TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

流体シミュレーションを用いた貧酸素水塊改善装置の効果検証

メタデータ	言語: Japanese
	出版者:
	公開日: 2011-12-19
	キーワード (Ja):
	キーワード (En):
	作成者: 遠矢, 亮 , 小島, 諒子, 石丸, 隆, 賞雅, 寛而
	メールアドレス:
	所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/394

Journal of the Tokyo University of Marine Science and Technology, Vol. 6, pp. 87-93, 2010

流体シミュレーションを用いた貧酸素水塊改善装置の効果検証

遠矢　亮[*1]・小島　諒子[*1]・石丸　隆[*2]・賞雅　寛而[*3]

（Accepted November 27, 2009）

Verification of Improving Hypoxia Apparatuses Effect by Computational Fluid Dynamics

Ryo TOYA[*1], Ryoko KOJIMA[*1], Takashi ISHIMARU[*2] and Tomoji TAKAMASA[*3]

Abstract: We conducted experiments using a Solar-Sea-Oasis (SSO) and a microbubble generator (MB) to improve hypoxic condition at mooring place in Tokyo University of Marine Science and Technology. We looked into effects of these apparatuses by computational fluid dynamics (CFD). When we operated SSO, the effect of dissolved oxygen (DO) supply was only confirmed near the water outlet. This was suggested by computational fluid dynamics that water that came out from water outlet rising upward without staying in the bottom was the causes. Then, we conducted experiments using a MB to aerate bottom of the sea more directly. Vertical distributions of DO showed oxygen was supplied horizontally, but DO concentration increased about 0.24 mg L^{-1} that was lower than SSO experiment. This was suggested by CFD that water came out from MB generator spread horizontally without staying near the MB generator was the cause. Therefore, it is necessary to improve of making the MB water staying more near the MB generator.

Key words: hypoxia, dissolved oxygen, microbubble , brackish water area, computational fluid dynamics

第一章　緒言

近年，日本各地や世界の沿岸域において，夏季の貧酸素水塊の発生が確認され，問題視されている。特に，閉鎖的内湾である東京湾では，毎年この貧酸素水塊が発生し[1),2)]，アサリなどの二枚貝など底生生物の生息に多大なダメージを与える[3)]。また，貧酸素水塊が風により湧昇し海域が青白色に濁ることを青潮と言い，これにより魚の大量死や悪臭といった二次被害をもたらすため貧酸素水塊改善方法の解決は早急に行わなくてはならない。この貧酸素水塊の原因は富栄養化状態によって増大する有機物によってもたらされた酸素消費の増加と，夏季における海域の成層状態が合わさり起こるといわれ，根本的な解決には，富栄養状態の改善が必要であると言われる[4)]。しかしそれには，栄養塩流出の長期的な改善や土木的な工事を施さなくてはならず，現在のところ短時間で容易に貧酸素水塊の改善する方法は見つかっていない。

そこで我々は，局所的に貧酸素状態を改善し，貧酸素水塊からの生物の逃避地を作ることを目的に研究を行っている。以前，小島ら[5)]では改善を施す海域の環境特性を把握した上で，夏季にも溶存酸素濃度（以下，DO）の高い表層の水を海底付近に放出する装置「ソーラーシーオアシス（以下，SSO）」とマイクロバブルを用いて直接海底付近に酸素を供給する 2 種類の方法で貧酸素水塊改善実験を行い，ある一定の成果を得た。しかし，持続的，または十分な DO の上昇が見られないなど貧酸素状態を改善するまでの効果を得ることできなかった。そのため，より効果的な改善方法を検討するにあたり流体シミュレーション（CFD）を用いた DO 供給の効果についての解析・予測が必要であると考えられる。ただし，DO が供給されたか否かは，水中及び海底での酸素消費速度を測定する必要がある。そこで，本研究では流体シミュレーションによる DO 供給効果の把握の初期段階として，小島らの観測データを基に SSO とマイクロバブル両装置から放出される海水の流動を流体シミュレーションにより把握し，装置の効果を検証した。

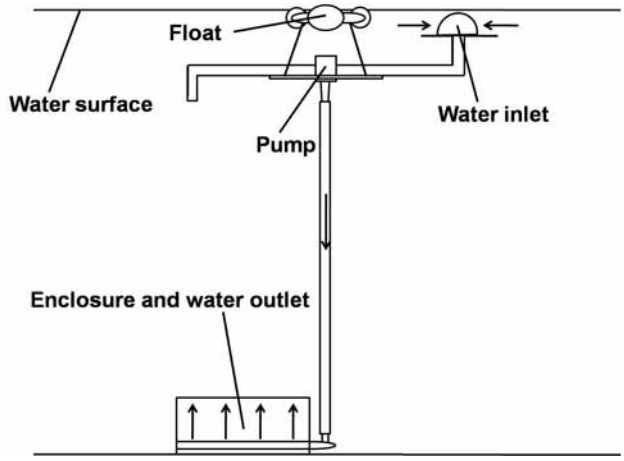
*1 Graduate School of Marine Science and Technology, Tokyo University of Marine Science and Technology, 4-5-7 Konan, Minato-ku, Tokyo 108-8477, Japan（東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科）
*2 Department of Marine Environmental Studies, Faculty of Marine Science, Tokyo University of Marine Science and Technology, 4-5-7 Konan, Minato-ku, Tokyo 108-8477, Japan（東京海洋大学海洋科学部海洋環境学科）
*3 Department of Marine Electronics and Mechanical Engineering, Faculty of Marine Technology, Tokyo University of Marine Science and Technology, 2-1-6 Etchujima, Koto-ku, Tokyo 135-8533, Japan（東京海洋大学海洋工学部海洋電子機械工学科）

第二章　方法

1. 装置の概要

1）SSO

本装置は，貧酸素水塊の発生する夏季であっても，表層には 5 mg L^{-1} 程度の DO が存在することに着目し，この表層水を太陽電池駆動のポンプにより底層に放出することで貧酸素状態を改善することを目的としたものである。装置の構造は，水中ポンプ（マキタ製）・浮き・取水口部から成る上部と，表層水放出孔（孔径 : 3.5mm, 総孔数 208 個）の開いた 4 本のパイプ・囲いからなる下部，上部と下部を繋ぐホースで構成されている（Fig. 1）。また，上部に流量計（SPX － 075，ハイテック製）を取り付け，海水流量を測定し，取水口にはゴミを吸引しないようにザルを取り付けた。装置各部の仕様は Fig. 1 の通りである。

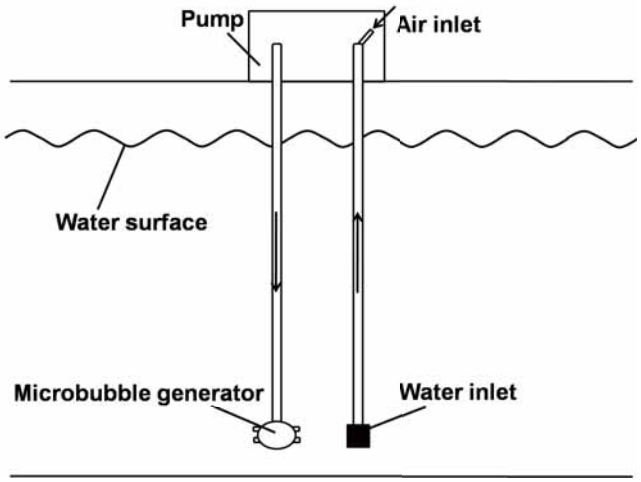


Size of apparatus	The upper part	100 cm × 30 cm
	The lower part	100 cm × 100 cm × 60 cm
Material of enclosure	SUS304	
Pump	Maximum flow	100 L min^{-1}
	Power consumption	340 W
	Rated power	150 W
	Rated voltage	AC 100 V
Hose	Length	5 m
Water outlet	Number	208
	Radius	3.5 mm

Fig. 1 Schematic diagram of Solar-Sea-Oasis (SSO)

2）マイクロバブル発生装置

本装置は数 μm から数 10μm の微細な気泡を発生させる装置である。このマイクロバブルは浮上速度が極めて遅く，単位体積当たりの表面積が大きいことから水に溶解しやすい。このため貧酸素水塊に直接酸素を供給できると考えられる。本装置は本体（ポンプ，空気吸引口），マイクロバブル発生ノズル，取水口，本体と取水口及びノズルつなぐホースから成る（Fig. 2）。マイクロバブル発生方式は超高速旋回方式である。取水口側のホースと本体の間に流量計（SPX － 075，ハイテック製）とバルブを取り付け，空気吸引口にも流量計（RK － 1650，コフロック製）を取り付け海水，空気流量を調整・測定した。装置各部の仕様は Fig. 2 の通りである。



Selling agency	Horus
Name	Wonderfully
Microbubble generation method	High speed whirling method
Rated voltage	100 V
Power consumption	370 W
Size of pump	30 cm × 38 cm × 30 cm
Hose　Length	10 m

Fig. 2 Schematic diagram of microbubble generator system

2. 現場観測

現場観測のデータに関しては小島ら[5]による観測値を一部改変したものを用いた。SSO，マイクロバブル両実験共に，本学品川キャンパス係船場西側岸壁付近で行った（Fig. 3）。多項目水質計（AAQ1183，JFE アレック製）を用いて海面直下から海底直上までの水温，塩分，DO を測定し，密度（σt）を算出した。観測点として，SSO では装置内外の 9 地点を（Fig. 4），マイクロバブルでは 7 地点を設け，マイクロバブル発生ノズルは③の位置にある（Fig. 5）。SSO では，稼働前日に上記の観測点で測定を行い現場の状況を確認した。またマイクロバブルでは，装置を 24 時間稼動させ，稼動前と稼動後の DO や密度分布の変化を比較した。気象や潮汐などの環境条件が異なっても底層での DO が増加することを確認するために，2008 年 7 月 31 － 8 月 26 日の期間に計 9 回の実験を行った。それぞれ稼動後から稼動前の値を引き，それらの平均を求め装置の効果を評価した。空気流量は 0.2 L min^{-1} とした。

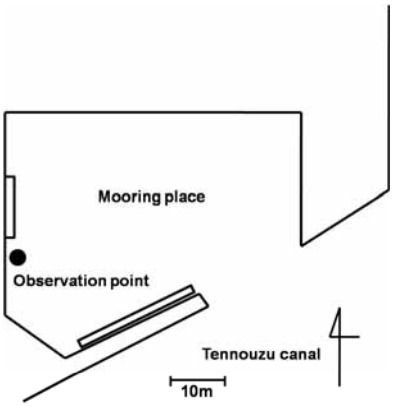


Fig. 3 Location of the observation point

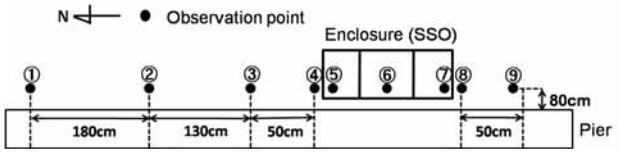


Fig. 4 Observation points around SSO

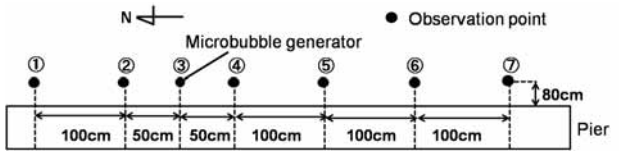


Fig. 5 Observation points of MB experiment

3. 流体シミュレーション

1) SSO

放出した水の挙動の流体シミュレーションに関しては，熱流体解析ソフトウェア FLUENT6.3 （FLUENT）を使用した。支配方程式は，運動方程式と連続式を用い，計算領域は x 軸方向に 9 m，y 軸方向に 4.2 m，z 軸方向に 9 m とし，10 cm × 10 cm × 10 cm の立方体メッシュを敷いた。乱流モデルは，標準 k-ε 乱流モデルを使用し，初期条件として実験地点付近の装置の影響のないと思われる地点にて観測した海水の密度分布を敷いた。入口条件は，海底部分に設けた表層水放出部（1 m × 1 m）から現場観測で得られた表層の密度の水を y 軸正の方向にポンプの流量から求めた流速 0.002 m s^{-1} で放出した。出口条件は , 最上部 20 cm を出入り自由とし，その他は出入りのない壁とした。また，係船場の表層と底層の水温はほぼ等しいため [5]，本計算では水温は考慮に入れなかった。

2) マイクロバブル

数億個発生するマイクロバブル一つ一つに対してシミュレーションを行うことは，計算容量が莫大なため困難である。従来の研究ではマイクロバブルのシミュレーション方法として，計算を簡単にするために幾つかの仮定を行うものが多い。例えば，佐々木ら [6] の気泡の浮力効果を無視し，生成項にマイクロバブルの効果を組み込んだものや，田中ら [7] のマイクロバブルを含んだ海水をマイクロバブルの空気量だけ軽い水と仮定して 2 次元計算を行った例などがある。佐々木ら [6] では，マイクロバブル発生装置が起こす流動に関しての考慮がなく，また田中ら [7] では，3 次元の現象を 2 次元で解析しているために忠実に再現できていない可能性や，装置の影響を三次元的に検討できないなどの問題点が挙げられる。

そこで本研究では，マイクロバブル発生装置からの流動を検討していくため，まず 3 次元シミュレーションを行っていく。そしてマイクロバブルの扱いについては佐々木ら [6] が，マイクロバブルからの酸素溶解過程はノズル部分での瞬間的な酸素溶解が支配的であり，水中を浮遊するマイクロバブルによる酸素溶解効果は小さいと水槽実験により示したため，海中に放出されたマイクロバブルによる酸素溶解は考慮しない。また，マイクロバブルは浮上速度が極めて遅く，小島ら [5] では本装置を使用した場合，空気流量 0.3 mL min^{-1} の場合に，より微細なマイクロバブルが多く生成されることが判明したため，気泡による浮上効果も無視して考えた。つまり，本シミュレーションではマイクロバブルによる流動への影響は極めて少ないと考えられるため，ノズルから放出される海水の影響のみを考えた。

SSO同様, 熱流体解析ソフトウェアFLUENT6.3 (FLUENT) を用いた。計算領域は，x 軸方向に 10 m , y 軸方向に 4.2 m, z 軸方向に 5 m とし，乱流モデルは標準 k-ε 乱流モデルを使用した。初期条件として装置稼働前に現場にて観測した海水の密度分布を敷き，入口条件として海底直上 40 cm に設置したマイクロバブル放出ノズル部分からポンプ海水流量から算出した流量で放出した。出口条件は，海底直上 40 cm に設置した取水口部分から自由に出入りするようにした。

第三章　結果と考察

1. ソーラーシーオアシス

1) 現場観測

装置稼働前のσt 分布及び, DO 分布は Fig. 6 のようになった。本係船場は汽水域であるため, 海面から海底までのσt の差は大きく，5—15 となっていた。一方，海底付近の DO は 0.4 mg L^{-1} で貧酸素状態であるが, 表層の DO は 4.4mg L^{-1} と酸素が存在していた。

装置稼働中のσt 分布及び, DO 分布は Fig. 7 のようになった。装置から一番離れた位置である①のσt は，稼働前の分布のように底層から表面にかけてからと徐々に低密度になっていた。一方，囲い内では表層水の影響で，同深度の囲い外のσt より低い値が示された。この σt 分布から，放出された表層水は鉛直上向きに上昇していると思われた。また，DO 分布については, σt 分布と同様な分布を示し，囲

いから鉛直上向きに同深度より高い値を示した。放出水の影響を受ける囲い内の DO は 2.0 mg L^{-1} と貧酸素状態は変わりないが , 囲い外より囲い内では 0.4 mg L^{-1} 程度高い値が見られた。

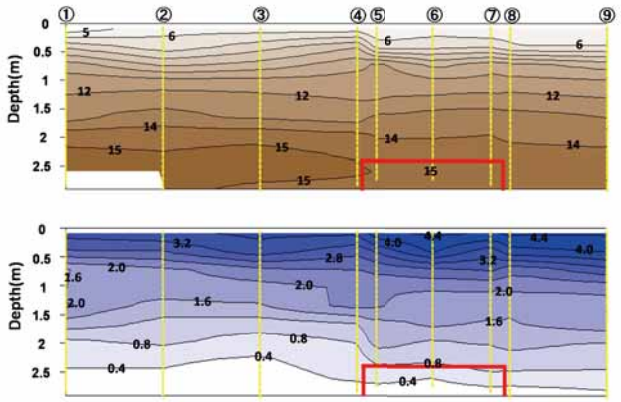


Fig. 6 Vertical distributions of density (brown, σ_t) and DO (blue, mg L^{-1}) before SSO operation

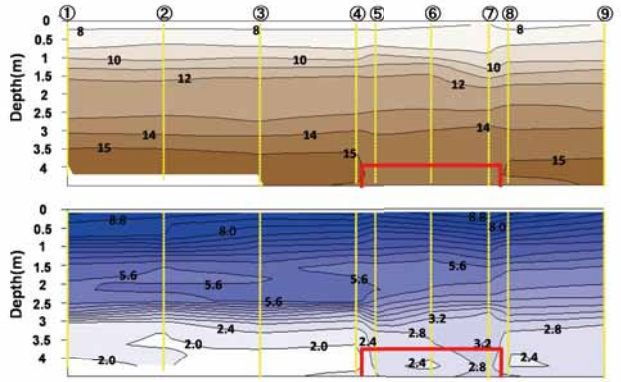


Fig. 7 Vertical distributions of density (brown, σ_t) and DO (blue, mg L^{-1}) after SSO operation

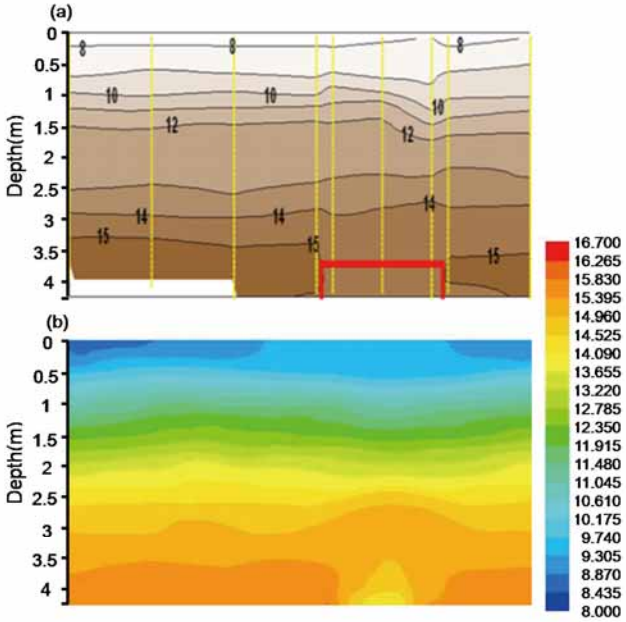


Fig. 8 Comparison of density between SSO operation (a, σ_t) and CFD (b, kg m^{-3})

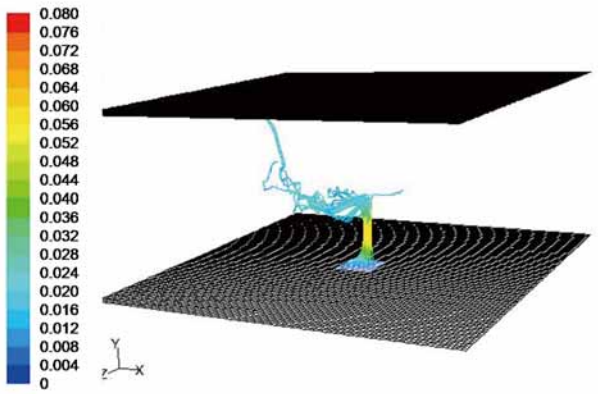


Fig. 9 Pathline of discharged water from SSO colored by velocity (m s^{-1}) on CFD

2）流体シミュレーション

流体シミュレーションの再現性を確認するため，観測結果と計算結果の密度分布を比較した。シミュレーションは Fig. 8 のように現場実験結果の傾向を十分に模擬している結果となった。またこのシミュレーション結果から放出水の軌跡は Fig. 9 のようになった。これにより，放出された表層水は，鉛直上向きに細い筋となり上昇し一定深度に達すると水平方向に広がっていくことが示唆された。現場観測において，DO 上昇が放出部の直近のみであったのは，放出された表層水が海底付近に留まらずに，すぐ上昇していくことが原因と考えられる。また上昇した表層水は等密度層まで達すると水平方向に拡散していくと考えられ，装置付近に滞留することはなかった。

このようにシミュレーションでは，放出した表層水と海底付近の密度差が大きいため，海底付近に留まらず浮上していき水平方向に拡散するという放出水の挙動がわかった。このため，取水深度をより深くすることにより，放出水を海底付近に滞留させることはできないかと考え，再び取水深度 1 m 付近の水の場合を計算した。取水深度は，現場観測で得られたデータから最も深い深度で豊富な DO が得られるものを選んで使用した。放出水の密度を表層から深度 1 m の値に変える以外は同様の条件で行った。その結果，密度分布や放出水の挙動ともにあまり違いが見られなかった（Fig. 10）。水平方向に広がる深度はほぼ変わらず，放出水は放出直後から細い筋状になり，上昇する挙動に表層水を取水した場合と変化はなく，効果として大きな違いはないと思われる。また，取水深度をより下げ滞留する時間を長くさせることも考えられるが，小島ら[5]の係船場での定点観測から貧酸素期である 6 月から 10 月までの 1 m より深い深度の DO が貧酸素の状態まで下がっているため効

果がないと示唆される。そのため SSO の効果としては放出部直近において少しの DO の上昇が得られる程度だと思われ，貧酸素期の生物の持続的な逃避地としては十分な効果を得られない。

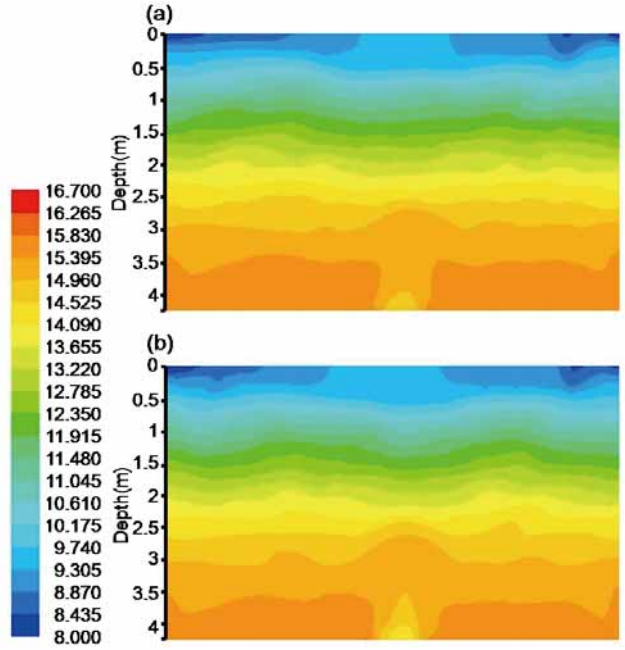


Fig.10 Vertical distributions of density (σ_t) on CFD about 0m water intake (a) and 1m water intake (b)

2. マイクロバブル

1）現場観測

装置稼動後では，表層付近での DO の変化に関係なく，僅かであるがノズル付近の 0.24 mg L^{-1} を最大値として底層全体で DO の増加が確認された（Fig. 11-(a) (b)）。密度線は横方向に伸びていることから，マイクロバブルが溶け込んだ海水は上昇することなく，横方向に広がっていることが示唆される（Fig. 11-(c)）。しかし，マイクロバブルの注入による底層水全体の大幅な貧酸素状態の改善はみられなかった。

2）流体シミュレーション

装置稼働 10 分後の密度分布と速度分布は Fig. 12，13 のようになった。密度分布を見ると現場観測同様に密度分布に対し大きな影響を及ぼしていることは見られなかった（Fig. 12）。また速度分布を見ると，ノズル周辺の水平方向に流れが生じているのがわかった（Fig. 13）。

このため現場観測の結果のようなノズル付近に DO の高い水が確認されたと思われる。また，放出水の軌跡を見ると，放出されたマイクロバブル水は水平方向に広がっている様子が確認されたため（Fig. 14），放出された水はその場

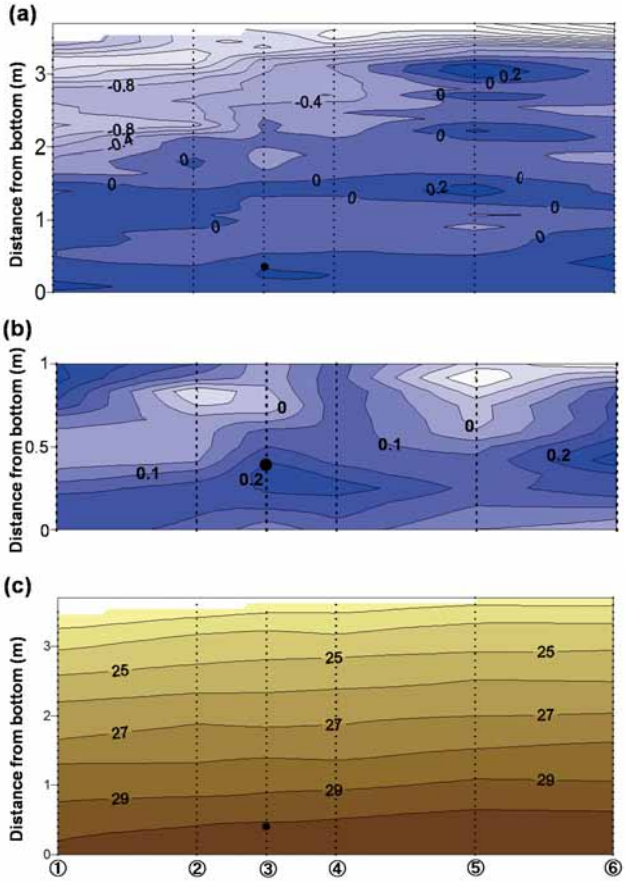


Fig.11 Vertical distributions of the mean DO (a, mg L^{-1}) of before and after 1 day of microbubble generator operation difference, its closed up near bottom (b, mg L^{-1}) and the mean density (σ_t, c) for nine experiments

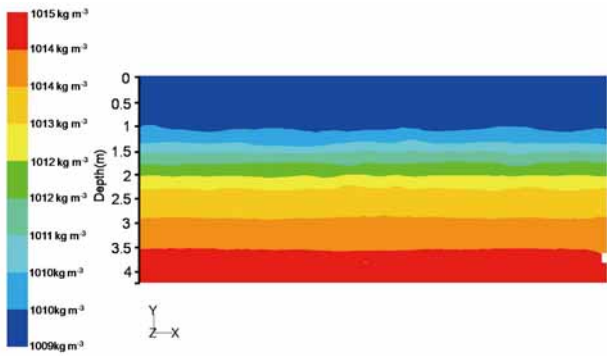


Fig.12 Vertical distributions of density (kg m^{-3}) after Microbubble operation on CFD

に留まらずに水平方向に拡散していくと考えられた。これは，現場観測で得られた水平方向の DO 増加と一致する。しかし，放出水の流れの影響が海底直近まで達していないため底泥への酸素供給は少ないと考えられた。このため海中への酸素供給効果は期待できるが，貧酸素水塊で深刻なダメージを受けるベントス，底生魚類などの生物の生息環境を改善することは難しいと考えられた。

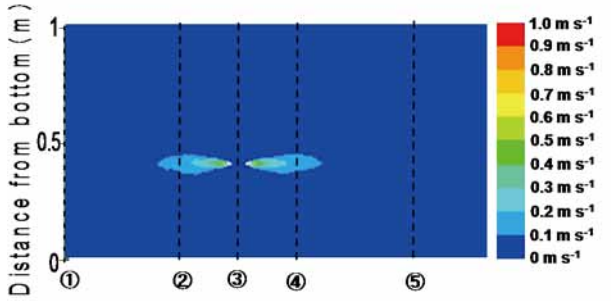


Fig.13 Vertical distributions of velocity after Microbubble operation on CFD

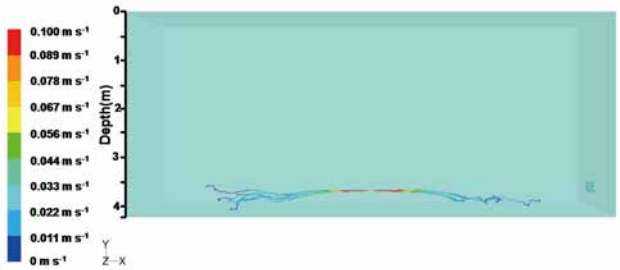


Fig.14 Pathline of MB water colored by velocity on CFD

3. まとめ

本研究では，SSO とマイクロバブル発生装置の効果を流体シミュレーションにより検証した。SSO は密度の軽い表層の海水を放出するために放出部直近でしか効果は見られなかったことが現場観測によりわかった。これは流体シミュレーションの結果とも一致し，この放出水が海底付近の海水との密度差により細い筋状に上昇していくことが原因であると示唆された。また，上昇する過程で混ざり徐々に密度を高めていき，同深度の海水の密度と同じになると水平方向に広がっていった。より放出水を海底付近に滞留させるためには，取水する深度を深くとる必要があると思われた。しかし流体シミュレーションにおいて取水深度を 1 m とした場合を計算したが，効果に大きな変化は見られなかった。

そこで直接海底付近に酸素を供給するためにマイクロバブル発生装置を用いた実験を行った。現場観測結果から，海底付近に酸素を供給できていることは示唆されたが，DO の増加量は最大で約 0.2 mg/L と小さかった。シミュレーションにより計算されたマイクロバブル水の軌跡から，これは放出した海水が鉛直方向には広がらず，水平方向に拡散していることが原因と考えられる。より海底付近の DO を増加させるためにマイクロバブル発生ノズル周辺に囲いを設置するなどの工夫をし，放出した海水をその場に滞留させる必要があると考えられる。

今後は，囲いを設置した場合の実験を行い，そこでの現場観測，シミュレーション結果の違いにどのような差があるのかを検討していく必要がある。そこから貧酸素期にも持続的に生物が生息できる DO を確保する方法を検討していきたい。また，その費用対効果を査定しようと考えている。

謝辞

本研究を行うにあたり，係船場での作業では酒井艇長，山根機関長にご協力いただいた。また，装置の作成，設置にあたっては東京海洋大学動力エネルギー工学研究室福原豊助教にご協力いただいた。心より御礼申し上げます。

参考文献

1) 清水潤子，山尾理．東京湾奥部における連続観測により得られた貧酸素水塊の現状について．月刊海洋　2007；39：29 － 34.
2) 富永衞，木村明，寒川強，太田一之，鬼塚正光，松尾信．閉鎖性海域の富栄養化と青潮．資源と環境　1994；3：11 － 19.
3) 風呂田利夫．東京湾における季節的酸素欠乏における底生生物群集の大量斃死ならびに種多様性の減少．月刊海洋　2005；37：791 － 796.
4) 柳哲夫．貧酸素水塊の生成・維持・変動・消滅機構と化学生物的影響．海の研究　2004；13：451 － 460.
5) 小島諒子，遠矢亮，石丸隆，賞雅寛而，川上啓介，大塚和臣．東京海洋大学品川キャンパス係船場の環境特性と貧酸素水塊改善の試み．東京海洋大学研究報告　2009；5：29 － 44.
6) 佐々木淳，小出摩耶子，長田正行，柴山知也，磯部雅彦．東京湾三番瀬における微細気泡発生装置を用いた青潮水改善効果の数値的検討．海岸工学論文集　2003；50：981 － 985.
7) 田中陽二，磯部雅彦，鯉渕幸生，五明美智男，大野嘉典．閉鎖性海域での微細気泡による水質改善効果の数値解析．海岸工学論文集　2005；52：1126 － 1130.

流体シミュレーションを用いた貧酸素水塊改善装置の効果検証

遠矢　亮[*1]・小島　諒子[*1]・石丸　隆[*2]・賞雅　寛而[*3]

([*1] 東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科
[*2] 東京海洋大学海洋科学部海洋環境学科
[*3] 東東京海洋大学海洋工学部海洋電子機械工学科)

要旨：　東京海洋大学品川キャンパス係船場にてソーラーシーオアシス（SSO）並びに，マイクロバブル発生装置による貧酸素水塊改善実験を行い，流体シミュレーションにより効果を検証した。現場観測からSSOの効果が放出部付近でのみ確認されたことは, 流体シミュレーションにより放出部から出た水が海底付近に留まらずに鉛直上向きに上昇してしまうことが原因だと示唆された。そこで，より直接海底付近に酸素を供給するためにマイクロバブル発生装置を用いた実験を行った。現場観測では水平方向に酸素が供給されている分布を示したが，DO 増加量が 0.24 mg L^{-1} と SSO よりも低い値となった。これは放出した水が, その場に滞留することはなく水平方向に広がっていることが原因と流体シミュレーションによりわかった。このため今後はより海底付近に滞留させる方法を考える必要がある。

キーワード：　貧酸素水塊，溶存酸素，マイクロバブル，流体シミュレーション，汽水域