

## 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

著者	小島 諒子 , 遠矢 亮 , 石丸 隆, 賞雅 賞雅, 寛而, 川上 啓介, 大塚 和臣
雑誌名	東京海洋大学研究報告
巻	5
ページ	29-44
発行年	2009-03-27
URL	<a href="http://id.nii.ac.jp/1342/00000346/">http://id.nii.ac.jp/1342/00000346/</a>

## 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

小島 諒子<sup>\*1</sup>・遠矢 亮<sup>\*1</sup>・石丸 隆<sup>\*2</sup>・賞雅 寛而<sup>\*3</sup>・川上 啓介<sup>\*1</sup>・大塚 和臣<sup>\*4</sup>

(Accepted December 18, 2008)

### Approaches in improving hypoxia and environmental capability at a mooring place in Shinagawa campus of Tokyo University of Marine Science and Technology

Ryoko KOJIMA<sup>\*1</sup>, Ryo TOYA<sup>\*1</sup>, Takashi ISHIMARU<sup>\*2</sup>, Tomoji TAKAMASA<sup>\*3</sup>, Keisuke KAWAKAMI<sup>\*1</sup> and Kazuomi OTSUKA<sup>\*4</sup>

**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. Prior to the experiments, we measured water quality (temperature, salinity and dissolved oxygen concentration (DO)) to assess the hydrographic condition in this mooring place. Hydrographic parameters or recorded temperature and salinity in the area were higher and lower respectively, than those measured in Tokyo Bay (Stn. F3). These data indicate intrusion of effluent water from Wastewater Treatment Plant and Shinagawa and Oi Thermal Power Plant near the mooring place. Water column was stratified all year round and was hypoxic at the bottom during May-November 2006 and June-November 2007. In SSO experiments, the difference of DO between the inner and outer side of SSO apparatus was 0.91 mg L<sup>-1</sup> in average. The trend of DO record traced at the SSO intake or the sea surface corresponded with that difference. When air flow rate was 1.0 L min<sup>-1</sup> in MB experiments, DO near the sea bottom did not increase, due to large size bubbles rising from the bottom up to the upper layer. Conversely, the rising of bubbles was not observed, and DO modestly increased along same density layer when air flow rate was 0.2 L min<sup>-1</sup>. However it was not enough to improve hypoxia and further improvement is thus required.

**Key words:** environmental capability, hypoxia, mooring place, brackish water area, dissolved oxygen, microbubble

### 第一章 緒言

日本各地の閉鎖的内湾で、貧酸素水塊の発生が報告されるようになって久しい。貧酸素水塊は、水塊内での酸素消費速度が、水塊内での酸素生産速度と水塊への水平・鉛直の酸素供給速度の和より大きい場合に形成される<sup>1)</sup>。例えば、富栄養化している東京湾では、植物プランクトンが大量に増殖し死亡沈降する。加えて、夏季には水温躍層の形成により表層からの酸素供給が絶たれるため、底層が貧酸素化する<sup>2)</sup>。

「貧酸素」の定義は統一されておらず、柳<sup>3)</sup>は溶存酸素

濃度(以下, DO)が 3.6 mg L<sup>-1</sup> 以下、山口・経塚<sup>4)</sup>は 3.0 mg L<sup>-1</sup> 以下、山尾<sup>5)</sup>は 4.3 mg L<sup>-1</sup> 以下の水塊をそれぞれ貧酸素水塊と定義している。これらの値はいずれも、生物に貧酸素の影響が及び始める水準ということから決定されている。本論文では、3.0 mg L<sup>-1</sup> 以下の場合を貧酸素とした。

貧酸素水塊発生の報告は近年も多く(例えば、山口・経塚<sup>4)</sup>、清水・山尾<sup>6)</sup>、松岡ら<sup>7)</sup>)、富栄養化状態の改善が貧酸素水塊問題の根本的な解決であるという意見が多い(例えば、柳<sup>1)</sup>、田中ら<sup>8)</sup>)。しかし、富栄養化状態の改善には長期的な努力、あるいは巨額の費用が必要なために実現は容易ではない(田中ら<sup>8)</sup>、鯉渕ら<sup>9)</sup>)。

\*1 The 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 Ocean sciences, 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)

\*4 Department of Ocean sciences, Faculty of Fisheries, Tokyo University of Fisheries, 4-5-7 Konan, Minato-ku, Tokyo 108-8477, Japan (東京水産大学水産学部海洋環境学科)

そこで我々は、現場の環境特性を把握した上で局所的に貧酸素状態を改善し、貧酸素水塊内に生物の生育可能な場所を造ることを目指して研究を行った。本研究で試験域とした東京海洋大学品川キャンパス係船場（以下、係船場）は、天王洲運河と京浜運河を介して東京湾に通じている。また、近隣には下水処理場、品川・大井火力発電所、目黒川が存在しており、特異的な環境が形成されていることが予想される。そこで本研究では、係船場において週に2-6日程度の頻度で観測を行い環境変動をとらえ、その上で貧酸素状態の改善を試みた。

## 第二章 方法

### 1. 係船場の環境特性調査

#### 1) 調査地点および調査期間

2006年1-6月には数日に1回12-16時に、2006年7月から2007年12月までは週に6日程度、14時30分前後に係船場内の定点（Fig. 1）で観測を行った。観測点の水深は約3.5mである。

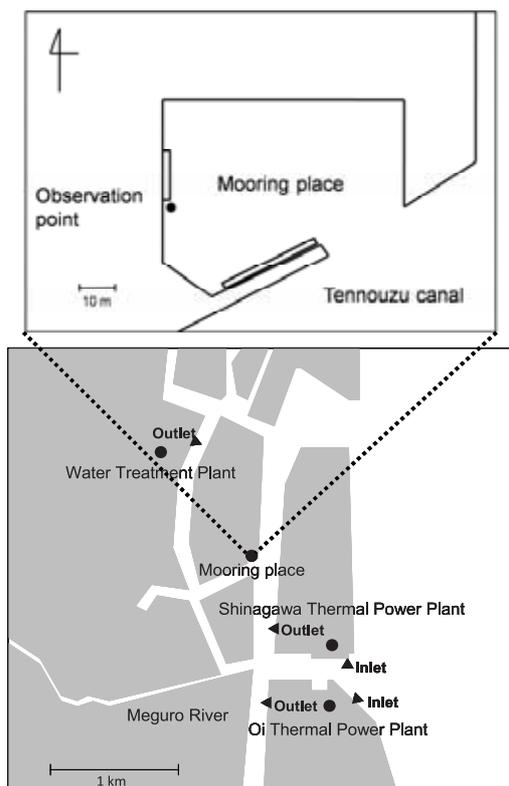


Fig. 1 Location of the mooring station and observation point.

#### 2) 調査項目および調査方法

2006年1月から2007年8月2日にかけて SCOOT メーター（Model 85, YSI 製）を用いて、深度 0.5 m ごとと表層（0.1 m）および底層（海底直上 0.15 m）で観測を行った。2007年8月3日から2007年12月までは多項目水質計

（AAQ1183, アレック電子製）を用い、海面直下から海底直上まで測定を行った。測定項目は水温、塩分、DO で、水温と塩分から密度  $\sigma_t$  を算出した。なお、2007年4月から8月2日にかけては、SCOOT メーターの校正が正しく行われていなかったため、特に低濃度域において DO を過大評価している可能性がある。

## 2. 東京湾羽田沖

#### 1) 調査地点および調査期間

2006年1月から2007年12月まで毎月1回（8月は除く）、東京海洋大学研究練習船青鷹丸により、東京湾羽田沖に位置する Stn.F3（35°30' N, 139°49' E）で観測を行った。また、2006年8月から2007年12月まで毎月1回（2006年11月、2007年3, 7, 9月は除く）、東京海洋大学研究練習船ひよどりにより、Stn.C（Stn.F3 近傍）で観測を行った（Fig. 2）。



Fig. 2 Observation station in the Tokyo Bay.

#### 2) 調査項目および調査方法

Stn.F3 では CTD（ICTD, FSI 製）を用い、Stn.C では多項目水質計（AAQ1183, アレック電子製）を用いて水温、塩分、DO を測定し、 $\sigma_t$  を算出した。本研究では水温、塩分は Stn.F3 のデータを用い、DO については Stn.C のデータを用いた。なお、多項目水質計は2006年8月から使用したため、観測データはそれ以降のものである。

## 3. ソーラーシーオアシス

#### 1) 装置概要

名称のソーラーは、当初、ポンプの駆動エネルギーとして太陽電池を用いようとしたことから、またシーオアシスは生物の生存可能な逃避地を意味する造語である。本研究期間中は、AC100V を電源とした。本装置は、係船場の底

層では夏に貧酸素状態となるが、表層には  $5 \text{ mg L}^{-1}$  程度の DO が存在することに着目し、表層水を底層に放出し底層の貧酸素を改善することを目的とした。

装置は水中ポンプ（マキタ製）・浮き・取水口から成る上部と、表層水放出孔・囲いから成る下部、上部と下部をつなぐホースで構成されている（Fig. 3）。上部は海面に浮いており、深度 20 cm 付近の水を取水する。取水された表層水は下部のパイプに横向きに開けられた孔から、着底している囲い中に放出される。なお、取水口にはゴミを吸引しないようステンレス製のザル（直径 30 cm）をつけていたが、ビニール袋や落ち葉などでザルがふさがれて流量が落ちることがあったため、装置稼働中に直径 60 cm の大型のものに交換した。装置の各部分の仕様は以下の通りである。

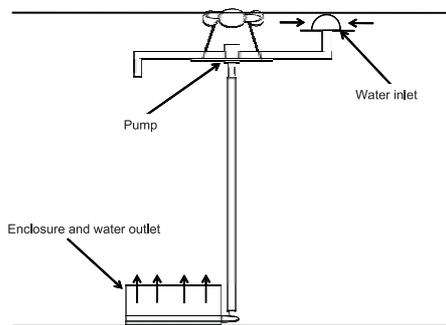


Fig. 3 Schematic diagram of Solar-Sea-Oasis (SSO).

装置サイズ	上部（フレーム）	100 cm × 30 cm
	下部（囲い）	100 cm × 100 cm × 60 cm
フレーム材質	SUS304（囲い部分にはさび止め塗装を施した）	
ポンプ	最大流量	100 L min <sup>-1</sup> 塗装
	消費電力	340 W
	定格出力	150 W
	定格電圧	AC 100 V
ホース	内径	10 cm
	長さ	5 m
表層水放出孔	孔径	3.5 mm
	孔数	208

## 2) 連続観測

装置を係船場に設置し、2007年8月13日から9月17日まで稼働させた。装置下部の囲い内に、多項目水質計（600 OMS-ROX, YSI 製）を、囲い南端から 60 cm 南の地点に水温塩分計（Compact CT, アレック電子製）と溶存酸素計（Compact Optode, アレック電子製）を設置し、装置稼働期間中に水温、塩分、DO を 10 分ごとに測定した。設置深度はともに海底直上 10 - 20 cm である。また、多項目水質計（AAQ1183, アレック電子製）を用い、ほぼ毎日 1 回、14 時 30 分前後に取水口直近の水温、塩分、DO を測定し、水温と塩分から  $\sigma_t$  を求めた。

また、放出水の動態を調べるために多項目水質計

（AAQ1183, アレック電子製）を用い、Fig. 4 に示す 9 点で海面直下から海底直上まで水温、塩分、DO を測定し、水温と塩分から  $\sigma_t$  を求めた。

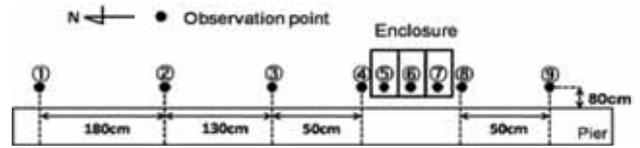


Fig. 4 Observation points around SSO, which are 80 cm apart from the pier.

## 3) 底質調査

装置稼働前の 8 月 11 日と装置稼働終了後の 9 月 17 日に、エクマンバジ探泥器（採泥面積  $0.0225 \text{ m}^2$ ）を用いて装置の囲いの内と外で採泥を行った。採泥後に採泥器内に入った直上水をサイホンを用いて抜き、表層 1 cm の泥を葉さじで採取した（採泥器表面積の半分程度）。その際貝殻などは除いた。その後、残った泥の表層 3 cm までを葉さじで採取し、目合い 2 mm のふるいにかけた。泥は分析まで保冷容器に収納し低温で保存した。その後実験室において表層 1 cm の泥で酸揮発性硫化物態硫黄（AVS-S）を、表層 3 cm の泥で強熱減量をそれぞれ測定した。双方とも 1 地点につき 3 回の測定を行った。AVS-S の分析は門谷<sup>10)</sup>に従い検知管（201H, ガステック製）を用いて行った。強熱減量の分析は環境庁水質保全水質管理課編<sup>11)</sup>に従った。

## 4. マイクロバブル発生装置

### 1) 装置概要

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（ノズル）、取水口、本体と取水口、本体とノズルをつなぐホースから成る（Fig. 5）。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、空気吸引口に流量計（RK - 1650, コフロック製）を取り付けた。本体は鉄製のアングルで製作した架台の上に置いた。本装置はストレーナー付の取水口からポンプにより水をくみ上げ、本体の空気吸引口から空気を吸引する。吸引された水と空気はホースを通じてマイクロバブル発生装置へ送られ、マイクロバブル（直径  $0.5 - 3 \mu\text{m}$ , メーカー公表値）と水がノズルから放出される。装置の仕様は以下の通りである。

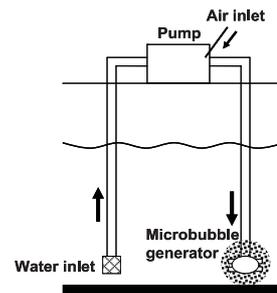


Fig. 5 Schematic diagram of microbubble generator system.

発売元	(株) ホルス
名称	ワンダフリー
バブル発生方式	超高速回転方式
定格電圧	100 V
消費電力	370 W
本体サイズ	30 cm × 38 cm × 30 cm
本体重量	約 14.5 kg
ホースの長さ	10 m

## 2) 気泡撮影

越中島キャンパス動力エネルギー工学研究室においてマイクロバブルの撮影を行った。海水を満たした水槽内 (28 cm × 58 cm × 34 cm) で気泡を発生させ、奥行き 2 mm, 幅 20 mm の流路内を通る気泡をカメラ (Pixelfly Family, PCO.Imaging 製) で撮影した (Fig. 6)。その際の空気流量は 0.1 – 1.0 L min<sup>-1</sup> である。得られた画像からそれぞれの空気流量ごとに気泡の直径と個数を求めた。

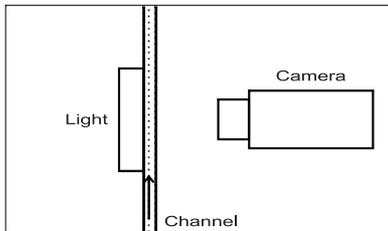


Fig. 6 Schematic layout of video system for the analysis of the size spectrum of microbubbles.

## 3) 現場実験 (2007 年)

本体を係船場の岸壁上に設置し、ホースを壁面より約 80 cm 離れた海中に垂らし、取水口とノズルが海底直上約 50 cm に位置するようにした。2007 年 10 月 17, 22 – 23 日, 11 月 2, 16 日に装置を稼働させ実験を行った。多項目水質計 (AAQ1183, アレック電子製) を用い, Fig. 7 に示す 7 点で海面直下から海底直上まで水温, 塩分, DO を測定し, 水温と塩分から  $\sigma_t$  を求めた。測定は最も北に位置する 1 から 2, 3…7 という順番で行った。ノズルの設置位置は 3 である。実験中にはランプ型水中 CCD カメラ (1101PC, 塚本無線製) を用い, 適宜気泡の放出状況を確認した。

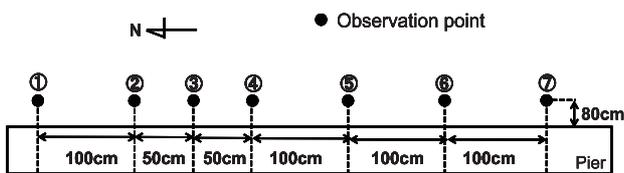


Fig. 7 Observation points of microbubble experiment, which are 80 cm apart from the pier.

## 4) 現場実験 (2008 年)

2007 年同様に, 本体を係船場の岸壁上に設置し, ホースを壁面より約 80 cm 離れた海中に垂らし, 取水口とノズル

が海底直上 30 cm に位置するように設置した。実験は 7 月 31 日から 8 月 26 日に行った。気泡撮影の結果に基づき空気流量は 0.2 L min<sup>-1</sup> とした。観測には多項目水質計 (AAQ1183, アレック電子製) を用い, Fig. 7 に示す 1 – 6 の地点で海面直下から海底直上まで水温, 塩分, DO を測定し, 水温と塩分から  $\sigma_t$  を求めた。実験中にはランプ型水中 CCD カメラ (111PC, 塚本無線製) を用い, 適宜気泡の放出状況を確認した。

## 第三章 結果と考察

### 1. 係船場の環境特性調査

#### 1) 水温

係船場の表層水温は 13.0 – 30.1 °C の間で変動し, 一方, 東京湾奥に位置する Stn.F3 の表層水温は 8.9 – 26.5 °C の間で変動した (Fig. 11-(a), 12-(a))。これより, 水温は係船場のほうが年間を通して高いことがわかる。係船場のほうが高温な理由としては, 品川, 大井火力発電所からの放流水の影響が考えられる。両発電所はともに, 東京湾側に位置する取水口から底層水を取水し, 京浜運河に面する放出口から 6 °C 程度上昇した海水を放流している<sup>12)</sup>。さらに, 下水処理場からの放流水は係船場の表層水温と比較して, ほぼ毎月高いことも, 係船場の水温が東京湾に比べ周年高くなっている要因のひとつと考えられる (Fig. 8)。

また係船場と Stn.F3 の 2006 年と 2007 年の水温変化を比較すると, 係船場では 2006 年は 13.0 – 28.4 °C で変動したのに対し, 2007 年は 15.5 – 30.1 °C の間で変動していた (Fig. 8, 11-(a))。同様に Stn.F3 も, 2006 年は 8.99 – 25.5 °C で変動したのに対し, 2007 年は 11.8 – 24.3 °C の間で変動していた (Fig. 12-(a))。これより, 2007 年のほうが高温であったことがわかる。2007 年は気温が高かったことから, 係船場のみではなく, 東京湾全体で水温が高かったことが示唆される。

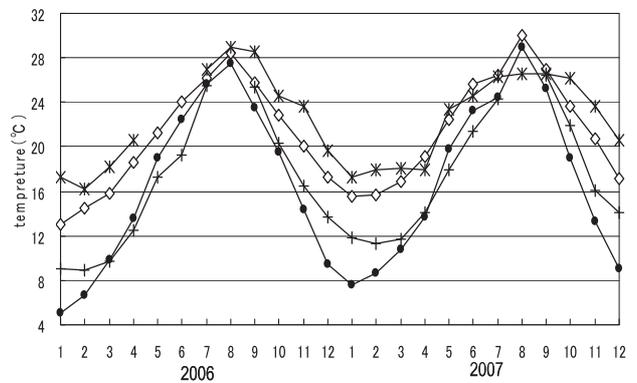


Fig. 8 Seasonal changes in air temperature at Tokyo (based on the mean data from the Tokyo Meteorological Observatory, ●), the surface water temperature of Stn.F3 (+) and the mooring place (◇), and the discharged water temperature from Wastewater Treatment Plant (\*)(°C).

## 2) 塩分

係船場の塩分は 10.1 – 32.2 の間で変動した (Fig. 11-(b))。一方、Stn.F3 では 25.1 – 34.6 の間で変動しており、係船場のほうが全体的に低い (Fig. 12-(b))。また、係船場では表層と底層の塩分差が通年大きく、その差は 9.4 – 16.5 であり、夏に大きく冬に小さい傾向がみられた。これは、降雨や下水処理場からの放流水の影響により、底層に比べて表層の変化が大きいためである。

2006 年と 2007 年を比較すると、2006 年では 8 月が最も低く、2007 年は 7 月と 9 月に低い値を示した。降水量をみると、2007 年の 8 月は 9.5 mm と非常に少なく、また下水処理場の簡易処理放流量も他の月に比べて非常に少なかった (Fig. 9)。そのため、2006 年と 2007 年で低い月が異なると考えられる。

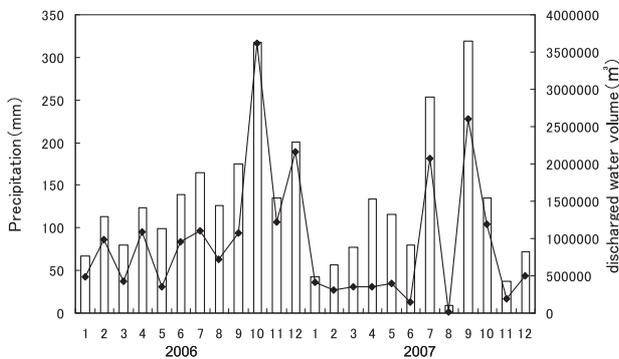


Fig. 9 Seasonal changes in precipitation in Tokyo (based on the data from Tokyo Meteorological Observatory) and the volume of primary treated discharged water from Wastewater Treatment Plant.

## 3) DO

表層の DO は係船場では 3.87 – 6.25 mg L<sup>-1</sup> の間で変動し、F3 では 4.30 – 13.56 mg L<sup>-1</sup> の間で変動した (Fig. 11-(c), 12-(c))。底層の DO は係船場では 0.60 – 6.37 mg L<sup>-1</sup> の間で変動し、Stn.F3 では 0.79 – 9.49 mg L<sup>-1</sup> の間で変動した。係船場のほうが低い理由としては、Stn.F3 よりも年間を通して水温が高く、バクテリアの活性が高いため、バクテリアの分解による酸素消費が大きいことが考えられる。また、Stn.F3 の表層では、観測が行われた月のうち 2/3 の月で飽和値を越えていたが、係船場で飽和値を超えた月はなかった。

係船場において、2006 年と 2007 年で大きな違いはみられなかったが、2006 年では 5 – 11 月において底層で貧酸素状態であったのに対し、2007 年は 6 – 11 月と 1ヶ月の差

があった (Fig. 11-(c))。兩年を通してみると、夏は上下差が大きく、冬は小さかった。これは、春から秋にかけては東京湾全体で底層での貧酸素化が進むのに対し、冬は東京湾で鉛直混合した DO の高い海水が係船場の底層に流入してくるためであると考えられる。

## 4) 密度

係船場の  $\sigma_t$  は 3.7 (2006 年 8 月) – 24.0 (2006 年 1 月) の間で変動した。表層と底層の密度差は 6.8 – 13.0 の間で変動し、Stn.F3 と比較すると通年上下差が大きかった (Fig. 11-(d), 12-(d))。

$\sigma_t$  の上下差に対する水温と塩分の寄与度を、深山<sup>13)</sup>の方法で算出した。ここで、

$$\text{水温の寄与度} = \text{③} / \text{①} \times 100$$

$$\text{塩分の寄与度} = \text{②} / \text{①} \times 100$$

①：観測で得られた水温と塩分から算出された上下の密度差

②：表層と底層の水温の平均値と観測された塩分から算出された密度差

③：観測された水温と、表層と底層の塩分の平均値から算出された密度差

とした。係船場では年間を通して塩分の寄与度が高かった (Fig. 10)。そのため、 $\sigma_t$  の密度差が通年大きいのは、塩分の密度差が通年大きいためと考えられ、水温の影響はほとんど受けていないといえる。

係船場は浅いにも関わらず、塩分の差による上下の密度差が大きく混合しにくいいため、貧酸素状態が形成されやすい。

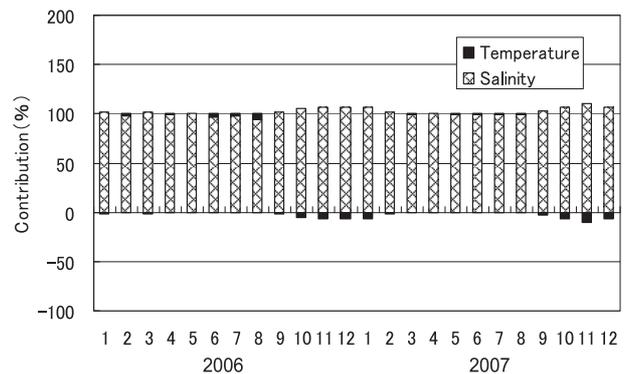


Fig. 10 Seasonal changes in the contribution ratio of salinity and temperature to  $\sigma_t$  at the mooring place.

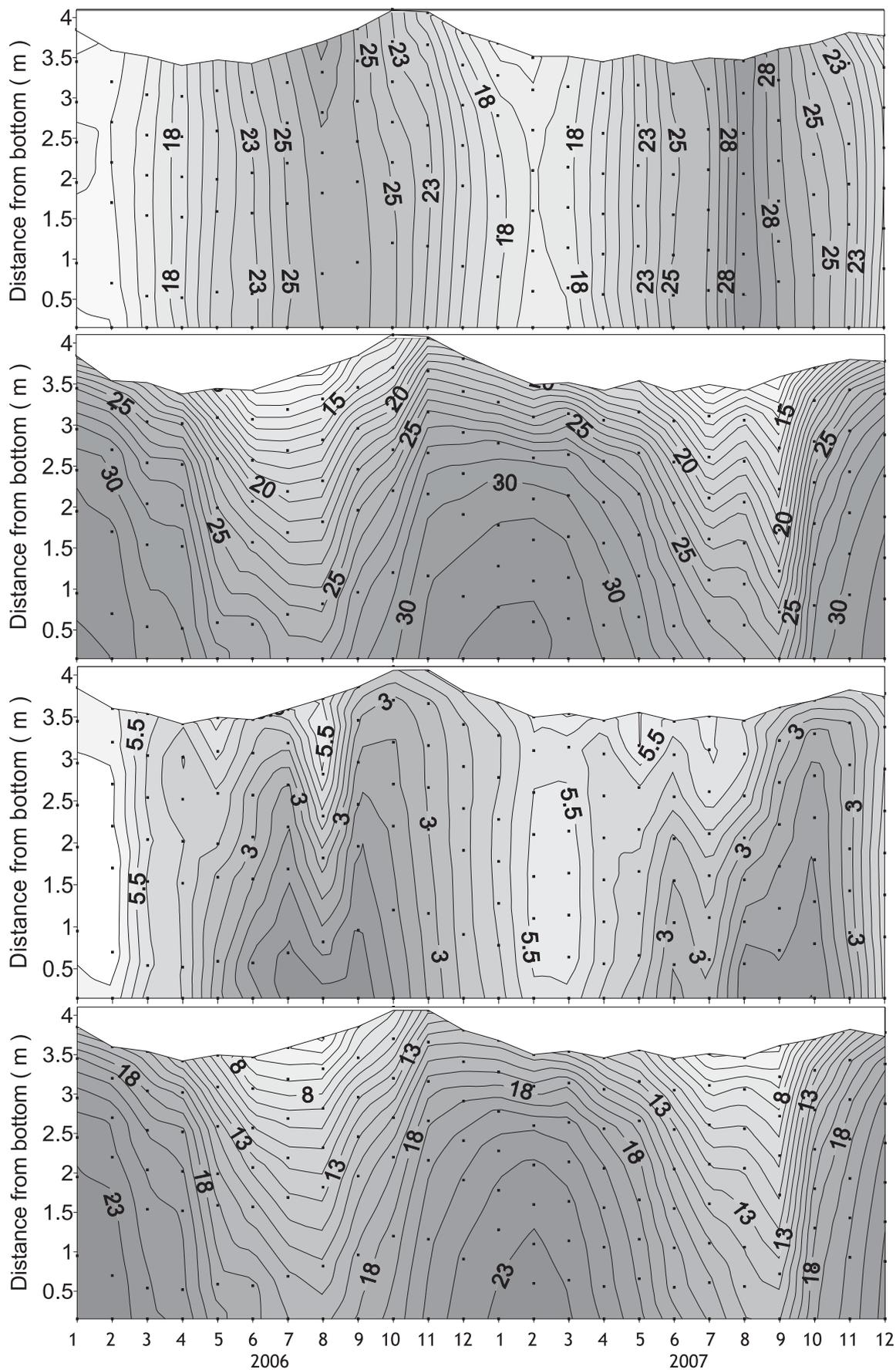


Fig. 11 Seasonal changes in temperature ( $^{\circ}\text{C}$ , a), salinity (b), DO ( $\text{mg L}^{-1}$ , c) and density ( $\sigma_t$ , d) at mooring place.

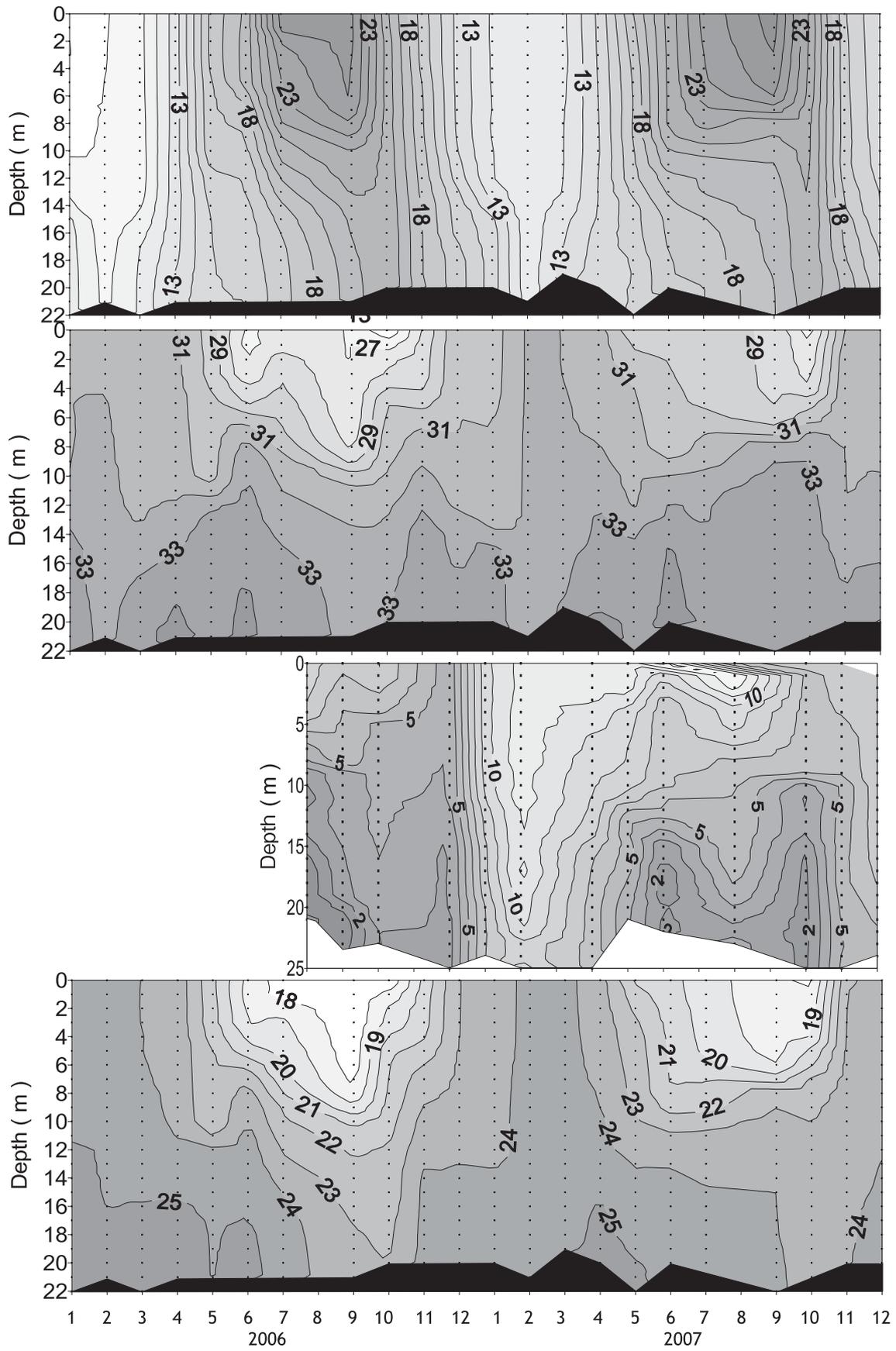


Fig. 12 Seasonal changes in temperature (°C, a), salinity (b), DO (mg L<sup>-1</sup>, c) and density ( $\sigma_t$ , d) at Stn.F3.

## 2. ソーラーシーオアシス

### 1) 連続観測

装置囲い内の DO は  $0 - 4.62 \text{ mg L}^{-1}$  の間で変動した (Fig. 13)。平均値は  $1.10 \text{ mg L}^{-1}$  であった。囲い外の DO は  $0 - 2.58 \text{ mg L}^{-1}$ 、取水口直近の DO は  $1.95 - 6.92 \text{ mg L}^{-1}$  の間で変動した。平均値は囲い外が  $0.19 \text{ mg L}^{-1}$ 、取水口直近が  $4.63 \text{ mg L}^{-1}$  であった。囲い外の DO が低い場合には、取水口の DO が高い状態であっても、囲い内の DO は低いままであった。これは囲い内が表層水で満たされることはなく、底層水と表層水が混合した水が囲い内に存在していたことを示している。囲いの内と外の DO の差の最大値は  $3.37 \text{ mg L}^{-1}$ 、最小値は  $-1.29 \text{ mg L}^{-1}$ 、平均値は  $0.91 \text{ mg L}^{-1}$  であった (Fig. 13)。この値は取水口の DO とよく対応していた (例えば、8月14日: 取水口  $5.90 \text{ mg L}^{-1}$  囲い内-囲い外  $3.08 \text{ mg L}^{-1}$ 、8月30日: 取水口  $1.95 \text{ mg L}^{-1}$  囲い内-囲い外  $0.1 \text{ mg L}^{-1}$ )。

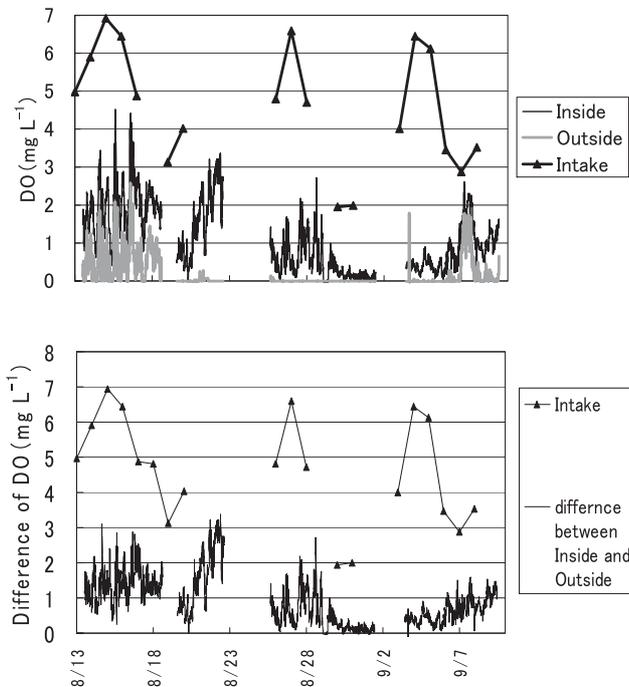


Fig. 13 Temporal change of DO at water intake (top) and difference of DO in the Inside and Outside of the enclosure (bottom) during SSO experiment.

生物の貧酸素耐性について Yamochi et al<sup>14)</sup> は、DO を調節した水槽内で 24 時間生物を飼育し、致死率を求めた。その結果、マハゼ *Acanthogobius flavimanus* は DO が  $0.57 - 0.93 \text{ mg L}^{-1}$  では全個体が死亡したが、 $1.55 \text{ mg L}^{-1}$  以上の場合には死亡個体はなかった。また、ガザミ *Portunus trituberculatus* の場合、 $0.63 - 1.49 \text{ mg L}^{-1}$  では 83% が死亡したが、 $1.79 - 2.13 \text{ mg L}^{-1}$  以上の場合には死亡個体はなかった。また、Miller et al<sup>15)</sup> によれば、魚類 12 種、甲殻類 9 種、二枚貝類 1 種の幼生及び仔稚魚を、貧酸素状態で飼育した場合の  $LC_{10}/LC_{50}$  は、平均で 1.32 である。これは、DO が少し増加するだけ

で、生存できる生物数が大きく増加することを示している。生物が斃死にいたるには、貧酸素の度合いとその継続時間が関連していると考えられる。装置の稼働により DO が致死濃度より高くなる時間が増加すれば、斃死する生物は減少すると考えられる。

また、取水口直近、囲いの内と外の塩分から、装置内における表層水と底層水の混合比を求めた。本装置による実験終了後に、囲い外に設置していた水温塩分計の電気伝導度の値が、ともに設置していた溶存酸素計の耐圧容器に使用されている金属の影響により、実際よりも高く出ていることが判明したため、値の補正を行った塩分値から、表層水の割合は平均で 16.8% となった。

### 2) 放出水の動態観測

本装置を稼働する前の 8 月 13 日には、DO、 $\sigma_t$  ともに水平方向に一様な分布をしており、深度が増すほど DO は減少し、 $\sigma_t$  は増加していた (Fig. 14、実線は囲いを示す。以下の図でも同様)。

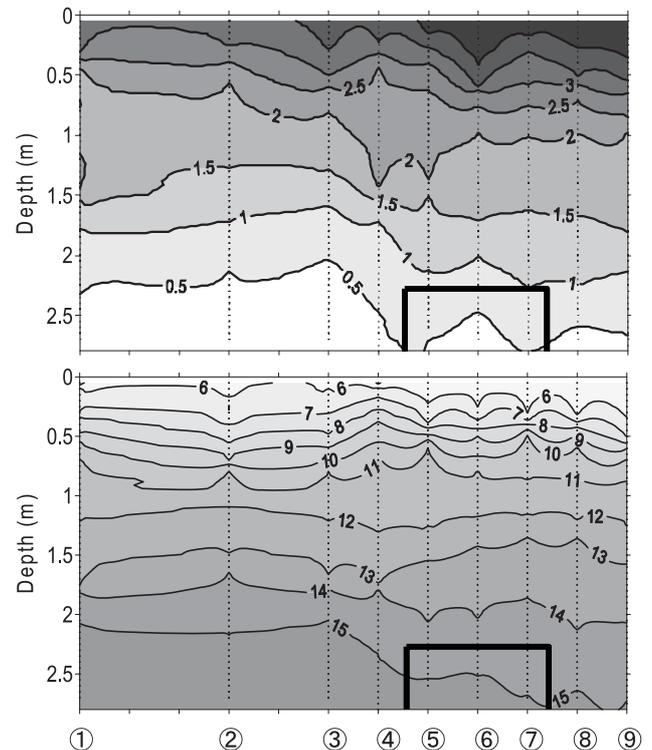


Fig. 14 Vertical distributions of DO and density before SSO operation.

装置稼働中 (9 月 3 日) の囲い内の DO は、同深度の囲い外の値よりも高くなり、囲いの上方で水平方向に均一な値となっていた (Fig. 15)。囲い外の海底直上では DO の上昇はみられず、本装置による貧酸素改善効果は得られなかった。囲い内で他の地点の同深度よりも低い  $\sigma_t$  が観測され、表層水が囲い内に放出されている様子が確認された (Fig. 15)。放出された表層水は底層水よりも密度が低いため、底

層水と混合しながら上昇し、周囲と密度が等しくなる層(深度 3 - 3.5 m) まで達すると、等密度面に沿って水平方向に広がっているものと考えられる。前述のように係船場では上下層の密度差が大きく、放出された表層水は底層水と混ざりにくく、また、速やかに上層に運ばれるため SSO の効果が表れにくいものと考えられる。

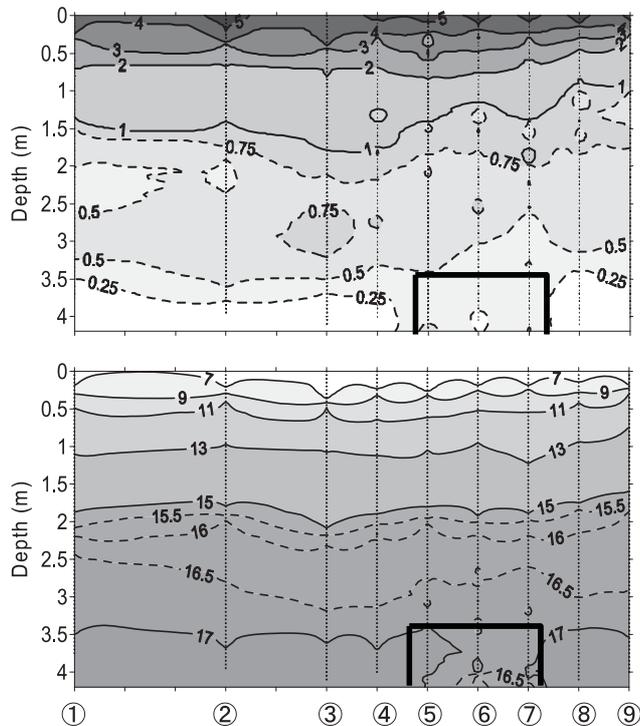


Fig. 15 Vertical distributions of DO and density after SSO operation.

### 3) 底質調査

AVS-S は装置稼働前、3 点の平均値が  $4.20 \text{ mg g dw}^{-1}$ 、装置稼働終了後の囲い内 2 点の平均値が  $4.56 \text{ mg g dw}^{-1}$ 、稼働終了後の囲い外 3 点の平均値が  $6.03 \text{ mg g dw}^{-1}$  であった (Fig. 16)。横山ら<sup>16)</sup>は、熊野灘において底泥中の AVS-S と直上水の DO に負の相関があることを報告している。本実験時には、装置稼働中に囲い内の DO が囲い外よりも高くなったため、AVS-S の増加を抑えることができたものと思われる。強熱減量は囲い内 2 点の平均値が 14.2%、囲い外 3 点の平均値が 17.4% であった (Fig. 17)。鯉淵ら<sup>17)</sup>は、海底付近への 5 日間の曝気により、底泥中の好気性細菌の指標となるユビキノン (偏性好気性細菌や通性嫌気性細菌に存在する補酵素) の割合が増えたと報告している。本研究においても、装置の稼働により囲い内の DO が上昇し、好気性細菌の割合が増加し、有機物の分解が進んだため、強熱減量が減少したと考えられる。本装置により、狭い範囲ではあるが、DO の増加と底質の改善を確認できた。さらに、本装置は夏季に表層の DO 濃度が飽和値に達するような海域で用いれば、より高い効果を得られると考えられる。

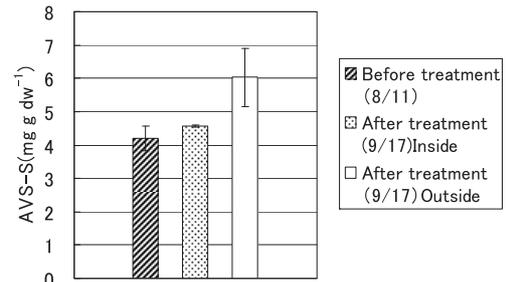


Fig. 16 AVS-S value in the bottom mud before and after treatment.

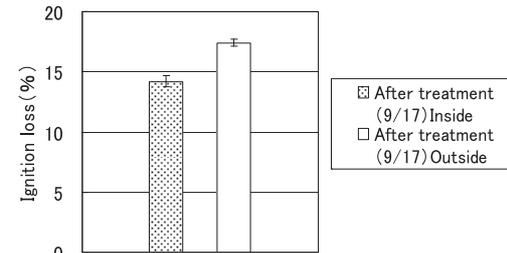


Fig. 17 Ignition loss rate of bottom mud after treatment.

## 3. マイクロバブル発生装置

### 1) 気泡撮影

気泡個数のピークは空気流量  $0.1, 0.5 \text{ L min}^{-1}$  において  $20 - 25 \mu\text{m}$ 、 $0.2, 0.3 \text{ L min}^{-1}$  において  $25 - 30 \mu\text{m}$ 、 $1.0 \text{ L min}^{-1}$  において  $100 \mu\text{m}$  以上であった (Fig. 18)。 $1.0 \text{ L min}^{-1}$  以外では、気泡数のピークは  $30 \mu\text{m}$  前後と似ていたが、空気流量が増すほど、 $100 \mu\text{m}$  以上の大きい気泡の数が増加した。

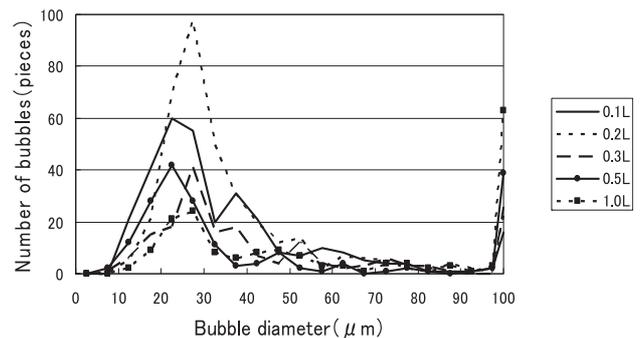


Fig. 18 Bubble size distribution for different air flow rate.

### 2) 現場実験① (2007年10月17日)

空気流量を  $0.2 \text{ L min}^{-1}$  として実験を行った。装置の海水流量は  $14.1 - 15.1 \text{ L min}^{-1}$  であった。稼働 1 時間後、3 時間後と時間が経過するにつれ、ノズル直下の底層において DO の上昇が見てとれることから、狭い範囲ではあるが底層に酸素を供給できたようであった。(Fig. 19-(a)(b)(c))、●はノズルの位置を示す。以下の図でも同様。 $\sigma_t$  は稼働前、稼働

中ともに水平方向にほぼ均一な値を示し、装置の稼動による海水の鉛直的な移動はみられなかった。

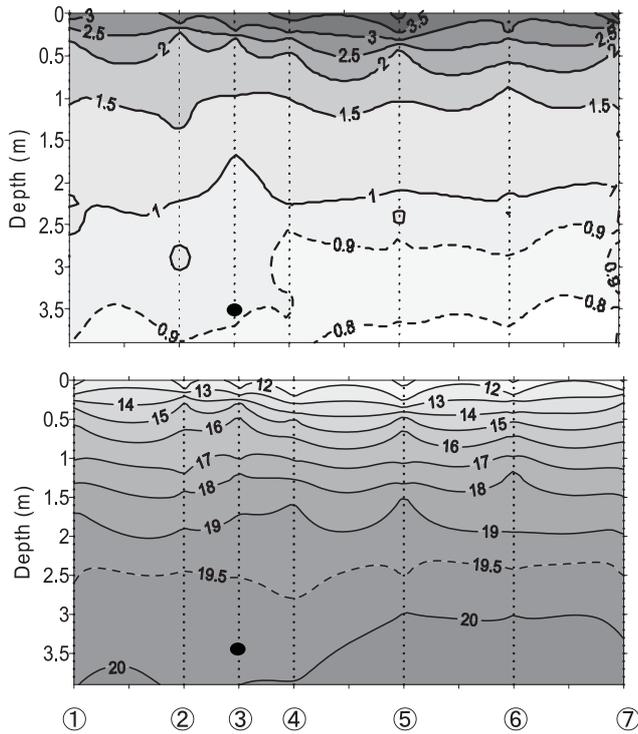


Fig. 19-(a) Vertical distributions of DO and density ( $\sigma_t$ ) before microbubble generator operation.

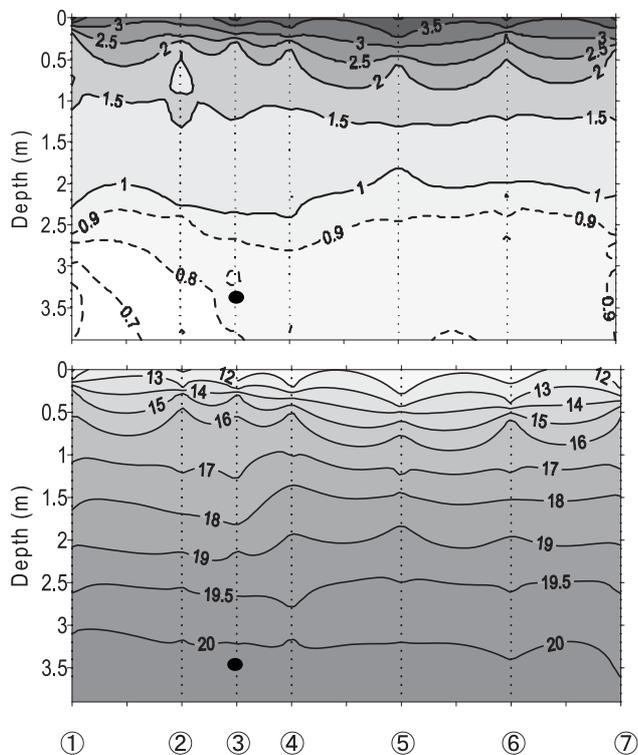


Fig. 19-(b) Vertical distributions of DO and density ( $\sigma_t$ ) after 1 hour from the initiation of microbubble generator operation.

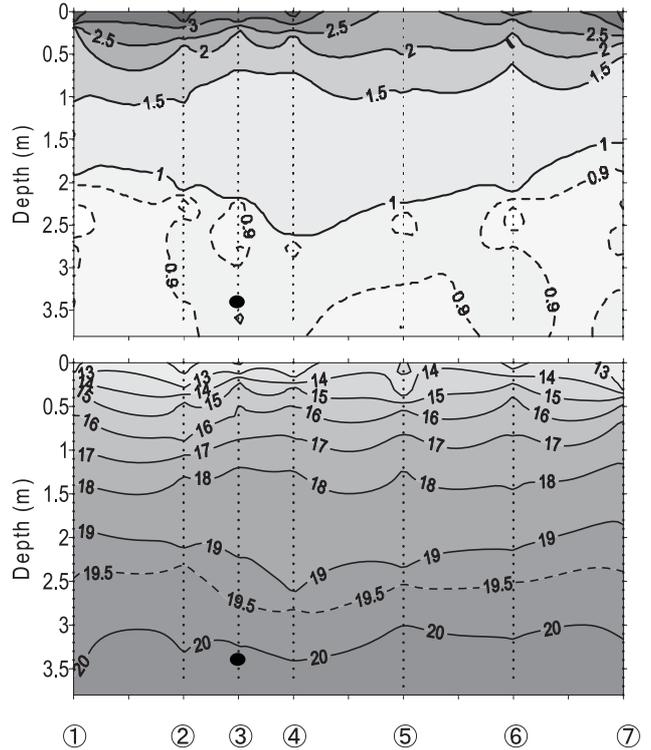


Fig. 19-(c) Vertical distributions of DO and density ( $\sigma_t$ ) after 3 hour from the initiation of microbubble generator operation.

### 3) 現場実験② (2007年10月22 - 23日)

次に、空気流量を  $1.0 \text{ L min}^{-1}$  に増加させ実験を行い、空気流量の違いにより DO の空間分布の違いを調べた。装置の海水流量は  $12.0 - 12.3 \text{ L min}^{-1}$  であった。装置稼動中には、装置稼動前と比較してノズル直近で DO の上昇がみられ、その影響はノズル直下、斜め上方にも及んでいるようであった (Fig. 20-(a)(b)(c)(d))。しかしノズル直下以外の海底直上では DO の上昇効果は低いようであった。 $\sigma_t$  の分布から、稼動4時間後、1日後にはノズル直下から50 cm 南の地点にかけて底層水の上昇がみられた。これは、気泡撮影の際に確認されたものと同様の、径の大きい気泡の浮力によるものと思われた。

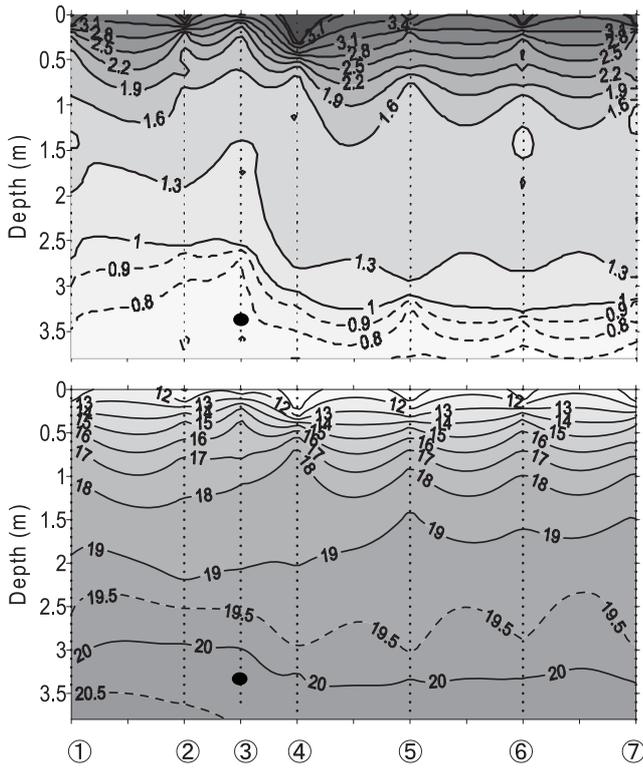


Fig. 20-(a) Vertical distributions of DO and density ( $\sigma_t$ ) before microbubble generator operation.

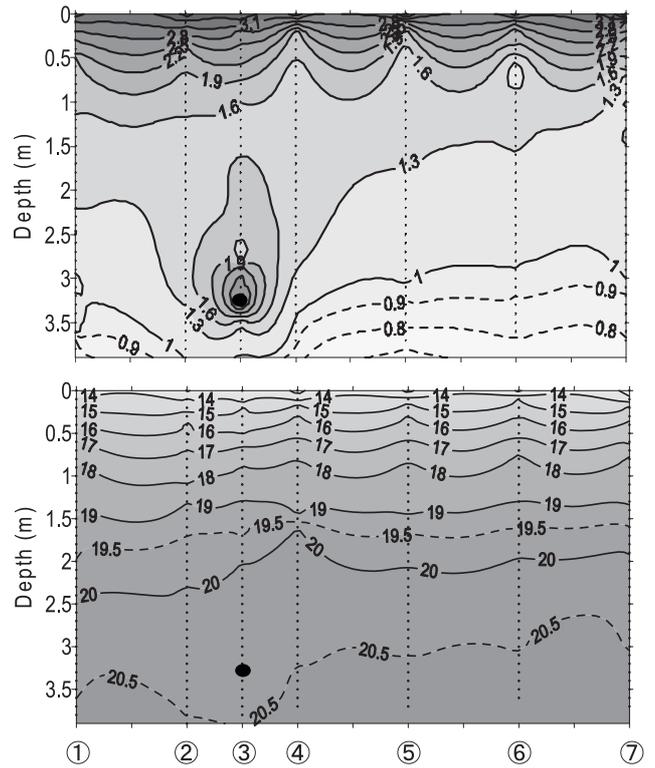


Fig. 20-(c) Vertical distributions of DO and density ( $\sigma_t$ ) after 4 hour from the initiation of microbubble generator operation.

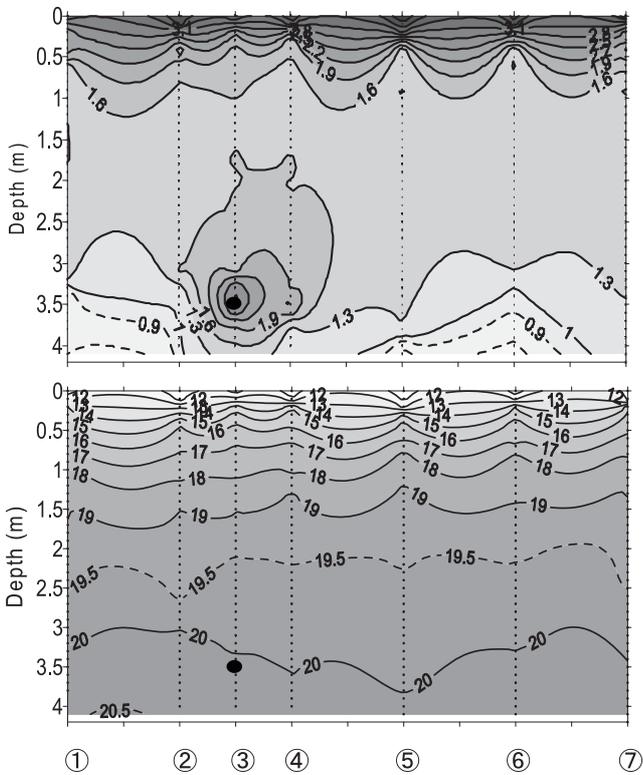


Fig. 20-(b) Vertical distributions of DO and density ( $\sigma_t$ ) after 30 minutes from the initiation of microbubble generator operation.

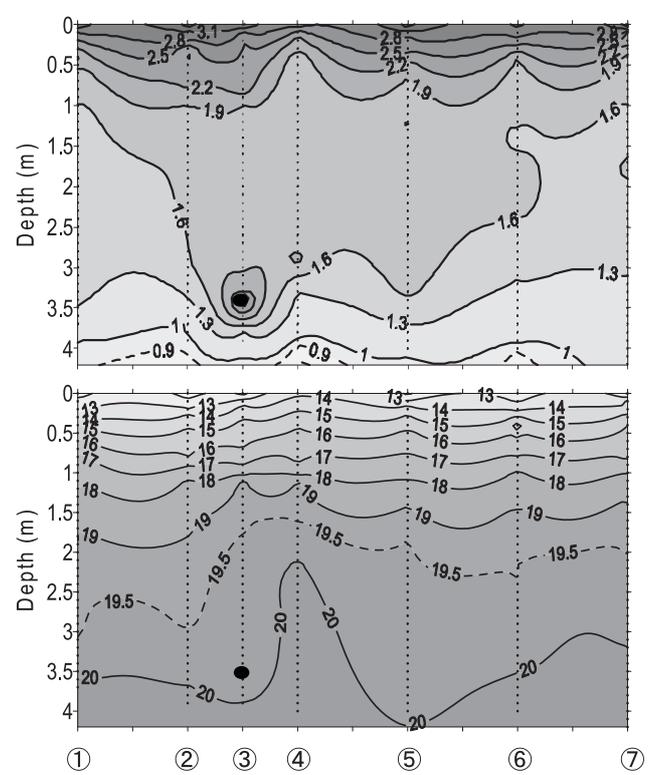


Fig. 20-(d) Vertical distributions of DO and density ( $\sigma_t$ ) after 1 day from the initiation of microbubble generator operation.

#### 4) 現場実験③ (2007年11月2日)

次に、実験①における底層の DO の上昇が装置によるものかを確認するため、空気流量  $0.2 \text{ L min}^{-1}$  のままで、装置停止後にも観測を行った。装置の海水流量は  $14.1 - 14.9 \text{ L min}^{-1}$  であった。この実験では、流量計の目盛りは  $0.2 \text{ L min}^{-1}$  となるように設定したが、実験終了後に流量計と装置をつなぐチューブの接続部分から空気が漏れていたことが判明したため、実際の空気流量は  $0.2 \text{ L min}^{-1}$  よりも大きくなっていただと思われる。

装置稼働後の DO は空気流量  $1.0 \text{ L min}^{-1}$  で行った時と同様な分布を示した (Fig. 21-(a)(b)(c)(d))。すなわちノズル直近と直下、斜め上方で DO の上昇が確認されたが、ノズル直下以外の海底直上では DO の上昇はみられなかった。装置停止後には稼働3時間後にみられたノズル周囲の高い DO ( $2 \text{ mg L}^{-1}$  以上) は観測されず、深度約  $1 - 3 \text{ m}$  の DO は  $0.1 \text{ mg L}^{-1}$  程度低下していた。 $\sigma_t$  の分布から、稼働1時間後、3時間後にはノズル直近から  $50 \text{ cm}$  南、もしくは  $50 \text{ cm}$  北の地点で底層水の上昇がみられた。

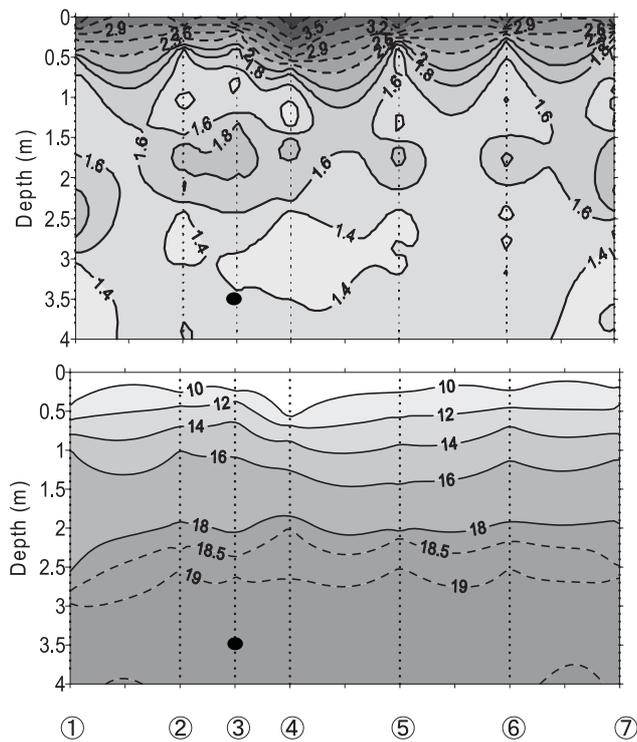


Fig. 21-(a) Vertical distributions of DO and density ( $\sigma_t$ ) before microbubble generator operation.

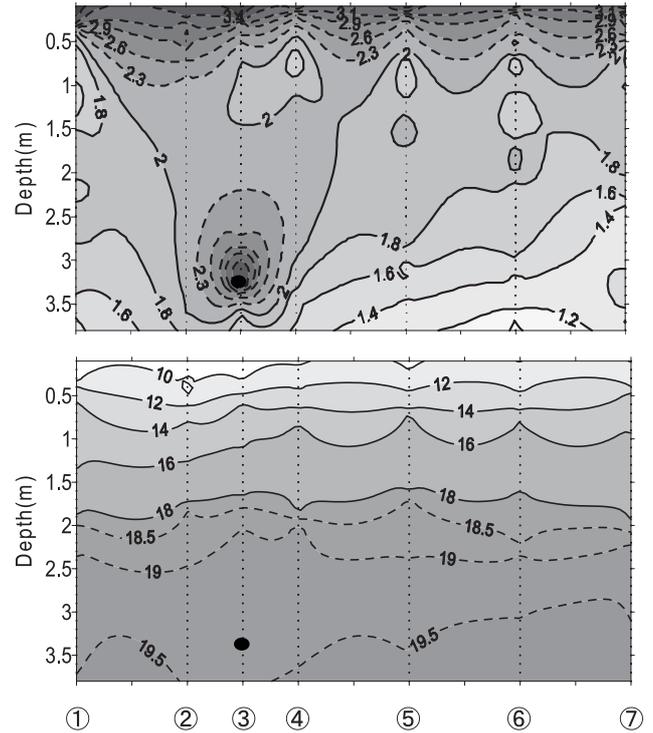


Fig. 21-(b) Vertical distributions of DO and density ( $\sigma_t$ ) after 1 hour from the initiation of microbubble generator operation.

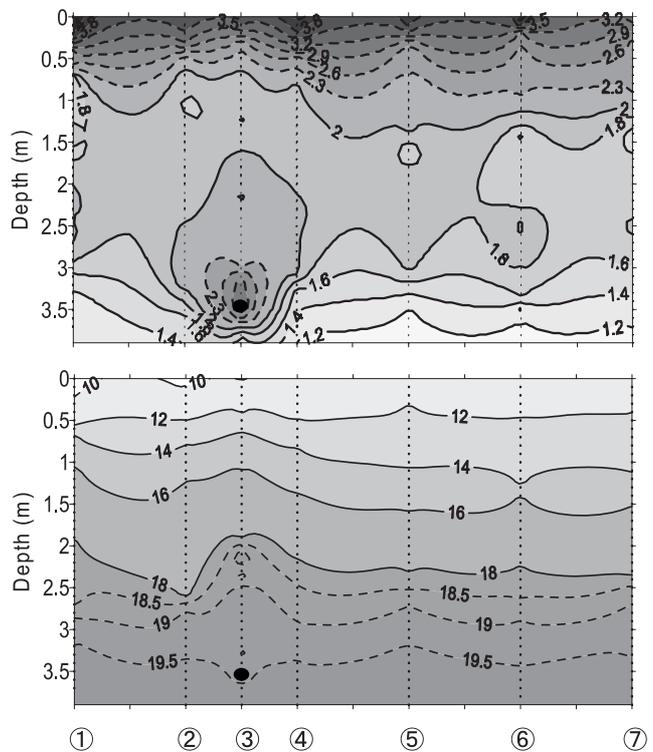


Fig. 21-(c) Vertical distributions of DO and density ( $\sigma_t$ ) after 3 hour from the initiation of microbubble generator operation.

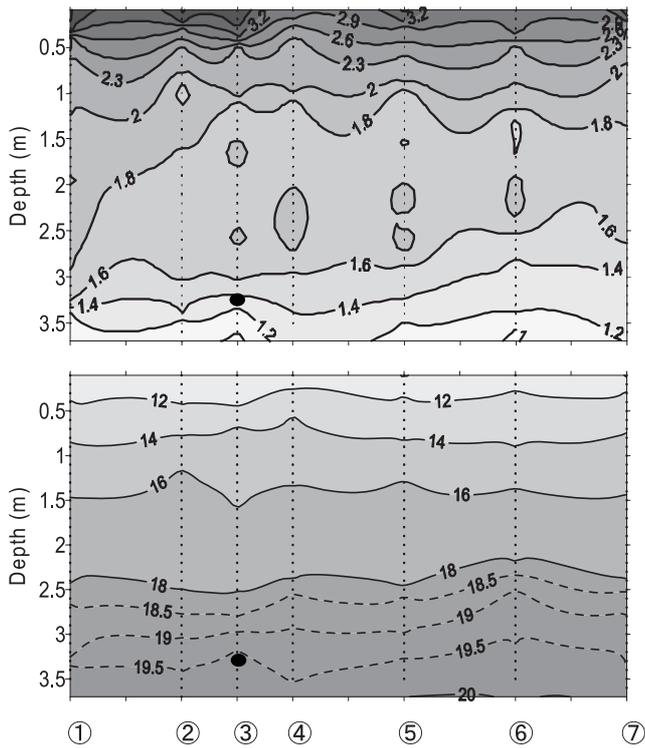


Fig. 21-(d) Vertical distributions of DO and density ( $\sigma_t$ ) after the end of operation.

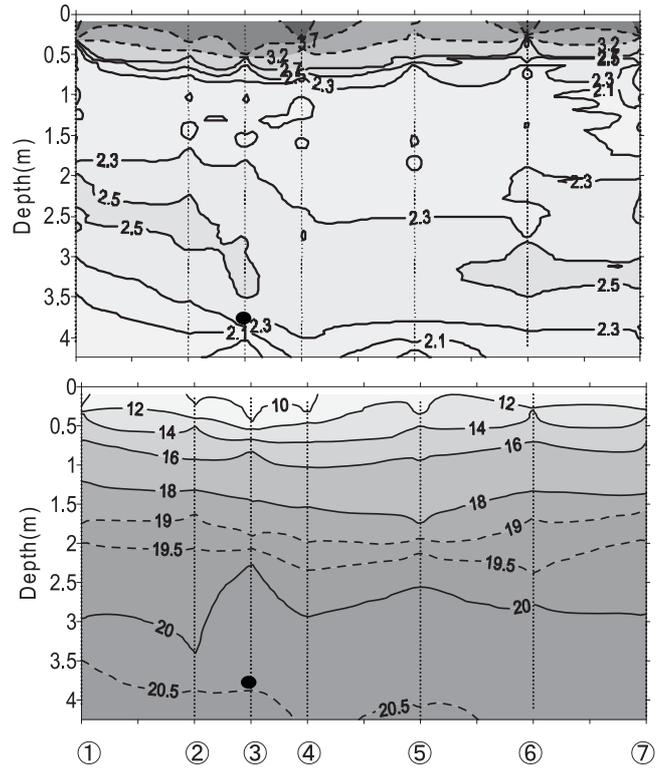


Fig. 22-(a) Vertical distributions of DO and density ( $\sigma_t$ ) before microbubble generator operation.

#### 5) 現場実験④ (2007年11月16日)

流量計と装置の間の空気漏れ箇所を補修し再実験を行い、装置停止後も観測を行った。なお、実験前に水中カメラで確認したところ、空気流量  $0.2 \text{ L min}^{-1}$  では気泡の量が実験①のときよりも少なく見えたため、流量は  $0.3 \text{ L min}^{-1}$  に設定した。海水流量は  $15.1 \text{ L min}^{-1}$  であった。

装置稼動1時間後には深度3 m付近の  $\sigma_t$   $19.75 - 20.25$  の層を中心に DO  $2.5 \text{ mg L}^{-1}$  以上が確認された (Fig. 22-(a)(b)(c)(d))。  $\sigma_t$  をみても実験②, ③のような底層水の上昇がみられなかったため、ノズルよりやや上方の一定の層に酸素を供給できたものと思われる。しかし稼動3時間後にはこのような現象はみられなくなった。この理由は不明であるが、潮汐による水平移動により、酸素が供給された水塊が移動した可能性が考えられる。稼動1時間後、3時間後ではともに、実験②, ③のようなノズル直近で DO が高くなったり、底層水が上昇するといった現象はみられなかった。

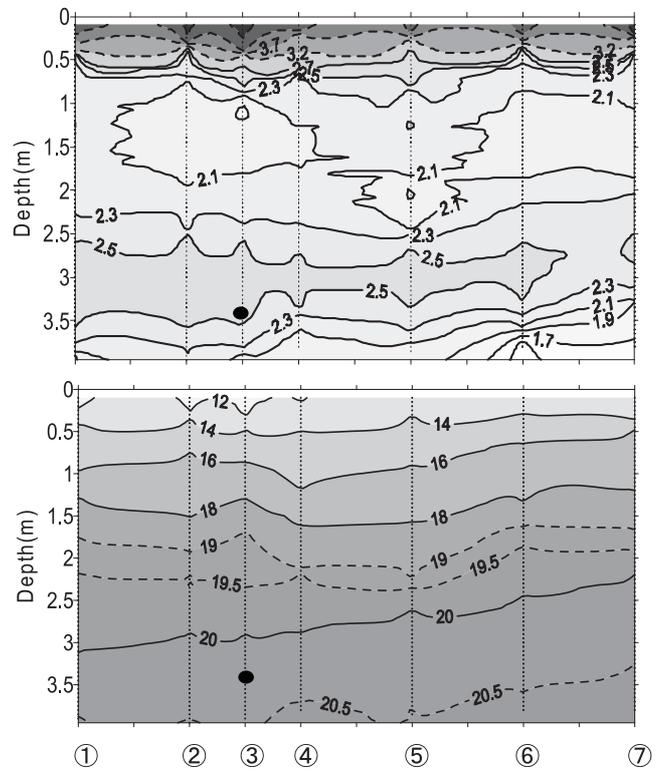


Fig. 22-(b) Vertical distributions of DO and density ( $\sigma_t$ ) after 1 hour from the initiation of microbubble generator operation.

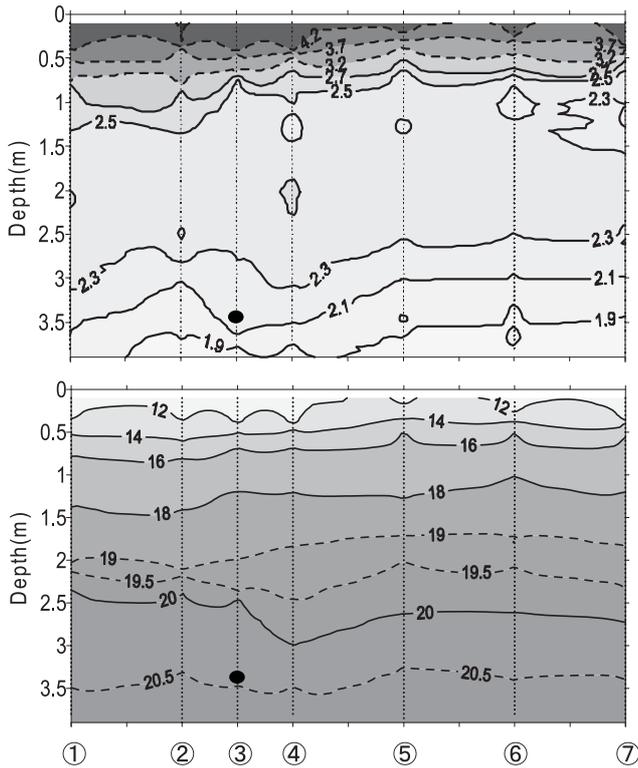


Fig. 22-(c) Vertical distributions of DO and density ( $\sigma_t$ ) after 3 hour from the initiation of microbubble generator operation.

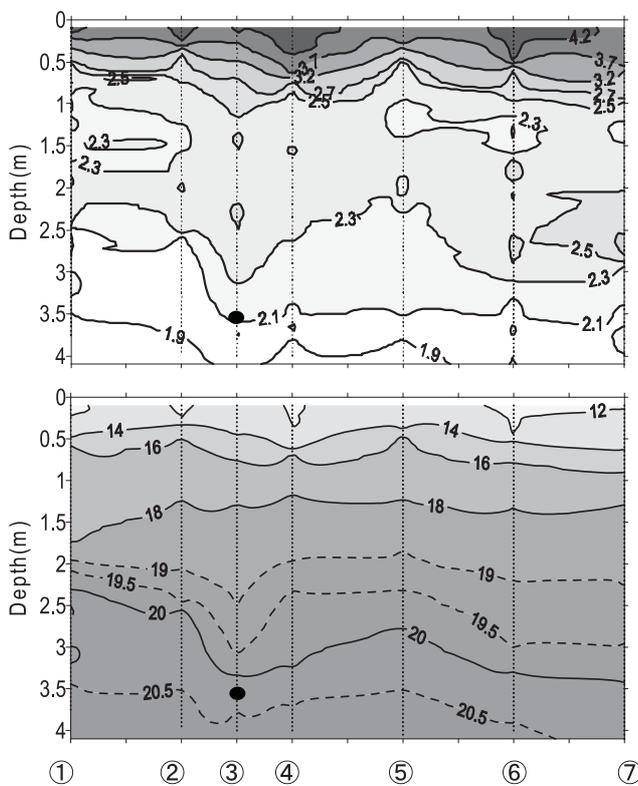


Fig. 22-(d) Vertical distributions of DO and density ( $\sigma_t$ ) after the end of operation.

## 6) 現場実験⑤ (2008年7月31 - 8月26日)

気象や潮汐などの環境条件が異なっても底層での DO が上昇することを立証するために、装置を 24 時間稼働させ、稼働前と稼働後を比較した。計 9 回のデータについてそれぞれ稼働後から稼働前の値を引き、それらの平均を求め装置の効果の評価した。空気流量は  $0.2 \text{ L min}^{-1}$  とした。装置の海水流量は平均  $14.5 \text{ L min}^{-1}$  であった。

装置稼働後では、表層付近での DO の変化に関係なく、底層でわずかではあるが DO の上昇が確認された (Fig. 23-(a)(b))。特に、ノズル直近での上昇が大きかった。Fig. 23-(a) より、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。しかし、マイクロバブルの注入により底層水の DO の上昇はみられなかった。これは、底泥による酸素消費が大きいと考えられる。

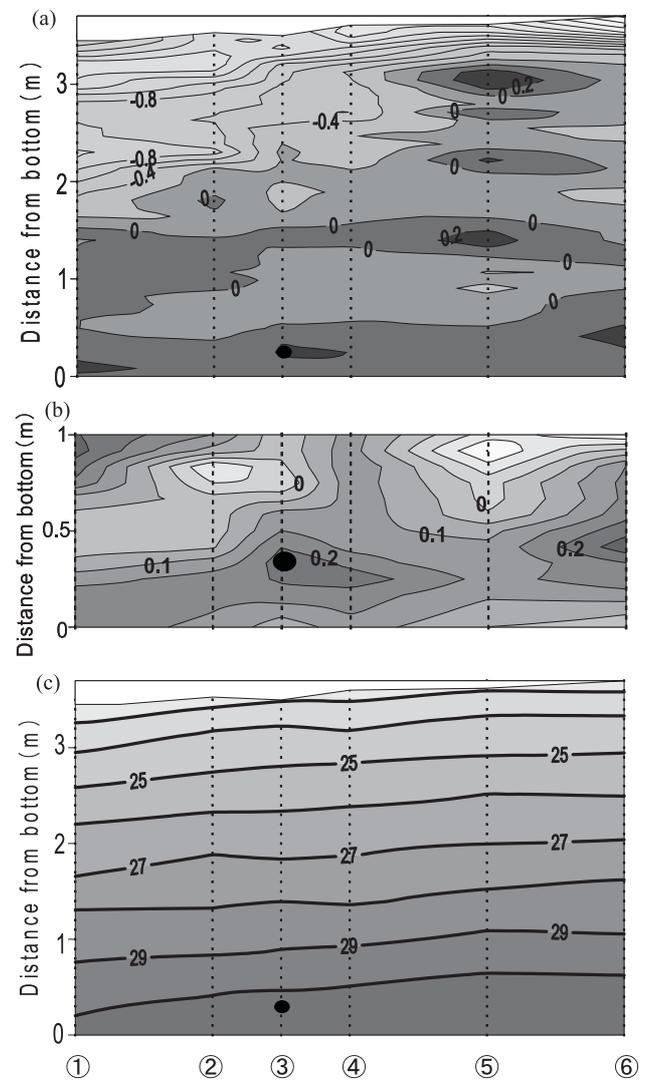


Fig. 23 Vertical distributions of the mean concentration of DO (a), its closed up near bottom (b) and density ( $\sigma_t$ ) (c) for 9 experiment.

#### 4. まとめ

水質調査により係船場は、年間を通じて表層から底層にかけて成層構造を成しており、底層では年間のうち半年以上が貧酸素状態であることが確認された。成層構造には、下水処理場や目黒川などによる淡水流入の影響が大きいことが示唆され、これにより底層の貧酸素状態の期間が半年以上にわたって続いていると考えられる。また、底質調査による強熱減量の値において係船場は 17.4%であり、山田ら<sup>18)</sup>による福山湾の 7.9 - 12.8%や、東京都環境局自然環境部<sup>19)</sup>による東京湾湾奥部の 12.0%と比べ、高い値を示した。これより、有機物分解のために酸素が消費されることも、底層の貧酸素状態を持続させていると考えられる。

このような水質環境を踏まえた上で、本研究では二つの貧酸素改善実験を試みた。貧酸素改善結果としては、ソーラーシーオアシスが平均で DO が  $0.91 \text{ mg L}^{-1}$  の上昇を示し、マイクロバブル発生装置では  $0.24 \text{ mg L}^{-1}$  の上昇を示した。しかし、ソーラーシーオアシスは効果の範囲が表層水放出部付近のみに限定された。また効果が表層の DO に左右され、水域全体が貧酸素状態となると効果がないという問題が挙げられた。一方、マイクロバブル発生装置では、ソーラーシーオアシス程の DO の上昇は見られなかったが、恒常的に効果が得られた。また、効果の範囲も底層部全体に広がっていることが示唆された。

今後は、実際にマイクロバブルが溶け込んだ海水が横方向に広がっているのかを確認するために、装置の周囲に囲いを設置し、その中での DO の変化を確認することが必要である。また、より詳細な酸素増加量を算出するために、底層での酸素消費速度を求めることが必要と考えられる。

これを基に、来年以降は当初の目的である生物の避難場所としての能力を把握するために、装置を貧酸素の時期に長期間稼働し、効果について生物・化学的に検証する必要がある。

#### 謝辞

本研究を行うにあたり、係船場での作業および、青鷹丸、ひよどりでの観測においては栗田嘉宥船長（現海鷹丸船長）、酒井一英艇長、山根勝行機関長、ならびに乗組員の方々にご協力いただいた。また、装置作成には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) 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.
- 2) 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.
- 3) 柳哲夫. シンポジウム「貧酸素水塊」のまとめ. 沿岸海洋研究ノート 1989; 26: 141-145.
- 4) 山口創一, 経塚雄策. 諫早湾における貧酸素水塊の形成機構. 海の研究 2006; 15: 37-51.
- 5) 山尾理. 東京湾奥部における底層溶存酸素濃度の時間変化(2003年 - 2005年). 海洋情報部技報 2006; 24: 116-125.
- 6) 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.
- 7) 松岡敷充, 水島康一郎, 広瀬雄太. 有明海・諫早湾における貧酸素水塊の出現状況(2003 - 2004年). 月刊海洋 2005; 37: 827-832.
- 8) 田中真史, 佐々木敦, 柴山和也, 磯部雅彦. 窪地海域を対象とした微細気泡エアレーションによる貧酸素水塊改善効果の解析. 海洋工学論文集 2004; 51: 1161-1165.
- 9) 鯉淵幸生, 磯部雅彦, 田中陽二. マイクロバブルによる沿岸域の水環境改善への取り組み. 混潮流 2006; 20: 207-215.
- 10) 門谷茂. 硫化物の簡易測定マニュアル 全国漁業協同組合連合会 社団法人かん水養魚協会. 東京, 神戸, 2002: 15.
- 11) 環境庁水質保全局水質管理課編. 改訂版底質調査方法とその解説. 日本環境測定分析協会 東京, 1988: 171.
- 12) 東京電力株式会社. 事後調査報告書工事の完了後一品川火力発電所更新事業一. 2004: 273.
- 13) 深山顕寛. 諫早湾における貧酸素水塊の動態に関する研究. 東京大学修士論文 2004.
- 14) Yamochi, S., H. Ariyama and M. Sano. Occurrence and hypoxic tolerance of the juvenile *Metapenaeus ensis* at the mouth of the Yodo river, Osaka. Fish Sci. 1995; 61: 391-395.
- 15) Miller, D., S. L. Poucher, L. Coiro. Determination of lethal dissolved oxygen levels for selected marine and estuarine fishes, crustaceans, and a bivalve. Marine Biology. 2002; 140: 827-832.
- 16) 横山寿, 西村昭史, 井上美佐. 熊野灘沿岸の魚類養殖場におけるマクロベントス群集と堆積物に及ぼす養殖活動と地形の影響. 水産海洋研究 2002; 66: 133-141.
- 17) 鯉淵幸生, 磯部雅彦, 佐々木敦, 藤田昌史, 五明美智男, 栗原明夫, 田中昌史, Mohammad Islam, 鈴木俊之. 貧酸素水塊改善に向けた現地微細気泡実験. 海岸工学論文集 2004; 51: 1156-1160.
- 18) 山田寛, 今林博道, 高田詔民. 福山湾富栄養域におけるスピオ科多毛類 *Polydora cornuta* の着底と生残に及ぼす貧酸素水の影響. 日本水産学会誌, 2001; 67: 814-820.
- 19) 東京都環境局自然環境部. 平成 16 年度東京湾調査結果報告書, 2006; 57.

**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**小島 諒子<sup>\*1</sup>・遠矢 亮<sup>\*1</sup>・石丸 隆<sup>\*2</sup>・賞雅 寛而<sup>\*3</sup>・川上 啓介<sup>\*1</sup>・大塚 和臣<sup>\*4</sup>

(<sup>\*1</sup> 東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科  
<sup>\*2</sup> 東京海洋大学海洋科学部海洋環境学科  
<sup>\*3</sup> 東京海洋大学海洋工学部海洋電子機械工学科  
<sup>\*4</sup> 東京水産大学水産学部海洋環境学科)

**要旨：** 貧酸素水塊改善を目的として本品川キャンパス係船場にてソーラーシーオアシス並びにマイクロバブルによる貧酸素改善実験を行った。また、実験を行う以前から係船場の環境特性を把握するため、水質の調査も行った。係船場の環境は東京湾と比べ水温が高く、塩分が低い。これは周辺にある芝浦水再生センターや品川、大井火力発電所の放流水の影響であることが示唆された。また、年間を通じて成層しており、底層の貧酸素状態は2006年5月－11月、2007年6月－11月に起きていた。ソーラーシーオアシスの実験では、装置内外のDO差は平均で $0.91 \text{ mg L}^{-1}$  高い値が示された。この差の変化は、取水口部分のDOとよく対応していた。マイクロバブルの実験では、空気流量が $1.0 \text{ L min}^{-1}$  の場合には、径の大きな気泡が発生しその周囲のみDOが高くなったが、それと連動して底層の海水が上昇し海底付近では効果が見られなかった。空気流量が $0.2 \text{ L min}^{-1}$  の場合には海水の上昇は確認されず、等密度面に添って緩やかに酸素を供給した。しかし、その量は貧酸素状態を解消するに至らず今後さらなる改良が望まれる。

**キーワード：** 環境特性、貧酸素水塊、係船場、汽水域、溶存酸素、マイクロバブル