

大阪湾奥の閉鎖性海域における流況制御を用いた 貧酸素化抑制の可能性

The Possibility of Tidal Current Control as Water Quality Remediation in
Semi-Enclosed Area Osaka Bay

石垣 衛¹・三次順也²・山崎宗広²・黒岩正夫³・辻 博和⁴・上嶋英機⁵

Mamoru ISHIGAKI, Jyunya MIYOSHI, Munehiro YAMASAKI, Masao KUROIWA
Hirokazu TSUJI and Hideki UESHIMA

The objective of this study is to verify the possibility of restraining the formation of low dissolved oxygen water condition in the bottom layer of semi-enclosed bay by tidal current control. Firstly, Omachama area in Osaka Bay was selected for case study area and detailed environmental investigation was conducted in order to clarify how limited tidal current affected the water quality in the region. Secondly, the feasibility of tidal current control as water quality remediation measures was studied by hydraulic simulation. As a result of this study, it was confirmed that anoxic water condition in semi-enclosed bay could be reduced by tidal current control by enhancing water exchange between the semi-closed area and outer sea and reducing the amount of organic suspended solids.

1. 緒 論

大阪湾奥の沿岸域では、高度成長期以降の大規模な埋立や防波堤建設等により、直立護岸で囲まれた閉鎖度の高い海域が多数出現した。このような海域では、流動場の大きな変化にともない停滞域が形成されたことで、陸域からの負荷が蓄積されやすく、過栄養化した海域が形成されている。その結果、植物プランクトン等の有機懸濁物の過剰な増殖を招き、透明度の低下や、貧酸素水塊が形成されるなどの環境課題が生じている。大阪湾奥に位置する御前浜は、西宮浜埋立や南芦屋浜埋立といった大規模な埋立が実施される中で、唯一その存在が市民によって守られた貴重な海浜域である。昨今の自然再生に対する社会動向において、劣化しつつある当該域の環境を保全・再生する関心が高まっており、市民が海とふれあうことができる親水空間の提供などが切望されている。

そこで本研究では、御前浜海域を対象とし、閉鎖度を高めた海域環境の修復を目的とした流況制御技術の適用効果、それにもなう水質改善の可能性について現地観測、水理模型実験により評価した。現地観測では当該域の水質の現況および、物質循環過程を明らかにし、有機懸濁物の酸素消費と貧酸素化の関連性について評価した。水理模型実験では、当該域の海水交換促進を目的とし、選定した流況制御手法の適用効果について評価した。

2. 流動・水質・物質収支に関する現地調査

(1) 対象海域

対象海域に選定した御前浜海域を図-1に示す。当該域は、尼崎西宮芦屋港（以下、尼西芦港と表現）の奥部に位置しており、周辺を西宮浜埋立地および、南芦屋浜埋立地に囲まれることで閉鎖度の高い海域となった場所である。当該域の面積は約50ha、最大水深は約8mであり、保有水量は平均潮位において約250万m³である。海域の南側および、東側に位置する2ヶ所の開口部を通じて海水の流出入があり、海域の北側中央部より夙川が流入している。また、海浜部の東側に豪雨時の排水ポンプ施設が2箇所設置されており、夙川とあわせて当該域への陸域由来の流入負荷源となっている。

(2) 現地調査方法

御前浜海域の水質の現況および物質循環の把握を目的に、図-1に示す調査地点にて、流況調査、水質調査、

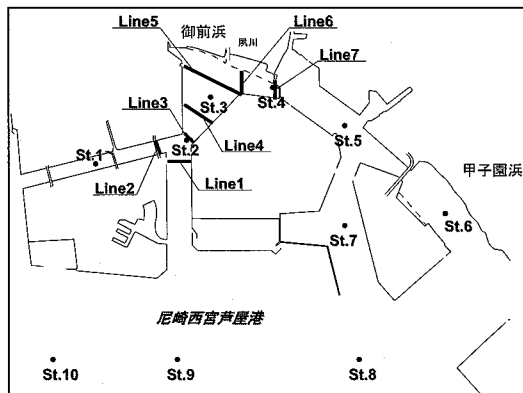


図-1 対象海域および調査地点

1 正会員 博(工) (株)大林組 土木技術本部 環境技術第二部
2 正会員 博(工) (独法)産業技術総合研究所
3 正会員 (株)大林組 土木技術本部 環境技術第二部
4 正会員 農博 (株)大林組 土木技術本部 環境技術第二部
5 正会員 工博 広島工業大学 環境学部 教授

表-1 現地調査概要

調査期日	調査項目		調査地点
H15. 7. 1	流況調査	流速, 流向	Line1 ~ Line7
	水質調査	水温, 塩分, DO, chl.a	St.2, St.3, St.4
H16. 8. 9 ~ H16. 8. 10	沈降物・堆積物調査	沈降速度, 堆積速度, 酸素消費速度	St.3, St.9
H18. 8. 24 ~ H18. 8. 25	流況調査	流速, 流向	Line3, Line7
	水質調査	水温, 塩分, DO, chl.a, T-N, DIN, T-P, DIP	St.2, St.3, St.4
	有機懸濁物生産量・分解量調査	一次生産速度, 分解速度	St.3, St.9
	沈降物・堆積物調査	沈降速度, 堆積速度, 酸素消費速度	

有機懸濁物生産量・分解量調査, 沈降堆積物調査を実施した。各調査は、表-1に示す期間において各項目について計測・分析を実施した。

a) 流況調査

平成15年度は、御前浜海域の流況の把握を目的とし、図-1に示すLine1～Line7の測線において小型船舶を用いたADCPの曳航観測を実施した。観測は7月1日の1潮汐周期間（7:00～21:00）に12回実施し、各測線における潮時毎・水深毎の断面流速・流向を計測した。また、平成18年度の調査は、御前浜海域に対する物質収支の算定を目的とし、測線Line3, Line7において、8月24日の1潮汐周期（7:00～19:00）にADCPを用いた観測を6回実施し、流量収支を求めた。

b) 水質調査

平成15年度の水質調査は、御前浜海域の水塊構造の把握を目的として実施し、図-1に示すSt.2, St.3, St.4にて機器計測を実施した。平成18年度の水質調査は、御前浜海域の物質収支の把握を目的に実施し、図-1に示すSt.2, St.3, St.4にて機器計測および、採水分析を実施した。採水分析は、各調査地点の表層下-1m水深および、海底上+1m水深の海水を採水して、室内にてT-N, DIN, T-P, DIPを分析した。

c) 有機懸濁物生産量・分解量調査

海域のDO収支に直接的に関連する植物プランクトンの一次生産量・分解量の把握を目的とし、図-1に示すSt.3, St.9にて有機懸濁物生産量・分解量調査を実施した。調査は、各調査地点の3水深（DL-0.5m, DL-1.5m, DL-2.5m）で採水を行い、明暗瓶法に従ってDO瓶を設置した。設置したDO瓶は、約5時間後に回収し、ウィンクラー法によりDOを測定することで、当該域の一次生産量・分解量を求めた。

d) 沈降物・堆積物調査

当該域の有機懸濁物の沈降・堆積過程がDO収支に及ぼす影響を求めることを目的とし、図-1に示すSt.3, St.9にて有機懸濁物の沈降量調査, 堆積物量調査を実施した。

沈降量調査について、St.3では4水深（DL-0.5m, DL-2.0m, DL-4.0m, DL-6.0m）に、St.9では5水深（DL-0.5m, DL-2.0m, DL-4.0m, DL-6.0m, DL-10.0m）にセジメントトラップ（直径8cm,

高さ25cm）を24時間設置し、各水深にて沈降物を捕集した。また、底泥直上にも容器を設置し、新生堆積物を捕集した。沈降速度は、沈降量調査で得た単位面積あたりの懸濁物沈降量の値を各水深で計測した浮遊懸濁物濃度の値で除することで求めた。回収した沈降物は上澄み液を除いた後、1,500rpmで遠心分離し、乾燥重量を測定した。また、採取した試料の一部は、乾燥させることなく酸素消費速度の分析に供した。酸素消費速度は、O₂UPTESTER（TAITEC製, 6C）を用いて暗条件下で攪拌を行いながら測定した。

堆積物調査は、各調査地点においてφ100mmのアクリルパイプを用いて25cm厚のコア採取を行い、採取試料の酸素消費速度を計測した。ここでは、コア採取に用いたアクリルパイプ内に飽和した海水を満たし、スターラーで攪拌しながらDOを測定することで底泥堆積物の酸素消費速度を求めた。なお、実験に用いた海水は、現地で採水した海水をろ過し、試料採取地点直上の水温に調整したものをを用いた。

(3) 流動環境

図-2に、平成15年7月1日の流況調査で得られた御前浜海域における上げ潮最強時の流れおよび、下げ潮最強時の流れを示す。ここでは、各測線における表層の流れをDL-2.0mの位置で示し、底層の流れをDL-5.0mの位置で示した。

上げ潮最強時では、Line3より当該域に流入する流れが卓越している。表層では、最大約20cm/秒で流入した流れがLine4まで到達することで、Line4の東側には約15cm/秒の強い流れが存在する。しかし、Line5およびLine6の流れは5cm/秒以下と遅く、上げ潮時に流入した海水は当該域奥まで到達していないことが示唆される。また、Line4の西側には南東から西向きの流れが存在しており、Line5の流向とあわせると、当該域中央部に反時計回りの循環流が形成されている。底層の流れは、表層に比較して弱いものの、ほぼ同様の流れを形成している。

下げ潮最強時では、Line3より流出する流れが卓越し、上げ潮時と異なり、底層の流れが表層の流れより大きい。底層の流れは、Line3で約20cm/秒、Line4で約10cm/秒であり、Line5では流れが5cm/秒以下と小さくなり停滞している。表層の流れは、Line1で当該域から

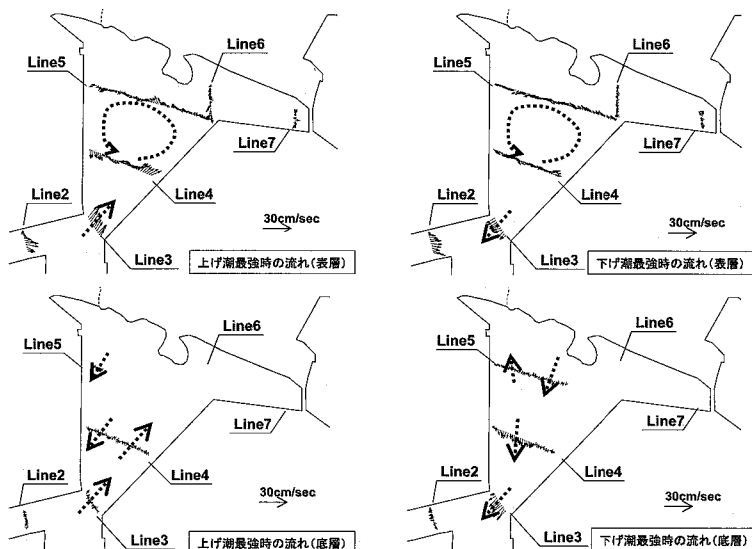
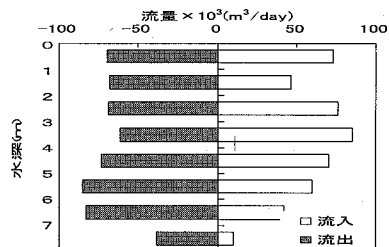
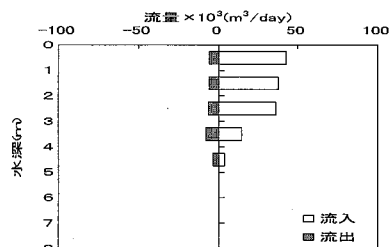


図-2 御前浜海域の流況



南側開口部 (Line3) からの流出入量



東側開口部 (Line7) からの流出入量

図-3 各流況測線における断面通過流量

流出する約 10 cm/秒の流が存在し、中央部には反時計回りの弱い流れの循環流が形成されている。

図-3 に各測線における水深別の流出入水量を示す。図より、Line3 では各水深とも流出入水量に著しい偏りはなく、内外の海水は均等に出入りしていた。Line7 では、流入量は少なく、当該域への流入量が流出量に比較して、大きな値であった。以上の観測結果から、当該域への海水の流出入は、主に Line3 を通じて行われているものの、外海水との交換範囲は南側域に留まり、Line7 の流れが小さいことも相俟って中央～北域に停滞域が形成されていることが示唆された。

(4) 溶存酸素の生産・消費過程

石垣ら(2005)は、現地観測結果より当該域が夏場に密度成層化し底層全域が貧酸素化すること、貧酸素化は密度成層の弱まりとともに解消に向かうものの、港奥部では成層が弱まる 11 月でも貧酸素化の状態が継続していることを示した。この結果は、当該域が沖合より早く貧酸素化し、その解消も遅れる特徴を持った海域であることを示すものである。そこで、当該域の有機懸濁物生産量・分解量調査および沈降物・堆積物調査から、植物プランクトンを中心とした一次生産・分解にともなう DO 収支を求めた。図-4 に、平成 18 年 8 月に St3 において計測した一次生産量と分解量を示す。一次生産量は、水深 0～1m で $8.3 \text{ g-O}_2/\text{m}^3/\text{日}$ の生産量が確認され、水深 1～2m で $7.0 \text{ g-O}_2/\text{m}^3/\text{日}$ 、水深 2～3m で $2.9 \text{ g-O}_2/\text{m}^3/\text{日}$ と水深が深くなるに従って生産量が低下する値を得た。現地観測で得た透明度(1.2m～1.6m)を考慮すれば、これ以深の一次生産は期待できず、単位面積あたりの一次生産量は

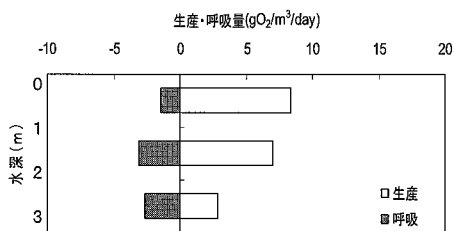


図-4 御前浜海域の一次生産量と分解量

$18.2 \text{ g-O}_2/\text{m}^2/\text{日}$ となる。呼吸商 1 として炭素量に換算すると $5.2 \text{ g-C}/\text{m}^2/\text{日}$ となり、谷本ら(2001)が示した大阪湾の一次生産量($1.1 \sim 4.0 \text{ g-C}/\text{m}^2/\text{日}$)より当該域の生産量が高いことが示された。その一方で、分解量も大きく、水深 2m～3m で $2.6 \text{ g-O}_2/\text{m}^3/\text{日}$ の値を得ており、分解量と生産量が同等であった。

平成 16 年 8 月に調査した St.3 および、St.9 における有機懸濁物の沈降フラックス量および、有機懸濁物・既堆積物の DO 消費速度を表-2 に示す。St.3 における有機懸濁物の沈降フラックスは $28.6 \text{ dry-g}/\text{m}^2/\text{日}$ であり、沖合の St.9 の $19.3 \text{ dry-g}/\text{m}^2/\text{日}$ に比較して大きい値を得た。この結果は、御前浜海域は、沖合に比較して沈降輸送が大きく、有機懸濁物等の汚濁負荷が蓄積されやすいことを示している。また、前述した当該域の一次生産量も大きいことと相俟って、当該域の水質、底質の悪化や酸素消費を増加させる要因の 1 つであると考えられる。

St.3 の有機懸濁物の沈降過程における酸素消費量について、水質調査結果より当該域には水深約 3m に密度

表-2 有機懸濁物のフラックス量, DO 消費量

調査地点	物質形態	有機懸濁物 Flux 量	DO 消費速度
St.3	沈降物	28.6 dry-g/m ² /日	1.9 g/m ³ /日(表層) 0.4 g/m ³ /日(底層)
	堆積物		1.3 g/m ² /日
St.9	沈降物	19.3 dry-g/m ² ・日	1.2 g/m ³ /日
	堆積物		0.7 g/m ² /日

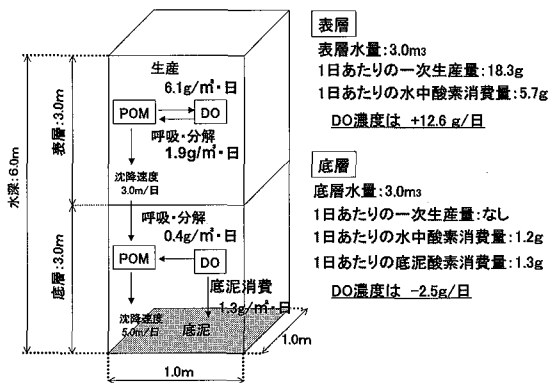
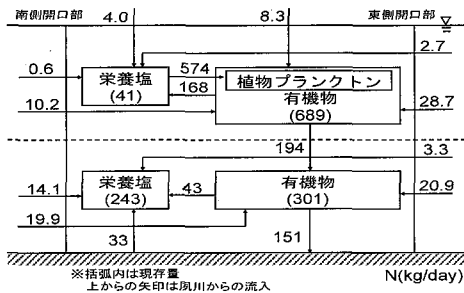
図-5 御前浜海域の1m²水柱あたりの酸素消費

図-6 御前浜海域の物質循環(窒素収支)

躍層が存在していることから、全水深(6m)に対して表層域(0~3m)と底層域(3m~6m)に分けてDO収支を算定した。St.3における1m²の水柱中の一次生産および、有機懸濁物の沈降・堆積過程におけるDO消費の収支を図-5に示す。図から、表層の一次生産による1日あたりの酸素供給量は18.3g-O₂となり、1日あたりの水中酸素消費量の5.7g-O₂に比較して約3.2倍の酸素が供給されている。一方で、底層域は一次生産がなく、1日あたりの水中酸素消費量は、1.2g-O₂、1日あたりの底泥酸素消費量は1.3g-O₂であり、ほぼ同等の酸素消費量であった。この結果は、仮に酸素が飽和状態としても、約5~6日で貧酸素化の状態となるポテンシャルを当該海域が有することを示している。ここで、底層の全酸素消費量のうち、約48%が水中酸素消費量

であり、当該域の貧酸素化解消には、主な水中酸素消費源である有機懸濁物量の削減も効果があると考えられる。

(5) 物質循環

図-6に、当該域の窒素収支を用いた物質循環を示す。ここで、各開口部のフラックスは平成18年8月の現地観測から得た流量収支に測線における水質(窒素濃度)の値を乗じて求めた。算定に用いた各調査結果の値は、本調査で捉えた当該海域の大潮時の断片的な値であるが、当該海域の特徴を反映しているものとして用いた。

図から有機懸濁物量は、流出入フラックスによる供給より、内部生産による供給が多い値を得た。また、増加した有機懸濁物の約34%が底層に沈降し、その内の約78%が底泥に堆積している。この結果から当該域では、栄養塩が蓄積されやすく、高い一次生産量により植物プランクトンが過剰に内部で生産され、沈降堆積することで汚濁負荷が蓄積される系が創出されていることが示された。この系を修復するには、内部生産で供給された有機懸濁物の希釈・拡散を促進し、汚濁負荷が蓄積されない系を創出することが1つの方法として考えられる。

3. 御前浜海域の流況制御に関する水理模型実験

(1) 水理模型実験内容

実験に用いた御前浜水理模型は、水平縮尺1/500、鉛直縮尺1/64の2次元の歪模型であり、鉛直方向の流れは一様な流れとして扱う。ここで、当該域は夏季に密度成層が形成され、密度流の影響が無視できない場であるが、ここでは、潮汐流の制御による海水交換に着目して流動場を評価した。実験は、油圧式のプランジャーを用いた起潮装置により、潮位振幅0.47cm(原型で30.3cm)、潮汐周期11分55秒(原型で12時間25分)を与え、前述にて示した当該域の流況観測結果を参照することで、現地の流況を再現した。実験ケースは、流況制御の適用効果を評価する目的で、Case1(現況)、Case2(流況制御構造物設置)、Case3(地形改変)の3ケースを設定した。ここで、対象海域の流況変化は、水面に設置した浮標の動きを画像解析により求めた。また、海水交換の評価は、浮標を等間隔に設置し、対象域内に残留する浮標数の変化より評価した。

(2) 水理模型実験結果と考察

a) 1 潮汐周期の流れ

図-7に1潮汐周期間の流跡を示す。Case1の結果では海域中央部には半時計回りの流れが存在し、南側開口部では、一旦流入した外海水が、海域奥部まで達することなく再び流出している。この結果は、前述の図-2に示した流況観測結果を再現できている。Case2では、流況制御構造物の設置により、中央部の循環流規模が大きくなった結果、南側開口部から流入した海水は現況に比

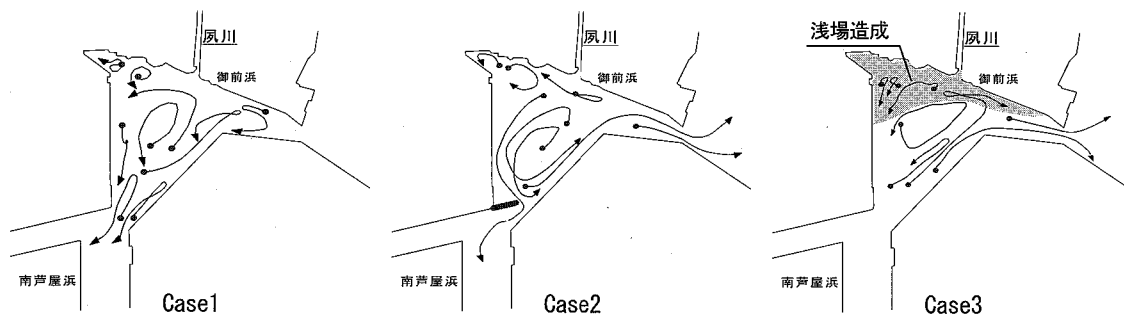


図-7 御前浜水理模型実験結果

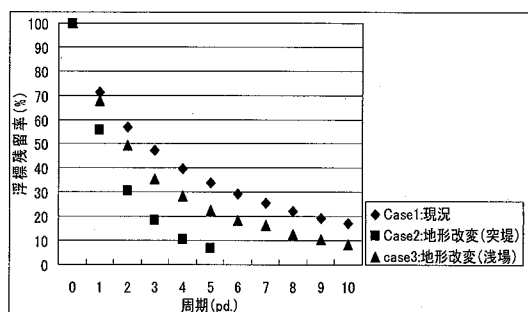


図-8 浮標残留曲線

表-3 海域の平均滞留時間

ケース	平均滞留時間 (pd.)
Case1	5.87
Case2	3.64
Case3	5.21

較して大きな流れを得た。その結果、南側開口部付近の海水は、1 潮汐周期間で東側開口部まで到達し、当該域から流出する。Case3 では、浅場造成ラインより奥域の海水の流れは小さくなる傾向にあるものの、現況の水深域では、南側開口部からの流入海水の流量が大きくなっている。このように流量が大きくなることは、当該域に流入する海水が奥域まで達すること、奥域の海水も当該域の外に流出しやすくなることで、海水交換の促進が期待される。

b) 流況制御による海水交換の変化

図-8 は、対象海域に設置した浮標ボールの残留率変化を示したものである。図中の浮標残留率は投入量で正規化して示しており、横軸の時間単位は潮汐周期を表す。

各ケースの浮標残留率の時間変化をみると、Case2 で残留率の値は最も早く減衰し、海水交換の促進が大きい結果を得ている。表-3 は、浮標残留率変化を $\exp(-at)$ 、(t は潮汐周期、 a は定数) で近似し、 $0 \sim \infty$ まで積分して得られる平均滞留時間の値を示したものである。Case2 の流況制御構造物の設置効果は、平均滞留時間が Case1 (現況地形) の 5.87 周期 (pd.) に対して、Case2 (構造物設

置) が 3.64 周期 (pd.) となり、海域の滞留時間を約 38 % 削減する結果を得た。Case3 (地形改変) は、平均滞留時間が 5.21 周期 (pd.) となり、浅場を造成することによる滞留時間の削減効果は約 11 % に留まった。

4. 結 論

本研究にて得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 御前浜海域への海水の流入は、南側開口部から量が卓越しており、上げ潮時に流入した海水は海域中央部付近まで達するものの、奥域まで到達せず、下げ潮時に南側開口部から流出する。このため、海域中央部から北東域に停滞域が形成されることが確認された。
- 2) 御前浜海域の物質循環は、内部生産による有機物懸濁物の供給が大きく、現存量の約 34 % が沈降し、約 27 % が底泥に蓄積する。これらの有機物懸濁物の沈降過程における酸素消費量は大きく、底泥堆積物の酸素消費量と同等であった。貧酸素化抑制に向けて、当該域の有機懸濁物量の削減が必要であることが示された。
- 3) 御前浜海域の流況制御の効果を検証する水理実験では、南側開口部に流況制御構造物を設置することで、平均滞留時間を約 38 % 削減できることが示された。このような海水交換による有機懸濁物の希釈・拡散は、水中の酸素消費量を削減でき、貧酸素化を抑制できる方法の一つと考えられる。

謝辞：本研究に用いたデータの一部は、『大阪湾奥部における流況制御技術の開発に関する研究』の共同研究成果である。ここに記して、謝意を表す。

参 考 文 献

- 谷本照巳・星加 章・三島康史・柳 哲男 (2001)：大阪湾における懸濁物質・窒素・リンの収支と循環，海の研究，Vol. 10, No. 5, pp. 397-412
- 石垣 衛・入江正安・中辻啓二・山本 縁 (2005)：大阪湾奥の物理的攪乱と貧酸素水塊が二枚貝の生息域に及ぼす影響，海岸工学論文集，第 52 巻，pp. 1181-1185