

# 貧酸素水塊を形成する閉鎖性港湾の浄化に関する研究

宮岡 修二 石垣 衛  
辻 博 和

## 概 要

再開事業が進められている某港湾地区では、夏場に水面から悪臭が発生するため、その対策が求められている。この水域は、防潮堤によって囲まれた閉鎖性水域であることに加えて、夏場には水温成層が生じ、上下の水の循環が起りにくくなるため、水が停滞しやすい。水底面には有機汚濁の著しい底質が堆積しており、停滞した港内下層水塊では、溶存酸素が急速に消費されて貧酸素状態となり、さらには悪臭物質である硫化水素が発生する。改善対策としては、底質を覆砂する方法と水循環を促進して上層水中の酸素を下層へ送り込む方法が候補として考えられた。そこで、これらの対策の改善効果について、室内実験および数値実験を用いた検討を行った。下層水と底質との界面をモデル化した円筒カラムを用いた室内実験を行い、覆砂および水循環の促進による酸素補給が底質からの臭気発生を抑制するのに有効であることを確認した。これらの対策の対象水域への適用性については、簡単なボックスモデルを用いた数値計算によって比較検討した。その結果、覆砂と水循環の促進を併用する方法が有効であろうと判断された。また、多量の土砂を投入することが可能であれば、窪地部を埋戻し、対象水域の水深を浅くする方法も有効であろうと考えられた。

## 1. はじめに

近年、都市部のウォーターフロントは、物流、アメニティ、生物との共生など多くの視点からその有用性が見直され、各地で整備事業が計画、実施されている。ところが、こうした水域の多くでは、赤潮に代表される植物プランクトンの異常増殖や貧酸素水塊の発生、水生生物種の減少など、水環境の悪化が深刻であり、水域の浄化対策が求められている。某港湾地区でも、地域住民が楽しみ憩える快適な港湾空間の創出を目ざして、現在、再開事業が進められている。しかし、当該水域では、夏場にかけて、貧酸素水塊が形成し、水面からはイオウ系の悪臭が発生するため、何らかの環境改善対策が必要とされている。

そこで、某港を対象として、水底質の現況を調査するとともに、改善対策の適応性について室内実験および数値実験を用いて検討した。

## 2. 某港の現況

### 2.1 某港の諸元

某港は水面積約 20 万 m<sup>2</sup>、港内水量約 150 万 m<sup>3</sup>、最大水深約 15m である。防潮堤によって囲まれており、外海とは、幅 30m、水深約 5m の水門でのみ通じている。

### 2.2 夏場の水質性状

Fig.1 には、94年7月に実施した水質の調査結果を示す。

水深が 5m から 10m の間で水温が 22.8℃ から 14.5℃ へと急激に低下しており、明瞭な水温成層が認められた。溶存酸素濃度は、水深 5m 以深では 1mg/l 以下であり、貧酸素状態にあった。そして、採取した港内下層水からは極めて強いイオウ臭が認められた。分析の結果、硫化物イオンが 6~30mg/l 含有されていた。また、下層水の COD<sub>Mn</sub> および全窒素、全リンの各濃度は、海域における環境保全ないし生物生息環境保全に係る環境基準値がそれぞれ 8mg/l 以下、1mg/l 以下、0.09mg/l 以下であることに比べて極めて高い値を示していた。

### 2.3 底質の性状

Table 1 には、95年9月に採取した底質の分析結果を示す。港内の底質は、黒色を呈しており、酸化還元電位が低く、COD<sub>Mn</sub> や酸揮発性硫化物の値が高い。富栄養化の進行した停滞性海域でみられる典型的な嫌気性のヘドロである。この底質からは、夏場の下層水と同質の、極めて強いイオウ臭が認められた。この底質から発生する臭気の組成は、ガスクロマトグラフィーを用いて分析した結果、大部分は硫化水素で占められていた。

### 2.4 夏場の水質悪化現象の解釈

当該水域は、水深が約 5m の水門を介してしか港外と通じておらず、閉鎖性が強い。さらに、港内は中央に最大水深 15m の窪んだ部分があり、夏場には鉛直方向に水温差、すなわち密度差が生じ、上下層間の水の循環が生じに

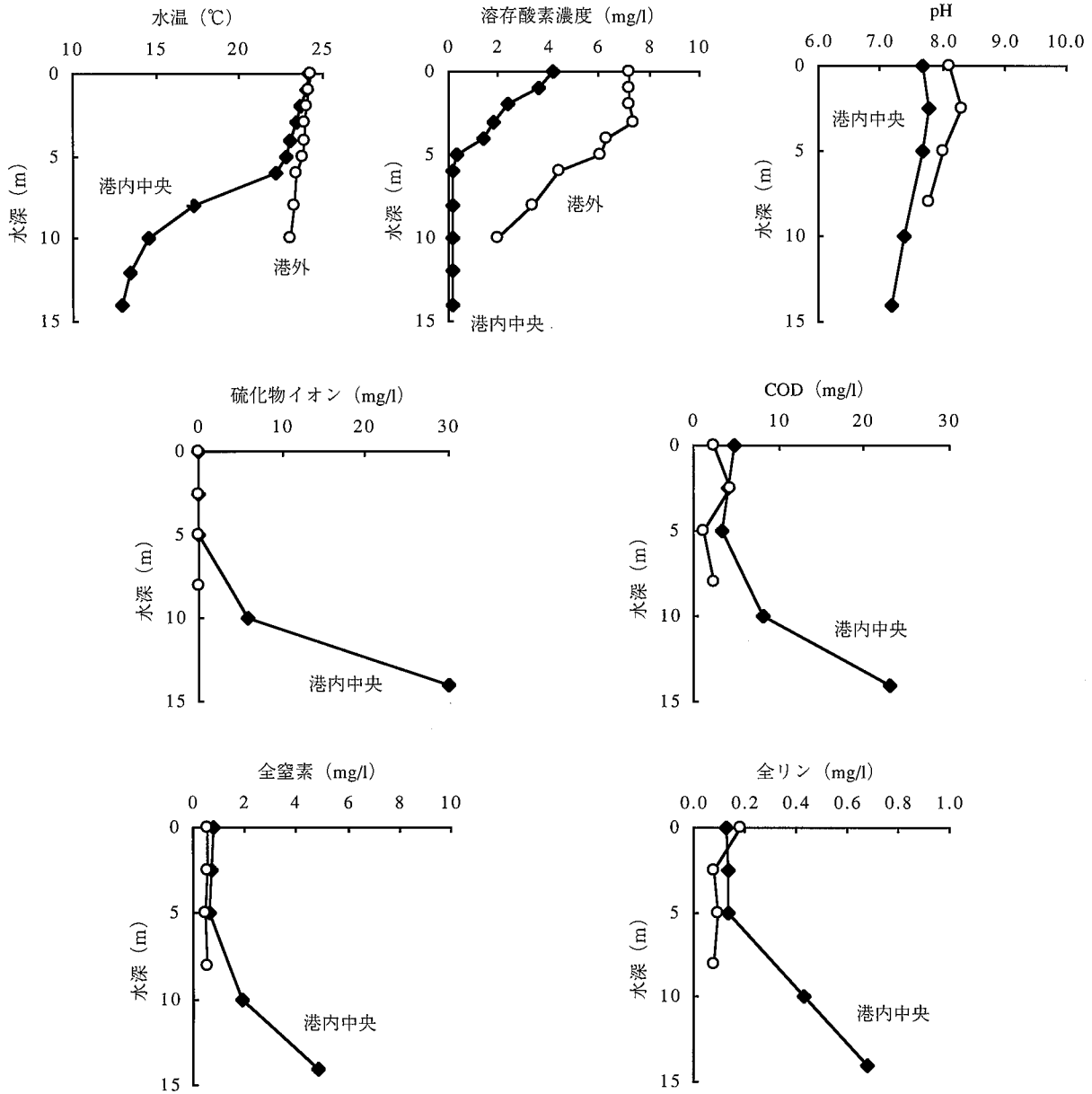


Fig. 1 某港の夏場における水質の鉛直分布  
Vertical Profiles of Water Temperature, Dissolved Oxygen, pH, Sulfide Ion, COD and Nutrients of the Port in Summer

くくなる。水面では大気中の酸素が吸収される再曝気が起こり、また、太陽光の達する上層では植物プランクトン等が光合成をする際に酸素が水中に放出される。これに対し、水質が汚濁し透明度が低下する夏場には、下層の光合成活性は低下する。加えて、水温成層が形成するため、上層の溶存酸素濃度の高い水塊が下層に移動することで供給される酸素量も少なくなる。さらに、底面に堆積した有機質の底質は、大きな酸素消費速度をもつため、下層の貧酸素化が進行しやすいと考えられる (Fig. 2)。また、底質の有機物が分解されることによって、富栄養成分である窒素、リンなどが溶出する。そして、貧酸素状態においては、偏性嫌気性細菌である硫酸塩還元細菌が海水中の硫酸イオンを還元するため、硫化水素などの悪臭物質が

Table 1 某港の底質性状  
Chemical Composition of Sediment in the Port

色調	黒色
含水比	127%
ORP	-178mV vs. NHE
強熱減量	10.6%
COD <sub>Mn</sub>	30.4 mg/g
全炭素 (C)	22.6 mg/g
全窒素 (N)	2.0 mg/g
酸揮発性硫化物	4.5 mg/g

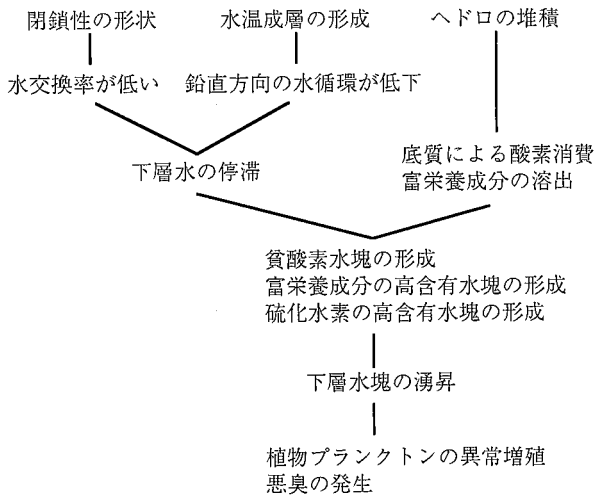


Fig. 2 夏場の水質悪化現象の解釈  
Mechanism of Oxygen-deficient Water Formation and Odor Elimination

生成される。このようにして形成された下層水塊が湧昇することによって、表層水が汚濁し悪臭が発生すると考えられる。

### 3. 某港の環境改善対策の基本案

当該水域における主要な問題点は、前章で整理したように、閉鎖性の形状をしていること、水温差により成層化すること、有機質の底質が堆積していることである。その対策案を Table 2 に示す。まず、底質が悪臭の発生源であることから、その処理が対策として考えられる。浚渫、固化、覆砂が一般的な方法であるが、現地の水深の深さ、底質の臭気強度などを考慮にいと、浚渫や原位置固化は不向きである。一方、覆砂は当該水域のような水深の大きい水域への適用性がある。

また、悪臭物質である硫化水素は嫌気状態において活発に生成されるので、下層に酸素を供給して、好气的状態を維持するという方法が考えられる。酸素の供給方法としては種々の方法があるが、今回は、港外および港内上層の海水中の溶存酸素を利用し、鉛直方向の水循環を促進して下層に上層水中の酸素を供給する方法を対策候補として考えた。

そのほか、貧酸素化する下層(窪地)部分に残土等を投入し、浅い水域に地形変更するという対策も考えられる。これは大規模な土木工事となるが、当該水域が漁業区域外であることから可能性はあるものと考えた。また、残土の有効利用がはかれ、浅場を創出できるなどの効果も期待される。

## 4. 室内実験による底質対策技術の効果の検証

### 4.1 室内実験の目的

Table 2 環境改善対策案  
Menu of Water Environment Remediation Methods

問題点	対策		
	方法	懸念事項	適応性
閉鎖性の港湾形状	-		-
水温成層の形成	海水の鉛直混合の促進		○
	残土等投入による窪地の解消	工事規模 許認可	△
ヘドロの堆積	浚渫	臭気発生 浚渫土の処分	×
	原位置固化	現地水深 汚濁の拡散	×
	覆砂		○

底質から直上水への悪臭物質の溶出に対して、3章で述べた対策案が有効であるか否かを検証するため、室内実験を実施した。

### 4.2 カラムを用いた模擬実験の概要

底質試料をφ約20cmのアクリル製円筒に20cmの高さに充填した。そして、その上に某港周辺海水のろ過水を水柱高70cmになるまで静かに流し入れた。実験ケースは Table 3 に示す。ケース(1)は、現在の状態を模擬するものとして、水面を流動パラフィンで覆い、大気からの酸素の供給を遮断した実験系とした。ケース(2)は、微細な空気気泡を20ml/minで吹き込み、酸素を補給する実験系とした。ケース(3)は、底質上面に海砂を約10cm厚に被覆し、その後ろろ過海水を70cmの高さになるまで流入させた。これらのカラムを20℃の暗室に静置し、海水(以後、直上水)の水質変化を経時的に測定した。

### 4.3 実験結果および考察

直上水の水質の経時変化を Fig. 3 に示す。

ケース(1)では実験を開始してから3日後には溶存酸素濃度がほぼ0mg/lとなった。硫化物イオン濃度は実験開始直後に増加しはじめ、30日後には Fig. 1 で示した港内底層水の水質に近い値となった。また、全窒素、全リンの30日後の濃度も、港内底層水と同程度となった。水深約70cmの直上水の水質変化について、実水域下層水の水質レベルを考慮すると、夏場の下層水の流動性は極めて小さい状態にあると推察される。

ケース(2)では溶存酸素濃度は一定に保たれ、硫化物イオン濃度は0.2mg/l以下であった。臭気は特に感じられなかった。底質直上水の溶存酸素濃度を飽和に近い状態で維持していれば、臭気は十分に抑制されることが明らかとなった。微細気泡中の酸素が直上水へ溶解す

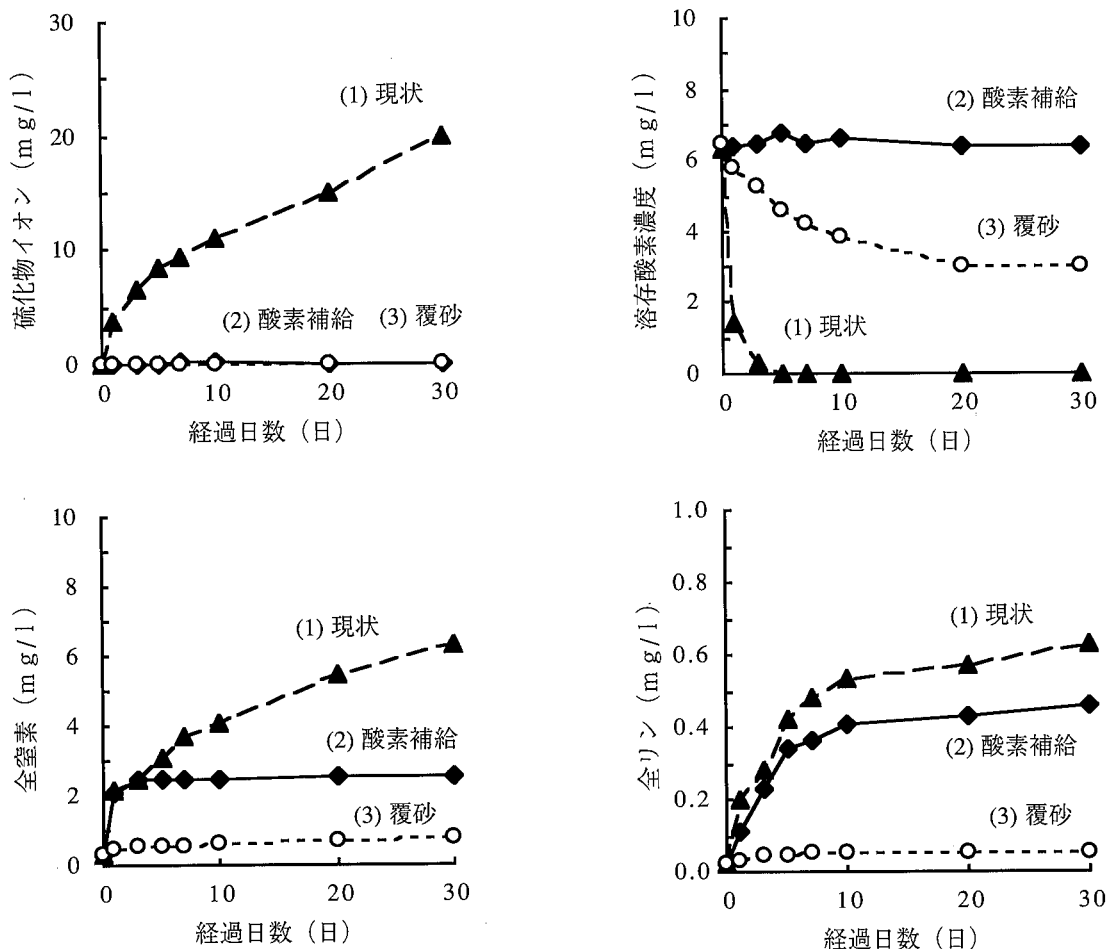


Fig. 3 模擬室内実験における底質直上水の水質変化  
Time Course of Dissolved Oxygen, Sulfide Ion and Nutrients  
of the Water in Column Experiments

る効率は、水深4.5mの清水に対して10~12%という報告がある<sup>1)</sup>。これを参考に、今回の実験について酸素移動効率を2~3%と仮定すると、水中への酸素溶解量は底質表面積あたり5~8g/m<sup>2</sup>/日となる。この値は、後述する現地底質の酸素消費速度と同程度である。このことより、底質の酸素消費速度に相当する量の酸素を供給すれば、臭気は解消されると推論される。また、酸素の供給は底質からの全窒素、全リンの溶出を抑制する効果も認められた。

ケース(3)の覆砂した実験系では、硫化物イオン、全窒素、全リンの各濃度の上昇はほとんどみられなかった。覆砂は底泥からの溶出を抑制した。

## 5. ボックスモデルを用いた各対策の効果の比較検討

### 5.1 数値実験の目的

4章のカラム実験から、底質の物理的な被覆あるいは底質への酸素の補給は、悪臭の抑制に対して有効な手法であることが確認された。本章では、簡単なボッ

Table 3 室内実験の条件  
Conditions of Column Experiments

ケース	条件
(1) 現状	対策なし
(2) 酸素補給	微細気泡空気の通気：20ml/min
(3) 覆砂	海砂による被覆：10cm厚

クスモデルを用い、これらの技術を水域に適用した場合の改善効果を比較検討した。

### 5.2 評価の指標

当該水域の環境改善の最終目標は、貧酸素化、富栄養化を抑制し、悪臭が発生しない快適で生物相の豊かな水域に回復させることである。そのためには、様々な指標を用いて、改善対策の効果を総合的に評価する必要がある。しかし、多数の指標を用いた総合的な効果の解析は極めて複雑な作業となる。

前章の実験より、底質直上水の溶存酸素濃度の回復は、

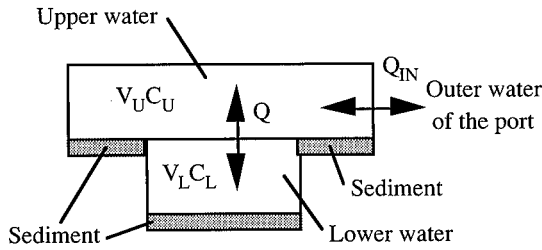


Fig. 4 ボックスモデル  
Box Model

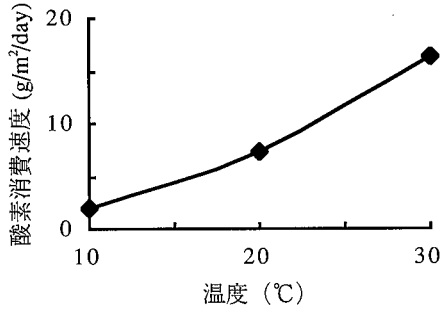


Fig. 5 底質の酸素消費速度  
Oxygen Consumption Rate of Sediment

Table 4 計算パラメータ  
Parameters

$V_U$	上層水塊水量	1,000,000m <sup>3</sup>
$V_L$	下層水塊水量	500,000m <sup>3</sup>
$S_U$	上層水塊と接する底面面積	100,000m <sup>2</sup>
$S_L$	下層水塊と接する底面面積	100,000m <sup>2</sup>
$S_L'$	深部かさ上げ時の底面面積	100,000m <sup>2</sup>
$Q_{IN}$	港外-上層水塊間の交換水量	400,000m <sup>3</sup> /日
$Q$	上層水塊-下層水塊間の交換水量	現状：10,000m <sup>3</sup> /日 促進時：150,000；300,000m <sup>3</sup> /日
$C_{IN}$	港外の溶存酸素濃度	7.39g/m <sup>3</sup> (一定) (水温20℃、塩分3%の飽和濃度)
$C_U$	上層水塊の溶存酸素濃度	初期値：7.39g/m <sup>3</sup>
$C_L$	下層水塊の溶存酸素濃度	
$W_U$	上層の水の酸素消費速度係数	0.07(1/日)
$W_L$	下層の水の酸素消費速度係数	
$M_U$	$S_U$ の酸素消費速度	現状：4.8g/m <sup>2</sup> /日
$M_L$	$S_L$ の酸素消費速度	覆砂：0.0g/m <sup>2</sup> /日
$M_L'$	$S_L'$ の酸素消費速度	0.0g/m <sup>2</sup> /日

臭気の抑制および底質からの窒素、リンの溶出抑制にも有効であることが明らかになっている。そこで、溶存酸素濃度を指標とし、水域の溶存酸素濃度の回復の程度をもって、対策の改善効果の比較検討を行った。

昭和46年環境庁告示「水質汚濁に関わる環境基準について」によれば、河川、湖沼、海域はそれぞれ6類型、4類型、3類型に分けられており、溶存酸素濃度に関しては全ての水域で最低でも2mg/l以上とされている。既往文献<sup>2)</sup>によると、貧酸素水塊の定義は溶存酸素濃度 2.5ml/l (3.6mg/l) 以下とされ、これ以下では海底の正常なベントス分布が危うくなるといわれている。また、0.025ml/l (0.036mg/l) 未満の状態は無酸素水塊と呼ぶことが提案されている。溶存酸素濃度が0 ml/l付近では、海水や底質の化学的状態や生物相が大きく異なってくるといわれている。

以上のような数値が示されているが、今回は、環境基準にある2 mg/l以上を改善対策の効果の判定材料とした。

### 5.3 水質予測モデル

現地測定の結果、夏場、港内の水温は水深約5mまではほぼ一様であり、それ以深では急激に低下していた。そして、水深約5mを境として、下層海水中の溶存酸素濃度はきわめて低い状態になっていた。そこで、当該水域を水深5mを境界として上下二つの水塊に分け、Fig. 4に示すようなボックスモデルを仮定した。なお、今回は水面での再ばっ気および光合成による溶存酸素の供給については考慮していない。また、土砂等を投入して地形変更し窪地を解消するケースについては、港内を1ボックスとして計算した。

### 5.4 パラメータの設定と計算ケース

パラメータの一覧表をTable 4に示す。

**5.4.1 底質の酸素消費速度** 底質試料を小型ビーカーに充填し、これを約2l容の容器内に置いた。次いで、港外海水のろ過水の溶存酸素濃度を飽和させ、これを容器内に静かに流し入れて満たした。溶存酸素計を挿入し、気相が生じないように密栓した。一定温度(10℃、20℃、30℃)、暗条件において、容器内の海水をスターラーで攪拌しながら、海水の溶存酸素濃度の経時変化を計測した。溶存酸素濃度の経時変化について、濃度の0次式を用いて底質の酸素消費速度を求めた。Fig. 5にその結果を示す。東京湾の底質については1.83g/m<sup>2</sup>/日<sup>3)</sup>、諏訪湖では6.13~15.89g/m<sup>2</sup>/日(at 10~20℃)<sup>4)</sup>といった値が報告されており、これらと近い値となった。この実験結果をもとに、現地水温を考慮して、底質の酸素消費速度を定めた。

**5.4.2 海水の酸素消費速度** 水の酸素消費速度係数に関しては、室内実験の結果と文献値<sup>3)</sup>を参考にして定めた。

**5.4.3 上下層間の交換水量** 上下層間の交換水量に関しては、現状を10,000m<sup>3</sup>/日、水循環を促進する場合を150,000ないし300,000m<sup>3</sup>/日とした。現状の交換水量については、武岡<sup>5)</sup>が水温成層を形成する水深約20mの燧灘での海水の鉛直の置換時間、すなわち $Q/V_L$ が85日となると考察していることを参考に、ここでは、 $Q/V_L$ を50日とした。水循環の促進には間欠式空気揚水筒を用いるものとし、1日で下層水量の30~60%が上層と置換する条件を想定した。

**5.4.4 計算ケース** Table 5に示すケースについて、計算を行った。

Table 5 計算ケース  
Cases of Calculation

ケース	対策	循環水量
(a)	対策なし	
(b)	全域覆砂	
(c) - 1	水循環の促進	150,000m <sup>3</sup> /日
(c) - 2	〃	300,000m <sup>3</sup> /日
(d) - 1	覆砂と水循環の併用	150,000m <sup>3</sup> /日
(d) - 2	〃	300,000m <sup>3</sup> /日
(e)	窪地の解消	

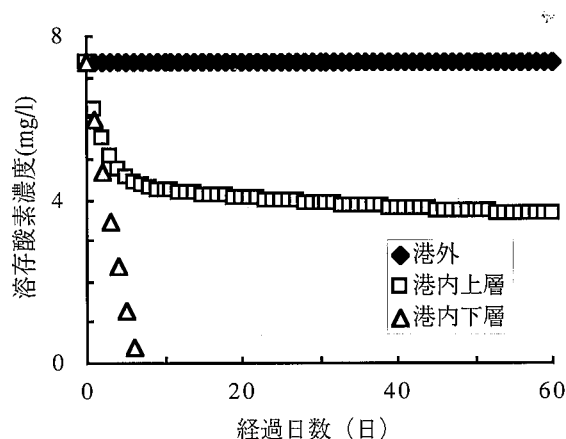


Fig. 6 計算結果の一例, ケース (a)  
An Example of Calculation Output

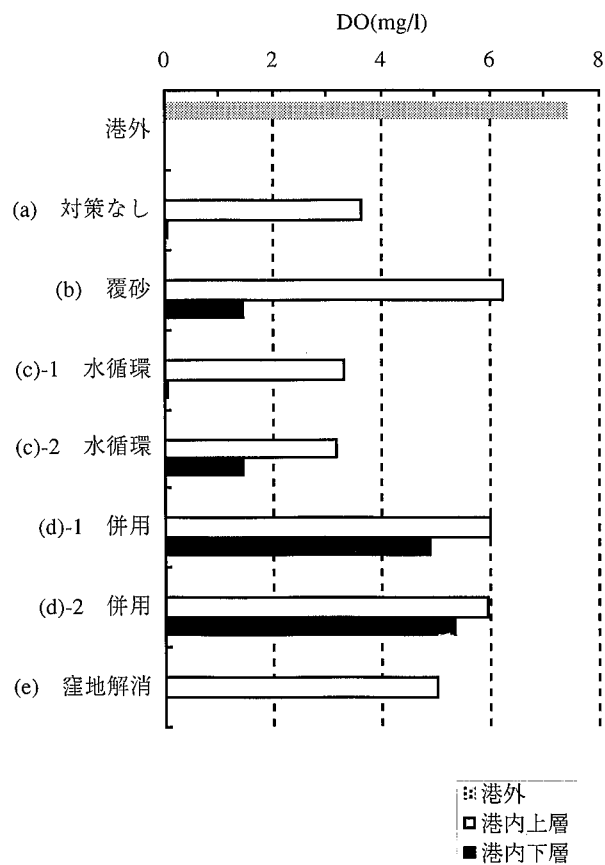


Fig. 7 各ケースの溶存酸素濃度収束値  
Stationary Output

### 5.5 計算結果

Fig. 6には、ケース (a) の計算結果を示す。上層水塊の溶存酸素濃度収束値はFig. 1に示した現地計測結果に近い値を示している。これより、今回用いたモデルは簡易なものではあるが、溶存酸素濃度を予測する目的に対しては、妥当な結果を与えるモデルであると判断した。

Fig. 7には、ケース (a) からケース (e) の溶存酸素濃度収束値を示す。ケース (b)：覆砂およびケース (c)：水循環の促進によって、港内下層の溶存酸素濃度は上昇しており、改善効果が確認された。溶存酸素濃度2mg/lを効果の判定材料とすると、ケース (d)：覆砂と水循環の促進を併用する対策およびケース (e)：土砂を投入し窪地を解消する策の効果が高いと判断された。

### 6. まとめ

貧酸素水塊を形成する某港湾水域を対象とし、水域の浄化対策について検討を行い、以下の知見を得た。

1) 夏場、対象水域の水深約5mから10mにかけて水温の急激な低下がみられ、水温成層が形成していた。そして、水深5m以深は、溶存酸素濃度が1mg/l未満の貧酸素状態となっており、悪臭が認められた。

2) 環境改善対策として、覆砂および底質への酸素の補給を対策としてとり上げ、室内実験によって効果を検討した。両者は悪臭物質の発生や窒素、リンの溶出抑制に有効な技術であることが確認された。

3) 簡易な水質予測モデルを用いて各種対策の改善効果を相互に比較した。覆砂と水循環の促進技術とを併用する方法が有効であろうと判断された。

### 参考文献

- 1) 井田哲夫：水処理工学，技報堂出版，p.250，(1990)
- 2) 柳 哲雄：シンポジウム「貧酸素水塊」のまとめ，沿岸海洋研究ノート，Vol.26, No.2, p.141～145，(1989)
- 3) 佐々木 淳，他：東京湾における貧酸素化現象および水温・溶存酸素の季節変動モデル，海岸工学論文集，Vol.40, p.1051～1055，(1993)
- 4) Kaori Takada, et. al.： Benthic oxygen consumption in lake Suwa, Verh. Internat. Verein. Limnol, Vol.24, p.1091～1094，(1991)
- 5) 武岡英隆：貧酸素水塊の物理モデル，沿岸海洋研究ノート，Vol.26, No.2, p.101～108，(1989)