

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

片倉徳男¹・村上和男²・高山百合子³・上野成三⁴

貧酸素化が顕著な水域では、水域環境の改善手法として底層付近に酸素を供給し、好気的な環境を維持する方法が用いられている。その手法として、加圧条件下で溶存酸素が飽和酸素量を超える酸素飽和度 200 % 以上までが達成できる「高濃度酸素水発生装置」を開発し、現地実験により装置の有効性を既に実証している。本研究では、高濃度酸素水発生装置の実用レベルの設計方法を確立するため、底質の有機物量、微生物に着目した室内実験により底質改善効果を検討し、水域の底質浄化に必要な溶存酸素 DO のレベルを明らかにした。さらに、スケールの異なる規模を対象とした流動・水質数値解析により水域規模に応じた最適放流量の設計諸元を明らかにし、実用レベルの装置の試設計を完了した。

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により、水域環境の悪化が継続している。このような水域環境では、堆積した有機物の酸化分解により発生する貧酸素化が問題であり、水質改善手法の一つ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、底質に沈降・堆積する有機物を分解する好気性の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(田中, 2006)。酸素供給の方法としては、水中で曝気を行う方法(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(平野, 1998; 佐々木ら, 2003)。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、酸素の供給により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。これに対して、筆者らは、溶存酸素量が飽和濃度以上の過飽和状態(DO % = 200 %)を達成できる高濃度酸素水の発生装置を開発し、現地実験により本装置の有効性を実証している(片倉ら, 2005)。しかし、高濃度酸素水発生装置の水域利用にあたり、酸素供給による底質浄化に必要な DO レベルと、水域全体への酸素供給量が不明であるため、これらを明らかにした上で、最適な装置の設計が可能となる。本研究では、高濃度酸素水発生装置の実用レベルの設計方法を確立するため、室内実験により底質中に生息

する微生物量を指標とした底質浄化に必要な DO レベルを明らかにしたうえで、スケール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、最適放流量の諸元を明らかにし、装置の試設計を行った。

2. DO に対する底質改善効果に関する室内実験

(1) 実験概要

三重県英虞湾立神地区の海域で採取した底泥を、DO の異なる条件に 21 日間にわたり曝露した。実験では DO の連続計測を行うとともに、実験前後の底泥中の有機物量、微生物量などを分析し、酸素の供給が底質改善に与える効果を定量化した。

(2) 実験条件

DO % が異なる水に底泥を曝露するため、表-1 に示す 4 種類の実験条件を設定した。実験区 1, 2 は高濃度酸素水を循環して過飽和(DO % = 180 %)の状態を維持する実験区と、曝気により飽和濃度(DO % = 100 %)を維持する実験区である。実験区 3, 4 は飽和濃度以下の環境とするため、底泥を敷いたカラムに使用時に製造した高濃度酸素水(DO % = 180 %)と飽和酸素水(DO % = 100 %)の 2 種類の水を満たして密閉した。この実験区は酸化分解により DO が減少し飽和濃度以下の環境となる。

表-1 実験条件

実験区名称	条 件
実験区 1	過飽和(高濃度酸素水曝露) + 循環
実験区 2	曝気(飽和濃度水曝露) + 循環
実験区 3	高濃度酸素水密閉 + 静置
実験区 4	飽和濃度水密閉 + 静置

(3) 実験装置

実験区 1, 2 は 2 台の水槽(0.5m³ × 2 台)を使用し、底泥の有機物、微生物量の変化を評価するために底泥を

1 正 会 員 大成建設技術センター主任研究員
2 フェロー 工博 武蔵工業大学教授工学部都市基盤工学科
3 正 会 員 大成建設技術センター研究員
4 正 会 員 工修 大成建設技術センターチームリーダー

充填したバット (18 × 20 cm) と、酸化層の状態を観察するために底泥を充填したカラム (直径 10 cm, 高さ 6 cm) を設置した。バットには 500 g の底泥を厚さ 1.5 cm, カラムには 3 cm の厚さで底泥を敷設した。図-1 に実験区 1, 2 の実験装置の概要を、写真-1(a) に底泥を充填したバットおよびカラムを示す。

実験区 3, 4 は、カラム (直径 10 cm, 高さ 8 cm) に底泥を 3 cm の厚さに敷き、高濃度酸素水、飽和酸素水で満たし、外部から空気が混入しないように密閉した。写真-1(b) に密閉したカラムを示す。

実験には海域の底泥を使用するため、水道水に 3 % 相当の NaCl を加えた塩水を使用した。

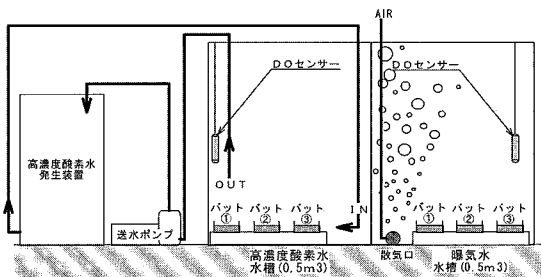
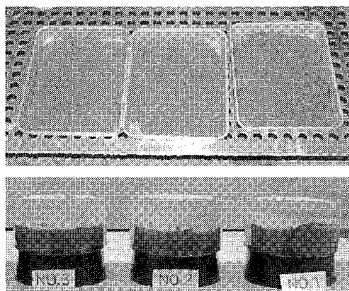
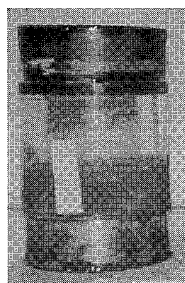


図-1 装置概要図



(a) バットおよびカラム
(実験区 1, 2)



(b) カラム
(実験区 3, 4)

写真-1 実験状況

(4) 計測・分析方法

水槽とカラムの DO 計測を行い、底質と底質中の微生物および水質を分析した。表-2 に分析項目を示す。

DO は実験区 1, 2 では小型メモリー DO 計 (Compact-DOW) による連続計測を、実験区 3, 4 では実験開始時と終了時にハンディ DO メーター (YSI Model 550A) で計測した。底質は実験終了時に、表層の変色した約 3~5 mm の酸化層と変色のみられない底層の試料を採取して分析に供した。なお、酸化層厚を 3~7 日毎に目視計測した。微生物のうち、微生物の全数を計測する全菌数を、菌体の核酸を染色する DAPI 溶液を用いた直接計数法で、増殖可能な微生物を計測する生菌数

表-2 分析項目

項目	計測・分析項目
DO	小型メモリー DO 計による連続計測 ハンディ DO メーターによる計測
底質	含水比, 強熱減量, 酸化層, pH, ORP, TN, TP, TS
微生物	全菌数, 生菌数 (好気・嫌気性)
水質	pH, TOC, TN, TP, NO ₃ , NH ₄ , PO ₄ , SO ₄

表-3 培養条件

項目	好気性菌	嫌気性菌
培地名称	CGY 培地	GAM ブイヨン medium
培養温度	20℃	
培養日数	14 日	

は好気性菌と嫌気性菌をそれぞれ MPN 法で計数した (海洋微生物研究法, 1985)。表-3 に生菌数計数の培養条件を示す。水質は、実験区 1, 2 では実験開始から 1, 2, 7, 21 日後に水槽内の水を、実験区 3, 4 では実験終了時に開封したカラム内の水を採取して、表-2 に示す項目を計測した。

(5) 実験結果

a) DO の変化

表-4 に実験区 1, 2 の DO (実験期間中の平均値) と、実験区 3, 4 の実験終了時の DO を示す。実験区 1 の平均 DO は 14.1 mg/l (DO % = 180 %), 実験区 2 の平均 DO は 8.8 mg/l (DO % = 110 %) を維持した。密閉カラムを用いた実験区 3 は、充填時に 14.1 mg/l (DO % = 180 %) の DO が終了時には 2.9 mg/l (DO % = 36 %) に、実験区 4 は 8.8 mg/l (DO % = 110 %) の DO が 1.5 mg/l (DO % = 17 %) まで減少し、その減少量は実験区 3 で 11.2 mg/l, 実験区 4 で 7.3 mg/l となった。この DO の減少は、微生物による有機物の酸化分解によるもので、充填時の DO が高いほど酸素の消費量が多い。これは、実験区 3 は実験区 4 に比べ充填時の溶存酸素が多いため酸化分解を活発に行う好気性菌が多量に生息する環境を維持したためである。

表-4 DO の変化件

項目	実験区 1 (実験期間中の平均 DO)	実験区 2 (実験期間中の平均 DO)	実験区 3 (終了時の DO)	実験区 4 (終了時の DO)
DO(%)	180	110	36	17
DO(mg/l)	14.1	8.8	2.9	1.5

b) 底泥中の有機物量の変化

底泥中の有機物量の指標として、実験開始時の原泥と各実験区の実験終了時の強熱減量 I.L. を図-2 に示す。各実験区とも原泥に比べ I.L. が減少しているが、DO が高いほど底泥表層の I.L. 減少量は多く、実験区 1 で 12.8 % まで約 2.4 %, 実験区 2 でも 13.5 % まで約 1.7

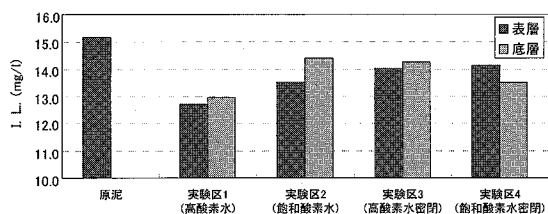


図-2 底泥中の有機物量 (強熱減量)

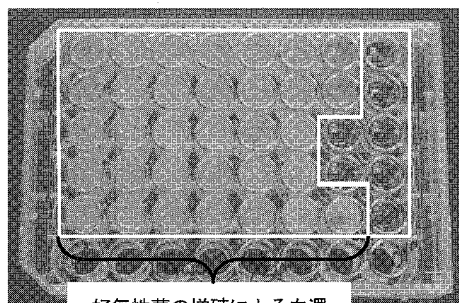
%減少した。酸化層より底層でも実験区1では強熱減量の減少が確認され、底質中の有機物量の除去に酸素の供給が有効であることが明らかとなった。

c) 底泥中の微生物

底泥中の微生物量として全菌数の計数結果を図-3に、好気・嫌気性菌 (生菌数) の計数結果を図-4に示す。

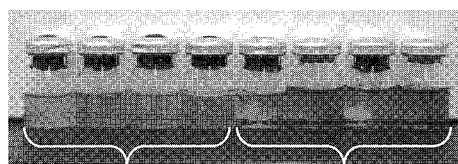
全菌数は、DOの低い実験区3、4では原泥の約3倍の菌数であるが、実験区1、2では原泥の4~5倍の菌数が計数された。

好気・嫌気性菌は、写真-2、写真-3に示すように、菌の増殖により培養プレート、培養瓶中の培養液は濁りが生じた。好気・嫌気性菌のうち、酸素を必要としない嫌気性菌はいずれの実験区も原泥の1~2倍であり増減がほとんど見られない。しかし、酸素を必要とし有機物の酸化分解を行う好気性菌は、密閉カラムを用いた実験区3、実験区4が約4~20倍程度あるのに対し、実験区1で200倍以上、実験区2でも100倍以上となり、DOが高いほど大幅に増加した。



好気性菌の増殖による白濁

写真-2 培養プレートにおける好気性菌の増殖



嫌気性菌の増殖による白濁 嫌気性菌非出現

写真-3 培養瓶における嫌気性菌の増殖

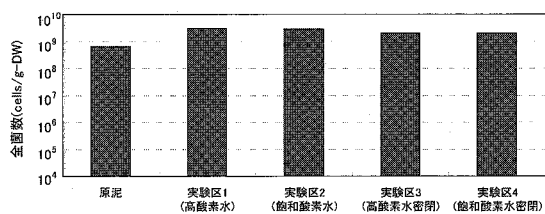


図-3 全菌数

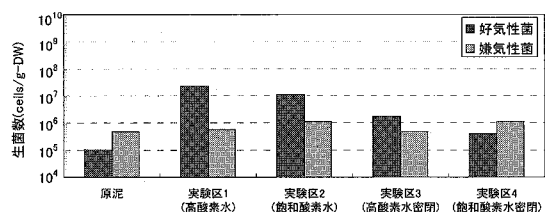


図-4 好気性・嫌気性菌数

d) 水質の変化

図-5に実験開始時と終了時のTP(全リン)の増減量から算出した溶出量を示す。DOが高い実験区1、2では底泥への吸着・沈降により水中のリン濃度が減少したが、DOが低い実験区3、4では溶出し、酸素の供給が底質からの栄養塩の溶出を抑制する効果があることを確認した。

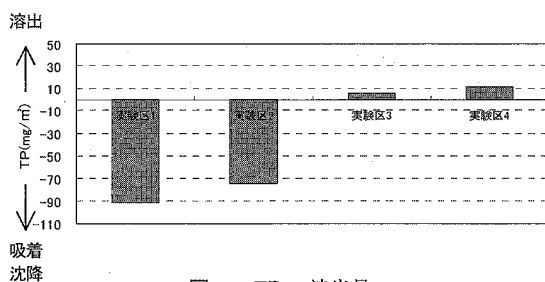


図-5 TPの溶出量

e) DOと底質改善効果

図-6に、原泥と実験終了時のI.L.の差から算出したI.L.減少量とDOの関係と、生菌数とDOの関係を示す。底泥中の有機物量はDOが高いほどI.L.減少量が増加して底泥から有機物が除去され、DOと細菌数の関係から嫌気性菌はDOに依存しないが、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。このことから、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が明らかとなった。また、好気性菌数はDOに依存するため、酸素供給による底質の改善には好気性菌が生息可能なレベルまでDOを上昇させる必要がある。本実験ではDOが1.5~3.5 mg/lの範囲で好気性菌数の明確な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2 mg/l以上と考えられる。

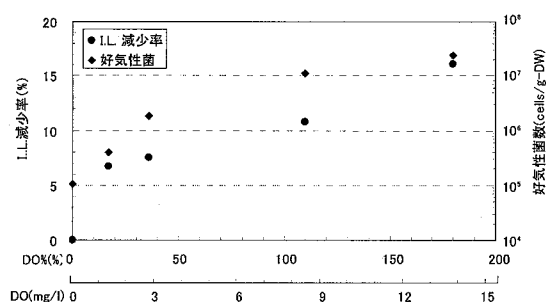


図-6 DO と IL 減少率, 生菌数

3. 流動・水質解析と最適放流量の設計

(1) 概 要

池や湖沼等の閉鎖性の水域を対象として, 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 (Delft Hydraulics, 2005a, 2005b)。

(2) 計算条件

数値解析の検討ケースと解析モデルを表-5, 図-7 に示す。モデル水域は, 0.25, 1, 4, 6.25 ha の正方形の水域を想定し, いずれも水深 2 m として, 水平メッシュ 5 m, 鉛直メッシュ 0.5 m × 5 層のモデルを設定した。モデル水域の一点から放流量と DO を変化させた条件で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 $1 \text{ g-O}_2/\text{m}^2/\text{day}$ とした (横山, 1993)。

表-5 計算条件

水域面積	0.25ha, 1ha	4ha, 6.25ha
流量 (m^3/min)	0.1, 0.3, 0.5, 0.75, 1	1~4
放流水の DC	100 % (8.3mg/l), 150 % (12.5 mg/l) 200 % (16.6mg/l)	

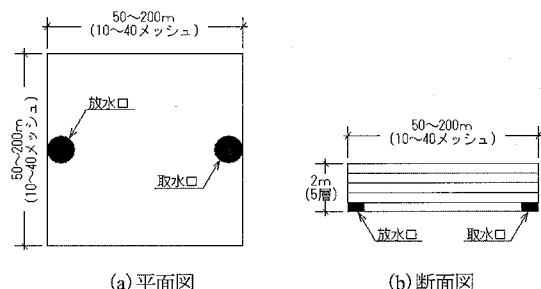


図-7 解析モデル

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 2 mg/l になっている状態を初期値とした。

(3) 水域の DO 改善効果

一例として, 1 ha 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 $1 \text{ m}^3/\text{min}$ で DO を変化させた場合と, 放流水の $\text{DO}=12.4 \text{ mg/l}$ ($\text{DO} \% = 150 \%$) で放流量を変化させた場合の解析結果を図-8, 図-9 に示す。

放流量 $1 \text{ m}^3/\text{min}$ 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 $\text{DO}=8.3 \text{ mg/l}$ ($\text{DO} \% = 100 \%$) の場合, 底泥の酸素消費量が供給される酸素量を上回るため, 通水 10 日目でも底層の DO は 2 mg/l 以下にとどまった。一方, 過飽和の高濃度酸素水では, $\text{DO}=12.4 \text{ mg/l}$ ($\text{DO} \% = 150 \%$) で放流 2 日後に好気性菌が生育可能な $\text{DO}=2 \text{ mg/l}$ 以上まで上昇し, $\text{DO}=16.5 \text{ mg/l}$ ($\text{DO} \% = 200 \%$) の放流ではさらに速やかに DO が上昇した (図-8)。

$\text{DO}=12.4 \text{ mg/l}$ ($\text{DO} \% = 150 \%$) の高濃度酸素水を放流量を変化させて放流した時, $0.75 \text{ m}^3/\text{min}$ 以上の流量で水域の DO は 2 mg/l を超過した (図-9)。この結果から 1 ha の水域に高濃度酸素水を放流する場合, $\text{DO} \% = 150 \%$ の放流量で $0.75 \text{ m}^3/\text{min}$ 以上が必要となることがわかる。

同様の手法により, 表-5 の各検討ケースについて 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, 飽和濃度水を放流する場合に比べ速やかに広

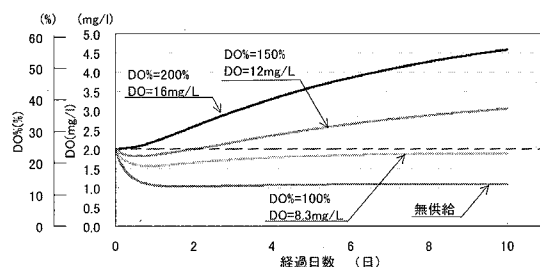


図-8 放流水の DO と DO 改善の経時変化 (1ha, $1 \text{ m}^3/\text{min}$)

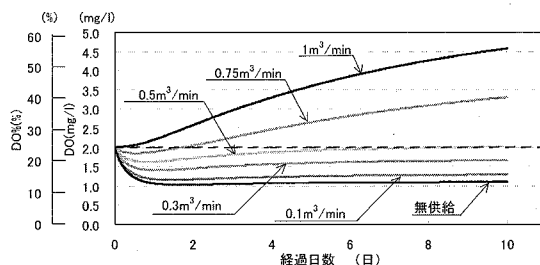


図-9 放流量と DO 改善の経時変化 (1ha, $\text{DO} \% = 150 \%$)

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。

(4) 最適放流量の設計

解析結果をもとに、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-10、図-11にまとめた。

一例として、DO% = 150%の場合、水域面積1haでは放流量0.6 m³/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。この方法により、水域面積に応じた最適放流量を設計することが可能となった。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倍以上の能力を持つことが明らかになった。

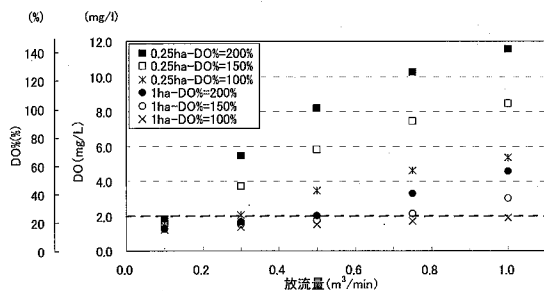


図-10 水域面積別の放流量とDOの関係(0.25ha, 1ha)

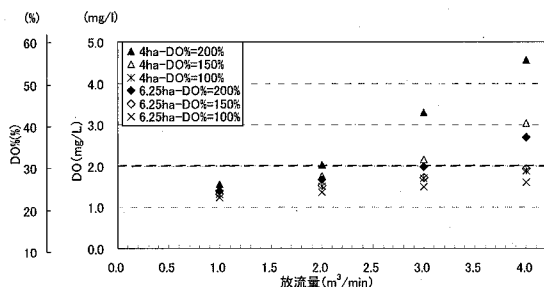


図-11 水域面積別の放流量とDOの関係(4ha, 6.25ha)

(5) 装置の設計

最適放流量の検討結果から、放水量1 m³/minの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、

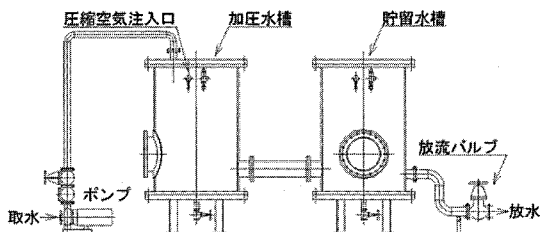


図-12 装置断面図

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、2 MPaの圧縮空気の加圧力を維持してDO% = 200%の高濃度酸素水を放流する。図-12に装置断面図を示す。

4. 結 論

本研究は高濃度酸素水発生装置の実用レベルの設計方法を確立するため、室内実験による底質浄化効果の検討、数値解析による水域規模に応じた最適放流量の設計を行い、実用レベルの装置の設計を完了した。結果を以下にまとめる。

- ①室内実験の結果から、有機物による汚濁が進行した底泥に酸素を供給することで、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。
- ②本実験に使用した底泥の場合、水域の底質浄化に必要な最低DOのレベルは、2 mg/l以上であった。
- ③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。
- ④数値解析により0.25～6.25 ha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 m³/min)の試設計を完了した。

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された。また、実験にあたり、大成サービス㈱から多大な協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 依田憲彦・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。
 片倉徳男・上野成三・大谷英夫(2005)：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，pp. 1116-1120。
 門田元・多賀信夫(1985)：海洋微生物研究法，学会出版センター，pp. 37-52。
 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。
 田中宏明(2006)：水域の底層環境とその改善，HEDRO, NO. 95, pp. 17-25。
 平野敏行(1998)：沿岸の環境圏，pp. 1116-1120. pp. 1296-1301。
 横山長之(1993)：海洋環境シミュレーション，白亜書房，201 p。
 Delft Hydraulics (2005a)：Delft3D-FLOW, user Manual, version 3.12。
 Delft Hydraulics (2005b)：Delft3D-WAQ, user Manual, version 4.01。