

大阪湾奥部の貧酸素化に及ぼす物質循環の影響 と環境改善策の一提案

THE INFLUENCE OF MATERIAL CYCLE ON OXYGEN DEFICIENCY
AT INNER PART OF OSAKA BAY AND A SUGGESTED
OF COASTAL ENVIRONMENT IMPROVEMENT

三好順也¹・山崎宗広¹・石垣 衛²・小野 健³・上嶋英機⁴

Junya MIYOSHI, Munehiro YAMASAKI, Mamoru ISHIGAKI, Ken ONO and Hideki UESHIMA

¹正会員 博(工) (独法)産業技術総合研究所 地質情報研究部門 沿岸海洋研究グループ
(〒737-0197 広島県呉市広末広2-2-2)

²正会員 博(工) 株式会社大林組 土木技術本部 環境技術第二部
(〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

³いであ株式会社 環境コンサルタント事業部 環境技術グループ
(〒550-0002 大阪府大阪市西区江戸堀3-2-23)

⁴正会員 工博 広島工業大学 環境学部地球環境学科 (〒731-5193 広島市佐伯区三宅2-1-1)

The surrounding of Omaehama is a natural coast only left in the Osaka bay. In this study, we decided to consider the influence of material cycle on oxygen deficiency after primary production, settling, deposition process was investigated. Water flow of the study site was produced the cycle that inflow through the surface of water from the outside coast, outflow through the over middle depth. The consumption DO per unit column of seawater was about 2.7 times higher than it of sediment. It was considered that the consumption DO of seawater is one of the causes of oxygen deficiency at the study site. As a result, material cycle was calculated, the accumulation of organic was gotten recognition on the coast. To increase the amount of seawater flow to outside coast is one of the oxygen deficiency improvement plans.

Key Words : *Oxygen deficiency, Material cycle, Primary production, Settling-Deposition process, Flow environment*

1. 緒 論

大阪湾奥部では慢性的な貧酸素化が生じており、沿岸生態系に多大な被害をもたらしている。これに対して、大阪湾再生推進会議が策定した大阪湾再生行動計画では、沿岸域の生態系機能を回復し、海域環境の改善を図るとしている。大阪湾奥部に唯一残された自然海岸である御前浜を含んだ尼崎西宮芦屋港（西宮エリア）は、そのアピールポイントの一つに指定されている。このエリアの奥部に位置する御前浜からその東側の甲子園浜周辺海域では、水上スキーやカヌーの練習場となっており、また御前浜では、散歩や潮干狩りを楽しむ市民がみられ、自然と触れ合うことのできる貴重な地域となっている。しかしながら、近年では、この周辺海域において年に数回の青潮の発生が確認されており、環境の改善が望まれている。

近年では、この周辺エリアを対象とした貧酸素水塊の挙動に関連して、気象の影響¹⁾や、栄養塩の

分布との関係²⁾、また二枚貝の生息域に及ぼす影響³⁾などの研究がなされている。ここで得られている知見として、御前浜から甲子園浜にかけての港奥部域では5月から貧酸素化が進行し、11月にもなお貧酸素水塊がみられること⁴⁾が挙げられ、中層での酸素消費の影響が一般的な沿岸域よりも大きく、貧酸素水塊の発生・消滅過程に重量な役割を果たしていることが指摘されている。

そこで本研究では、溶存酸素に直接関連する植物プランクトンによる一次生産・呼吸に加えて、懸濁粒子の沈降・堆積といった生産から分解までの過程に着目し、港湾内での当該過程による物質循環と、それに伴う酸素収支の定量化を試み、ここでの物質循環が貧酸素化に及ぼす影響について調査、検討を行った。それに加えて、酸素の輸送や酸素消費物質の拡散など流れに関連した環境改善策の提案を目的に、潮汐を再現した瀬戸内海大型水理模型を用いて実験的検討も行った。

2. 現 地 観 測

(1) 調査概要

a) 流動調査

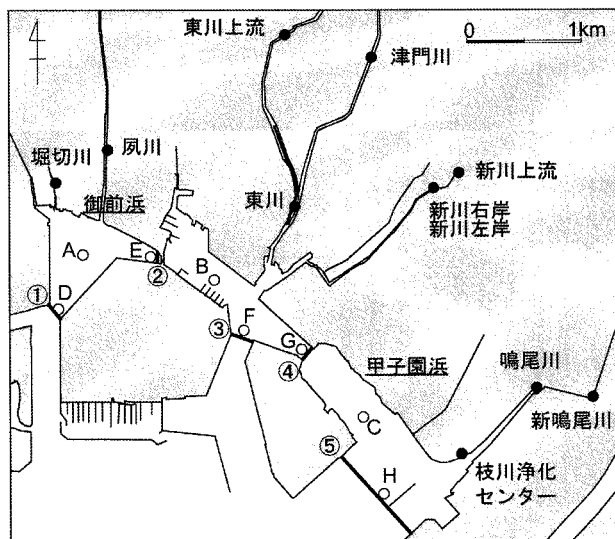
2006年8月24日に図-1に示す測線①～⑤において、小型船を用いた ADCP(1200 kHz)の曳航観測を行った。一潮汐にわたる流動変化を捉えるために、約12時間(満潮～満潮)で6回の観測を実施した。

b) 水質観測

地点 A～H において、鉛直方向に水温、塩分、濁度、Chl. a、DO の測定を STD 計によって観測した。また同地点において4水深(水深0.5、1.5、2.5 m、海底上1.5 m)にて採水を行い、SS、POC、PON、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、DTN の分析を行った。なお、有機物の分析には CHN コーダー(YANACO 製、MT-5)、栄養塩については、自動水質分析器(BLTEC 製、AACS V)を用いて行った。

c) 一次生産量の測定

地点 A～C において水面から0.5、1.5、2.5 m で採水を行い、明暗瓶法に従って DO 瓶を垂下した。約5時間後回収し、ウィンクラー法により DO を測定した。また、呼吸商を1として得られた酸素量を炭素量に換算した。



○：調査地点 ●：河川地点 —：測線
図-1 調査地点および測線

d) 沈降物調査

地点 A～C において巻き上がった堆積物が混入しない水深帯である海底面上1.5 m にセジメントトラップ(直径8 cm、高さ25 cm)を計6本一昼夜設置し、沈降物を捕集した。回収した沈降物は、サイフォンで上澄み液を除いた後、1500 rpm で遠心分離し乾燥重量を測定した。試料の一部は乾燥させずに酸素消費速度の分析に供した。酸素消費速度は O_2 UPTESTER (TAITEC 製、6C) を用いて暗条件下で攪拌を行いながら測定した。また、乾燥後の試料について POC、PON の分析を行った。

e) 堆積物調査

堆積物は、地点 A～C において内径10 cm のパイプを用いてコア採取し、沈降物と同様に POC、PON および酸素消費速度の分析を行った。酸素消費速度は、大島⁵⁾や徳永ら⁶⁾の方法に従い、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 を測定した。なお、実験に用いた海水は、採取した現場水を GF/C でろ過し、試料採取地点底上付近の水温に調整したものとした。

f) 流入負荷調査

また河川からの流入負荷を把握するため、黒丸で示した地点において流速、水深の観測を行った。また、水質観測と同様に採水を行い、SS、POC、PON、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、DTN の分析を行った。

(2) 調査結果および考察

a) 流動環境

図-2、図-3に8月24日の下げ潮期と上げ潮期における流速分布を示す。下げ潮期は外側の海域と接続する測線①、③、⑤の水深1 m において北東向きの外側から陸域に向かっての流入する流れが卓越していた。これに対して同側線での水深3 m 以深では、水深1 m と流れが逆転しており、南西向きの外側に向う流れが確認された。上げ潮期では、測線⑤の水深1、3 m で北東向きの流れが確認されたものの、側線①、③では潮汐流と密度流が重なり合った複雑な流れが形成されていた。

次に各水深の側線長にその水深の平均流速を乗じて1 m 毎の流量を求めた結果を図-4に示す。なお、計6回の調査で北東向きの流れを流入、南西向きの流れを流出としてそれぞれ積算した。流速分布の結

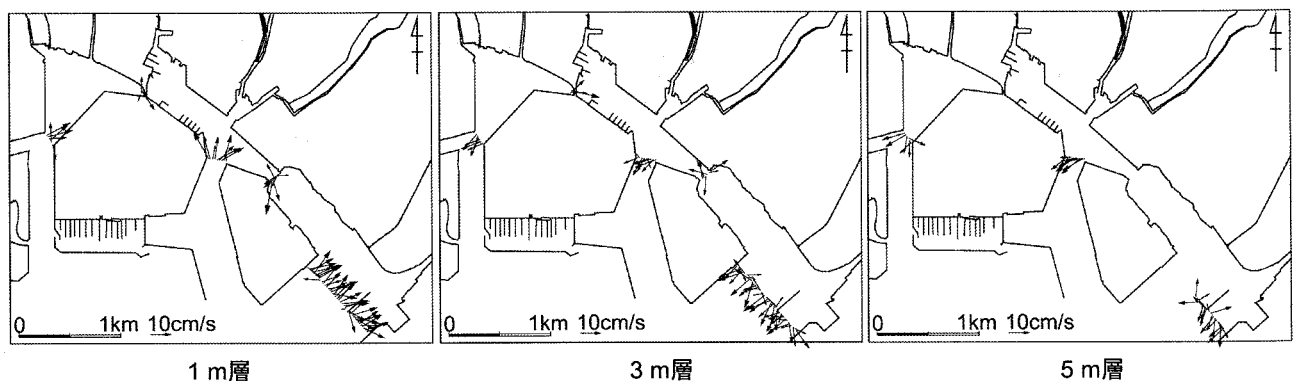


図-2 下げ潮期における流速分布

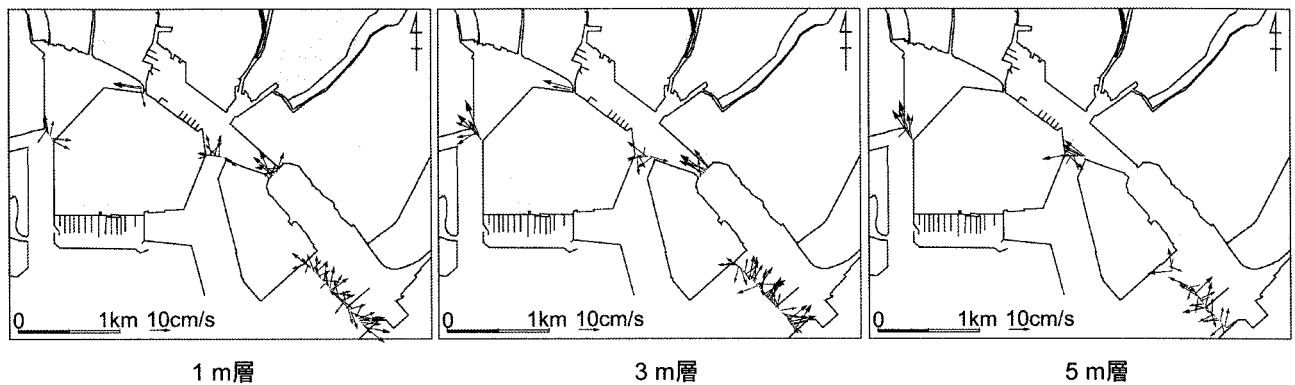


図-3 上げ潮期における流速分布

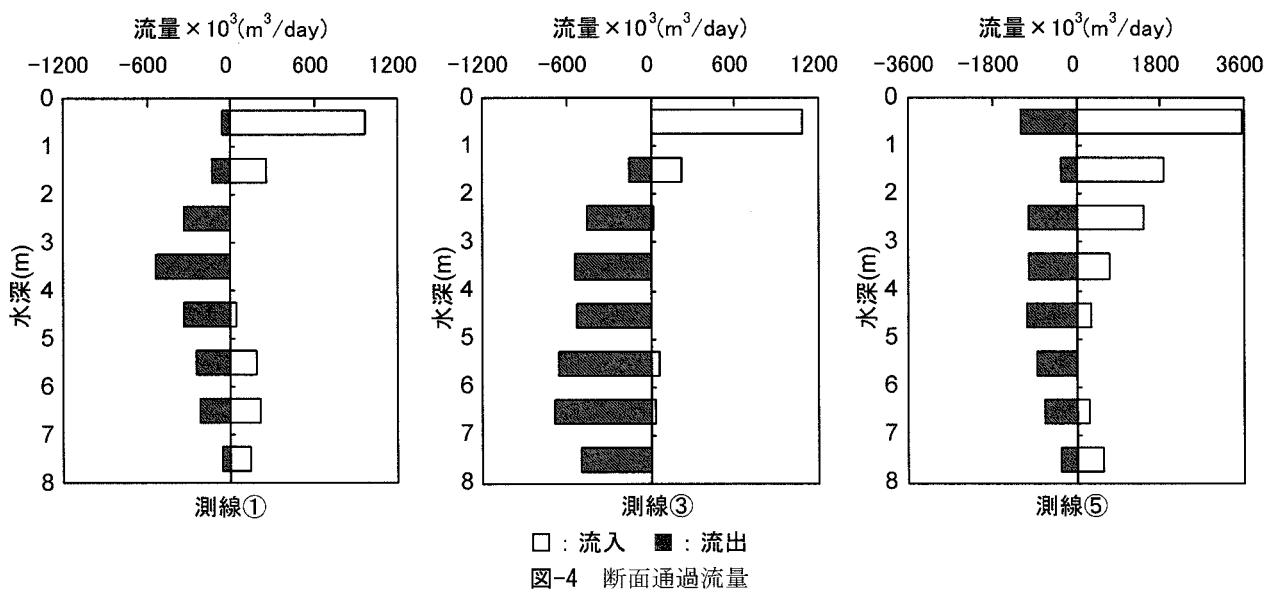


図-4 断面通過流量

果と同様に、いずれの測線においても表層では流入する流れが卓越しており、2, 3 m 以深では逆の南西方向の流れが大きかった。つまり本海域では、外側の海域から表層を通じて奥部へ流入し、中層以深から流出するといった循環が形成されていることがわかった。

b) 植物プランクトンの生産・呼吸に伴う酸素収支

図-5 に地点 A～C において測定した一次生産量と呼吸量を示す。水深 0～1m で平均 $13.0 \text{ gO}_2/\text{m}^3/\text{day}$ の生産量が確認され、水深 1～2m で $8.8 \text{ gO}_2/\text{m}^3/\text{day}$ 、水深 2～3m で $2.5 \text{ gO}_2/\text{m}^3/\text{day}$ と水面より深くなる

につれ低下していた。単位面積あたりの一次生産量は、平均 $22.2 \text{ gO}_2/\text{m}^2/\text{day}$ であり、呼吸商 1 として炭素に換算すると平均 $8.3 \text{ gC}/\text{m}^2/\text{day}$ となる。例えば瀬戸内海の夏季の一次生産量は $0.12 \sim 0.95 \text{ gC}/\text{m}^2/\text{day}^{7)}$ 、大阪湾沖合では $1.1 \sim 4.0 \text{ gC}/\text{m}^2/\text{day}^{8)}$ と本海域の一次生産量は非常に高いことがわかる。尼崎西宮芦屋港の東側に位置し、閉鎖的な海域である尼崎港の港湾内では、平均 $7.1 \text{ gC}/\text{m}^2/\text{day}$ と近い値を示していることから、大阪湾奥部での人工構造物に囲まれた閉鎖的な海域では、非常に高い植物プランクトンの活性がみられることがわかった。

その一方で、生産量に反映して呼吸量も高く、水深 2～3 m で $2.1 \text{ gO}_2/\text{m}^3/\text{day}$ と最も高かった。この水深帯では一次生産量 ($2.5 \text{ gO}_2/\text{m}^3/\text{day}$) と呼吸量が同程度であった。水質調査によると本海域の透明度が 1.2～1.6 m であったことから、これ以深の水深帯での一次生産は期待できないものと考えられる。しかしながら、Chl. a の鉛直分布 (図-6) からは、水深 2.5～3.5 m でピークを示しており、水深 3～4 m においても水深 2～3 m と同程度の植物プランクトンの呼吸による酸素消費が予想される。したがって、植物プランクトンによる一次生産と呼吸での酸

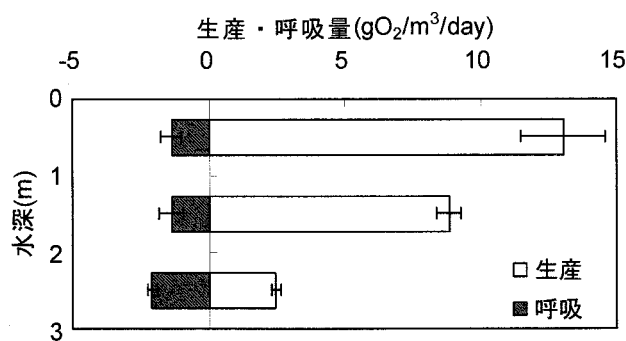


図-5 一次生産量と呼吸量(平均±標準誤差)

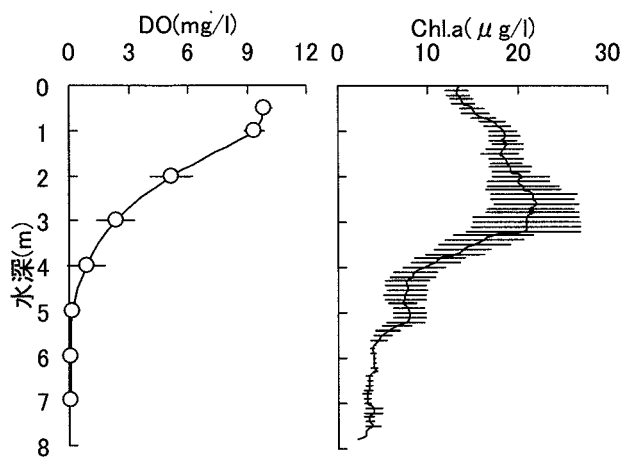


図-6 DOとChl. aの鉛直分布（平均±標準誤差）

素収支において、水深 0～3 m では生産量が呼吸量を上回るものの、水深 3 m 以深では呼吸量が生産量を上回り、中層における過度の呼吸は貧酸素化を助長する要因となることが示唆された。

c) 懸濁粒子の沈降・堆積過程における酸素消費

表-1 に地点 A～C における懸濁物の性状、沈降物の SS Flux とその性状、堆積物の性状をまとめて示す。本海域の SS Flux は平均 31.4 dry g/m²/day であった。それに対して、本海域の外側で行われた調査での SS Flux は、1.5～11.2 dry g/m²/day⁹⁾ と奥部に位置する本海域のほうが高く、海底への沈降物負荷の大きいことがわかる。また SS Flux に POC を乗じて海底への有機物負荷量を算出すると、2.36 gC/m²/day 生じており、本海域での植物プランクトンによる一次生産量の約 29% に相当する有機物量が海底に負荷されていることがわかった。

次に沈降物が海底に至るまでの沈降過程で酸素を消費することを考慮し、沈降物の DO 消費量を式 (1) によって算出した。

$$\text{沈降物の DO 消費量 (gO}_2\text{/m}^2\text{/day)} = \frac{\alpha \cdot \beta \cdot h}{v} \quad (1)$$

ここで、 α : SS Flux dry g/m²/day, β : 沈降物の DO 消費速度 gO₂/dry g/day, h : 平均水深=5 m, v = 沈降物の沈降速度 m/day である。なお沈降速度は、沈降物量を同水深帯の SS で除して算出した¹⁰⁾。

沈降物が海底に至るまでの DO 消費量は 0.97 gO₂/m²/day となり、コア採取で得られた堆積物の DO 消費量 1.93 gO₂/m²/day の 1/2 程度であった。また、ここで得られた沈降物の平均沈降速度は 6.0

m/day と速く、沈降物と堆積物の有機物濃度にそれほど違いがみられないことから、沈降粒子は速やかに海底に到達、堆積し、海底において分解が進行していると考えられた。

d) 単位水柱あたりの酸素消費量

以上で得られた結果を用いて、一次生産から沈降・堆積過程での DO 消費量を累積し、単位水柱あたりの DO 消費量を求めた。なお、3 m 以深での海水の DO 消費量については、沈降物の単位重量あたりの DO 消費速度 1.60 gO₂/dry g にその水深帯での SS を乗じて求めた。

単位水柱あたりの海水の DO 消費量は平均 5.20 gO₂/m²/day であった。この内、沈降物の DO 消費量は 0.97 gO₂/m²/day であるので、その差の 4.23 gO₂/m²/day は植物プランクトンの呼吸や懸濁物の分解による消費であることがわかる。また海水の DO 消費量は、堆積物のそれ (1.93 gO₂/m²/day) に比較して約 2.7 倍高く、海水の DO 消費は、本海域での貧酸素化の要因の一つであると考えられた。ただし、海水の DO 消費には DO の豊富な水深帯である表層での消費も含まれているおり、貧酸素化のメカニズムを明確化するためには、今回行った一次生産調査のように、各水深帯における DO 消費量を詳細に観測することが必要であると考えられる。

e) 物質循環

測線①、③、⑤と海岸線で囲まれた海域について物質循環を検討した結果を図-7 に示す。外側の海域と接続する測線①、③、⑤を通過する Flux (図中左側) は、ADCP により観測した流量 (図-4) に測線上の地点 (例えば、測線①では地点 D) での水質結果を用いて各物質濃度を乗じて求めた。なお、

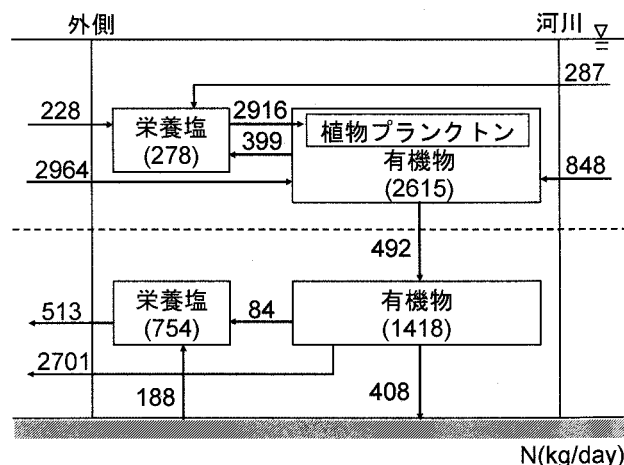


図-7 物質循環図(数値: Flux, 括弧内: 現存量)

表-1 懸濁物、沈降物、堆積物の性状（平均±標準誤差）

	SS Flux dry g/m ² /day	POC mgC/dry g	PON mgN/dry g	C/N	DO消費量 gO ₂ /m ² /day
懸濁物	-	430.8±35.6	78.00±6.72	5.63±0.19	-
沈降物	31.4±2.0	76.4±4.03	7.50±0.92	11.00±0.93	0.97±0.21
堆積物	-	56.2±3.75	6.43±0.67	9.04±0.50	1.93±0.25

栄養塩は DIN, 有機物は DON+PON を意味する. ここで, 流動調査の結果で表層と中層以深で流れが異なっていたこと, 一次生産の結果より水深 3 m 以深で一次生産が行われていないことから, 水深 3 m を境界に上下層の 2 層に分けて算出した. 河川からの流入量 (図中右側) も本調査で得られた流量データに各物質濃度を乗じて求めた. 植物プランクトンの一次生産による栄養塩の固定量は炭素生産量にレッドフィールド比 ($C:N=5.68:1$, 重量比) により窒素固定量を求めた. 沈降粒子の分解量および堆積物の分解量については, 炭素 1 g を分解するために必要な酸素量 $3.47 \text{ gO}_2^{(1)}$ を用いて酸素消費量から炭素量を算出し, それぞれの C/N から窒素量に換算した.

上層 (水深 3 m 以浅) への栄養塩の流入は, 外側の海域から 228 kg/day , 河川からは 287 kg/day であり, やや河川からの流入が大きかった. 対して下層 (水深 3 m 以深) からの流出は, 外側の海域へ 513 kg/day であり, 上層への栄養塩の全流入量 515 kg/day とほぼ一致していた. しかしながら, 上層への有機物の流入は外側の海域から 2964 kg/day , 河川から 848 kg/day と合計 3812 kg/day であったが, 下層から約 70% に相当する 2701 kg/day しか流出しておらず, 本海域内に残りの有機物が蓄積していると思われる. 一方, 有機物の上層から下層への Flux は 492 kg/day 生じており, このうちの 84 kg/day が沈降過程で分解し, 残りの 408 kg/day が海底に負荷されていることがわかる. さらに負荷された有機物の約 46% にあたる 188 kg/day の有機物が海底で分解されるものの, 残りの有機物は分解されずに堆積していると考えられる.

これらの蓄積する有機物は本海域内で DO を消費し, 分解されると考えられ, 外側の海域への流出量を増加させることが貧酸素化の改善策の一つであるといえる. 特に海底への負荷された有機物よりも, それのもととなる海水中での有機物を効果的に流出されれば, 海水の DO 消費の削減に加えて, 海底での堆積物の DO 消費の削減に繋がるものと思われる.

3. 環境改善に向けた水理模型実験

(1) 実験概要

瀬戸内海大型水理模型は, 水平 1/2000, 鉛直縮尺 1/159 の歪み模型であり, 海底地形は詳細な海図にもとに製作されている¹²⁾. 実験は, 潮汐を現地と同様に再現させるために, 紀伊水道, 豊後水道および響灘の 3 ヶ所の起潮装置に, 瀬戸内海で卓越する M_2 潮を与えて行った.

酸素の輸送や酸素消費物質の拡散など流れに関連した環境改善策の提案を目的に, Case1, 2 の突堤および導流堤設置を想定し, 実験を行った. (図-8) なお, 現況地形は Case0 とした. 港内の流況の変化は, 水面に浮かべた紙製の浮標 (直径 5 mm) の動きをデジタルカメラによって 5 秒毎に撮影を行い, 個々の浮標について追跡し, 評価を行った.

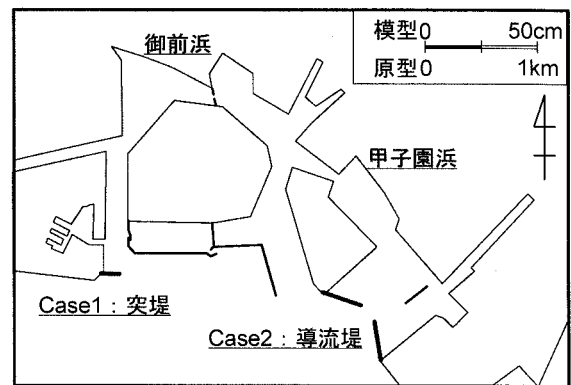
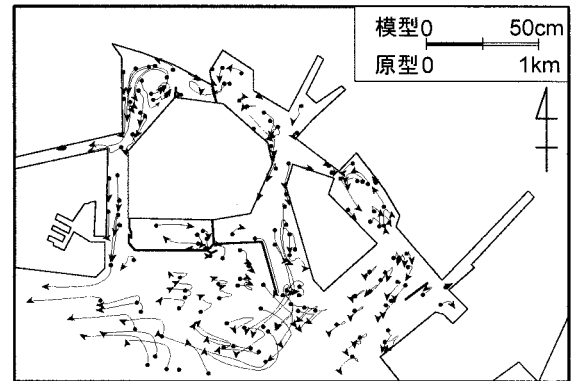
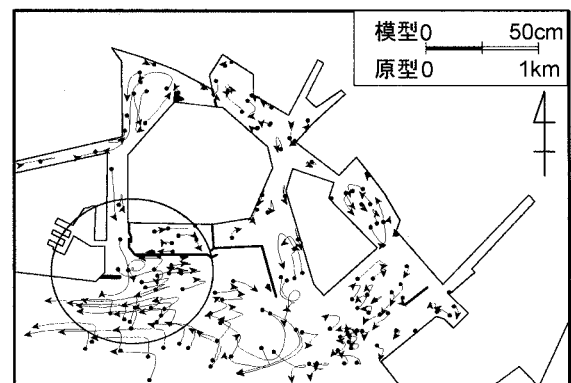


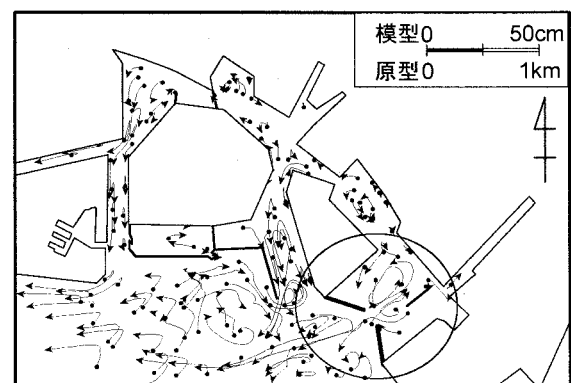
図-8 実験条件



Case0 : 現況地形



Case1 : 突堤設置



Case2 : 導流堤設置

図-9 流跡の変化

(2) 実験結果および考察

図-9 に各実験条件における 1 潮汐周期間での浮

標流跡の変化を示す。現況地形 Case0 での流跡では、御前浜前方の海域で反時計回りの循環流が確認された。突堤を設置した Case1 では、突堤周辺において複雑な流れに変化しているが、御前浜前方の奥部までは影響を及ぼしておらず、現況地形と同様に反時計回りの循環流がみられ、その規模に変化はない。ハの字型に導流堤を設置した Case2 では、導流堤の背後で現況地形 Case1 では存在しなかった大きな反時計回りの循環流がみられ、流動が大きくなっていた。また導流堤から外側へ向かう大きな流れもみられることから、奥部域の海水の流出に効果的であると思われる。その一方で、導流堤設置に伴い、御前浜前方の循環流が弱くなり、流れが衰退していた。

以上のことから、Case1 の突堤設置では、突堤周辺の流れを変化させることはできるものの、奥部域まで影響が及ばず、流動の改善はみられなかった。また Case2 の導流堤設置では、奥部域の流れを衰退させていたものの、導流堤周辺では流動の改善がみられることから、それに加えて突堤等を配置することで、本海域での流動改善の効果が期待できる。

4. 結 論

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 尼崎西宮芦屋港奥部の御前浜から甲子園浜の前方海域では、上げ潮期、下げ潮期ともにその外側の海域の表層から海水が流入し、中層以深から流出するといった循環が確認された。
- 2) 本海域での一次生産量は平均 $8.3 \text{ gC/m}^3/\text{day}$ であった。水深 2~3 m では生産量と呼吸量が同程度であり、それ以深においては、植物プランクトンによる生産は期待できず、呼吸による DO 消費のみとなる。
- 3) 沈降物が海底に至るまでの DO 消費量は $0.97 \text{ gO}_2/\text{m}^2/\text{day}$ で、堆積物による DO 消費量 $1.93 \text{ gO}_2/\text{m}^2/\text{day}$ の 1/2 程度であり、沈降物の平均沈降速度が 6.0 m/day と速いことから、沈降物は速やかに海底に堆積し、海底において分解が進行していると考えられた。
- 4) 単位水柱あたりの海水の DO 消費量は、平均 $5.20 \text{ gO}_2/\text{m}^2/\text{day}$ であり、堆積物のそれ ($1.93 \text{ gO}_2/\text{m}^2/\text{day}$) に比較して約 2.7 倍高く、本海域での貧酸素化の要因の一つであると考えられた。
- 5) 本海域での物質循環を求めた結果、栄養塩は流入に対して流出がほぼ一致しているものの、有機物については流入に対して約 70% しか流出しておらず、本海域内に蓄積していると考えられた。また海底への有機物負荷量は、 408 kg/day であり、約 46% に相当する 188 kg/day の有機物が海底で分解されるものの、残りの有

機物は分解されずに堆積していると考えられた。

6) 環境改善に向けての水利模型実験より、導流堤設置によって、奥部域の流れを衰退させていたものの、導流堤周辺では流動の改善がみられたことから、それに加えて突堤等を配置することで、本海域での流動改善の効果が期待できる。

謝辞：本研究は、共同研究「大阪湾奥部における流況制御技術の開発に関する研究」の一環で行ったものである。また、枝川浄化センターには貴重なデータを提供して頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 入江政安，西田修三，中辻啓二，金俊憲，湯浅楠勝：都市域近傍の閉鎖性水域における貧酸素水塊の挙動に及ぼす気象の影響，海岸工学論文集，第 50 巻，pp. 991-995，2003。
- 2) 入江政安，中辻啓二，西田修三，石垣衛，窪田勇輝：人工構造物に囲まれた水域における DO および栄養塩の時空間分布特性，水工学論文集，第 50 巻，pp. 1411-1416，2006。
- 3) 石垣衛，入江政安，中辻啓二，山本縁：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. 1181-1185，2005。
- 4) 石垣衛，上嶋英機，上月康則，吉村直孝，宇都宮隆司，村上仁士：閉鎖性水域への流況制御技術の適用と流速場の変化に対する付着生物群集の応答の研究，土木学会論文集，No. 762/VII-31，pp. 21-32，2004。
- 5) 大島巖：有明海湾奥部での貧酸素水塊形成要因についての一考察，海の研究，14(3)，pp. 459-462，2005。
- 6) 徳永貴久，松永信博，阿部淳，児玉真史，安田秀一：有明海西部海域における高濁度層の観測と懸濁物質による酸素消費の実験，土木学会論文集，No. 782/II-70，pp. 117-129，2005。
- 7) 山口峰生，安楽正照：瀬戸内海西部周防灘における基礎生産について，南西水研報，No. 17，pp. 135-148，1984。
- 8) 谷本照巳，星加章，三島康史，柳哲雄：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. 397-412，2001。
- 9) 西田修三，入江政安，中辻啓二：大阪湾奥部沿岸域における懸濁物質の挙動と底泥特性，海岸工学論文集，第 53 巻，pp. 991-995，2006。
- 10) 細川恭史，堀江強，三好英一，加藤道康：沿岸域におけるけん濁粒子の沈降速度測定法について—数種の測定法の比較—，港湾技研資料，No. 433，pp. 3-26，1982。
- 11) 佐々木克之：内湾および干潟における物質循環と生物生産【5】沈降物捕集方法と三河湾の沈降量，海洋と生物，Vol. 15，No. 5，pp. 319-324，1993。
- 12) 中国工業技術試験所：瀬戸内海大型水利模型—その施設と設備—，中国工業技術試験所大型水利模型資料，94p.，1976。