

## 海水浄化船による閉鎖性海域の水質改善

### The Improvement in Water Quality on the Closed Sea Area by Using the Floating Vessel of Seawater Treatment

湊 太郎\*・山崎 正一\*・佐藤 義夫\*\*・福江 正治\*\*

Taro MINATO, Shoichi YAMASAKI, Yoshio SATO and Masaharu FUKUE

**要旨:** 閉鎖性海域の汚染とそれに伴う生態系の変化は、国際的にも重要な環境問題として取り上げられている。また、赤潮や青潮の発生によって漁業被害が起こるなど、市民生活に密接な問題でもある。このような閉鎖性海域を正常な状態に回復させるためには、水質および底質浄化を行う必要がある。

本研究では、シルトフェンスで区切られた実海域で実験を行い、海水浄化船の海水浄化能力について検討した。その結果、シルトフェンスの外側に比べて、内側の透明度が向上し COD の値も低減した。また、内側の底層水の DO も向上させることが可能であるということが明らかとなった。さらに、ろ材の表面に捕捉された物質は、重金属元素の含有量が大阪湾堆積物のそれよりも高い値を示した。これらのことから、海水浄化船の移動によって、貧酸素状態を改善し透明度を向上させることが可能であるということがわかった。また、海水浄化船のシステムが、重金属元素の除去などにある程度対応できるということがわかった。

**キーワード:** 海水浄化, 浄化船, 透明度, 栄養塩, 重金属

#### 1. まえがき

閉鎖性海域の水質汚濁や重金属元素などによる汚染は、その海域の生態系に対して著しい変化を生じさせている。特に、沿岸部における埋立て面積が増加し、自然の干潟や砂浜が減少するのに伴って、生物種の多様度が確実に低下している。海域に生息する生物種の多様度の低下は、経済的な影響のみならず、それを利用する人間の健康にも多大な影響を及ぼすと考えられる。

閉鎖性海域を正常な状態に回復させるためには、海域内に存在する栄養塩類や重金属元素などを効率よく海域外へと排出させなければならない。栄養塩類などの海域外への排出方法については、沿

岸に生息する生物の利用が考えられる。これは、沿岸域に干潟や藻場などを人工的に再生・創出し、そこに生息する生物によって栄養塩類などを固定させ、これを捕食する生物によって海域内に存在する物質を海域外へと排出させるというものである。栄養塩類などの固定は、海藻・海草類などによって行われる。これらを捕食し、閉鎖性海域の外に物質を排出する生物としては、魚類や鳥類が挙げられる。このような、生物を利用した方法は、エネルギー効率がよく費用対効果も高いと思われる。利用される生物が有用な種類であれば、さらに漁獲などによる収益を見込むことができる<sup>1)</sup>。しかしながら、現場で創出した沿岸環境であって

\* 正会員 青木マリーン(株), \*\* 非会員 東海大学海洋学部

も、埋立て前の沿岸環境と同等の生態系を確保するのは不可能か、あるいは相当な期間を要するといわれる<sup>1), 2)</sup>。また、広島湾において、現在の干潟面積を1940年代の面積に回復させたとしても、湾内に流入する外部負荷や一次生産による内部負荷に対して発揮される浄化能は約1.6%程度であり、現在の広島湾における汚濁の状況からは、干潟による水質浄化能に過大な期待はできないという報告もある<sup>3)</sup>。さらに、2001年度までに再生・創出された干潟（覆砂）のうち、モニタリングが実施されている事例<sup>4)</sup>について整理すると、底生生物に対する効果は大きい、水質が改善されたと評価できる事例は全体の30%以下であった。つまり、健全な沿岸生態系が回復したとしても、それらが処理できる量を遥かに超える物質が現在の閉鎖性海域に存在しているということである。

これらのことから、閉鎖性海域を正常な状態に回復させるためには、沿岸生態系で処理できる量と外部および内部負荷量が平衡に達するまで、人為的に過剰な物質を海域外へ排出させなければならないと考えられる。

著者らは、閉鎖性海域に存在する過剰な物質を人為的に回収し系外へ排出させる方法として、海水浄化船が適用できるか実海域で実験を行い検討してきた<sup>5)</sup>。海水浄化船に搭載したシステムは、炭素繊維と砂ろ過を組み合わせたものである（図1参照）。これらのシステムによって、海水浄化船に導入された海水から、SSとして80%以上、CODとして18%程度の物質が回収されるということが明らかとなった<sup>5)</sup>。しかし、これまでの研究では、海水浄化船内に回収された懸濁物が含有する物質の質や量については調べていない。また、海水浄化船を稼働させることによる、周辺海域における水質の向上の程度が明らかになっていない。

そこで本研究では、海水浄化船の能力と周辺海域の水質の関係を調べることを目的として、実海

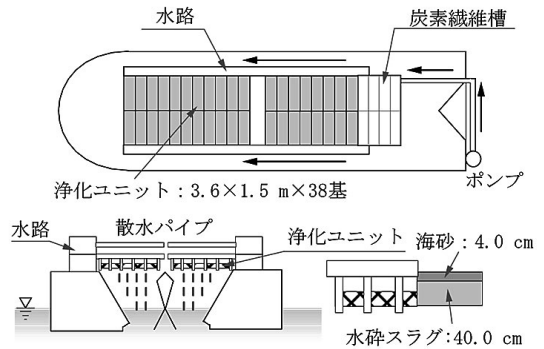


図1 海水浄化船の浄化設備<sup>5)</sup>

域において海水浄化船を稼働させて実験を行った。実験は、シルトフェンスによって区切られた海域内で行った。このとき、海水浄化船内に回収された懸濁物について、それらの栄養塩類や重金属元素の含有量を調べた。これらの結果をもとにして、海水浄化船による閉鎖性海域の水質向上の可能性について検討した。

## 2. 実験海域および実験方法

### 2.1 実験海域

本研究では、図1に示す海水浄化船を兵庫県の甲子園浜公共岸壁に曳航して係留し、8月から3ヶ月間連続で稼働させた。期間中の処理水量は、6,000~10,000m<sup>3</sup>/日であった。設置した海域を図2に示す。なお、海水浄化船の設置位置を矢印で示しておく。

甲子園浜公共岸壁は、大阪湾の湾奥に位置し、その東西には湾奥に唯一残された自然干潟の御前浜と甲子園浜が存在する。甲子園浜公共岸壁が位置する海域は、かつては前面が広く開けた海域であった。しかし現在では、図2に示すように、埋立てによって東西約2.3km、南北約150~400mの細長い運河状の海域へと変化している。

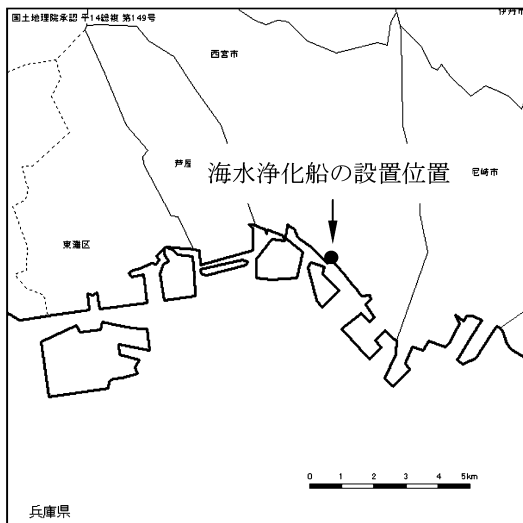


図2 海水浄化船を設置した海域



写真1 実海域における実験の状況

## 2.2 実験方法

### 2.2.1 実験条件

甲子園浜公共岸壁における実験では、岸壁に浮体構造物を係留し、その周囲にシルトフェンスを設置した(写真1参照)。シルトフェンスの展開海域は、全長80m、幅20m、深さ6mである。この区切られた海域内において海水浄化船を24時間連続で稼働させた。稼働期間は、2003年8月1日から10月30日までの約3ヶ月間である。

### 2.2.2 採水および水質分析の方法

実験期間中、ポンプで揚水した直後の海水と、浄化ユニットを通過した海水について集水器を設けて採水し、多項目水質モニター(YSI ナノテック, model6600)を用いて水質測定を行った。測定した項目は、溶存酸素量(DO mg/l)、塩分(‰)、水温(°C)である。これらの試料については、浮遊懸濁物質量(SS mg/l)と化学的酸素要求量(COD mg/l)の測定も行った。SSは重量法、CODは過マンガン酸法により求めた。さらに、海水浄化船による効果を検討するため、シルトフェンスの内外の水質測定を行った。採水バケツを用いて

表層水を採取し、過マンガン酸法によりCOD(mg/l)を求めた。また、多項目水質モニターにより、各水深の濁度とDOを測定した。シルトフェンス内側の採水と測定は、海水浄化船の左舷船尾付近で行い、シルトフェンス外側の採水と測定は右舷の岸壁において実施した。このとき、直径30cmの透明度板を用いて透明度(m)の測定も同時に行った。

### 2.2.3 ろ材に捕捉される物質の採取と分析方法

本実験の期間中にろ材の表面で捕捉された物質について、試料を採取し土質および含有する物質量を調べた。ろ材の表面に残留した物質は、ステンレス製のヘラを用いて採取した。これをプラスチック製の容器に保存して持ち帰り、それらについて土質試験を行った。なお、土質試験の方法は、地盤工学会による土質試験の方法と解説<sup>6)</sup>によった。採取した試料の一部は、テフロン容器密閉分解法にて前処理し、ICP(SPS7000 Plasma Spectrometer SIKO I)および原子吸光度計を用いて、特定有害物質以外の重金属などについて測定した。また、分光光度計にて全リン(T-P)を測定した。さらに、特定有害物質などについては、工場排水試験方法(JIS K 0102)および昭和46年12月環境庁告示第59号付表1に掲げる方法に準

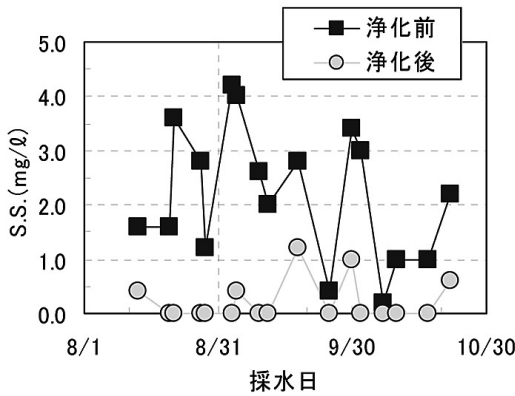


図3 海水浄化船内におけるSSの変化

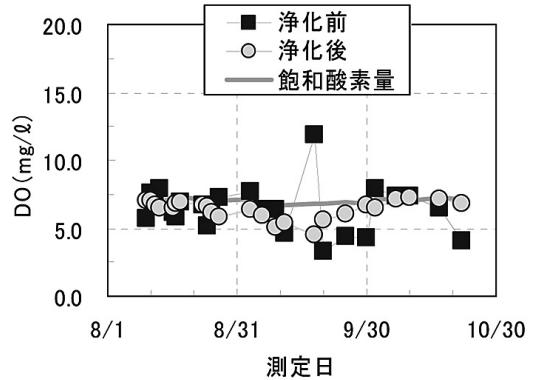


図5 海水浄化船内におけるDOの変化

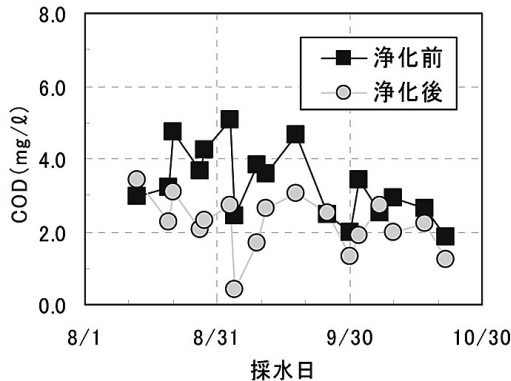


図4 海水浄化船内におけるCODの変化

じて試験を行った。このとき、検液の作成は、平成15年3月環境省告示第19号によった。

### 3. 実験結果

#### 3.1 海水浄化船内における水質変化

図3に海水浄化船内におけるSS (mg/l) の変化を示す。この図を見ると、浄化後の海水中では、SSがほぼ1.0mg/l以下にまで減少している。浄化後の海水におけるSSの減少割合は、実験期間を通じて平均で約90%であった。

図4に海水浄化船内におけるCOD (mg/l) の変化を示す。この図から、浄化後の海水中では、CODの値が3.0mg/l以下まで減少するということがわかる。また、CODの値の減少割合は、秋季(約24%)に比べて夏季(約35%)において高い。

実験期間を通じて、浄化後の海水におけるCODの減少割合は、平均で約30%であった。

図5に海水浄化船内におけるDO (mg/l) の変化を示す。なお、図中には、比較のために飽和酸素量の値も示してある。飽和酸素量は、次式を用いて算出した。

$$\ln C = A_1 + A_2(100/T) + A_3 \ln(T/100) + A_4(T/100) + S[B_1 + B_2(T/100) + B_3(T/100)^2] \quad (1)$$

ここに、 $C$ は飽和酸素量 (mg/l),  $T$ は絶対温度 (K),  $S$ は塩分(‰)である。また、 $A_1 = -173.4292$ ,  $A_2 = 249.6339$ ,  $A_3 = 143.3483$ ,  $A_4 = -21.8492$ ,  $B_1 = -0.033096$ ,  $B_2 = 0.014259$ ,  $B_3 = -0.0017$  である。図5からわかるように、浄化前の海水のDOは、一部を除き5.0~8.0mg/lまで大きく増減する。一方、浄化後の海水のDOの変化は小さく、ほぼ飽和酸素量(6.0~7.0mg/l)に近い値で推移することがわかる。なお、9月中旬頃にDOが著しく増減するのは、この期間中に大規模な青潮と赤潮が交互に発生したためである。

#### 3.2 ろ材の表面で捕捉した物質

表1に、ろ材の表面で捕捉された物質について行った土質試験の結果を示す。また、図6に、粒径加積曲線を示す。なお、これらの表および図中には、比較のために、笠岡湾における実験<sup>9)</sup>で得

表 1 土質特性

試料名	笠岡湾	甲子園浜
土粒子密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.633	2.423
液性限界 (%)	106.1	241.3
塑性限界 (%)	43.6	41.9
塑性指数	62.5	199.4
礫分 (%)	0	0
砂分 (%)	18	18
シルト分 (%)	32	27
粘土分 (%)	50	55
pH	7.8	8.3
強熱減量 (%)	11.2	20.1
有機炭素含有量 (%)	2.0	13.0

られた捕捉物質の土質特性についても示してある。

表 1 より、本実験においてろ材の表面に捕捉された物質は、粘土分などの粒度組成が笠岡湾で得られた物質とほぼ同じであるということがわかる。しかし、土粒子密度  $\rho_s$  (g/cm<sup>3</sup>) は石英 (2.60~2.70 g/cm<sup>3</sup>)<sup>6)</sup> などの無機鉱物に比べて小さく、泥炭 (1.40~2.30 g/cm<sup>3</sup>)<sup>6)</sup> や黒ぼく (2.30~2.60g/cm<sup>3</sup>)<sup>6)</sup> など有機物を多く含む土に近い値である。また、本実験で得られた物質の強熱減量と有機炭素含有量の値は、それぞれ有機質粘土 ( $L_i=10.7\%$ ,  $C_{oc}=2.35\%$ )<sup>6)</sup> よりも黒ぼく ( $L_i=21.3\%$ ,  $C_{oc}=6.01\%$ )<sup>6)</sup> や腐植土 ( $L_i=66.7\%$ ,  $C_{oc}=37.1\%$ )<sup>6)</sup> に近い値である。

図 6 を見ると、本実験においてろ材の表面に捕捉された物質は、比較的広い範囲の粒径の粒子からなり、2  $\mu$ m 以下の粒子が約 50%含まれているということがわかる。なお、笠岡湾で得られた物質は、2  $\mu$ m 以下の粒子が約 40%含まれていた。

表 2 に、本実験においてろ材の表面に捕捉された物質について、その特定有害化学物質の含有量を示す。なお、表中には、比較のために土壤汚染

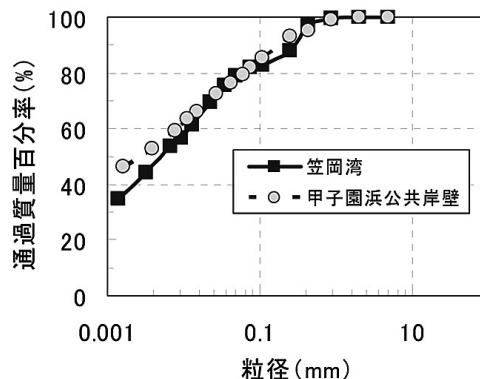


図 6 粒径加積曲線

表 2 特定有害化学物質

項目	含有量 (mg/kg)	基準値 <sup>8)</sup> (mg/kg)
カドミウム及びその化合物	1.00	150 以下
六価クロム化合物	0.20	250 以下
シアン化合物	1.00	50 以下
水銀及びその化合物	0.01	15 以下
セレン及びその化合物	0.50	150 以下
鉛及びその化合物	47.0	150 以下
砒素及びその化合物	3.60	150 以下
フッ素及びその化合物	99.0	4,000 以下
ホウ素及びその化合物	47.0	4,000 以下

対策法に基づく基準値<sup>8)</sup>が示してある。この表から、本実験でろ材の表面に捕捉された物質は、その特定有害物質の含有量が基準値を大きく下回る値であるということがわかる。

表 3 に、本実験においてろ材の表面に捕捉された物質について、重金属元素と栄養塩類の含有量を示す。なお、鉄 (Fe) の含有量は、他の元素に比べて著しく大きいため、鉄 (Fe) 含有量の単位のみ%で示した。また、表中には、比較のために、笠岡湾における実験<sup>5)</sup>で得られた物質および大阪湾の堆積物<sup>9), 10)</sup>について、それぞれの重金属元素および栄養塩類の含有量を示してある。

表3 重金属元素および栄養塩類

	含有量 ( $\mu\text{g/g-dry}$ )		
	Zn	Cu	Mn
笠岡湾	645	213	2,410
甲子園浜	884	364	2,921
大阪湾 <sup>9)</sup>	242	45	888
	含有量 ( $\mu\text{g/g-dry}$ )		
	Ni	Fe (%)	T-P
笠岡湾	—	2.5	510
甲子園浜	26.7	2.3	2,881
大阪湾	37.8 <sup>9)</sup>	3.5 <sup>9)</sup>	820 <sup>10)</sup>

この表から、ろ材の表面に捕捉された物質の亜鉛 (Zn)、銅 (Cu)、マンガン (Mn) の含有量は、大阪湾堆積物の平均値に比べて非常に高い値を示すということがわかる。また、これらの含有量は、大阪湾<笠岡湾で得られた物質<本実験で得られた物質の順に高い。長岡ら<sup>9)</sup> (2004) によると、重金属元素の含有量と相関性が高いのは強熱減量であり、大部分の元素において有意な正の相関性が認められた。表1を見ると、本実験で得られた物質の強熱減量の値は、笠岡湾のものに比べて約2倍高い値である。さらに、大阪湾堆積物の強熱減量の値<sup>9)</sup>は、 $L_i=8.43\%$ であり、海水浄化船のろ材表面で捕捉された物質に比べて低い値である。これらのことから、大阪湾の堆積物に比べて、笠岡湾および甲子園浜公共岸壁で得られた試料の亜鉛 (Zn)、銅 (Cu)、マンガン (Mn) の含有量が高い値を示すのは、強熱減量の値が大阪湾の堆積物に比べて高いためであると考えられる。

### 3.3 海水浄化船の周辺の水質

図7に、海水浄化船の周辺における濁度の鉛直分布を示す。これは、右舷側の船尾付近で測定した結果である。図7a)を見ると、8月の濁度の値は、水深2.0m以浅の表層と底層付近で高く、水深

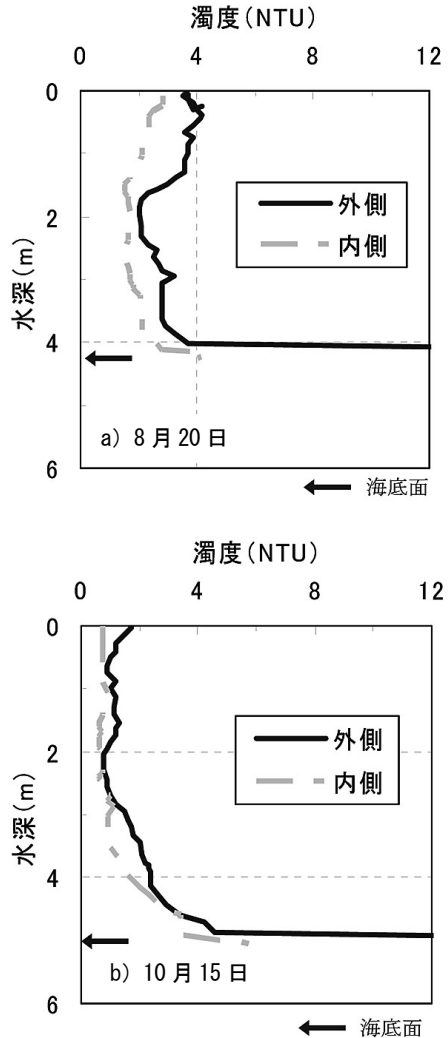


図7 海水浄化船の周辺の濁度の鉛直分布

2.0m~3.0mの層で低いという分布を示すということがわかる。また、この図から明らかのように、水深によらずシルトフェンスの内側の濁度が外側に比べて低い値を示す。特に、濁度が高い値を示す水深2.0m以浅の表層で、内外の濁度の差が最も大きい。

図7b)を見ると、10月の濁度の値は、8月とは異なる分布を示すということがわかる。8月に表層付近で現れた高濁度層が無くなり、水深が増すにつれて濁度も増加するという分布に変わっている。しかし、シルトフェンスの内側と外側では、

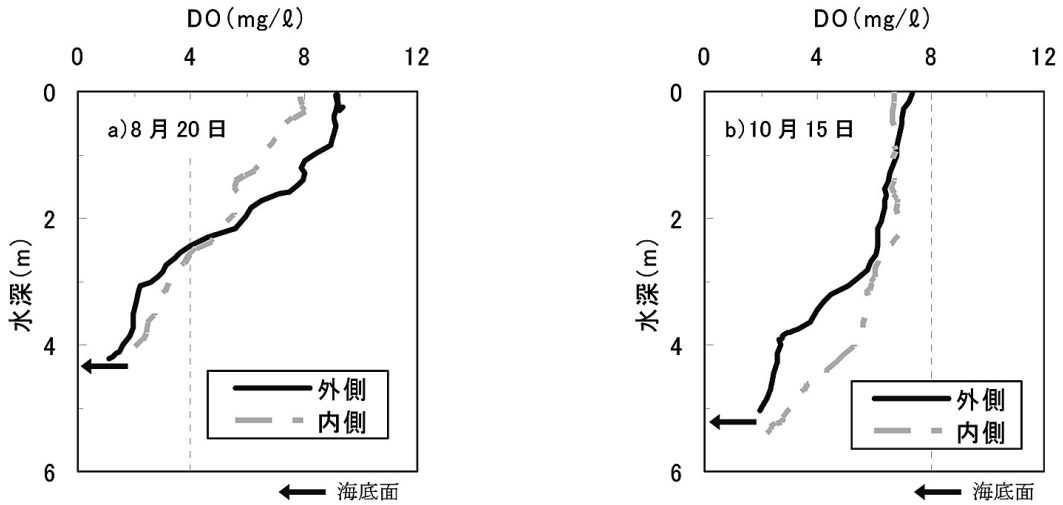


図8 海水浄化船の周辺のDOの鉛直分布

内側の濁度が外側に比べて低い値を示す。

図8に海水浄化船の周辺におけるDOの鉛直分布を示す。これは、濁度と同様に、右舷側の船尾付近で測定した結果である。この図から明らかのように、季節によらず、DOは表層で高く底層で低いという分布を示す。また、底層のDOは、秋季であっても2.0mg/l程度と比較的低い値である。このことから、甲子園浜公共岸壁の付近の海域では、10月中旬頃まで、底層水が貧酸素化しているのではないかと推定される。

図8 a)を見ると、水深2.0m以浅の層では、シルトフェンスの内側のDOが外側に比べて低いということがわかる。このような差は、図8 b)の水深1.0m以浅においても若干ではあるが認められる。一方、これらよりも深い層では、シルトフェンスの内側のDOが外側に比べて高い値を示すということがわかる。図8 a)に示す8月20日では、水深3.0m付近で内側のDOが外側に比べて約1.0mg/l高く、海底付近でも0.5mg/lほど高い値を示す。図8 b)に示す10月15日では、水深4.0m付近の層で内側のDOが外側よりも2.0mg/l高い値を示す。

表層付近におけるDOの減少については、植物プランクトンの減少が関係しているものと思われる。図7に示したように、表層の濁度は、シルトフェンスの外側に比べて内側で低い。シルトフェンスの内側と外側の海水を採取し、それぞれクロロフィルaの値を求めたところ、外側が65.8 $\mu$ g/l、内側が40.8 $\mu$ g/lであった。これらのことから、シルトフェンスの内側では、海水浄化船によって植物プランクトンが除去され、それらが放出するDOの分だけ外側に比べて低くなっているということが考えられる。

図9に海水浄化船の周辺における透明度の変化を示す。この図から、シルトフェンスの外側に比

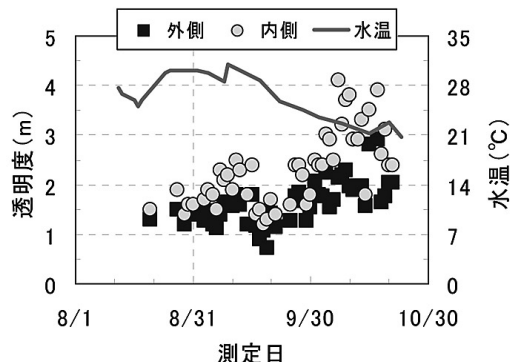


図9 海水浄化船の周辺の透明度の変化

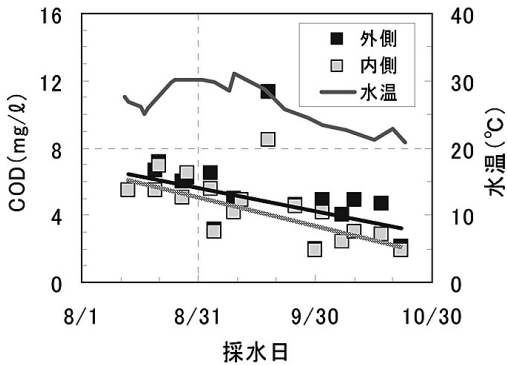


図 10 海水浄化船の周辺の COD の変化

べて、内側の透明度が常に高い値を示すということがわかる。実験期間中の内側と外側の透明度差は、0.13~1.97m (平均 0.65m) であった。また、シルトフェンスの外側の透明度は、水温の低下に伴って自然と向上し、夏季に 2m 以下であるが秋季には 3m まで増加する。なお、9 月中旬頃に透明度が著しく低下するが、これは、この時期に大規模な青潮と赤潮が交互に発生したためである。

図 10 に海水浄化船の周辺における COD の変化を示す。この図から、実験期間を通じて、シルトフェンスの内側の COD が、外側に比べて低い値を示すということがわかる。実験期間中の COD の差は、0.02~1.92mg/l (平均 0.71mg/l) であった。なお、9 月中旬頃に COD の値が急に増大するのは、この日に *Prorocentrum triestinum* による赤潮が発生したためである。図を見ると、このように赤潮が発生した場合でも、シルトフェンスの内側の COD は、外側に比べて低い値を示す。このときの COD の差は、約 3.0mg/l であった。

## 4. 考察

### 4.1 海水浄化船内における物質除去能力

笠岡湾で行った実験<sup>5)</sup>と大阪湾の湾奥で行った本実験を比較すると、船内に導入された海水からの SS 除去率の平均値は、笠岡湾に比べ本実験のほうが約 1.1 倍高い結果となった。また、COD 除

去率の平均値は、本実験のほうが約 1.6 倍高いという結果になった。

海水浄化船に導入された海水の COD 値は、笠岡湾では 1.2~5.9mg/l (平均 3.1mg/l) の範囲であった<sup>5)</sup>。一方、甲子園浜公共岸壁では、1.9~5.1mg/l (平均 3.3mg/l) であり、笠岡湾に比べて平均値が若干高い値を示す程度である。しかしながら、海水浄化船に導入された海水の SS の値は、笠岡湾では 10.0~33.6mg/l (平均 20.9mg/l)<sup>5)</sup>であるのに対して、甲子園浜公共岸壁では 0.2~4.2mg/l (平均 2.2mg/l) と大きく異なる値であった。平均値で見ると、甲子園浜公共岸壁の SS の値は、笠岡湾の 1/10 である。

ろ材表面で捕捉された物質の土質特性 (表 1 参照) を見ると、甲子園浜公共岸壁で得られた試料は、粘土分などの粒度組成が笠岡湾で得られた試料とほぼ同じであるが、土粒子密度が小さく、強熱減量および有機炭素含有量の値が笠岡湾の試料に比べて高い。ここで、表 3 に示す化学分析結果を見ると、甲子園浜公共岸壁で得られた試料の全リン (T-P) の値が、笠岡湾で得られた試料に比べて約 6 倍高い値を示すということがわかる。加古川流域<sup>13)</sup>を例に挙げると、塩基性~中性岩類の T-P は 585~699  $\mu\text{g/g}$ 、酸性火山岩類の T-P は 51~211  $\mu\text{g/g}$  の範囲にあり、これらの値から、加古川流域の T-P のバックグラウンド値は 277  $\mu\text{g/g}$  とされている。また、この加古川<sup>13)</sup>については、下流域の堆積物の T-P は 544  $\mu\text{g/g}$ 、感潮域の堆積物の T-P は 847  $\mu\text{g/g}$  という値が示されている。これら堆積物の細粒分は、それぞれ 23% と 85% であった。笠岡湾で得られた試料の T-P の値は、これらの値に近い。

大阪湾の粒状物の T-P が、城<sup>12)</sup>によって詳細に調べられている。その内容を表 4 に整理しておく。この表から、海中懸濁物で T-P の値が大きく、海底堆積物で小さくなるということがわかる。また、



表4 内湾粒状物の有機物含有量  
(城<sup>12)</sup>を一部加筆)

	T-P ( $\mu\text{g/g}$ )
海中懸濁物 中層(水深の1/2層)	2,060 (1,360)
底層(海底+2m)	1,710 (1,130)
新生堆積物 中層(水深の1/2層)	900 (420)
底層(海底+2m)	820 (360)
海底堆積物	650 (180)

( )内は有機態

T-Pのうち有機態の占める割合も、懸濁物の約70%から堆積物の約30%まで減少する。海底堆積物のT-Pの値は、上述した岩石類や河川堆積物の値に近い。なお、海中懸濁物の強熱減量の値は、15~28%の範囲であった<sup>12)</sup>。表1および表3と表4より、甲子園浜公共岸壁で得られた物質のT-Pと強熱減量の値が、大阪湾内の海中懸濁物のそれらに近い値であるということがわかる。

これらのことから、笠岡湾の海水には、懸濁物質として粘土鉱物などの無機態粒子が多く含まれ、有機物の多くは溶存態有機物として存在する。一方、甲子園浜公共岸壁の周辺海域では、有機物の多くが植物プランクトンなどの懸濁態粒子として海水中に多く存在し、土粒子などの無機態粒子は比較的少ないということが考えられる。これが、笠岡湾における実験に比べて、本実験においてCOD除去率が高くなった理由であると思われる。

海域は、大気や降雨、河川や地下水などを通じて、人為的に放出される物質が最終的に到達する場所である。そのため、海水浄化船のろ材の表面に捕捉される物質には、栄養塩類のほかカドミウム(Cd)などの特定有害化学物質、亜鉛(Zn)や銅(Cu)などの重金属元素が含まれる。

表2に示したように、甲子園浜公共岸壁における実験でろ材の表面に捕捉された物質は、鉛(Pb)を除き、その特定有害化学物質の含有量が基準値

の1/40以下であった。pHの範囲などにもよるが、一般的にPbは、CdやCrなど他の有害化学物質に比べて、粘土鉱物、三二酸化物、有機物と親和性が高い<sup>13)</sup>。そのため、Pbの含有量が他の物質に比べて、比較的高い値を示したのではないかと考えられる。

表3について述べたように、ろ材の表面に捕捉された物質の亜鉛(Zn)や銅(Cu)、マンガン(Mn)の値は、大阪湾堆積物に比べて高い値を示す。一方、ニッケル(Ni)と鉄(Fe)は逆に大阪湾堆積物のほうが高い値を示す。

表3に示す物質のうち、Zn、Cu、Mn、Feは、緑色植物が必要とする微量元素であり、これらは植物体内において酸化還元反応等に関与する<sup>14)</sup>。しかし、Niは有用性が認められるものの、その働きがあまり重要ではない要素とされる<sup>14)</sup>。Znについては、すべての藻類の正常な生長と発達に必要であると考えられ、藻類がZnを摂取する場合には2つの経路があるといわれる<sup>15)</sup>。1つは収着であり、もう1つは代謝同化作用である。淡水植物プランクトンや付着生物に関する研究によれば、枯死した藻類の細胞中には、生体よりも多くのZnが蓄積しており、正常な代謝機能に必要な量よりも多くのZnが、収着によって蓄積されるということが示された<sup>15)</sup>。このZnと同様に、Cuについても、クロレラ(*Chlorella regularis*)に関する研究において、正常な代謝機能に必要な量よりも多くのCuが、収着によって蓄積されるということが明らかにされた<sup>16)</sup>。これらのことから、ZnやCu、Mnなど、海藻類によって利用される微量元素が、ろ材表面で捕捉された物質中で高い値を示すのは、捕捉された物質が主に植物プランクトンからなり、それらによって摂取されたZn、Cu、Mnが測定されたためであると考えられる。

Feは、生物に利用される一方、地殻中に大量に存在する元素である。地殻中の濃度では、酸素や

ケイ素、アルミニウムに次いで大きな値を示す<sup>7)</sup>。また、粘土粒子の結晶構成物質あるいは水和酸化物のような無機態粒子として、海水中に懸濁している。これらの懸濁物は、海水中に供給されると直ちに沈降堆積する<sup>7)</sup>。そのため、Fe含有量は、ろ材の表面の捕捉物質に比べて、大阪湾堆積物で高い値を示すのではないかと考えられる。Niは、先述したように、生物には利用されにくい元素である。一方、Zn、Cu、Mnに比べると、Feの水酸化物や酸化物と親和性が高い<sup>9)</sup>。そのため、NiはFeと似た挙動を示すものと思われる。

以上のことから、基礎生産性が高い大阪湾の湾奥では、海域に過剰に存在する栄養塩類や有機物は植物プランクトンの体内に固定された形で存在し、それらが海水浄化船によって効率よく回収されるものと考えられる。同時に、植物プランクトンに摂取された重金属類が、海水浄化船によって海水中から除去されるものと思われる。

#### 4.2 水質改善の可能性

甲子園浜公共岸壁における実験では、図9に示すように、水温の低下に伴ってシルトフェンス内外の透明度が自然に向上した。図7に示す濁度の鉛直分布を見ると、8月20日にはシルトフェンスの内外ともに水深2.0m以浅の層で高濁度層が認められた。この日の透明度は外側が1.5m、内側が2.2mであった。この値は、高濁度層の厚さとほぼ同じである。10月15日の鉛直分布を見ると、8月20日に認められた高濁度層が消滅している。この日の透明度は外側で3.2m、内側で4.3mであった。この値は、濁度が増大し始める水深とほぼ同じである。これらのことから、甲子園浜公共岸壁の周辺海域の透明度は、主に水深2.0m以浅の高濁度層の消長に依存するものと考えられる。したがって、水深2.0m以浅の高濁度層を構成する物質を除去すれば、夏季であっても2.0m

以上の透明度を確保することが可能になるものと思われる。

先述したように、ろ材表面の捕捉物質は、有機物を多く含むものであった。本実験では、海水を揚水するポンプを水深1.0~1.5mに設置した。そのため、これら有機物に富む物質は、水深1.0~1.5m付近の層に存在していたものである。上述したように、この水深には、夏季に高濁度層が存在した。このことから、高濁度層を構成物質は、有機物に富むものであると考えられる。したがって、水深2.0m以浅の高濁度層を構成する物質を除去することによって、海域のCODの値を減少させることも可能であると思われる。

図11に海底面上1m付近における底層水のDO変化を示す。図中には、比較のために表層と底層の水温変化も示してある。この図から、表層水と底層水の水温差が大きい夏季では、シルトフェンスの内外ともに底層水のDOは2.0mg/l以下で推移するが、水温差がほとんどない秋季には、底層水のDOは2.0mg/l以上に増大するということがわかる。また、秋季ではシルトフェンス内側のDOが外側に比べて高い場合が多い。

図8に示したように、表層水のDOは、季節やシルトフェンスの内外に係わらず6.0mg/l以上と高い値を示す。しかし、図11に示すように、夏季の表層と底層の水温差は5.0℃以上であった。その

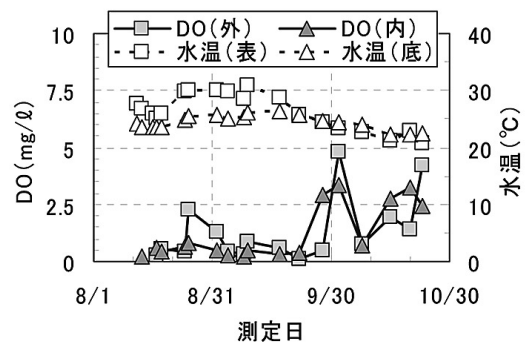


図11 底層(海底+1m)におけるDO変化

ため、DO の高い表層水が底層に供給されることはなく、底層水は貧酸素状態になったものと思われる。その後、水温差が小さくなると、表層水と底層水が混合し始める。このとき、底層の DO は増大する。9 月中旬頃より底層水の DO が増大するのは、このような理由によるものである。しかし、シルトフェンス外側では、底層水の DO の増加量は平均で 1.5mg/l 程度である。これは、海底に存在する有機物などによって、供給された酸素が消費されるためであると思われる。一方、シルトフェンス内側では、DO の増加量は平均で 2.1mg/l である。シルトフェンスの内側では、海水浄化船から DO の高い海水が 24 時間連続して供給される。シルトフェンスの外側に比べて、内側で底層の DO 増加量が大きいのは、このような表層水が供給されるためであると思われる。これらのことから、海水の鉛直混合を促進する方法を併用して海水浄化船を稼働させれば、夏季であっても、底層水の貧酸素化を抑制することが可能であると考えられる。

## 5. 結論

本研究では、シルトフェンスで区切られた海域で実験を行い、海水浄化船による閉鎖性海域の水質向上の可能性について検討した。その結果、海水浄化船を稼働させることによって、その周辺海域の透明度を向上させ、COD の値を減少させることが可能であるということがわかった。また、大阪湾のように基礎生産性の高い海域では、植物プランクトンの体内に固定された形で、栄養塩類や有機物が海水浄化船によって効率よく回収されるということが明らかとなった。このとき、植物プランクトンに摂取された亜鉛などの重金属元素が、同時に海水中から除去されるということが判明した。さらに、海水の鉛直混合を促進する方法を併用することによって、底層水の貧酸素化を抑制で

きる可能性があるということがわかった。

## 謝辞

本研究を行うに当たり、多くの方のご協力またはご支援をいただいた。ここに謝意を表します。

## 引用・参考文献

- 1) 松田 治ほか：水産業における水圏環境保全と修復機能，恒星社厚生閣，pp.60—85，2002
- 2) 木村賢史：葛西人工海浜における自然浄化能力，水，Vol.38，No.9，pp.101—107，1996
- 3) 李 正奎ほか：自然干潟および人工干潟の有機物浄化能の定量化と広島湾の浄化に果たす役割，水環境学会誌，Vol.26，No.3，pp.149—156，1998
- 4) 国土交通省港湾局環境整備計画室：海域環境情報提供システム，自然環境の再生・創造施設等の情報，<http://www.milt.go.jp/kowan/ecoport/index.htm>
- 5) 湊 太郎ほか：海環境修復技術としての海水浄化船，日本沿岸域学会論文集，No.16，pp.81—92，2004
- 6) 地盤工学会：土質試験の方法と解説，2000
- 7) 西村雅吉 編：海洋化学，産業図書，1983
- 8) 環境省；土壤汚染対策法施行規則（環境省令第 29 号），2003
- 9) 長岡千津子ほか：大阪湾における底質重金属濃度と底質環境との関係，日本水産学会誌，Vol.70，No.2，pp.159—167，2004
- 10) 大阪府：大阪府環境白書 平成 14 年版，2002
- 11) 寒川喜三郎ほか：最新の底質分析と化学動態，技報堂出版，pp.51—76，1996
- 12) 城 久：大阪湾における富栄養化の構造と富栄養化が漁業生産におよぼす影響について，大阪府水産試験場研究報告，第 7 号，pp.1—76，1986

- 13) R. N. Yong *et al.* : Principles of Contaminant Transport in Soils, Elsevier, 1992
- 14) 山崎耕宇ほか：植物栄養・肥料学，朝倉書店，pp.73-102，1993
- 15) National Research Council 編：環境汚染物質の生体への影響 17 亜鉛，東京化学同人，pp.57-63，1986
- 16) 山本義和：水生生物と重金属〔1〕銅，サイエンティスト社，pp.62-84，1979

## 著者紹介

### 湊 太郎（正会員）

青木マリーン株式会社 技術営業部（兵庫県神戸市東灘区魚崎西町3-4-3），昭和47年生まれ，平成14年3月東海大学大学院博士課程修了，工学博士（東海大学），日本沿岸域学会ほか会員，e-mail：minato@aokimarine.co.jp

### 山崎 正一（正会員）

青木マリーン株式会社 取締役（兵庫県神戸市東灘区魚崎西町3-4-3），昭和23年生まれ，昭和46年3月東海大学海洋学部海洋工学科卒業，日本沿岸域学会ほか会員

### 佐藤 義夫（非会員）

東海大学海洋学部海洋科学科（静岡県静岡市清水折戸3-20-1），昭和22年生まれ，昭和45年東海大学海洋学部海洋科学科卒業，現在同大学教授，理学博士（東海大学），日本海洋学会，日本海水学会，日本地球化学会ほか会員

### 福江 正治（非会員）

東海大学海洋学部海洋土木工学科（静岡県静岡市清水折戸3-20-1），昭和23年生まれ，昭和46年3月東海大学海洋学部海洋工学科卒業，昭和52年McGill大学大学院Ph. Dコース修了，現在同大学教授，Ph. D, International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering，土木学会，地盤工学会，海底環境研究会ほか会員

## The Improvement in Water Quality on the Closed Sea Area by Using the Floating Vessel of Seawater Treatment

Taro MINATO, Shoichi YAMASAKI, Yoshio SATO and Masaharu FUKUE

**ABSTRACT** : In this study, applicability of the floating vessel of seawater treatment to remediation technique of water in the closed sea area is examined. As a result, it was found that the floating vessel increased transparency and decreased COD of seawater on the inside sea area closed by the silt protector. In addition, the collected materials on the floating vessel contained many nutrient salts and heavy metal ions. Therefore, using the floating vessel of seawater treatment, it is possible to improve the water quality on the closed sea area.

**KEYWORDS** : *seawater treatment, floating vessel, transparency, nutrient salts, heavy metal ion*