ月間である。平成17年12月22日から平成18年4月27日までの約4ヶ月間は機器を停止した。

## 3 調査方法

本報では、紙面の制約により、湖沼等水質浄化技術分野実証試験において得られた成果のうち、主要な調査項目について選択し、以下詳述する。

### (1) 調査項目及び分析方法

水質調査項目として、水温、pH、DO、透視度、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、溶解性 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、T-N、T-P、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、クロロフィルa、植物プランクトンの種毎の個体数・群数、アオコ指標を選定した。クロロフィルaはSCOR/UNESCO法(上水試験法IV-427)、植物プランクトンの種毎の個体数・群数はJIS K 0101 64.3により分析した。アオコ指標は、見た目アオコ指標<sup>8)</sup>(国立環境研究所)を用いてアオコの発生状況の目視調査を行った。残りの調査項目はJIS K 0102により分析した。

その他の調査項目として、水位計を両池の堰堤に設置して、1時間毎の水位を観測した。長池については用水路に三角堰を設置し、1時間おきに観測した水位から越流水量を算出した。また、試験実施場所の降水量を把握するため、最寄りの気象台である高松地方気象台(試験実施場所から西南西約7.5kmに所在)のデータを用いた。

### (2) 調査地点、試料採取方法及び採取頻度

実証池及び対照池における調査地点を図3に示す。DO、水温、pHは、実証池3地点(St1, St2, St3)及び対照池1地点の計4地点において、水面下20cmから20cm毎に、池底から20cm上部まで現地にて測定した。透視度及びアオコ指標については、同地点で採取した表層水を用い、現地にて測定した。

室内分析用の水質試料の採取地点は、長池1地点(St2)及び羽子池1地点の計2地点を選定した。水質試料の採取方法は表層水、底層水ともにJIS K 0094 4.1に準じ、表層水は水面より20cmまでの間で採取し、底層水は池底から20cm上部で採取した。

なお、調査は10時から13時までの間で実施した。

機器稼動期間中は、水温、pH、DO、透視度、COD<sub>Mn</sub>、溶解性COD<sub>Mn</sub>、クロロフィルa（平成18年度は2週間に1回）、アオコ指標の各項目について、1週間に1回の頻度で調査を実施した。T-N、T-P、PO<sub>4</sub>-Pについては2週間に1回、植物プランクトンの種毎の個体数・群数については4週間に1回の頻度で調査を実施した。機器停止期間中は各項目とも4週間に1回の頻度で調査を実施した。



図3 水質浄化機器の設置場所及び調査地点

### Ⅲ 結果と考察

#### 1 調査期間中の水域の概況

調査期間中の降水量、実証池の水位の観測結果を図4に示す。

実証池の水位は、機器稼動当初(平成17年7月末～9月上旬)は渇水の影響で、満水位よりも低かったが、その後、台風の襲来による降雨により、9月中旬には満水位のレベルにまで上昇した。

水位が低下した期間には、機器の底部が着底する事態が発生したが、機器は正常に稼動した。その後はほぼ満水位で推移したが、多量の降雨の際には水位が上昇し、池水が堰を越えて流出した。

平成18年9月中旬から10月上旬にかけての一時的な水位の減少は、堰を下げて放水し、満水位が低下したことによる。なお、満水位における実証池St2の水深は約1.3mである。

対照池の水位は、調査期間中は概ね満水位で推移したが、多量の降雨の際には水位が上昇し、池水が堰を越えて流出した。なお、満水位における対照池中央部の水深は約1.1mである。

平成18年度の機器稼動期間中の実証池における越流水量の経日変化を図5に示す。

この期間中の実証池の越流水の積算流量は、約24,000m<sup>3</sup>であり、平均貯水量を1,600m<sup>3</sup>とすると、平均滞留日数は15日と見積もられる。

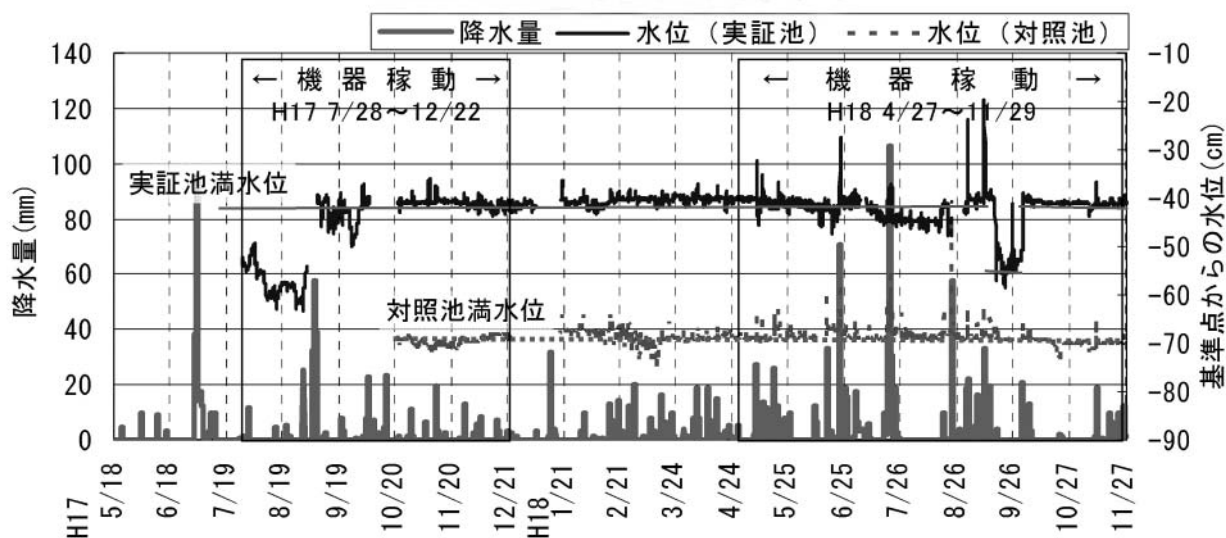


図4 実証池、対照池の水位変動及び降水量

また、降水量が50mm以上観測された日には、1両日中に実証池の貯水量の1～2倍もの水量が流出する事が判明した。

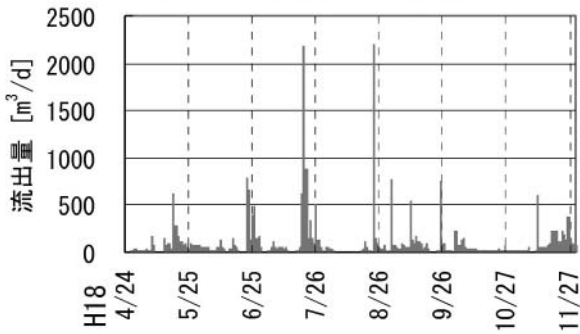


図5 実証池の越流水量の経日変化 (平成18年4月27日～同年11月29日)

## 2 水質調査結果

### (1) DO

DOは、機器稼動前には両池ともに表層から底層にかけて減少する傾向があり、底層では貧酸素水塊の発生が見られたが、機器稼動期間中は、実証池における調査地点全てにおいて、DOの鉛直分布が概ね均一であることが確認された(図6)。

実証池及び対照池における底層のDOの経日変化を図7に示す。

実証池では、機器稼動期間中は農業用水基準5mgO/L以上であったが、平成18年度は、対照池においても底層のDOは5mgO/L以上を観測した。

平成18年度の機器稼動期間中、対照池ではアオコが前年以上に発生しており、表層のDOが20mgO/L以上の過飽和の状態が度々観測されたことから、調査時における底層のDOは、この影響を受け、比較的高い値で推移したものと推測される。

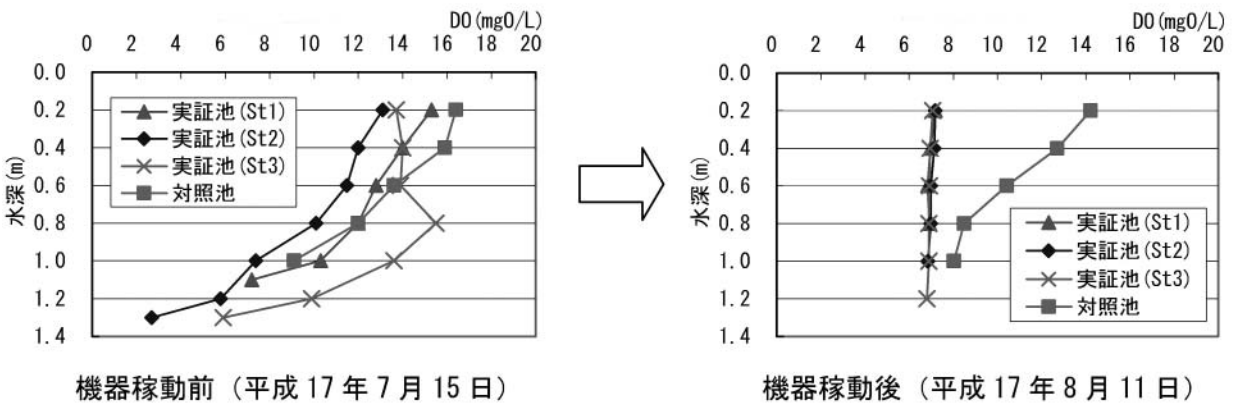


図6 機器稼動前後のDOの鉛直分布

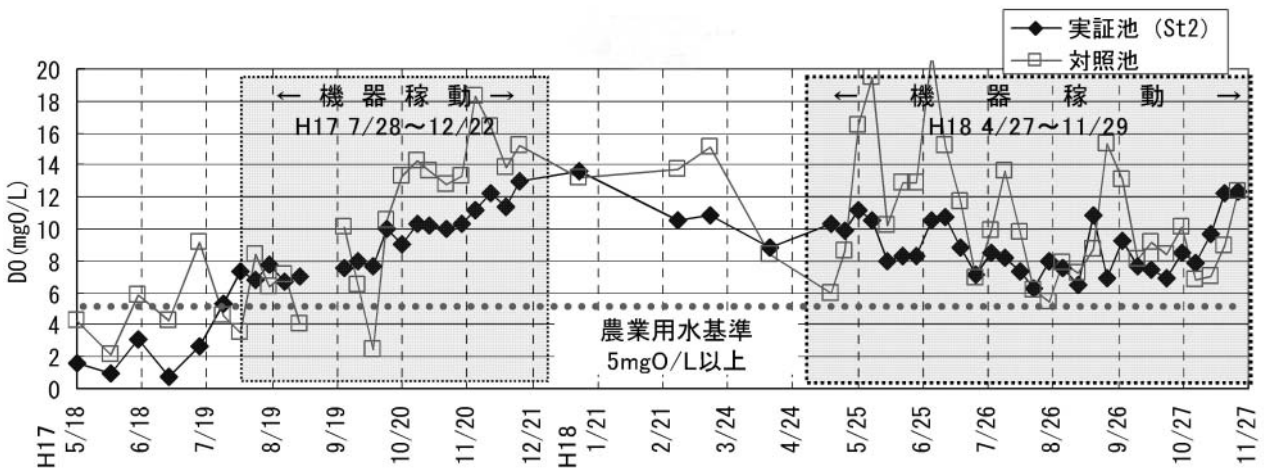


図7 DOの経日変化(底層)

また、機器稼働期間中の表層と底層の水温差の平均値は、実証池で0.4℃、対照池で1.2℃であり、機器停止中(機器設置前の事前調査期間を含む)は、両池ともに約1.2℃であった。

補足調査として、機器稼働時の平成18年10月25日から10月28日までの期間、実証池及び対照池において1時間毎に底層のDOを測定した結果を図8に示す。数日前を含め、調査期間中は晴天であり、平均風速は1.7m/sと穏やかであった。

調査の結果、実証池底層のDOは、日射量の増加に呼応して上昇し、昼過ぎから夕方にかけて最大となり、明け方近くに最小となる変動を示した。水温についてもDOと同様の挙動を示した。

一方、対照池底層のDOは、深夜過ぎに急激に上昇し、最大となった後、日中から深夜にかけて徐々に低下した。水温は、夜間よりも日中が低い値であった。

対照池のこのような挙動は、日中には成層が形成

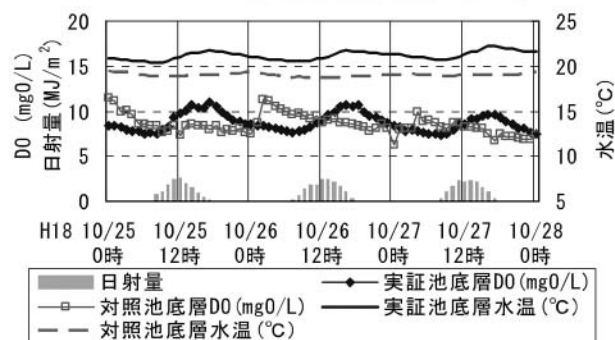


図8 DOの日間変動(底層)

されるが、深夜にかけて表層水が冷却され、底層水との水温差がなくなる深夜過ぎに、池水の鉛直混合が起こるためと推測される。実証池では、機器により池水の循環混合が起こるため、成層は形成されない。

以上より、午前10時から正午までの時間帯では、両池の底層のDOは、ほぼ同程度の値であるが、DOの日間変動は、大きく異なる挙動を示すことが明らかになった。DOの経日変化の調査結果及び補足調査結果から、機器による酸素の供給効果及び水域の鉛直方向及び水平方向への循環効果が実証されたものと考えられる。

(2) COD<sub>Mn</sub>及び溶解性COD<sub>Mn</sub>

実証池及び対照池における表層のCOD<sub>Mn</sub>の経日変化を図9に示す。

両池とも表層のCOD<sub>Mn</sub>は、降雨の度に10mgO/L付近まで低下するが、機器稼働期間中のCOD<sub>Mn</sub>平均値は、実証池で13mgO/L(最大値20mgO/L, 最小値8.4mgO/L), 対照池で18mgO/L(最大値33mgO/L, 最小値9.0mgO/L)であった。

対照池における降雨後のCOD<sub>Mn</sub>の上昇が著しいのに対し、実証池では緩やかな上昇、またはほぼ横ばいに推移しており、全般的に対照池よりも変動が小さくなっているのが特徴的である。

冬季から春先までの機器停止期間中のCOD<sub>Mn</sub>は、両池ともほぼ横ばいに推移しており、水質悪化はみられない。

底層のCOD<sub>Mn</sub>についても、同様の傾向を示した。

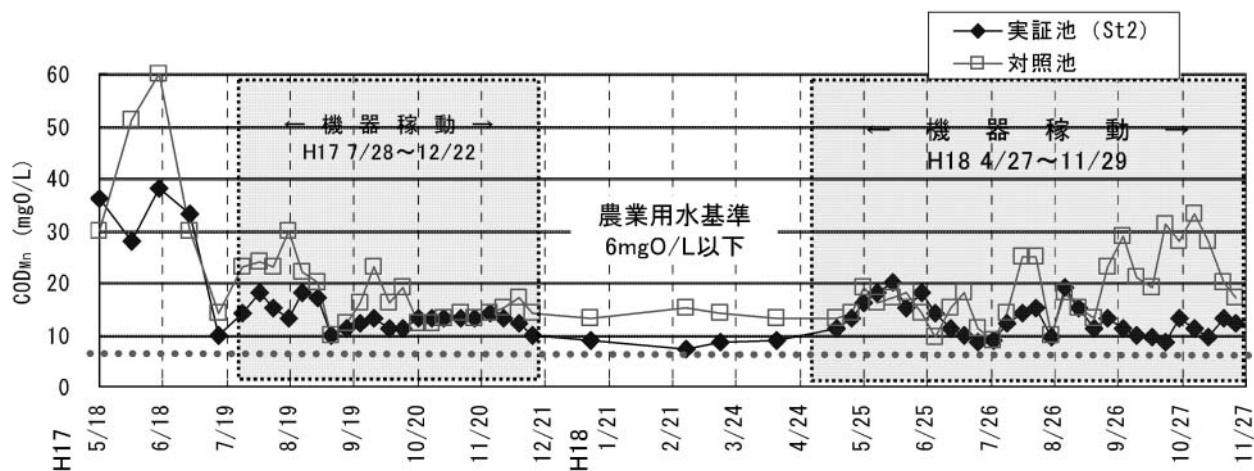


図9 COD<sub>Mn</sub>の経日変化(表層)

また、機器稼働期間中の表層の溶解性 COD<sub>Mn</sub> 平均値は、実証池で6.5mgO/L（最大値9.1mgO/L，最小値5.4mgO/L），対照池で8.9mgO/L（最大値14mgO/L，最小値6.0mgO/L）であり，COD<sub>Mn</sub> と同様の傾向を示した。

以上の結果から，機器は水質悪化を抑制する効果を有すると考えられる。

(3) T-N, T-P 及び PO<sub>4</sub>-P

機器稼働期間中の表層の T-N 平均値は，実証池で1.3mg/L，対照池で2.7mg/L であり，機器停止期間中の T-N 平均値（実証池で1.1mg/L，対照池で3.7 mg/L）や各池における事前調査の値と比較して大差なかった。

機器稼働期間中の表層の T-P 平均値は，実証池で0.18mg/L，対照池で0.50mg/L であり，機器停止期間中の T-P 平均値（実証池0.067mg/L，対照池で0.37 mg/L）と比較してやや高かった。

PO<sub>4</sub>-P の経日変化を図10に示す。機器稼働期間中の表層の PO<sub>4</sub>-P 平均値は，実証池で0.036mg/L，対照池で0.22mg/L であり，機器停止期間中は，実証池0.003mg/L 以下，対照池で0.14mg/L であった。実証池における事前調査の値は0.25mg/L であるから，実証池では，機器稼働後に 1/10以下の濃度まで急激に低下したことになる。

このことは，底質から水中への PO<sub>4</sub>-P の回帰と何らかの関係があると思われるが，本報での記載は割愛する。詳細は，本紙の笹田等の報告を参照されたい。

(4) アオコ指標，クロロフィル a, 透視度及び植物プランクトンの種毎の個体数・群数

実証池及び対照池における表層の見た目アオコ指標及びクロロフィル a の経日変化を，それぞれ図11及び図12に示す。

見た目アオコ指標は，平成18年度の機器稼働期間の後半において，対照池がレベル2～3にまで上昇したのに対し，実証池ではほぼレベル0で推移し，機器稼働期間全体にわたり，実証池のほうが明らかに低いレベルで推移した。

機器稼働期間中の表層のクロロフィル a 平均値は，実証池130μg/L，対照池180μg/L であり，実証池のほうが対照池よりもやや低い値であったが，透視度は両池ともに17度と低かった。

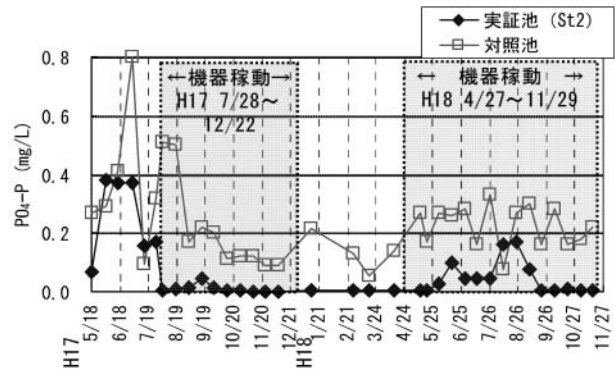


図10 PO<sub>4</sub>-P の経日変化（表層）

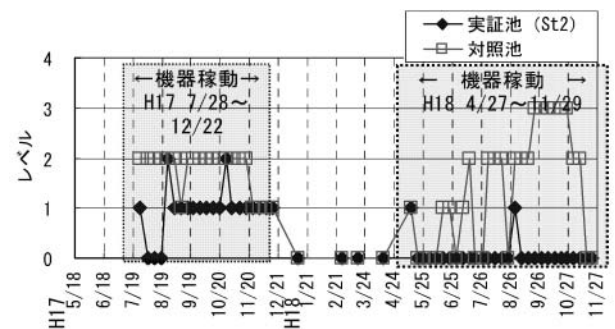


図11 見た目アオコ指標の経日変化（表層）

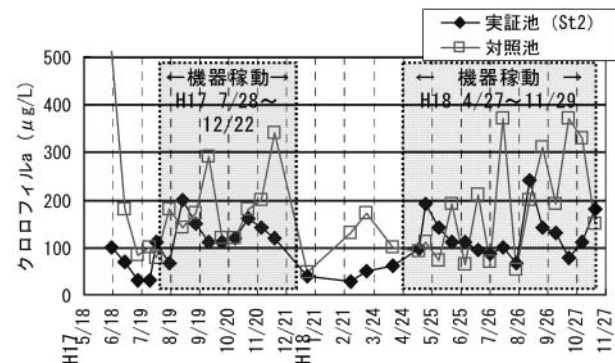


図12 クロロフィル a の経日変化（表層）

実証池及び対照池における表層の植物プランクトンの種毎の個体数・群数について，最優先種のみを表3に示す。

機器稼働前の表層における植物プランクトンの最優先種は，両池ともにアオコの原因となる *Microcystis* であったが，機器稼働中は，実証池ではそれ以外の珪藻綱，藍藻綱が最優先種になり，対照池では平成17年度は夏季に，18年度では夏季から秋季にかけて *Microcystis* が最優先種であった。底層についてもほぼ同様の結果が得られた。

表3 植物プランクトンの最優先種(表層)

日付	稼動状況	実証池(St2)表層	対照池表層	日付	稼動状況	実証池(St2)表層	対照池表層
H17.7.27	機器稼動前	<i>Microcystis aeruginosa</i> (藍藻綱)	<i>Microcystis aeruginosa</i> (藍藻綱)	H18.4.13	機器停止中	<i>Synedra</i> sp. (珪藻綱)	<i>Synedra</i> sp. (珪藻綱)
H17.8.4	機器稼動中	<i>Aulacoseria granulata</i> (珪藻綱)	<i>Microcystis aeruginosa</i> (藍藻綱)	H18.5.12	機器稼動中	<i>Oscillatoria limnetica</i> (藍藻綱)	<i>Monoraphidium minutum</i> (緑藻綱)
H17.9.1		<i>Cyclotella meneghiniana</i> (珪藻綱)	<i>Microcystis aeruginosa</i> (藍藻綱)	H18.6.8		<i>Oscillatoria limnetica</i> (藍藻綱)	<i>Scenedesmus opoliensis</i> (緑藻綱)
H17.9.29		<i>Phormidium</i> sp. (藍藻綱)	<i>Microcystis aeruginosa</i> (藍藻綱)	H18.7.6		<i>Phormidium</i> sp. (藍藻綱)	<i>Microcystis aeruginosa</i> (藍藻綱)
H17.10.27		<i>Fragilaria crotonensis</i> (珪藻綱)	<i>Aulacoseria ambigua</i> (珪藻綱)	H18.8.3		<i>Phormidium tenue</i> (藍藻綱)	<i>Pleodorina</i> sp. (緑藻綱)
H17.11.24		<i>Nitzschia subacicularis</i> (珪藻綱)	<i>Stephanodiscus hantzschii</i> (珪藻綱)	H18.9.7		<i>Nitzschia subacicularis</i> (珪藻綱)	<i>Microcystis aeruginosa</i> (藍藻綱)
H18.1.12		機器停止中	<i>Nitzschia subacicularis</i> (珪藻綱)	<i>Aulacoseria ambigua</i> (珪藻綱)		H18.10.5	<i>Nitzschia subacicularis</i> (珪藻綱)
H18.2.28	<i>Nitzschia subacicularis</i> (珪藻綱)		<i>Cyclotella</i> sp. (珪藻綱)	H18.11.2	<i>Aulacoseria ambigua</i> (珪藻綱)	<i>Microcystis aeruginosa</i> (藍藻綱)	
H18.3.16	<i>Nitzschia subacicularis</i> (珪藻綱)		<i>Cyclotella</i> sp. (珪藻綱)		<i>Stephanodiscus hantzschii</i> (珪藻綱)		

以上の結果から、機器は、植物プランクトンの発生を防止するものではないが、アオコの原因である *Microcystis* の異常増殖を抑制する効果を有すると考えられる。

#### Ⅳ まとめ

曝気循環型の水質浄化機器の稼動により、最大水深1.6m、面積1,350m<sup>2</sup>の比較的小規模の水域では、鉛直方向及び水平方向の DO がほぼ均一化され、5 mgO/L 以上が維持された。また、対照池では降雨後の COD<sub>Mn</sub> の上昇が著しいのに対し、実証池では緩やかな上昇、またはほぼ横ばいに推移し、全般的に対照池よりも変動が小さかった。更にアオコの原因である *Microcystis* の異常増殖を抑制する効果が認められた。

他の水域へ適用する際は、同規模の水域であれば、同様の効果が期待できる。なお、規模の異なる水域においては、機器の仕様や設置基数などを変更することで適用可能であると考えられる。

#### 文献

- 1) 環境省環境技術実証モデル事業ホームページ [http://www.eng.go.jp/policy/etv/01\\_intro](http://www.eng.go.jp/policy/etv/01_intro)
- 2) 環境省、香川県：平成17・18年度環境技術実証モデル事業湖沼等水質浄化技術分野実証試験結果報告書(2007)
- 3) 笹田康子等：水環境の事故・苦情の香川県環境保健研究センターにおける対応-ため池での魚のへい死事例の考察-, 香川県環境保健研究センター所報, 5, 21-27, (2006)
- 4) 島谷幸宏, 細見正明, 中村圭吾：人口浮島, エコテクノロジーによる河川・湖沼の水質浄化, 258, ソフトサイエンス社(東京), (2003)
- 5) 山田勝：層流多重循環による水質浄化-特集/公園の水と水辺の管理-, 緑の読本, 23, 951-955, (1992).
- 6) 石原暁等：ため池の富栄養化とオニバスの生育(第4報)-ため池底泥の富栄養化の実態-, 香川県環境研究センター所報, 25, 45-49, (2000)
- 7) 細見正明：国立公害研調査報告, 16, 5, (1981)
- 8) 国立環境研究所ホームページ <http://www.nies.go.jp/kanko/tokubetu/sr24/>