

大阪湾阪南港の浚渫窪地における底質環境に関する調査研究

Study of Sediment Quality at Dredged Hollow Places in Port of Han-nan, Osaka Bay

入江政安¹・中辻啓二²・寺中恭介³

Masayasu IRIE, Keiji NAKATSUJI and Kyosuke TERANAKA

Laboratory experiments in sediment quality at the hollow places are carried out in the presenting paper. They are designed to have the correct information of sediment in hollow area and to clarify the influence of the sediment on water quality in coastal areas. The sediment qualities in the hollows are much worse than those outside of the hollows, so that the rate of oxygen consumption by the bottom sediment in the hollows is as 2-10 times as that outside of the hollows. The formation rate of inorganic phosphorus and nitrogen in the sea mud and the diffusion rate of inorganic phosphorus and nitrogen to seawater in the hollows are much higher than those outside of hollows. These rates are different between sediments in two hollow places because of sulfide form.

1. はじめに

浚渫窪地とは、海底から土砂を採取することによって形成された地形であり、自然海底に対して局所的に掘り下げられた海底のことである。浚渫窪地の存在は、海底の土砂を掘削したことにより生物の生息・生産の場を喪失しているばかりでなく、貧酸素水塊の発生源として周辺海域に悪影響を与えているとの指摘もある。浚渫窪地がもたらす水質悪化の研究は東京湾で進んでいる。佐々木ら(1996)や八木ら(1997)、五明ら(1998)では東京湾における浚渫窪地の現地観測に基づく研究が行われ、佐々木(1997)では浚渫窪地に適した流動モデルが提案され、解析が行われている。大阪湾では、浚渫窪地を対象とした現地観測や解析はほとんどなされていない。一方、底泥—海水間の栄養塩の拡散や底泥による酸素消費についての研究も多くなされており、大阪湾においては堀江ら(1984)や、大阪府水産試験場(1986)、韓ら(2005)、窪田ら(2006)の研究がある。しかし、いずれも湾奥の貧酸素水塊のある海域を対象とした調査であり、浚渫窪地内外の底質を把握しようとしたものではない。そこで、本研究では、浚渫窪地の底質の把握と底質が水質に及ぼす影響を解明することを目的に、阪南港内の浚渫窪地とその周辺において底質調査を実施し、解析を行う。

2. 調査および分析方法

(1) 調査地点および採泥方法

大阪湾における浚渫窪地は神戸港から阪南港にわたる湾奥部湾湾域に存在する。多くは埋立地直近の沖側にある。深い窪地の中には元の地盤高から12m以上深いもの

もあり、規模は様々である。本研究では、浚渫窪地の多い阪南港の中から、阪南港1区にある中規模のものを選んだ。図-1に対象とした窪地の位置と概要を示す。阪南2区埋立地北にある浚渫窪地は最大水深は約17.5m、規模は南北約1000m、東西約800mであり、周囲との水深差は6~8mである。大津川河口部にある浚渫窪地は最大水深が約17m、約200m四方の小規模なものである。周囲との水深差は5~6mである。図-1に示した調査点のうち、窪地内の調査点として調査点1, 7, 13, 窪地外の調査点として調査点4, 5, 6において試料を採取した。調査点13は浚渫窪地内に位置するが、2002年に浚渫土砂が投入されており、もともとあった底質からは変化しているものと推測される。底土を攪乱しないように透明アクリルパイプ(内径19cm、長さ50cm、ただし、酸素消費速度調査は内径9.3cm、長さ50cm)を用いて、潜水士が海底泥を底面から0.3m以上柱状採取し試料とした。同時に、各地点において海底上1m層の海水を採水した。底泥採取は2006年9月15日に行った。

(2) 底質調査

採取した試料は船上で速やかに0~2cm, 2~5cm, 5~10cm, 10~20cm, 20~30cmの5層に分割し、冷蔵保存した上で分析室に持ち帰った。持ち帰った試料は、層別に土粒子の分析を行い、遠心分離器により抽出した間隙水の分析も同時に行った。各層において、土粒子の分析項目はpH, ORP, T-S, COD_{sed}, T-N, NH₄-N, T-P, I-P, Al-P, Fe-P, Ca-P, 間隙水の分析項目はpH, S²⁻, COD, T-N, NH₄-N, NO₂-N, NO₃-N, T-P, PO₄-Pである。

(3) 生成速度調査

底質調査と同様に採泥し、分割した試料を分析回数分に更に分割し、気相が残らないように密閉し、暗所冷蔵保存する。各層毎に0時間, 1日後, 2日後, 6日後, 10日後に計測を行う。分析時毎に遠心分離器により間隙水を抽出し、間隙水中のNH₄-NおよびPO₄-Pを分析した。

1 正会員 博(工) 大阪大学大学院助教工学研究科地球総合工学専攻
2 フェロー 工博 大阪大学大学院教授工学研究科地球総合工学専攻
3 学生会員 大阪大学工学部地球総合工学科

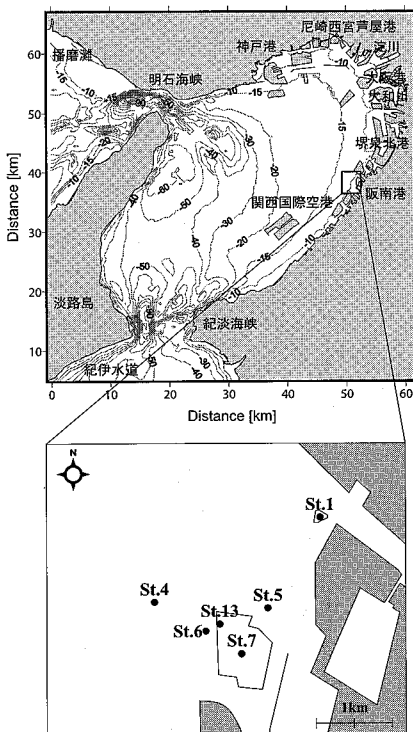


図-1 底泥採取地点

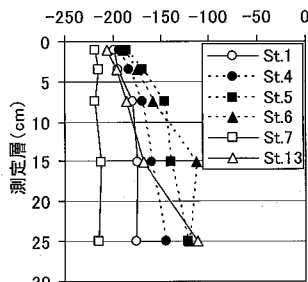


図-2 ORP(mV)の鉛直分布

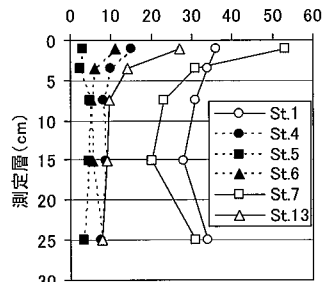
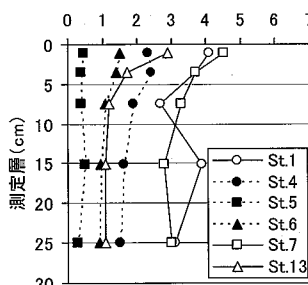
図-3 COD_{sed}(mg/g)の鉛直分布

図-4 T-N(mg/g)の鉛直分布

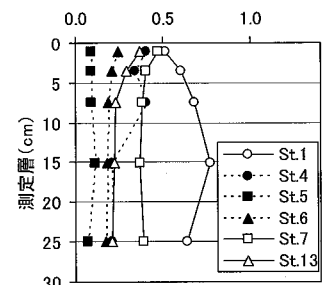


図-5 I-P(mg/g)の鉛直分布

本論文では、経過時間中の $\text{NH}_4\text{-N}$ および $\text{PO}_4\text{-P}$ の増加量をもって生成速度と呼んでいるが、分解された栄養塩の中には、土粒子に吸着するものもある。したがって、ここで求めている速度は、正確には、分解された無機態栄養塩あるいは同粒子に吸着していた無機態栄養塩の間隙水中への脱着速度を算出しており、堀江・細川(1984)で用いられているような分解速度とは異なっている。

(4) 溶出速度調査

持ち帰った試料について、サイフォンを用いてアクリルパイプ(内径 19 cm, 長さ 50 cm)内の直上水を速やかに除去した。その後、アクリルパイプ底部から泥厚 25 cm となるように底泥を抜き取った。現場で採水した海底上 1 m の海水を $1\mu\text{m}$ フィルターでろ過し、直上水として用いカラムを作成した。実験条件は暗条件・現地水温で、底泥中の微生物活性を止めるような作業は行っていない。調査期間は 48 時間とし、調査始後 0, 2, 4, 8, 24, 48 時間後に直上水を採水し、 $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ の測定分析を行った。その期間内の時間あたりの増加量をもって、溶出速度とした。

(5) 酸素消費速度調査

溶出速度調査と同様に、持ち帰った試料から、サイフォンを用いてアクリルパイプ(内径 9.3 cm, 長さ 50 cm)内の直上水の除去、泥厚の調整、海水のろ過を行い、カラムを作成した。底泥中の微生物活性を止めるよ

うな作業は行っていない。アクリルパイプ内の直上水を現場水温で維持し、曝気して直上水を酸素飽和状態とした後、暗条件で調査を開始した。調査は直上水の溶存酸素(DO)濃度が $2\sim 3\text{mg/l}$ 程度となるまで継続し、DO を測定した。DO の測定は直読式溶存酸素計により直接カラム内にセンサーを投入して行った。

3. 結果

(1) 窪地内外の底質

各調査地点における ORP(酸化還元電位)の鉛直分布を図-2 に示す。今回調査を実施した海域は夏季には貧酸素状態となり、特に底層付近においては無酸素状態となる海域である。調査した時期においても底層水が貧酸素状態であった。採取した底泥における ORP は全ての測点において負の値を示しており、調査海域における底泥は全域で還元状態であったことが確認できる。窪地外の測点では、底泥表層で還元状態が強く、下層に行くにしたがって弱くなっていく。一方で、窪地内の測点は上層から下層まで還元状態が強くなっており、St.13 の最下層を除き、ORP は $-168\sim -218\text{mV}$ という値を示している。

各調査地点における COD_{sed} , T-N の鉛直分布をそれぞれ、図-3, 図-4 に示す。土粒子中に含まれる I-N は T-N の $1\sim 8\%$ で、T-N のほとんどが有機態窒素(O-N)である。窪地外の観測点 St.4, 5, 6 において COD_{sed} は

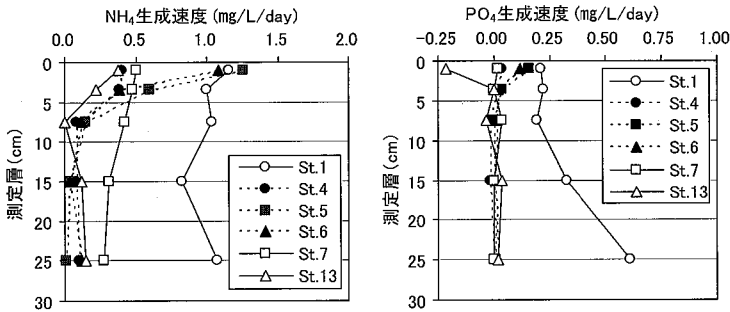


図-6 無機態窒素およびリンの生成速度

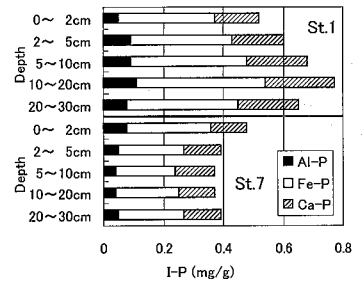


図-7 I-P の形態別鉛直分布

2.4 ~ 15 mg/g 前後を示しているのに対して、窪地内の観測点 St.13 の上層および St.1, 7 では 20 mg/g 以上となっている。図-4 に示す T-N の値と比較すると、T-N が多く含まれる地点では COD_{sed} の値も大きいという結果になっている。また、ORP の分布と同様に、窪地外の観測点と St.13 では COD_{sed} 、T-N ともに下層に向かうにつれて減少する傾向にあるが、St.1, 7 においては下層でもほぼ変化なく高い値を示している。このことから、窪地内における有機物の堆積量は非常に多いと考えられる。

(2) 無機態栄養塩の底泥内生成速度

底泥中の有機物の分解速度は様々な定義されるが、ここでは、間隙水中の無機態栄養塩の生成（増加）速度と底泥土粒子に含まれる有機態栄養塩含有量の比較から有機物の分解速度について解析する。図-6 に算出された無機態窒素・リンの生成速度を示す。ここで、生成速度は実験開始から 6 時間後までの変化量を時間で割ったものを用いた。窪地外（観測点 4, 5, 6）の生成速度は、泥深 5cm 以深では窒素が 0.01 ~ 0.15 mg/L/day, リンが -0.02 ~ 0.01 mg/L/day となっており、ほとんど生成されない。それに対して泥深 0 ~ 5cm では窒素が 0.38 ~ 1.26 mg/L/day, リンが 0.02 ~ 0.16 mg/L/day となっている。一方、窪地内の調査点についてみると、浚渫土砂投入点 (St.13) においては、5cm 以深で窪地外と同様、ほとんど生成されないのに対し、泥深 0 ~ 2cm では減少していることが分かる。これはこの分析期間中、無機態リンが土粒子に吸着していることを示している。窪地内の観測点 7 では窒素の生成速度は 0.27 ~ 0.50 mg/L/day とやや大きい値を示しているが、リンはどの層においてもほとんど生成されなかった。しかし、St.1 においては窒素が 0.82 ~ 1.16 mg/L/day, リンが 0.19 ~ 0.61 mg/L/day と共に非常に高いことが分かる。同じ窪地内の観測点でも、St.1 と St.7 にこのような差異が認められる理由として、図-7 に示すように、St.1 の底泥中に含まれる Fe-P の量が多いことが一因であると言える。

底泥中の有機態リンの量についての窪地内外での差は、生成速度の差に比べて小さい。したがって、分解速度の

違いは底泥に吸着している Fe-P の量の違いによるところが大きく（細見, 1987）、窪地内では pH や酸化還元電位といった底質の環境と相まって、底泥中の有機物が分解されやすい傾向にあるといえる。

(3) 無機態栄養塩溶出速度

溶出速度は実験開始から 24 時間の直上水の濃度変化量を時間で割ったものを用いた。各観測点における無機態窒素 (I-N) および無機態リン (I-P) の溶出速度を表-1 に示す。I-N の溶出速度は無機態 3 態 (NH_4 -N, NO_2 -N, NO_3 -N) の溶出量の合計から算定している。窪地外の観測点においては、I-N 溶出速度は 136 ~ 167 mg/m²/day, I-P 溶出速度は 3.2 ~ 12.7 mg/m²/day となった。窪地内の浚渫土砂投入点 (St.13) における溶出速度はこれらと大きな差が認められなかった。しかし、窪地内の原状の底質をもつ 2 点においては、St.7 で I-N 溶出速度が 597 mg/m²/day, I-P 溶出速度が 25.7 mg/m²/day, St.1 で I-N 溶出速度が 1164 mg/m²/day, I-P 溶出速度は 58.9 mg/m²/day と、窪地外の点に比べて数倍程度の高い値となった。

(4) 酸素消費速度

酸素消費速度の算定にあたっては、ほぼ全地点が 6 ~ 7 時間までは時間に比例して積算酸素消費量が増えたこ

表-1 無機態窒素およびリンの溶出速度

調査地点		I-N (mg/m ² /day)	I-P (mg/m ² /day)
窪地内	St.1	1164	58.9
	St.7	597	25.7
	St.13	223	9.6
窪地外	St.4	167	10.2
	St.5	194	3.2
	St.6	136	12.7

表-2 酸素消費速度

調査地点		酸素消費速度 (mg/m ² /day)
窪地内	St.1	2.99
	St.7	10.76
	St.13	2.24
窪地外	St.4	1.18
	St.5	0.97
	St.6	1.13

とから、酸素消費が早く進む St.7 については開始から 1.5 時間後、それ以外の観測点では開始から 6 時間後の酸素消費量を時間で割ったものを酸素消費速度として算出した。算出された酸素消費速度を表-2 に示す。窪地外の 3 点において、酸素消費速度は $0.97 \sim 1.18 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ であった。窪地内の浚渫土砂投入点 (St.13) においては、窪地外よりやや高く、 $2.24 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ である。窪地内の原状の底質をもつ 2 点においては 2.99 (St.1) ~ 10.76 (St.7) $\text{mg/m}^2/\text{day}$ となり、窪地外より高い値を示した。

4. 議 論

(1) ORP と硫化水素の発生

今回の調査において、窪地内及びその周辺海域は貧酸素化が進んだ結果、底泥の環境は強い還元状態であったことが分かった。このような環境では青潮の原因でもある硫化水素が発生しやすくなる。硫化水素は硫酸還元菌により嫌気呼吸が行われ、硫酸還元が起こることによって発生する。この硫酸還元反応は ORP が -200 mV 付近まで低下すると発生しやすくなるとされており (平野ら, 1998), 調査結果の解析を行った。ORP と土粒子中の硫化物 T-S と間隙水中の硫化物イオン S^{2-} との関係を図-8 に示す。浚渫窪地内の St.1, 7 と St.13 の上層では ORP が -200 mV 近くかそれ以下になり、T-S および S^{2-} ともに、他地点に比べて大きくなっていることが分かる。窪地内では硫化物及び硫化物イオンが生成・蓄積されていたことがわかる。

硫化水素は硫化物イオンとして海水中に存在しているが、非常に還元性の強い無機イオンであるため、酸素や金属イオン等と反応しやすい。硫化水素の発生が顕著にみられた St.1 と St.7 の 2 地点における大きな違いは硫化物の存在している形態である。St.1 では泥深 30 cm まで T-S が $5.5 \sim 5.9 \text{ mg/g}$ と非常に多く堆積していたが、 S^{2-} は表層間隙水中に $60 \sim 90 \text{ mg/l}$ であり、泥深 5 cm 以深ではほとんど見られなかった。しかし、St.7 においては、泥深 30 cm まで一様に、T-S が $2.6 \sim 3.1 \text{ mg/g}$ 、 S^{2-} が $150 \sim 160 \text{ mg/L}$ であった。2 つの浚渫窪地で、T-S が多いのが St.1、 S^{2-} が多いのが St.7 と違いがあるのが分かる。

(2) 硫化物と間隙水中のリン濃度の関係

底泥に含まれる有機物は、バクテリアにより無機物に分解される。その結果、堆積していた有機態窒素・リンは無機態として水中に溶出する。図-9 に I-N および I-P の生成速度の関係を示す。窪地を含めた観測点の各層から、窒素とリンはある一定の割合で分解が行われているという結果が得られた。しかし、St.1 においては I-N と I-P の生成速度の比は一定ではなく、I-P の生成

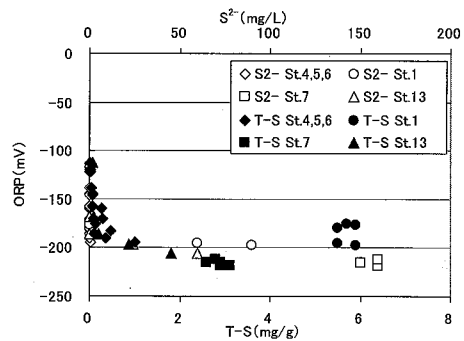


図-8 ORP と T-S・ S^{2-} との関係

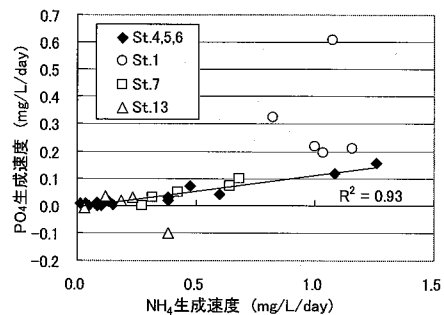
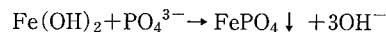
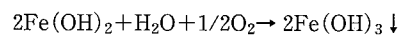


図-9 無機態窒素およびリンの生成速度の関係

速度が I-N の生成速度に比べて大きな値を示している。

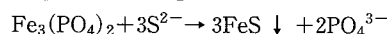
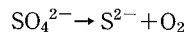
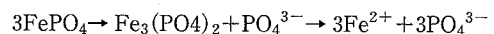
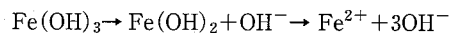
底泥中のリンは好気的条件下では溶出しにくい、もしくは溶出しにくく、嫌気的条件下では溶出しやすい。水中および底泥内での酸化還元過程において、リン、鉄および硫酸イオンの挙動は次のように示すことができる。

・酸化過程



[FePO_4 は多量の $\text{Fe}(\text{OH})_3$ と共沈する]

・還元過程



[この反応により PO_4^{3-} の溶出が進行]

ここで、 $\downarrow$: 不溶沈殿を意味する

このように、酸化状態でリン酸態リンは鉄イオンと結合して不溶化し、溶出しにくくなるが、還元状態では鉄と結合していたリン酸態リンが溶出する。また、硫酸還元による硫化水素の生成とともに、硫化鉄の沈殿を伴ってリンが溶出することを示している。

図-10 に各調査点での土粒子中の T-S と間隙水中の I-P の関係を示す。ただし、本調査では FeS の測定を行っていないため、 FeS が一定の割合を占めていると

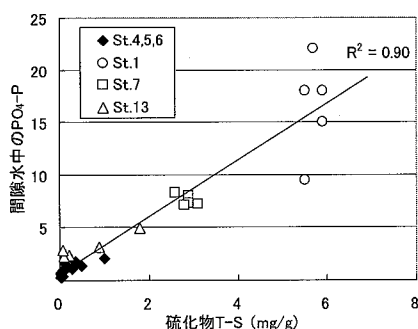


図-10 硫化物と間隙水中のリン濃度

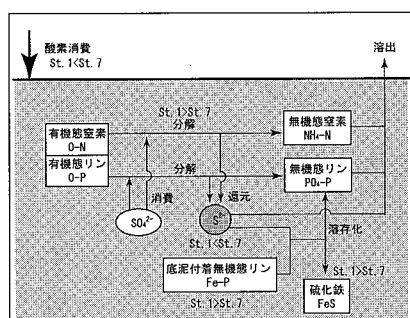


図-11 硫化物とリン酸態リン溶出の概念図

考えられる T-S との比較を行っている。図に示すように、硫化物の増加に伴って間隙水中のリン濃度が増加していることが分かる。また、このような硫化物の生成は窪地内において多く見られ、窪地内では硫化水素の発生による間隙水中のリン濃度の増加、すなわちリンの溶出が促進されているものと考えられる。

以上の結果を改めて整理すると図-11 のようになる。 S^{2-} が生成され、Fe-P が存在する場合、硫化鉄 FeS の沈殿とともにリンが多量に溶出する。また、St.1 と St.7 を比較すると、St.1 では反応が進み、FeS とリン酸態リンの溶出が多くなっている。一方、St.7 では反応が余り進まず、リン酸態リンの溶出は少ないものの、 S^{2-} が蓄積し、いずれ溶出することになる。これは、St.1 は河川からの懸濁物の流入など、硫化水素が金属等の物質と反応し、硫化物として堆積しやすい状況であることが推測される。したがって、同じ窪地内でも Fe-P (あるいは Al-P) が供給されるかどうかで、硫化水素および I-P の溶出量に変動することが分かる。

5. まとめ

本研究で得られた主な結論は以下の通りである。

- ①夏季に底層水が貧酸素化する当海域では、底泥は全ての測点において還元状態となっている。表層で還元状態が強く、下層に行くにしたがって弱くなっていく窪

地外の測点と異なり、窪地内の測点では上層から下層まで還元状態が強くなっている。

- ②窪地外では、新生堆積物の占める表層以外には有機物の分解が進んだ状態で堆積している。しかし、窪地内では、30 cm まで有機物が分解されないまま堆積した状態になっている。

- ③窪地内の無機態窒素・リンの溶出速度および酸素消費速度は窪地外に比して大きかった。窪地外の酸素消費速度は約 $1 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ で大阪湾奥部の一般的な値であった。一方で窪地内の底泥による酸素消費速度は $3 \sim 10 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ となり、高い値を示した。

- ④生成速度調査の結果、窪地内においては下層においても生成速度が大きい。図-9 に示すように、多くの点で $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{PO}_4\text{-P}$ の分解速度は比例する。しかし、St.1 (窪地内) においては無機態リンの分解速度が大きい。

- ⑤土粒子中の全硫化物量および間隙水中の硫化物イオン濃度は窪地内ではるかに大きな値をとる。また、同じ窪地内でも Fe-P が供給されるかどうかにより、硫化水素および I-P の溶出量に変化するものと考えられる。

謝辞：本研究の調査は鐵鋼スラグ協会西日本支部近畿地区部会からの依頼により財団法人災害科学研究所にて実施したものである。関係者に謝意を表したい。

参考文献

- 大阪府水産試験場(1986)：大阪府水産試験場報告，第7号，174pp.
- 窪田勇輝，入江政安，菅直子，西田修三，中辻啓二(2006)：大阪湾北部港湾域における2005年底質調査，平成18年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集，Ⅱ-62.
- 五明美智男，佐々木淳，磯部雅彦(1998)：東京湾湾奥の浚渫窪地における湧昇現象の現地観測，海岸工学論文集，第45巻，pp. 981-985.
- 佐々木淳，磯部雅彦，渡辺晃，五明美智男(1996)：東京湾における青潮の発生規模に関する考察，海岸工学論文集，第43巻，pp. 1111-1115.
- 佐々木淳(1997)：東京湾湾奥水塊の湧昇現象と青潮への影響，海岸工学論文集，第44巻，pp. 1101-1105.
- 田中昌宏，Arjen Markus，阪東浩造(1997)：青潮の生化学反応を含む数値モデルの開発，海岸工学論文集，第44巻，pp. 1096-1100.
- 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.
- 平野敏之監修(1998)：沿岸の環境図，pp. 597-601.
- 細見正明(1987)：湖沼底泥からの窒素・燐溶出とその制御に関する研究，大阪大学学位論文，199p.
- 堀江毅・細川恭史(1984)：海底泥中のリンの挙動モデルについて，港湾技術研究所報告，第23巻，第2号，pp. 49-74.
- 八木宏，内山雄介，鯉淵幸生，日向博文，宮崎早苗，灘岡和夫(1997)：東京湾湾奥部における成層形成期の水環境特性に関する現地観測，海岸工学論文集，第44巻，pp. 1076-1080.