

# 浦の内湾の成層期における栄養塩の生産・消費と循環について

宗 景 志 浩\*   ・大 原    聡\*\*   ・長谷川    浩\*\*\*  
岩 崎    望\*\*\*\*・福 家 英 乗\*\*\*\*\*

## 1. はじめに

閉鎖性の強い浦の内湾では、成層化が進む6月初旬から貧酸素水塊が形成され、底泥から栄養塩、微量金属、硫化物などが溶出するようになる。そのうえ湾中央で行われている給餌養殖から多量の有機物が負荷されるため、夏季には水質の悪化が一段と進行する。一方、湾奥部周辺には人家も河川も少なく、養殖も行なわれていない。そのため、湾奥部への栄養塩の供給は少ないと思われるが、毎年4月頃から湾奥部を中心に鞭毛藻類やラフィド藻類のプランクトンが発生し、時には大規模な赤潮が形成される。赤潮は湾中央に広がり、養殖魚の大量死を招くこともある。

これまでの観測の結果(宗景ら, 1998), ①湾外水の差し込み(密度流)が発達すると、栄養塩の豊富な底層水が湾奥部へ輸送され巻き上げられる, ②植物プランクトンはこの栄養塩を吸収しながら増殖・浮上し、湾中央から湾口側へ輸送された後、湾口側滞留域で死滅・沈降することなどが分かった。さらに、沈降したプランクトンは底泥中でバクテリアによって分解され、無機栄養塩として再び溶出すると考えられる。

本研究では、クロロフィル $a$ 、栄養塩及び金属類を測定し、栄養塩類の生産・消費場(植物プランクトンの増殖及び死滅・分解場)並びにそれらの輸送経路をボックスモデルによる物質収支解析から明らかにしようとした。

## 2. 方    法

### 2.1 観    測

1997年4月から8月にかけて、図-1に示す浦の内湾の湾内7点、湾外1点において、水温、塩分、溶存酸素(DO)、クロロフィル $a$ 等の観測と採水を行った。試水を0.2 $\mu$ mミリポアフィルターを用いて濾過した後、アンモニア態窒素(NH $_4$ -N)はインドフェノール法、硝酸態窒

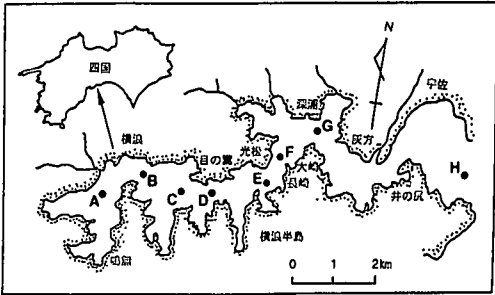


図-1 浦の内湾の地形と観測点

素(NO $_3$ -N)はカドミウム・銅カラム還元ナフチルエチレンジアミン法、溶存態全リン(DTP)及び磷酸態リン(DIP)はモリブデンブルー法により吸光度を測定した。また、溶存態の珪素(Si)、鉄(Fe)及びマンガン(Mn)など微量金属は誘導結合プラズマ原子発光装置(ICP-AES)を用いて分析を行った。

### 2.2 物質輸送の推算法

湾内における物質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10mで上下に、さらにSt. CとSt. D及びSt. GとSt. Hの間で分割し、それぞれ湾奥、湾中央、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。

$$QH_2 = QH + QH_4$$

$$V_1 \frac{dC_1}{dt} = QH_2(C_2 - C_1) + Q_{21}(C_2 - C_1) + r_1 q_1(C_3 - C_1) + R(C_0 - C_1) + P_1$$

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

$$V_3 \frac{dC_3}{dt} = Q_{43}(C_4 - C_3) + r_1 q_1(C_5 - C_3) - QH_2(C_3 - C_1) - r_1 q_1(C_3 - C_1) + R(C_1 - C_3) + P_3$$

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

ここで、 $t$ 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(1~6)はボックス

\* 正 会 員    農博    高知大学助教授    農学部生産環境工学科  
\*\* 学生会員    理博    高知大学大学院    理学研究科化学専攻  
\*\*\*            理博    京都大学助手    化学研究所  
\*\*\*\*           農博    高知大学助教授    海洋生物研究センター  
\*\*\*\*\*        理修    高知大学大学院    理学研究科化学専攻

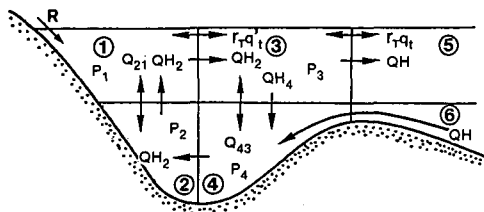


図-2 物質輸送モデル

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。 $q_i$ 及び $q'_i$ 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。 $r_r$ は潮汐による海水交換率である。

### 3. 差し込みと海洋環境

#### 3.1 差し込み流量

図-3には各観測期間における淡水供給量と差し込み流量を示した。差し込みとは高密度湾外水が湾内底層に侵入する密度流現象のことであり、まとまった降雨のあと湾内の塩分濃度が低下し、湾外水との密度差が大きくなった大潮時によく発達する。6月中旬以降の大潮は6月20日、7月5日及び7月20日であり、高知気象台によると6月28日及び7月8日にそれぞれ81.5、56.5 mm/dayのまとまった降水量を記録した。本観測期間の差し込み流量は $0.1 \sim 0.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{h}$ で、7月4日から7月8日の大潮時期には $0.23 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{h}$ にまで増大した。

#### 3.2 差し込み前後の水質変化

7月4日及び7月8日における水温、塩分、DO及びクロロフィルa濃度の湾内縦断分布を図-4に示した。7月5日の大潮時に発達した差し込みにより、7月8日には湾内下層の水温、塩分及びDOは7月4日のそれに比べていずれも上昇し、貧酸素水塊も消失するなど湾内の

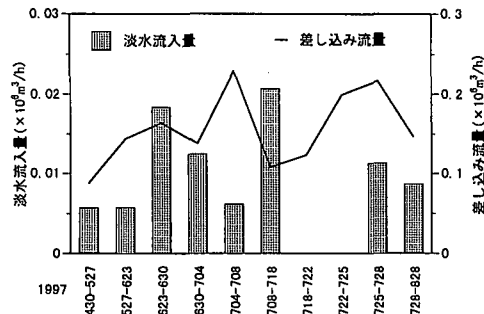


図-3 淡水流入量と差し込み流量

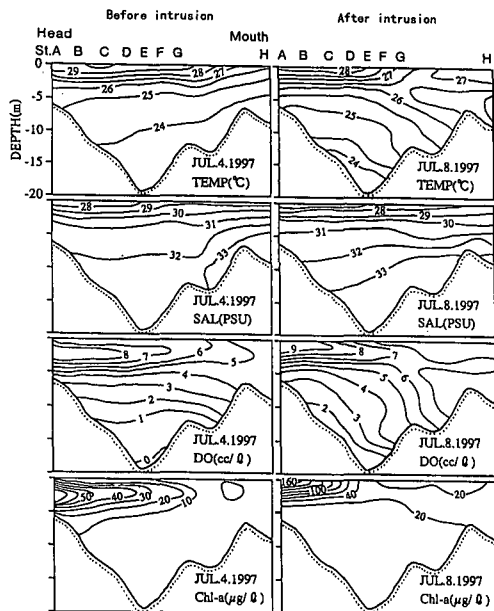


図-4 水温、塩分、DO、クロロフィルaの縦断分布

水質環境は大きく変化した。

クロロフィルaは、7月4日には湾奥底層で $70 \mu\text{g}/\text{l}$ を示し、この高濃度域が湾口側へ舌状に広がっていた。7月8日には濃度の中心が湾奥上層へ移動し、 $160 \mu\text{g}/\text{l}$ まで増大した。さらに、高濃度域は湾口側上層にまで広がって大規模な赤潮を形成した。

#### 3.3 クロロフィルa濃度の季節変化

図-5には各ボックスの平均クロロフィルa濃度を観測期間ごとに示した。これによるとBOX-1(湾奥側上層)の平均濃度が最も高く、次いでBOX-3(湾口側上層)が高い。上層部での濃度変化は類似しており、6月23日と7月8日に濃度が増している。また、珪藻類プランクトンが優占種となった7月中旬以降の平均クロロフィルa濃度は湾内全体で低い。

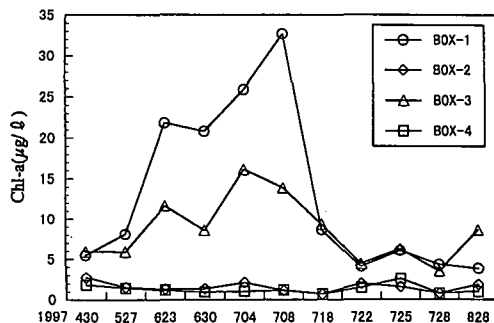


図-5 各ボックスの平均クロロフィルa濃度

#### 4. 物質輸送量・負荷量の季節変化

##### 4.1 栄養塩

図-6には各ボックスにおけるDIPの輸送量と負荷量の変化を観測期間ごとに示した。BOX-4(湾口側下層)では、DIP負荷量( $P_4 > 0$ :生産)は6月以降徐々に増加している。これらは貧酸素化が激しい時期に底層から溶出したもので、大部分はBOX-2(湾奥側下層)に輸送されている。BOX-2では、6月30日~7月18日を除いて負荷量( $P_2$ :DIPの生産及び消費)はほとんどなく、BOX-4から輸送されたDIPがそのままBOX-1に輸送される結果となった。

BOX-1では、鞭毛藻類やラフィド藻類が優占した7月10日までは、BOX-2から輸送されたDIPの大部分が消費( $P_1 < 0$ )されており、これらの多くはプランクトンに吸収された。従って、BOX-1からBOX-3へのDIPの供給量は少ないが、ここでも大部分は植物プランクトンに吸収された。

7月10日以降、BOX-1では鞭毛藻類やラフィド藻類が消失し、代わりに珪藻類が優占種となったが、細胞密度が低かったためDIPは十分利用されないままBOX-3へ輸送された。BOX-3では珪藻類が大増殖したため、多くはこれらに利用された。

従って、BOX-4で溶出したDIPは湾内を循環する間に、BOX-1やBOX-3で大部分が植物プランクトンに吸

収され、溶存態のDIPとして再びBOX-4に戻る量はほとんどない。

##### 4.2 クロロフィルa

夏期の浦の内湾では、クロロフィルa濃度と植物プランクトン量とは相関がある(門谷ら, 1991; 宗塚ら, 1996)。そこで、植物プランクトンの代わりにクロロフィルaをトレーサーとして収支を調べることにする。図-7には各ボックスにおけるクロロフィルaの輸送量と負荷量の変化を示した。

BOX-1では、6月23日から7月8日にかけてクロロフィルaの負荷量(生産量)が増加している。これは鞭毛藻類やラフィド藻類プランクトンの大増殖(赤潮)によるものであり、その大部分はBOX-3へ輸送された。7月8日を過ぎると負荷量は減少した。これは栄養塩が枯渇したためプランクトンの増殖が停止したり、優占種がクロロフィルaの少ない珪藻類に変化したことによると考えられる。

BOX-3へ輸送された植物プランクトンは、鉛直混合や連行流によってBOX-4(下層)へ運ばれたり、湾外へ輸送されたりした。6月23日~30日、7月8日~18日には、負荷量は負値を示している。これは、この時期には鞭毛藻類やラフィド藻類のプランクトンが優占して赤潮を形成したが、これらは死滅後急速に分解されたり、捕食を受けたりしたためと思われる。BOX-3では7月20日以降は栄養塩の供給が再び増加したため、負荷量もや

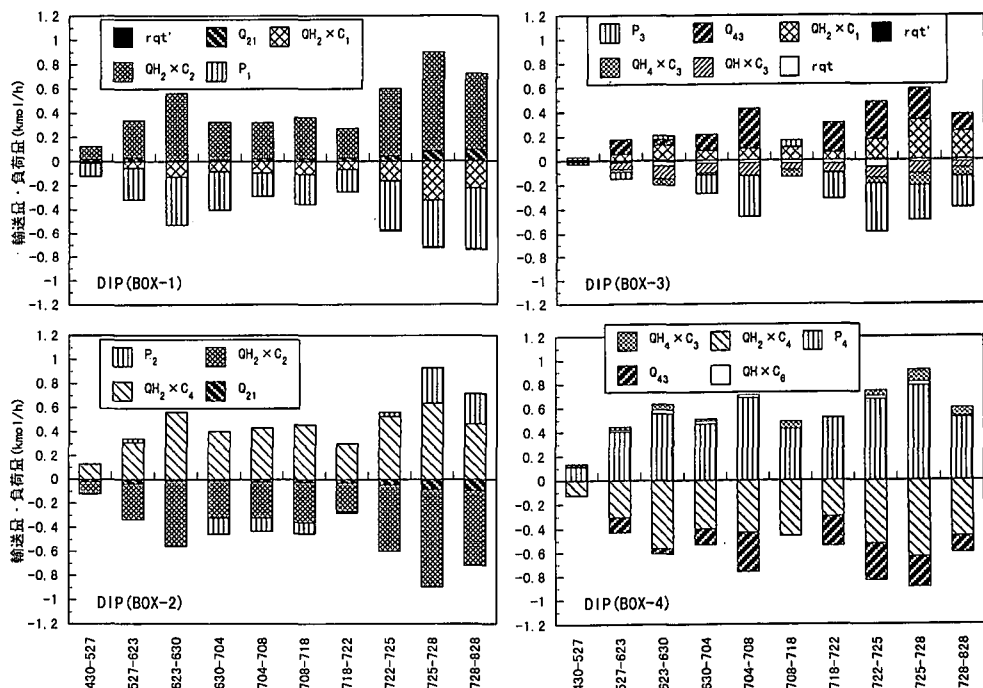


図-6 DIPの輸送量と負荷量の季節変化

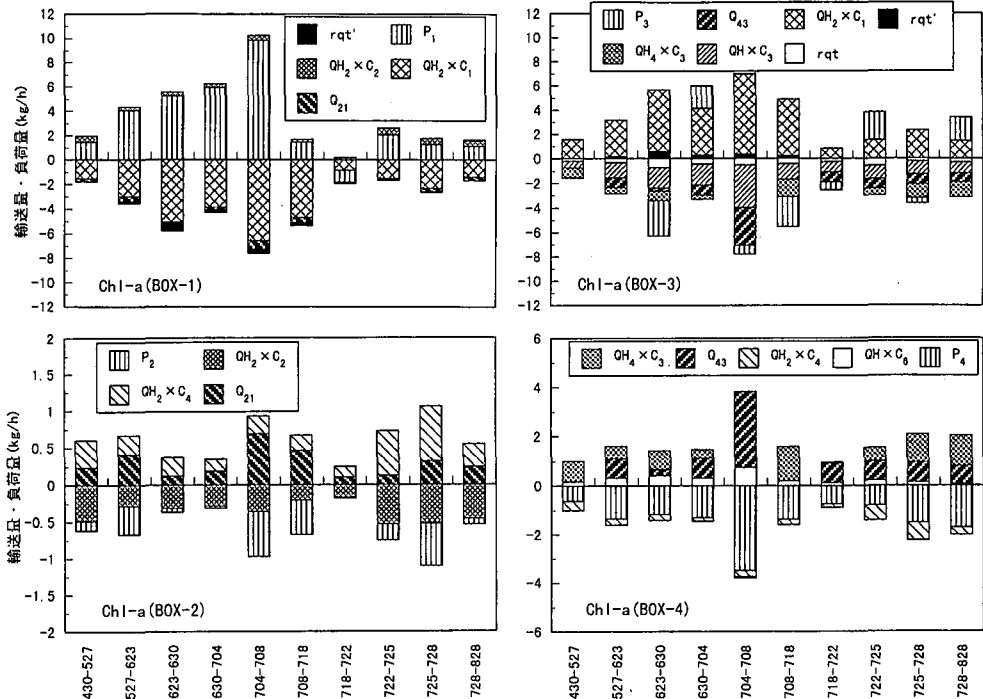


図-7 クロロフィルaの輸送量と負荷量の季節変化

や多くなってプランクトン（珪藻類）が急増したことを示している。

BOX-4では生産量のほとんどはBOX-3（湾口側上層）から輸送されてきたものであり、そのほとんどが消費されている( $P_4 < 0$ )。つまり、植物プランクトンはSt. F付近の滞留域(宗景ら, 1995)まで輸送される頃には活性を失い、沈降して死滅・分解すると考えられる。

## 5. 湾内全体の物質収支

図-8は4月から8月までの栄養塩(DIP, DIN, Si), クロロフィルa, Fe及びMnの収支を湾内全体で平均化して示したものである。

### 5.1 栄養塩

栄養塩類の主要な生産場はBOX-4（湾口側下層）で、貧酸素化に伴って底泥から溶出した負荷量( $P_4$ )である。ここでは、DIP, DIN, Siの生産量はそれぞれ全生産量の85, 54, 84%となった。次いで $P_2$ 及び $QH \times C_6$ (湾外からの流入)である。しかし、DIN(特に $NO_3-N$ )やSiは降雨や河川水からの供給も多い。仁淀川から淡水流出量が増加すると、潮汐交換や移流による流入の割合がDIPのそれに比べて増加した。

一方、主要な消費場はBOX-1（湾奥側上層）で、多くは植物プランクトンに吸収された負荷量( $P_1$ )である。ここではDIP, DIN, Siの消費量はそれぞれ全消費量の62, 43, 38%となった。次いで $P_3$ 及び $QH \times C_3$ (湾外への流

出)である。

### 5.2 クロロフィルa

クロロフィルaの生産場、すなわち植物プランクトンの増殖の主な場所は湾奥側上層( $P_1$ : 86%)である。湾口側上層での生産は僅か( $P_3$ : 7%)で、ここではBOX-1から輸送されたプランクトンのうち死滅するものもあるため、(生産と消費が相殺されて)生産量は小さい値になっている。

クロロフィルaの消費(植物プランクトンの消失・死滅)についてみると、約半分は潮汐交換や流れに乗って湾外へ流出し、残り約半分は湾口側下層で死滅すると考えられる。

### 5.3 負荷量比とレッドフィールド比

栄養塩の負荷量(消費量)が全て植物プランクトンに吸収されるものとして、リンと窒素の負荷量の比を算出した。その結果、降雨量の多かった期間を除き、リンの消費量が窒素のそれに比べ5~6倍多く、レッドフィールド比(リン:窒素=1:16)に一致しなかった。そこで、植物プランクトン以外にリンの消費される原因を調べた。

Mnについてみると、BOX-4が主な生産場で、BOX-1及びBOX-3が主な消費場である。BOX-2でも底泥から溶出していると考えられるが、消費の割合が多い。植物プランクトンの少ない下層では、これによる吸収よりもDIPとの吸着に使われている可能性が高い。

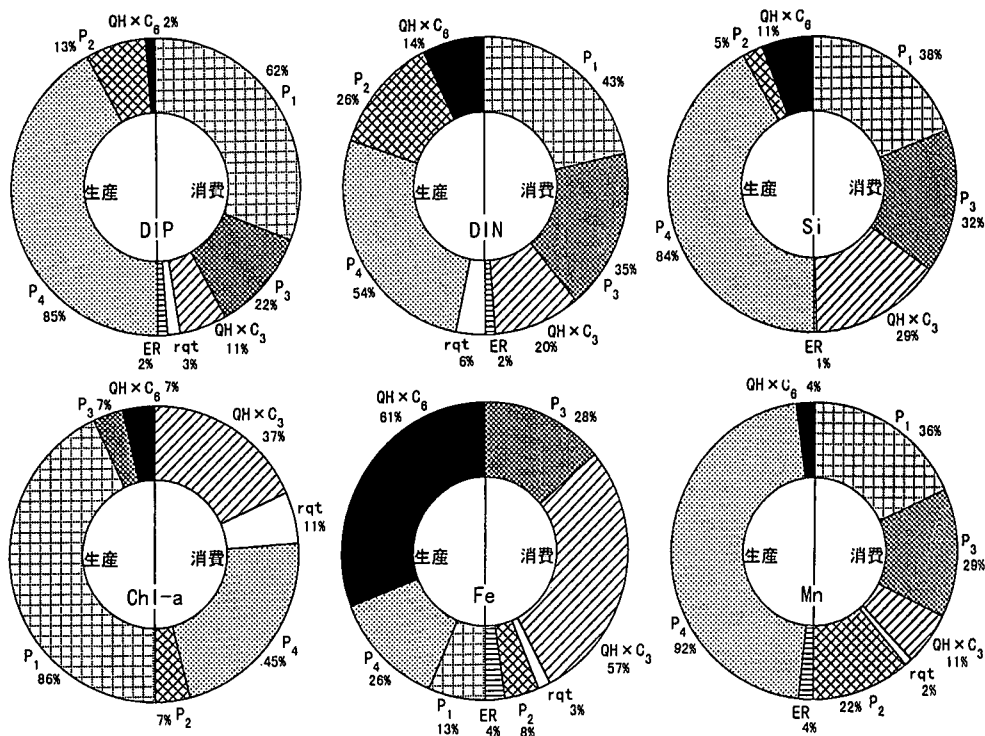


図-8 栄養塩、クロロフィル a, Fe 及び Mn の物質収支

溶存態 Fe の濃度は湾内外で一様で季節変化も小さいため、負荷量よりも移流による輸送が支配的であった。また、濃度は Mn のそれよりかなり低く、輸送量も負荷量も 1 桁小さかった。これは、溶存態の Fe が溶出しても、Mn より速やかに硫化物として、または酸素存在下で水和酸化物を形成して懸濁化する (小山, 1975) ため、(同時に生産・消費が進行して) 濃度差が生じないことによる。

栄養塩のすべてが植物プランクトンに吸収されたとすると、湾外へ流出する DIP の平均量は 0.30 kmol/h となる。湾内への平均流入量は 0.06 kmol/h となり、DIP の生産が湾底層からの溶出と湾外からの流入だけであれば、湾内は浄化されているといえる。レッドフィールド比の割合で窒素とリンが消費されるとして、湾外への流出量を逆算すると 0.11 kmol/h となり、先の平均流入量に近づく。

以上の結果、レッドフィールド比を越える DIP 消費は、Fe 及び Mn 酸化物に吸着して懸濁態に変化し、湾内底層に沈降・堆積したと考えられる。これらの量を考慮すると、プランクトン態として湾外へ流出している栄養塩量はさらに少なくなり、多くは湾内に蓄積すると考えられる。

## 6. 結 論

以上の結果、浦の内湾では湾口側底層で生産された栄養塩が差し込みによって湾奥側上層へ輸送され、植物プランクトンの増殖に利用される。植物プランクトンは、上層に移動しながらさらに増殖し、表層のごく薄い層で赤潮を形成しながら湾口側へ輸送されるが、表層部では栄養塩類 (特に窒素、リン) の欠乏や強光阻害などにより衰退する。これらは湾口側滞流域 (St. F 付近) に集まった後下層に沈降し、底泥中で分解して再び無機栄養塩として溶出し湾内を循環する。従って、湾外への流出は少なく、繁殖による負荷が増せば容易に水質は悪化する。

## 参 考 文 献

- 小山忠四郎 (1975): 琵琶湖堆積物の物質変化の機構に関する生物地球化学的考察, 水処理技術, Vol. 16, No. 1, pp. 19-39.
- 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.
- 宗景志浩・中川倫寿・長谷川 浩・井関徹也 (1996): 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, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 1106-1110.
- 宗景志浩・岩崎 望・秋沢歌織・長谷川 浩・大原 聡 (1998): 浦の内湾における植物プランクトンの分布構造と短期変動について, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 1136-1140.
- 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.