

(67) 閉鎖性水域における底層部への高濃度酸素水導入による水質改善効果に関する研究

PURIFICATION OF WATER QUALITY IN CLOSED WATER BODY BY INTRODUCTION OF HIGH CONCENTRATED OXYGEN WATER INTO BOTTOM LAYER

今井 剛*, 浮田正夫*, 関根雅彦*, 樋口隆哉*

Tsuyoshi IMAI*, Masao UKITA*, Masahiko SEKINE* and Takaya HIGUCHI*

ABSTRACT; In this study, the method of using high concentrated oxygen water to depurate the bottom sediment was confirmed to be effective. The high concentrated oxygen dissolver was developed and the lab scale experiments were performed. High rate, high efficiency oxygen dissolver was developed, the optimum running condition of the equipment and the method of making high concentrated oxygen water was discussed in this study. In addition, the repression of phosphorus release by high concentrated oxygen water was also studied. On the basis of the fundamental knowledge from the lab scale study, pilot scale apparatus was set up and the pilot study was carried out.

KEYWORDS; closed water body, bottom sediment, eutrophication, high concentrated oxygen water, DO, phosphorus.

1. はじめに

湖沼・ダム貯水池など、いわゆる「閉鎖性水域」における水質は、他の水域と比較して著しく悪化しており、深刻な環境問題として広く認知されている¹⁾。閉鎖性水域とは、外部との水の交換が少ない水域を指し、一般に窒素・リンなどの汚濁原因物質が蓄積しやすい形状である。したがって、元来、閉鎖性水域は必然的に富栄養化が進行しやすい水域であるといえる。この特性に加え、産業活動の高度化、生活様式の変化などにより²⁾、水域へ流入する負荷は増大し、水域内の底質には大量に水質汚濁の原因となる物質が蓄積している。本研究では、この底質中に含まれ、水域内へ溶出することで有機物の過剰生産(アオコの発生など)を誘発する無機栄養塩類に起因する内来性富栄養化³⁾、いわゆる内部生産負荷の削減を目的とした技術開発を行った。

本研究で削減を目的とする内部生産負荷とは、水域内に蓄積している底泥からの栄養塩類の溶出に起因する有機物量の増大を指す。既存の内部生産負荷の削減技術としては、浚渫や覆砂が主たる技術となっている。しかし、これらの技術には、浚渫泥の処理場・捨場の確保や覆砂に必要な砂の入手が困難であるなど問題を抱えている⁴⁾。他に、底質からの栄養塩類等の溶出に底層部の嫌気化が大きく影響している問題を解決する技術として深層曝気などがあるが、水域内を無闇に攪拌し、水質の悪化した底層水を水域内に拡散してしまうことから施設設置後に使用を停止している事例もある。現在ではマイクロバブルを使用した技術開発が行われており、曝気による攪拌については改善されている⁵⁾。水域内の汚濁原因物質(有機物)を酸化・分解する場合に、必要とされる酸素の量がいわゆる化学的酸素要求量(COD)であるが、すでに大量に汚濁原因物質が蓄積している水域では、常に酸素が欠乏しやすい状態となっている。加えて閉鎖性水域では、温度躍層の出現による成層化が生じやすく、成層期には底層部の溶存酸素(DO)濃度はほぼ0mg/Lになる。底層部(底質近傍)の貧酸素化は、底質から水域へのリンの溶出を大きく助長する。したがって、富栄養化の進行した水域底層部のDO濃度改善技術は、閉鎖性水域の水質浄化において不可欠な技術であ

* 山口大学工学部社会建設工学科 (Department of Civil and Environmental Engineering, Yamaguchi University)

るといえる。

そこで、本研究では深層曝気にみられるような発生した気泡の上昇にともなう水域内の無闇な攪拌など、鉛直方向の流れを誘発せず、選択的に、しかも高効率に底層部のDO濃度を改善する高濃度酸素水を用いた技術の開発を行う。「高濃度（超過飽和）に酸素が溶存している水」＝「高濃度酸素水」という状態で、底層部に酸素を供給することで、高効率に底層部のDO改善を行うことを目指す。底層部へ高濃度酸素水を用いた酸素供給を行うことで、底質からのリンの溶出を抑制する。リンはアオコ発生の制限因子となることでも知られており、リン濃度の制限は閉鎖性水域の浄化において最も効率的であり重要な項目である。また、成層期において本法を適用することで、底質から溶出したリンを含む底層水からリンを水酸化鉄とともに、底質へ移行させ⁶⁾、水域内のリン濃度の低下を図る。さらに底層部を継続して好氣的に保つことで、底質に固定されたリンが再度溶出することを抑制し、内部生産負荷の削減を行う。また、酸素供給を行うことは底質中の微生物（好気性菌など）の活性化に効果を示すと考えられ、水域内の生態系の修復・強化による根本的・持続的な水質浄化作用が期待される。

加えて、本研究で開発を行った高濃度酸素水製造装置の開発過程およびその性能について実験的に検討を行った結果と、高濃度酸素水のリン溶出抑制効果の検討結果を踏まえて、山口県内のダム貯水池において平成15年7月より実施した現地パイロット実験で得られた結果から、本法の有効性を検討する。

2. 高濃度酸素水製造装置の開発およびその性能の評価

2-1. 高濃度酸素水製造装置の概略および高濃度酸素水の製造方法について

本研究で開発した高濃度酸素水製造装置の概略図を図1に示す。本装置では、加圧された酸素が充填されている装置内（図1中1）に、装置外周の接線方向から気液混合流体がポンプにより噴射される。この噴射口（気液混合

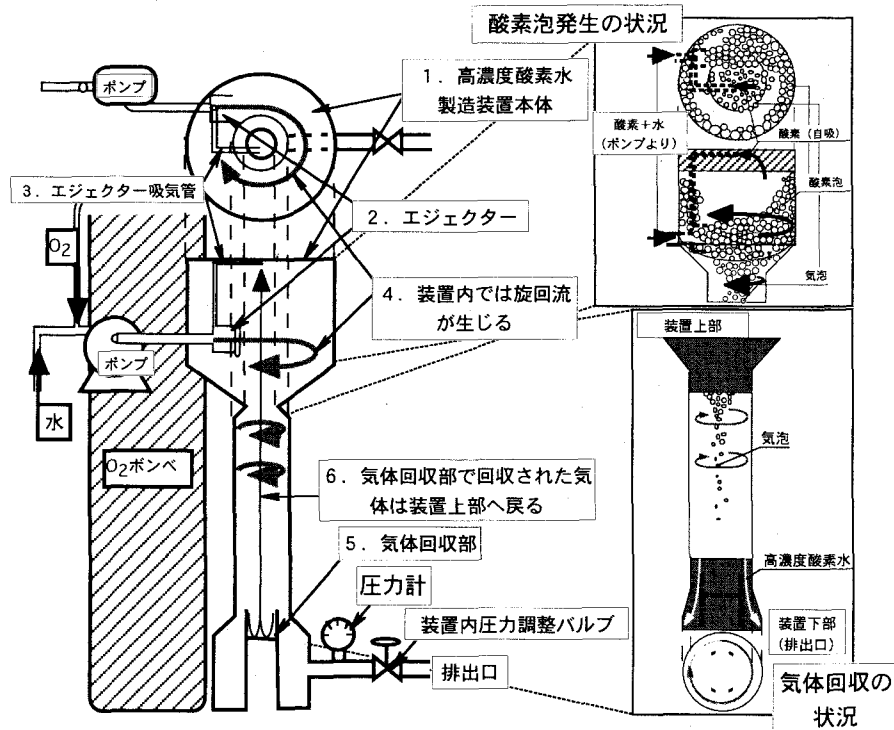


図1 高濃度酸素水製造装置（ラボスケール）の概略図

流体流入口)には、エジェクターを配置し、効率的な気泡の混合による気液の接触面積向上を図っている(図1中2)。エジェクターの吸気口は、装置内上部に固定されており(図1中3)装置内の酸素を自吸する。このため装置内圧力と、供給する気体量が適正な状態下において、装置内に流入する気液混合流体は大量に酸素の泡を含んだ状態となる。このとき、装置内では、表面泡のような泡が大量に生成される。この泡は、水

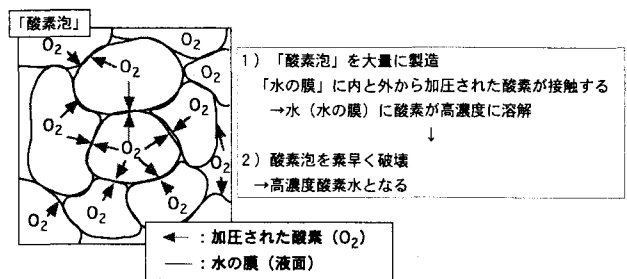


図2 酸素泡の説明

の膜に包まれた酸素であり、酸素が充填されている装置内に生成された「水の膜をもつ酸素泡」(以後、酸素泡)は、その水膜の内部も外部も酸素である(図2参照)。加圧された装置内で、このような状態を作り出し、この酸素泡を素早く生成させては速やかに破壊することで、高速に水に飽和溶解度以上の酸素を溶解させる。

酸素泡を大量に含む流体を、装置外周の接線方向から装置内に噴射させることにより、その流れは旋回流となり装置上部から下部へと移動する(図1中4)。その際、溶け残った酸素は向心力により中心に集まり、高濃度酸素水は、装置内壁に沿うように下部へ移動し、排出口より吐出される。中心部に集まった気体は、装置下部に設置されている気体回収部(図1中5)により装置上部へと返送される。返送された酸素は再びエジェクターにより水と混合される。つまり本装置において適正な運転条件下では、装置上部(図1中6)は酸素と酸素泡で満たされ、気体回収部の設置により、供給された酸素は水に溶存する以外に装置外部へと排出されない。したがって、供給した酸素が100%有効利用できる装置構造となっている。

2-2. 装置運転条件の検討に関する実験

本装置において、処理水DO濃度の制限因子は、供給する気体量と装置内圧力である。本実験装置では、装置内圧力は処理水排出口側にあるバルブの開閉により調整する。したがって、装置内圧力が高くなるほど装置外に流出する流量が減少し、酸素と水の接触時間は長くなる。よって、本装置を用いてより高濃度な酸素水を製造するには、酸素濃度の高い気体(すなわち純酸素)を供給し、より高い圧力で処理を行えばよい。本装置においては、装置内圧力が決定されれば、その圧力に最適な供給気体量が存在すると考えられる。

そこで、本装置を用いて高濃度な酸素水を製造するための最適運転条件について検討した。

装置内圧力は、本実験装置の耐圧限界である0.2MPaに固定し、供給する気体(酸素)の量を変化させた場合の実験を行い、処理水DO濃度等の測定結果より運転条件に関する検討を行った。DOの測定はDOメーター(GS製DOM-1000W)を用いて測定した。

2-3. 装置運転条件の検討実験に関する結果および考察

各条件における処理水DOおよび処理水流量の測定結果を表1、図3に示す。なお、ここでは実験結果の一例と

表1 運転条件検討実験結果

供給気体量 [mL/min]	処理水DO [mg/L]	処理水流量 [L/min]	酸素供給速度 [mg/min]	酸素溶解効率 [%]
300	28.3	15.9	450	100*
500	38.4	15.7	603	84.5
700	48.4	15.3	739	73.9
900**	47.8	15.1	722	56.1

*:100%をわずかに超える値となった。(運転開始前に装置内に充填していた酸素が影響したものと考えられる)

**:900mL/minとした場合においては、気体の供給量が水量に対して過剰となり処理水排出口から装置外への気体の漏れが確認された。

して、供給気体量を300、500、700、900mL/minとした場合についての結果を示す。本実験では、運転条件の評価に「酸素供給速度」という値を算出して用いた。「酸素供給速度」とは、製造された酸素水を底層に導入した場合に、単位時間当たり底層へ供給できる酸素の量であり、処理水DOと処理水流量の積で表される。実験結果より、最も高い値となった供給気体量700mL/minの付近に装置内圧力0.2MPa時の最適気体供給量があることがわかった。そして、この運転条件下では、内容積約2.3Lの本装置を用いて、十数秒程度の滞留時間でDO濃度約50mg/L以上の高濃度酸素水を約15L/min(22,000L/day)で製造可能であることが確認された。なお、DO濃度については、以下に

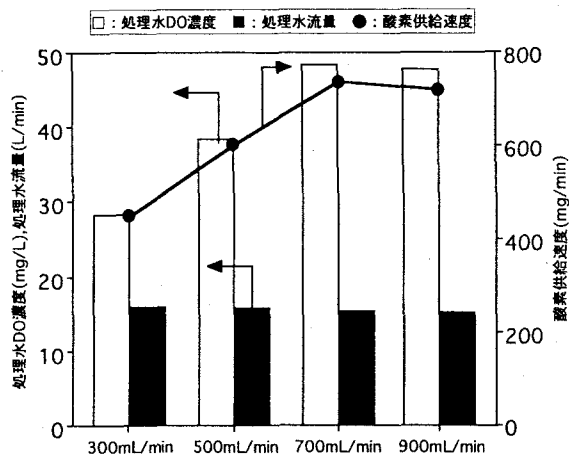


図3 各運転条件における酸素供給速度の比較

述べるように測定方法によるロスがあると考えられ、測定値が実際の値より低く測定されている可能性が高い。ほぼ100%の酸素が水に溶解したと仮定すると、約70mg/Lの高濃度酸素水が製造されていたと考えられる。次に、供給した気体を100%溶解させた場合の処理水DO(理論値)を算出し、その値で処理水DO(測定値)を除いた値より酸素溶解効率を求めた。表1より、100%となったのは、1条件のみとなった。この理由は、装置内圧力が0.2MPaと大気圧よりも高く、装置内においては完全に溶解していた(装置は内部が観察できる様になっており、気泡の流出はみられなかった)ものが、装置より排出された瞬間に圧力差により発泡(処理水が大量の微細気泡により白濁したことが確認された)・脱気されてしまったものと考えられる。したがって、測定結果は、実際の値より低く測定されたと考えられ、処理水DOの測定方法に関しては、さらなる改良が必要である。

3. 高濃度酸素水の導入による底質からのリン溶出抑制効果の把握

3-1. 底質からのリン溶出について

湖沼・ダム貯水池等の閉鎖性水域における内部生産負荷の主な原因物質として底質から溶出するリン・窒素が挙げられる。窒素は往々にしてリンよりも大量に存在し、水域の浄化がリン制限で達成される(リンを制限する方が浄化が達成されやすい)水域が多い。

水域内でリンは、リン酸(H_3PO_4 , PO_4^{3-})の状態で植物プランクトンの異常繁殖の原因となり、植物プランクトンの死滅などにより底質へ沈降する。沈降した後、底質中での嫌氣的な分解により、再び PO_4^{3-} に分解される。底質直上水が嫌氣的である場合に、底質から水域へ PO_4^{3-} の溶出量はより多くなり、同時に2価の鉄(Fe^{2+})も溶出することが既往の研究⁶⁾により確認されている。溶出した PO_4^{3-} は、 Fe^{2+} が酸化され(Fe^{3+})、水酸化された水酸化鉄($FeO(OH)$)とともに底質に沈降し、再び底質中で還元・分解されて、水質への溶出を繰り返している^{6), 7)}。本研究では、このような状態にある底層部へ、高濃度酸素水を用いた酸素供給を行うことで、底質からの PO_4^{3-} 溶出を抑制する。また、成層期において本法を適用することで、底質から溶出した PO_4^{3-} を含む底層水から PO_4^{3-} を $Fe(OH)_3$ とともに、底質へ移行させ、底層付近の水質浄化を行う。

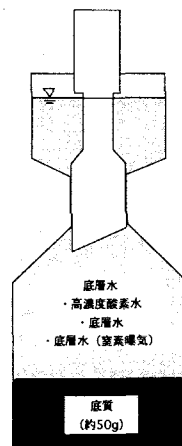


図4 溶出抑制効果把握実験の概略

3-2. 高濃度酸素水によるリンの溶出抑制効果の把握実験

ダム貯水池の水深約40mの地点から底質を採取（エクマンバージによる）し、200mLフランビン内に約50gずつ供し、同水域より採取した底層水で満たし、底質から直上水への PO_4^{3-} 溶出を確認する実験を行った（図4参照）。このとき接触させる直上水を（1）高濃度酸素水化したものの、（2）採取したそのままの状態、（3）窒素曝気を行いDOを0に近づけたものの、3系統を用意し、それぞれの直上水中的 PO_4^{3-} および Fe^{2+} 、 Fe^{3+} の経時変化を測定した。なお実験開始時の高濃度酸素水のDOは17.4mg/L、採取したそのままのもののDOは3.3mg/L、窒素曝気したもののDOは0.55mg/Lであった。また、本実験は28日間行った。なお、実験期間中においてDOの調整は行っていない。

PO_4^{3-} の定量は下水試験法⁸⁾にしたがいモリブデン酸青（アスコルビン酸）吸光光度法により行った。 Fe^{2+} は下水試験法⁸⁾にしたがいo-フェナントロリン吸光光度計で定量し、 Fe^{3+} については下水道試験法⁸⁾にしたがい溶解製鉄を測定し、同じ検体について測定した Fe^{2+} の値を差し引いた値を Fe^{3+} の量とした。また、DOはDOメーター（GS製DOM-1000W）を用いて測定した。

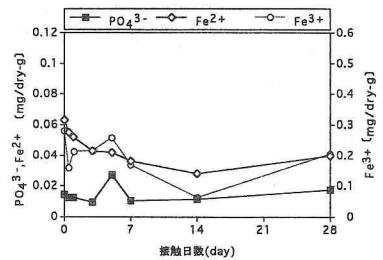


図5 底質から直上水（酸素水）への溶出量の変化

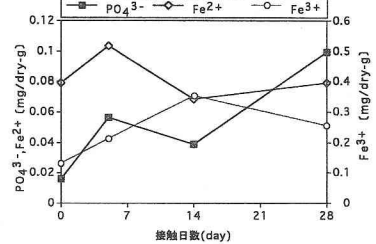


図6 底質から直上水（ N_2 曝気した底層水）への溶出量の変化

3-3. リン溶出抑制実験に関する結果および考察

差が最も顕著であった、直上水を高濃度酸素水化したものと窒素曝気したものの結果を図5、図6に示す。これらの実験結果より、窒素曝気したものについては直上水中的 PO_4^{3-} が増加しており、同時に Fe^{2+} も増加したことがわかる。逆に高濃度酸素水を接触させた場合については、実験開始当初からの PO_4^{3-} の増加はほとんどみられなかった。したがって、従来の知見通り直上水を好氣的に保つことにより、 PO_4^{3-} の溶出を抑制できることが確認された。終了時、窒素曝気した底層水を接触させた系では、水中のリン濃度（接触している底質当たり）が約0.1mg/dry-gであったのに対し、高濃度酸素水を接触させた場合では約0.02mg/dry-gであり、溶出量を8割程度も削減できる効果が確認された。この効果は好気的な条件が維持される限り持続または強化されると考えられる。

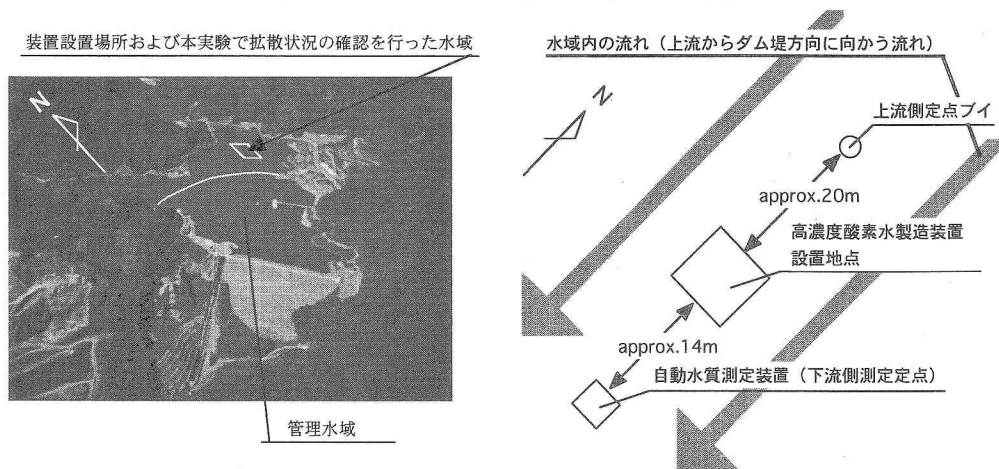


図7 現地実験（山口県内のダム湖）フィールド内の装置設置場所（左図）及び水質想定地点の概略図（右図）

4-1. 現地実験について

図8 現地実験装置概略図

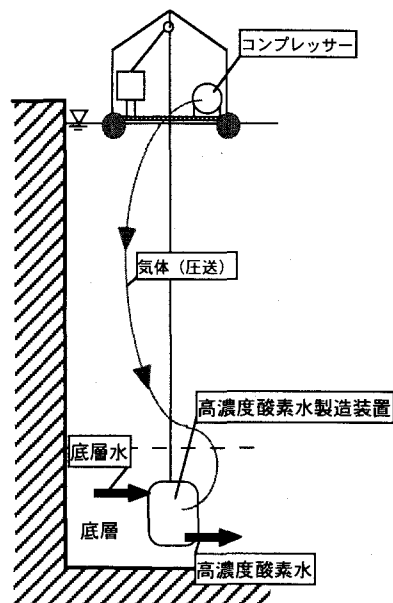


圖 9 「原位置式」方式概略圖

現地実験を行うにあたり、日量1000tの処理が可能なパイロットスケールの高濃度酸素水製造装置を製作した。その概略図を図8に示す。大型化による形状の変更等はあるものの、基本構造は前述のラボスケールの装置とほぼ同じである。

本装置は底層水吸い込み口側に揚程5m (0.05MPa) の能力を持つ水中ポンプを用いた。つまり、装置内における加圧可能な圧力は最大で約0.05MPaである。また、処理水排出口は、処理水が水平方向に対して全方位に広がるような形状となっている。供給する気体については、酸素製造装置 (PSA : Pressure Swing Adsorption (圧力変動吸着)) を用いて酸素を製造 (空気より酸素のみを抽出) したが、その量が毎分 8L 程度であったため、これを底層 (本実験では水深約 40m) に圧送すると、その量は水压により約 3L/min 程度に減少してしまう。そのため、不足分を空気で補い、製造された酸素と空気を混合した、酸素濃度 30% 程度の気体を用いた。

通常、底層部への気体供給や、高濃度酸素水の導入を行う場合、装置はその大部分が陸上に設置されるのが一般的である。しかし、本研究では「原位置式」の高濃度酸素水導入法により、より高効率なシステムの構築を目指した。「原位置式」とは、**図 8** の装置を水域底層部に配置する方法である (**図 9** 参照)。原位置式は陸上設置式と比較して、(1)底層水の汲み上げ・返送に要する設備およびエネルギーが不要である(ただし、底層への気体圧送用のコンプレッサーは必要)、(2)底層部で同水深の底層水を吸い込み、同水深へ高濃度酸素水として供給するため、水温コントロール設備なしで、水温変化を最小限に抑えることができる(陸上設置型では水温変化に対する何らかの対策が必要であ

る)、(3)「原位置式」では装置を配置する水深に相当する水圧が装置に作用する、等の利点を有する。そのため、処理水吸い込み口側に(1)小さな水中ポンプを設置することで、(2)水圧を有効利用した、(3)より省エネルギーな運転が可能となる、の3点の大きな特徴を持つ。

4-4. パイロットスケール装置の設定および運転条件について

本装置において、処理水のDOに影響を及ぼすと考えられる因子のうち、装置内圧力、気体の酸素濃度は前述の通りそれぞれ0.05MPa、30%で固定されている。今回の実験期間において、約1000t/dayの連続運転処理を続け、その処理水DOの測定値は6～10mg/Lであった。なお、この処理水DOは、処理水出口付近で測定を行ったため、装置外に出た際に周囲の大量の底層水によって希釈されていると考えられる。よって処理水DOは「6～10mg/L程度以上」であると推測される。

一方で、前述の通り実験装置の関係で当初予定していた供給気体の酸素濃度（95%程度）を実現できなかったため、以下のような実験を行った。本装置の最大ポテンシャルを確認するための実験として、供給する気体に純酸素（酸素ポンプによる供給）を使用する運転実験を行った。他の条件は通常の連続運転と同じ条件に設定した場合に、処理水DOは20mg/L以上（DOメーターの最大測定値である20mg/Lを振り切ったためそれ以上は測定不可能であった）であった。なお、このときの処理水流量約1180t/dayを用いて、処理水DOの理論値（供給した気体が100%溶解した場合）を算出し、この値で実測値を除いた値より、本装置の酸素の溶解効率を求めた。結果は、50%以上（ただし、前述の通り処理水DOの測定値が実際よりも低く測定されている可能性が大であり、DOメーターの最大測定値を振り切ったため、50%以上であると推察される）の溶解効率であることが確認された。

4-5. 底層部における高濃度酸素水の拡散状況について

「原位置式」による高濃度酸素水導入を平成15年8月より開始し、装置設置地点の周辺で水深方向のDOおよび水温を継続的に測定した。結果を図10、図11に示す。図10に示した水深方向のDOの経日変化は、装置を設置した地点から約14m下流の地点に設定した測定定点（図7右図参照）での結果であり、実験期間中において位置の変動はほとんどなかった。図10（図11も同様）において水底の形状が変化しているようにみられるのは、ダム貯水池の水深が変化したためである。つまり、図10（図11も同様）は水面が基準となっている。図10より、DOが大きく変化する水深（温度躍層）以深において、装置を配置した水深38m付近を中心にDOが高くなっていたことがわかる。この効果は、装置の運転を一時休止した期間（図10参照 03/11/1～14の間）との比較からも見て取れる。なお、季節の進行とともに温度躍層が下がり、11月下旬には装置周辺に達したことが図より確認できる。また、DO測定に加えて、水深方向の水温の経日変化に関する測定も同様に行った。その結果を図11に示す。この図より、4ヶ月程度運転を継続したにもかかわらず、高濃度酸素水の導入による温度躍層の破壊などは

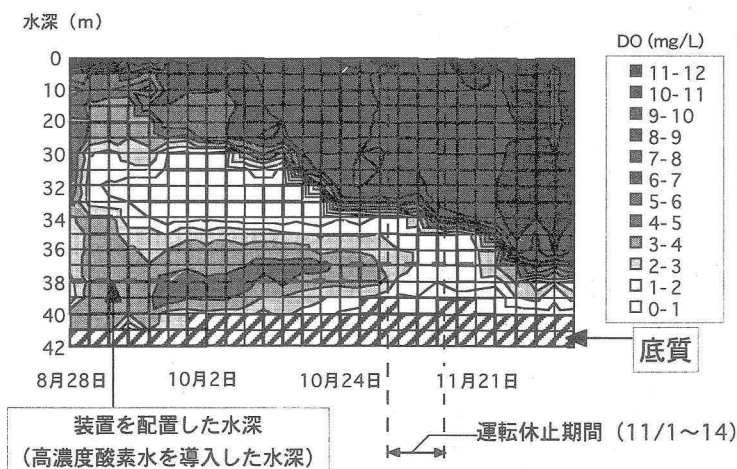


図10 水深方向のDOの経日変化（平成15年8月28日～12月9日）

一切生じなかったことがわかる。これは、高濃度酸素水の拡散速度が明らかになってはいないものの、製造された高濃度酸素水の水温と底層部の水温がほぼ同じであったことを示すものであると考えられる。したがって、温度躍層による水域内における水深方向の循環の停滞を有効利用して、選択的に底層部に高濃度酸素水の導入を行えることが示されたと考えられる。以

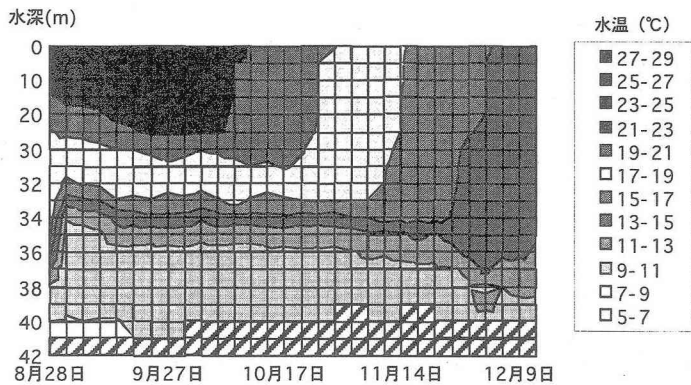


図 11 水深方向の水温の経日変化（平成 15 年 8 月 28 日～12 月 9 日）

上の結果より、高濃度酸素水は導入した水深において水平方向へと拡散したと推測される。よって、本装置により導入した高濃度酸素水は、底層部に高い確率で定着し、効率的に底質およびその近傍に酸素を供給可能であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、閉鎖性水域における内部生産負荷による水質汚濁を改善する技術として、高濃度酸素水を用いた水域底層部 DO 改善技術について研究を行った。そして本法において必要な、高濃度酸素水製造装置の開発およびその性能の把握に加え、高濃度酸素水のリン溶出抑制効果に関する検討を室内実験にて行い、この結果を踏まえて現地実験を行った。本研究をまとめると以下のようである。

5-1. 高濃度酸素水製造装置の開発および効率的な運転方法について

実用レベルの装置開発のための予備実験として、ラボスケールの装置（内容積約 2.3L）を製作し、本研究で開発した高濃度酸素水製造装置の性能および、装置の運転条件に関する検討を行い以下の結果を得た。

- ①ラボスケール実験装置の最適運転条件をほぼ決定でき、装置の運転条件の検討方法についての知見を得た。
- ②最適運転条件下では、約十数秒の滞留時間で DO 濃度約 50mg/L 以上の高濃度酸素水を約 15L/min(22,000L/day)で製造可能であることが確認された。DO 濃度については、測定方法によるロスがあり、測定値が実際の値より低く測定されている可能性が高い。理論的には約 70mg/L の高濃度酸素水が製造されていると考えられる。

5-2. 高濃度酸素水のリン溶出抑制効果の把握

高濃度酸素溶解処理を行った底層水と底質を接触させ、底質から底層水へのリン溶出の経日変化を確認する実験を行い以下の結果を得た。

- ①窒素曝気を行い貧酸素化させた底層水と底質の接触実験から、 PO_4^{3-} および Fe^{2+} の溶出が確認された。
- ②窒素曝気した底層水と底質の接触実験との比較により、高濃度酸素水を接触させた場合では、リン溶出量を約 80% 削減でき、底層部を好気化することでリン溶出抑制を行うことが可能であることが確認された。

5-3. 水域底層部における高濃度酸素水の拡散状況について

ダム貯水池において、パイロットスケールの高濃度酸素水製造装置を水深 37～38m（周辺の平均水深が 41m の水域において）に配置して、底層部への高濃度酸素水導入実験を行い、底層部における高濃度酸素水の拡散状況つ

て検討し、以下の結果を得た。

- ①設定した調査地点（定点）における水深方向のDO濃度を実験期間中に継続して測定し、経日変化より高濃度酸素水の拡散状況を確認した結果、水域内の温度躍層を壊すことなく、導入を行った水深に高濃度酸素水が水平方向に広がることを確認された。
- ②本装置を用いて導入した高濃度酸素水の底層部への定着率は高く、高効率に底層部のDO濃度改善が行われると考えられる。
- ③本現地連続実験では、酸素濃度 30% の気体を供給気体とした運転で、約 10mg/L 以上の高濃度酸素水を 1000t/day で常時製造可能であった。
- ④供給気体を純酸素とした運転実験においては、20mg/L 以上の高濃度酸素水を連続実験と同等以上の処理能力（処理水流量約 1180t/day）で製造可能であることが確認された。そしてこの実験より本装置の酸素溶解効率は少なくとも 50% 以上であることが確認された。
- ⑤連続実験の結果より、底層部へ選択的に酸素供給を行うことが可能であり、5-2. の結果と併せて評価すると、本技術は実際の閉鎖性水域においても適用可能であり、リン溶出抑制に大きな効果があり、底質環境を改善することが可能であると考えられる。

謝辞

本研究を実施するにあたり、本学修了生の汐重啓君、本学卒業生の上山慎一君に多大な助力を得ました。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 環境省環境管理局水環境部，平成 13 年度公共用水域水質測定結果，2002.
- 2) 須藤隆一編，環境修復のための生態工学，講談社サイエンティフィック，2000.
- 3) 浮田正夫，京都大学博士論文，わが国における窒素・リンの発生源構造と富栄養化の機構に関する基礎的研究，1982.
- 4) 勝井秀博，底泥置換覆砂工法の開発，底泥浄化技術セミナーテキスト，2002.
- 5) 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，Vol.46, pp.1091-1096, 2002.
- 6) 千葉県水質保全研究所，湖沼底泥からのリンの溶出機構－鉄イオンの酸化および錯形成との関係－，1991.
- 7) 臼井恵次，好気的条件下における堆積物からのリンの溶出について，第 24 回水環境フォーラム山口講演集，pp.35-40, 2004.
- 8) (社)日本下水道協会編，下水試験法，1997.