

## 〈論文〉

## ダム湖への高濃度酸素水の供給と金属濃度の低減効果

久岡夏樹<sup>1)</sup>, 鈴木 穰<sup>2)</sup>, 南山瑞彦<sup>1)</sup>, 若林健一<sup>3)</sup>, 増木新吾<sup>3)</sup><sup>1)</sup>独土木研究所 水環境研究グループ水質チーム (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 E-mail: hisaoka@pwri.go.jp)<sup>2)</sup>独土木研究所 材料地盤研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)<sup>3)</sup>松江土建(株) 環境部 (〒690-0046 松江市乃木福富町340)

## 概要

日本の多くのダム貯水池では、春季から秋季にかけて、表層水が温められることにより底層水との温度差が生じ、水温躍層が形成される。このような状況下では鉛直方向の水の混合が抑制されるため貯水池の底層は貧酸素状態となり、底泥から金属類などの溶出が増加し、貯水池の水質に悪影響を及ぼす。このため、効果的に底層のDO濃度を広範囲にわたり回復させることを目的として高濃度酸素水供給装置について検討を行い、また高濃度酸素水供給による底層の金属類濃度の低減について検討を行ったので報告する。

キーワード：高濃度酸素、溶出抑制、鉄、貯水池、底泥

原稿受付 2010.8.18

EICA: 15(2-3) 185-191

## 1. はじめに

日本の多くのダム貯水池では、春季から秋季にかけて水温躍層が形成される。このような状況下では、鉛直方向の水の混合が抑制されるため、底層への酸素供給が抑制される。一方、ダム貯水池に供給された有機物や貯水池内で発生した藻類は、底層に沈降した後微生物により分解され、その際に溶存酸素(DO)が消費される。これらの要因から、有機物濃度の高い貯水池においては、水温躍層が形成される時期に底層が貧酸素状態となる。このような状態においては、好気性生物の棲息は困難となるとともに、底泥から栄養塩、有機物や金属などの溶出が増加し、貯水池の水質に悪影響を及ぼす。

底層の貧酸素化対策としては、底層部に空気や酸素を供給する深層曝気方式<sup>1)</sup>が主として用いられてきたが、水平方向への拡散が不十分である点や、吐き出し高さの変更が困難である点などが課題としてあげられる<sup>2)</sup>。新たな微細気泡発生装置を用いた方式<sup>3)</sup>や、DOの豊富な表層水を底層へ送り込む方法<sup>4)</sup>などが検討されているが、底層の貧酸素状態を完全に解消させるのは未だ困難な状況である。また、気泡噴流により鉛直混合流を起こし、水温躍層を破壊してDOが豊富な表層水を底層へ送る曝気循環方式では、本来富栄養化の対策を目的としたものであるため、底層のDO改善がされにくいことに加え、躍層破壊による底層水の浮上や底泥の巻き上げといった課題<sup>3)</sup>がある。

水温躍層が破壊されると、底層の貧酸素化で底泥か

ら溶出した栄養塩類が表層へ供給されるためアオコの原因となったり、雨天時にダム貯水池へ流入した土砂などが貯水池全体にいきわたり、濁水の長期化を引き起こしたりと問題が生じるため、水温躍層を破壊しない対策が必要だと考えられる<sup>5)</sup>。このため、水温躍層を破壊することなく、効果的に底層のDO濃度を広範囲にわたり回復させることを目的として、高濃度酸素水供給装置を開発した。

本研究では、顕著な貧酸素化と金属の溶出が見られるダム貯水池に高濃度酸素水供給装置を適用し、水温躍層を保持しつつ底層の酸素濃度が広範囲に上昇させることが可能かどうかの検証を行うとともに、金属濃度の低減に関する検討を行ったので報告する。

## 2. 研究方法

## 2.1 高濃度酸素水供給装置

本研究に用いた高濃度酸素水供給装置をFig. 1に示す。装置は大きく分けて酸素発生装置と気液溶解装置(Photo. 1)の2つの装置によって構成される。本装置は既に複数の現場で導入されており、特徴は以下の通りである。

## (1) 水圧を利用した酸素溶解

酸素溶解部である気液溶解装置は、装置の内部と外部を遮断せず、装置内外で水圧が一致するような構造とした。これにより、装置を設置した水深の水圧を利用して酸素を溶解させることができるため、吐出後の発泡を伴わない効率的な高濃度酸素水の供給が可能で

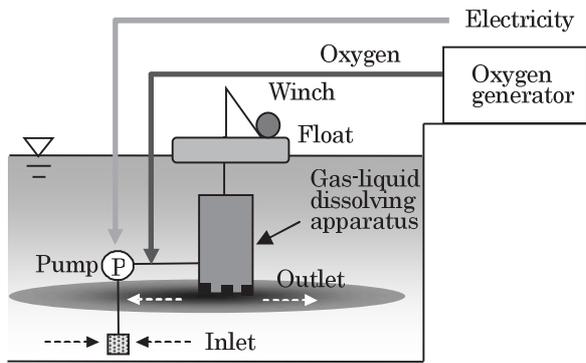


Fig.1 Water Environmental Preservation System

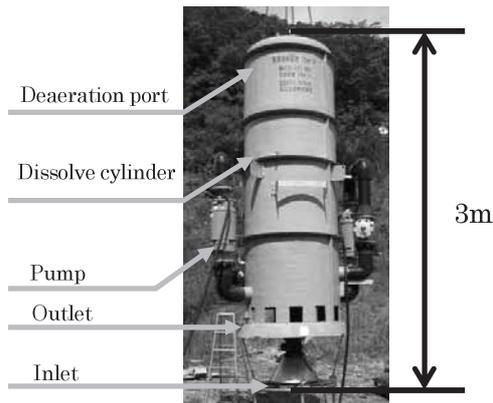


Photo.1 Gas-liquid dissolving apparatus

ある。また、酸素は酸素発生装置 (PSA) により、空気中の酸素濃度 (21%) を高めた (90% 以上) ものを使用した。これにより、吐出する高濃度酸素水の DO 濃度を 50~70 mg/L とすることができる。

### (2) 上昇流の抑制

酸素を溶解させた状態で水平方向に吐出させることにより上昇流を抑制し、水温躍層を破壊することなく高濃度酸素水を供給するような構造とした。吐出後に気泡が生じないため、それによる上昇流や底泥の巻き上げが抑制される。

### (3) 気液溶解装置の上下移動

気液溶解装置に接続されたワイヤーをウインチで操作することで、吐出部の位置を上下させることができるような構造とした。これにより、任意の水深に高濃度酸素水を供給することが可能である。

## 2.2 ダム貯水池における酸素水供給実験

### (1) 実験方法

底層の DO 濃度に対する効果を確認するため、ダム貯水池に高濃度酸素水供給装置を設置し実験を行った。対象とするダム貯水池は、有効貯水量約 640 万  $m^3$ 、最大水深は約 30 m であり、毎年貧酸素水塊が発生する。

装置をダム堤体から 130 m 上流 (St.1) と 900 m 上流 (St.4) に設置し、DO の濃度変化と装置の効果範

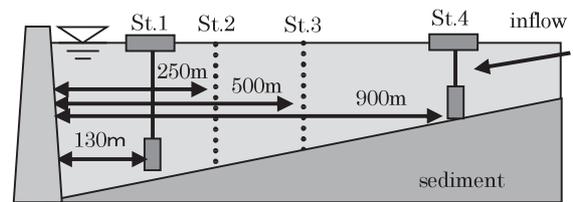


Fig.2 Survey points

囲を調べるため、実験開始前にはダム堤体から 250 m 上流の地点 (St.2) で、実験開始後は St.1 とダム堤体から上流側へ 100 m おきに 10 地点の計 11 地点で定期的に水質計測を行った。代表調査地点として St.1, St.2 と、ダム堤体から 500 m 上流に位置する湖心 (St.3) を設定した (Fig. 2)。

現地では、多項目水質計 (HYDROLAB DataSonde 5X) を用いて水温、DO、クロロフィル a (Chl.a) 濃度等の水質測定を定期的に行った。また、同時に北原式採水器を用いて採水を行い、採水した試料は一部現場でろ過を行い、冷蔵運搬して持ち帰り、変質を防ぐために直ちにホットプレート硝酸分解 (硝酸を加え加熱処理後、冷却) を行い、内標準物質を添加し定容した後、ICP 質量分析法にて測定を行った (下水試験方法下巻-1997-年版 pp.192-207 参照)。分析項目は、塩素消毒の際に酸化されて赤水や黒水が発生する原因となる鉄とマンガンに加え、人体に悪影響を及ぼすヒ素を対象とした。

### (2) 運転条件

まず、ダム貯水池の現況を把握するため、2005 年 3 月から 8 月にかけて月に一度、ダム堤体から 250 m 上流の地点 (St.2) で水質測定、最下層での採水を行った。採水した試料は持ち帰り金属濃度分析を行った。

次に、高濃度酸素水供給装置を用いた実験を 2008 年、2009 年の 2ヶ年にわたり実施した。2008 年は St.1 において 8 月 27 日から酸素水供給を開始し、12 月 24 日まで装置を稼働させた。調査は現地において実験開始前、開始 1 日後、3 日後、7 日後、14 ヶ月後と、実験開始から 1ヶ月おきに行った。同時に St.1 において表層 (水深 50 cm)、水温躍層直上 (水深 8 m)、水温躍層直下 (水深 19 m)、最下層 (湖底から 50 cm 上) で採水し、持ち帰って金属分析を行った。

2009 年は、底層の DO が低下しているものの嫌気状態までには至っていない 2009 年 3 月 31 日から酸素水供給を開始し、2009 年 12 月 24 日まで行った。装置は St.1 に加え、水温躍層付近に生じる貧酸素層を解消するために St.4 でも稼働させ、吐出流量をそれぞれ 120  $m^3/h$ 、90  $m^3/h$  とした。2008 年と同様に同じ地点で定期的に水質測定、採水を行い、持ち帰って水質分析を行った。

なお、実験で用いた装置の定格消費電力は、吐出流量 120  $m^3/h$  条件で 7.5 kwh、吐出流量 90  $m^3/h$  条件

で5 kwh, PSAは15 kwhである。

装置の運転は、ダム湖底層のDO濃度の改善を図ることを目的としていることから、ダム湖最下層から高濃度酸素水の供給を開始し、設置水深におけるDO濃度がダム湖全体で15 mg/L/以上になった段階で順次上方に向かって気液溶解装置を移動させる方式とした。なお、最下層のDO濃度が低下した場合には、再度装置を下方に移動した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 水温

2005年にSt.2で計測した結果をFig.3に示す。Mar.14には既に水温躍層を形成しはじめており、Jul.26には表層の水温が25℃を超えているにもかかわらず、底層では7℃程度のままであった。

2008年にSt.1で計測した結果をFig.4に示す。2008年は、Aug.26(実験開始前)には水深10~15mに水温躍層が形成されており、実験期間中、高濃度酸素水の供給にかかわらず水温躍層が維持されていた。

2009年にSt.1で計測した結果をFig.5に示す。2009年は水温躍層が形成され始める3月末から実験

を開始しており、表面水温は気温の上昇に伴い上昇しているが、2008年と同様に装置の稼働による水温躍層への影響は見られなかった。このことから実験期間中に水温躍層へ影響を与えるような鉛直方向の水の混合は起こっておらず、維持されていたと考えられる。

#### 3.2 DO濃度

2005年にSt.2で計測した結果をFig.6に示す。水温躍層が形成し始めたMar.14で既に底層のDOは5 mg/L程度であった。May.16には底層でほぼ0 mg/Lになっており、Jul.26には水深10 m以深でほぼ0 mg/Lになっていた。このことから、水温躍層が形成されると水温躍層以深で貧酸素状態になることが確認された。

2008年実験期間中の、気液溶解装置の設置水深をFig.7に、ダム貯水池の調査地点におけるDO濃度鉛直分布の変化をFig.8~10に示す。St.1では、Aug.26(運転開始前)には水温躍層以深のDO濃度はほぼ0 mg/Lであったが、Aug.27(運転開始1日後)には酸素供給水深におけるDO濃度が30 mg/Lにま

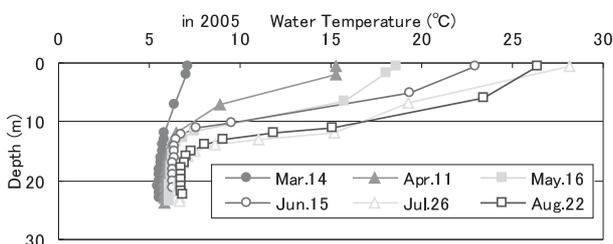


Fig.3 Change of vertical profiles of water temperature in 2005

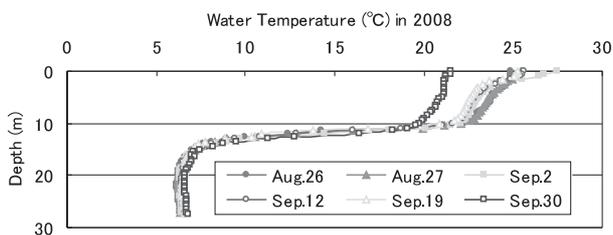


Fig.4 Change of vertical profiles of water temperature in 2008

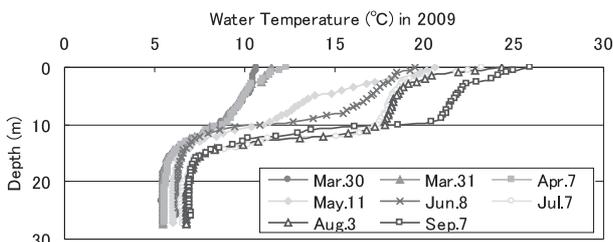


Fig.5 Change of vertical profiles of water temperature in 2009

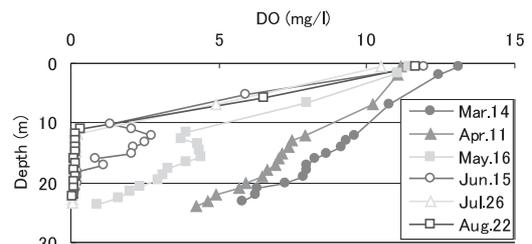


Fig.6 Change of vertical profiles of DO concentration at St.2 over time (Mar.14-Aug.22, 2005)

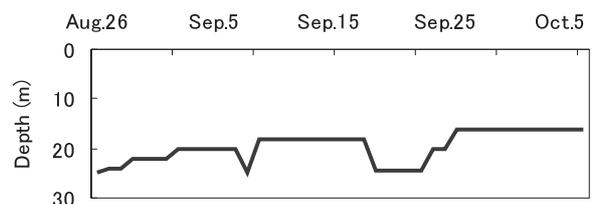


Fig.7 Operation depth of gas-liquid dissolving apparatus in 2008

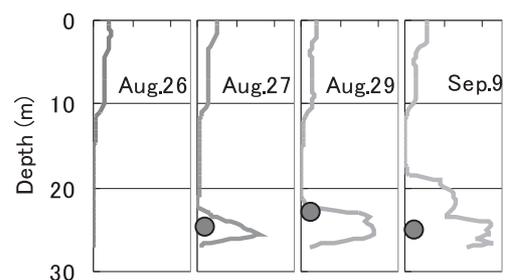


Fig.8 Change of vertical profiles of DO concentration at St.1 over time (Aug.26-Sept.9, 2008). (Red circles is the

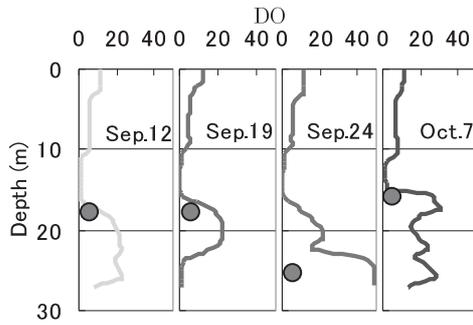


Fig.9 Change of vertical profiles of DO concentration at St.1 over time (Sep.12 - Oct.7, 2008). (Red circles is the position of the gas-liquid dissolving apparatus)

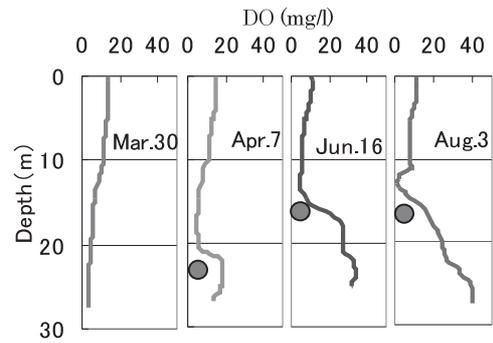


Fig.12 Change of vertical profiles of DO concentration at St.1 over time (Mar.30-Aug.3, 2009). (Red circles is the position of the gas-liquid dissolving apparatus)

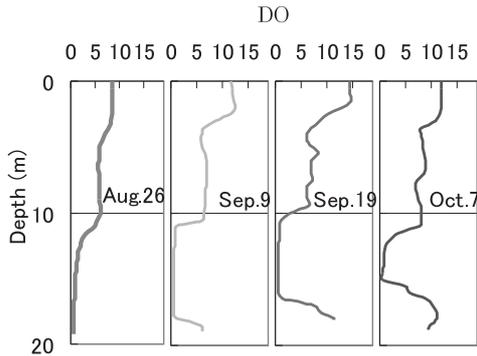


Fig.10 Change of vertical profiles of DO concentration at St.3 over time (Aug.26 - Oct.9, 2008).

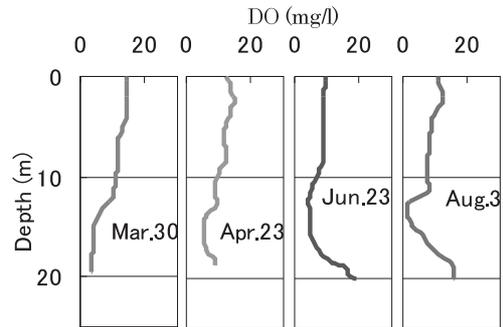


Fig.13 Change of vertical profiles of DO concentration at St.3 over time (Mar.30-Aug.3, 2009)

で上昇し、順次装置を上下に移動させたことより、Sep. 9 (13日後)には水深 20 m 以深の底層部で、DO 濃度が 20 mg/L 以上にまで上昇した (Fig. 8)。しかし、装置を上方へ移動させた結果、最下層への高濃度酸素水の供給停止と有機物分解等に伴う底泥付近での酸素消費により、最下層の DO 濃度は低下し、Sep. 19 には再び約 0 mg/L まで低下した (Fig. 9)。そこで装置を最下層まで下げて酸素供給を行ったところ、Sep. 24 には再度 DO 濃度が上昇し、その後実験終了まで好気状態を維持した。St.3 では、Sep. 9 (運転開始 2 週間後)に最下層の DO 濃度が上昇しはじめ、Sep. 19 (約 3 週間後)には 10 mg/L まで上昇した (Fig. 10)。その後、実験終了まで底泥付近の DO 濃度が 0 mg/L になることはなかった。

2009 年実験期間中の、St.1 における気液溶解装置の設置水深を Fig. 11 に、ダム貯水池の調査地点にお

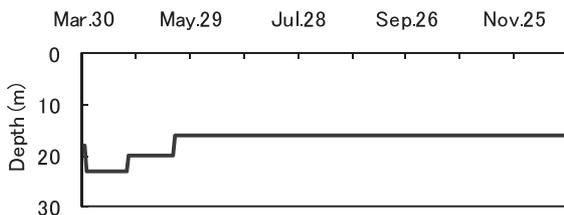


Fig.11 Operation depth of gas-liquid dissolving apparatus at St.1 in 2009

ける DO 濃度鉛直分布の変化を Fig. 12, Fig. 13 に示す。2009 年は、Mar. 30 (運転開始前)には水温躍層が形成されはじめており、底層部の DO 濃度は表層と比較して低くなっていた (Fig. 12)。Apr. 7 (運転開始 8 日後)には、装置設置位置の酸素水供給水深における DO 濃度が 15 mg/L 以上にまで上昇し、順次装置を上方へ移動させ、Jul. 16 には水深 20 m 以深で、DO 濃度が 25 mg/L 以上にまで上昇した。2008 年と異なり水温躍層が形成され始めた時期から高濃度酸素水の供給を開始し、同一水深で長時間高濃度酸素水の供給を行ったことにより、実験期間中最下層で DO 濃度が 15 mg/L 以下になることはなかった。St.3 では、運転開始 2 週間後に最下層の DO 濃度が上昇しはじめ、約 3 週間後には 10 mg/L まで上昇した (Fig. 13)。その後、実験終了まで底泥付近の DO 濃度が 0 mg/L になることはなかった。

2008 年、2009 年ともに 11 地点で水質測定を行った結果、ダム堤体から 500 m 上流までの地点において St.1 や St.3 と同様の結果が見られた。このことから、広範囲にわたって高濃度酸素水の供給が行われていることが確認された。水温躍層付近の貧酸素層解消のため、2009 年には St.4 にも高濃度酸素水供給装置を設置したが、装置を設置した水温躍層付近に流入水が流れ込むため、高濃度酸素水が停滞することなく下流へ

流されてしまい、DO 濃度の上昇がみられなかった。

### 3.3 金属類濃度

2008 年の、St.1 の最下層における溶存態鉄 (D-Fe) の濃度 (Fig. 14) は、高濃度酸素水の供給開始後にいったん上昇したが、すぐに減少を始め、Sep. 12 には表層水と同程度にまで低下した。Sep. 19 に一旦最下層の DO 濃度がほぼ 0 mg/L に低下したが、その時点での底泥からの再溶出による溶存態鉄の濃度上昇は見られず、実験終了まで表層水と同程度の低い値を保った。高濃度酸素水を供給したことにより D-Fe が酸化して懸濁態となり、沈降して濃度が低下したと考えられる。また、DO 濃度が低下した時も酸化された状態であったため容易には溶出しなかったと考えられる。

2009 年は、St.1 の最下層における D-Fe 濃度 (Fig. 15) は、実験期間中ほぼ常に表層より低い値に抑えられていた。Jun. 8 に一度濃度が上昇したが、Jun. 30 には低下した。実験開始時から低い値に保たれていたのは、2009 年は水温躍層が形成され始めた時期から高濃度酸素水の供給を行ったため、最下層の DO 濃度が 0 mg/L まで低下することがなく、Fe が酸化した状態を保っていたことによるものと考えられる。実験期間中に一度濃度が上昇した原因として、春季に大増殖した藻類の影響が考えられる。St.1 で測定した Chl. a 濃度の鉛直分布経時変化 (Fig. 16) をみると、実験開始から表層の Chl. a 濃度が上昇しており、May. 11 には 100  $\mu\text{g/L}$  を超えた。現地観測でも珪藻が大増殖していることが確認された。しかし、May. 26 には

5  $\mu\text{g/L}$  未満と大幅に低減していた。このことから、大増殖していた珪藻が一気に最下層に沈降し、その死骸が最下層で分解されたことで底層の D-Fe 濃度が上昇したのではないかと推察される。

2008 年の、St.1 の最下層における溶存態ヒ素 (D-As) の濃度 (Fig. 17) は、同年の D-Fe と同様の挙動を示した。2009 年は濃度が常に表層より低く保たれ、D-Fe 濃度が 100  $\mu\text{g/L}$  ほど上昇した Jun. 8 においても上昇は 1  $\mu\text{g/L}$  程度であった (Fig. 18)。

Fig. 19 に、2008 年、2009 年の実験期間における D-Fe 濃度の変化量と、同期間の D-As 濃度の変化量との関係を示す。濃度の変化量とは、ある調査時の濃度とその前の調査時の濃度との差である。D-Fe : D-As = 100 : 1 の比で、D-Fe の濃度変化につれ、D-As の濃度が変化している傾向が見られた。これは、As が Fe(III) 酸化物により共沈することによると考えられる。

2008 年の溶存態マンガン (D-Mn) 濃度 (Fig. 20) は、最下層の DO 濃度が上昇して約 2 週間後 (Sep. 9) に低下し始めた。その後濃度は下がり続けたが、最下層の DO 濃度がほぼ 0 mg/L まで低下すると、顕著に濃度が上昇した。高濃度酸素水供給装置の設置水深を下げることで最下層の DO 濃度を上昇させると、D-Mn 濃度は再び低下する傾向を示した。12 月 24 日には水の上下混合がはじまっており、濃度が表層と同程度まで低下した。Mn は高濃度酸素水供給だけでは酸化しづらく、Mn 酸化細菌による酸化が大きいいため、高濃度酸素水供給から濃度低下までの時間がかかったと推察される。また、Mn は還元されやすい物質であ

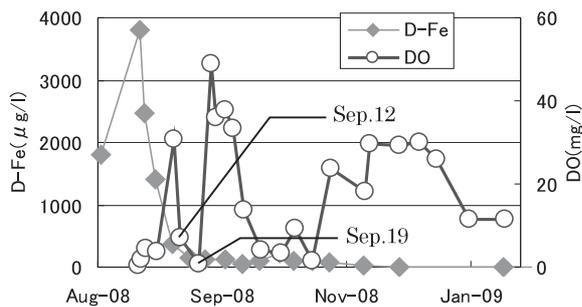


Fig.14 Change of D-Fe concentration at St.1 over time in 2008

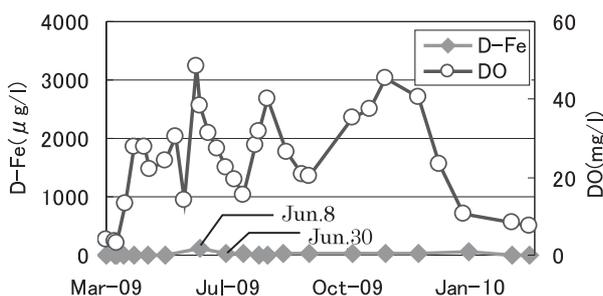


Fig.15 Change of D-Fe concentration at St.1 over time in 2009

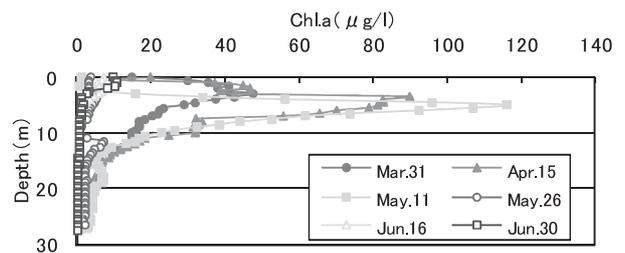


Fig.16 Change of vertical profiles of Chl.a concentration at St.1 over time in 2009

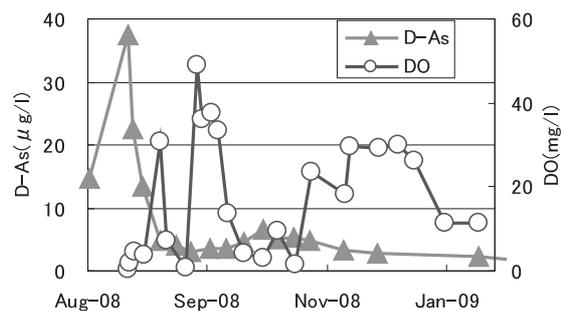


Fig.17 Change of D-As concentration at St.1 over time in 2008

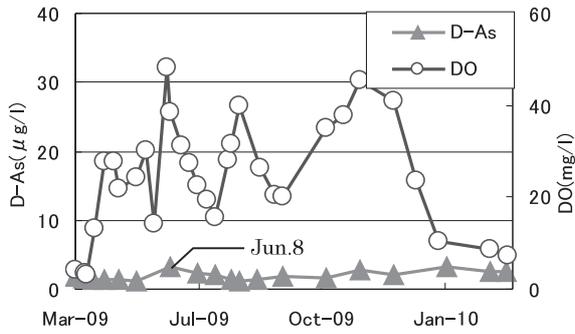


Fig.18 Change of D-As concentration at St.1 over time in 2009

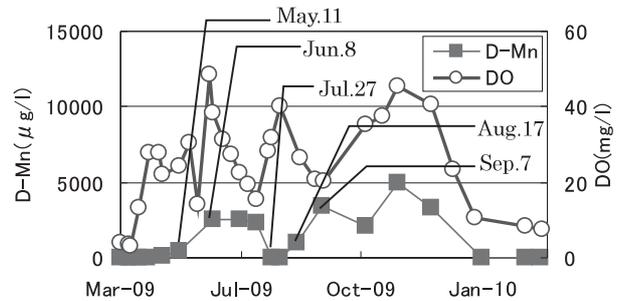


Fig.21 Change of vertical profiles of D-Mn concentration over time at St.1 over time in 2009

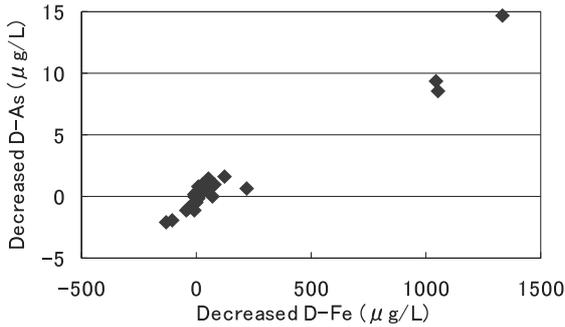


Fig.19 Relationship between decreased D-Fe and decreased D-As

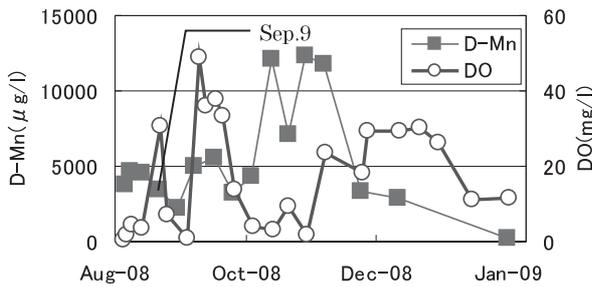


Fig.20 Change of vertical profiles of D-Mn concentration at St.1 over time in 2008

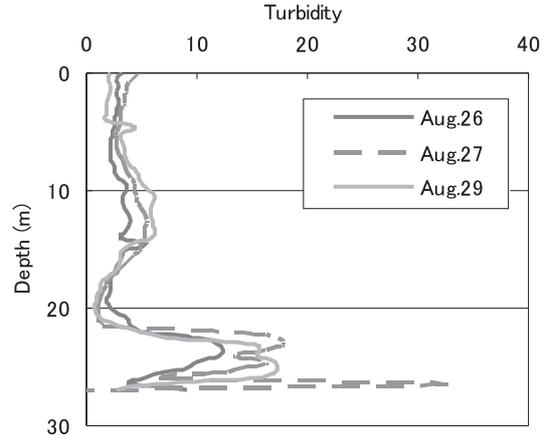


Fig.22 Daily variation of turbidity at St.1 in 2008

るため、DO 濃度の低下に顕著に反応したと考えられる。

2009 年は (Fig. 21) 最下層の DO を高く保ったため実験開始後しばらく表層と底層に差は見られなかったが、珪藻類が大発生した May. 11 から上昇し始め Jun. 8 には約 2500 μg/L まで上昇した。Jul. 27 には一旦表層と同程度の濃度になったが、Aug. 17 には再び上昇し始め、Sep. 7 には約 3400 μg/L まで上昇し、その後上下混合が始まっていた 1 月 18 日まで高い値のままであった。

2008 年の実験開始直後に D-Fe や D-As の濃度が上昇した原因として、装置稼動に伴う底泥の巻き上げや高濃度酸素水供給による懸濁態化が考えられる。St.1 における濁度の鉛直分布を Fig. 22 に示す。装置稼動前 (Aug. 26) と比較して装置稼動後 (Aug. 27) に最下層の濁度の上昇が確認された。しかし、3 日後 (Aug.

29) には濁度が低下していることから、濁水の長期化および貯水池全体への影響は小さかったと考えられる。

#### 4. ま と め

ダム貯水池底層の貧酸素状態を、水温躍層を破壊することなく、広範囲にわたり解消させることを目的として、高濃度酸素水供給装置を開発するとともに、高濃度酸素水供給による底層の金属類濃度の低減について検討した。

- (1) 高濃度酸素水供給装置を用いてダム貯水池へ高濃度酸素水の供給を行った結果、水温躍層を維持したまま底層の DO 濃度を効果的に上昇させることが可能であった。
- (2) ダム堤体から 500 m 上流までの地点において、St.1 や St.3 と同様の結果が見られたことから、底層に吐出された高濃度酸素水は、広範囲にわたっていることが確認された。
- (3) ダム堤体から 600 m 上流までの地点において、St.1 や St.3 と同様の結果が見られたことから、気液溶解装置を適宜上下させることにより、水温躍層下の DO 濃度を回復させることが可能であった。
- (4) 高濃度酸素水を供給することで、St.1 における

最下層のD-Fe濃度とD-As濃度が低下することが確認された。低下したD-FeやD-Asは、最下層のDO濃度が低下しても顕著な再溶出は見られなかった。また、D-FeとD-Asは同じ割合で増減する傾向が見られた。

- (5) 高濃度酸素水を最下層へ十分に供給することにより、D-Mnの濃度を十分に低下させる可能性が示された。
- (6) D-Mnの濃度を低く保つためには装置の運転方法や藻類の大増殖対策について検討する必要がある。

DO濃度を高く保つことで、底泥からのリンの溶出が抑制されることから、高濃度酸素水供給装置を用いて貧酸素状態を改善することによる藻類の大増殖抑制効果について検討していく予定である。

#### 参考文献

- 1) 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)
- 2) 国土交通省中国地方整備局山口河川国道事務所, 島地川ダム水質改善検討委員会, 第2回委員会資料, p.30 (2008)
- 3) 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)
- 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) 田作光良, 檜枝俊輔: 日吉ダムにおける冷濁水対策の取組み, 平成19年度近畿地方整備局研究発表会論文集, 調査・計画・設計部門 II, No.3, pp.1-4 (2007)

## Controlling metals release from sediment by supplying water with supersaturated dissolved oxygen

Natsuki Hisaoka<sup>1)</sup>, Yutaka Suzuki<sup>2)</sup>, Mizuhiko Minamiyama<sup>1)</sup>

Kenichi Wakabayashi<sup>3)</sup>, Shingo Masuki<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Public Works Research Institute Water Quality Research Team

<sup>2)</sup> Public Works Research Institute Material and Geotechnical Engineering Research Group

<sup>3)</sup> Environment Division, Matsue doken Co., Ltd.

† Correspondence should be addressed to Natsuki Hisaoka :

(Public Works Research Institute Water Quality Research Team E-mail: hisaoka@pwri.go.jp)

#### Abstract

The release of metals from bottom sediment sometimes significantly affects water quality through eutrophication in dam reservoirs. Various studies have been conducted on countermeasures for controlling the release of metals from the sediment by supplying oxygen to water using air, either by the microbubbles system or by injecting surface water into the bottom layer of dam reservoirs. We investigated a novel water quality restoration technology: using pure oxygen gas to supply water with supersaturated dissolved oxygen to the bottom layer, to control the release of metals from the sediment.

**Key words:** supersaturated dissolved oxygen, control of metal release, iron, reservoir, sediment