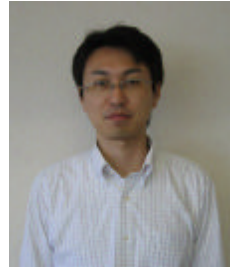


高濃度酸素水を用いた水質改善効果について (中間報告)

野村 栄一¹

¹中国技術事務所 品質調査課 (〒736-0082 広島市安芸区船越南2-8-1)



中国地方整備局管内の直轄ダムは、上流域に生活活動の盛んな地域を抱え、貯水池内は従前、耕作地である場合が多く、このため貯水池底層部に富栄養化の原因となる栄養塩類が蓄積しやすい環境にあり、貯水池の底層部が貧酸素化することによって溶出し水質悪化を引き起こすことが懸念される。

このような課題に対し、広島県三次市にある灰塚ダム貯水池の底層部に高濃度酸素水を供給して好気状態を創出する技術を用いて、水質改善効果の検証を行った。

キーワード 高濃度酸素水, ダム湖, 富栄養化, 栄養塩, 水質改善

1. はじめに

灰塚ダムは、江の川水系上下川の広島県三次市に建設された重力式コンクリートダムです。灰塚ダムは栄養塩濃度が高く成層期の底層の嫌気化が顕著な貯水池で、底泥からの溶出に伴う内部負荷が増加していくため、経年的に濃度が上昇することとなる。底泥からの溶出により成層期に下層に蓄積した負荷が循環期において表層に回帰してくるため、春先の栄養塩濃度が高くなり、植物性プランクトンの異常繁殖につながっていると考えられる。

2. 灰塚ダムの現状と課題

灰塚ダムの流入河川のT-Pは、本川(上下川)が0.02mg/L~0.15mg/L程度、田総川が0.01mg/L~0.09mg/L程度であり、上下川から流入する栄養塩類濃度が高い。DOは、試験湛水時の平成17年10月~12月において全層が低くなっており、平成18年、19年の6月には底層DOが嫌気化している。

灰塚ダムでは、富栄養化現象(植物プランクトンの異常発生)対策として、曝気循環施設が設置、運用されている。しかし、貯水池全体ではないが流入部付近、ダムサイト付近及び湖岸部など局所的にアオコが発生している。貯水池は富栄養化しているものと考えられ、特に、平成18年には、貯水池中央部の底層の栄養塩濃度が上昇し、7月に起こった出水に伴って一部表層に回帰し、それにより中央部のクロロフィルaが上昇したことが要因

の一つとして考えられる。

このような状況を踏まえ、灰塚ダムでは、更なる対策が必要と考えられ、DOを供給することで底層からの栄養塩の溶出を減少させアオコの発生を抑える対策として、高濃度酸素供給の実験施設を導入した。

3. 高濃度酸素水供給施設の概要

高濃度酸素水供給施設は、装置を設置した水深における圧力を利用し、酸素を溶解させた水(高濃度酸素水)を送水することで、貯水池の水温成層を破壊することなく底層ならびに供給したい水層のみに酸素を供給(水平拡散)することができる。これにより底層付近の貧酸素水層に酸素供給して好気状態を保つことにより底層からの栄養塩類の溶出を抑制するものである。

現在、灰塚ダムには、ダムサイト及びダムサイトから約800m上流の地点の2箇所の実験施設として設置している。(表-1, 図-1, 2)

表-1 高濃度酸素水供給施設諸元

施設名	諸元
高濃度酸素水供給施設	装置基数: 2基 装置能力: 下流側 80m ³ /h 上流側 120m ³ /h 酸素水吐き出し濃度: 5% 酸素水吐き出し速度: 10cm/s 吐き出し標高: 任意

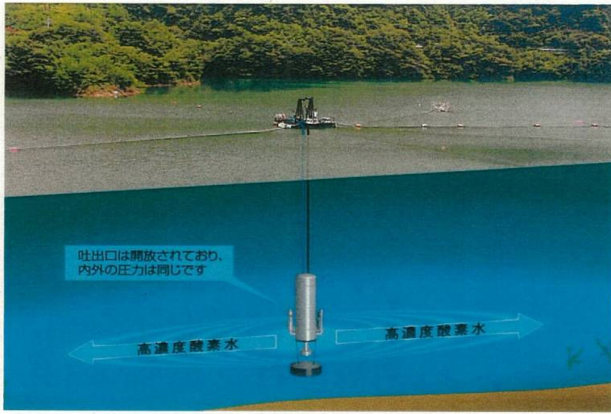


図-1 水中型気液溶解装置設置イメージ

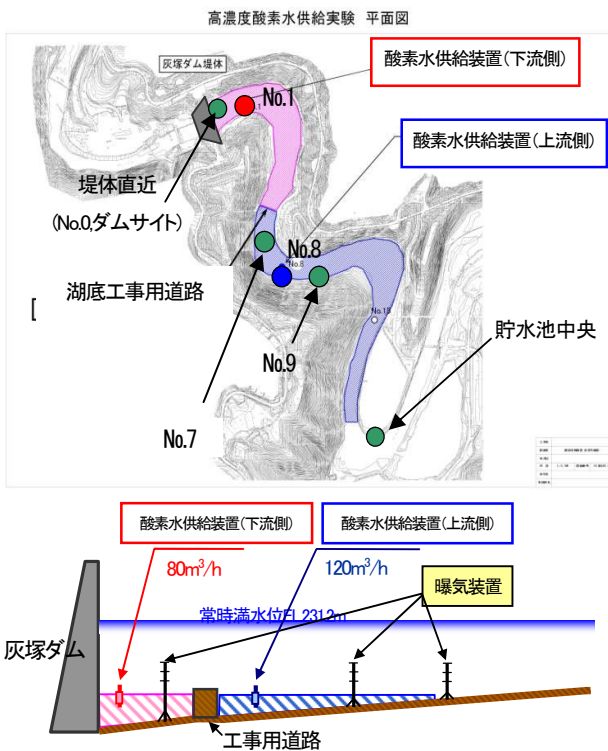


図-2 高濃度酸素水供給装置設置図

4. パラメータ設定のための試験

ダム湖の性状及び水質予測モデルパラメータ設定のための試験を実施した。

水質予測モデルの作成にあたっては、底層の水質変化の精度を高めることが重要であり、高濃度酸素水供給施設のメカニズムを踏まえ、溶出速度試験、DO消費速度試験、酸化析出沈降物調査（沈降速度）及び水質予測モデルで重要となる藻類増殖速度試験を実施した。（図-3）

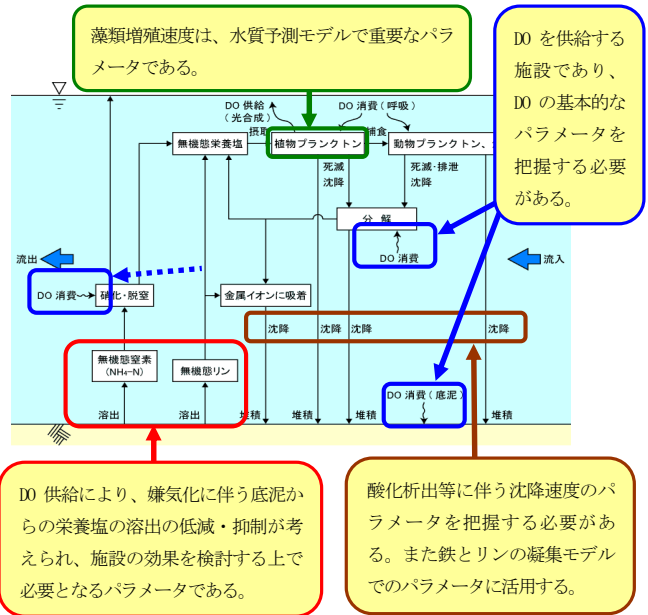


図-3 モデルの水質変化機構の概念と精度を高めるために必要なパラメータ

(1) 溶出速度試験

アオコ発生メカニズムには、栄養塩の供給源として底泥からの溶出が大きく関わっていると考えられる。底泥の溶出速度試験を実施し底泥からの溶出に関するパラメータを設定した。

結果、 $PO_4\text{-P}$ は、好気条件（空気曝気により溶存酸素濃度を飽和にコントロール）では溶出せず、嫌気条件（窒素曝気により溶存酸素濃度を 1mg/L 以下にコントロール）で溶出している。また、水温 10°C よりも、 20°C の方が溶出速度が高くなる傾向であった。

高濃度酸素水を供給されているNo.8地点付近は、供給されていない貯水池中央に比べて、溶出速度は小さくなっている。No.8地点は酸化膜が形成され $PO_4\text{-P}$ の溶出がある程度抑えられたものと考えられる。

このことから、 $PO_4\text{-P}$ 溶出速度のパラメータは、高濃度酸素水供給施設の影響を受けるエリアとそうでないエリアに分けて設定するものとした。（表-2）

表-2 $PO_4\text{-P}$ 溶出速度試験結果

地点	水温条件	嫌気条件	好気条件	備考
No.8地点付近	10°C	$0.001\text{g/m}^2/\text{day}$	$0.001\text{g/m}^2/\text{day}$	T-P含有量： 2.39mg/g
※高濃度酸素水供給施設の影響を受ける地点	20°C	$0.017\text{g/m}^2/\text{day}$	$0.002\text{g/m}^2/\text{day}$	
貯水池中央付近	10°C	$0.003\text{g/m}^2/\text{day}$	$0.000\text{g/m}^2/\text{day}$	T-P含有量： 2.37mg/g
※夏期に嫌気化する地点	20°C	$0.021\text{g/m}^2/\text{day}$	$0.001\text{g/m}^2/\text{day}$	
貯水池上流付近	10°C	—	$0.001\text{g/m}^2/\text{day}$	T-P含有量： 1.01mg/g
※年間を通して好気状態の地点	20°C	—	$0.002\text{g/m}^2/\text{day}$	

表-3 DO消費速度試験結果

地点	水温条件	DO消費速度
ダムサイト(表層)	10℃	0.005 gO ₂ /gCOD/day
ダムサイト(嫌気層)	10℃	0.010 gO ₂ /gCOD/day
ダムサイト(高濃度酸素水)	10℃	0.014 gO ₂ /gCOD/day
貯水池中央部(嫌気層)	10℃	0.017 gO ₂ /gCOD/day
貯水池上流部(好気層)	10℃	0.012 gO ₂ /gCOD/day
ダムサイト(嫌気層)	20℃	0.086 gO ₂ /gCOD/day

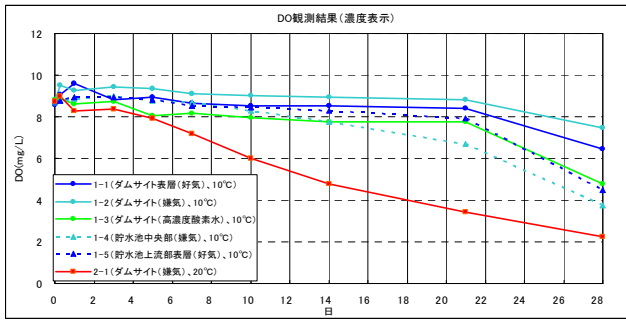


図-4 DO観測結果

(2) DO消費速度試験

栄養塩や金属はDOの状態によって溶出速度が異なり、例えば、リンはDOが約2mg/L以下になると溶出する傾向が見られる。このため、DOの変化を予測する必要があり、貯水池でのDO消費速度のパラメータを設定するためのDO消費速度試験を実施した。

結果、一般的な範囲より比較的高い値である。

金属イオンによる酸化も含まれるためDO消費速度が大きくなっているものと考えられる。(表-3, 図-4)

(3) 酸化析出沈降物調査

酸化析出沈降物調査は、嫌気により底泥から溶出した金属等が高濃度酸素水を供給することにより、酸化析出物として、どの程度沈降するかを把握するために調査を実施した。

結果、マンガンは、高濃度酸素水により酸化析出物を顕著に生成している。一方、鉄やリンは、高濃度酸素水による酸化析出物の生成は顕著ではない。これは、酸化析出物となる溶解成分が増加していないことを示していると考えられ、高濃度酸素水の供給により底泥からの溶出を抑制しているものと考えられる。窒素とリンの比率で見ると、水中では20:1程度であるが、沈降物中では5:1程度である。これは、リンの方が酸化により沈降物が生成しやすいことを示していると考えられる。

この調査結果から、特に栄養塩濃度に関与する現象として、鉄とリンは凝集し、一緒に沈降していると考えられ、リン濃度を表現するパラメータ(鉄とリンの凝集のモデル化)の一つとして採用した。(図-5, 6)

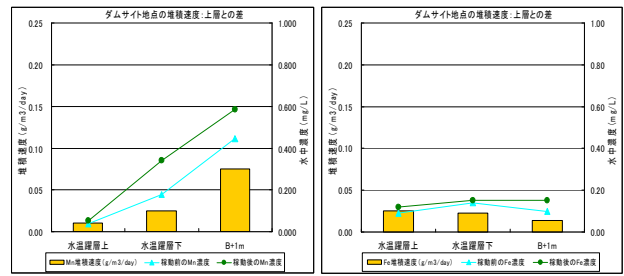


図-5 ダムサイト地点における鉄とマンガンの堆積速度

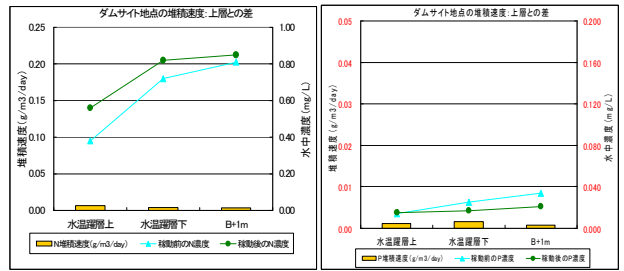


図-6 ダムサイト地点における窒素とリンの堆積速度

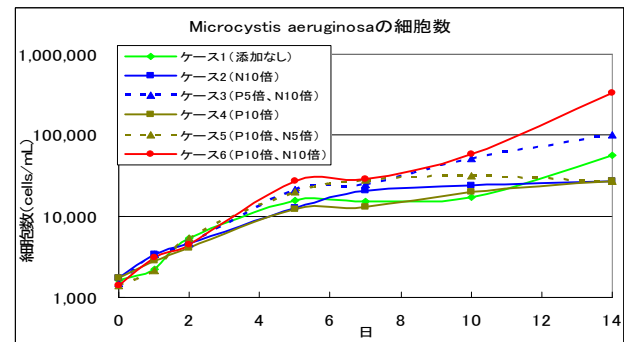


図-7 Microcystis aeruginosaの計測結果

(4) 藻類増殖速度試験

AGP試験は、予測モデルの重要なパラメータである藻類増殖速度に係わる定数を設定するために実施した。対象とした種(ミクロシスティス)は、灰塚ダム貯水池において夏期の優占種とし、現地で採取し分離培養した。

AGP試験結果より、最大比増殖速度、半飽和定数は、以下のとおり一般的な範囲の値であった。(図-7)

- ・最大比増殖速度: 1.36 1/day
- ・窒素半飽和定数: 0.06 mg/L
- ・リン半飽和定数: 0.02mg/L

5. 水質調査結果及び供給施設の効果検証

既往の水質調査結果等を整理し、貯水池の状況を把握するとともに、水質の実測値からみた高濃度酸素水供給施設の効果を検証した。

(1)水質調査結果から見た効果

a) リン

PO₄-Pは、嫌気状態で高くなるのに対して、好気状態になると急激に低下しその後は上昇しない。これは、酸素があることで鉄の形態が変化しリンと吸着、沈降するためである。その後もPO₄-Pは、上昇していないことから溶出自体を抑えているものと考えられる。

したがって、高濃度酸素水を供給することにより、PO₄-Pを水中から低減させ底泥からの溶出を抑制する効果がある。(図-8)

b) 窒素

No.7地点の平成18年と平成19年を比較すると、I-Nは、嫌気化している平成18年の方が高く、酸素が供給されている平成19年の方が低くなっている。これは、窒素の溶出量が減少したことによるものと考えられる。また、NO₃-Nは平成19年の方が多く、NH₄-Nからの硝化によるものと考えられる。

このように、I-Nについては、酸素があることで、NH₄-Nの溶出量が減少すると、硝化が進みNO₃-Nの量が増える効果が見られる。なお、NH₄-Nについては、豊かな生態系の確保の観点から、河川において基準が定めてあり、低濃度ほど良好となる。その観点からも貯水池において、NH₄-Nを低下させることは高濃度酸素水供給施設の効果として評価できる。(図-9)

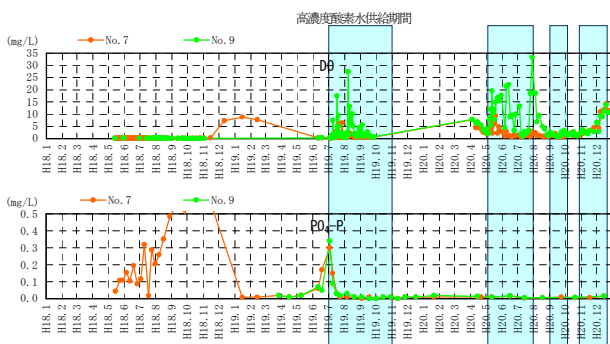


図-8 底層のDOとPO₄-Pの時系列変化

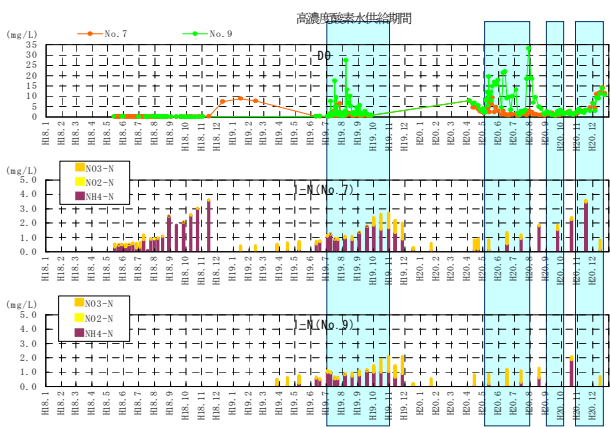


図-9 貯水池底層のDOとI-Nの時系列変化

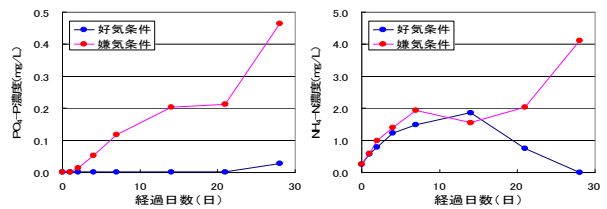


図-10 底泥によるPO₄-Pの溶出速度試験結果

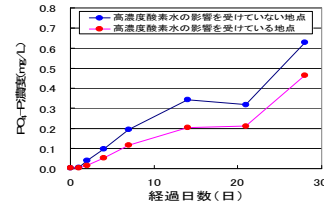


図-11 高濃度酸素水の有無による嫌気条件における溶出の違い

(2) 溶出速度試験結果からの効果

灰塚ダム貯水池の底泥を用いて実施した溶出速度試験結果として、酸素がある場合には、PO₄-P、NH₄-Nの溶出は抑えられることが分かる。高濃度酸素水を供給した場合には、底層に十分酸素がいきわたることから、底泥からの栄養塩の溶出は抑制されていると言える。また、高濃度酸素水による影響を受けた底泥とそうでない底泥とでは、同じ嫌気条件でも影響を受けた底泥の方は溶出が少なくなる傾向が見られた。(図-10, 11)

6. 灰塚ダム水質予測モデル作成

高濃度酸素水供給施設による効果を把握するための水質予測モデルを作成した。灰塚ダムにおける水質予測モデルは、一般的に用いられる鉛直二次元モデルとした。

(1) 再現計算

最終パラメータは、初期パラメータから灰塚ダム貯水池の実測値を再現できるようになるまでパラメータを変更し、繰り返し計算を実施することで設定した。

再現計算結果より、再現計算は、概ね実測値を再現できているものと考えられる。

鉛直二次元モデルで、貯水池の縦断方向に溶出速度、底泥DO消費速度のパラメータ値を変更させたのは、他事例では見受けられない。このことにより、今まで上流から下流まで一様に与えていた場合にくらべ、精度が高められたものと考えられる。

鉄とリンの凝集沈殿をモデル化したこと、溶解性鉄の酸化に伴うDO消費も考慮したこと、各種パラメータ算出のための実験を行い、この実験結果のパラメータを中心に同定作業を行ったことも精度が高められた要因と考えられる。(図-12, 13, 14, 15, 16, 17)

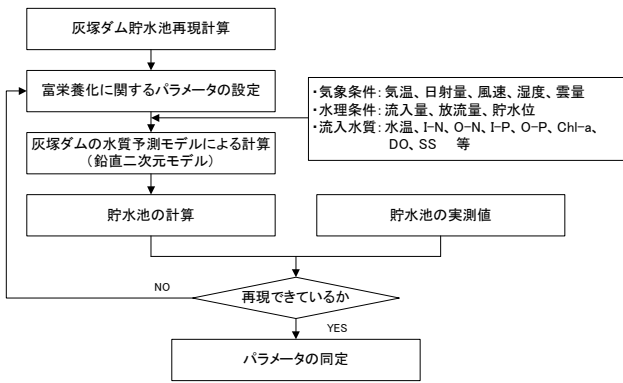


図-12 富栄養化に関するパラメータの同定フロー

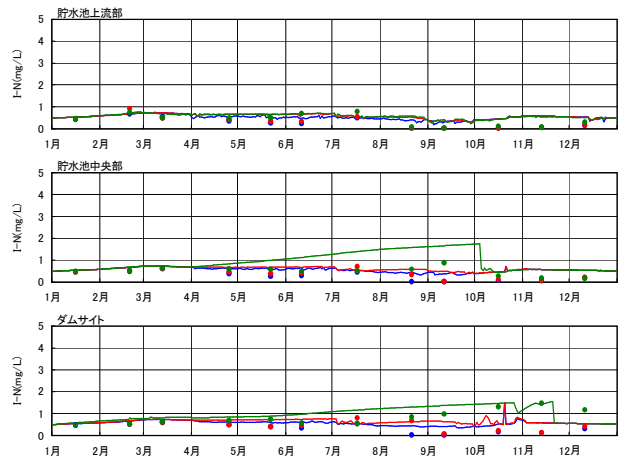


図-15 水質予測モデル再現計算結果 (I-N)

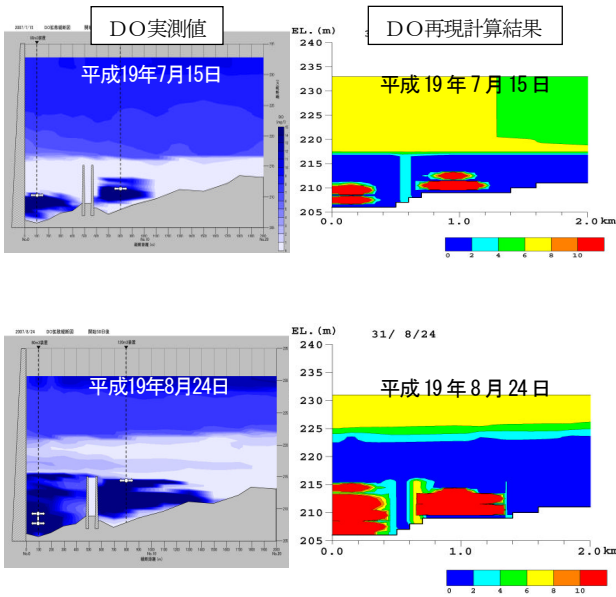


図-13 水質予測モデル再現結果

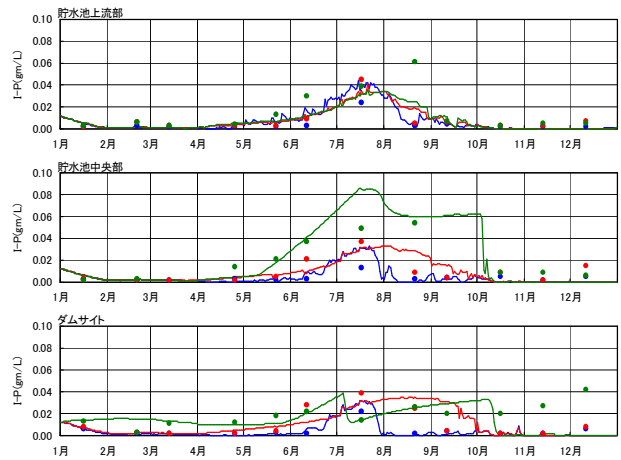


図-16 水質予測モデル再現計算結果 (I-P)

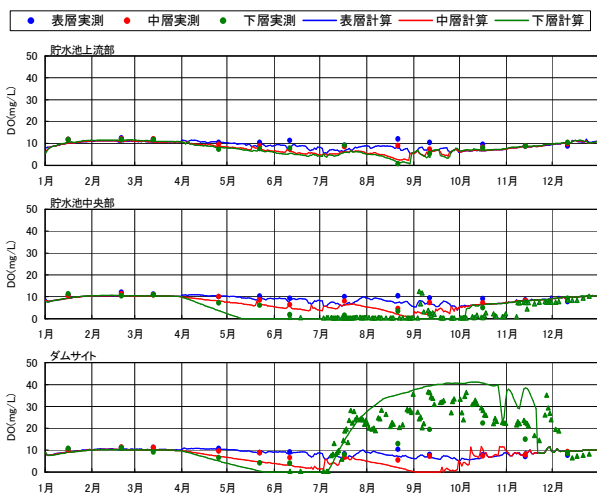


図-14 水質予測モデル再現計算結果 (DO)

7. まとめ

高濃度酸素水の影響を受けた底泥は、栄養塩等の溶出速度が小さくなることが確認できた。また、高濃度酸素水の供給により、リンや金属の酸化析出物が生成し沈降除去されたり、溶出量そのものが低減することが確認できた。

これらの試験結果をもとに、水質予測モデルのパラメータを設定し、概ね実測値を再現できた。今後は、更に予測精度を高めるための追加調査（コアサンプルを用いた溶出実験等）を行い、高濃度酸素水の富栄養化低減効果の評価を行う。更に、高濃度酸素水が生物に与える影響を確認し、高濃度酸素水供給施設の適切な運用手法について検討を行う。