

酸素飽和度200%の高濃度酸素水を発生する装置の開発

片倉徳男*・上野成三**・大谷英夫**

内湾や湖沼の水質改善手法として、貧酸素化が顕著な水域の底層付近に酸素を供給して溶存酸素量を増加させる方法が用いられている。そこで、加圧下において大気圧での飽和量以上に酸素を溶存させ、気泡をほとんど含まず、かつ、溶存酸素が飽和酸素量以上に含まれる「高濃度酸素水」の発生装置を開発し、貧酸素水域に効率よく酸素を供給するシステムの確立を目指した。本研究では、バッチ式及び連続式の高濃度酸素水発生装置を製作し、室内実験により溶存酸素量を増大させる改良を加えた上で基本性能を評価した。さらに、連続式の装置を用いた実海域実証試験を行い、本装置による貧酸素水域の改善効果を検証した。

1. はじめに

内湾や湖沼の水質改善手法として、貧酸素環境になりやすい水域の底層付近に酸素を供給して、溶存酸素量を増加させる方法が用いられている。従来型の酸素供給方法は、水中での曝気法、揚水した水を曝気して再び底層付近に放水する方法（依田ら, 1998）、微細気泡を水流で底層付近に供給する方法などがある（佐々木ら, 2003; 平野, 1998）。いずれの方法も、溶存可能な酸素量は飽和酸素量が限度であることから、酸素供給効率に限界があること、微細気泡により懸濁物質や海底面上の浮泥が浮上することなどの問題がある。一方、理論的に高圧下では大気圧での飽和量以上に酸素が溶存し、過飽和の高濃度酸素水を発生させることが可能である。そこで、溶存酸素量が飽和酸素量以上（過飽和）に含まれ、かつ気泡の発生量が少ない「高濃度酸素水」を水中で拡散させて酸素を供給する方法が、貧酸素水域の改善に効果的であると考えた。

本研究では、室内実験から高濃度酸素水の基本特性を把握した。次に、連続的に飽和酸素量以上の酸素が溶解した高濃度酸素水を製造・放水できる小型実験装置を開発し、室内及び実海域で装置の性能評価を行い、高濃度酸素水の貧酸素水域での利用の可能性について検討した。

2. 装置の基本原

高濃度酸素水を発生させるための基本的な装置の原理を図-1に示す。水域から揚水した水に加圧水槽内で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、放水時の圧力差で発生する気泡の量を低減するために、一時的な貯留水槽を設けて加圧水槽で発生する大型の気泡を除去し

て、極力、気泡を含まない過飽和の状態で水域に放水する。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、空気のみを使用した。

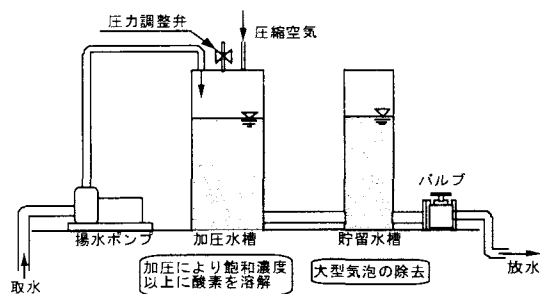


図-1 原理図

3. 高濃度酸素水の基本特性把握実験

バッチ式で高濃度酸素水を生成する耐圧性の装置を使用し、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。また、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。

(1) バッチ式装置における DO と圧力の関係

写真-1 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。実験は水槽に給水口から水道水を入れて密閉した後に圧縮空気容器内部を0.1~0.4 MPaの範囲で加圧し、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）で酸素飽和度（DO%）を計測した。

* 正 会 員 大成建設㈱技術センター土木技術研究所
** 正 会 員 工 修 大成建設㈱技術センター土木技術研究所

図-2 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装置から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。しかし、気泡化するガスは過飽和分の一部であり、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、0.2 MPa 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。

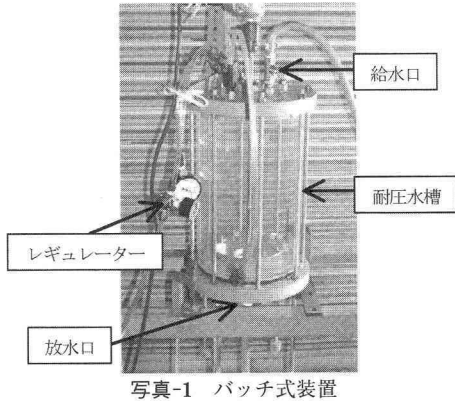


写真-1 バッチ式装置

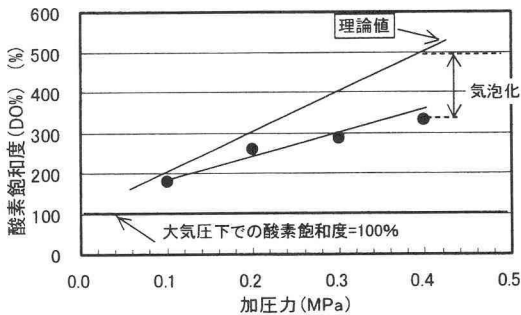


図-2 バッチ式装置による加圧力と酸素飽和度(%)

(2) 連続式装置における DO と圧力の関係

a) 装置概要

写真-2 に連続式装置を示す。装置は70 L 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で抜けることが予測されたため、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

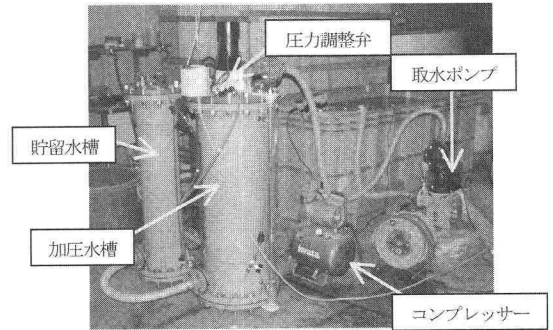


写真-2 連続式装置

整弁を設置した。

b) 実験方法

連続式装置を用い、加圧力を0.1~0.4 MPa、放水量を25 l/min~65 l/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%)をハンディ DO メーターで計測した。実験では気泡を水域へ放水せず、連続して高濃度酸素水を生成する機構を確立するため、貯留水槽の有無による気泡の抑制効果についても検証した。

c) 加圧力と酸素飽和度

図-3 に加圧力と放水中の DO% について貯留水槽の有無で比較した結果を示す。貯留水槽が無い場合、大気圧下に放水された時点で、溶存した酸素が気泡化して大量に抜けるため、加圧力に関わらず酸素飽和度は約150%となり理論値を下回った。また、理論値と放水中の DO% の差は加圧力に比例して増加した。一方、貯留水槽を設置することで放水中の DO% は貯留水槽が無い場合に比べ高くなり、0.2 MPa の加圧で200%を越える酸素飽和度となり、貯留水槽が気泡化抑制に効果があることを確認した。しかし、貯留水槽を備えた条件でも0.3 MPa 以上の加圧では気泡化量が増加し、過飽和の状態を維持しているものの DO% は低くなる傾向を示した。この結果、連続式装置は0.1~0.4 MPa の加圧で、酸素飽和度の2倍程度(酸素飽和度約190~220%)の高酸素水を生成できた。

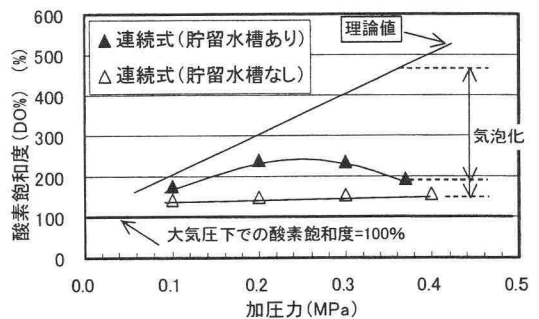


図-3 連続式装置による加圧力と酸素飽和度(%)

d) 流量と酸素飽和度

0.1, 0.2 MPa の加圧条件で, 貯留水槽を設置し放水量を 25 l/min~65 l/min に変化させた場合の放水流量と放水時の DO% を調査した. 流量が 60 l/min を超えると気泡量が増加し, DO% が低下する傾向を示すが, 実験の放水量範囲では 0.1 MPa の加圧で約 170~200%, 0.2 MPa の加圧で約 220~240% と DO% は 200% を超過した. (図-4)

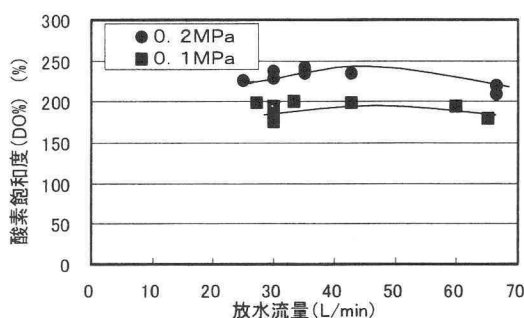


図-4 連続式装置による放水量と酸素飽和度 (%)

(3) 高濃度酸素水の発生効率の最適加圧条件

写真-3 はバッチ式装置で 0.1 MPa, 0.35 MPa 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. 加圧下で溶解したガスは放水と同時に大気圧下へおかれるため, 過剰分が気泡化して白濁する. 気泡の発生量は加圧力が高いほど多量であるが, 放水直後に発生した気泡は浮上して, 容器内の透明度が増している. 基本特性把握実験では, いずれも酸素飽和度の計測を気泡が消失した時点で行っているが, 前述のとおり, 気泡が消失しても飽和濃度を大きく上回り, 加圧条件で水中に溶解した過飽和のガスは, 速やかに全量が気泡化するのではなく, 水中に維持できる特性があることを確認した.

図-5 にバッチ式装置及び連続式装置で放水された高濃度酸素水の酸素飽和度を各加圧力下における理論上の

飽和度で除した, 酸素残存率を示す. 理論値ではいずれの加圧力においても酸素残存率は 100% になるが, 連続式装置, バッチ式装置ともに加圧力が高まるほど, 過飽和分の気泡化により酸素残存率が低下した.

酸素残存率はバッチ式装置が最も高く, 0.4 MPa の加圧力でも理論値の約 65% の酸素が残存した. 連続式装置では貯留水槽を設置した場合, 0.2 MPa で理論値に対して約 80% の酸素残存率となるが, 貯留水槽がないと 0.2 MPa で約 50% まで酸素残存率は低下し, 貯留水槽の設置が酸素残存率を高めることに効果的であることを確認した. しかし, 連続式装置では加圧力が 0.3 MPa を超過すると酸素残存率が 50% 以下となり, 酸素飽和度は過飽和であるものの写真-3 に示したように気泡化により残存率が大きく低下した.

以上の結果から, 連続式装置の加圧力の最適条件として, 酸素飽和度 200% 以上の高濃度酸素水を放水可能であった 0.2 MPa と設定した.

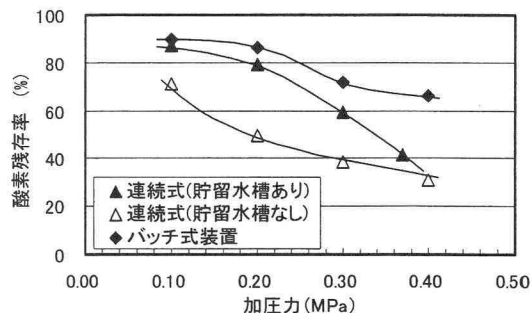


図-5 加圧力と酸素残存率

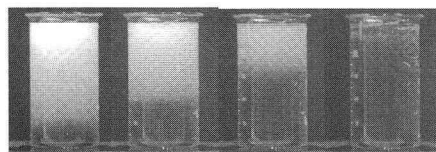
4. 海域実証試験

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働実験を行った. 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働状況の確認を目的とした.

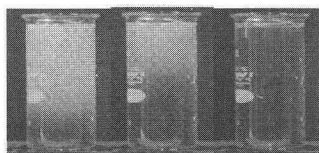
(1) 概要

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る. 現地周辺は, 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-6 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 5 m 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 30 m 離れた海底面直上から高濃度酸素水を放水した. また, 放水された高濃度酸素水の水平方向への拡散を抑制するため, 放水口から下流方向に高さ 50 cm の仕切壁を設け, 仕切壁の内側を域内, 外側を域外



0.3MPa→20秒 → 40秒 → 60秒 → 100秒



0.1MPa→20秒 → 40秒 → 60秒

写真-3 放水後の気泡発生量の変化

とした。写真-4、図-7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0.2 MPaに設定し、40 l/minの流量で放水した。

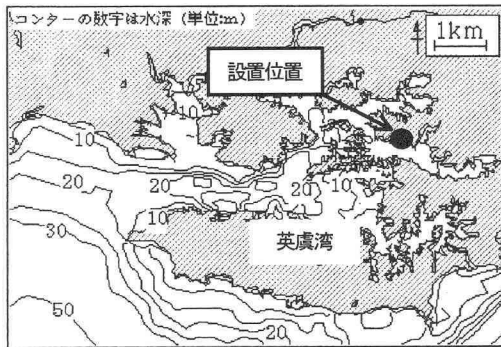


図-6 実験位置

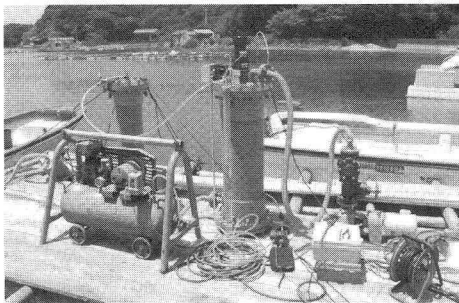


写真-4 装置配置状況

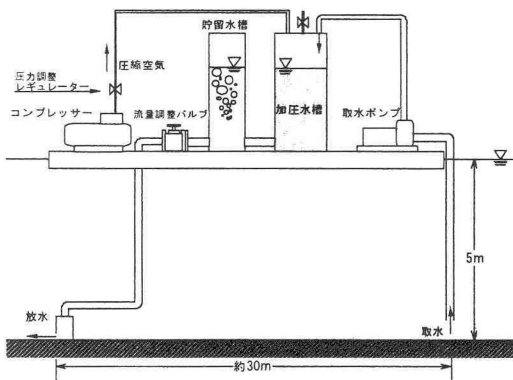


図-7 実証試験概要図

(2) 計測方法及び計測位置

高濃度酸素水の拡散状態と性能評価を目的として、放水口から30 cmとバックグラウンドとして3.5 mの海底面から10 cmの位置に小型メモリー DO 計(アレック電子 Compact-DOW)を設置し、酸素飽和度(DO%)の連続計測を行った。また、放水口から3.5 mの範囲で、海底面から10 cm, 60 cmの高さで、ハンディ DO メーター(YSI Model 550A)により溶存酸素量(DO)を計測した。DOの計測位置を図-8に示す。

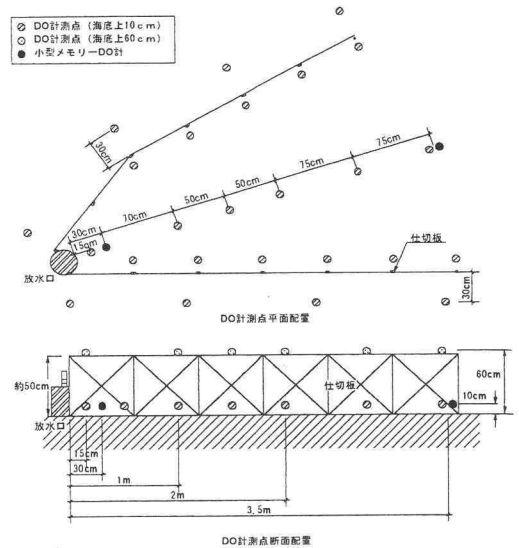


図-8 計測位置

(3) 計測結果

a) 連続計測結果

図-9に、小型メモリー DO 計により、放水口から3.5 mに設置した計測値をバックグラウンド値として、放水口から30 cmの位置で酸素飽和度(DO%)を連続計測した場合の、DO%の上昇幅の経時変化を示す。

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から、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、放水量が少ないため放流した高濃度酸素水が速やかに拡散して放水口から30 cm離れた位置ではDO%が低下したが、本方式による酸素の供給が可能であることを確認した。

b) 高濃度酸素水拡散状況

連続式装置から放水する高濃度酸素水の拡散状況を調査するため仕切壁内外(域内・域外)の測点で酸素飽和

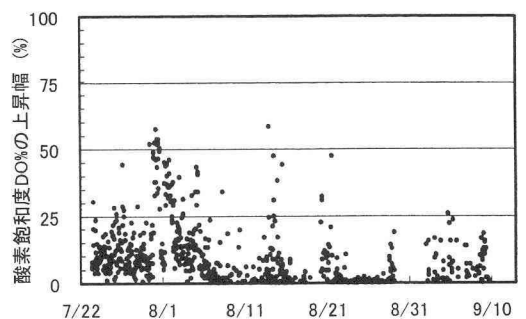


図-9 海域実験における酸素飽和度の上昇幅

度 (DO%) を計測した。図-10 に測定の放水口からの距離と、各測点における海底面直上 (10 cm) と海底面から 60 cm 上方の DO% の上昇幅を示す。ここでは、域外で計測された DO% の平均値をバックグラウンドとして、各測点とバックグラウンドとの DO% の差を上昇幅とした。調査は各測点で、ハンディ DO メーターを用いて計測した。計測は海域の溶存酸素量 (DO) が通常レベルである時期 (2004 年 8 月 4 日) と、極端に貧酸素化した時期 (2004 年 8 月 24 日) に行った。

海域が通常の DO の場合、バックグラウンドとした域外の DO% が約 50% (4 mg/l, 約 26°C) であるのに対して、放水口から 20 cm の海底面直上で上昇幅は約 60%, 60 cm 離れた位置で約 30% となり、高濃度酸素水が海底面に沿って拡散することを確認した。また、海底面から約 60 cm 上方でも放水口から 60 cm 離れた距離で約 25% 高くなっていることから、高濃度酸素水が上方にも拡散した。

海域が極端に貧酸素化している場合、バックグラウンドとした域外の DO% は約 5% (0.4 mg/l) に満たないレベルであった。このとき、放流口から 15 cm の距離では海底面直上で上昇幅が 120% となったが、30 cm の距離ではバックグラウンドと同レベルまで低下した。しかし、海底面から 60 cm 上方では、放水口から 1.2 m の距離までが 10% 上昇した。これは、高濃度酸素水が放水口より拡散するものの、海底面に近いほど溶存酸素濃度が低く、供給された酸素が海底面に近いほど速やかに消費されたためと考えられる。

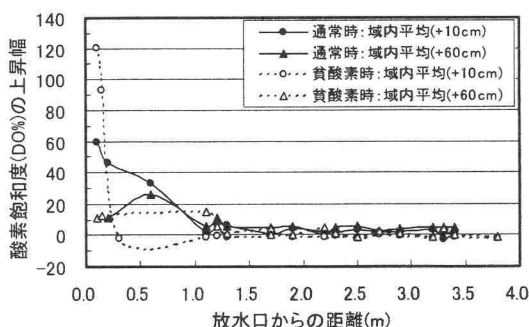


図-10 放水口からの距離と酸素飽和度上昇幅(通常時)

c) 放水状況

写真-5 に水中撮影した高濃度酸素水を放水している放水口の状況を示す。貯留水槽の設置により発生する気泡を減少させ、さらに水深約 5 m の場所で放流するため約 0.05 MPa の水圧がかかり、放水した高濃度酸素水は目視で確認できる気泡を含まなかった。このため、気泡による底質表面に堆積する浮泥の浮上は確認されなかった。



写真-5 無気泡状態で放水される高濃度酸素水

d) 海域実証試験における稼動状況

7 週間にわたる海域実証試験を通して、塩分付着による電磁弁の一時的な不良と、魚類による取水口の閉塞が 2 回生じ、空気の大量混入により放水管が浮上した。これを除き、装置は連続稼動した。

5. 結 論

本研究は酸素を溶解させた高濃度酸素水を貧酸素水域の改善へ利用するため、加圧下で生成する高濃度酸素水の基本特性の把握、連続的に高濃度酸素水が放流可能な装置開発と実海域での性能評価を行った。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圧縮空気を利用して生成した高濃度酸素水は、気泡を含まない状態でありながら過飽和の酸素を含む。加圧力が高いほど溶存酸素量は増加するが気泡化量も増加し、0.2MPa が適正な加圧力であった。
- ③海域実証試験から、流量約 40 l/min の放水量で海底面に沿って、放水口から 0.6 m の範囲の DO% が約 25% 上昇し本装置の現地適用性が実証できた。

以上から、DO200% の高濃度酸素水発生装置の基本性能と実海域での適用性を確認した。

今後は、対象水域の規模と水質に応じた装置の諸元と効果の最適化について検討を行う予定である。

謝辞: 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。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た。ここに謝意を表す。

参 考 文 献

- 佐々木淳・小出摩耶子・長田正行・柴山知也・磯部雅彦 (2003) : 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, pp. 981-985.
- 平野敏行 (1998) : 沿岸の環境圏, pp. 1296-1301.
- 依田彦彦・島谷幸宏・中村圭吾 (1998) : 水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, pp. 524-525.