

新浜湖における水環境特性と微細気泡による曝気効果の検討

田中陽二¹・磯部雅彦²・鯉渕幸生³
五明美智男⁴・大野嘉典⁵

貧酸素水塊を解消する方法として注目されている微細気泡の現地適用性を検討するため、汽水湖である新浜湖の水質特性を明らかにし、微細気泡の現地実験を行った。新浜湖では千鳥水門からの流入によるエスチャリー循環的な流れが発生しており、窪地底層部では貧酸素水塊が形成されやすい状況となっていた。この流動構造を利用して水質改善を行う方法を提案し、数値モデルを用いて検討を行った。微細気泡実験より、酸素送気量に応じて水質改善効果があることを定量的に示し、特に SOD を計測することが底層曝気効果の検討に有効であることを明らかにした。

1. はじめに

千葉県市川市にある新浜湖は 1970 年に鳥や水辺の自然環境保護を目的に造られた人工の汽水湖である。現在は行徳近郊緑地特別保全地区に設定されており、東京湾に残された数少ない野鳥の飛来地・生息場である。しかし、夏季に野鳥のエサとなる底生生物の死滅が大きな問題となっており、これは底層の貧酸素化が主原因と考えられている。そこで、本研究では貧酸素水塊を解消する手法として注目されている微細気泡による底層曝気を行い、その効果を検討した。またその前段階として、新浜湖の水環境特性を明らかにするために現地観測を行った。

微細気泡による曝気効果の検討は、貯水池では道奥ら (2001) による過去の観測結果との偏差による推定があり、現地海域では佐々木ら (2003) による数値流動モデルによる検討、および田中ら (2004) のボックスモデルによる推定がある。しかしながら、微細気泡水塊の移流拡散効果が大きい精度よい把握はできていないことが指摘される。そこで、本研究では底泥の酸素消費速度に着目した底層曝気効果の評価も行った。

2. 現地観測と実験の概要

新浜湖は北東に位置する千鳥水門から江戸川放水路に、南西にある暗渠から三番瀬にそれぞれ繋がっている (図-1, 2)。ただし、暗渠の流量は千鳥水門と比べて非常に少なく、大潮時に千鳥水門の流量が $15 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度あるのに対し、暗渠水門では $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度しかない (千葉県 (2004))。湖内の水深は千鳥水門前で 9 m と最も深く、そこから徐々に浅くなる地形となっているが、暗渠

の前で最大水深 4 m の窪地ができています。この窪地内で夏季に貧酸素水塊の形成が指摘されている (千葉県 (2004)) ことから、図-2 の A 地点の底層に微細気泡発生装置を設置した。また、新浜湖の長期的な水質変動を捉えるために、自記式水質計を A 点表層に設置し、溶存酸素 (DO)、塩分、水温を計測した。さらに水質の横断面構造を把握するために図-2 の B ラインを中心に投げ込み式水質計による観測を行った。

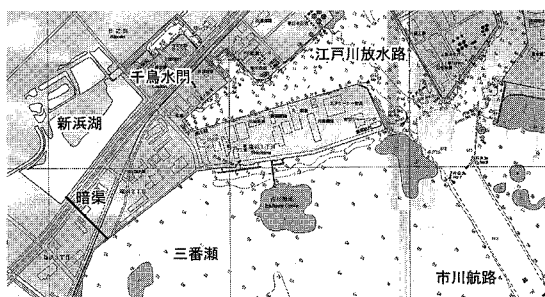


図-1 新浜湖周辺の地形 (海上保安庁 (2004) に加筆)

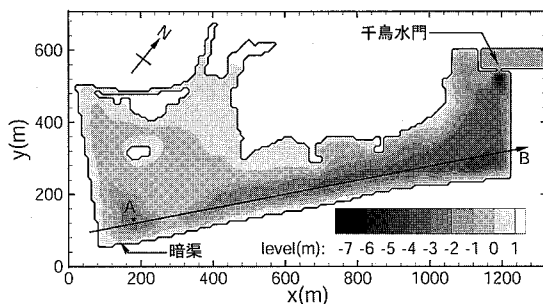


図-2 新浜湖の地形

微細気泡実験は微細気泡の生成に空気を用いた空気実験と、純酸素 (濃度 99.5%) を用いた純酸素実験を行った。空気実験は 2005 年の 8/18~8/24, 8/30~9/7, 9/8~9/11 の間で連続稼働させ、純酸素実験は 9/13, 16, 20 の 3 日間行った。

実験装置の概要を図-3 に示す。台船を鉄骨で繋げて固

1 学生会員 修(工) 東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻
2 フェロー 工博 東京大学教授東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻
3 正会員 博(工) 東京大学講師東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻
4 正会員 博(工) 東亜建設工業(株)技術開発センター
5 正会員 学(工) 東亜建設工業(株)技術開発センター

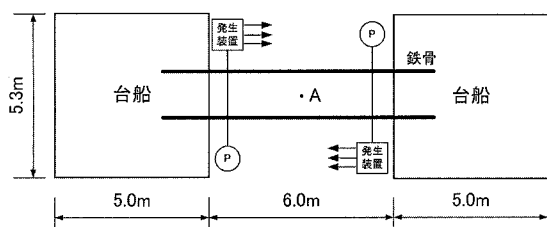


図-3 微細気泡装置の配置

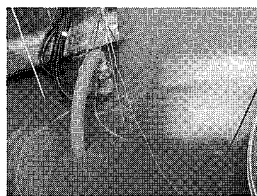
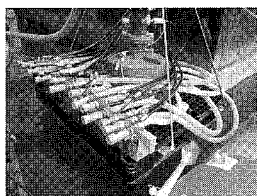


図-4 微細気泡装置の概観 図-5 微細気泡の噴出状況

定し、一つフロートとして水面に浮かべた。そこからワイヤーで吊るした微細気泡装置と水中ポンプを底面に設置した。微細気泡装置は図-4、5のように、直列に15基並べたものを2台設置し、それぞれに水中ポンプを取り付けて底層水を取水するようにした。このような配置にしたのは微細気泡装置によって生成した高濃度の酸素水塊をなるべく底層で循環させるためである。微細気泡装置は有限会社多久和製のマイクロクリーンを使用した。

3. 新浜湖における水環境特性

(1) 湖内の水質特性

A点表層に設置した自記式水質計の観測結果を図-6に示す。風速などの気象データは千葉測候所の値を用いており、図中下部の矢印は装置を連続運転した期間を表

し、黒丸は純酸素実験を行った日を表している。

水質計の観測結果から特徴的な現象として、DOの急減と塩分の急増が5回(8/26, 29, 9/6, 10, 12)観測された。それら水質が大きく変動した5点を下向きの矢印で図中に示した。これらの塩分急増の原因として、(a)新浜湖の底面にあった水塊の湧昇、(b)千鳥水門からの流入、(c)暗渠からの流入、の3つが考えられる。そこで最も大きく水質が変動した8/29～8/30の現象に注目して考察する。図-7(上・中段)はA地点における水質の鉛直プロファイルであり、8/29の水質変動前における窪地底層部の塩分は22.1 PSUであるが、8/30の底層部塩分は22.8 PSUと高くなっている。しかしながら8/29の10:00に新浜湖全域で観測された中で最も高い塩分は22.6 PSUであり、これは8/30の底層塩分よりも低い。したがって、8/29に窪地へ流入してきた塩分水塊は湖内の底面水塊の湧昇ではなく、外部からの流入によるものである。

次に、大きな水質変化をもたらす水塊の流入源を調べる。千鳥水門と暗渠の外側で9/11の下げ潮時に計測し

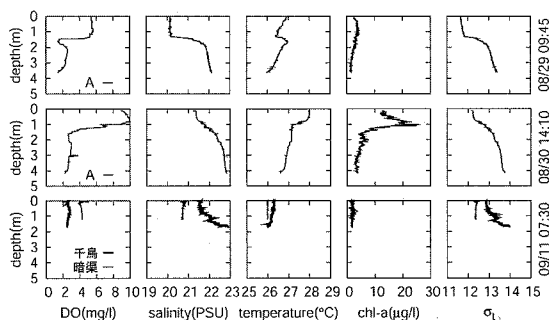


図-7 水質鉛直プロファイル(上段: 8/29 A点, 中段: 8/30 A点, 下段: 9/11 境界部)

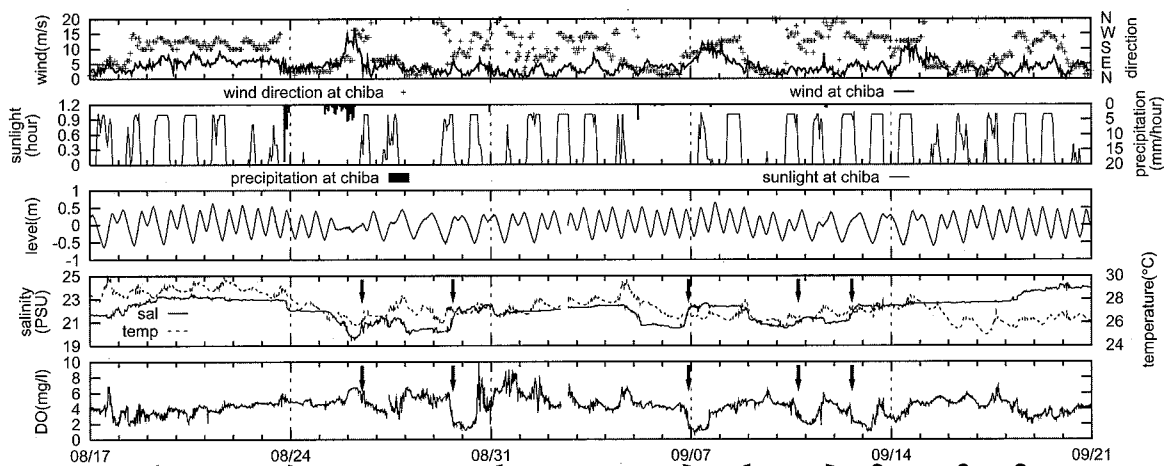


図-6 2005年8月17日～9月21日の連続観測結果 (A点表層)

た水質の鉛直プロファイルを図-7 (下段) に示す。暗渠よりも千鳥水門からの流入水塊の方が高塩分で貧酸素な状態となっている。9/11 以外の観測結果からも同様な傾向が得られている。

このように、暗渠ではなく千鳥水門から高塩分水塊が流入する原因として、新浜湖周辺の地形形状が影響していることが考えられる (図-1)。千鳥水門は江戸川放水路に通じており、そこから水深 7 m 程度に浚渫された市川航路に繋がっている。したがって、水深が比較的深い市川航路の水塊が千鳥水門の方へ流入しやすくなっている。浚渫された航路にある水塊は水深が深いため周囲より高塩分であり、底泥での酸素消費が起こっていると考えられることから貧酸素水塊であると推測される。図-6 に示したように高塩分水塊が流入するときに DO が低下するのはその水塊による影響と考えられる。それに対し、暗渠の方は三番瀬と繋がっているが干潟域であるため水深が 1 m 程度と浅く、密度の重い水塊が流入しにくい地形構造となっている。

(2) 湖内の流動特性

装置稼働前の 8/16 における B ライン上の水質横断面分布を図-8 に示す (図上部の三角は計測位置を表す)。左側の窪地部分にのみ強い密度成層が形成されており、底層に貧酸素水塊が形成されている。計測を行ったときは上げ潮時であり、右側の千鳥水門から外海水が流入している。図のコンターラインの形状から、流入してきた低塩分水塊が千鳥水門の上層を流れ、湖内奥部にある上層の水塊が底層に潜り込んで千鳥水門側に流れている状況が観測される。しかし、窪地の底層部は停滞したままであり、千鳥水門によって発生する流れの影響を受けていない。これは窪地手前の浅瀬によって流動が阻害されているためと考えられる。

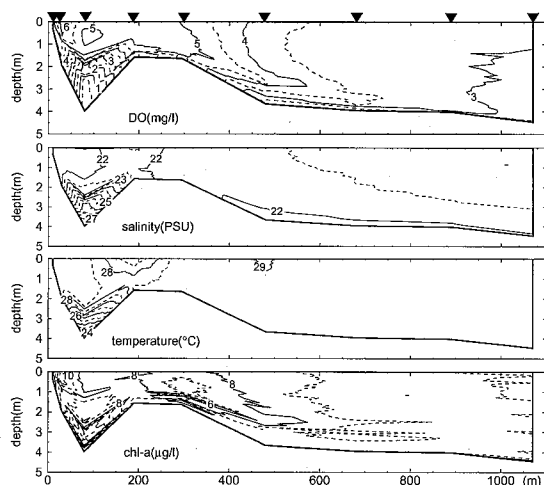


図-8 8/16 14:30 の B ライン上での水質横断面分布

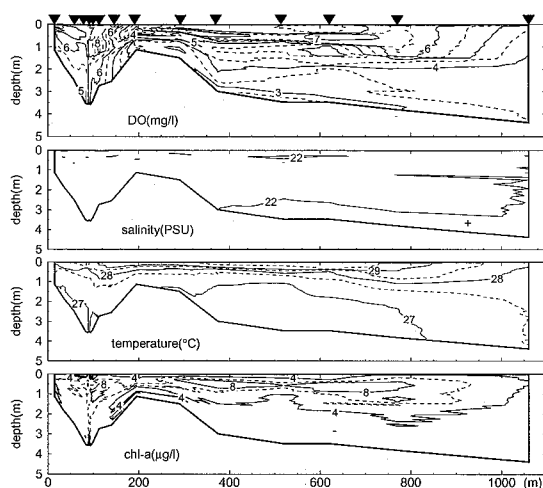


図-9 9/1 13:30 の B ライン上での水質横断面分布

図-9 は微細気泡の空気実験を行っている間に観測された水質の横断面分布であり、上げ潮時の結果である。このときは千鳥水門から比較的高い塩分水塊が流入しているため、水塊が底層を這うように流れ込み、湖内奥部の表層水塊はその流れを補償するように表層を千鳥水門へ向かって流れている。なお、窪地中央部で水平方向の水質 (DO, 水温, クロロフィル *a*) が不連続となっていることは微細気泡の影響と考えられる。

このように、新浜湖では千鳥水門による流れが支配的であるため、上げ潮時にはエスチャリー循環のような上下で逆向きの流れが生じる流動構造となっている。しかしながら、エスチャリー循環的な流れは千鳥水門から窪地前の浅瀬までであり、窪地底層部は循環流れから取り残されている。そのため窪地が成層化した場合は底層の水塊は外部との海水交換がなくなり長期に貧酸素水塊が停滞すると考えられる。

(3) 新浜湖の流動を利用した窪地底層部の水質改善

これまでの観測結果の考察によって推測された新浜湖の流速分布特性に基づき、窪地底層部の水質改善方法の提案を試みる。湖内で生じているエスチャリー循環的な流れを利用するため、窪地と千鳥水門間の浅瀬を浚渫する。それによって、上下層の循環流れを新浜湖奥部まで到達させ、窪地底層部の流動を促進する効果が期待できる。

この提案の可能性を検討するため、鯉湖ら (2001) の σ 座標系準三次元モデルにより計算を行い、流動変化を調べた。モデルの水平方向のメッシュサイズは 15 m で、鉛直方向は 15 層とし、初期条件として水深に比例した 22~28 PSU の塩分勾配を設定した。境界条件として市川港の M_2 分潮を千鳥水門の外で与え、千鳥水門から 22 PSU の軽い水塊と 28 PSU の重い水塊が流入してきた条件を設定した。計算上の地形変化は窪地横の浅瀬部分が

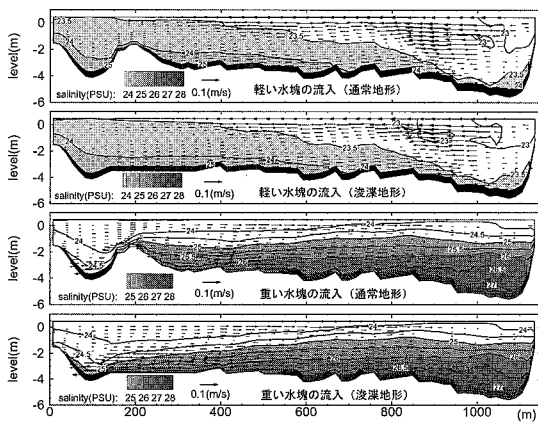


図-10 浚渫による湖内の流動変化

水深 3.5 m になるように浚渫し、総浚渫量は 14,558 m³ となった。千鳥水門から密度水塊が流入してくる最初の上げ潮時の流動結果を図-10 に示す。

計算結果より、前節の考察と同様にエスチャリー循環的な流れの発生が確認された。浚渫を行った結果として、軽い密度水塊が流入する場合は上層を流れる水塊が湖内奥部まで発生しており、窪地底層部分で補償流が比較的強く起こっている。重い密度水塊が流入する場合も浚渫を行うことによって窪地底層部での流れが強くなっている。このように地形を変えることで窪地内の海水交換を促進できることが示された。

4. 微細気泡による曝気効果の検討

(1) 微細気泡水塊の拡散

微細気泡による底層曝気は上昇流が小さいことによって効果的な曝気ができることが一つの特徴である。本実験で行った微細気泡曝気がどのような拡散をしたかを調べた。9/13 日に行った純酸素実験による窪地での水質分布を図-11 に示す。微細気泡装置は $x=90$ m 付近に設置している。このときは成層が弱く鉛直混合が発生しやすい状態であったが、塩分、DO の分布の広がりは一様となっていない。このことから微細気泡水塊が不均一で 3 次元的な拡散をしていることがわかる。微細気泡の影響と考えられる塩分の広がりが $x=30\sim120$ m までであることから、微細気泡設置位置からの影響範囲は最大で 60 m 程度と推定される。

(2) 水質改善効果

9/8 に行った空気実験の結果を図-12 に示す。実験前の 6:00 の段階では底層に 1 mg/l 以下の貧酸素水塊が形成されていたが、実験を開始した 8:00 以降は徐々に DO が回し、15:00 の段階では 3 mg/l まで上昇している。

次に、水中に溶解した正味の酸素量を検討する。9/8

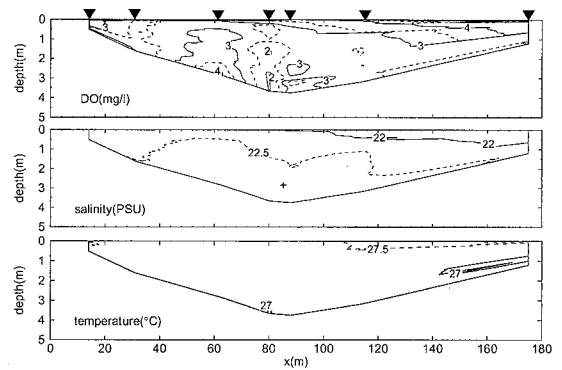


図-11 純酸素実験中の B ライン上での水質 (9/13 10:30)

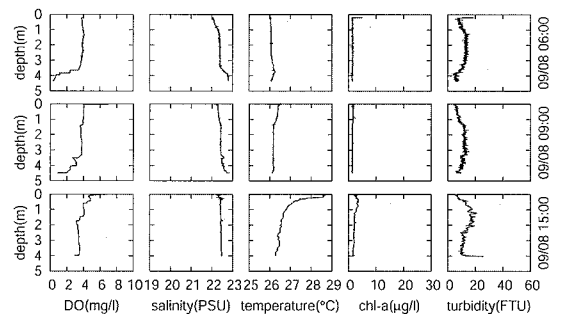


図-12 空気実験中の A 点での水質変化 (9/8)

以後の実験期間中にフロート内ではほぼ同時刻に 4~14 点の水質鉛直プロファイルを 1 日数回計測した。それらの観測結果を用いて水中の酸素溶解効率を算出する。その際、ある 1 点の計測値はその周囲の体積の代表値と考えて空間積分を行った。水平方向の分割はなるべく現象を反映するような長方形で区分した。計算式を次に示す。

$$E = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{V} \sum_i S_i \int_h^{\zeta} C_i(z) dz \right) \dots \dots \dots (1)$$

$$\varepsilon = \frac{VE}{\rho_a Q_a} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 E はフロート部分における単位時間あたりの酸素溶解量 (mg/l/hour)、 ζ, h は水面位置と底面位置、 S_i, C_i は計測地点 i のフロート内における代表 DO (mg/l) および代表面積 (m²)、 V はフロート部分における全体積 (m³)、 ε はフロート部分での酸素溶解効率 (-)、 ρ_a は酸素密度 (g/m³)、 Q_a は酸素送気量 (m³/hour) である。計算には底泥の酸素消費などは考えないものとし、空気中に含まれる酸素量は 20% とした。これらの式を用いて、外部からの影響が少ないと考えられる 9/8, 9 の空気実験と、9/13, 16, 20 の純酸素実験について E, ε を算出した (図-13)。図中の曲線は、適当と思われる関数式を最小二乗法で求めたものである。

酸素溶解効率は 2~12% しかないが、これは積分範囲がフロート部分だけであるために水平方向の移流拡散効

果を捉えられていないこと、および表層から気泡が抜けていく量や、底泥・水中での酸素消費量があるためと考えられる。酸素送気量が増えるにつれて溶解効率は減少するが、これは発生装置内および水中で溶けきれない気泡の割合が増加するためであり、鯉渚ら (2004) の室内実験結果も同様の傾向を示している。したがって、時間効率の送気量に対する割合 (E/Q_a) は徐々に通減する。

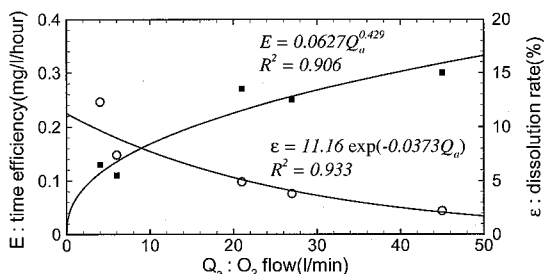


図-13 酸素供給量と酸素溶解効率の関係

(3) 底質改善効果

新浜湖の底質環境について、現状把握および微細気泡が与える影響を評価するため、純酸素実験での装置稼動前と実験終了直後で A 点の底泥酸素要求量 (SOD) の計測を行った。装置稼動前は SOD が平均で $5\text{g}/\text{m}^2/\text{day}$ と高く、底泥による酸素消費が活発に行われている状況にあった。

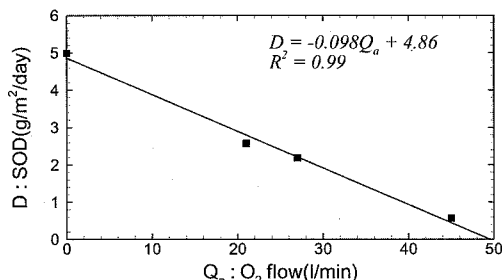


図-14 酸素送気量と装置稼動後の SOD の関係

次に、微細気泡による影響を調べる。実験直後の SOD は微細気泡による酸素供給と底泥による酸素消費が平衡状態に達していると考えられ、実験前の SOD の平均値は送気量ゼロの状態での平衡状態である。酸素の送気量と平衡状態の SOD の関係を図-14 に示す。

実験後の SOD は酸素供給量と明瞭な負の相関が成り立っており、微細気泡による底層曝気は底質環境に効果的であることを示している。また、底泥の場合は微細気泡の効果が同じ地点に蓄積されるため、水質の計測と比べて観測点数および回数が少なくても現象をよく把握できる。このように SOD による底層曝気効果の評価は、

曝気に対する感度および観測コストの両面から判断して有効と結論付けられる。

5. ま と め

本研究では新浜湖の水質流動特性を明らかにした上で、微細気泡による水質・底質改善効果を検討した。主要な結論を以下に述べる。新浜湖では千鳥水門による限られた場所でのみ海水交換が行われるため、流入してくる水塊に応じて上下層で逆向きの流れが生じる。さらに千鳥水門から東京湾の底層水塊が入り込みやすい地形となっている。また、窪地底層の水塊は停滞しやすく、底泥の SOD が高いことから長期にわたり貧酸素水塊が形成されやすい状況にあることが明らかとなった。このような流動・水質特性から、窪地底層部における貧酸素対策の一案として、湖内のエスチャリー循環的な流れを利用し底層の流動を促進する方法を提案した。また、その効果を準三次元モデルを用いて確認した。

微細気泡実験より得られた結論として、微細気泡による曝気は酸素送気量に応じて水質および底質改善効果があることを定量的に把握した。また、水中では微細気泡水塊が不均一に拡散するため、その効果の計測が困難であるが、底泥の SOD を計測することにより底層曝気の効果を実証的に観測できることを明らかにした。

謝辞：新浜湖で実験を行うにあたり、行徳野鳥観察舎の方々にご協力頂いた。ここに記して謝意を表す。また、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)、および 2005 年度鋼構造研究・教育助成事業の補助によるものである。

参 考 文 献

- 海上保安庁 (2004)：千葉港葛南，航海用海図。
- 鯉渚幸生・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。
- 鯉渚幸生・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 (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。
- 田中真史・佐々木淳・柴山知也・磯部雅彦 (2004)：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，海岸工学論文集，第 51 巻，pp. 1161～1165。
- 田中陽二・磯部雅彦・鯉渚幸生・五明美智男・大野嘉典 (2005)：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，第 52 巻，pp. 1126～1130。
- 千葉県 (2004)：平成 15 年度行徳湿地連携検討調査 (影響予測調査) 業務委託報告書。
- 道奥康治・神田徹・大成博文・森口昌仁・松尾昌和・白澤静敏・松尾克美 (2001)：マイクロバブルによる富栄養貯水池の水質改善工と浄化効率，水工学論文集，第 45 巻，pp. 1201～1206。