

# 浦の内湾における差し込み直後の水質悪化と物質輸送について

宗景志浩\*・中川倫寿\*\*・長谷川 浩\*\*\*・井関徹也\*\*\*\*

## 1. はじめに

夏季の浦の内湾では、まとまった降雨があると著しい塩分低下が生じ、湾外水との密度差が増大して大潮時には差し込み（密度流）が発達する。差し込みによって底層部の貧酸素化は解消されるが、上層は海面の黒色化や溶存酸素の低下が生じる。また、最奥部では鞭毛藻プランクトンが増殖し、差し込みに伴う表層移流に乗って湾央から湾口側に移動しながら大規模な赤潮を形成する（宗景ら, 1992a）。そこで、本研究では海象、硫化物、栄養塩などの分布を測定し、差し込み時におけるこれらの分布特性や物質輸送を調べ、差し込み直後の水質悪化とその機構を明らかにしようとした。

## 2. 方 法

### 2.1 観 測

1993年8～9月及び1994年6～9月に、図-1に示す湾内7点、湾外1点で水温、塩分、溶存酸素(DO)、クロロフィル(Chl. a)の鉛直分布を定期的に計測した。また、湾内7点、湾外1点において水深0, 2, 5 m毎及び底泥直上で採水した。試水は直ちにフィルターで濾過した後、濾液については溶存態全窒素(DTN)、溶存態無機窒素(DIN: アンモニア態窒素(NH<sub>4</sub>-N)+亜硝酸態窒素(NO<sub>2</sub>-N)+硝酸態窒素(NO<sub>3</sub>-N))、磷酸態磷(PO<sub>4</sub>-P)、珪酸態珪素(SiO<sub>2</sub>-Si)を測定した。フィルター上の懸濁物については懸濁態窒素(PON)を測定した。分析には植松ら(1978)や真鍋ら(1986)の方法を参考にした。

また、酸化還元電位(ORP)は1992年8～9月(宗景ら, 1992b)の、硫化水素(S<sup>2-</sup>)及びマンガン(Mn)は1995年8月の、いずれも差し込み前後の観測結果を使った。

### 2.2 差し込み時の物質輸送の推算法

差し込みに伴う栄養塩の輸送と循環を明らかにするために6ボックスモデルを作成した。図-2に示すように湾内を水深11 mで上下に分割し、さらにSt. 2とSt. 3の

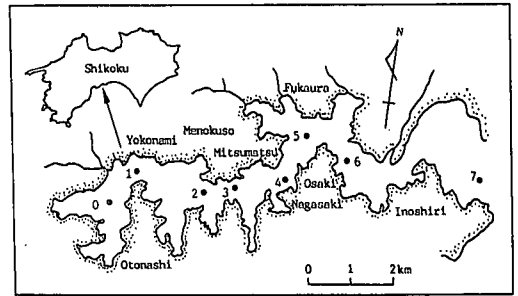


図-1 浦の内湾観測地点

間及びSt. 6とSt. 7の間で分割し、それぞれ湾奥、湾央、湾口側とする。各ボックスを①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥とすると、湾内における物質収支は以下になる。

$$QH_2 = QH + QH_4$$

$$V_1 \frac{dC_1}{dt} = QH_2(C_2 - C_1) + Q_{21}(C_2 - C_1) + r_7 q_v(C_3 - C_1) + R(C_0 - C_1) + P_1$$

$$V_2 \frac{dC_2}{dt} = QH_2(C_4 - C_2) - Q_{21}(C_2 - C_1) + P_2$$

$$V_3 \frac{dC_3}{dt} = Q_{43}(C_4 - C_3) + r_7 q_v(C_5 - C_3) - QH_2(C_3 - C_1) - r_7 q_v(C_3 - C_1) + R(C_1 - C_3) + P_3$$

$$V_4 \frac{dC_4}{dt} = QH_2(C_6 - C_4) - QH_4(C_6 - C_3) - Q_{43}(C_4 - C_3) + P_4$$

ここに、 $t$ は時間、 $C$ は指標物質平均濃度、 $P$ は負荷量(生産+消費)、 $V$ は体積、数字(1～4)はボックス番号である。 $R$ 、 $C_0$ はそれぞれ淡水流入量と淡水中の指標物質平均濃度である。 $QH$ は差し込み流量、 $Q_{21}$ は湾奥側の、 $Q_{43}$ は湾口側の鉛直混合量である。 $QH_2$ は湾央断面での差し込み流、 $QH_4$ はボックス③④での差し込みに伴う連行流(下降流)を表す。 $q_v$ 及び $q_v$ は湾口及び湾央部断面での潮汐流量で、各断面以奥の水面積と潮位差で与える。 $r_7$ は潮汐による海水交換率である。

計算是差し込みの発達した1993年8月5日～17日、8月17日～23日、1994年9月5日～13日、9月5日～27日の期間について行なったが、やや大きな差し込みが発達した1993年8月17日～23日を中心に詳述する。従

\* 正会員 農博 高知大学助教授 農学部生産環境工学科  
 \*\* 農修 海洋助産研究室長 水産庁西海区水産研究所  
 \*\*\* 理修 高知大学助手 理学部化学科  
 \*\*\*\* 農修 (株)ツルイ化学

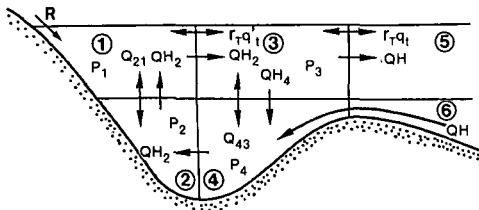


図-2 物質輸送モデル

殖や陸域からの負荷は $P$ に含まれるが、短期間であるため考慮しない。

### 3. 差し込み時の海洋環境

#### 3.1 塩分, DO

図-3に1993年8月5日及び23日の塩分とDOの湾内縦断分布を示した。1993年8月5日は7月下旬の降雨のため低塩分化と表層直下における成層化が著しい。塩分は5m以浅では26 psu以下、底層でも30 psu以下となっている。湾奥部表層直下にDOの高濃度域が見られるが、9m以深で1 ml/l以下の強い貧酸素水塊が湾内全域に広がっている。

湾外水の差し込みが強まった8月17日には、30 psu以上の高塩分水塊が湾奥部底層に流入している。26 psu以下の低塩分水は2m以浅まで押し上げられており、湾内全体が高塩分化しつつある。DOの縦断分布では、DO 1 ml/l以下の水塊が湾奥側水深5m~10mに押し上げられており、水深5m付近では3 ml/l以下の水塊が湾口側に舌状に張り出している。

23日には塩分は湾口側底層で32 psuにまで上昇し、5m以深は全域で30 psuを上回った。26 psu以下の低塩水は僅かに湾奥側の1m以浅に見られる。底層部の貧酸素水塊は完全に消失し、湾内全域で3 ml/l以上に回復し

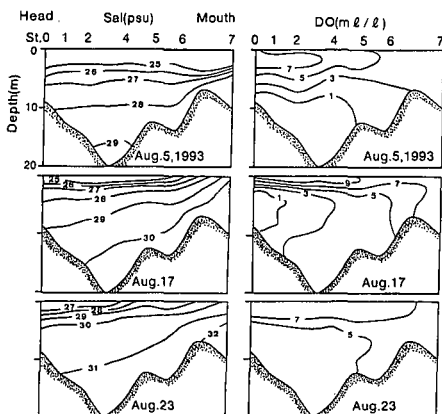


図-3 差し込み時の塩分とDOの縦断分布

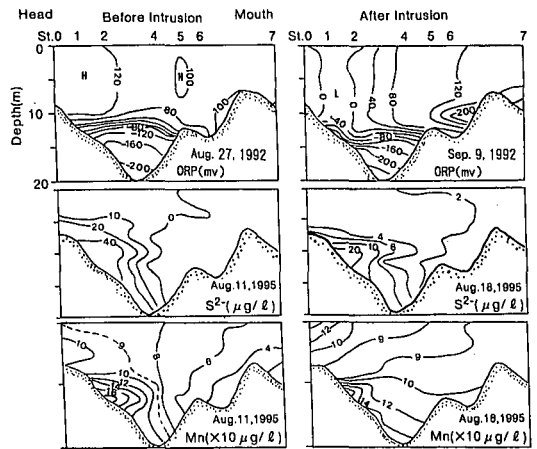


図-4 差し込み前後のORP,  $S^{2-}$ 及びMnの縦断分布

ていた。

#### 3.2 差し込み直後の水質悪化

図-4には差し込み前後のORP,  $S^{2-}$ 及びMnの分布を示した。酸化環境にある表層部ではORPは通常100 mv以上を示すが、貧酸素化が進行した底層部では著しく低下し、-200 mvにもなる。その後差し込みが発達すると、その先端部の目の糞付近では、下層から表層まで0 mv程度に低下し、海面は黒色化した。

貧酸素化の進行に伴って、 $S^{2-}$ 及び $Mn$ のいずれも底泥上に蓄積されるが、差し込み直後には湾奥部で巻き上げられ、表層部でも濃度が上昇した。しかし、 $S^{2-}$ は東京湾の青潮 (Takeda et al., 1991) で見られるほど高濃度にはならなかった。

#### 3.3 アンモニア態窒素 ( $NH_4-N$ )

図-5 (左) に1993年8月5, 17及び23日の $NH_4-N$ 濃度の縦断分布を示す。 $NH_4-N$ は、貧酸素水塊が形成されていた8月5日には湾奥部底層で10~16  $\mu g-at/l$ 、上層で1~3  $\mu g-at/l$ で、湾奥側では減少している。

差し込みが強まった8月17日には、湾奥底層部にあった高濃度水塊が湾奥に押し込められ、中層付近では湾奥から湾口へやや張り出している。最高濃度も10  $\mu g-at/l$ 程度まで低下している。中層から上層でも濃度は低下しているが、これには差し込みによる湾外への排出、 $NO_2-N$ 、 $NO_3-N$ への硝化、植物プランクトンによる消費などが考えられる。

差し込み後期の23日には $NH_4-N$ の高濃度水塊はほとんど消失しており、わずかに湾奥部の底泥直上に6  $\mu g-at/l$ の水塊が見られる。

#### 3.4 磷酸態磷 ( $PO_4-P$ )

図-5 (右) に1993年8月5, 17及び23日の溶存無機態磷 ( $PO_4-P$ ) 濃度の縦断分布を示す。 $PO_4-P$ は $NH_4-N$ と同様有機物の分解によって生じ、一般に底泥直上に還

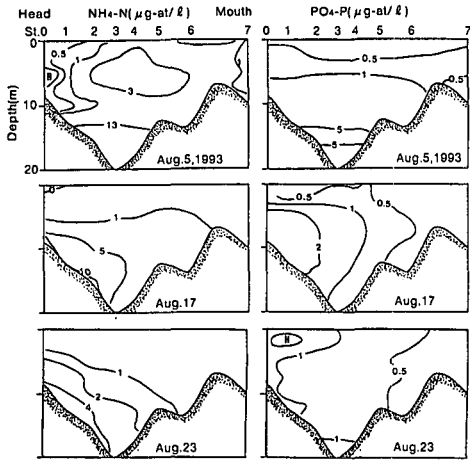
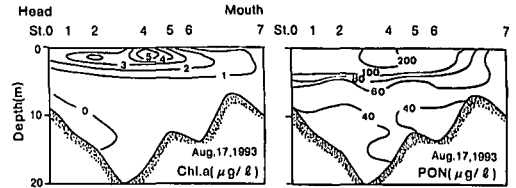
図-5 差し込み時の  $\text{NH}_4\text{-N}$  と  $\text{PO}_4\text{-P}$  の縦断分布

図-6 赤潮発生期の Chl. a と PON の縦断分布

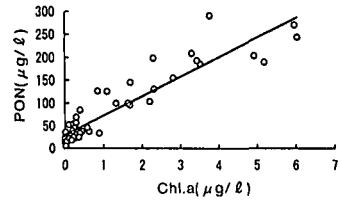


図-7 赤潮発生期の Chl. a と PON の関係

元環境が形成されるのに伴って底泥中から溶出する (小山ら, 1978)。

貧酸素水塊が発達していた8月5日には、湾中央底層に  $\text{PO}_4\text{-P}$  の高濃度水塊が見られ、最高濃度は  $6\mu\text{g-at}/\ell$  以上に達していた。その後大規模な差し込みが発達し、湾中央底層にあった高濃度水塊は8月17日には湾奥部の中層～底層に押し込められ、中層部では湾口側へ張り出している。

差し込みがさらに進み、23日にはこの高濃度水塊は  $1\mu\text{g-at}/\ell$  程度にまで減少した。しかし、その分布形はさらに変化する、湾奥海面では通常の10倍程度の濃度となった。これは、湾奥底泥直上に押し込められた  $\text{PO}_4\text{-P}$  の高濃度水塊が差し込みによって巻き上げられ海面に浮上したためと考えられる。このような現象は  $\text{NH}_4\text{-N}$  や DO では明瞭にはみられなかった。これは  $\text{NH}_4\text{-N}$  が  $\text{PO}_4\text{-P}$  に比べ酸化され易く、かつ鞭毛藻プランクトンなどに吸収され易いため、湾奥上層に輸送される間に消費されたためと思われる。

### 3.5 懸濁態窒素 (PON) と溶存態窒素 (DIN)

1993年8月17日における湾内全域の Chl. a (相対値) と懸濁態窒素 (PON) の縦断分布を図-6に、これらの相関を図-7に示した。湾中央層部に Chl. a と PON 濃度のピークが見られ、これらは *Chattonella* 属を優先種とする赤潮を形成していた。門谷ら (1991) にならってこれらの一次相関をとると、有為な相関が得られた。

$$\text{PON} (\mu\text{g}/\ell) = 42.6 \times \text{Chl. a} (\mu\text{g}/\ell) + 30.1$$

$$(r^2 = 0.86)$$

右辺第1項は植物プランクトンに、第2項はその他デトリタスなどに由来した PON である。第1項に比較し第2項は微量であり、PON の大部分は Chl. a (植物プランクトン) とみなされる。

St. 1 及び St. 4 の1993年8月5日から31日までの DIN と PON の変動を図-8に示す。8月初旬は、表層部では降雨に伴って陸域から多量の  $\text{NO}_3\text{-N}$  が供給され、底層では貧酸素化に伴って底泥から  $\text{NH}_4\text{-N}$  が供給されたため全層で DIN は高く、湾内平均で  $8\mu\text{g-at}/\ell$  を越えていた。PON は湾奥で  $300\mu\text{g}/\ell$ 、湾中央では  $170\mu\text{g}/\ell$  程度であった。

差し込みが強まった8月中旬には、湾奥中層の DIN 濃度が一旦上昇した後急激に低下している。湾中央でも中層以深の濃度は  $6\mu\text{g-at}/\ell$  以下、表層でも  $1\mu\text{g-at}/\ell$  以下に低下した。一方、PON は湾奥表層では徐々に減少しているが、湾中央では増加し、最高  $300\mu\text{g}/\ell$  程度となった。差し込みによって湾奥に輸送された栄養塩 (DIN) を利用して増殖した植物プランクトン (PON) が、表層部の移流に乗って湾中央から湾口側へ輸送されたと考えられる。

差し込みが最も発達した8月中旬以降、湾中央では中・底層の PON が増加している。これは鉛直混合によって湾口側で中・底層に輸送された PON や巻き上げられた底泥が差し込みに乗って湾中央側へ輸送されたためと考

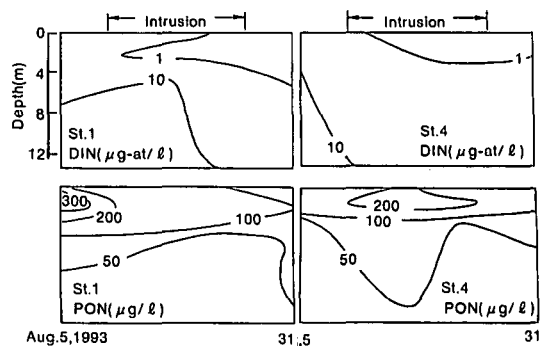


図-8 DIN と PON の変動 (1993年8月)

えられる (宗景ら, 1995)。

#### 4. 差し込みに伴う物質輸送量と負荷量

##### 4.1 海水輸送量

差し込み発達期の海水流量の推算結果を表-1 に、一例として1993年8月17~23日における結果を図-9に示す。湾外から湾口側底層へ輸送される差し込み海水量  $QH$  は  $1 \sim 2.6 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$  となった。これとほぼ等量 ( $QH_2 = 1.7 \sim 2 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$ ) の海水が湾奥底層から上層へ輸送された。これらは潮汐による海水交換量  $r_{TQ}$  の3~4倍、交流量の2~4割にあたる。

湾口側上(下)層から下(上)層への海水輸送量  $QH_4$  は  $0.7 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$  程度となり、 $QH$  や  $QH_2$  と比較してかなり小さい。また、密度成層の強度や湾内外の密度差によって差し込みの規模や、分流(上昇流)か連行(下降流)かが決まるようである。

海水の鉛直混合量は湾奥側では  $Q_{21} = 0.1 \sim 0.5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$  となり、 $QH$  や  $QH_2$  と比較して一桁小さい。しかし、湾口側では  $Q_{43} = 2.1 \sim 3.6 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$  と大きく、湾口側の鉛直混合は湾奥側の17倍(平均)にも上る。

これらの結果、差し込みが発達すると、図-9で示すように湾内下層の海水が湾奥上層に押し上げられ、さらに湾口側に流出する循環系が形成される。また、湾口側では成層が弱まって鉛直混合が活発化するものと考えられる。

##### 4.2 $\text{PO}_4\text{-P}$ の輸送量と負荷量

差し込みの発達した1993年8月17日から23日の期間の  $\text{PO}_4\text{-P}$  の輸送量と負荷量を図-10にまとめて示した。上・下層間の輸送量は差し込みと鉛直混合による輸送の合算で示し、淡水流入及び潮汐による輸送は小さいため省略した。

$\text{PO}_4\text{-P}$  は差し込みにより湾口側底層から湾奥側に  $0.13 \text{ kg-at/h}$ 、湾奥底層から上層及び湾口側に  $0.28 \text{ kg-at/h}$ 、湾外に  $0.14 \text{ kg-at/h}$ 、それぞれ輸送されている。これより、還元環境下で底層に蓄積された多量の  $\text{PO}_4\text{-P}$  は、差し込み流に押されて輸送され、図-5で示した湾奥上層に高濃度水塊が現れたことを裏付けている。

$\text{PO}_4\text{-P}$  負荷量は下層で  $0.06 \sim 0.12 \text{ kg-at/h}$ 、上層で  $-0.1 \sim -0.12 \text{ kg-at/h}$  となった。これは下層で生産され

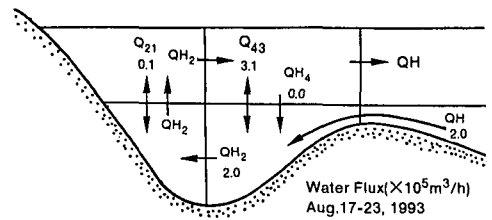


図-9 海水輸送量

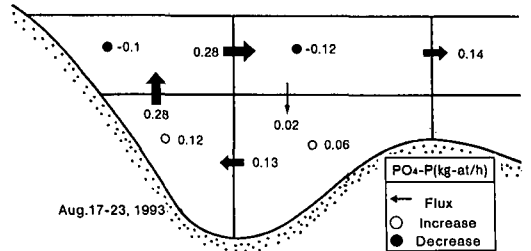


図-10  $\text{PO}_4\text{-P}$  の輸送量と負荷量

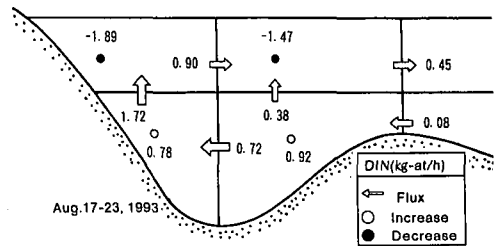


図-11 DIN の輸送量と負荷量

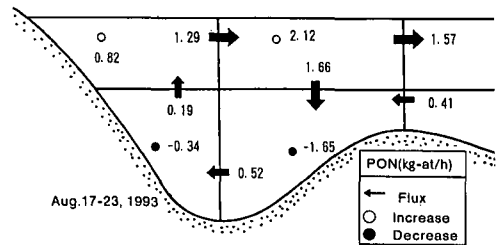


図-12 PON の輸送量と負荷量

た  $\text{PO}_4\text{-P}$  が上層に運ばれ、植物プランクトンに吸収されたものと考えられる。

##### 4.3 DIN, PON の輸送量と負荷量

1993年8月17日から23日の期間のDIN及びPONの輸送量と負荷量をそれぞれ図-11, 12に模式的に示した。湾内上・下層間の輸送量は差し込みによる輸送と鉛直混合による輸送の合算で示し、淡水流入及び潮汐による輸送は小さいため省略した。

表-1 差し込み時の海水輸送量 (単位:  $\times 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$ )

| 計算期間         | $QH$ | $QH_2$ | $QH_4$ | $Q_{21}$ | $Q_{43}$ |
|--------------|------|--------|--------|----------|----------|
| 1993 8/ 5-17 | 2.6  | 2.0    | 0.6    | 0.2      | 2.2      |
| 8/17-23      | 2.0  | 2.0    | 0.0*   | 0.1      | 3.1      |
| 1994 9/ 5-13 | 1.0  | 1.7    | 0.7*   | 0.1      | 2.8      |
| 9/ 5-27      | 1.2  | 1.9    | 0.7*   | 0.5      | 3.6      |

\*: 連行流 (下降流)

DIN は湾奥下層から上層への輸送量が最も大きく 1.72 kg-at/h となった。湾奥上層では輸送された DIN が消費され (負荷量 = -1.89 kg-at/h), 逆に植物プランクトンが主体の PON が増加 (負荷量 = 0.82 kg-at/h) している。

湾奥上層部を湾口側へ, DIN は 0.90 kg-at/h, PON は 1.29 kg-at/h 輸送された。また, DIN は主として鉛直混合により湾口側下層から上層へ 0.38 kg-at/h 輸送された。湾口側上層の DIN 負荷量は -1.47 kg-at/h と減少し, PON 負荷量は 2.12 kg-at/h と増加している。ここでも湾奥と同じく輸送された栄養塩を利用して植物プランクトンの増殖があったと考えられる。

湾口側上層から湾外へ 1.57 kg-at/h の PON が排出され, DIN の排出量 0.45 kg-at/h を大きく上回る。つまり, 湾内から湾外へ排出される窒素の形態は, 溶解態よりも懸濁態 (植物プランクトン) の割合が大きい。

差し込みが発達すると, 湾口側では成層が弱まって鉛直混合量が活発化するため, 湾外への排出量と等量 (1.66 kg-at/h) の PON が湾口側上層から下層へ輸送される。これらは下層部で沈降し水中から除かれるが (負荷量 = -0.34 ~ -1.65 kg-at/h), 底泥中で分解され再び DIN となって水中に溶出する (DIN 負荷量 = 0.78 ~ 0.92 kg-at/h)。

## 5. 結 論

浦の内湾の成層期に発達する差し込み前後の海況, 栄養塩及び微量物質を計測し, 以下の結果を得た。

① 成層期の浦の内湾では, 貧酸素化に伴って底泥から  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$ ,  $\text{S}^{2-}$ , Mn などの栄養塩や還元物質が溶出し, 湾央底層部の ORP は著しく低下する。

② 貧酸素化が長期にわたって形成された後に差し込みが発達すると, 湾外から高密度海水が湾内底層に侵入し, 塩分や DO はいずれも急上昇する。しかし, 底層部に蓄積された栄養塩や還元物質が目の糞以奥の湾奥部表層

に押し上げられ, 海面の栄養塩濃度は通常の 5~10 倍に増加する。そして, 海面付近では DO は充分あるにも関わらず, ORP は低下し, 水質が著しく悪化する。

③ 湾奥から湾央にかけて表層ではこれらの栄養塩を利用して植物プランクトンが増殖し, 移流に乗って湾口側へ運ばれる。差し込み後には湾口側の成層が弱まり鉛直混合が活発化するため, 多くは下層に輸送される。これらは下層部で沈降し水中から除かれるが, 底泥中で分解され再び DIN となって水中に溶出する。

このように, 浦の内湾では, 窒素は形態を変えながら差し込みに駆動された閉鎖的な物質循環系を形成しており, 効率のよい海水交換が生じているにも関わらず, 水質の浄化には結びついていない。

## 参 考 文 献

- 植松光男, 南川雅男, 有田英之, 角皆静男 (1978): 海水中の懸濁粒子量の測定, 北大水産彙報, 第 29 巻, 第 2 号, pp. 164-172.
- 小山忠四郎 (1978): 窒素燐の発生源—底泥からの溶出, 環境創造 12, pp. 36-46.
- 真鍋武彦, 反田 實 (1986): 海水中に含まれる微量の反応性珪酸, 反応性磷酸, アンモニア, 亜硝酸及び硝酸の同時分析について, 海と空, 第 62 巻, 第 1 号, pp. 25-37.
- 宗景志浩, 村田 宏, 森山貴光, 土居 聡 (1992a): 湾外水の差し込みが浦の内湾の鞭毛藻赤潮の発生に及ぼす影響, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 986-990.
- 宗景志浩, 家田智之 (1992b): 浦の内湾における硫化水素の溶出が貧酸素化に及ぼす影響, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 981-985.
- 宗景志浩, 田村圭一, 中川倫寿 (1995): ADCP 観測による浦の内湾の差し込みの流れ構造と浮遊物質分布, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 1091-1095.
- 門谷 茂, 三島康史, 岡市友利 (1991): 大阪湾の富栄養化の現状と生物による N と P の循環, 沿岸海洋研究ノート, 第 29 巻, 第 1 号, pp. 13-26.
- Takeda, S., Y. Nimura and R. Hirano (1991): Optical, biological, and chemical properties of Aoshio, hypoxic milky blue-green water, observed at the head of Tokyo Bay, Journal of Oceanographical Society of Japan, Vol. 47, pp. 126-137.