

貧酸素水改善に向けた現地微細気泡実験

鯉 渕 幸 生* ・磯 部 雅 彦** ・佐々木 淳***
藤 田 昌 史**** ・五明美智男***** ・栗 原 明 夫*****
田 中 真 史***** ・Mohammad Islam***** ・鈴 木 俊 之*****

東京湾をはじめとする内湾では、夏季の海底での貧酸素化が湾内の水環境に悪影響を与えており、深刻な社会問題となっている。そこで本研究では、微細気泡発生システムの海域への適用方法や水質・底質を含む水環境の改善効果の把握を目的に、室内実験に基づく装置の選定、酸素溶解特性の定量化、京浜運河における予備実験を経て、東京湾の旧船橋航路に微細気泡システムを設置し、約1ヶ月に及ぶ実海域現地実験を行なった。その結果、微細気泡発生装置の周囲で溶存酸素の改善が見られ、底泥表層の微生物群集構造にも微細気泡の効果が確認できた。

1. はじめに

東京湾をはじめとする内湾では、長年にわたり水質悪化が問題になっており、下水道整備をはじめとして、様々な対策が行われているにもかかわらず、大きな改善がみられない状況が続いている。水質悪化のなかでも、特に海底の貧酸素化は、湾内の水環境に悪影響を与える重要な問題となっている。そのため、内湾の貧酸素化については、これまで多くの研究がなされ、貧酸素水塊の形成や消長にいたるプロセスが観測され、その発生プロセスや他の水質項目との関係が明らかにされている(鯉渕ら, 2001)。近年、貧酸素水を抑制するための一手段として、微細気泡による溶存酸素(以下 DO)の改善手法が提案されており、このような手法を用いて、ダム湖や貯水池などの比較的狭い閉鎖性水域における貧酸素化の改善が行われ、一定の効果を上げている。これらの手法を海域へ適用した例としては、大成ら(2002)によるカキ養殖場への適用例や佐々木ら(2003)の数値計算による検討があるが、海底における貧酸素化の解消のための手法や効果については十分な知見が得られていない。

そこで本研究では、微細気泡発生システムの海域への適用方法や問題点、水質・底質を含む水環境の改善効果を明らかにすることを目的とした。そのため、まず小型の微細気泡発生システムを製作して、室内実験・実海域予備実験を実施を行った。さらに、これらの成果をもと

に実海域に適用可能な微細気泡発生システムを製作し、東京湾湾奥部の旧船橋航路において、一ヶ月におよぶ現地実験を行った。

2. 室内実験による溶解特性の把握

微細気泡発生システムの開発にあたっては、まず小型の装置を製作し、水温や塩分や圧力の異なる条件下での酸素溶解特性を明らかにした。

(1) 室内実験の概要

室内実験は、図-1に示すような幅0.2 m、奥行き0.2 m、高さ1 mの水槽を含む小型の微細気泡発生システムを作成して行った。実験に際して、まず水槽中に、亜硫酸ナトリウムを適量用いて無酸素水を作製した後、微細気泡を用いたエアレーションを行い、微細気泡発生開始後の水槽内のDOを1 min 間隔で連続計測した。DOと水温の計測にはAlec電子製COMPACT-DOWを使用した。これらを水槽中に吊り下げ、水槽中の濃度場が一樣になるように攪拌しながら計測を行った。酸素の溶解率は、供給した酸素量と、実際に水槽内で増加した酸素量の比から算定した。

(2) 実験結果と考察

空気流量による酸素の溶解率の変化を明らかにするために、空気流量を0.1~0.75 l/minまで変化させて実験

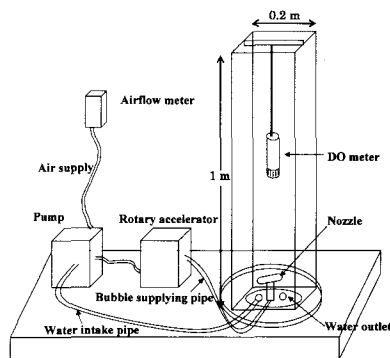


図-1 酸素溶解実験装置の概要

- | | | | |
|-------------|------|----------------------|---------------------------------|
| * 正 会 員 | 博(工) | 東京大学講師 | 大学院新領域創成科学研究科環境学専攻 |
| ** 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 |
| *** 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学専攻 |
| **** 正 会 員 | 博(工) | 山梨大学助手 | 大学院医学工学総合研究部門 |
| ***** 正 会 員 | 博(工) | 東亜建設工業株式会社 | 技術研究所 |
| ***** 正 会 員 | 修(工) | 東亜建設工業株式会社 | 技術研究所 |
| ***** 正 会 員 | 修(工) | 前横浜国立大学大学院 | 工学府社会空間システム学専攻 |
| ***** | 修(環) | Texas A&M University | Department of Civil Engineering |
| ***** | 修(環) | 群馬大学医学部医学科 | |

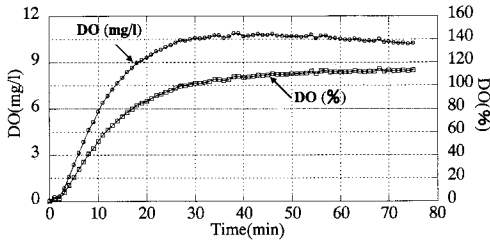


図-2 空気流量 0.21/l/min における DO 時系列

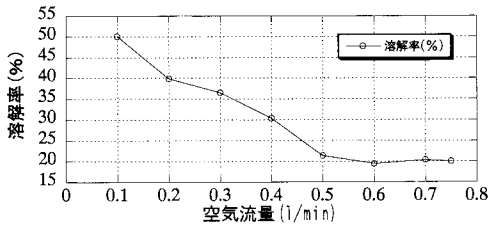


図-3 空気流量と酸素溶解率の関係

を行った。実験結果の一例として、0.2 l/min における溶存酸素の時系列を図-2 に示す。水槽中の DO はスタート直後から上昇し、9.7 分後には酸素飽和度が 50% に達した。この時、水槽内が十分に攪拌されており、その中央における酸素濃度は 5.8 mg/l であったことから、これに体積を乗じて酸素量を算定すると、水槽内には 232 mg の酸素が存在していたものと算定される。一方、単位体積あたりの空気には 300 mg の酸素があることから、この時間内に供給された酸素の量は、 $0.2 \text{ l/min} \times 9.7 \text{ min} \times 300 \text{ mg/l} = 582 \text{ mg}$ となる。ここで酸素溶解率を、供給された酸素に対する水槽中の酸素の増加量と定義すると、溶解率は $232 \text{ mg} / 582 \text{ mg} \times 100 = 40\%$ となる。同様の実験を人工海水においても行ったところ、溶解率は 36% となり、淡水と海水とではそれほど変わらないことが明らかになった。

空気流量を変化させて溶解率を求めた結果を図-3 に示す。溶解率は空気流量によって変化し、空気流量が 0.1~0.5 l/min の間には 50% から 20% にまで大きく減少した。一方、その後は空気流量を増加しても変わらず 20% 程度で推移した。したがってこの装置において、もっとも効率的に酸素を溶解できる空気流量は、0.5 l/min の場合であることが分かった。以上のような実験を、異なる水温や水圧条件で実施し、酸素の溶解特性を明らかにした。

3. 京浜運河における実水域予備実験

(1) 実験概要

室内実験で得られた結果に基づき、微細気泡発生シス

テムをスケールアップし、それを横浜市鶴見区安善の京浜運河に設置して(図-4)、2 週間に及ぶ予備実験を行った。実験にあたっては、図-4 に示す地点において、一辺 3.5 m のカーテンにより仕切られた矩形の曝気エリアと、同様のカーテンで仕切られているものの曝気を行わない比較対照エリアを設け実験を行った。曝気エリアでは、空気流量 2 l/min~5 l/min で運転を行ない、それぞれのエリアには自記式水質計を 3 層で設置し、DO、水温、塩分の連続測定を行なうとともに、投げ込み式水質計(アレック電子製、AAQ 1183)による水質測定も同時に行うことで、より現場に近い条件での酸素溶解効率や装置運転後の水質改善効果について検討を行った。

(2) 実験結果

図-5 はマイクロバブルによる酸素供給前後の DO 鉛直プロファイルの一例である。溶存酸素はマイクロバブル注入開始から 2 時間後には、全体的に 2 mg/l 程度の増加が認められ、海底直上においても 5 mg/l 程度にまで回復していることが分かる。

図-6 は酸素供給開始後の各地点における溶存酸素の時系列である。微細気泡は実験開始時においては 2 l/min とし、その後、3 時間 40 分後から 5 l/min に変更を行い、5 時間 30 分後に再び 2 l/min に戻した。この図から明らかに、DO は 2 l/min においては全ての深度において緩やかに増加する傾向を示していたが、その後流量を 5 l/min に増加させた後、下層で急激に減少していることが分かる。これは、空気流量を増加した際に、気泡径の

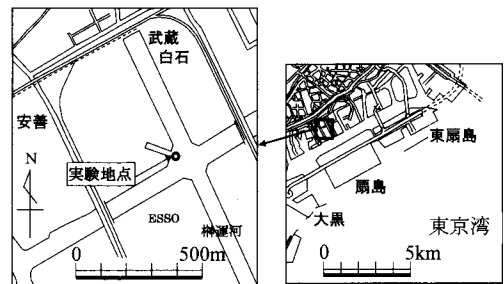


図-4 予備実験実施地点

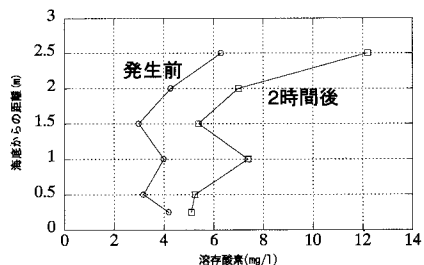


図-5 酸素供給実験前後の DO 鉛直プロファイル

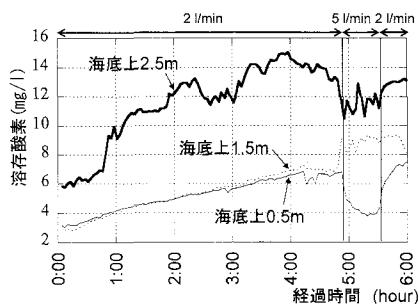


図-6 空気流量による溶解酸素の時間変化

大きな気泡が発生する割合が増加したため、湧昇流が発生し、それに伴って周囲のDOの低い水塊が集められたためと考えられる。従って微細気泡発生装置の運用にあたっては、最適な酸素溶解率となる空気流量を選択するだけでなく、気泡径にも注意を要することが分かった。

4. 三番瀬旧船橋航路における長期現地実験

(1) 実験概要

室内実験および実水域予備実験で得られた結果を踏まえて、2003年8月28日から同年10月3日まで、東京湾湾奥部の三番瀬の中でもとくに貧酸素化が著しい旧船橋航路にて実海域現地実験を行なった(図-7)。

実海域現地実験に適用した微細気泡発生システムは、図-8に示すように、陸上部と海中設置部に分かれており、陸上部には発電機、燃料タンク、コンプレッサーを配置した。また海中設置部は、水中ポンプおよびラインミキサー(西華産業株式会社製OHRラインミキサー)によって構成される。これらは発電機によって電力が供給され、外部からの電力供給を一切必要としないため、将来的には小型船等を用いた海上設置等にも柔軟に対応することが可能である。今回の実験では海中設置部を、岸壁から200m沖の航路中央部に設置した。なお微細気泡発生装置の運転は9月2日に空気流量20 l/minで開始し、9月4日に50 l/minに流量を変更、その後9月18日に再び20 l/minに戻し、9月25日に運転を停止した。

(2) 観測概要

微細気泡発生システムの効果を把握するための観測は、微細気泡発生装置近傍とその周囲4ヵ所に3層で自記式計測機器を設置し、DO・塩分・水温・クロロフィル a ・濁度の連続測定を行なった。観測は微細気泡を発生させる前の8月28日より、微細気泡発生装置停止後の10月1日まで行った。

流速の測定は、対象海域が平均水深5m程度と浅いため、浅海域でも対応可能なADCP 1200 kHz-ZedHed(RD Instrumentst製)を使用した。さらに週に3回程度の頻度で、投げ込み式水質計(アレック電子製, AAQ 1183)

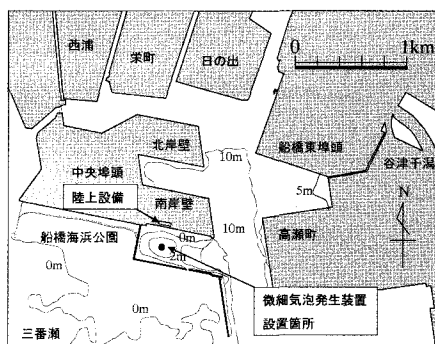


図-7 三番瀬旧船橋航路周辺図

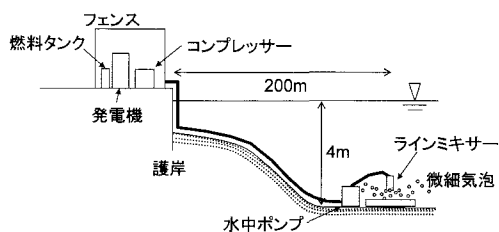


図-8 微細気泡発生システム配置図

や採水による栄養塩分析により、水質の詳細な空間分布を測定した。栄養塩の分析項目は $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 T-N 、 T-P であり、これらの分析にはオートアナライザー(プラン・ルーベ社製 ACCS-II)を使用した。

さらに底泥を採取し、これをC/Nコーダ(ヤナコ製MT型)で分析することで、全有機炭素量と窒素量を測定した。採取した底質の一部は、キノンプロファイル法による底質微生物群集構造の分析を実施した(藤田ら, 2003)。キノンとは、細菌の呼吸鎖や光合成電子伝達鎖において水素キャリアーとして機能する補酵素である。キノンプロファイル法とは、キノンをバイオマーカーとして利用する微生物群集の解析手法であり、これにより従来困難であった現場底質中の微生物の推定が可能である。

(3) 実験結果

a) 実験期間中の気象状況と海象

図-9は観測期間中の千葉気象台における風ベクトル・全日射量・降雨量・気温の時系列と連続観測によって得られた対象海域における水温・塩分・海底上3mにおける25時間移動平均流速・クロロフィル a 、DOの時系列である。期間中の気温は9月中旬までが平均25°C程度なのに対し、9月中旬以降は低下し、平均20°C前後となった。一方、水温は8月末から9月中旬にかけては上下差が大きく、成層状態にあることが分かる。塩分は生物付着の影響を受けて9月上旬に減少しているものの、同

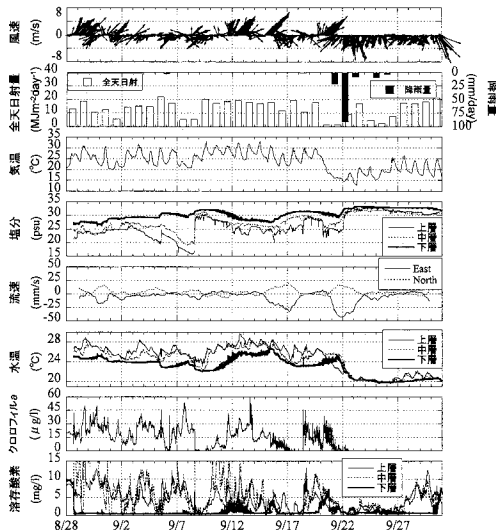


図-9 気象台及び海象の時系列。上から千葉気象台におけるベクトル・全日射量・降雨量・気温 25 時間移動平均流速・クロロフィル a、DO 時系列

様の成層構造が塩分についてもみられる。この際、成層の強度は主に風向に対応して変化しており、北風連吹時には上層の水温が下層と同程度にまで低下している。これは沿岸湧昇に伴って東京湾の下層の水塊が湾奥に湧昇し、実験地点がこのような水塊に覆われるためと考えられる。ADCP によって得られた流速を 25 時間移動平均をおこなって算定した残差流の時系列である。とくに大規模な青潮に発展した 9 月 16 日と 9 月 22 日～9 月 23 日には西向きの流れが卓越しており、上述の結果を裏付けている。このような北風の連吹に伴う流動により、9 月 7 日、9 月 17 日および 9 月 22 日には小規模な青潮が観察された。特に強い北風となった 9 月 21 日には沿岸湧昇の影響が強く、気温の低下や降雨に伴って、水温が急激に低下し、その後 9 月 22 日以降においては北風が卓越するようになったため、上下一様の状況が観測期間終わりまで続いた。このように実験地点の海象は主に風向によって大きく変動することが分かる。

b) 水質観測結果

同期間におけるクロロフィル a は $0 \sim 60 \mu\text{g/l}$ の範囲で短期間に大きく変化しており、南風が卓越する高日射時に増加し、北風時に減少する傾向にある。特に小規模な青潮が確認された 9 月 7 日、17 日、22 日にはクロロフィル a が大きく減少し、ほぼ $0 \mu\text{g/l}$ となっており、北風に伴う下層水の湧昇によって説明できる。DO については、上層では、クロロフィル a との対応がよく、植物プランクトンの光合成によって、海面表層から中層にかけて、酸素が供給されていると考えられる。一方、下層では、ほぼ全ての期間中で貧酸素状態にある、これは成層によ

って鉛直混合が阻害され、表層からの酸素供給が小さくなることに加え、海底での酸素消費が大きいためと考えられる。

図-10 は微細気泡発生装置直上における DO の鉛直分布時系列である。微細気泡発生装置運転開始前の底泥直上の DO は 0 mg/l であったが、運転開始後 DO は $2 \sim 4 \text{ mg/l}$ に上昇し、下層では DO の回復が確認できた。装置運転後においては上層から下層にかけて DO が一様となっており、微細気泡とともに径の大きな気泡が同時発生することで強い上昇流が発生し、それによって底層水が巻き上げられ、上層から下層にかけて DO が一様化していると考えられる。水面に巻き上がった底層水は、その後周囲の海水と混ざり合い拡散していったと考えられる。同様の一様化傾向はアンモニア態窒素やリンなど下層で高濃度となる栄養塩についても見られた。

図-11 に観測期間中もっとも大規模な青潮が発生した 9 月 23 日の底層における DO 濃度の平面分布を示す。底層 DO は青潮水の浸入によって全体的に低下しており、微細気泡発生装置から離れた地点では 0.2 mg/l 程度であった。一方、微細気泡発生装置の東西方向では DO が 1 mg/l 程度にまで改善されているのが確認でき、青潮の状態下においても微細気泡による DO 供給の効果が見てとれる。この際、DO 濃度は東西方向で高く、とくに西側で舌状に分布しているが、潮汐流が東西方向であることや、青潮水が西向きに浸入したことを反映して、微細気泡が西向きに流されたと考えられる。このように微細気泡は流れに乗って周囲に拡がることで、装置周辺の直径 6 m の範囲に及んでいることが明らかとなった。

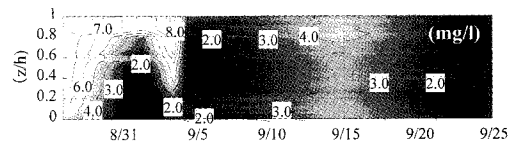


図-10 溶解酸素の鉛直分布時系列

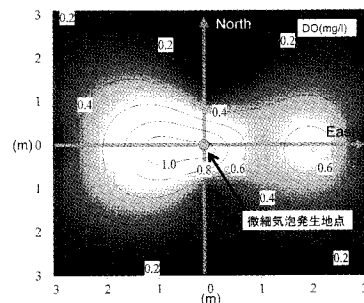


図-11 青潮水 (9 月 23 日) における下層 DO の平面分布

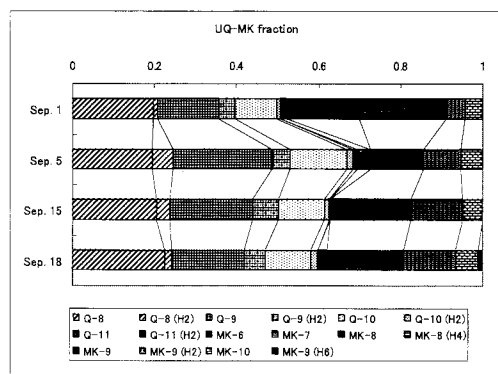


図-12 キノン存在比の変化

(4) キノンファイルによる底生微生物群集構造解析

曝気地点におけるキノン存在比の変化を図-12に示す。キノンは構造的にユビキノンとメナキノンに大別され、イソプレノイド側鎖数 n の違いにより、 $Q-n$, $MK-n$ と表される。さらに水素飽和度 x の違いにより Hx と表される。ユビキノンは比較的高い酸化還元電位を有し、酸素や硝酸鉛などの電子受容体に対して機能することから、偏性好気性細菌や通性嫌気性細菌などに存在する。一方、メナキノンは低電位のフマル酸や硫酸塩などによる嫌気呼吸に係わることから、絶対嫌気性細菌や通性嫌気性嫌気性最近などに存在し、一般的に一菌種は一種の優占キノンを含有する。

曝気開始前の9月1日においてはユビキノン、とメナキノンの比である Q/MK 比が5割程度となっており、曝気開始以前においては好気呼吸と嫌気呼吸を行う微生物が同量程度存在していたと解釈される。一方、20 l/min で曝気を開始してから5日後の9月5日においては、 Q の割合が急激に増加しており、72%へと変化した。これは好気呼吸を行う微生物が増加したことを意味しており、マイクロバブルによる酸素供給の効果が、底泥における微生物群集を変化させたと考えられる。

続く9月15日と18日においては、ともに Q の割合が62%となっている。このとき、空気流量がより大きい50 l/minの方が、20 l/min に比べて好気性微生物の割合が少ないことについては、前述したように50 l/min 時には、微細気泡に占める大きい気泡の割合が増加したため上昇流が発生し、これが周囲の貧酸素水塊を集め、DOが低下したことが原因と考えられる。

以上のことから、微細気泡発生システムにより、水中の溶存酸素だけでなく、底質の微生物に明確な変化が見

られ、特に好気性の微生物が増加したことが明らかになった。今回の実験では影響範囲を分かりやすくするため、発生装置を一機だけ配置したため、酸素の放出量が少なく、水中の酸素増加範囲は少なかったが、キノン分析により、溶存酸素が低いにも係わらず好機性の微生物が定量されたことで、供給された酸素が、底質で直ちに利用されていることが明らかになった。したがって、微細気泡発生システムの効果を見る上では、水中のDOを測定するだけではなく、キノン分析により底質微生物の群集構造の遷移を観測することが有用と考えられる。

5. ま と め

本研究では、室内実験および京浜運河における予備実験の結果を踏まえて開発した微細気泡発生システムを旧船橋航路に設置して、1ヶ月におよぶ微細気泡発生実験を行い、水質底質を含む水環境の改善効果について検討した。その結果、装置周囲でDO濃度の回復が確認され、青潮状態下においてもDO回復効果が得られた。放出した微細気泡は、潮流によって輸送され、数mの範囲でDO濃度の上昇が確認できた。本実験では、影響を分かり易くするため、気泡発生装置を1機しか用いなかったため、その影響範囲は狭かったものの、複数の装置を用いることにより影響範囲を広げることが可能であり、そのための基礎的な知見が得られた。また底泥のキノンについては、微細気泡発生以降で、好気呼吸に係わるユビキノンは最大20%増加し、逆に嫌気呼吸に係わるメナキノンは低下するなど、底泥の微生物群集構造にも変化が見られ、微細気泡の効果が底泥の微生物群集構造に対しても確認できた。

謝辞：三番瀬旧船橋航路における現地実験にあたっては、行徳漁業組合並びに葛南港湾工事事務所からご協力いただいた、ここに記して謝意を表する。本研究は日本学術振興会科学研究費基盤研究S(課題番号14102026)の補助によるものである。

参 考 文 献

- 大成博文・前田邦男・松尾克美・山原康嗣・渡辺勝利・石川並木 (2002): マイクロバブル技術によるカキ養殖効果, 水工学論文集, 第46巻, pp. 1163-1168
- 鯉淵幸生・佐々木淳・磯部雅彦 (2001): 東京湾における窒素・リンに着目した物質循環機構, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 1076-1080.
- 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.
- 藤田昌史・鯉淵幸生・Udin HASANUDIN・小倉久子・藤江幸一・磯部雅彦 (2003): 東京湾における水質動態と底質微生物構造の解析, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 996-1000.