

◆特集：湖沼・貯水池の自然再生◆

高濃度酸素水供給による貯水池の水質保全

阿部千雅* 津森ジュン** 鈴木 穰***

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、水中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⁶⁾)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、水中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きた。本システムは、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PO₄-Pの溶出抑制効果を確認したことから、ここに報告するものである。

2. 高濃度酸素水供給システム

本システムは、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。

2.1 システム構成

図-1、2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、酸素発生装置、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、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、湖面

Water Quality Control of a Dam Reservoir by Supplying High Concentration Dissolved Oxygen Water into Hypolimnion

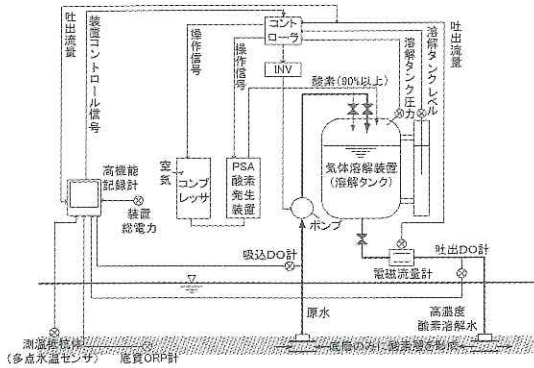


図-1 高濃度酸素水供給システム構成図

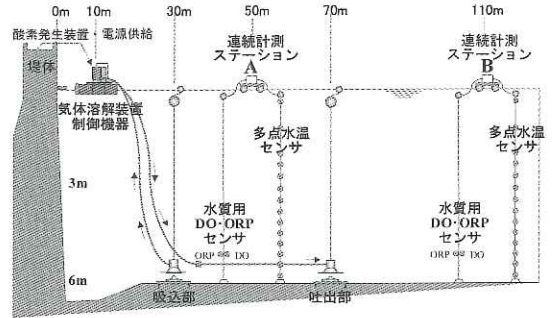


図-2 高濃度酸素水供給システムと水質モニタリングの配置概要(牛縊前貯水池縦断方向)

上の圧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。酸素発生装置及び気体溶解装置による圧力制御により、吐出水の溶存酸素濃度は50mg/l～70mg/l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。

2.2 運転制御方法¹¹⁾

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、深さ方向の水温勾配を検知して酸素水の供給量制御を行っている。また本実験では使用していないが、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。

3. 方法

3.1 調査対象水域の概要

調査では、本システムを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)に設置した。この前貯水池の貯水容量は約214,000m³、湛水面積約47,000m²、最大水深は約6.3mであり、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1.82～2.54mg/l、総リン(TP)は0.03～0.05mg/lとなっている。

3.2 実験条件

夏季(7月23日～9月18日)に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。

Run1では酸素を供給せずに水の循環だけを行い、Run2から酸素供給を開始して、DOや栄養塩濃度に対する効果を調べた。Run3で吐出流量を低下させたのち、Run4で運転を停止して、酸素供給がない場合の底泥溶出への影響を調べた。Run5、Run6では、運転と停止の条件を再度繰り返した。

3.3 水質観測

図-3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。A、B地点では水深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、

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	90	有り	142	44.6
3	8/12～8/19	8日間	30	有り	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

DO、水温、ORPを測定した。また水深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にて採水を行い、SS、VSS、Chl-

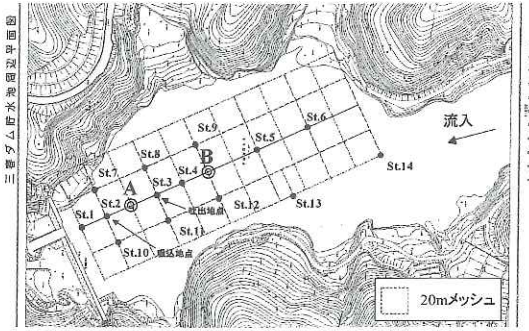


図-3 調査地点平面図

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) について分析を行った。

A、B 以外の地点では水深方向 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水質分析を行った。

4. 結果

4.1 降水量、気温

図-4 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。

4.2 水温、溶存酸素の経時変化

図-5 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。

1) 水温

Run1 開始前日の 7 月 22 日では表層と底層では 10°C 以上の差となり水温成層が形成されていた。Run1、Run2、Run3 において底層部の水温は 5.0m と 6.0m 水深で同程度となっていること、中層 3.0m 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 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いるが、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-5 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、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 $90\text{m}^3/\text{h}$ で酸素供給を行った結果、底層部 5.0、6.0m の DO が上昇したが中層 3.0m では DO の上昇は見られず、吐出流量を $30\text{m}^3/\text{h}$ とした Run3 の途中まで無酸素の状態が続いている。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 が上昇しているが、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。

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。また、Run2 において酸素供給中も中層 3.0m で DO が $0\text{mg}/\text{l}$ 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。

4.3 栄養塩濃度の変化

図-6 に水温、DO と同様に、B 地点の $\text{PO}_4\text{-P}$ の経時変化を表層 0.5m、中層 3.0m と底層 5.0、5.8m 水深について示す。

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

Run1 から Run2 開始前における底層 5.0m の $\text{PO}_4\text{-P}$ は $0.05 \sim 0.1\text{mg}/\text{l}$ 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 $0.02 \sim 0.08\text{mg}/\text{l}$ 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 $0.02\text{mg}/\text{l}$ 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 $0\text{mg}/\text{l}$ 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 $\text{PO}_4\text{-P}$

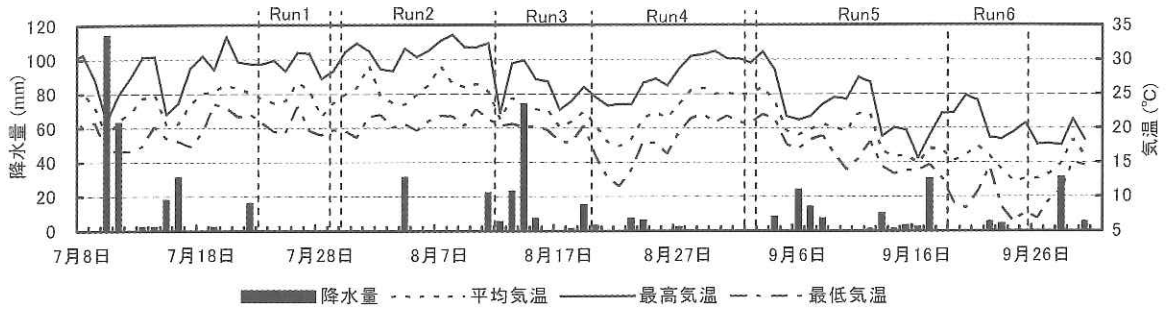


図-4 降水量、気温

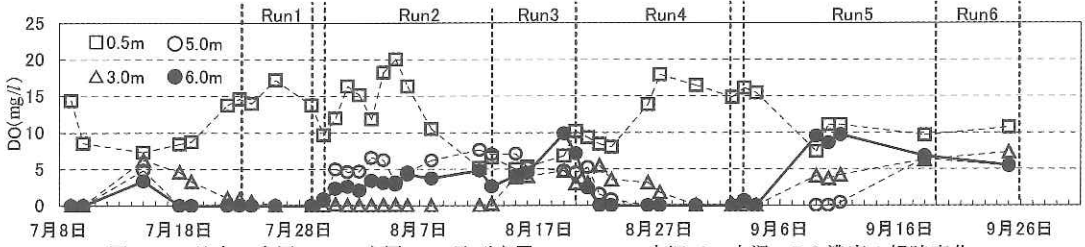
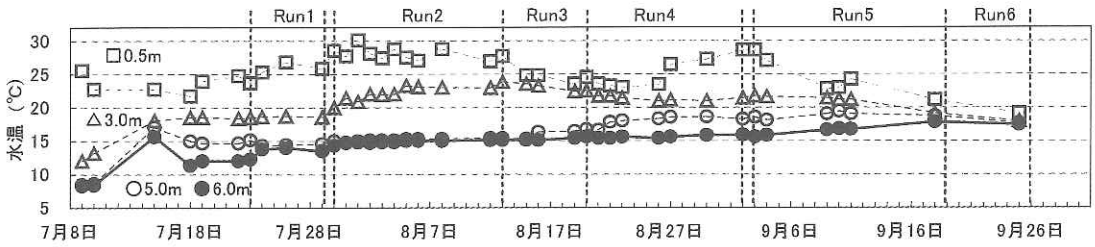


図-5 B地点の表層0.5m、中層3.0m及び底層5.0m、6.0m水深での水温、DO濃度の経時変化

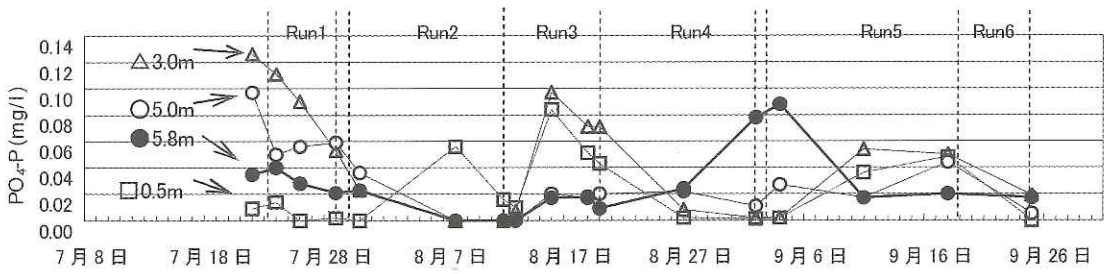


図-6 B地点の表層0.5m、中層3.0m及び底層5.0m、5.8m水深でのPO₄-Pの経時変化

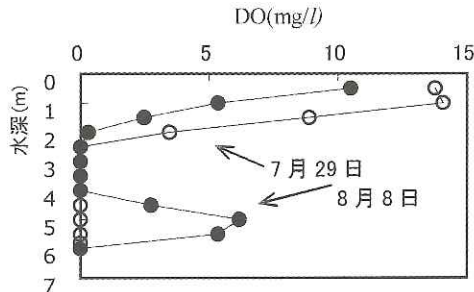


図-7 B地点のDOの鉛直分布 (7月29日 (Run2開始前日)、8月8日 (Run2開始9日後))

は再び減少した。

なお図-7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、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。この傾向は、吐出流量30m³/hのRun3においても観測された。

5. 考察

5.1 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。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、運転開始してから約5時間後の5.0m水深で0.7mg/lとなった。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、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できた。

5.2 栄養塩の溶出抑制効果

図-8にRun2後半からRun4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。

6. 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、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べるために、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) 無酸素状態の貯水池底層へDO50～70mg/lの高濃度酸素水を供給したところ、水深4.0mより下層のDOが0.9～8.3mg/lとなった。この時中層部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。
- 2) 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。
- 3) PO₄-Pは、酸素供給前で、中層3.0m、底層5.0m、5.8mにおいて0.02～0.08mg/lであったが、酸素供給開始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の変化から本システムによるPO₄-Pの溶出抑制が認められた。

今後は、様々な貯水池への対応や運転効率の一層の向上を図るため、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。

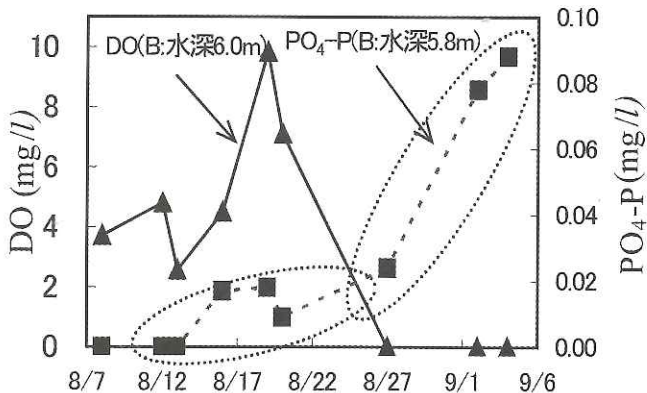


図-8 B地点のDO(6.0m)とPO₄-P(水深5.8m)の経時変化

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、中村主吾、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、底層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。

※この研究は、平成14年度から平成16年度まで(株)松江土建、(株)横河電機と実施した共同研究「湖底付近において長期測定可能なセンサーの開発と底質改善技術への利用に関する共同研究」によるものです。

阿部千雅*



独立行政法人土木研究所水循環研究グループ水質チーム主任研究員
Chika ABE

津森ジュン**



国土交通省都市・地域整備局下水道部流域管理官付補佐
(前 独立行政法人土木研究所水循環研究グループ水質チーム主任研究員)
Jun TSUMORI

鈴木 稜***



独立行政法人土木研究所水循環研究グループ水質チーム上席研究員
Yutaka SUZUKI