

# 栄養階級の異なる港湾での懸濁物の沈降堆積過程に関する一考察

## Sedimentation Process of Suspended Solids in Ports with Different Nutrient Level

三好順也<sup>1</sup>・上月康則<sup>2</sup>・倉田健悟<sup>3</sup>・山崎宗広<sup>1</sup>

Junya MIYOSHI, Yasunori KOZUKI, Kengo KURATA and Munehiro YAMASAKI

The objective of this study is to compare from primary production to sedimentation process of suspended solids in ports with different nutrient level, and to compare effects on oxygen deficiency of oxygen consumption of their process in ports. The investigation was conducted water quality, primary production, settling matter and sediment at Komatsushima port in Tokushima prefecture and Amagasaki port in Hyogo prefecture. As a result, organic ingredients of suspended solid were different from two ports. It was suggested that suspended solid ingredient in Amagasaki port was included phytoplankton a lot than it in Komatsushima port. This ingredient difference affected oxygen consumption of sedimentation process and material cycle.

### 1. 緒 言

都市近郊の沿岸域では、埋立や防波堤の建設によって閉鎖度を高めた海域が多数みられる。このような海域では、陸域から負荷が蓄積されやすく、植物プランクトンの過剰な増殖を招き、その結果、透明度の低下や底層の貧酸素化などの環境問題が生じている。

底層の貧酸素化の直接的な要因は、枯死した植物プランクトンを含む懸濁物の沈降過程や堆積後の底泥の分解過程などによるところが大きいものの、海域毎にその過程や貧酸素化への寄与は異なる(柳, 2004)。特に港湾のような都市近郊の海域では、陸域からの負荷を直接受け止めるために、栄養度の違いに起因して植物プランクトンの生産活性から沈降堆積過程への影響は顕著に異なると予想される。

本研究では、紀伊水道に面した徳島県小松島港沖洲地区(以下、小松島港)と大阪湾の最も奥部に位置する兵庫県尼崎港(以下、尼崎港)での現地調査によって、富栄養海域の小松島港と過栄養海域の尼崎港との違いについて考察を行った。本研究の特徴は、①栄養階級の異なる港湾での懸濁物の沈降堆積過程を比較し相違点を抽出した点、②この過程での酸素消費量から物質循環を推定した点にある。

### 2. 現地調査の概要

#### (1) 調査地域

富栄養海域の小松島港は、徳島県小松島港沖洲地区は

徳島市の中心部を流れる新町川と一級河川の吉野川との河口域に囲まれた海域である(図-1)。大潮時には約2mの潮位差があり、水深は平均潮位時に約5mとなる。また、比較的懸濁物濃度の高い閉鎖的な海域であり、夏季には透明度が著しく低下し、海底には生物の死骸やデトリタスが堆積している(倉田ら, 2004)。夏季の底層でのDOは2mg/l程度まで低下し、3.5mg/l以下の貧酸素化は約3ヶ月継続する(三好ら, 2006)。なお船舶の航跡波を除いて非常に静穏な海域である。

過栄養海域である尼崎港は、非常に狭い湾口を持つ閉鎖的な港湾(図-2)で、大型船による航跡波を除いて静穏である。夏季の底層は無酸素状態に達することもあり、慢性的な貧酸素化は約5ヶ月間継続する(三好ら, 2007)。そのため生物の多様性は劣化しており、極度に偏った生物相が形成されている(三好ら, 2004)。

#### (2) 調査方法

両港湾において、2003年7月から9月と2004年8、9月(小松島港:計5回, 尼崎港:計2回)に水質、一次生産、懸濁物、沈降物および堆積物を対象に調査を行った。水質

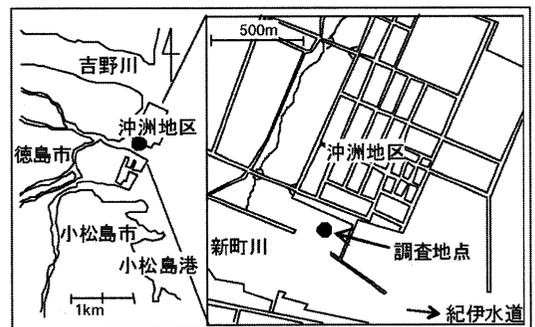


図-1 徳島県小松島港沖洲地区の観測地点

- |              |                           |
|--------------|---------------------------|
| 1 正 会 員 博(工) | (独法)産業技術総合研究所             |
| 2 正 会 員 博(工) | 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部 教授 |
| 3 正 会 員 博(理) | 島根大学 汽水域研究センター 准教授        |

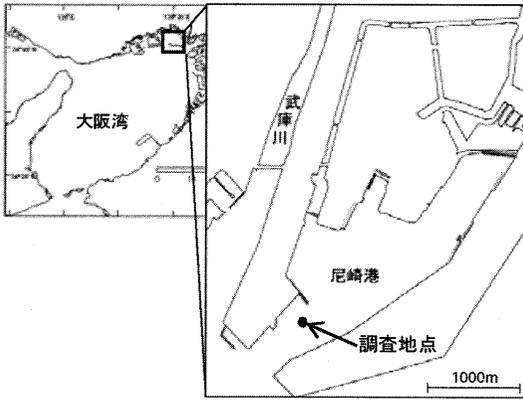


図-2 兵庫県尼崎港の調査地点

は、水質計 (HORIBA, U-10) を用いて、水温、塩分および DO の測定を行った。また採水サンプルは、あらかじめ焼却処理 (500°C, 2 時間) した GF/F で吸引ろ過し懸濁物量 (SS) を測定した。乾燥後の試料は、酸処理を行った後、懸濁態有機炭素 (POC)、懸濁態窒素 (PN) を CN コーダ (Thermo Finnigan, NC Soil Analyzer) を用いて分析した。一次生産量は、明暗瓶法に従って水深 0.5, 1.5, 3.5m の 3 水深に DO 瓶を垂下し、8~9 時間程度設置した後、実験室に持ち帰りウィンクラー法に準じ DO を測定し、一次生産量を算出した。なお、炭素生産量は光合成商を 1 とし算出した。沈降物は、セジメントトラップ (口径 82 mm, 高さ 255 mm) を用いて港内で約 24 時間設置し、捕集した。捕集した沈降物は、1500rpm で遠心分離し乾燥重量を測定した。また、得られ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<sub>2</sub> UPTESTER (TAITEC, 6C) を用いて暗条件下で攪拌を行いながら測定した。また、乾燥後の試料は 1N 塩酸を用いて酸処理を行った後に、懸濁態有機炭素 (POC)、懸濁態窒素 (PN) を CN コーダ (Thermo Finnigan, NC Soil Analyzer) を用いて分析した。堆積物は、シリンジを用い

て採取し、表層から 0~5mm を切り取り試料とした。採取した試料は沈降物と同様の方法で、酸素消費速度、POC、PN について分析を行った。

### 3. 結果および考察

#### (1) 水質の鉛直分布

図-3 に小松島港と尼崎港での水質の鉛直分布を示す。尼崎港は小松島港に比較して、表層付近で DO が高い傾向を示すが、D.L. ±0.0~1.0m の間で急激に DO が低下し、それ以深は海底まで緩やかに低下していた。また  $\sigma_t$  については、尼崎港で D.L. -1.0m 付近において急激に変化していた。尼崎港での水温と塩分の鉛直分布からは、D.L. ±0.0~1.0m の間で塩分成層がみられるものの、水温は表層から海底まで緩やかに変化していることから、塩分変化の影響によって密度成層が形成されていると考えられた。これに対して小松島港では、水温、塩分ともに緩やかな変化を示していることから、尼崎港は小松島港に比較して、成層がより発達しやすい水域であることがわかる。

#### (2) 懸濁物の性状と一次生産量

懸濁物、沈降物および堆積物の分析によって得られた各物質の有機物濃度と C/N を図-4 に示す。懸濁物の POC は、小松島港で平均  $91.5 \pm 11.5 \text{ mgC/dry g}$ 、尼崎港では平均  $212.7 \pm 2.6 \text{ mgC/dry g}$  と小松島港に比較して約 2.3 倍高かった (t-test,  $P < 0.01$ )。PN についても、小松島港 ( $11.6 \pm 1.2 \text{ mgN/dry g}$ ) に比較して尼崎港は  $43.1 \pm 1.2 \text{ mgN/dry g}$  と約 3.7 倍高かった (t-test,  $P < 0.01$ )。大阪湾の主要植物プランクトンの一種であるヘテロシグマ (*Heterosigma akashiwo*) の窒素濃度は、 $67.5 \text{ mgN/dry g}$  (Yamochi and Abe, 1984)、赤潮を形成する海産珪藻の一種 *Skeletonema costatum* (Tsujiimoto et al., 2006) の窒素濃度は  $64.6 \text{ mgN/dry g}$  (眞鍋, 1989) といずれも尼崎港での懸濁物の PN よりも高いことから、尼崎港の懸濁物の有機物成分は、小松島港に比較して植物プランクトン由来の有機物が多く含まれていると考えられる。また小松島港の懸濁物 C/N 比は

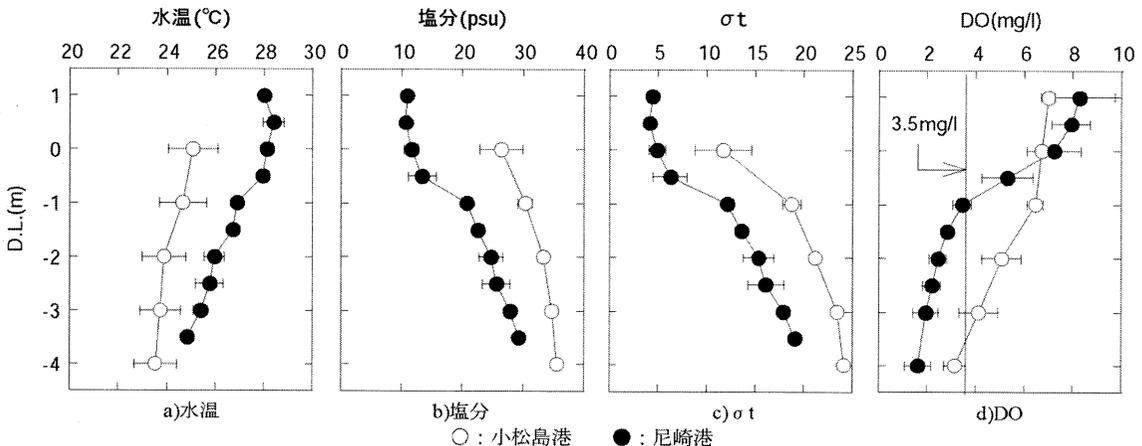


図-3 水温、塩分、 $\sigma_t$  および DO の鉛直分布

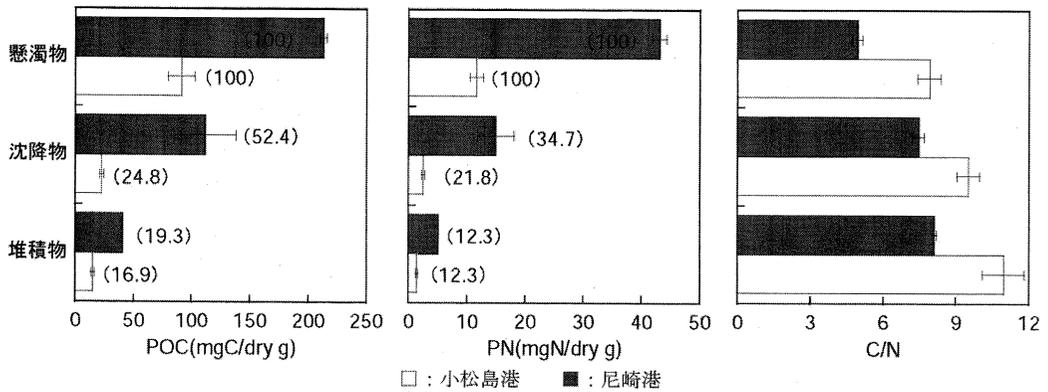


図-4 懸濁物の沈降堆積過程における POC, PN および C/N の変化  
括弧内の数値はそれぞれの懸濁物の有機物濃度を100とした場合の値(%)を示す

7.9±0.5であったのに対して、尼崎港では4.9±0.2とレッドフィールド比 (C:N=5.68:1重量比) に近く、さらに一次生産量は、小松島港 (平均1.8gC/m<sup>2</sup>/day) に比較して、尼崎港では約6.4倍の11.5gC/m<sup>2</sup>/day と非常に高かったことから、尼崎港では、小松島港よりも懸濁物に占める植物プランクトンの割合は高いと推察される。

(3) 沈降物の性状と海底への有機物負荷量

懸濁物から沈降物への有機物濃度の変化は、懸濁物の POC を100とした場合、小松島港での沈降物のそれは約24.8%に減少しており、その濃度は22.7±1.7mgC/dry gであった (図-4)。尼崎港での沈降物の POC は、111.5±26.3 mgC/dry g と小松島港よりも高かった (t-test, P<0.01) ももの、懸濁物のその約52.4%に減少していた。また C/N は小松島港で9.5±0.5、尼崎港では7.5±0.2と小松島港に比較して低いことから、尼崎港では、未分解の有機物をより多く含んだ懸濁物が沈降していると推測された。一般に有機物濃度に比例しバクテリアの増殖活性やそれに伴う酸素消費速度は高くなることが知られており、図-5 に示す沈降物の POC と酸素消費速度との関係から、尼崎港では、小松島港の約12倍もの酸素消費活性の高い物質が沈降していることがわかる。

一方、尼崎港の沈降物量は25.8±10.9g/m<sup>2</sup>/day と小松島港 (96.0±12.8g/m<sup>2</sup>/day) に比較して有意に小さく (t-test, P<0.01)、1/4程度であった (図-6)。小松島港は吉野川と新町川に囲まれた地区で、河川由来の粒子が多く含まれていると考えられ、また小規模な港湾地区で静穏であることなどが沈降物量を増大させる要因であると考えられる。これに対して尼崎港は、陸域から流入する大きな河川が無く、下水処理排水が主な流入源であることも相まって、ここでの沈降物量は小松島港よりも小さくなったと考えられる。しかしながら、沈降物量に POC を乗じて求めた POC Flux は、尼崎港で2.9±1.1gC/m<sup>2</sup>/day 生じており、小松島港 (2.0±0.3gC/m<sup>2</sup>/day) に比較して海底への有機物負荷は約1.4倍大きい値を示した (t-test, P<0.05)。したがって懸

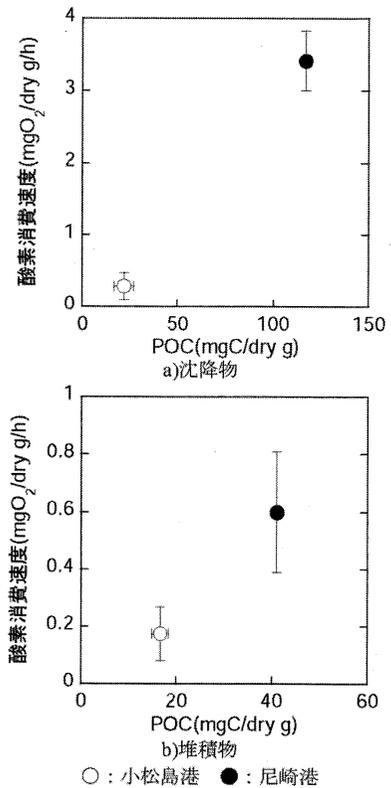


図-6 伊勢湾・三河湾・外洋間の海水交換量

濁物の成分の違いに起因し、尼崎港では、小松島港よりも酸素消費活性の高い物質がより多く沈降していることがわかった。

(4) 堆積物の性状

堆積物の有機物濃度は、小松島港での POC 15.5±1.3 mgC/dry g に比較して、尼崎港のそれは41.0±0.2mgC/dry g と約2.6倍高く (t-test, P<0.01)、またそれぞれ港湾での分解割合は、小松島港で約16.9%、尼崎港で19.3%であ

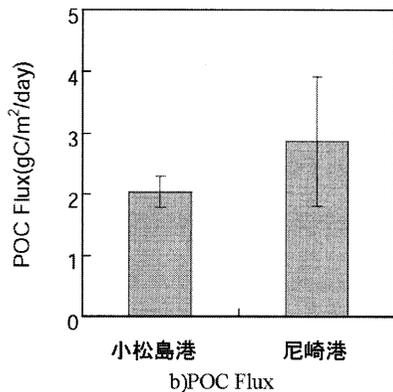
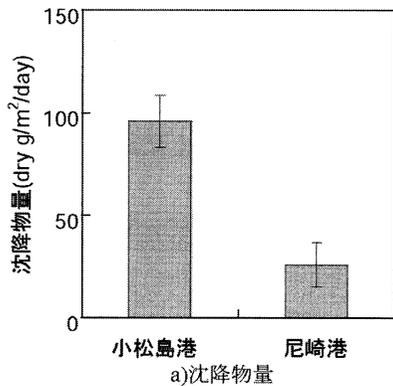


図-6 沈降物質と POC Flux

た(図-4)。PNについても、小松島港 ( $1.4 \pm 0.2 \text{ mgN/dry g}$ ) に比較して尼崎港は  $5.1 \pm 0.1 \text{ mgN/dry g}$  と約3.6倍高かった (t-test,  $P < 0.01$ )。C/Nについては、小松島港で  $11.0 \pm 0.9$ 、尼崎港では  $8.1 \pm 0.1$  であったことから、小松島港に比較して尼崎港の堆積物は、海底に到達してもなお分解の進行していない有機物を多く含んでいることがわかった。さらに図-5に示す堆積物の POC と酸素消費速度との関係から、尼崎港では小松島港よりも、約3.4倍酸素消費活性の高い物質が堆積していることがわかった。

##### (5) 単位面積あたりの酸素消費量

これまで述べた結果を用いて単位面積あたりの水柱で消費される酸素消費量を推算した。懸濁物を含む海水の酸素消費量は、一次生産量調査時の暗瓶の酸素消費量を用いた。また沈降物については、それが海底に至るまでの間の沈降過程で酸素が消費されることを考慮して、単位面積あたりの沈降物の酸素消費量を式(1)によって算出した。

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

ここで、 $\alpha$  : SS Flux dry g/m²/day,  $\beta$  : 沈降物の酸素消費速度 gO<sub>2</sub>/dry g/day,  $h$  : 平均水深 = 5m,  $v$  : 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(細川ら, 1982)。堆積

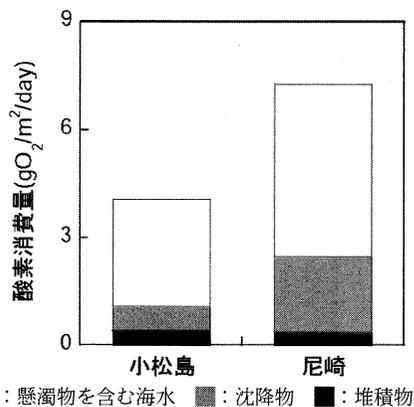


図-7 単位面積あたりの酸素消費量

物については沈降物量を新生堆積物量とみなし、それに堆積物の酸素消費速度を乗じて推算した。

その結果、単位面積あたりの水柱の酸素消費量は、小松島港 ( $4.1 \text{ gO}_2\text{/m}^2\text{/day}$ ) に対して、尼崎港では  $7.3 \text{ gO}_2\text{/m}^2\text{/day}$  の酸素が消費されており、約1.8倍であった(図-7)。また堆積物の酸素消費量は、小松島港で  $0.4 \text{ gO}_2\text{/m}^2\text{/day}$ 、尼崎港で  $0.34 \text{ gO}_2\text{/m}^2\text{/day}$  と両港湾で同程度であったものの、尼崎港での沈降物の酸素消費量は  $2.1 \text{ gO}_2\text{/m}^2\text{/day}$  と、小松島港のそれ ( $0.7 \text{ gO}_2\text{/m}^2\text{/day}$ ) の約3倍生じていた。このことは、尼崎港の底層 DO が無酸素まで低下し、5ヶ月にも渡り貧酸素が継続する要因の一つであると考えられる。

##### (6) 物質循環

小松島港と尼崎港での懸濁物の沈降堆積過程を比較するために、単位面積あたりの炭素循環を算出した。分解の式より炭素 1gC を分解するために必要な酸素量  $2.67 \text{ gO}_2$  を用いて、図-7において求めた沈降物と堆積物の酸素消費量から、それぞれの炭素分解量を推算した。懸濁物現存量については、図-4に示す懸濁物の POC に SS の平均値(小松島港:  $6.2 \text{ mg/l}$ 、尼崎港:  $18.2 \text{ mg/l}$ ) を乗じて水深 5m あたりに換算した。

懸濁物の POC 現存量は、小松島港で  $2.8 \text{ gC/m}^2$ 、尼崎港ではその約6.9倍に相当する  $19.3 \text{ gC/m}^2$  であった(図-8)。そのうち沈降過程での炭素分解量は、小松島港で  $0.30 \text{ gC/m}^2\text{/day}$ 、尼崎港で  $0.79 \text{ gC/m}^2\text{/day}$  と推定され、それぞれ一次生産量の約17%、約7.2%に相当していた。また沈降過程で分解を受けた後に海底に負荷される POC Flux は、一次生産量に対して小松島港で同程度、尼崎港で約26%であった。堆積物の分解については、小松島港で  $0.15 \text{ gC/m}^2\text{/day}$ 、尼崎港で  $0.14 \text{ gC/m}^2\text{/day}$  と海底に負荷される POC Flux に対してそれぞれ7.5%、4.8%とごくわずかであり、都市近郊の港湾では、海底に負荷された有機物のほとんどが分解を受けることなく蓄積される系が形成されていることがわかる。その蓄積量は、小松島港で  $1.85 \text{ gC/m}^2\text{/day}$ 、尼崎港で  $2.76 \text{ gC/m}^2\text{/day}$  と尼崎港は小松島港に比較して、約1.5倍の有機物が継続的に堆積していることがわかった。

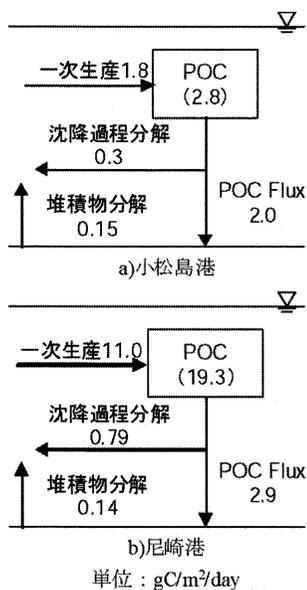


図-8 単位面積あたりの物質循環  
括弧内の数値は単位面積あたりの現存量を示す

以上のことから、富栄養海域の小松島港と過栄養海域の尼崎港とを比較して、懸濁物の有機物成分の違いに起因して、それらの沈降堆積過程での分解特性に相違がみられ、それに伴う物質循環過程が異なることがわかった。

#### 4. 結 論

本研究では、栄養階級の異なる港湾での有機物の生産から沈降、堆積過程を比較し、それぞれの過程の酸素消費量の違いから港湾の貧酸素化に及ぼす影響について考察を行った。以下に得られた主要な結果を要約する。

- 1) 尼崎港は、D.L.  $\pm 0.0 \sim 1.0\text{m}$  の間で急激に DO が低下し、また  $\sigma_t$  についても、同様に D.L.  $-1.0\text{m}$  付近において急激に変化していたことから、成層がより発達しやすい水域であることがわかった。
- 2) 尼崎港での懸濁物の有機物濃度と一次生産量は、小松島港に比較して高く C/N はレッドフィールド比に近いことから、懸濁物に占める植物プランクトンの割合は高いと推察された。
- 3) 尼崎港の沈降物は、小松島港よりも有機物濃度、酸素消費速度および POC Flux が高く、C/N が低いことから未分解の有機物を多く含む物質が沈降していることが分かった。
- 4) 尼崎港の堆積物は、沈降物と同様に小松島港よりも有機物濃度が高く、C/N は低いことから、海底に到達してもなお分解の進行していない有機物を多く含み、また約3.4倍もの酸素消費活性の高い物質が堆積して

いることがわかった。

- 5) 単位面積あたりの堆積物の酸素消費量は、小松島港で  $0.4\text{gO}_2/\text{m}^2/\text{day}$ 、尼崎港で  $0.34\text{gO}_2/\text{m}^2/\text{day}$  と両港湾で同程度であったものの、尼崎港での沈降物の酸素消費量は  $2.1\text{gO}_2/\text{m}^2/\text{day}$  と、小松島港のそれ ( $0.7\text{gO}_2/\text{m}^2/\text{day}$ ) の約3倍生じていた。
- 6) 沈降堆積過程で分解を受けることなく蓄積する堆積物量は、小松島港で  $1.85\text{gC}/\text{m}^2/\text{day}$ 、尼崎港で  $2.76\text{gC}/\text{m}^2/\text{day}$  と尼崎港は小松島港に比較して、約1.5倍の有機物が海底に負荷されていた。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、小松島港の調査では、徳島大学工学部建設工学科水口教授、国土交通省四国地方整備局高松港湾空港技術調査事務所、小松島港湾空港工事事務所の皆様、株式会社エコーの岩村俊平氏、北野倫生氏、山本秀一氏に多大な協力を頂いた。尼崎港の調査は、環境省の補助による環境技術開発等推進事業〔実用化研究開発課題〕閉鎖性海域における最適環境修復技術のパッケージ化（平成13～15年度）の一部として行われ、上嶋英機教授（広島工業大学）には研究を進めるにあたって有意義な助言を多々頂いた。ここに記して心より感謝する。

#### 参 考 文 献

倉田健吾・上月康則・村上仁士・水谷雅裕・森正次・北野倫生・岩村俊平（2004）：港湾における生態系の環境修復～徳島県小松島港で行われた実証実験を例に～，土木学会論文集，No.755/VII-30，pp.95-104.

細川恭史・堀江毅・三好英一・加藤道康（1982）：沿岸域におけるけん濁粒子の沈降速度測定法について一数種の測定法の比較一，港湾技研資料，No.433，pp.3-26.

眞鍋武彦（1989）：海産珪藻 *Skeletonema costatum* 元素組成とそれから導かれる理論組成式，日本プランクトン学会誌，第36巻，第1号，pp.43-46.

三好順也・上月康則・森正次・亀田大悟・矢間北斗・倉田健吾・村上仁士（2004）：岸壁付帯式テラス型海岸構造物によるムラサキガイ由来の汚濁負荷削減効果，海洋開発論文集，Vol.20，pp.1061-1066.

三好順也・上月康則・倉田健吾・村上仁士・野田敏・岩村俊平（2006）：港湾環境に及ぼす直立壁面の付着性二枚貝の影響に関する考察，海岸工学論文集，第53巻，pp.1116-1120.

三好順也・上月康則・村上仁士（2007）：大阪湾奥部における自律的環境修復を促す護岸付帯式海岸構造物の機能評価，日本水学会誌，Vol.61，No.6，pp.331-336.

柳哲雄（2004）：貧酸素水塊の生成・維持・変動・消滅機構と化学・生物的影響，海の研究，13（5），pp.451-460.

Tsujimoto, A., R. Nomura, M. Yasuhara, H. Yamazaki and S. Yoshikawa（2006）：Impact of eutrophication on shallow marine benthic foraminifers over the last 150 years in Osaka Bay, Japan, *Marine Micropaleontology*, 60, pp.258-268.

Yamochi, S. and T. Abe（1984）：Mechanisms to initiate a *Heterosigma akashiwo* red tide in Osaka Bay II. Diel vertical migration, *Marine Biology*, 83, pp.255-261.