

尼崎運河での水環境改善に向けた新しい曝気手法に関する現地実験

Field Study on New Aeration Techniques for Water Environment Restoration in the Amagasaki Canal

山中亮一¹・上月康則²・森友佑³・森紗綾香⁴・板東伸益³・高谷和彦⁵・上嶋英機⁶

Ryoichi YAMANAKA, Yasunori KOZUKI, Yusuke MORI, Sayaka MORI
Nobuyoshi BANDO, Kazuhiko TAKATANI and Hideki UESHIMA

The Amagasaki Canal is an enclosed waters located in innermost recesses of Osaka Bay. In this areas, we confirmed that the canal have been polluted and increased the sedimentation of organic matter because the canal is sheltered waters with artificial vertical structures and is affected by waste water from factories. According to the consumption of oxygen by the organic mud, there is anoxic water in the bottom of the canal. In this study, a field experiment for clarification on the adjustability of the new aeration technique was executed. A basic performance of the diffused aeration based on microscopic bubble was evaluated. Consequently, the control methods of the aeration system and the prevention of marine biofouling in fall were clarified.

1. はじめに

大阪湾奥の兵庫県尼崎市臨海部に位置する尼崎運河は、水深2~8m, 幅10~40m, 総延長約12.5kmの閉鎖性海域である。閘水門により水位が管理されているため海水交換が制限され、産業系負荷に起因する富栄養化により、水環境が著しく悪化している。とくに夏季においては、水深2m以深では貧酸素化が著しく、その一方で表層では活発な一次生産により過飽和状態であり、水深方向の水質変化が大きい(森ら, 2007)。さらに、ほぼ全域が直立護岸に囲まれているため、懸濁物が海底に沈降・堆積しやすく、海底は有機汚泥化している。このように水質汚濁が極度に進行しているため、生物生息域は中層以浅に限られ、水質浄化能を有する生物が関与する物質循環機能は著しく低下していると考えられる。

このような海域における貧酸素化を解消するため、これまで曝気手法が多く用いられてきた(佐々木ら, 2006; 田中ら, 2004)。しかし幾つかの課題が指摘されている。たとえば、水域全体を曝気対象とすることにより生じるコストの問題、微細気泡を用いた場合でも生じることがある硫化物を含む底層水の吸い上げ、連続運用のため生じる維持管理などである。

そこで、本研究ではこのような問題が生じにくく、本運河の水環境特性に適した“水塊構造非破壊型曝気手法”

を提案する。この手法は、曝気対象を直立護岸壁面近傍に限定し、主に付着生物生息域の拡大と物質循環の活性化による浄化機能の向上を目的としている。生物の生息に必要な溶存酸素(以下、DOと表記)を確保するため、微細気泡による従来の曝気手法とは異なり、緩やかで必要最小限の曝気を行う。この際、底層水を極力吸い上げないように散気量を調整する。曝気装置は、コスト面に優れるセラミック製の微細気泡エアストーンを採用した。

本研究では、この新しいコンセプトに基づく曝気手法について、その性能評価と、本手法の現地における適応性と運用方法、効果の検証、および環境負荷(CO₂排出量)の評価を目的とする。

2. 室内実験

本研究では、曝気装置としてクレノートン株式会社製のセラミック製微細気泡発生用エアストーン(以下、微細気泡石と表記)を採用した。この基本性能の評価を行うために、観賞魚水槽用として広く流通しているセラミック製のエアストーン(以下、汎用品と表記)と併せて室内実験を行った。

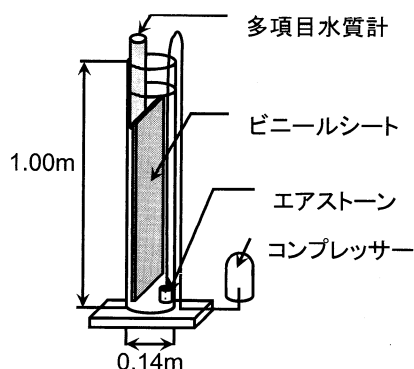


図-1 室内実験装置の概要

- 1 正 会 員 博(工)徳島大学講師大学院ソシオテクノサイエンス研究部
2 正 会 員 博(工)徳島大学教授大学院ソシオテクノサイエンス研究部
3 学生会員 徳島大学大学院先端技術科学教育部環境創生工学専攻
4 学生会員 修(工)徳島大学大学院先端技術科学教育部環境創生工学専攻
5 兵庫県中播磨県民局県土整備部
6 正 会 員 博(工)広島工業大学教授大学院環境学研究所

(1) 実験方法

微細気泡石より発生する気泡径および溶存酸素改善効率についての室内実験を行った。図-1に示すように直径0.14m、高さ1.00mの円柱水槽に、濾過を施した現地海水14Lを入れ、散気量0.10L/minにおける気泡径の計測を行った。計測は水中でプレバートに気泡を付着させ、顕微鏡を用いて行った。また、溶存酸素改善効率の計測は、窒素曝気により無酸素状態とした現地海水14L(水温14.3℃、塩分25psu)に対し円柱底付近から散気し、多項目水質計(Hydrolab DS-5)を用いて行った。散気量は0.03, 0.05, 0.10L/minとした。散気開始後の水中のDOを10秒間隔で連続計測した。

(2) 実験結果および考察

図-2に気泡径の頻度分布を示す。図-2(a)の微細気泡石による気泡は概ね直径250 μ m以下であり、ピークは直径20 μ m前後であった。これは他の微細気泡発生装置(辻村ら, 2005)と同等であった。一方、図-2(b)に示す汎用品は前者で僅かに認められた直径250 μ m以上のものが20%程度あり、目視でもその差異は明らかであった。

つぎに、散気中の溶存酸素飽和率(以下、飽和率と表記)の経時変化を図-3に示す。飽和率は、いずれの散気量においても図-3(a)に示す微細気泡石によるものが図-3(b)に示す汎用品の結果よりも早く上昇した。例えば散気量が0.10L/minのとき、汎用品に比して約半分の時間で飽和状態に達した。これより本研究では微細気泡石を現地実験に用いることとした。また、微細気泡石と汎用品のいずれの場合も、散気量の違いにより飽和率の時間変化に差異が認められ、ここでは散気量が多いほうが飽和率は常に高い傾向を示していた。しかし、効率の観点から見ると図-4に示す微細気泡石を用いたときの、供給酸素量と溶解酸素量の比から算出した溶解率の経時変化では、散気量が少ないほうが溶解率は高い傾向を示していた。鯉淵ら(2004)の報告でも同様の傾向が示されていた。田中ら(2006)によると、これは散気量が増加するほど上昇流が卓越するため気泡の滞留時間が減少し、溶解せずに水面から放出される気泡が増加するためと指摘されている。また、図-5の通り飽和率と溶解率の関係を整理したところ、飽和率が低いほど溶解率は高くなることがわかった。

以上より、曝気を効果的に行うためには、一概に散気量を多くすればよいものではなく、溶解率が散気量と飽和率によって変化することを考慮する必要があると考えた。そこで、本実験で求めた図-5に示す関係より、任意の条件における溶解率を散気量、飽和率の関数として回帰分析により算出し、つぎにこれを用いてある時刻の飽和率の変化量を求めることで、微細気泡石を用いた場合の飽和率の経時変化を求めた。図-6に結果を示す。これによると散気量が0.10L/min前後で曝気すると、30分後

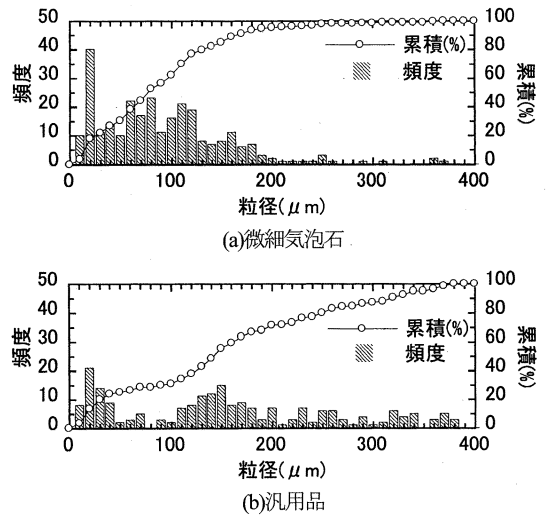


図-2 気泡径の粒径頻度(散気量0.10L/min)

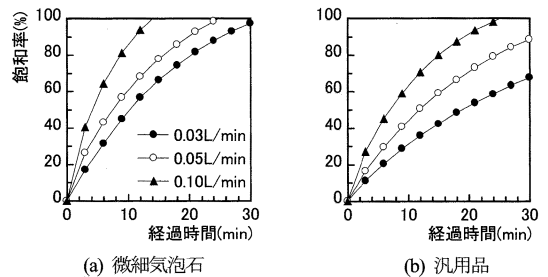


図-3 飽和率の経時変化

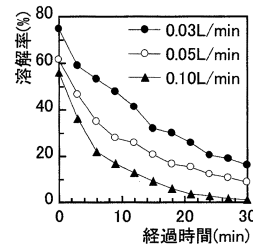


図-4 溶解率の経時変化

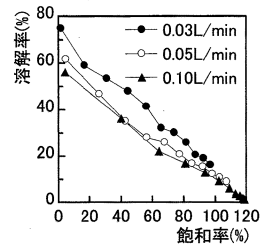


図-5 飽和率と溶解率の変化

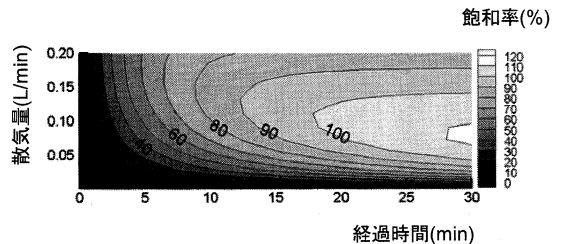


図-6 散気量ごとの飽和率の経時変化

に最も飽和率が上昇することがわかる。この結果は図-3の結果と矛盾していないことから、このような簡便な方法ではあるが、散気量と飽和率に対する相対的な曝気効

果を予測できると判断した。

3. 現地実験

(1) 現地実験概要

2007年10月12日に尼崎運河内の北堀運河(図-7参照)に、図-8に示す3種の実験系を有する実験施設を設置した。

実験系A, Bには、図-9に示す微細気泡石と同材質の散気盤をそれぞれ底層(水深3.3m), 中層(水深2.8m)に設置した。実験系Cはコントロール系とし散気は行わなかった。散気盤への加圧は陸上に設置したコンプレッサーを用い、流量計により散気量を調節できるようにした。各系ともコの字型の矢板に備えつけ、各系間の影響が少なくなるようにした。

(2) 実験方法

2007年11月28日に現地実験を行った。散気量を0.25, 0.60L/minとし、それぞれの定常状態における水質(DO, 塩分, 水温の鉛直分布)を多項目水質計(ALEC AAQ118 6, Hydrolab DS-5)を用いて計測した。また、同様に散気していない時の水質を測定した(以下、散気なし時と表記)。

(3) 実験結果

図-10, 図-11に各散気条件における密度とDOの鉛直分布を示す。散気量を0.25L/minとしたとき、図-10(b)に示した密度は、散気なし時と比較して密度構造の変化は小さく、底層水の吸い上げはほとんど生じていなかったと考えられる。そしてこのときDOは実験系A, Bともに水深2m以深において5mg/Lに改善しており、曝気の効果があったことがわかる。曝気効果を評価するため、曝気開始前とのDOの変化量の鉛直分布を図-12に示す。これによると実験系A, Bにおいては全水深において、曝気の効果によりDOが改善していたことがわかる。なお、実験系Cの表層におけるDO上昇は一次生産によるものと考えた。一方、散気量を0.60L/minとしたときは、密度は図-10(c)によると0.25L/minと比べて水深2m付近で低く、表層付近で高くなっていた。このとき図-11(c)に示すDOは水深2m以深では改善しているものの、水深1.5m以浅では7mg/Lから5mg/Lまで減少していた。これらは散気に伴い発生する強い上昇流により鉛直混合が生じたためと考えられる。このとき図-12(b)によると、水深1.5m以浅におけるDOが減少したことがわかる。このような場合、底層の硫化水素を含む水塊が表層まで吸い上げられ、青潮などが発生することもあるため、本運河における散気量としては適していないと考えた。

以上より、散気量を0.25L/minとした場合は、実験を行った秋・冬季において、現地において水塊構造非破壊型曝気として機能させることが出来たと言える。

室内実験の結果を基に求めた、現地実験系における散気量ごとの飽和率の経時変化を図-13に示す。ここでは、

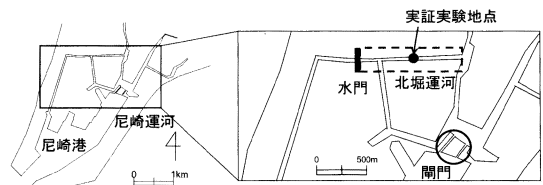


図-7 実証実験地点

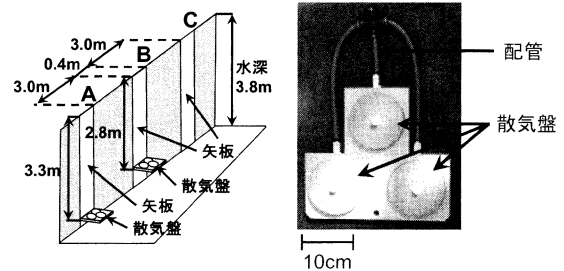


図-8 実証実験施設の概要

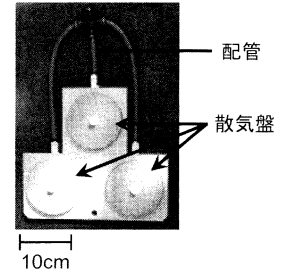


図-9 散気盤

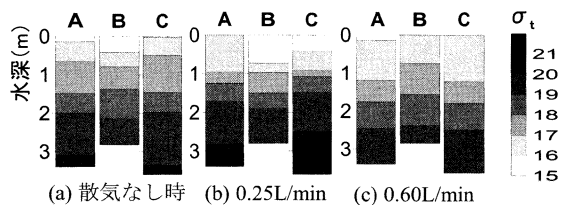


図-10 密度 σ_t の鉛直分布

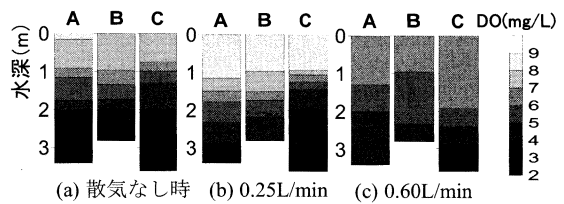


図-11 DOの鉛直分布

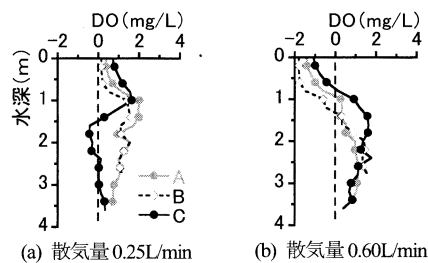


図-12 曝気によるDOの変化量

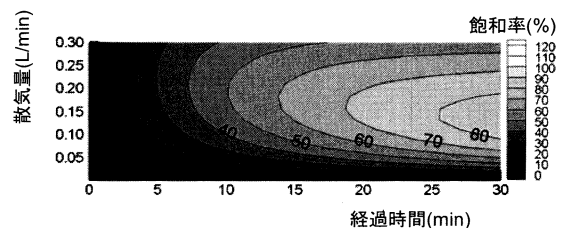


図-13 散気量ごとの飽和率の経時変化

簡単のため散気盤が設置している矢板に囲まれた水塊が海水交換せず、拡散もしないと仮定して概算した。結果によると、0.13L/minで散気した場合、30分間で飽和率は80%程度まで上昇することになる。各散気量の結果を比較すると0.13L/min辺りでもっとも飽和率が上昇した結果であることから、現地において0.13L/minに近い散気量である0.10L/minとし、運用した。ところが、約1ヵ月間で散気盤を覆うように藻類、付着性二枚貝等が付着し、目詰まりにより散気が困難な状況になった(写真-1)。このため、水塊構造非破壊型曝気として機能しつつ、連続的に使用できる散気量は0.10L/minから0.60L/minまでの間にあり、本実験では0.25L/minではそのように機能させようことを確認した。なお、本実験は一般的には生物の活性が低い秋・冬季において実施されたものであり、今後、春・夏季においても継続的に実験を行う必要があると考えている。

4. 生物生息域拡大効果

現地実験において曝気を継続的にを行い、深さ方向への生物生息域拡大を試みた。毎月、散気盤直上の矢板において水深50cm間隔で設定したコドラート(15×20cm)に

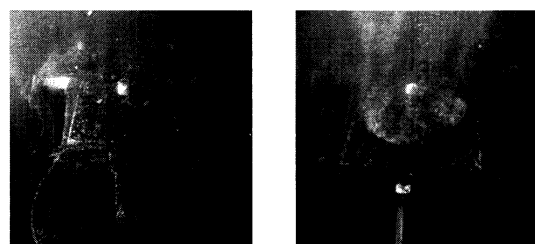


写真-1 散気量の違いによる曝気状況

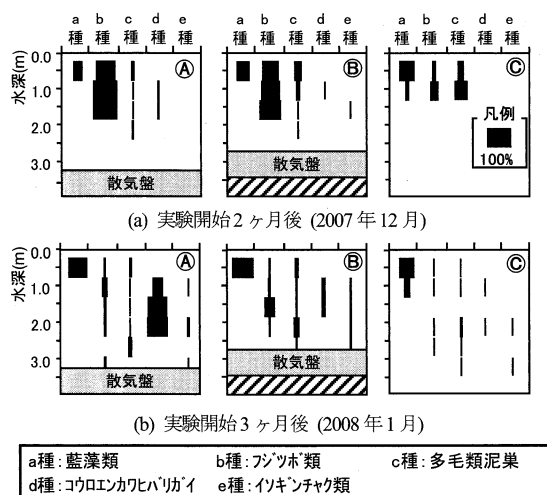


図-14 付着生物の被度の経月変化

おける付着生物の被度(%)を目視観察した。実験系A, Cは水深0.5mから水深3.0mまで、実験系Bは水深0.5mから水深2.5mまでを調査対象とした。

実験開始2ヶ月後および3ヶ月後の付着生物被度の経月変化を図-14に示す。図-14(a)に示す実験開始2ヶ月後では、実験系Cにおいて、付着生物は水深1.5m以深では認められず、貧酸素化の影響により生物が生息しうる水深帯が表層のみに限られていた。しかし、このときの実験系A, Bでは、水深1.5m以深に着目するとフジツボ類(*Balanus spp.*)と多毛類泥巢がともに付着しており、生物生息域の限界であった水深1.5m以深への生息域拡大がみられた。図-14(b)に示す実験開始3ヶ月後には実験系Cにおいても貧酸素化が解消していたため、水深1.5m以深で生物が付着しはじめている。これに対して実験系A, Bではとくに中層においてフジツボ類、コウロエンカワヒバリガイ(*Xenostrobus securis*)の被度の増加がみられた。そこでフジツボ類およびコウロエンカワヒバリガイについて種ごとにまとめた被度の経月変化を図-15に示す。コウロエンカワヒバリガイは富栄養化海域における優占種であり、海洋生物の中でも比較的高い生産力を持っており、フジツボにおいても濾過食者であるため、水質浄化能力の利用可能性がある。フジツボ類は実験開始2ヶ月後から3ヶ月後にかけて、いずれの実験系においても底層まで生息範囲は拡大したが、水深2.0m以浅において被度が大幅に減少し、相対的には減少傾向がみられた。同時期に本運河の前面に位置する尼崎港で行われた調査では、フジツボ類の大幅な減少は見られなかった。この差異については、フジツボを基盤として他の生物が付着したことなどが理由の一つであると考えた。

一方、コウロエンカワヒバリガイは生息範囲、被度ともに増加した。同時期の尼崎港においても増加傾向を示

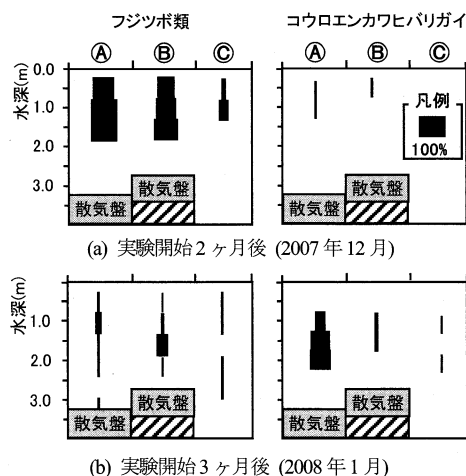


図-15 フジツボ類およびコウロエンカワヒバリガイの被度の経月変化

していた。さらに、本運河と同様の水環境特性を有する洞海湾におけるコウロエンカワヒバリガイの個体群動態に関する報告(小濱ら, 2001)では、現存量は1年間を通して安定しており、貧酸素化しやすい水域においても同様の傾向を示していた。本運河において兵庫県が実施した2006年8月の付着生物調査では、コウロエンカワヒバリガイが被度75%と高い密度で分布していた。以上より、本運河においてコウロエンカワヒバリガイが主要生物のひとつであり、曝気によりその生息域が拡大したことから、本曝気手法の目的である物質循環の活性化を本種に行える可能性があることがわかった。しかし、実験開始3ヶ月後での評価であり、生物種が遷移途中である可能性があることから、今後継続して調査を行う必要があると考える。

5. CO₂排出量に関する環境影響負荷

本手法を現地で展開する際の環境負荷(CO₂排出量)を概算した。散気量0.25L/minとした場合、本研究で用いた日立製のコンプレッサー(「エアーパンチ」PA800S, 出力0.75kw, 吐出し空気量85L/min)であれば、散気盤340個分を稼働することが可能である。そこで、北堀運河(総延長1996.25m)の直立護岸に沿って、現地実験施設と同様に散気盤を3m間隔で設置し、散気量0.25L/minで稼働した場合、コンプレッサー2機で理論上はまかなうことができる。ここで、使用電力量に電力会社が公表しているCO₂排出量に関する原単位を乗じてCO₂排出量を求めたところ、4607kgCO₂/yearとなり、1世帯あたりのCO₂排出量(約5277kgCO₂/year)(温室効果ガスインベントリオフィス, 2008-06-30参照)以下であることがわかった。

6. おわりに

本研究では、曝気対象を直立護岸壁面近傍に限定し、主に付着生物生息域の拡大と物質循環の活性化による浄化機能の向上を目的とする“水塊構造非破壊型曝気手法”を提案し、室内実験および現地実験よりその性能評価、現地における適応性と運用方法、効果の検証、および環境負荷の評価を行った。

室内実験の結果から、微細気泡石から発生する気泡は、他の微細気泡発生装置(辻村ら, 2005)による気泡と同等であること、曝気は溶解率が高い散気量で行うと効果的であることがわかった。

尼崎運河における現地実験では、散気量0.25L/minで曝気した場合、密度構造を維持しつつ全水深でDOの増加が見られ水塊構造非破壊型曝気として機能することがわかった。一方、0.60L/minでは、1.5m以浅でDOが減少

し、上昇流によって鉛直混合が生じることがわかった。また、現地実験を実施する際、最も効果的な散気量を把握するために、室内実験の結果を基に、現地実験系における散気量と飽和率の関係から、0.13L/min前後が最も効果的であると推算した。そこで、0.10L/minで散気したところ、散気盤に藻類・付着二枚性等が付着し目詰まりが発生した。以上より、秋・冬季の尼崎運河において、水塊構造非破壊型曝気として機能させるには、散気量を0.10~0.60L/minの範囲に設定する必要があることがわかった。

生物生息域の拡大効果については、曝気を行っている系で、水質浄化能を有するフジツボ類やコウロエンカワヒバリガイの生息域、被度の拡大が確認された。また、2006年8月の付着生物調査においても、コウロエンカワヒバリガイが優占しており、コウロエンカワヒバリガイによって、本手法の目的である物質循環の活性化を図れる可能性があることがわかった。

現地実験と同様の配置で、本手法を北堀運河全域で展開した場合のCO₂排出量は4607kgCO₂/yearであり、1世帯あたりのCO₂排出量以下であることがわかった。

謝辞：本研究は「尼崎シーブルー事業計画技術検討会(兵庫県)」の一貫として行われたものであり、関係者の皆様からは多大なご協力を頂いた。ここに記して、深く謝意申し上げる。

参考文献

- 温室効果ガスインベントリオフィス：日本の温室効果ガス排出量データ(オンライン), <http://www-gio.nies.go.jp/aboutghg/nir/nir-j.html>, 参照2008-06-30.
- 鯉淵幸生・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.
- 小濱剛, 門谷茂, 梶原葉子, 山田真知子(2001)：ムラサキイガイおよびコウロエンカワヒバリガイの個体群動態と過栄養海域における環境との関係, 日本水産学会誌, 67(4), pp.664-671.
- 佐々木洋之・佐々木淳・武田真典・岡野崇裕・足立有平(2006)：閉鎖性水域におけるマイクロバブル発生装置を用いた溶存酸素供給効果の把握, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.1171-1175.
- 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塊改善効果の解析, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.1161-1165.
- 田中陽二, 磯部雅彦, 鯉淵幸生, 五明美智男, 大野嘉典(2006)：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, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.1166-1170.
- 辻村太郎・京藤敏達(2005)：風波によるマイクロバブルの分散・拡散とマイクロバブル浄化法の効果に関する研究, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.1121-1125.
- 森紗綾香・上月康則・中西敬・上嶋英機(2007)：尼崎運河の水質・底質環境について, 第41回日本水環境学会, p.596.