

資料

浅い貯水池における貧酸素化及び富栄養化要因の解析

後田 俊直, 橋本 敏子*

Analysis of Dissolved Oxygen Deficiency and Eutrophication in Shallow Pond

TOSHINAO USHIRODA and TOSHIKO HASHIMOTO*

(Received September 30, 2011)

県内の著しく富栄養化の進んだ浅い貯水池において夏期に調査を行い、貧酸素化及び富栄養化の要因を解析した。この貯水池では、日成層現象と酸素消費速度が速いことが特徴であり、貧酸素化の消長及び富栄養化の進行にこれらが密接に関係していた。

Key words : 貧酸素, 酸素消費, 富栄養化, 日成層

緒 言

湖沼やため池（以下「湖沼等」と言う）の閉鎖性水域では水が長期間滞留するため、その過程において成層の形成、貧酸素化、富栄養化などのさまざまな水質変化が起こることとなる。特にため池は一般的な湖沼と比較して「浅く小さな水域」であり、周囲環境（気温、日照、風、流入負荷、植生等）の影響を強く受ける。水量が少ない池では、流入物等による汚染の影響が短時間に池の水質として現れる。また浅い池では混合されやすいので、底に溜まった栄養分は拡散し、植物プランクトンや水生植物に取り込まれ、効率よく何回も利用される。このようにため池は栄養分の回転が速く、富栄養化が進行しやすい水域といえる [1, 2]。湖沼等の水環境はその湖沼等の形状や周辺環境によって異なり、その湖沼等特有の水質現象が起こる [3]。例えば、浅い湖沼等では水温成層が形成されにくいため底層の酸欠は起こりにくいとされるが、実際は水深 1 m 程度のため池でも酸欠が原因と考えられる魚の斃死が発生している例もあり [4, 5]、その水質現象は様々である。

そこで本報では、広島県内の著しく富栄養化の進んだ浅い貯水池（ため池）において夏期に現地調査を行い、貯水池内の溶存酸素や栄養塩類等の変動を明らかにするとともに、室内実験において底層の酸素消費速度及び栄養塩類溶出速度を測定することで貯水池の貧酸素化及び富栄養化の要因を解析した。

方 法

1 貯水池の概要

調査を行なった貯水池は、広島県東広島市安芸津町にある広島県立総合技術研究所農業技術センター果樹研究部の貯水池で、湛水面積は3384㎡、水際はコンクリート護岸であり、底部はほぼ平坦で水深は1.8m（満水時）である。（図1）貯水池の周辺は果樹園となっており、この灌水に利用されている。流入する河川はなく、主たる流入負荷は降雨時等における園地からの流入水である。流出部は1箇所でありオーバーフローで流出している。例年梅雨時期には満水となるが、夏期には流入水の減少と灌水への利用により水位は50cm程度低下する。特に、調査を行った2008年は、梅雨明けが例年より早く（7月6日頃）[6]、夏期の降水量は極めて少なかった。調査期間中の貯水池の水深と降水量を図2に示す。貯水池は7月上旬には満水（水深1.8m）であったが、水位は徐々に低下し、8月中旬には最低水位（水深0.85m）となり、8月下旬まで水深1m以下で推移した。富栄養化が進んでおり、例年ヒシの異常繁殖が見られる。調査を行なった2008年は、8月8日頃からアオコの発生が見られ8月下旬まで続いた。

2 調査時期及び調査地点

2008年の夏期（7～8月）に調査を行い、水質及び底質の調査は図1に示す調査地点で水質計による計測、採

*退職：Retired

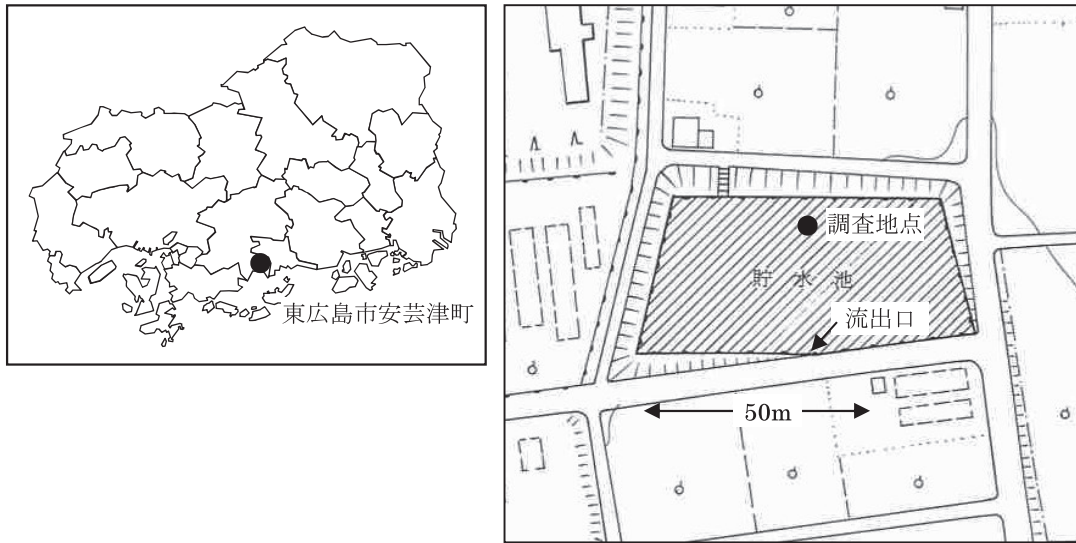


図1 貯水池の位置及び調査地点

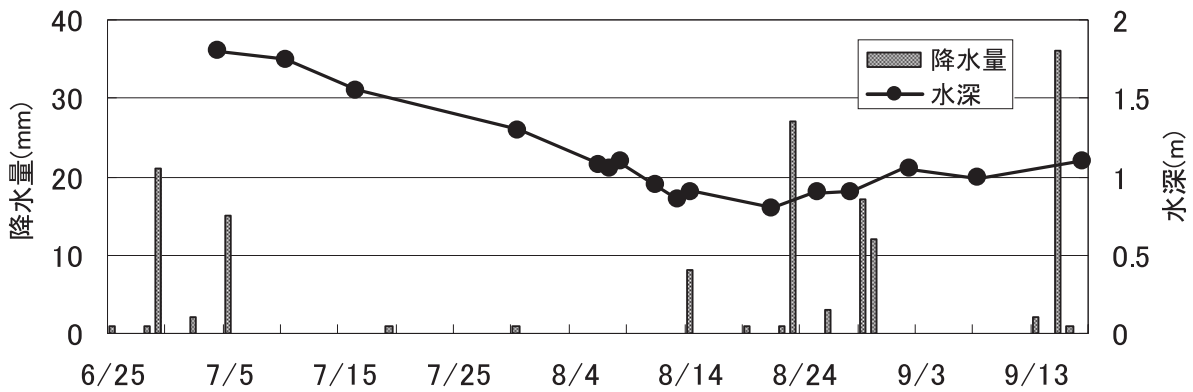


図2 調査期間中の貯水池の水深と降水量

水及び採泥を行なった。なお、計測及び採水は正午前（11時～13時の間）に行なった。

日間変動の調査は、同様に図1に示す調査地点でDOは8月6日～8月8日、8月21日～8月23日及び9月8日～9月10日の3回行い、水温は8月13日～9月14日にかけて行った。なお、DOは90～120分間隔で、水温は60分間隔で自動計測器にて測定した。

3 調査方法

水質については、水温、pH、電気伝導度（EC）、溶存酸素（DO）は多項目水質計Quanta（環境システム株式会社製）を用い、表層（0m）から底層（底上10cm = B-10cm）まで数10cmごとに現地にて測定した。また、小型水中ポンプで採水を行い、栄養塩類〔総窒素（TN）、総リン（TP）、アンモニア態窒素（NH₄-N）、硝酸態窒素（NO₃-N）、亜硝酸態窒素（NO₂-N）、リン酸態リン（PO₄-P）〕、総有機炭素

（TOC）、溶存態有機炭素（DOC）及びクロロフィルa（Chl-a）の測定に供した。NH₄-N、NO₃-N、NO₂-N及びPO₄-PはBRANLUEBBE社のオートアナライザー TRAACS-2000で測定した。TPはペルオキシ二硫酸カリウムにより分解後、オートアナライザー TRAACS-2000で測定した。TN、TOC及びDOCは島津全有機炭素計 TOC-500で測定し、懸濁態有機炭素（POC）は POC=TOC - DOC として求めた。Chl-aはアセトン抽出吸光度法で測定した。なお、溶存態成分は試水をワットマンろ紙 GF/Cでろ過した後上記分析法により測定した。

底質については、エックマンバージ型採泥器を用いて採泥し、含水率、強熱減量（IL）、硫化物（AVS）は底質調査方法（底質調査方法の改定について：環水管第127号、昭和63年9月8日）により、TOC及びTNは柳本製 CHN コーダ MT-3により、TPはIL法により測定した。

日間変動の調査では、底層 DO は DO メーター（株式会社東興化学研究所社 TOX-90i）を用いて底上10cm の DO を測定した。また、水温はデータロガー（アズワン株式会社 TL3633）を用いて表層（0m）、中層（底上50cm）及び底層（底上10cm）の水温を連続測定した。

4 底泥酸素消費速度（Sediment Oxygen Demand = SOD）

実験に用いる底泥試料は、2008年7月～8月に計2回（7月16日及び8月25日）、図1の調査地点周辺の底泥を HR 型不攪乱柱状採泥器（離合社製）によりそれぞれ2サンプル採取した。コア泥はアクリルパイプ（内径11cm、高さ50cm）に採取し、泥が乱れないよう中蓋をして持ち帰った。コア内の上層水をサイフォンで除去した後、採泥地点の底層水をメンブレンフィルター（孔径0.45 μm）によりろ過し、その1Lをサイフォンでコア泥の上層に静かに注いだ。コア内の上層水を空気で曝気し、酸素濃度を高めた後、上層水表面が空気に接しないよう中蓋をして恒温室内に静置し、経時的に DO を測定した。実験は採泥当日の現場の底層の水温と同等の25℃、暗条件で行った。DO の測定には DO メーター（株式会社東興化学研究所社 TOX-90i）を用いた。酸素消費速度（gO/m²/日）は時間と上層水中の DO の減少量との1次回帰式を求め、1日当たり、底泥面積当たりとして算出した。

5 底層水の酸素消費速度（Water Oxygen Demand = WOD）

実験に用いる底層水の採水は2008年7月～8月に計3回（7月16日、8月8日及び8月25日）行い、図1の調査地点周辺の底上10～30cm の底層水をそれぞれ5～6サンプル採水した。この底層水を曝気し、密栓した100mL ぶん瓶に分注した後、現場水温と同等の温度（7月16日及び8月25日は25℃、8月8日は30℃）、暗条件下で静置し、経時的に DO を測定した。なお、DO はウィンクラ-アジ化ナトリウム変法により測定し、時間と DO の減少量との1次回帰式を求め酸素消費速度（mgO/l/日）を算出した。

6 底泥からの栄養塩溶出速度

実験は「4 底泥酸素消費速度」と同じ方法で行なった。経時的に DO を測定すると同時に上層水10mL を採取し、ディスパーザブルメンブレンフィルター（孔径0.45 μm）でろ過し、クロロホルムを1～2滴加え分析に供した。この際、上層水を採取量だけ補充した。

採取した上層水中の無機態窒素（NH₄-N、NO₃-N 及び NO₂-N）及び無機態リン（PO₄-P）をオートアナライザーにより測定し、その結果から溶出速度（mg/m²/日）を算出した。

日）を算出した。

結果と考察

1 水質及び底質の状況

調査期間中の表層及び底層の水質の変化を図3に、調査期間中の平均値を表1に示す。また底質の調査結果を表2に示す。なお、水質は2008年7月～8月に4～7回、底質は1回実施した結果である。貯水池の栄養塩類についてみると、調査期間中の平均値は、TN は表層で2.3mg/l、底層で2.6mg/l、TP は表層で0.25mg/l、底層で0.48mg/l であった。過去の広島県内の富栄養化した湖沼（8湖沼）における調査結果（1996～1998年、表層）では、8湖沼の平均値は、TN：0.85mg/l（0.29～1.1mg/l）、TP：0.082mg/l（0.008～0.41mg/l）であり[7]、これらの値と比較してもかなり高く、富栄養化が進行しているといえる。また、TOC 及び Chl-a を比較すると、上記の調査が、TOC：3.4mg/l（2.4～4.9mg/l）、Chl-a：21 μg/l（5.3～36 μg/l）に対して、TOC：15mg/l（表層）、14mg/l（底層）、Chl-a：125 μg/l（表層）、189 μg/l（底層）となっており、有機汚濁の進んだ生物生産の高い池といえる。底質については、TOC：45mg/g、TN：5.0mg/g 及び TP：1.0mg/g であり、水深の浅い代表的な富栄養湖の霞ヶ浦（TOC：59mg/g、TN：6.9mg/g 及び TP：1.3mg/g）[8] や諏訪湖（TN：3～6 mg/g 及び TP：1.5～3 mg/g）[9] と同等のレベルであり、底泥中の有機物や栄養塩類の蓄積も著しいといえる。また、硫化物の発生（1.2mg/g）もみられ、底泥が嫌酸化していることが伺われた。なお、図3の水質の経時変化の詳細については後で述べる。

2 貧酸素の形成要因とその形成機構

(1) DO の鉛直分布と経時変化

DO 及び水温の鉛直分布を図4に示す。DO は表層では過飽和となっているが、水深が深くなるほど減少するプロファイルを示した。特に7月10日の調査では水深1.4m 以下では DO=0 の無酸素状態となった。底層が貧酸素化する要因のひとつとして表層の水温上昇に伴う成層化により表層から底層への酸素供給量が減少することが挙げられる。水温の鉛直分布をみると表層と底層では水温差が生じており、水温成層（密度成層）が形成されていることが推測された。DO の経時変化（図3①）をみると、調査初期には底層 DO は低く、無酸素の日もあったが、7月下旬以降は徐々に上昇していた。一方、水温の経時変化（図3②）をみると、調査初期は表層と底層の水温差は大きい（約7℃）が、底層水温の上昇により徐々にその差は小さくなり7月下旬には2℃程度と

表1 水質調査結果

	表層 （最小値～最大値）	底層 （最小値～最大値）
水温 (°C)	32.9 (30.2~35.3)	28.5 (23.8~31.0)
pH	9.1 (8.4~9.8)	6.8 (5.9~8.3)
EC (mS/cm)	0.19 (0.18~0.20)	0.20 (0.18~0.22)
SS (mg/l)	30 (14~45)	48 (30~77)
DO (mg/l)	13.1 (10.1~16.0)	2.1 (0.03~4.5)
TN (mg/l)	2.3 (1.5~4.8)	2.6 (1.5~3.4)
NH ₄ -N (mg/l)	0.06 (0.02~0.12)	0.46 (0.01~1.6)
NO ₃ -N (mg/l)	<0.005 (<0.005~0.011)	0.010 (<0.005~0.025)
NO ₂ -N (mg/l)	0.008 (<0.005~0.039)	0.020 (<0.005~0.098)
TP (mg/l)	0.25 (0.22~0.30)	0.48 (0.29~0.87)
PO ₄ -P (mg/l)	0.038 (0.003~0.14)	0.076 (<0.003~0.30)
TOC (mg/l)	15 (10~20)	14 (8.6~27)
DOC (mg/l)	7.4 (5.7~12)	5.7 (4.1~6.3)
POC (mg/l)	7.5 (3.2~13)	7.9 (3.1~20)
Chl-a (μg/l)	124 (51~156)	189 (116~268)

表2 底質調査結果

含水率 (%)	IL (%)	TOC (mg/g)	TN (mg/g)	TP (mg/g)	硫化物 (mg/g)
77	15	45	5.0	1.0	1.2

なっていた。密度成層は水温差が大きいほど安定するが、7月下旬にかけて徐々に成層強度が低下しているものと思われた。また、底層 Chl-a の増加や pH の上昇（図3③及び⑭）から底層での光合成も活発化していることが推察できる。底層 DO の増加はこれらが要因であると考えられた。

(2) 底層水中及び底泥の酸素消費量

底層水中では動植物やバクテリアの呼吸、あるいは表層で生産され沈降してきた有機物の分解により酸素が消費される。水温成層の形成と同時に水温上昇により底層の酸素消費量が増加することも貧酸素化の要因として挙げられる。ここでは底層水中の酸素消費速度（WOD）と底泥酸素消費速度（SOD）を室内実験により求めた。その結果を表3及び表4に示す。各採水日ごとの平均値は、WODは3.8~6.3mgO/l/日、SODは0.76~1.3gO/m²

/日であり、いずれも8月が高い結果となった。これは7月と比べて8月の方が水温が高かったことや水中生物や有機物の増加（図3の④SS、⑪TOC、⑬POC及び⑭Chl-aの増加）により酸素消費量が増加したことが原因と考えられる。ここで底上0.5mまでを底層と仮定し、底面積1m²、底上からの高さ0.5mの水柱を考えると、測定結果からこの水柱でのWODは、1.9~3.2gO/m²/日と計算できる。これをSODの測定結果0.76~1.3gO/m²/日と比較すると、底層水中の酸素消費量はSODよりもWODの方が大きく約2.5倍の酸素消費速度を示した。この結果から貧酸素化の進行にはSODよりもWODの寄与が大きいと考えられた。

(3) DOの日間変動とその要因

WOD及びSODの測定結果から、底面積1m²、底上0.5mの水柱における酸素消費速度（WOD+SOD）は2.7

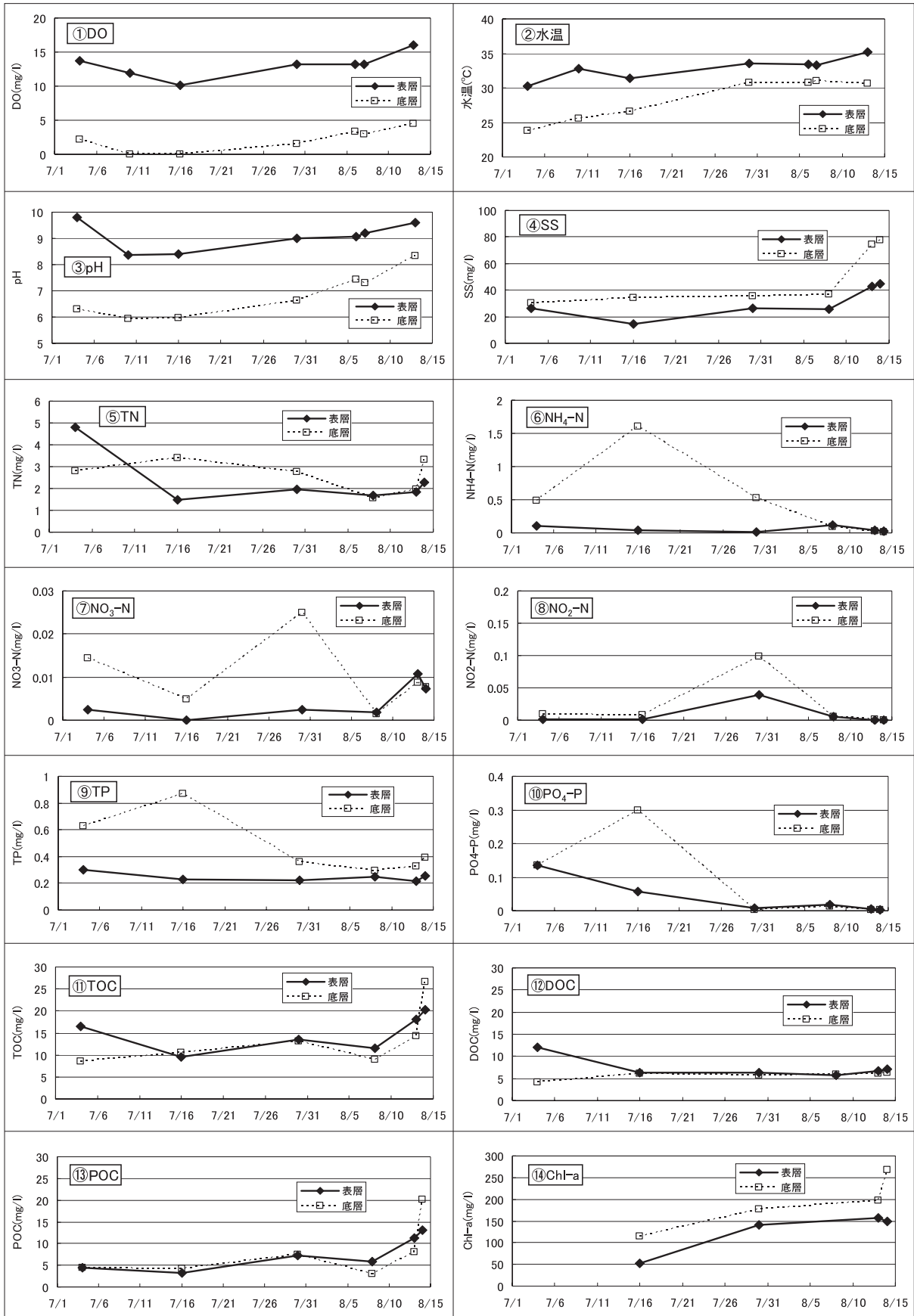


図3 表層及び底層の水質変化

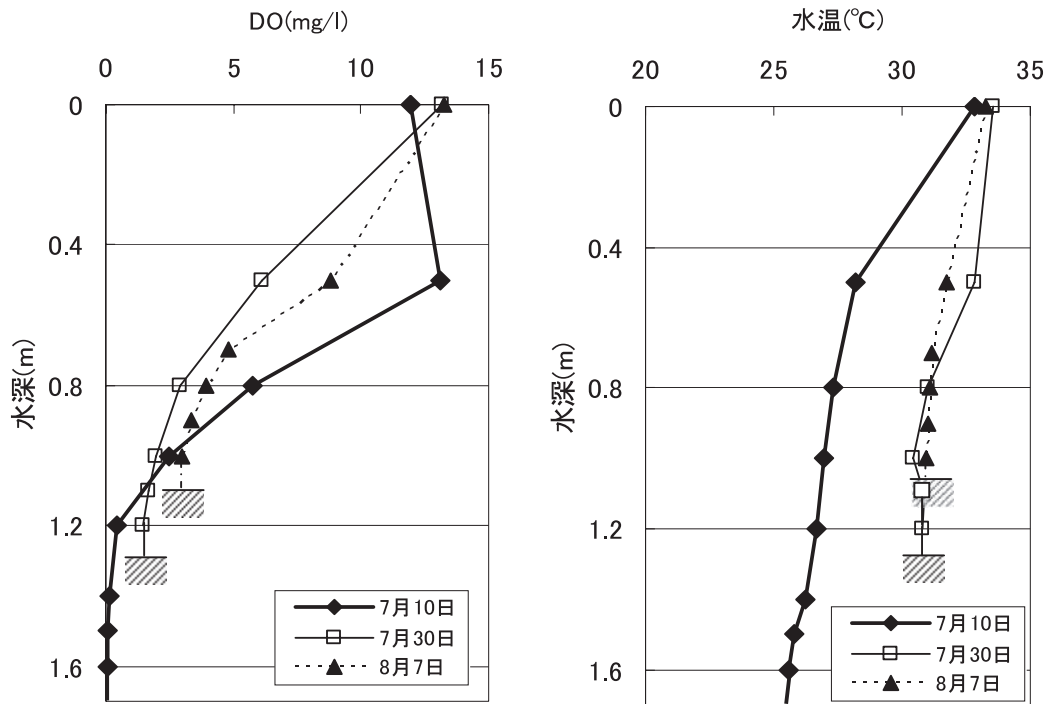


図4 DO及び水温の鉛直分布

表3 底層水の酸素消費速度

採水日	試験温度(°C)	酸素消費速度(mgO/l/日)		
		平均値	最小値~最大値	n
7/16	25	3.8	2.9~4.6	4
8/8	30	6.3	2.7~9.6	5
8/25	25	6.3	5.2~7.3	4

表4 底泥の酸素消費速度

採泥日	試験温度(°C)	酸素消費速度(gO/m ² /日)		
		平均値	最小値~最大値	n
7/16	25	0.76	0.59~0.92	2
8/25	25	1.3	0.81~1.8	2

~4.5 gO/m²/日と見積もることができる。この結果は、飽和のDO濃度が1日程度で無酸素となるほどの高い値である。このことから、底層DOは時間スケールで変動しているものと推定されるため、底層DOの日間変動を調査した。その結果を図5に示す。底層DOの日間変動は、昼間は徐々に低下し、夜間から明け方にかけて急激に上昇するパターンを示した。この変動パターンには、水温成層が関連していることが考えられることから水温の日間変動を調査した。調査は8月13日~9月14日に行ったがその結果の一部を図6に示す。水温の日間変動は、表層では昼夜の差が大きく、中層及び底層ではほとんどみられなかった。表層では日中、水温は上昇

し、14~17時にピークとなった後低下し、夜間から朝にかけて底層と等しくなった。この結果から昼間は表層水の水温が日射により上昇することで水温成層が形成されているが、夜間に表層から底層までの水温が均一となった後は鉛直混合が起こっている、いわゆる日成層が形成されているものと推察された。このことから夜間の底層DOのピークは水温成層の消滅による鉛直混合によりDOの高い表層水が供給されたためと考えられた。鉛直混合後、底層DOは呼吸や有機物の分解によって消費されるため再び減少を始める。日中は光合成により酸素の供給があるため、みかけのDO減少量は緩やかになっているが、日没後は急激に減少した。日没後は底層への

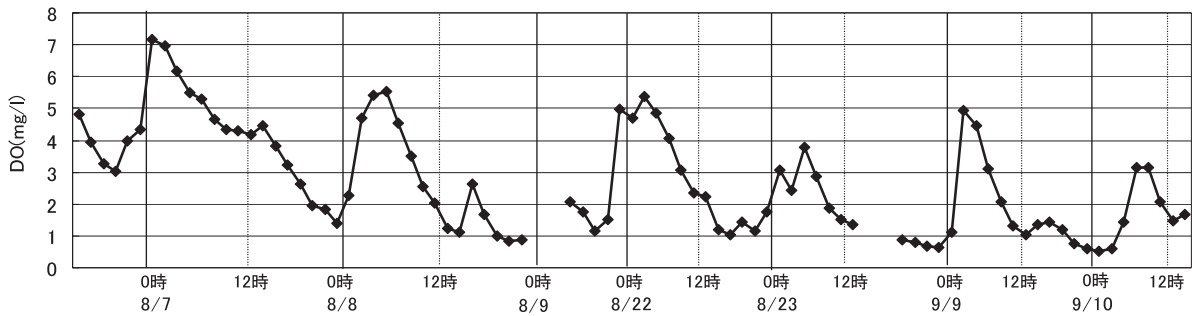


図5 底層DOの日間変動 (8/6~8/8, 8/21~8/23, 9/8~9/10)

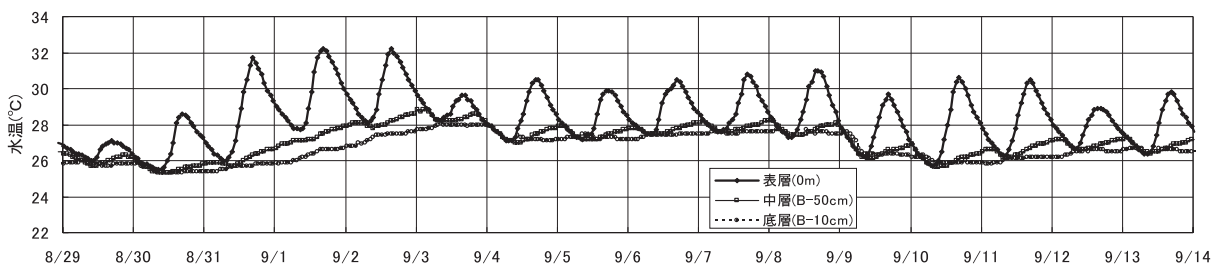


図6 水温の日間変動

酸素供給はなく消費のみであるから、日没から鉛直混合が起こるまでの時間帯における DO 減少量から底層の酸素消費速度を算出した。酸素消費速度は、28~48 gO/m³/日 (8月6日~8月8日及び8月21日の測定結果から計算) となり、室内実験から求めた酸素消費速度 (WOD+SOD: 2.7~4.5 gO/m³/日) とよく合っていた。

(4) 貯水池の貧酸素化機構

以上の結果から調査を行った貯水池での貧酸素化機構を考察する。

貧酸素化を表す DO 濃度の定義はなく、研究対象により様々な値が用いられている。本報では後述するリンの溶出に影響を及ぼす 2 mg/l 以下を貧酸素として定義した。

一般に湖沼等の貧酸素化は、成層が鉛直方向の移流・拡散を抑制し、底層における酸素消費が酸素供給を上回ることによって起きるとされている。このため、貯水池内の成層状態と酸素消費量は貧酸素化の重要な要因となる。

一般的に夏期には湖沼等の水は表面から温められ、底層水との温度差により水温成層 (密度成層) が形成される。水温成層には日射のサイクルに対応して1年単位の成層 (季節成層) と1日単位の成層 (日成層) がある。湖沼等の水深がある程度浅いと風などの作用により鉛直混合が起こりやすく季節成層が安定に形成されない。浅

い湖沼等では日成層のみみられる。日成層の上下の水温差は1°Cのオーダーであり、風速4~5mの弱い風でも容易に混ざり、その日のうちに消滅してしまうような微弱で不安定な成層である [10, 11]。水深の浅い霞ヶ浦 [11, 12] や諏訪湖 [9] などでも日成層が観測されており、今回調査を行った貯水池においても日成層現象がみられた。本貯水池での日成層は、日射の強い昼間に形成され、表層水温の低下する夜間に消滅した。つまり1日のうちに成層時と循環 (鉛直混合) 時があり、これがほぼ毎日繰り返された。貧酸素化の消長も日成層の消長に対応して時間スケールで変化した。成層時には、表層水と底層水は別々の水塊となり、昼間は表層では光合成により酸素が放出されるので表層 DO は過飽和となるほど高濃度となる。一方、底層においても水深が浅いため光が届き光合成が行われるが、酸素消費はきわめて大きいため消費が卓越し、底層 DO は減少する。特に日没後は光合成による酸素供給がなくなるため、さらに DO の低下は著しくなる。日成層の形成は、表層からの酸素供給を遮断するため、持続時間が長いほど底層の酸素環境に悪影響を及ぼすこととなる。今回の調査期間中 (8月13日~9月14日) での日成層の持続時間は平均18.6時間 (12~24時間) であった。一方、貯水池の有機物量及び生物量は多いため底層の酸素消費速度は飽和の DO 濃度が1日で無酸素となるほどの高い値である。夜間の日成層消滅時 (循環時) には表層の高濃度の酸素が供給

されることで底層 DO は一時的に高くなるが、本貯水池での日成層の持続時間と酸素消費速度を考えると、底層はその日のうちに貧酸素状態となり、1日サイクルでの貧酸素の消長が頻繁に起こっているものと推察される。このように日成層の形成に加え、酸素消費速度が速いことが本貯水池で貧酸素化を起こす要因となっている。

一方で日成層が1日のうちで消滅せず持続するケースもみられた。図6をみると8月31日～9月3日にかけては表層と底層の水温の一致はみられず、日成層が3日間持続していた。この間は表層と底層の昼間の水温差が大きく、1日の最大値は、4.8～6.0℃であった。そこで1日の表層と底層の水温差の最大値 (ΔT_{max}) と日成層の持続時間をプロットしたものを図7に示す。これら関係には正の相関がみられ、日中の水温差が大きい場合は成層が安定化し、持続するものと思われた。今回水温の測定期間中(8月13日～9月14日)では1日のうちで日成層が消滅しなかったのはこの3日間だけであった。調査初期(7月上中旬)においては水温の連続測定は行ってはいないが、日中の水温差みると、4.8～7.2℃と大きく(図3 ②)、また DO が完全に0となっている(図3 ①) ことや底層に NH_4-N や PO_4-P が蓄積されている(図3 ⑥及び⑩) ことから、この時期には終日成層が安定し、夜間に鉛直混合は起こっていなかったものと推察された。その後、底層水温は徐々に上昇し、水温差が2℃程度となった7月下旬頃には日成層現象が起こっていたものと推察された。

3 富栄養化要因の解析

(1) 栄養塩溶出速度

底質からの窒素及びリンの溶出実験結果を図8に示す。窒素について、 NO_3-N 、 NO_2-N 濃度の変化はほとんどなかったが NH_4-N 濃度は時間の経過とともに上昇し、窒素は NH_4-N として底質から溶出していることが確認された。コア内の DO は時間とともに低下するが、 NH_4-N の溶出は直上水の DO によらず一定の割合で溶出した。一方、リンの溶出は直上水の DO により大きく影響され、DO が約 2 mg/l 以上ではほとんど溶出は起こらないが、約 2 mg/l より低くなると溶出が起こった。溶出実験結果から時間と濃度との1次回帰式から溶出速度を算出すると、窒素が $92 mg/m^3/日$ 、リンが $18 mg/m^3/日$ ($DO < 2 mg/l$) であった。この値は、富栄養湖である霞ヶ浦(窒素: $68 \sim 134 mg/m^3/日$ 、リン: $1 \sim 10 mg/m^3/日$) や諏訪湖(窒素: $45 \sim 199 mg/m^3/日$ 、リン: $6.3 \sim 36.5 mg/m^3/日$) で報告された値に匹敵するものであった [13]。

(2) 貯水池の富栄養化機構

本貯水池での富栄養化機構について考察する。貯水池の流入負荷は、降雨時の園地からの流入水であり、夏期、特に調査期間中の降雨は少なく、負荷量のほとんどは内部負荷によるものと考えられる。調査の初期(7月上中旬)は水温成層が安定化し、表層と底層の鉛直混合が抑制されていることから、底層は貧酸素化し、底泥から溶出した NH_4-N や PO_4-P が底層に蓄積され高濃度となっている。(図3 ⑥及び⑩) 調査の後期(7月

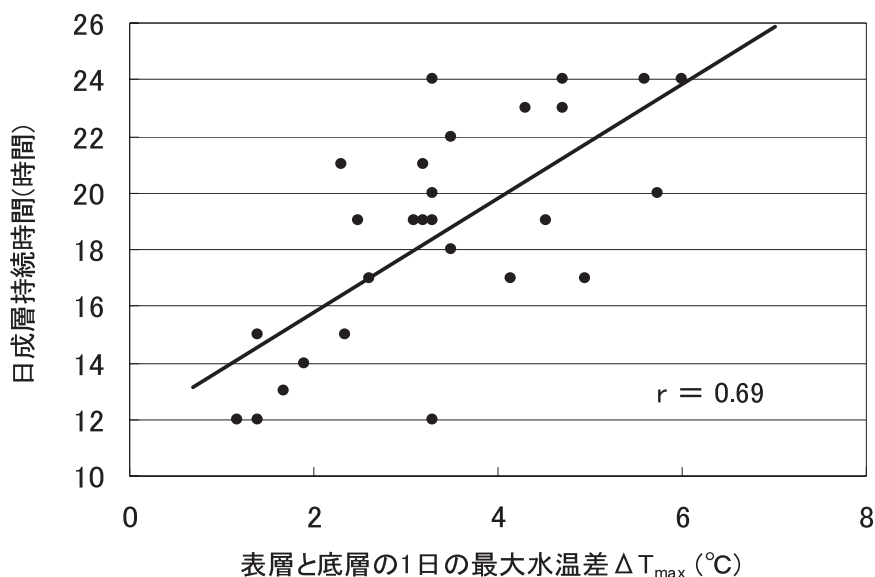


図7 表層と底層の1日の最大水温差と日成層持続時間との関係

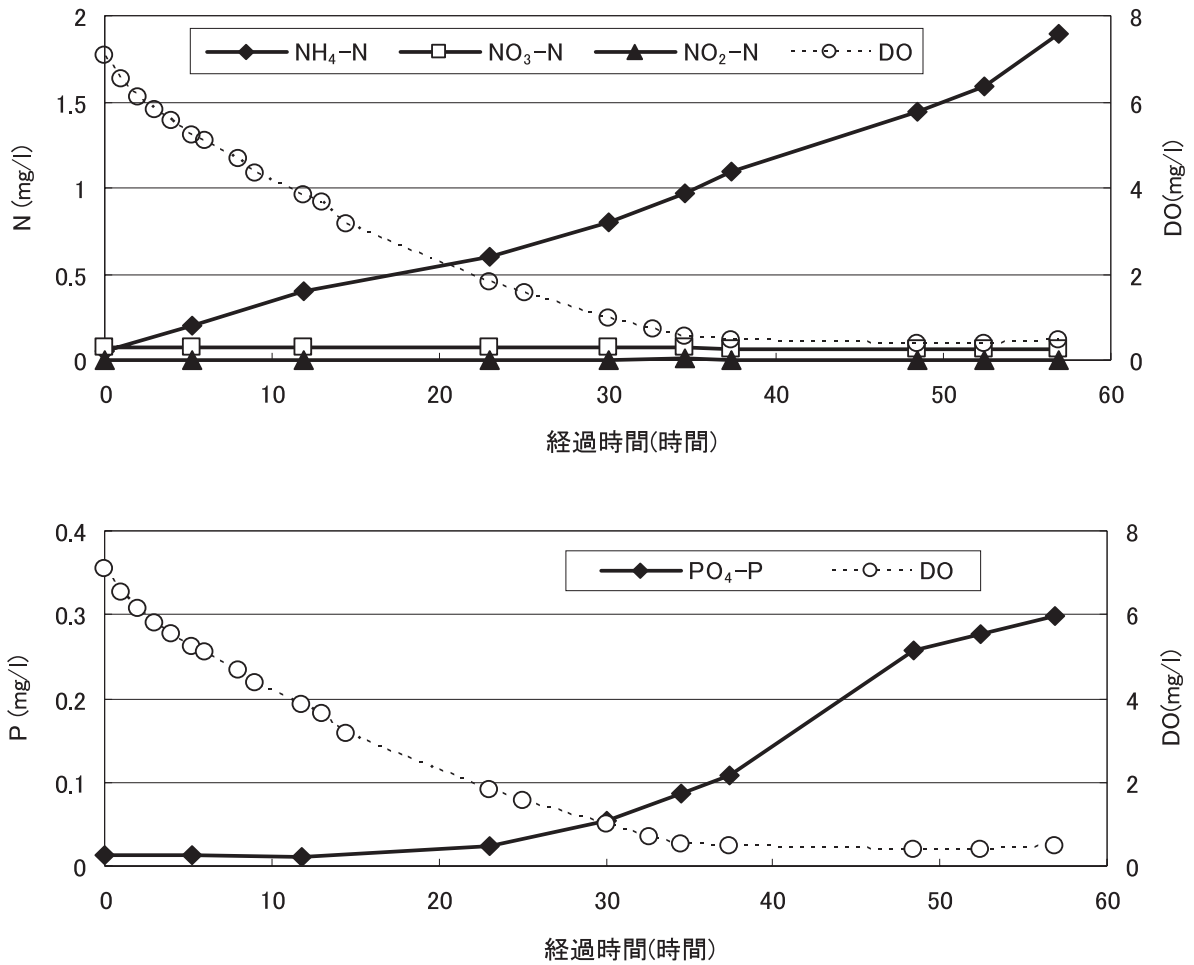


図8 窒素及びリンの溶出実験結果

下旬～8月)には日成層現象が起り、その消滅の際に底泥から溶出した窒素やリンが生産層に供給されることになる。日成層条件はアオコの植物プランクトン(ミクロキスティス、アナベナ)の増殖に好適であるという報告もある[14]。実際、8月上旬以降にはSS、POC及びChl-aが増加しており(図3④、⑬及び⑭)、貯水池内の光合成(一次生産)の活発化や有機物量(生物量)の増加がみられる。また、8月8日頃からアオコが発生したが、日成層現象がアオコ発生を引き金となった可能性もあるといえる。窒素の溶出は底層の酸素環境に依存しないため常に底泥から溶出しており、1日単位での日成層の消滅により頻りに拡散され貯水池内を富栄養化させる。一方、リンはDO < 2 mg/lの貧酸素条件下で溶出し、DOが高いと溶出は起らない。このため日成層の消滅時には表層の豊富な酸素が底層に供給されることで底層は好氣的となり溶出は抑制される。しかし、この貯水池では酸素の消費量が大きいため、鉛直混合により底層の酸素濃度が一時的に上昇しても数時間で貧酸素状態

(リン溶出の条件: DO < 2 mg/l)に戻ってしまう。その結果、日成層の形成・持続(=貧酸素化)と消滅(=鉛直混合)を繰り返すことでリンの溶出と拡散が頻りに繰り返されることになり、リンの水中回帰が促進され、貯水池の富栄養化が進行していくものと考えられる。

今回は貯水池の富栄養化機構について水温(日成層の消長)とDO(貧酸素化の消長)の日間変動及び栄養塩溶出速度から考察した。その結果から栄養塩類についても時間スケールでの変動が推測され、本貯水池での富栄養化機構の検証には栄養塩類も含めた日間変動の調査が必要と考えられる。

まとめ

広島県内の著しく富栄養化の進んだ浅い貯水池における貧酸素化及び富栄養化の要因を解析した。得られた知見は以下のとおりである。

- 1 貯水池では、日成層現象がみられ、昼間から夜間に

かけて成層を形成し、夜間から明け方にかけて成層が消滅し循環（鉛直混合）が起こった。1日のうちで日成層の持続時間は平均18.6時間であった。また、昼間の表層と底層の水温差が大きいほど日成層の持続時間は長くなった。

- 2 底層の酸素消費には底泥（SOD）よりも水中（WOD）の酸素消費が約2.5倍大きく寄与していた。その消費速度（SOD+WOD）は、2.7~4.5 gO/m³/日と見積もられ、飽和のDO濃度が1日程度で無酸素となるほどの高い値であった。
 - 3 底層DOは、日成層の消長に対応して時間スケールで変化した。底層DOは、日成層形成時（昼間～夜間）には減少し、消滅時（夜間～明け方）には一時的に上昇した。上述したように酸素消費速度が非常に速く、また日成層が持続することにより底層DOは減少し、その日のうちに貧酸素化（DO < 2 mg/l）した。このように1日サイクルでの貧酸素の消長が頻繁に起きているものと推察された。
 - 4 底泥からの栄養塩の溶出速度は、窒素が92mg/m³/日、リンが18mg/m³/日であった。窒素はNH₄-Nの形で直上水のDO濃度によらず溶出した。一方、リンは直上水のDOが高いと溶出は起こらず、貧酸素条件下（DO < 2 mg/l）でPO₄-Pの形で溶出した。
 - 5 貯水池内での日成層の消長及び底層での貧酸素の消長により溶出と拡散が頻繁に繰り返されることで、窒素及びリンの水中回帰が促進され、貯水池の富栄養化が進行するものと考えられた。
- 以上のように本貯水池では、日成層現象と酸素消費速度が速いことが特徴であり、このことが貧酸素化の消長、更には富栄養化の進行に密接に関係していた。

参考文献

- [1] 土山ふみ, 身近な水辺, ため池の現状と保全. 水環境学会誌. 2003;26(5):246-251.
- [2] 村松隆, 早坂智恵, 岩崎祐佳, 千葉雅子, 見上一幸. ため池の富栄養化に伴う水質変動現象の分析. 宮城教育大学環境教育研究紀要. 2003;6:15-20.
- [3] 湖沼技術研究会. 湖沼における水理・水質管理の技術. 平成19年3月. http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/kankyo/kankyoku/kosyo/tec/pdf/1.pdf. (参照2011-9-16).
- [4] 笹田康子, 岡井隆. 浅いため池における溶存酸素の挙動. 水環境学会講演要旨集. 2007;41:126.
- [5] 藤田和男, 岩藤高志, 北村雅美, 斎藤直己. ため池での魚のへい死について. 岡山県環境保健センター年報. 2008;32:21-30.
- [6] 気象庁: 昭和26年(1951年)以降の梅雨入りと梅雨明け(確定値): 中国(山口県を除く), http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/baiu/kako_baiu06.html. (参照2011-9-16).
- [7] 広島県保健環境センター水質環境部. 汚濁湖沼の水質改善に関する研究報告書. 平成13年3月.
- [8] 相崎守弘, 大坪国順, 福島武彦, 岩田敏, 村岡浩爾, 高松武次郎. 霞ヶ浦底泥の物性と栄養塩の分布特性(2)炭素, 窒素及びリンの分布. 国立公害研究所研究報告. 1984;51:175-189.
- [9] 豊田政史. 浅い山地湖沼における大気-水-物質循環に関する研究. 京都大学博士論文. 2007. http://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/bitstream/2433/123491/1/D_Toyota_Masashi.pdf. (参照2011-9-21).
- [10] 石川忠晴, 田中昌宏, 小関昌信. 日々の日射によって形成される弱い温度躍層と吹送流の相互干渉. 水理講演会論文集. 1988;32:323-328.
- [11] 石川忠晴, 田中昌宏, 小関昌信. 浅い湖の日成層が水質に及ぼす影響. 土木学会論文集. 1989;411:247-254.
- [12] 小松伸行, 北村立実, 石井裕一, 北澤大輔. 霞ヶ浦における貧酸素水塊の現地観測. 茨城県霞ヶ浦環境科学センター年報. 2007;3:83-91.
- [13] 西条八束, 三田村緒佐武. 新編湖沼調査法. 講談社. 1995. p. 114.
- [14] 中野伸一, 中島拓男, 熊谷道夫, 焦春萌, 早川和秀, Jean-Jaques Frenette, 辻村茂男. アオコ発生機構解明に関連した隔離水塊実験. 琵琶湖研究所報. 1999;16:12-18.