

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改善効果の解析

田中 真史*・佐々木 淳**・柴山 知也***・磯部 雅彦****

貧酸素水の改善技術として注目されつつある微細気泡エアレーション技術の実海域における効果や適用性の検討を目的として、東京湾旧船橋航路の窪地において現地実験を行った。エアレーションの規模からすると底層の貧酸素水はいわば無限に存在していると見なせるため、エアレーションに伴う上昇流を誘起してしまうと改善が見込めないが、密度躍層の存在下で気泡を高品質に保つことで上昇流を抑制できると、成層を維持しつつ下層の貧酸素水を改善可能なことが分かった。現地実験結果を基に酸素収支に関する簡単なボックスモデルを構築し、一定の改善効果を得るための上昇流速の許容上限値を決定する等の定量的な検討を行い、本技術の有効性を示した。

1. はじめに

東京湾をはじめとする閉鎖性内湾においては富栄養化に起因してしばしば貧酸素水塊が現れ、底生生物のへい死や青潮の発生等によって生態系の劣化を引き起こしている。その根本的な解決には富栄養状態の改善が不可欠であるが、貧酸素水中に酸素を直接溶解させて貧酸素の改善を図る対症療法の一つとして、微細気泡技術が注目されつつある。

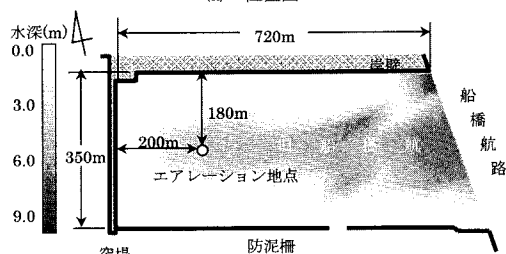
一般に微細気泡は環境中に放出された後、水中で徐々に酸素が溶解するものと認識されてきた。しかし、植松 (2001) や佐々木ら (2003) によれば、エゼクター部において気泡が生成される際に瞬間的かつ効率的に酸素が溶解し、いわば高酸素水が環境中へ放出されるものと理解されている。さらに微細気泡は上昇速度が小さく、高橋 (2003) が確認したように水中を漂ううちに残った気体も溶解して完全に消滅するという圧壊現象も見られることから、気泡を均一に微細に保って長時間底層に滞留させることができれば、効率的な溶存酸素 (以下、DO) 濃度の改善を図ることができると考えられる。

貯水池では道奥ら (2000) によって微細気泡を用いた水質改善の取り組みが始まるなど、いくつかの適用例がある。一方、海域では、空間規模と移流効果が格段に大きいことからその適用は極めて困難である。しかしながら、航路や浚渫窪地といった閉鎖性の強い海域では水塊の停滞性が強いことからその適用性を検討する余地があると考えられ、また当該海域が青潮水の起源となっていることからその有効性が期待される。

そこで本研究では、底層水塊が貧酸素化する夏季の東京湾奥部の停滞水域である旧船橋航路の窪地において、微細気泡エアレーションの適用性に関する基礎的検討を



(a) 位置図



(b) 水深図

図-1 旧船橋航路概要図

行う。具体的には、当該海域において約1ヶ月間の現地実験を実施し、併せて水質と流動のモニタリングを行うことで、水質変化とエアレーション効果を把握する。次に、観測結果を基にして酸素収支に着目した簡単なボックスモデルを構築し、微細気泡によるエアレーション効果の定量的な検討を行う。

2. 現地実験

微細気泡エアレーションの効果을把握し、実海域における適用性を検討する目的で、2003年8月27日から10月3日にかけて千葉県船橋市の旧船橋航路において微細気泡発生装置を設置し、現地実験を行った。図-1に示す旧船橋航路は東西方向におよそ720 m、南北方向におよそ350 mで、北側を岸壁に、西側を突堤に、南側を防泥柵に囲まれ、海水の流入は東側の船橋航路と防泥柵の開開口部を通じてのみなされる極めて海水交換の小さい海域である。微細気泡装置は旧航路奥部の突堤から200 m、岸壁から180 mの地点に設置した。設置地点の水深はおよそ4.4 mだが、窪地地形のため夏季には恒常的に下層

* 修(工) (株)テトラ 土木技術部
** 正会員 博(工) 横浜国立大学助教授 大学院工学研究院システムの創生部門
*** フェロー 工 博 横浜国立大学教授 大学院工学研究院システムの創生部門
**** フェロー 工 博 東京大学教授 大学院新領域創成科学研究科環境学専攻

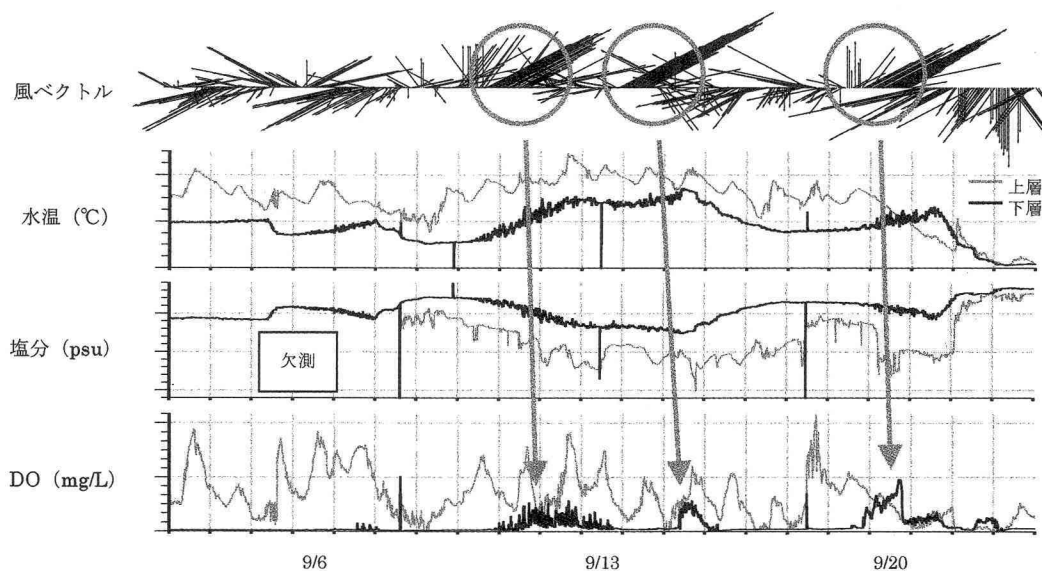


図-2 風ベクトルおよび西測点における上下層の水質変動

の DO がほぼ 0 mg/L となる。

微細気泡装置は、(株)流体工学研究所製の OHR ラインミキサーMX-25を採用した。写真-1に、本実験に先立つ予備実験において観察された、微細気泡特有の雲状に白濁した気泡放出の様子を示す。本装置は水中ポンプで現地海水を、コンプレッサーで圧縮空気をそれぞれラインミキサーに送り込む独自のシステムとなっており、取水側となる水中ポンプと放水側となるラインミキサーの設置間隔をおよそ 10 m として海底に沈設した。コンプレッサーや発電機は北側の岸壁上に設置した。

モニタリング用の自記式水質計は原則として鉛直 3 層に設置し、上層は海面から 0.5 m、中層は上層から 2.0 m、下層は海底から 0.5 m の位置となるよう配置した。これを微細気泡放出点の近傍と東西南北各点の計 5 地点においてブイからつり下げる形で係留した。これら自記式水質計による連続計測に加えて、多項目水質計等による船上調査を週 2, 3 回の頻度で実施した。なお、本観測全般に関しては、鯉淵ら (2004) を参照されたい。

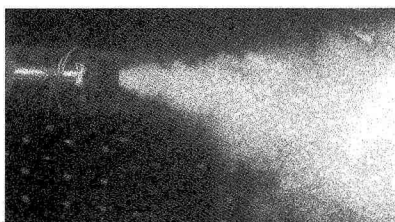


写真-1 ラインミキサーからの噴出状況

3. 結果と考察

(1) 水質場の連続計測

実験期間中の全般的な水質変動の様子を把握するため、図-2に9月3日0時から9月24日0時までの3週間における、風ベクトル(気象庁千葉測候所)および西測点における上下層の水温(°C)、塩分、DO(mg/L)の変動を示す。

上層の水温および DO がおよそ一日を周期として変動しているのは、気温および日射量が一日周期で変動するため、DO の増加は日射量の増加に対応した光合成によるものと考えられる。一方、下層の水温、塩分には数日周期での緩やかな増減が見られるが、これは風向・風速に起因する現象と考えられる。すなわち、北寄りの風が吹けば上層水が沖に流出し、代わって沖側の低温・高塩分な下層水が湾奥で接岸湧昇する様子を表している。逆に、南西風のときは高温・低塩分の上層水が湾奥に集積した様子を捉えている。このときは DO 濃度の高い表層水が旧船橋航路にも流入するため、それ以前はほぼ 0 を示していた DO が振動しながら上昇する様子が見られた。一方、21 日頃からの台風接近に伴う北寄りの風の連吹により、22 日には青潮が発生したことを目視により確認している。なお、自記式水質計は装置からおよそ 10 m 以内に設置したが、何れもエアレーションの影響と見られる変化を捉えることはできなかった。

(2) エアレーション効果

図-3は、9月4日における塩分および DO(mg/L)の鉛直分布で、左図が装置直上、右図が装置から十分離れ

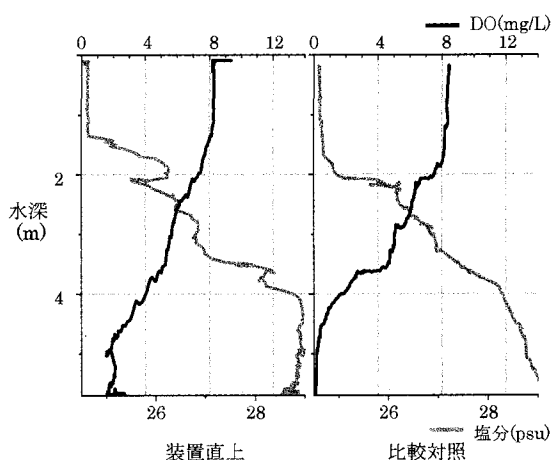


図-3 9月4日における塩分およびDOの鉛直分布

表-1 各条件による改善結果

	密度成層	気泡による上昇流	結 果
9月4日	あり	少ない	成層を維持して下層の改善
9月15日	あり	多い	装置直近を除き上層を一様に貧酸素化
9月23日	なし	少ない	貧酸素状態を促進

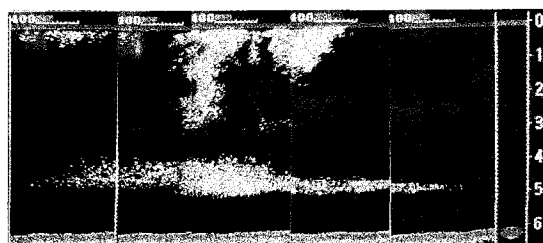
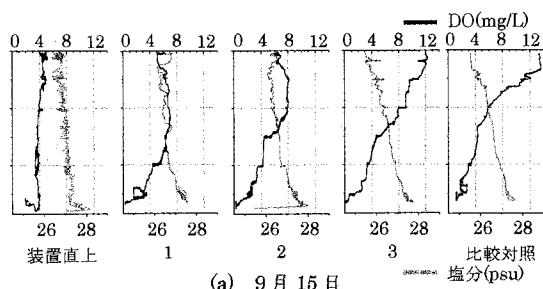
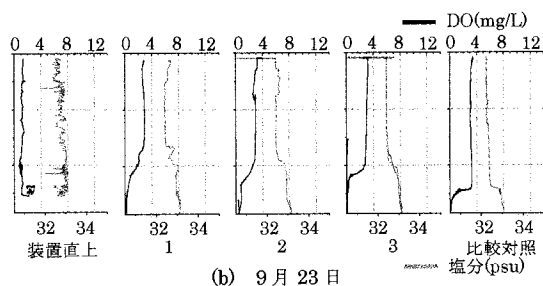


図-5 魚群探知機で捉えた気泡群



(a) 9月15日



(b) 9月23日

図-4 水平距離の違いによる塩分およびDOの鉛直分布

た比較対照点におけるものである。比較対照点で形成されている成層が装置直上においても維持されつつ、3.5 m以深におけるDO濃度の改善が確認できる。

同様に、図-4 (a), (b) はそれぞれ9月15日と23日における鉛直分布で、装置直上から1 m間隔で測定した結果も併せて示した。15日は空気流量を大きく設定して装置を稼働したところ、放出された気泡中には大粒径の気泡が混在してしまい、その結果強い上昇流が誘起されて装置直上では成層が完全に破壊された。これによりDOも鉛直方向に一様となり、装置直近を除いては改善が見られなかった。23日は空気流量を再び絞って4日と同流量に設定したが、前日に大規模な青潮が発生したた

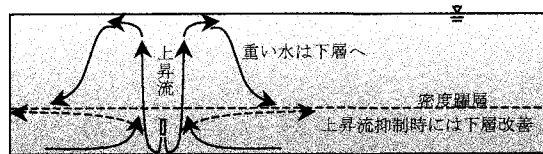


図-6 流動構造の模式図

め比較対照点においても密度の一様化と貧酸素化が著しく、15日と同様に改善は見られなかった(表-1)。さらに、装置近傍における気泡の広がりといった局所的な流動場の様子を船上から簡便に捉えるため、魚群探知機を用いた気泡モニタリングを考案し、気泡群の拡散状況を視覚的に捉えた。図-5は23日に本多電子(株)製魚群探知機HE5620によって得られた画像だが、装置直上に上昇する気泡が存在しながらも、一定深度で側方に拡がる気泡群の様子が確認された。

9月4日を除く以上の結果は、大粒径の気泡が混在したり、あるいは強固な密度成層が存在しないことによって強い上昇流が誘起され、周囲から引き込まれた底層水が上層へ到達し、その後再び沈降して等密度層で側方へ貫入するといった流動構造が形成されていたことを示している(図-6)。実験水槽のような完全閉鎖系に近い小領域であれば、このような鉛直循環の継続によりDO濃度の改善が見込めると期待されるが、本実験で対象としたような海域では装置規模からすると底層貧酸素水がいわば無限に存在しているとみなせるため、このような上昇流を引き起こしてしまうと改善はほとんど不可能であると考えられる。

4. ボックスモデル解析

(1) DOの拡散方程式

現地実験においては大型気泡の混入により上昇流を誘起してしまうとDOの改善は困難となる一方、密度成層が存在し、かつ気泡径を微細に保つことが可能な場合には、上昇流を抑制することで上層の貧酸素化を防ぎながら下層水の改善が可能なが分かった。これを踏まえ、微細気泡エアレーションの効果を定量的に評価するため、DO収支に着目した簡単なボックスモデルを構築した。図-6で示した流動構造を図-7左に模式的に示し、底層のDO濃度改善域として仮定した半径(以下、影響半径) r 、下層水の層厚(以下、下層厚) h の円筒領域 V (体積 V)におけるDO収支の模式図を図-7右に示した。

円筒領域 V がDO濃度 C_0 で定常状態にあるとき、濃度の非定常項は、

$$\frac{\partial C}{\partial t} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

と置ける。次に、 V 側面の外側と直上層の濃度をそれぞれ C_{out} 、 C_{top} と仮定して定常状態におけるDO収支を考える。鉛直方向の拡散係数を K_v 、領域 V の底面積を A_b とすれば鉛直拡散による上層からの供給量は、

$$K_v \frac{\partial C}{\partial z} A_b = \frac{2\pi r^2}{h} K_v (C_{top} - C_0) \quad \dots\dots\dots (2)$$

上昇流に起因する周囲底層水の引込み流速を v_s 、領域 V の側面積を A_s とすれば、この引込みによる酸素流入量は、

$$v_s A_s C_{out} = 2\pi r h v_s C_{out} \quad \dots\dots\dots (3)$$

これらが領域 V におけるDOの増加分である。次に減少分として、上昇流による水塊の移動速度を w_0 とすれば流出速度は、

$$w_0 A_b C_0 = \pi r^2 w_0 C_0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

水平方向の拡散係数を K_h とすれば側面からの拡散による流出速度は、

$$-K_h \frac{\partial C}{\partial r} A_b = -2\pi h K_h (C_{out} - C_0) \quad \dots\dots\dots (5)$$

単位時間単位面積当たりの底質の酸素消費量を ν_b とすれば底質における消費速度は、

$$\nu_b A_b = \pi r^2 \nu_b \quad \dots\dots\dots (6)$$

とそれぞれ記述できる。また、海水の密度を一定値 ρ とすれば海水の連続式は、

$$\rho v_s A_s - \rho w_0 A_b = 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

と表わせ、 $C_{out} = 0$ mg/Lを仮定してこれらを整理すれば、

$$S_{O_2} + \frac{2\pi r^2}{h} K_v - (C_{top} - C_0) - 2\pi h K_h C_0 - \pi r^2 (\nu_b + w_0 C_0) = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

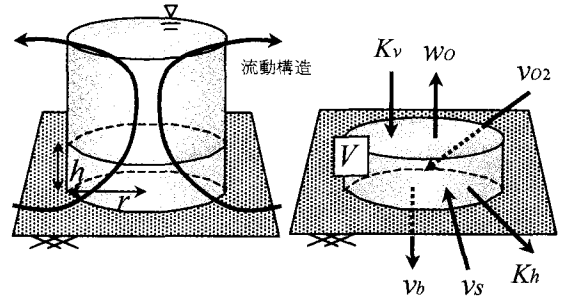


図-7 円筒領域 V とDO収支の模式図

が導かれる。ここで、 S_{O_2} はエアレーションによる単位時間当たりの酸素供給速度である。

(2) パラメータの設定

各パラメータは、例えば図-3に示す9月4日の調査結果から推測することができる。図-3より密度躍層の深度を3.5mと見ると、下層厚 h は水深5.7m-3.5mより2.2mと設定できる。直上層濃度 C_{top} は3.5mにおけるDO濃度5mg/L、定常状態濃度 C_0 は底層が0→2mg/Lに改善したことから2mg/Lとそれぞれ読み取れる。また、影響半径を $r=1$ m、底質の酸素消費量を $\nu_b=1.0$ gm⁻²day⁻¹とそれぞれ仮定した。なお当日の条件から、エアレーションによる供給速度は $S_{O_2}=5.7$ g/minである。次いで、拡散係数については、上昇流速 w_0 に矛盾の生じないように設定した。すなわち、湾内の水平方向拡散係数として考えられるおよそ $1 \times 10^{-4} \sim 10^{-1}$ の範囲内で、 w_0 が下向き(負の値)を持たないように定めた。鉛直方向拡散係数は水平方向の0.01倍とした(表-2)。

表-2 決定した拡散係数

水平方向拡散係数	1×10^{-3} m ² /s
鉛直方向拡散係数	1×10^{-5} m ² /s

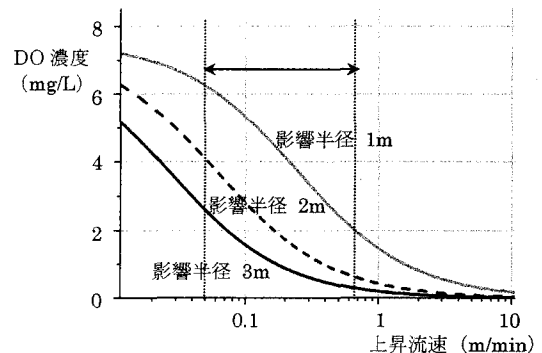


図-8 上昇流速と影響規模の関係

(3) 定量的検討

観測で得られた結果を用いて拡散方程式のパラメータを設定することで、効果を定量的に評価できるようになった。図-8に、影響半径 r を変化させたときの上昇流速 w_0 と定常状態における領域 V のDO濃度 C_0 の関係を示した。これにより、図-3に示す観測条件において、 $C_0=2\text{ mg/L}$ を $r=1\text{ m}$ で維持するためには、上昇流速 $w_0=0.67\text{ m/min}$ 以下である必要があり、それを超えると改善効果が望めないことが示された。また、現在一般的に知られている微細気泡の上昇速度はおよそ $3\text{ m/h}=0.05\text{ m/min}$ であり、そこまで上昇流速を抑えることが技術的に可能と考えられることから、上記の目標DO濃度を達成するための実現可能な上昇流速の範囲は図-8に矢印で示される。そこで、例えば上昇流速 w_0 を 0.07 m/min 以下に抑えることができれば、影響半径 $r=3\text{ m}$ においてDO濃度 C_0 が $0\rightarrow 2\text{ mg/L}$ まで改善することが期待できる。

さらに、現地実験において当初想定していた 10 m 程度の改善半径を得るために必要な流量を検討し、例えば上昇流速 w_0 を 0.1 m/min に抑えたらば、エアレーションによる酸素供給速度を $S_{O_2}=44.9\text{ L/min}$ にする必要があったと考えられる。なお、現地実験に先がけて行った予備実験により、本装置は空気流量が水流量のおよそ 0.1 倍のときに高品質な微細気泡を生成できたことから、上記の酸素供給速度を実現するための水流量は 450 L/min 程度であったと考えられる。

5. ま と め

本研究により得られた成果は次のようにまとめられる。

- ・自記式水質計および投込み式多項目水質計により、青潮発生過程を含めた約1ヶ月間の水質連続計測データを取得した。日射量や気温の変化に伴う水質変化や、風向、風速に起因して変動する湾内の鉛直構造を確認した。
- ・エアレーションによる底層貧酸素水改善効果は、上昇

流に起因する流動構造に強く依存することを示した。

- ・水塊の上昇流速と成層構造の関係から、密度躍層が上昇流を抑えて下層拡散を促し、下層の貧酸素水改善を助長することを示した。
- ・現地実験とボックスモデル解析により、影響半径を変化させたときの上昇流速と影響規模の関係を示し、一定の改善効果を得るための上昇流速の許容上限値を予測した。以上の考察の結果、微細気泡エアレーションの有効性が示唆された。

謝辞：現地実験の設計から遂行までご尽力頂いた東亜建設工業(株)技術研究所水理環境研究室長の五明美智男博士、同土木本部設計部の栗原明夫氏ならびに同研究室研究員の方々に大変お世話になった。また、現地実験では東京大学の鯉淵幸生講師に、データ解析においては横浜国立大学の島谷学助手に助言をいただいた。さらに観測全般でご協力頂いた横浜国立大学修士2年の長田正行氏をはじめとする横浜国立大学柴山研および東京大学磯部研の学生諸氏に対し、ここに記して謝意を表する。本研究は国土交通省関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所受託研究費(代表：横浜国立大学柴山教授)および日本学術振興会科学研究費基盤研究S(代表：東京大学磯部教授)の補助によるものである。

参 考 文 献

- 植松秀人(2001): 単一パイプのみによる流体粒子の極限的微小化と活性化, 超音波 TECHNO, 5月号, pp. 2-6.
- 鯉淵幸生・佐々木 淳・五明美智男・栗原明夫・藤田昌史・Mohammad Islam・鈴木俊之・田中真史・磯部雅彦(2004): 貧酸素水改善に向けた現地微細気泡実験, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 1156-1160.
- 佐々木 淳・小出摩耶子・長田正行・柴山知也・磯部雅彦(2003): 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, 第50巻, pp. 981-985.
- 高橋正好(2003): 『非常識』のマイクロバブル収縮・圧壊現象, 混相流レクチャーシリーズ, 第28回, pp. 15-19.
- 道奥康治・神田 徹・大成博文・西川孝晴・松尾克美・木戸崇博(2000): マイクロバブル・エアレータによる貯水池の水質浄化実験, 水工学論文集, 第44巻, pp. 1119-1124.