高濃度酸素水を利用した水質浄化システム

システムの概要と装置の設計

片倉 徳男*1・高山 百合子*1・上野 成三*2

Keywords : Water purification, Sediment purification, Dissolved oxygen
水質浄化，底質浄化，溶存酸素

1. はじめに

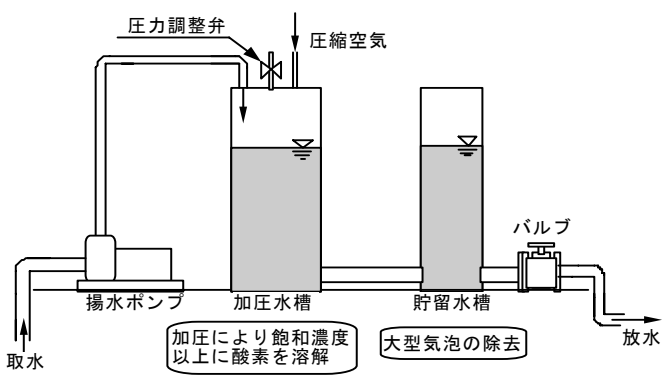
内湾や湖沼などの閉鎖性の水域では，陸域からの汚濁負荷の流入，有機物の海底への堆積など水域環境の悪化が継続しており，特に堆積した有機物の酸化分解による貧酸素化が問題となっている。このような環境を好気的な環境にする方法として，貧酸素化した水域に酸素を供給する方法が用いられている。貧酸素化した水域への酸素補給は，好気性微生物の生息環境を維持するために必要であるだけでなく，嫌気環境で底質から溶出するリンやアンモニアの濃度を抑制することが可能である[1)]。

酸素供給の方法としては，水中で曝気を行う方法，揚水した水に曝気を行い再び底層付近に放水する方法[2)]，微細気泡を含む水を底層付近に供給する方法[3)4)]などがある。これらは，いずれも水中に酸素を直接供給する方法であるが，水中に溶存可能な溶存酸素濃度（DO）は酸素飽和度（DO%）が 100%までに限定され，貧酸素化の解消効果に限界があった。

本報では溶存酸素濃度を飽和濃度以上の過飽和状態に高めることが可能な高濃度酸素水の発生装置を開発して，現地実験による本装置の有効性を実証した[5)]。また，室内実験で底質中に生息する微生物が有機物の分解に必要なDOレベルを明らかにしたうえで，面積が異なる水域モデルを対象にした流動・水質数値解析によりDOの拡散状態を検討し，水域の規模に応じた最適放流量の諸元と，装置の試設計を行った。[6)]

2. システムの概要

高濃度酸素水を発生する装置の基本原理を図－1 に示す。加圧水槽で貧酸素の水域から取水した水をコンプレッサーから送気した圧縮空気による加圧力を利用して過飽和の状態になるまで空気を水中に溶解させ，過飽和の酸素を含む高濃度酸素水を生成する。次に，気泡を含まない状態で高濃度酸素水を放水するため，貯留水槽で放水時の圧力差で発生する気泡の量を低減し，加圧水槽で発生する大型の気泡を除去する。なお，溶存させるガスに酸素濃度が高いガスを利用すると，空気を用いる場合より高い過飽和の高濃度酸素水を生成することが可能である。しかし，酸素濃度を高めたガス（例えば純酸素など）が別途必要となるため，空気を使用している。



図－1　原理図
Fig.1 Principle of the high-oxygen discharge system

＊1　技術センター土木技術研究所水域・生物環境研究室
＊2　国際支店土木部土木技術部技術室

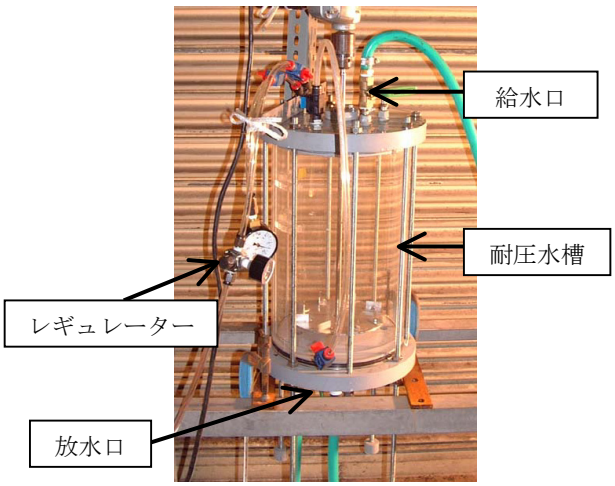
3.　高濃度酸素水の基本特性

高濃度酸素水を生成する耐圧性のバッチ式装置を使用し，加圧力を変化させて高濃度酸素水に溶解する溶存酸素量（DO）と圧力の関係を把握した。次に連続して高濃度酸素水を生成可能な小型実験装置を試作し，室内において装置の高濃度酸素水放水量に関する基本性能を評価した。

3.1　バッチ式装置における DO と圧力の関係

3.1.1　装置概要

図－2 にバッチ式装置（容量 20L）を示す。装置は耐圧水槽に，給放水口，圧縮空気給気管を備え，コンプレッサーから送気される圧縮空気の加圧力を精密レギュレーターで調整した。給水口から水道水を水槽に入れて密閉した後に，圧縮空気で容器内部を 0.1～0.4 MPa の範囲で加圧し，放水口から放出される高濃度酸素水をビーカーに採取して，気泡が消失した時点でハンディ DO メーター （YSI Model 550A）を用いて酸素飽和度（DO%）を計測した。

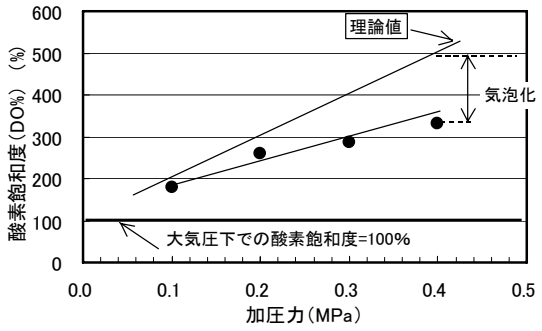


図－2　バッチ式装置
Fig. 2 Small scale device　(Discontinuous discharge type)

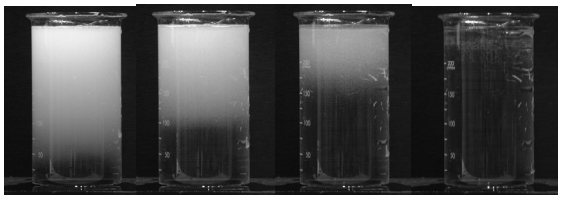
3.1.2　加圧による溶存酸素濃度の増加

図－3 に加圧力と酸素飽和度の関係を示す。大気圧下における酸素飽和度（DO%）は 100%であり，理論的には加圧力に比例して酸素飽和度は増加する。バッチ式装置では，加圧下で一旦溶存した酸素が放水後に大気圧下におかれるため過飽和分のガスが気泡化するが，いずれの加圧条件でも放水中の DO%は過飽和の状態を維持した。この実験から，バッチ式装置を用いた場合，0.2MPa 以上の加圧条件で飽和酸素量の 2.5 倍以上（酸素飽和度 250%以上）の酸素が溶存する高濃度酸素水を得た。

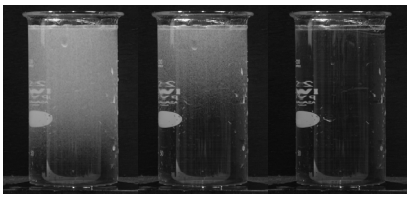
図－4 はバッチ式装置で 0.1 MPa，0.35MPa で加圧し，放水直後の高濃度酸素水をビーカーに静置した状況である。加圧下で溶解した空気は放水と同時に大気圧まで減圧されるため，過剰に溶存した空気が気泡化して白濁する。この気泡の発生量は加圧力が高いほど多量に発生するが，気泡は浮上・脱気して容器内の透明度が増加し，約 60 秒後には消失している。図－3 に示す結果は，気泡が消失した時点で酸素飽和度の計測を行っているが，気泡が消失しても水中の溶存酸素濃度は飽和濃度を大きく上回った。したがって加圧状態で水中に溶解した過飽和の空気は，速やかに全量が気泡化するのではなく，一部が過飽和の溶存状態で水中に維持できる特性があることが判る。



図－3　バッチ式装置による加圧力と酸素飽和度（%）
Fig.3 The relation between DO% and pressure by the small scale device　(Discontinuous discharge type)



0.3MPa　→20 秒　→　40 秒　→　60 秒　→　100 秒



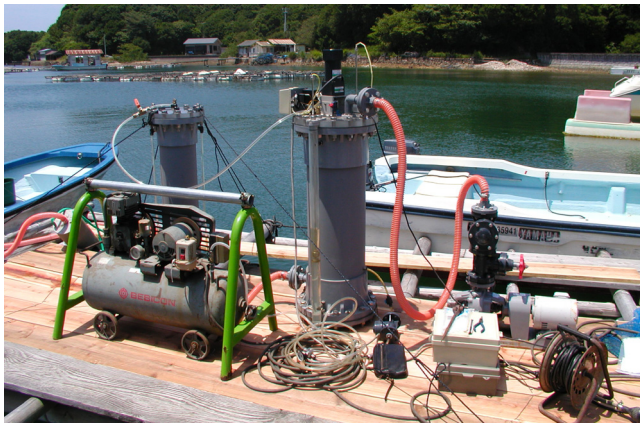
0.1MPa　→20 秒　→　40 秒　→　60 秒

図－4　放水後の気泡発生量の変化
Fig.4 The changes of the water state in the dissolved oxygen release (P = 0.1 MPa and 0.3 MPa)

3.2　連続式装置における DO と圧力の関係

3.2.1　装置概要

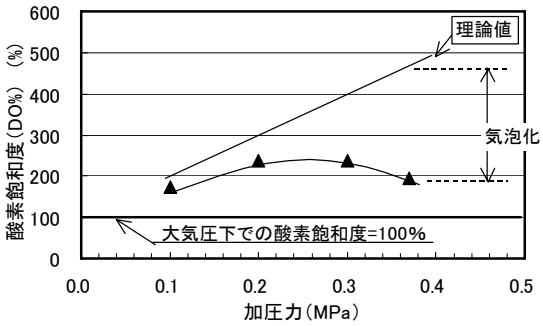
図－5 に連続式高濃度酸素水発生装置（試作機）を示す。装置は 70L の加圧水槽で取水ポンプから揚水した水に圧縮空気を用いて空気を溶解させ，連続して高濃度酸素水を生成・放水するシステムである。バッチ式装置による実験から，加圧水槽から直接放水すると加圧力が高いほど気泡化により溶解した酸素が大気中に抜けることが予測された。そこで，加圧水槽の次段階に貯留水槽を設けて，大型の気泡を除去して，溶存酸素濃度を極力高い状態で維持できるシステムとした。また，放水量はバルブで調整した。さらに，加圧水槽内において取水ポンプの吐出圧とコンプレッサーからの圧縮空気の圧力を一定に保たせるために，圧力調整弁を設置した。



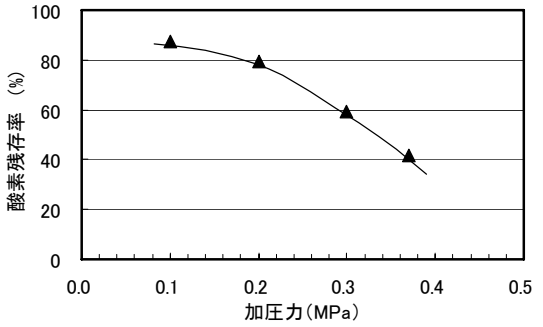
図－5　連続式装置
Fig.5 Full scale device　(Continuous discharge type)

3.2.2　加圧力と酸素飽和度の関係

連続式高濃度酸素水発生装置を用い，加圧力を 0.1～0.4 MPa，放水量を 25L/min～65L/min に変化させて，放水される高濃度酸素水中の酸素飽和度（DO%）を DO メーターで計測した。図－6 に加圧力と放水中の DO%の結果を示す。放水中の DO%は 0.2MPa の加圧で 200%を越える酸素飽和度となった。図－7 に放水中の酸素飽和度を理論上の飽和度で除した酸素残存率を示す。理論上はいずれの加圧力においても酸素残存率は 100%であるが，加圧力が高いほど，過飽和分の気泡化により酸素残存率が低下した。酸素残存率は，0.2MPa で理論値に対して約 80%であるが，0.3MPa を超過すると 50%以下まで低下した。このことは，加圧力が高い場合，気泡化しやすくなることを示している。これらの結果から，溶存酸素濃度が高いながらも気泡化量が少ない加圧力 0.2MPa を以降の実験における装置の設定値とした。



図－6　加圧力と高濃度酸素水の酸素飽和度（%）
Fig.6 The relation between DO% and pressure by the full scale device（Continuous discharge type, Q=40 L/min）



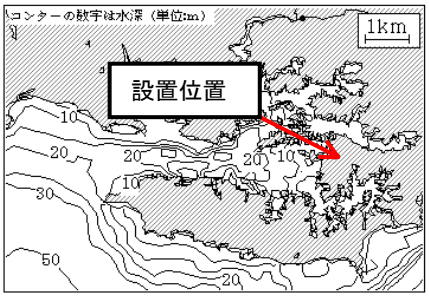
図－7　加圧力と酸素残存率
Fig.7 The relation between the residual rate of DO% and pressure

4.　海域実証試験

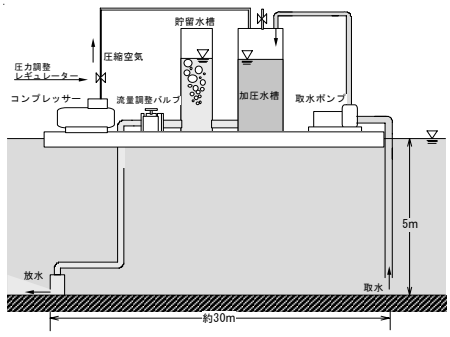
実海域において，室内実験で使用した連続式高濃度酸素水発生装置を用いた連続稼動実験を行った。実証試験は約 7 週間にわたり実施し，高濃度酸素水の拡散及び装置の性能と稼動状況等の装置の実現性の確認を目的とした。

4.1　概要

実証試験は三重県英虞湾で行った。現地は英虞湾の中でも湾奥の静穏な海域であり，夏期に貧酸素の状態が観測される場所である。試験は 2004 年 7 月 23 日から 9 月 9 日にかけて約 7 週間連続して実施した。図－8 に実験位置を示す。本試験では連続式装置を筏上に設置し，水深約 5m の海底付近から取水を行い，高濃度酸素水を生成して，取水口から約 30m 離れた海底面直上から放水した。図－9 に装置の概要を示す。加圧力は基本特性把握実験で決定した 0.2MPa に設定し，40L/min の流量で放水した。



図－8　実験位置
Fig.8 The location of the field test

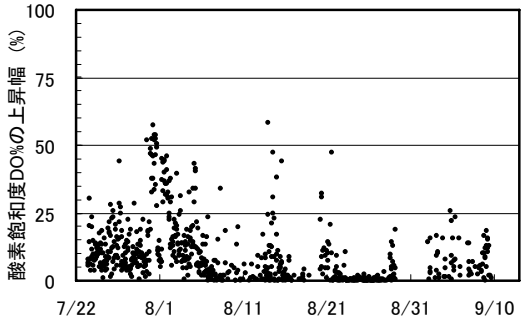


写真－9　装置の概要図
Fig.9 Field test set up

4.2　連続計測結果

小型メモリーDO 計により，放水口から 0.3m，3.5m（バックグラウンドとする）の位置での DO を計測した。図－10 に DO%の上昇幅の経時変化（放水口から 0.3m と 3.5m の DO の差）を示す。

当初の目的である加圧力による高濃度酸素水発生装置で連続放流が可能であることを実証した。DO%の上昇幅は平均で約 12%，最大約 60%となった。室内で実施した基本特性把握実験では，放水口における高濃度酸素水の DO%は約 200%であり，バックグラウンド値を考慮すると放水口での上昇幅は 100%以上が想定される。本試験では，放水量が少なく放流した高濃度酸素水が速やかに拡散して放水口から 30cm 離れた位置では DO%が低下した。

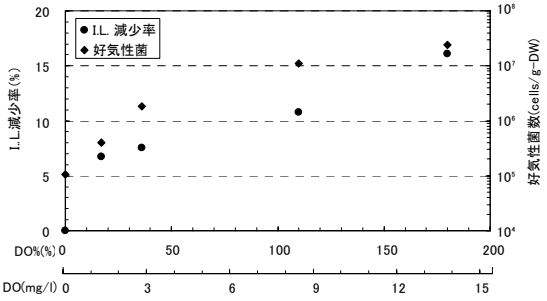


図－10　　海域実験における酸素飽和度の上昇幅
Fig.10 Time historical change of ⊿DO%

5.　酸素供給による底質改善効果

貧酸素水域への酸素供給による底質の改善効果を確認するため，海域の底泥を用いた室内実験を行った。

実験には三重県英虞湾立神地区の海域で採取した底泥を，DO の異なる条件のカラム（直径 10cm，高さ 6cm）に 21 日間にわたり曝露し，実験前後の底泥中の有機物量，微生物量などの変化から，酸素の供給が底質改善に与える効果を定量化した。図－11 に，原泥と実験終了時の強熱減量（I.L.）の差から算出した I.L.減少量と DO の関係と，底泥表層に生息する好気性菌数と DO の関係を示す。底泥中の有機物量は DO が高いほど I.L.減少量は増加し，底泥の酸化分解に必要な好気性菌は DO が高いほど多量となった。これは，酸素の供給により好気性菌の生息環境を維持することで，底泥の有機物の分解を促進できることを示している。また， DO が 1.5～3.5mg/l の範囲で好気性菌数の増加と強熱減量の減少（約 7%）が確認できたことから，水域の底質浄化に必要な最低 DO は 2mg/l 以上と考えられた。



図－11　DO と I.L.減少率，生菌数
Fig.11 The relation between DO%, I.L and bacteria quantity

6.　流動・水質解析と最適放流量の設計

水域規模に応じた高濃度酸素水発生装置の必要能力を設計するため，3 次元流動モデル DELFT3D-FLOW による数値シミュレーションで流速場を解析した。次に水質と底質の変化の相互作用を考慮した低次生態系モデルである DELFT3D-WAQ に流速場データを組み込んで解析を行い，高濃度酸素水の拡散状態を解析した。

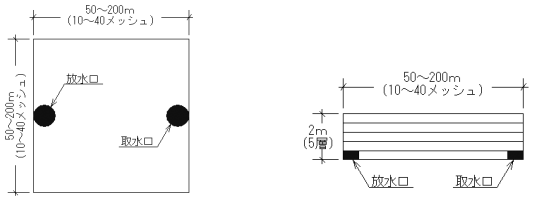
6.1　計算条件

数値解析の検討ケースと解析モデルを表－1，図－12 に示す。モデル水域は，0.25，1.4，6.25haの正方形の水域を想定し，いずれも水深 2mとして，水平メッシュ

5m，鉛直メッシュ 0.5m×5 層のモデルを設定した。モデル水域の一点から放水量とDOを変化させた高濃度酸素水を放流してDOの拡散状態を解析し，DOの改善可能な範囲を検討した。モデルは底層で酸素消費が，水面では再曝気が行われる条件とした。底泥の酸素消費速度は 1g −O2/㎡/dayとした[7]。また，高濃度酸素水を必要とする貧酸素の水域を想定し，水域全体のDOが2mg/lになっている状態を初期状態とした。

表－1　計算条件
Table 1 The precondition of simulation

水域面積	0.25ha，1ha	4ha，6.25ha
流量（㎥/min）	0.1~1.0	1.0~4.0
放流水の DO	100%（8.3mg/l），150%（12.5mg/l） 200%（16.6mg/l）	



（a）平面図　　（b）断面図

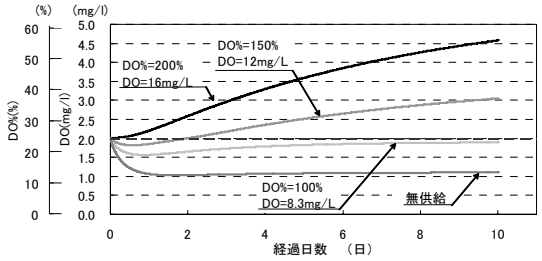
図－12　解析モデル
Fig.12 Model of the numerical simulation

6.2　水域の DO 改善効果

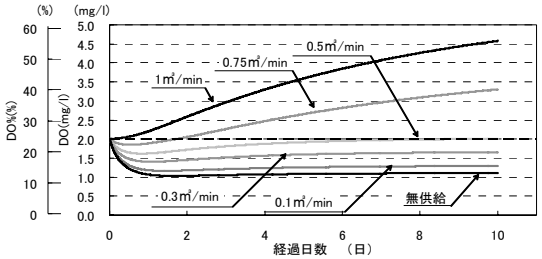
一例として，1ha の水域を対象とした場合の水域中心部最下層の DO 経時変化について，放流量 1 ㎥/min で DO を変化させた場合と，放流水の DO=12.4mg/l（DO%=150%）で放流量を変化させた場合の解析結果を図－13，図－14 に示す。

放流量 1 ㎥/min で放流水の DO を変化させた時，酸素の供給がない場合（無供給）と，従来法の限界である飽和濃度水 DO=8.3mg/l（DO%=100%）の場合では，底泥の酸素消費量が供給される酸素量を上回り，通水 10 日目でも底層の DO は 2mg/l 以下にとどまり，底質改善の効果がみられない。一方，過飽和の高濃度酸素水では，DO=12.4mg/l（DO%=150%）で放流 2 日後に好気性菌が生育可能な DO=2mg/l 以上まで上昇し，DO=16.5mg/l（DO%=200%）の放流ではさらに速やかに DO が上昇した（図－13）。

DO=12.4mg/l（DO%=150%）の高濃度酸素水を放流量を変化させて放流した場合，0.75 ㎥/min 以上の流量で水域の DO は 2mg/l を超過した（図－14）。この結果から 1ha の水域に高濃度酸素水を放流する場合，DO%=150%の放流量で 0.75 ㎥/min 以上が必要となることがわかる。同様の手法により，表－1 の各ケースについて DO の拡散状況を解析した。いずれのケースでも高濃度酸素水は，飽和濃度の水を放流する場合に比べ速やかに広範囲の水域の DO を上昇させることが可能であり，高濃度酸素水による酸素供給が，効率良く水域の貧酸素化を改善する効果が明らかになった。



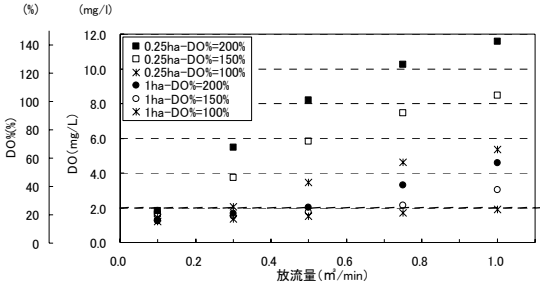
図－13　放流水の DO 経時変化（1ha，1 ㎥/min）
Fig. 13 Relations of the change of DO of discharge water and DO of a model（1ha，1 ㎥/min）



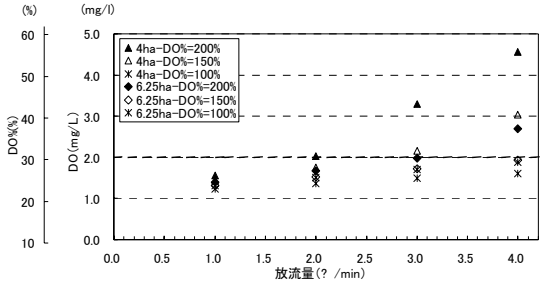
図－14　放流量と DO 改善の経時変化（1ha，DO%=150%）
Fig.14 Relations of the quantity of discharge water and DO of a model（1ha，1 ㎥/min）1ha，DO%=150%）

6.3　最適放流量の設計

解析結果をもとに，モデル水域に 10 日間連続放流を行った時の放流量と DO の改善効果を図－15，図－16 にまとめた。一例として，DO%=150%の場合，水域面積 1ha では 0.6 ㎥/min が最適放流量となり比較的小型のポンプ能力で DO 改善効果が得られることがわかる。また，いずれのケースでも，高濃度酸素水の放流は,従来法である飽和濃度水の放流に比べ，1.5 倍以上の能力を持ち，少ない放流量でより広範囲に酸素供給できることができることを明らかにした。



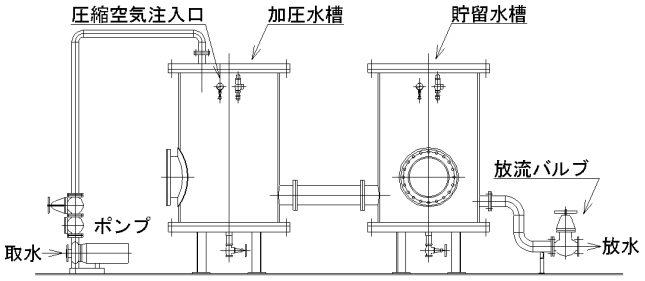
図－15　水域面積別の放流量と DO の関係（0.25 ha，1ha）
Fig.15　Quantity of discharge and DO（0.25 ha，1ha）



図－16　水域面積別の放流量と DO の関係（4ha，6.25ha）
Fig.16 Quantity of discharge and DO（4ha，6.25ha）

6.4　装置の設計

最適放流量の検討結果から，1 ㎥/min を持つ装置の実設計を行った。装置は貧酸素水を取水するポンプ，取水した水と加圧した圧縮空気を混合する加圧水槽，安定放流を行う貯留水槽，圧縮空気を送風するコンプレッサーで構成し，2MPa の圧縮空気の加圧力で DO%=200%の高濃度酸素水を放流する。図－17 に装置断面図を示す。



図－17　装置断面図
Fig.17 Cross section of the system.

7.　おわりに

高濃度酸素水を利用した水質浄化システムについて，結果を以下にまとめる。

①室内実験の結果から，生成する高濃度酸素水は 200%程度の酸素を含む過飽和の状態を維持した。

②海域実証試験から加圧力を利用した高濃度酸素水発生装置の実海域での適用性を実証した。

③室内実験の結果から，有機物による汚濁が進行した底泥への酸素供給により，酸化分解を行う好気性菌が多量に生育可能となり，DO が多いほど菌数が増加し，同時に底質中の有機物量が減少した。

④数値解析の結果，高濃度酸素水は従来法である飽和濃度水の放流に比べ，1.5 倍以上広範囲の水域の水質改善が可能である。

⑤数値解析により 0.25~6.25ha の水域を対象とした高濃度酸素水発生装置の最適放流量を設計し，実用レベルの装置（1 ㎥/min）の試設計を完了した。

謝辞

現地実験にあたり，原条晃氏，原条誠也氏，芙蓉海洋開発㈱から多大な協力を得ました。各位に謝意を表します。本研究は，三重県地域結集型共同研究事業の一部で実施した研究の一部である。

参考文献

1) 依田憲彦・島谷幸宏・中村圭吾，循環による底泥酸化処理技術の開発，土木学会第 53 回年講概要集，1998
2) 門田元・多賀信夫，海洋微生物研究，学会出版センター，1985
3) 佐々木淳・小出摩耶子・長田正行・柴山知也・磯部雅彦，三番瀬における微細気泡発生装置を用いた青潮改善効果の数値的検討，海工論文集，第 50 巻，2003
4) 田中宏明，水域の底層環境とその改善，HEDRO，NO．95，2006
5) 片倉徳男・上野成三・大谷英夫，酸素飽和度 200%の高濃度酸素水を発生する装置の開発，海工論文集，第 52 巻，2005
6) 片倉徳男・村上和男・高山百合子・上野成三，酸素飽和度 200%の高濃度酸素水発生装置を利用した底質浄化効果と最適放流量の設計方法，海工論文集，第 53 巻，2006
7) 横山長之，海洋環境シミュレーション，白亜書房，1993