

大阪湾奥部沿岸域における懸濁態物質の挙動と底泥特性

西田修三¹・入江政安²・中辻啓二³

閉鎖性水域の懸濁態物質は溶存態に比して時空間的にその濃度が大きく変動し、水域への環境インパクトが極めて大きい。大阪湾奥部においても、河川から流入した有機物や内部生産による懸濁態物質が大量に堆積し、水質汚濁の原因となっている。本研究では、大阪湾奥部において底質調査と沈降物調査を実施し、湾奥部の底泥特性に及ぼす懸濁態物質の影響について解析を行った。その結果、陸起源有機物の影響は河道部と沿岸数 km の範囲に限られ、沖合に堆積している有機物のほとんどが内部生産によるものであることがわかった。また、沈降フラックスの算定値を基に、溶出と脱窒を考慮した堆積量の見積りも行い、底泥の栄養塩収支を明らかにした。

1. はじめに

内湾沿岸域に形成される生態系は、濁水や赤潮など懸濁態物質の影響を顕著に受ける。そのため、沿岸開発の影響評価や漁場造成の適地決定には、精度の高い濁質の挙動予測が必要とされる。さらに、閉鎖性が強い水域では、沈降性を有する懸濁物は物質循環に重要な役割を果たし、水域全体の環境動態に大きな影響を及ぼしている。

これまで、栄養塩の動態に関する観測や実験データを基に、種々の水質予測モデルが提案されてきた。そして、溶存態物質の動態に関しては、比較的良好な予測が可能になってきた。しかし、懸濁態物質の動態については、生物化学過程に加え物理過程が大きく作用し、より複雑な挙動を示すため、精度の高い予測は難しい。また、懸濁態物質の動態を支配する素過程（沈降、堆積、分解、吸脱着、再浮上）に関する実験的研究も進められてきたが、流れのスケールが大きく異なる上に、強い非定常性を有する実水域への適用には未だ課題が多い。

沿岸域の懸濁態物質の挙動のうち、沈降過程については早くから研究が行われている。沈降速度測定法に関しては細川ら（1982）が研究開発を行い、堀江ら（1986）により大阪湾をはじめとする閉鎖性水域での微細懸濁物の沈降速度に関する報告がなされている。この方法を用いた最近の研究例としては、広島湾奥部で行われた佐々倉ら（2005）の研究が挙げられる。異なる堆積速度の算定方法としては、松本・横田（1978）や星加ら（1994）、川西・田原（2004）等の研究がある。

閉鎖性水域の懸濁態物質は溶存態に比して時空間的にその濃度が大きく変動し、水域への環境インパクトが極めて大きい。そのため、懸濁態物質の挙動を明らかにし、その動態をより的確にモデル化することにより、水質予

測の精度を格段に向上させることができる。大阪湾奥部においても、淀川等の河川から流入した有機物や内部生産による懸濁態物質が大量に堆積している。海底に堆積した有機物は分解され、再び海中に溶出し、これが大阪湾奥部の水質汚濁の原因ともなっている。そこで本研究では、淀川河口域を含む大阪湾奥部において現地調査を実施し、懸濁態物質の挙動を明らかにし、底泥特性に及ぼす懸濁態物質の影響について解析を行う。

2. 調査分析方法

（1）湾奥部底質調査

2004 年 12 月 6 日～9 日に大阪湾奥部を対象とした底質調査を実施した。観測点を図-1 に示す。観測点は湾内への主な流入負荷源と考えられる淀川と武庫川の河口（潮止め堰下流）、尼崎西宮芦屋港と神戸港の港内、およびその沖合の領域、計 36 点である。KK 式採泥器を用い、調査船上から底泥を採取し、底泥表層（0～5 cm）を対象に分析を行った。分析項目は同位体比（ $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ ）、含水比、強熱減量、TOC、COD、T-N、T-P である。

なお、この観測の直前の 12 月 4 日、5 日にはそれぞれ、降水量 36 mm、17 mm の降雨があった。

（2）沈降物・沈降速度調査

2005 年 9 月 19、21 日において、大阪湾北部港湾域を対象に水質・底質の調査を実施した。観測点は図-1 に示す C1～C4 の 4 点で、尼崎西宮芦屋港内に C1、神戸港東部海域に C2、港外代表点として西宮防波堤沖に C3、淀川の河口に C4 を設定した。観測地点の水深は、それぞれ 10.5 m、12.8 m、14.3 m、9.5 m である。

沈降物の調査にあたっては、広口型捕集瓶（口径 8.3 cm、深さ 24 cm）を 6 本束ねてサンプラーとし、2 昼夜設置した。設置水深は C1、C2、C3 では海面下 3 m、1/2 水深、海底面上 3 m の 3 層、C4 については海底面上 3 m の 1 層のみとした。採取されたサンプルについて強熱減量、SS、COD、T-N、I-N、T-P、I-P の 7 項目の分析を行った。

1 正会員 工博 大阪大学大学院助教授 地球総合工学専攻
2 正会員 博(工) 大阪大学大学院助手 地球総合工学専攻
3 フェロー 工博 大阪大学大学院教授 地球総合工学専攻

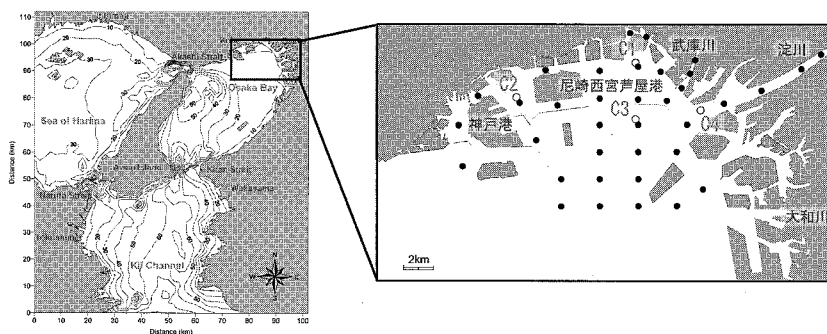


図-1 現地観測地点

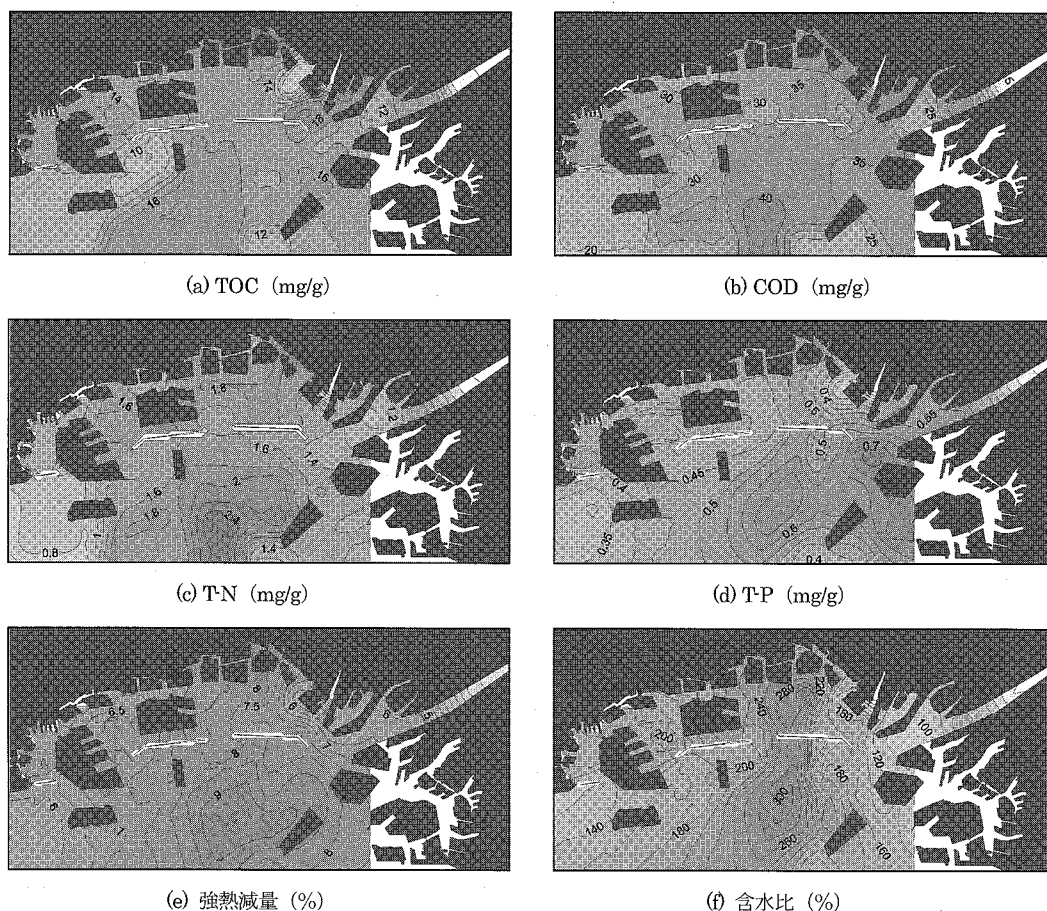


図-2 各底質項目の水平分布

(3) 底質・脱窒速度・分解速度調査

沈降物調査と同時期同地点で不攪乱柱状泥（直径 20 cm）を採取し、底質の分析を行った。採取したコアサンプルは 0～5 cm、5～10 cm、10～15 cm の 3 層に分割し、各層における含水比、単位体積重量、T-N、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、T-P、I-P を分析した。また、別途採取した不攪乱柱状泥（直径 10 cm）を用いてアセチレン法による脱窒

実験を行った。現場水温を維持して、実験開始から 0、0.5、1、2、4 時間後の計 5 回、実験装置内の直上水の $\text{NO}_2\text{-N}$ 濃度を測定した。実験開始前と終了後には、間隙水中（3 層：0～2、2～4、4～6 cm）の $\text{NO}_2\text{-N}$ も分析した。

さらに、上記底質調査において採取した不攪乱柱状泥を用いて、分解速度の実験も行った。現場水温を維持し

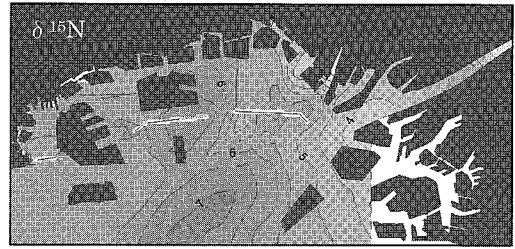
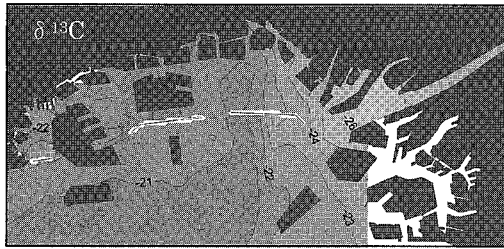


図-3 炭素と窒素の安定同位体比 (‰)

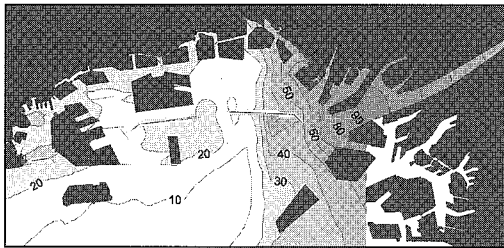


図-4 陸起源有機物の堆積割合 (%)

表-1 底泥表層(0~5 cm)における有機態分解速度

	C1	C2	C3	C4
O-P	0.75	1.21	0.23	0.86
O-N	3.95	4.95	1.33	5.34

(μg/g/day)

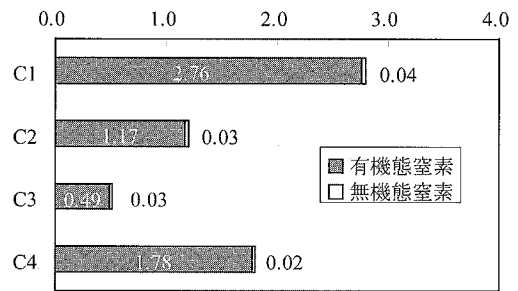
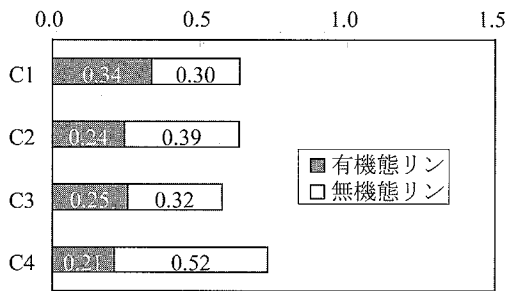


図-5 底泥表層 (0~5cm) における堆積量 (左:リン, 右:窒素)

て、実験開始から0, 2, 5, 10日後の計4回、実験装置内の間隙水中のI-PおよびNH₄-Nの分析を行った。

3. 調査結果

(1) 底泥特性と安定同位体比分析

湾奥部36測点(図-1の黒丸)の底質分析によって得られた、底泥表層のTOC, COD, T-N, T-P, 強熱減量, 含水比の平面分布を図-2に示す。分布形状は似た形状を示し、港外の西宮防波堤沖でいずれも極大値を有している。含水比が300%を超え有機物量が多いことから、かなり有機汚濁が進んでいることがわかる。この有機物の堆積には、底層を湾奥に向かうエスチュアリー循環流も大きく関わっているものと推察される。

淀川河口部と防波堤内の港域においても相対的に高い値を示しており、特にT-Pは淀川や大和川の河口周辺部で高濃度を示し、陸域からのリン供給も多いことが窺える。

炭素と窒素の安定同位体比の平面分布を図-3に示す。また、各地点のδ¹³Cより陸起源有機物(27%)と海起

源有機物(20%)の混合比(吉岡, 1997)を算定し、それを陸起源有機物の堆積割合と考えて図示したのが図-4である。この結果を見ると、陸起源有機物の影響域は淀川河道部と沿岸数kmの範囲に限られ、ほとんどの陸起源有機物がこの領域で沈降堆積しているものと考えられる。図-2に示した底質特性と比較すると、西宮防波堤沖に堆積している有機物は、そのほとんどが内部生産によるものであることがわかる。

図-5は底泥表層のリンおよび窒素の組成を示したものである。表層の有機態の量はリンよりも窒素の方が測点間のばらつきが大きい。また、河口部のC4のO-P/T-P比が他の点に比べて小さいことがわかる。表-1に「有機態のリンと窒素」の分解速度を示す。有機態の堆積量と分解速度に明確な相関はみられない。有機態堆積量の多いC1で分解速度が大きくないのは特徴的である。内部生産による沈降物の多いC3では、窒素・リンともに分解速度が他点に比べて小さくなっているが、O-P/T-P比をみるとC1, C2と比べて大きな違いは認めら

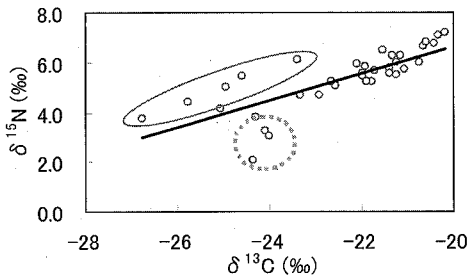


図-6 炭素と窒素の安定同位体比

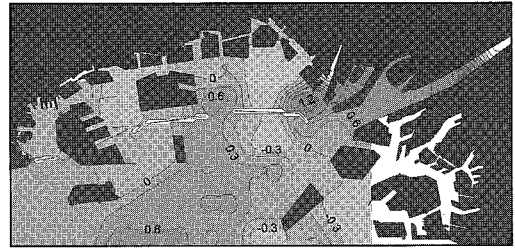


図-7 δ¹⁵N の偏差量分布

表-2 沈降速度

項目	層	C1	C2	C3	C4
SS	海面下 3 m	—	23	1	—
	1/2 水深	74	115	111	—
	海底面上 3 m	129	643	382	175
	海面下 3 m	—	23	1	—
VSS	1/2 水深	51	52	89	—
	海底面上 3 m	96	322	297	7
	海面下 3 m	9.9	1.9	—	—
	1/2 水深	27.8	48.3	72.0	—
PN	海底面上 3 m	24.5	84.0	875.7	—
	海面下 3 m	1.3	21.9	8.5	—
	1/2 水深	42.8	110.1	76.3	—
	海底面上 3 m	79.1	182.0	542.6	31.2

(cm/day)

表-4 窒素収支(堆積が正)

	C1	C2	C3	C4
N 堆積速度	22.7	8.8	43.7	12.7
I-N 溶出速度	20.5	23.8	21.2	28.3
脱窒速度	2.0	2.0	3.7	4.2
N 収支	0.2	-17.0	18.7	-19.8

(mg/m²/day)

れない。

図-6 に $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ の関係を示す。両者は良い直線関係にあり、起源の推定が十分可能であることがわかる。一般に $\delta^{15}\text{N}$ は、脱窒や廃水の流入によっても高い値を示す。そこで、調査水域での相対的な脱窒活性を、図-6 の近似直線からの $\delta^{15}\text{N}$ の偏差量で推定してみた。図-7 に偏差量の分布を示す。淀川河口などでは $\delta^{15}\text{N}$ が高い値を示していることから(図-6 の実線で囲まれたデータ)、この水域では脱窒が活発に生じていることが予想される。一方、淀川および武庫川の上流側観測点では、他の観測点に比べて $\delta^{15}\text{N}$ の値が低く(図-6 の点線で囲まれたデータ)、相対的に脱窒が小さいことが予想される。

(2) 沈降フラックス

観測点 C1~C4 に設置したサンプラーにより採取された沈降物の分析結果を基に、沈降速度と沈降フラックスを

表-3 沈降フラックス

項目	層	C1	C2	C3	C4
SS	海面下 3 m	—	591	45	—
	1/2 水深	1,183	2,479	2,388	—
	海底面上 3 m	1,547	11,260	9,166	4,026
	海面下 3 m	—	341	23	—
VSS	1/2 水深	432	523	887	—
	海底面上 3 m	478	1,933	2,820	68
	海面下 3 m	11.4	2.3	—	—
	1/2 水深	25.0	38.7	43.2	—
PN	海底面上 3 m	15.9	54.6	175.1	—
	海面下 3 m	0.2	3.0	1.8	—
	1/2 水深	3.6	10.5	11.8	—
	海底面上 3 m	9.1	27.3	38.0	5.5

(mg/m²/day)

表-5 リン収支(堆積が正)

	C1	C2	C3	C4
P 堆積速度	4.2	5.1	8.3	6.4
I-P 溶出速度	3.5	1.7	6.5	12.7
P 収支	0.7	3.4	1.8	-6.3

(mg/m²/day)

算定した。細川ら(1986)の沈降速度算定式を参考に、観測前後の水質平均値を用いた次式を使用した。

$$w = \frac{F}{C_m} = \frac{R - C_0 \cdot V}{ATC_m} \quad (1)$$

ここで、 F : 沈降フラックス (mg/m²/day), R : 捕集筒内の懸濁態の量 (mg/g-SS), C_0 : 設置時の周囲水中の懸濁態濃度 (mg/L), C_m : 設置時と回収時の周囲水中の平均懸濁態濃度 (mg/L), V : 捕集筒容積 (m³), A : 捕集筒開口面積 (m²), T : 捕集時間 (day) である。

得られた沈降速度と沈降フラックスを表-2と表-3に示す。すべての観測点において、沈降速度と沈降フラックスは水深方向に増大している。これは、凝集効果によるものと考えられるが、C2やC3の底層における急増は巻き上げの影響による可能性も否定できない。観測前後に測定された濁度分布からは、巻き上げによる底層部での濁度の顕著な上昇は見られず、また、観測期間中の風況も平均風速 3 m/s 以下、最大風速 6 m/s 程度であ

った。

有機物が多く堆積していた沖合の観測点 C3 では、VSS の沈降フラックスが他点より大きく、プランクトン性の懸濁物の堆積が多いものと考えられる。

得られた沈降速度を基に、表層懸濁物の海底へのおおよその沈降時間を求めると、C1~C4 それぞれで 16 日、5 日、9 日、7 日と得られ、懸濁物の沈降堆積にはかなりの時間を要する結果となった。特に C1 において沈降に長時間を要する結果となったのは、表層における沈降速度がきわめて低く得られたことによる。

(3) 底泥の栄養塩収支

下層の沈降速度を用い、さらに N と P については沈降に伴う分解を考慮して、SS, N, P の海底面への堆積フラックスを算定してみた。C2 と C3 については再懸濁の影響が考えられるため、中層の沈降速度を採用した。その結果を堆積速度として表-4、表-5 に示す。P の分解速度に関しては、大阪湾奥部の試料をもとに得られた実験式(堀江ら, 1986)より決定し、N については既往の観測資料を参考に 0.040/日と与えた。

表には、各地点で採取された底泥の溶出および脱窒実験によって得られた放出フラックス、さらにこれらの総和としての収支も示している。C3 では窒素の堆積速度が大きいため、他の地点と異なり堆積傾向を示している。また、淀川河口部 C4 では窒素・リンともに堆積傾向はみられないが、今回の観測が平水時の観測であったことと、前述の陸起源有機物の堆積分布から考えると、出水時に大きな堆積が生じているものと推察される。

脱窒速度に関しては、堆積速度の約 10~20 % を示し、無視できない量であることがわかる。特に淀川河口部の C4 では特に大きな値を示しており、図-7 の結果とも一致した傾向にある。脱窒量は還元環境下では硝酸態の濃度に依存し、湾奥部ではこの硝酸態の濃度が大きく変動するため、脱窒量も大きく変動しているものと考えられる。筆者等が 2000 年 8 月に実施した観測結果(韓ら, 2005)では、C1 付近で約 15 mg/m²/day, C3 付近で約 6 mg/m²/day の値を示し、今回の調査結果に比して大きな値が得られている。

4. おわりに

本研究では、大阪湾奥部において懸濁態物質に着目した現地調査を実施し、その挙動と底泥特性に及ぼす影響について解析を行った。得られた主たる結果は以下の通りである。

- (1) 底泥の TOC, COD, T-N, T-P, 強熱減量, 含水比の平面分布は似た形状を示し、港外の沖合で最も高い値を示した。
- (2) 安定同位体比を基に陸起源有機物の堆積状況を調べた

結果、その影響域は淀川河道部と沿岸数 km の範囲に限られ、ほとんどの有機物がこの領域で沈降堆積するものと考えられる。

- (3) C1~C4 すべての観測点において、沈降速度と沈降フラックスは水深方向に増大しており、凝集効果によるものと考えられる。
- (4) $\delta^{15}\text{N}$ から脱窒活性を推定した結果、淀川河口などで脱窒が活発に生じ、淀川および武庫川の河道上流側では相対的に脱窒は小さいことが予想される。
- (5) 有機物が比較的多く堆積していた沖合の観測点 C3 では、VSS の沈降フラックスが他点に比して大きく、プランクトン性の懸濁物が多く堆積していることが予想され、底質分析結果と一致した傾向を示した。
- (6) 内部生産による沈降物の多い C3 で窒素・リンともに分解速度が他点に比べて小さな値を示したが、O-P/T-P 比は C1, C2 と比べ大きな違いは認められなかった。一方、河口部の C4 では O-P/T-P 比が他点に比して小さいという特性を有していた。
- (7) 窒素とリンの海水-底泥間の収支を算定したところ、C3 では窒素が堆積傾向を示し、淀川河口部では窒素・リンともに堆積傾向はみられなかった。河口域では出水時に大きな堆積が生じているものと推察される。

謝辞：本研究の一部は、科学研究費補助金・基盤研究(C) (No.16560447, 代表者 西田修三)により行われた。現地観測においては、国土交通省神戸技術調査事務所のご高配とご協力を頂いた。また、本研究室学生の木村瑛君と窪田勇輝君にはデータ分析に助力を頂いた。記して謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 川西澄・田原敏博(2003)：内湾の海底境界層に存在するフロック沈降速度の現地測定, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.956-960.
- 佐々倉諭・日比野忠史・高御堂良治・村上和男・松本英雄(2005)：広島湾奥域における有機懸濁物質の沈降特性, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp.911-915.
- 韓銅珍・中辻啓二・西田修三(2005)：閉鎖性内湾の底泥特性と水質・底質の相互作用について, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp.966-970.
- 星加章・谷本照巳・三島康史(1994)：大阪湾における懸濁粒子の堆積過程, 海の研究, 第 3 巻, pp.419-425.
- 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, 港湾技術研究資料, No.433, 26p.
- 堀江毅・三好英一・関根好幸・宮原祐二(1986)：微細有機懸濁物の沈降特性について, 海岸工学講演会論文集, 第 33 巻, pp.337-341.
- 松本英二・横田節哉(1978)：大阪湾底泥の堆積速度と重金属汚染, 日本海洋学会誌, Vol.34, pp.108-115.
- 吉岡崇仁(1997)：有機物の一次生産と分解過程における安定同位体比の変動, 水環境学会誌, Vol.20, pp.192-195.