

(66) 貯水池底層への高濃度酸素水供給による水質変化の連続観測

Continuous monitoring of water quality in supplying high concentration dissolved oxygen water into hypolimnion of a dam reservoir

津森ジュン¹, 田中宏明², 鈴木穰¹, 李建華³, 和田順之輔⁴, 田中克知⁵, 福井真司⁶
Jun TSUMORI¹, Hiroaki TANAKA², Yutaka SUZUKI¹, Jianhua Li³, Junnosuke WADA⁴, Katsutomo TANAKA⁵
and Shinji FUKUI⁶

ABSTRACT; Nutrient release from sediments sometimes significantly affects water quality of eutrophicated reservoirs. Various studies have been conducted so far on countermeasures for controlling nutrient release from the sediments by supplying oxygen gas into water such as Micro bubbles system and Injection of surface water into bottom layer in reservoirs. In this study, we investigated a novel water quality restoration technology supplying water supersaturated dissolved oxygen into the bottom layer to control nutrient release from the sediments. We had conducted a field investigation in Ushikubiri reservoir using the technology from July 23 to September 15, 2002. Temperature, DO and ORP in water column were continuously monitored at two locations by a sensor system during the experimental period. Further, we observed nutrients, Chl-a, SS, VSS and DOC concentrations in water column by manual samplings. The DO supply system was intermittently operated by temperature control, in order to maintain stratification of the water column even under DO supply. As a result, increase in DO in the bottom layer was significantly observed without destruction of the stratification, which resulted in decrease of phosphorus and nitrogen concentrations in the water column. The decrease in total nitrogen in the middle layer of the water column seemed due to denitrification because of depletion of DO in the middle layer. This field experiments demonstrates that the system could reduce nutrient release from the sediments and improve water quality of water column.

KEYWORDS; High concentration dissolved oxygen, sediment, nutrient release, DO, ORP, monitoring.

1. はじめに

日本の多くの多目的ダム貯水池においては、夏期に水温成層が形成される。このため、水柱や底泥での有機物分解等に伴い酸素が消費されるが、水温成層により鉛直方向の水の混合が抑制されるため底層が貧酸素化し、底泥からの栄養塩、有機物や金属などの溶出速度が大きくなる。こうした底層での貧酸素化対策としては、間欠揚水筒方式や散気管方式など気泡噴流により鉛直混合流を起こす成層破壊型 (Destratification) の曝気循環方式や底層部に空気や酸素を供給する深層曝気方式 (Hypolimnetic Aeration) がこれまで取られてきた。成層破壊型の曝気循環方式では底層水の浮上や酸素溶解量の限界などに課題^{1,2)}があることから、近年、我が国においても深層曝気方式の導入³⁾や、新たな微細気泡発生装置を用いた方式²⁾や溶存酸素の豊富な表層水を底層へ送り込む方法⁴⁾などが検討されている。深層曝気方式については McQueen ら⁵⁾によると 1949

1 (独)土木研究所水質チーム (Water Quality Research Team, Public Works Research Institute)

2 京都大学大学院環境質制御研究センター (Research Center for Environmental Quality Control, Kyoto Univ.)

3 同济大学環境科学工程学院 (College of Environmental Science and Engineering, Tongji Univ.)

4 三洋テクノマリン (株) 環境調査部 (Environmental Research Div., Sanyo Techno Marine, Inc.)

5 横河電機 (株) 環境システム営業本部 (Environmental System Sales Div., Yokogawa Electric Corp.)

6 松江土建 (株) 環境部 (Environmental Project Div., Matsue Doken, Inc.)

年頃から欧米の湖沼やダムにおいて研究や実用化が始まっており、1980年代にはエアリフト方式の深層曝気方式について多くの研究（例えば McQueen ら⁹⁾）が行われたが、現在も設計酸素供給量の設定に課題⁷⁾を残している。また、微細気泡方式では環境中に放出される微細気泡による酸素溶解効果は小さいとの指摘⁸⁾や、表層水供給方式では植物プランクトンが増殖した表層水を供給すると底層水質の悪化が懸念されるなど、解決すべき課題がある。さらに、底層対策のみでは表層での富栄養化による植物プランクトンの増殖などが防げないため、成層を維持しつつ表層対策との併用が可能な底層対策が必要である¹⁾。

筆者らは、従前の深層曝気方式がいずれも湖沼や貯水池の底層部へ空気や酸素を供給し、水柱内で溶解させる方式であるのに対し、気体溶解装置により強制的に酸素を溶解させた湖水を底層部へ供給する高濃度酸素水注入システムの開発を行っている。本システムは、底層環境の改善を目的に、水温成層を破壊することなく底層のみに溶存酸素を供給することに加え、底層の水温、溶存酸素(DO)を連続モニタリングし自動制御することにより、効率的な酸素溶解機能を有するという特徴を有する新しいシステムである⁹⁾。本研究は、実際の貯水池で高濃度酸素水を注入することにより、水質変化がどのように起こるかを現地観測し、その結果から、水温成層を維持したまま効率的に底層へ酸素を供給することが可能なことと、それに伴い $\text{PO}_4\text{-P}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ の溶出抑制効果、底層部での硝化促進及び中層部での脱窒現象を確認したことから、ここに報告するものである。

2. 方法

2.1 調査対象水域の概要

調査対象水域は、図-1に示す国土交通省所管の阿武隈川水系三春ダムに設けられている牛縊前貯水池（以下、「前貯水池」と云う）である。この前貯水池は、本貯水池への流入負荷削減を目的として、牛縊川（流域面積 5.1km^2 ）からのSS性汚濁物質を前貯水池内に沈殿させるために設置されたものであり¹⁰⁾、洪水期の6月11日から10月10日にかけて三春ダム本貯水池の水位が標高318.0mの制限水位まで下げられるため単独の貯水池として出現する。貯水容量は約 $214,000\text{m}^3$ 、湛水面積約 $47,000\text{m}^2$ 、最大水深は概ね約6.3mである。前貯水池の夏期の滞留時間は22.5日¹⁰⁾と比較的長いことから夏期には水温成層が発達する。牛縊川からの流入水質は、平成8年から15年の三春ダム管理所の調査結果では、年平均値で総窒素(TN)は $1.82\sim 2.54\text{mg/l}$ 、総リン(TP)は $0.03\sim 0.05\text{mg/l}$ となっている。

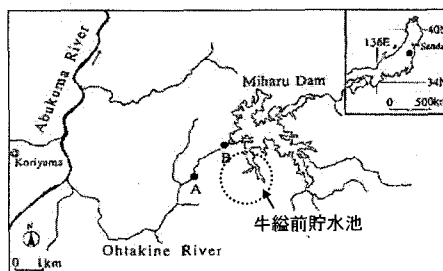


図-1 三春ダム位置図

2.2 高濃度酸素水供給システム

本システムは、溶存酸素がほとんど無い底層湖水に高濃度の酸素を溶解させることにより底層の酸素環境を改善するものである。このため、底層湖水を湖面まで汲み上げて気体溶解装置に導入し、高濃度の酸素を溶解させた後に、再び底層に吐出させるシステムとなっている。吐出によって生じる流動により水温成層を破壊しないように、水質モニタリングを併用した自動運転制御を特徴としている。

1) システム構成

図-2、3に高濃度酸素水供給システム及びその水質モニタリングの概略を示す。本システムは、圧力スイング吸着(Pressure Swing Adsorption; PSA)法による酸素発生装置(コフロック社 OX-6.0)、気体溶解装置、湖水循環ポンプ装置と水質モニタリング機器から構成される。これらの装置は水面下に設置するセンサ部を除き貯水池内の台船上に設置され、商用電源を用い陸上部よりケーブルにより供給される電力により運転が行われる。底層部へ供給する高濃度酸素水は、水温躍層以下の貯水池底層から湖水をポンプにより汲み上げ、

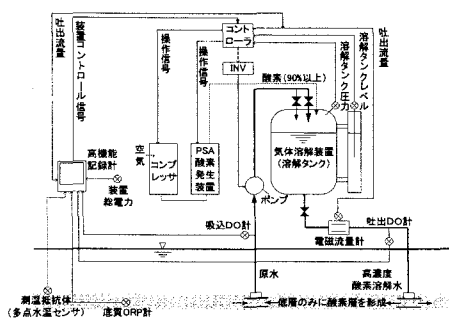


図-2 高濃度酸素水供給システム構成図

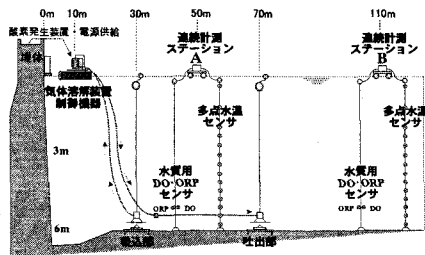


図-3 高濃度酸素水供給システムと水質モニタリングの配置概要(牛轡前貯水池縦断方向)

湖面上の压力容器内で酸素ガスを溶解させた後、再び底層部へ吐出させる。高濃度酸素水は、PSA 酸素発生装置によって空気中から窒素を取り除くことにより体積比で酸素が90%以上、残りが窒素とアルゴンとなった空気を気体溶解装置による圧力制御によって湖水に溶解させることにより50mg/l～70mg/lの高濃度を保つことが出来る。また、吸込部及び吐出部は円盤型となっており全水平方向に吸込及び吐出を行う。なお、使用電力量は、今回の実験で用いた吐出流量90m³/hと30m³/hの条件の場合には、それぞれ定格消費電力で27kW、11.5kWとなっている。

2) 運転制御方法¹⁾

本システムは成層を破壊するような過剰な流動が生じないようにするため、水温センサによる水温計測結果の演算を用いた自動運転により酸素水の供給量制御を行っている。これは、事前に観測した水温鉛直分布から水温成層を把握し、この時点での成層状態を破壊しないよう制御を行うものである。本実験では、水温躍層以深の底層部の上下端の2つの水深における水温データを利用し、これらの水温差が一定値以下にならないことを供給量制御の条件として定めた。これは、底層部上下端の水温差が小さくなる場合は、底層部において循環混合が生じており、この循環混合が水温躍層より上層にも流動の影響を与えられられることから、この場合には装置を停止させることとしたものである。また本実験ではDOによる制御は行わなかったが、底層部でDOが高くなれば酸素を供給する必要は無くなることから、底層水中のDOが一定値を超える場合にも停止する制御を行うシステムとして設計を行った。

2.3 実験条件

2002年7月23日から9月18日にかけて酸素供給及び吐出流量を変化させた現地実験を行った。実験条件を表-1に示す。7月23日から7月28日にかけてRun1を行い、酸素を供給せずに吐出流量90m³/hで底層部の湖水を循環させ、この実験結果より

表-1 実験条件と稼働状況

Run No.	期間	日数	吐出流量 (m ³ /h)	酸素供給	稼働時間 (h)	稼働時間率 (%)
1	7/23～7/28	6日間	90	無し	59	47.9
2	7/30～8/12	14日間		有り	142	44.6
3	8/12～8/19	8日間	30		151	90.4
4	8/20～9/2	14日間	0	無し	0	0
5	9/3～9/18	16日間	30	有り	323	88.9
6	9/19～9/25	7日間	0	無し	0	0

より湖水循環による水温成層の破壊が無いことと、その時点における水温成層状態から運転制御に用いる水温計測水深及び水温差について制御条件¹⁾を定めた。Run1終了後、1日置いてから酸素を溶解させた水を底層に戻すRun2を開始した。吐出流量はRun1と同じ90m³/hとした。溶解装置出口で測定した吐出水のDOは、運転開始から約5時間で50mg/lに達し、その後は概ね50～60mg/lで推移していた。続いて8月12日から高濃度酸素水を流量30m³/hで注入したRun3を行い、8月19日に運転を停止した。この後Run4として8月20

日から9月1日まで、装置運転を行わずに底層部の酸素消費過程における水質変化を調査した。Run5はRun2とは吐出流量による違い、Run3とは実験前底層酸素環境の違いによる水質変化を比較するため9月3日から9月18日まで流量 $30\text{m}^3/\text{h}$ により運転した。Run6はRun4と同様に酸素消費過程を調査するため9月19日から25日までの水質変化を調査した。Run2では水温による自動制御の結果、稼働時間率（実験期間に対する装置運転実稼働時間の割合）が約45%となる間欠運転となった。Run3及びRun5は流量を $30\text{m}^3/\text{h}$ として $90\text{m}^3/\text{h}$ 運転と同じ水温制御を行ったが、稼働時間率は約90%とほぼ連続運転となった。

2.4 水質観測

図-4に示すA、B地点、その他14地点(St.1~14)と流入、流出地点において水質調査を適宜行った。調査項目はA、B地点では携帯型多項目水質計（横河電機、WM22）を用いて水深0.5mから6.0mまで50cm毎と吐出高さ5.8m水深でpH、導電率、濁度、DO、水温、ORPを測定した。また、バンドン採水器にて水深0.5、1.0、2.0、3.0、4.0と5.5mは両地点とも採水し、さらにA地点では水深6.0m、B地点では水深5.8mにて採水を行った。採水した試料はクーラーで冷蔵運搬して土木研究所に持ち帰り、SS、VSS、

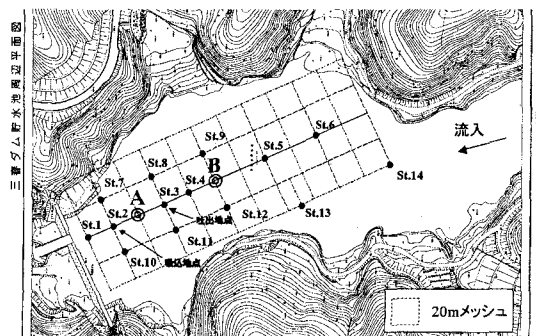


図-4 調査地点平面図

Chl-a、栄養塩（総窒素TN、溶存態窒素DTN、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、総リンTP、溶存態リンDTP、 $\text{PO}_4\text{-P}$ ）、溶存性有機態炭素（DOC）について速やかに分析を行った。

A、B以外の地点では携帯型多項目水質計により水深方向0.5、1.5、3.0、4.0、5.0と6.0mにてpH、導電率、濁度、DO、水温、ORPを測定した。また、流入、流出地点ではA、B地点と同じ項目について携帯型多項目水質計による測定と採水による水質分析を行った。測定方法は、SS、VSSはWhatman製GF/Bを用いたろ過により、Chl-aは前処理をUNESCO法で行い単波長吸光度法で測定した。栄養塩、DOCはそれぞれオートアナライザ（ブランルーベ、TRAACS2000）、TOC計（島津、5000A）を用いて測定した。

3. 結果

3.1 降水量、気温

図-5に三春ダム近傍にある福島気象台船引観測地点における実験前後も含めた期間の降水量と気温を示す。Run1開始からRun2終了までの21日間の降雨日数は3日間、累加雨量は58mmと他のRun3~6に比べて少なく、また気温は $18.6\sim 33.6^\circ\text{C}$ と他のRun3~6と比べると高い傾向にあった。吐出流量を $90\text{m}^3/\text{h}$ から $30\text{m}^3/\text{h}$ に切り替えた8月12日からのRun3期間中は、8日間のうち6日間は降雨があり、累加雨量も125mm

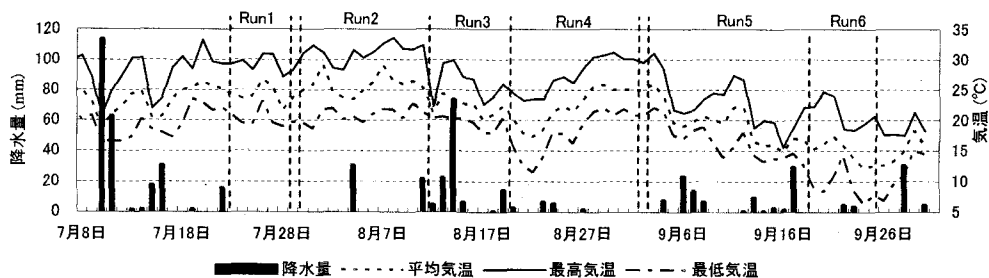


図-5 降水量、気温

と多く、最高気温、最低気温ともそれ以前に比べ低い傾向にあった。8月20日から9月1日までのRun4においては、累加降雨量も10mmと少なく、気温も上昇傾向にあった。9月3日以降のRun5、6においては、気温は低下するとともに、他の実験期間に比べ降雨回数が多かった。

3.2 水温、溶存酸素の経時変化

図-6にB地点の水温とDOの経時変化を、表層部は0.5m水深、中層部は3.0m水深、そして底層部は吐出口開口部がおおよそ5.8m水深に位置することから吐出高さの上下となる5.0mと6.0m水深でのデータを例示する。

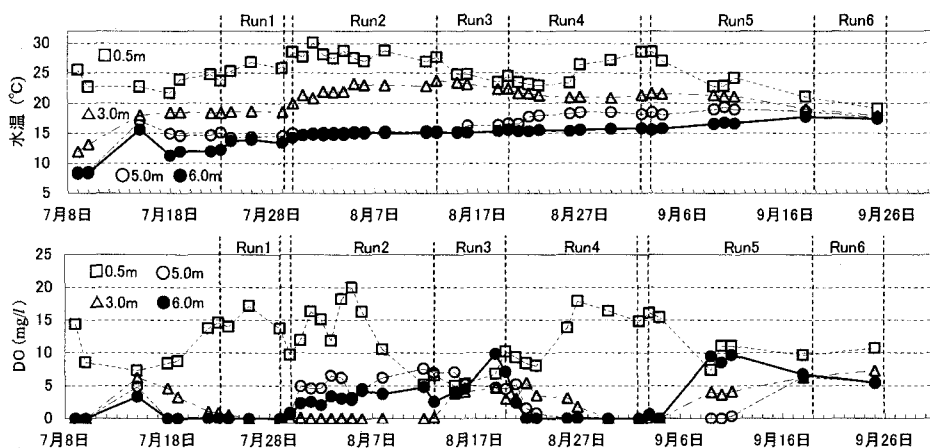


図-6 B地点の表層 0.5m、中層 3.0m及び底層 5.0、6.0m水深での水温、DO濃度の経時変化

1) 水温

Run1 開始前日の7月22日では表層と底層では10℃以上の差となり水温成層が形成されていた。Run1において底層5.0mと6.0m水深で実験開始前に異なっていた水温が同程度になっていることから、装置の稼働により底層水が攪拌混合されたものと推測された。また、水深3.0mの水温はほぼ一定であり、底層5.0mと6.0m水深の水温とは異なることから、装置運転による混合の影響は生じていないと考えられた。酸素供給を行ったRun2からRun3にかけてもRun1と同様に底層部の水温は5.0mと6.0m水深で同程度となっていること、中層0.3mと底層5.0mの水温差に変化は見られないことから、底層のみが流動していると考えられた。Run5では吐出流量をRun2と同じ30m³/hで運転を行ったが、底層5.0mと6.0m水深では水温が同程度になることは無かった。またRun5最終日9月18日の調査では全水深でほぼ同程度の水温となっており、この原因は9月13日から17日の降雨の影響と、平均気温の低下により循環期に入った影響と考えられた。

2) DO

図-6よりRun1開始前の7月22日時点では中層3.0m、底層5.0、6.0mでDOがほぼ無くなっていることが分かる。Run1では、底層部の湖水を循環させるだけの実験を行ったが、中層、底層ともにDO変化は見られず、この結果、本システムにおいて酸素供給を行わない限り酸素混入は無いことが明らかとなった。Run2において吐出流量90m³/hで酸素供給を行った結果、底層部5.0、6.0mのDOが上昇した。これに対し、中層3.0mではDOの上昇は見られず、吐出流量を30m³/hとしたRun3の途中まで無酸素の状態は続いている。Run2、3で酸素供給を行ったにも関わらず中層3.0mでDOは上昇せず、表層から底層に向けて好気、嫌気、好気の互層の溶存酸素構造が形成された。Run3後半で中層3.0mのDOが上昇しており、これは降雨流入により表層部と中層部が混合した結果と考えられた。これは表層0.5mと中層3.0mの水温が同程度になっていることから推測出来る。その後、運転停止に伴いRun4では水深6.0m、5.0m、3.0mと下層より順に再び酸素消費が

生じていった。この結果、Run5 開始前の中層 3.0m、底層 5.0、6.0m では DO が再び無くなっている。Run5 では Run3 と同じ吐出流量 $30\text{m}^3/\text{h}$ で酸素供給を行ったが、底層 5.0m での DO の上昇は認められず、底層 6.0m 水深では DO が上昇した。この結果、前述のように底層 5.0、6.0m で水温が異なることから、吐出流量 $30\text{m}^3/\text{h}$ では Run1、2 の $90\text{m}^3/\text{h}$ ほど底層で大きな流動が生じなかったと考えられた。

3) ORP

図-7 に B 地点の湖底より 1.0m 上で連続観測した ORP データを示す。Run1 においては ORP は 0mv 程度であったが、Run2 で酸素を供給すると ORP は増加し、酸素供給停止後の Run4 途中までこの状態は続き、その後減少し続けマイナス値となった。ORP の変化は底層 5.0、6.0m の DO が 0mg/l となるよりも遅れて生じており、実験期間中の観測では、常に DO 変化よりも遅れて ORP が変化する傾向が見られ、底層部への酸素の供給による ORP の変化が観測された。

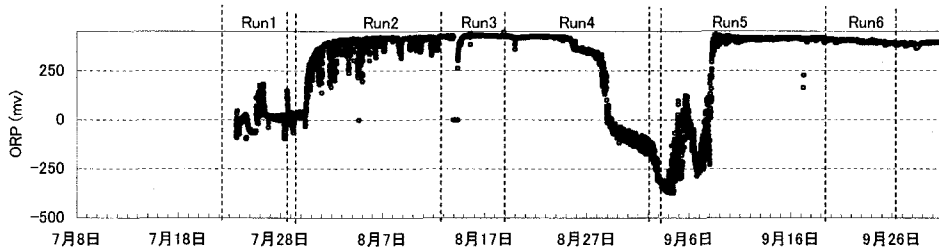


図-7 ORP の経時変化(B地点の湖底より1m上での連続観測結果)

以上のように、7 月 23 日から 9 月 25 日の実験期間中において、水温成層の形成過程、酸素供給による底層 DO の上昇や運転停止に伴う酸素消費と ORP の変化が観測された。また、Run2 において酸素供給中も中層 3.0m で DO が 0mg/l であることから、酸素供給範囲は底層部に限定されたことが示唆された。

3.6 栄養塩濃度の変化

図-8 に水温、DO と同様に B 地点の $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の経時変化を表層 0.5m、中層 3.0m と底層 5.0、5.8m 水深における測定結果を例示する。

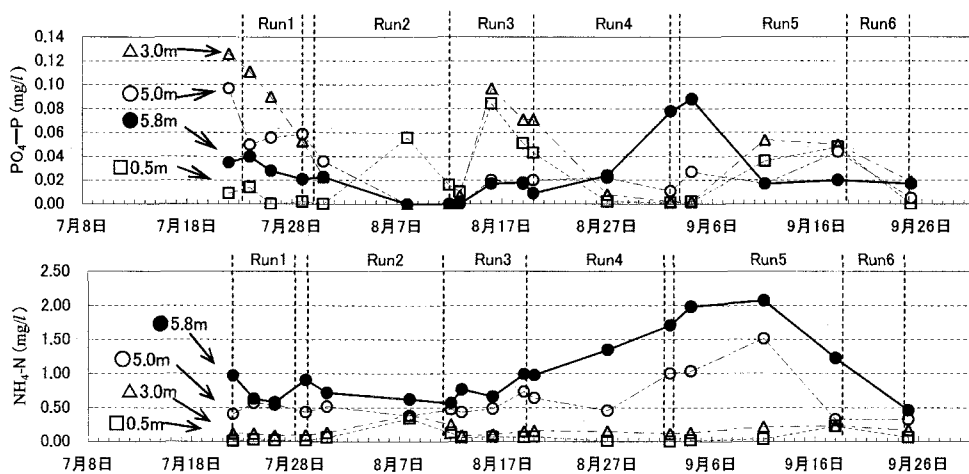


図-8 B地点の表層 0.5m、中層 3.0m及び底層 5.0m、5.8m水深での $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の経時変化

1) $\text{PO}_4\text{-P}$

Run1 開始前日の 7 月 22 日では中層 3.0m、底層 5.0m で 0.1mg/l 以上と実験期間中で最も濃度が高かった。また、Run1 から Run2 開始前における底層 5.0m の $\text{PO}_4\text{-P}$ は $0.05\sim 0.1\text{mg/l}$ であり、これは水温成層の形成や

溶存酸素が底層部で消費されている状況を考慮すると底泥からの $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出が原因ではないかと推測された。Run2 開始前 7 月 29 日の中層 3.0m, 底層 5.0m, 5.8m の $\text{PO}_4\text{-P}$ は $0.02\sim 0.08\text{mg/l}$ であったが, Run2 の運転 9 日後にはいずれの水深でも定量下限値 0.02mg/l 以下に減少した。運転停止中の Run4 では底層 5.8m の $\text{PO}_4\text{-P}$ の上昇が観測され, 底層部の DO が 0mg/l となっており, 再び底泥から溶出したものと考えられた。Run5 において酸素供給を行ったところ底層 5.8m での $\text{PO}_4\text{-P}$ は再び減少した。

2) $\text{NH}_4\text{-N}$

図-8 示す Run2 開始前 7 月 29 日の $\text{NH}_4\text{-N}$ は中層 3.0m, 底層 5.0m, 5.8m で $0.10\sim 0.91\text{mg/l}$ あり, Run2 運転 9 日後に定量下限値 0.05mg/l 以下 $\sim 0.6\text{mg/l}$ へと減少した。図-9 に示す Run2 の酸素供給前後の B 地点における窒素鉛直分布からも底層における $\text{NH}_4\text{-N}$ の減少が確認出来る。また, 同様に酸素供給を行った Run5 でも底層 5.0, 5.8m で $\text{NH}_4\text{-N}$ の減少傾向が見られた。これは図-9 の底層 5.8m において $\text{NO}_x\text{-N}$ の増加が起きていることから, 底層への酸素供給による溶出抑制と硝化促進の結果と推測された。Run4 においては底層 5.0, 5.8m で $\text{NH}_4\text{-N}$ の上昇傾向が見られ, 底層部で酸素が消費されていることから, この濃度増加は溶出によるものと考えられた。

3) 互層構造における窒素類の変化

図-10 に示すように B 地点の DO は 7 月 29 日に水深 2.5m より下層で 0mg/l となっていたが, 酸素供給とともに水深 4.0m 以下で上昇したが, 中層 2.5~4.0m では引き続き DO が 0mg/l となる嫌気的環境となっていた。この時, 中層 2.0~4.0m において $\text{NO}_x\text{-N}(\text{NO}_3\text{-N}+\text{NO}_2\text{-N})$ の顕著な減少が確認できた。図-9 に示す中層 2.0~4.0m での TN, $\text{NH}_4\text{-N}$ の減少と図-10 に示す DOC の観測結果から, これは脱窒によるものではないかと推測された。この傾向は, 吐出流量 $30\text{m}^3/\text{h}$ の Run3 においても類似の傾向が観測された。

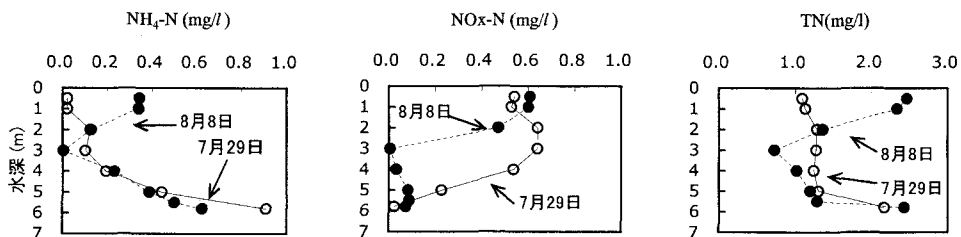


図-9 B地点の窒素の鉛直分布(Run2:7月29日,8月8日)

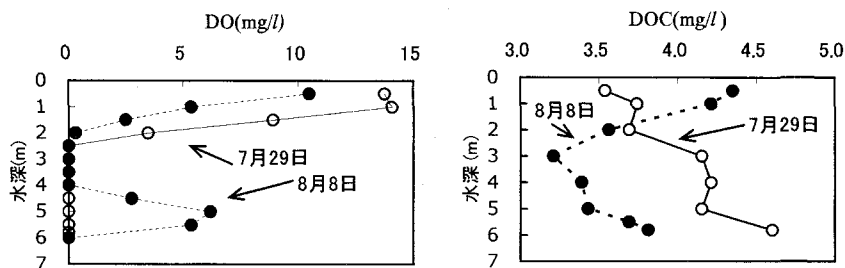


図-10 B地点のDO, DOCの鉛直分布(Run2:7月29日,8月8日)

4. 考察

4.1 底層部の酸素環境改善状況

Run2 を対象に高濃度酸素水供給システムの効果を検討する。図-11 は Run2 期間中の St.4, 5, 9 と 14 における DO 鉛直分布の変化を経過日数毎に示したものである。なお, 7 月 30 日は St.14 で測定を行っていない。Run2 は 8 月 12 日まで続いているが, 8 月 11 日以降に降雨があったため, 降雨の影響がない 8 月 8 日の

データを採用した。7月30日調査で底層部のDO上昇が認められた最も遠い調査地点は、吐出口から80m離れたSt.5であり、5.0m水深で0.7mg/lとなった。測定時刻は、当日10時に運転開始してから約5時間後であった。ただし、St.5より吐出口に近いSt.11、St.12などDO上昇が認められない地点もあった。この原因としては、測定精度の問題、吐出口から均一に拡散していない、貯水池底層の空間的に酸素消費の違うことや底層での流動機構などが関与していると考えられ、今後、底層での流動状況について把握する必要があると考えられた。1日後の7月31日には、吐出地点から約165mと最も遠く離れているSt.14地点においても底層5.0mのDOが1.8mg/lとなり上昇が認められた。この時点での全調査地点の水深4.0mにおけるDOは0mg/lであったことからSt.14におけるDO上昇も装置効果によるものと考えられた。また、4.0m水深より下層の全調査地点でのDOは0.6mg/l (B地点4.5m水深) から5.0mg/l (B地点5.5m水深) の範囲、9日後(8月8日)も水深4.0mより下層のみでDOが上昇しており、全調査地点下層でのDOは0.9mg/l (A地点4.5m水深) から8.3mg/l (St.4地点5.0m水深) の範囲にあった。これらのことから本システムは底層部のみに酸素を供給していることが確認出来た。また、吐出部から165m離れた上流まで底層部のみに酸素供給が出来ていたことから、設計条件として吐出流量や溶解酸素量を調整することにより、効率的な底層環境の改善が図れると考えられた。

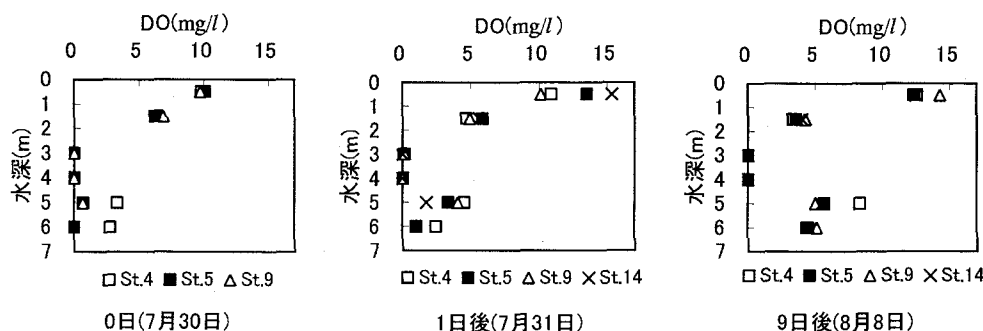


図-11 Run2の0日(7月30日),1日後(7月31日)と9日後(8月8日)のDOの地点別鉛直分布

本システムのように酸素供給を行うシステムにおいては、対象とする水域での酸素消費速度を把握する必要がある。ここでは、Run2 期間中における前貯水池底層部における酸素消費速度の概算を行うこととする。先にも述べたとおり図-11 に示す水深4.0mでのDOのように、全調査地点の水深4.0mにおいてDOの増加は認められないことから、水深4.0m以深のみを対象に考える。計算対象とする水深4.0mから湖底6.3mまでの底層容量は約57,000m³である。9日後までの稼働実績は約112時間、総吐出量は底層容量の約15%に相当する8,800m³であった。これに実験中に測定した吐出水DOの最小値である46mg/lを掛けると供給酸素量は405kgとなる。これに対し9日後の全調査地点の水深4.0m以深でのDOの平均値は6.1mg/lであり、底層部の残存酸素量は約348kgとなった。これと供給酸素量との差分、酸素消費量57kgを湖底面積13,000m²と経過日数9日で除すると、酸素消費速度0.5g・m⁻²・d⁻¹となった。これは、津森ら¹²⁾がRun4での酸素消費過程から求めた酸素消費速度3.45g・m⁻²・d⁻¹の7分の1であり、和田ら¹³⁾が室内実験より求めた水中での酸素消費速度0.5g・m⁻²・d⁻¹と同程度となった。今後、現地実験と室内実験を更に行い酸素供給と貯水池内の酸素消費の関係について、定量的な解明を進めていく必要がある。

4.2 栄養塩の溶出抑制効果

図-12にRun3後半からRun5前半までの8月8日から9月4日におけるB地点の底層6.0mのDOと底層5.8mのPO₄-Pの経時変化を示す。この結果よりDOが0mg/lになるとPO₄-Pの溶出速度が著しく大きくなること、DOが2mg/l程度となればPO₄-Pの溶出が抑制されると示唆された。

また、図-13 に酸素供給を行った Run2、5 における酸素供給前後の B 地点における導電率鉛直分布の経時変化を示す。小松ら¹⁴⁾によれば、導電率の値は底泥から溶出した還元的な化学物質の濃度に依存するとしている。Run2、5 ともに実験前には中層 2.0~4.0m に比べ底層 4.0~6.0m では深くなるほど導電率が大きくなる傾向があり、それぞれ酸素供給前には栄養塩類の溶出が生じていると推測された。Run2 の場合は酸素供給後は導電率が底層部で同程度の値になることから溶出は抑制されたものと考えられた。

しかし、Run5 の場合には実験開始から 15 日後の 9 月 18 日においても底層 4.5m 以深で導電率は小さくなっているものの、底層に近いほど高い傾向を持っており、溶出抑制効果を見いだすことは出来なかった。Run5 において底層部の導電率が勾配を持っている理由としては、吐出流量が Run2 に比べて小さかったことや、図-5 に示すように 9 月 18 日以前の降雨流入の影響が考えられた。しかしながら、図-6、8 と図-12 に示す DO と $\text{PO}_4\text{-P}$ の経時変化、図-13 に示す Run2 の導電率鉛直分布の経時変化の結果から総合的に考えると、本システムで底層部に酸素を供給することにより底泥からの $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出抑制効果があったと考えられた。

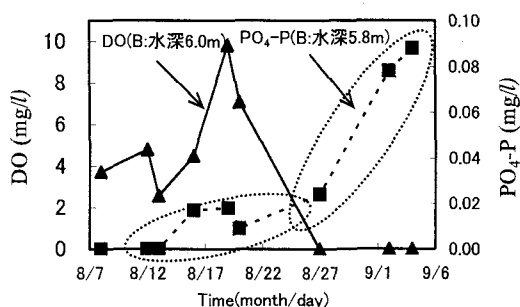


図-12 B地点のDO(6.0m)と $\text{PO}_4\text{-P}$ (水深5.8m)の経時変化

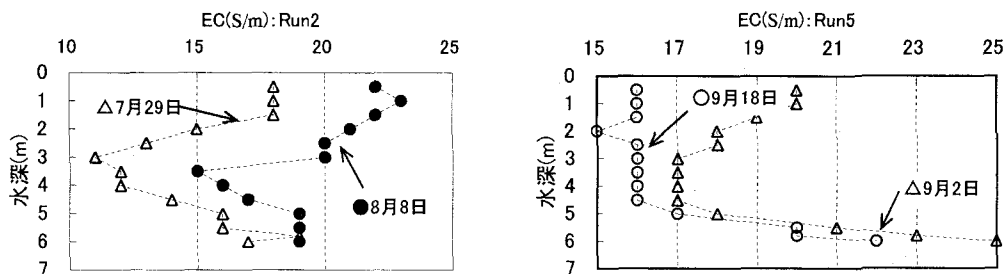


図-13 酸素供給によるRun2,5でのB地点の導電率鉛直分布の経時変化

5. まとめ

底層湖水を汲み上げ気体溶解装置により酸素を溶解させて生成した高濃度酸素水を貯水池底層に供給させるシステムの有効性を調査する目的で、実貯水池において2種類の吐出流量による酸素供給実験を行い、次のことが明らかになった。

- 1) 水温成層の破壊を防ぐために水温連続観測データによる運転制御を行ったところ、吐出流量 $90\text{m}^3/\text{h}$ の場合は稼働時間率で約 45%の間欠運転、吐出流量 $30\text{m}^3/\text{h}$ の場合は約 90%とほぼ連続運転となった。
- 2) 無酸素状態の貯水池底層へ $\text{DO} 50\sim 60\text{mg/l}$ の高濃度酸素水を吐出流量 $90\text{m}^3/\text{h}$ で供給したところ、5 時間後には供給地点から 80m 離れた地点の底層 5.0m 水深の DO が 0.7mg/l にまで上昇し、9 日後には約 165m 離れた調査地点を含めた 16 地点の水深 4.0m より下層で $0.9\sim 8.3\text{mg/l}$ となった。この時 middle layer 2.0~4.0m 水深での無酸素状態は継続し、水面より湖底まで好気、嫌気、好気的環境の互層の溶存酸素構造が形成された。
- 3) 酸素供給の 9 日後には、吐出部から 165m 離れた上流までの底層のみに酸素供給が出来たことから、吐出流量や溶解酸素量を調整することにより、より効率的な底層環境の改善が図れると考えられた。
- 4) 吐出流量 $90\text{m}^3/\text{h}$ 運転の前後で、中層 3.0m、底層 5.0m、5.8m の $\text{PO}_4\text{-P}$ は $0.02\sim 0.08\text{mg/l}$ であったが、Run2 の運転 9 日後にはいずれの水深でも定量下限値 0.02mg/l 以下に減少した。酸素供給の有無、底層部での DO と導電率の変化から本システムによる $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出抑制が認められた。また、 $\text{NH}_4\text{-N}$ も中層 3.0m、底層 5.0m、

5.8m で減少傾向が見られ、これは酸素供給による溶出抑制と硝化促進によるものと考えられた。

今後は、様々な貯水池への対応や運転効率の一層の適正化を図るため、吐出流量、酸素溶解濃度と酸素消費の定量的検討を行い、底層部の栄養塩などの溶出抑制による水質改善効果をより詳細に解明する必要がある。また、通常の貯水池では見られない好気、嫌気の互層構造が生じ中層の嫌気的環境下において脱窒と考えられる窒素の低下も観測されたことから、こうした互層構造の形成による水質現象の変化を解明する必要があると考えられた。

謝辞

本研究は独立行政法人土木研究所、横河電機株式会社と松江土建株式会社の共同研究により実施したものであり、現地調査に当たっては多くの関係者にご協力頂きました。また、水質分析は共和技術株式会社の方々にご協力を頂きました。研究の場を提供して頂くとともに貴重な資料の提供など国土交通省東北地方整備局三春ダム管理所の方々には多大なるご協力を頂きました。これらの関係各位に記して深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 天野邦彦, 藤原正好: 成層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.
- 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) 中村悟, 梶谷隆志: 布目ダムにおける深層曝気装置の水質改善効果, ダム技術, No.164, pp.42-52, 2000.
- 4) 小松利光, 長谷部崇, 松永崇, 井上徹教, 藤田和夫, 井芹寧, 西元誠, 稲垣晃: 底層への表層水連続供給による貯水池の水質改善実験, 水工学論文集, 第45巻, pp.1207-1212, 2001.
- 5) McQueen, D.J., Lean, D.R.S.: HYPOLIMNETIC AERATION AND DISSOLVED GAS CONCENTRATIONS, Water Res., Vol. 17, pp.1781-1790, 1983.
- 6) McQueen, D.J., Lean, D.R.S.: Hypolimnetic aeration: an overview, Water Poll. Res., Vol. 21, pp.205-217, 1986.
- 7) Burris, V.L., McGinnis, D.F., Little, J.C.: Predicting oxygen transfer and water flow rate in airlift aerators, Water Res., Vol. 36, pp.4605-4615, 2002.
- 8) 佐々木敦, 小出摩耶子, 長田正行, 柴山知也, 磯部雅彦: 東京湾三番瀬における微細気泡発生装置を用いた青潮水改善効果の数値的検討, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.981-985, 2003.
- 9) 佐々木稔, 田中宏明, 李建華, 和田順之輔, 中村圭吾, 柴田省三, 田中克知, 福井真司: 底層環境改善のためのモニタリング技術と活用, 環境システム計測制御学会誌, 第7巻, 第2号, pp.237-240, 2002.
- 10) 清水俊明, 矢沢賢一, 丹羽薫: 三春ダムさくら湖の水質保全対策, ダム技術, No.143, pp.71-81, 1998.
- 11) 田中克知, 柴田省三, 福井真司, 田中宏明, 佐々木稔, 底質改善への気体溶解装置への適用(Ⅰ)「気体溶解装置の適用とその制御」, 第37回日本水環境学会年会講演集, p.119, 2003.
- 12) 津森ジュン, 和田順之輔, 田中宏明, 李建華, 田中克知, 柴田省三, 福井真司: 高濃度酸素水注入による貯水池の水質変化に関する現地観測, 第40回環境工学研究フォーラム講演集, pp.141-143, 2003.
- 13) 和田順之輔, 津森ジュン, 田中宏明, 李建華, 田中克知, 柴田省三, 福井真司: 貯水池底質からの栄養塩溶出について, 第40回環境工学研究フォーラム講演集, pp.135-137, 2003.
- 14) 小松利光, 岡田知也, 中村由行, 中島信一, 長谷部崇, 藤田和夫, 井芹寧: 閉鎖性水域底層への表層水供給による水質改善効果, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.1111-1115, 1999.