

閉鎖性内湾の底泥特性と水質・底質の相互作用について

韓 銅珍*・中辻啓二**・西田修三***

底質の水平・鉛直分布および窒素とリンの溶出機構を把握するため、大阪湾の湾奥部を中心に底泥の不攪乱柱状採取を行い、底質の分析および室内実験を行った。その結果、底泥の COD は湾奥沿岸部で高く、湾中央部で比較的低い値を示し、海水水質と高い相関を有することが明らかになった。また、無機態リンの形態別構成比の鉛直分布から、底泥表層における Al イオン、Fe イオンと結合しているリンは還元条件で脱着され水中へ溶出するが、その一部は海水中の Ca イオンと結合され、再び海底へ沈降するメカニズムが明らかになった。溶出速度は、窒素・リンともに湾奥部沿岸の停滞水域において高い値を示した。成層化により下層が貧酸素化され、底泥からのリンの溶出が促進されることが分かった。

1. はじめに

湾内に河川から流入した粒子態有機物や湾内で内部生産により生成された粒子態有機物は、海底に堆積する。底泥中の有機物は、その後、微生物による分解作用を受け、無機態栄養塩として再び海水中に回帰する。これらの無機態栄養塩は表層に輸送され、富栄養化の原因となる。また、底泥における有機物の分解により酸素が消費され、底層の貧酸素水塊を形成する。

湖において、底泥からの窒素とリンの溶出、有機物の分解過程、堆積物による溶存酸素の消費のメカニズムを明らかにするための調査および分析が細見(1987)などにより行われている。

沿岸海域においては、大阪湾を対象に城ら(1986)が溶出速度、底質調査を行っており、呉ら(2003)は、東京湾を対象に底質の汚染状況および堆積過程を把握するための調査を行っている。しかし、閉鎖性沿岸海域において栄養塩の溶出機構および水質と底質の相互作用などを明らかにするための調査・分析の例は非常に少ない。

そこで、本研究では、大阪湾湾内の底泥を対象に現地調査および分析を行い、湾内に流入した栄養塩の沈降・堆積により形成された底泥がどのような分布状況と特性をもつのか、また水質との関連性はどの程度であるのかを理解することを目的とする。

2. 調査および分析方法

(1) 調査の概要

大阪湾における底質の水平・鉛直分布および窒素とリンの溶出機構を把握するために、大阪湾湾奥部を中心に 9 カ所で底泥の不攪乱柱状採取を行い、底質の分析および室内実験を行った。調査位置は図-1 に示すとおりで

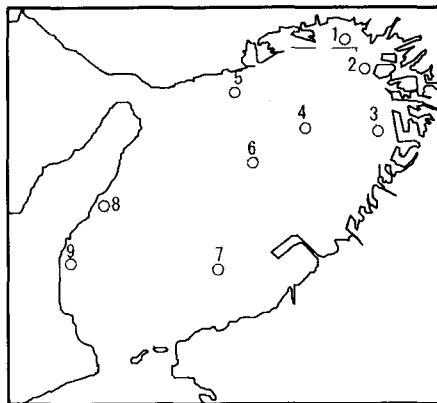


図-1 対象領域および調査地点位置図

ある。また、現地の条件を把握するため直上水を採水し、水質の分析も行った。調査内容および分析項目は表-1 に示す。

表-1 調査内容および分析項目

調査内容	調査項目
水質調査	水温、塩分、DO、COD、T-N、T-P、I-N、I-P
底質調査	粒度組成、含水比、ORP、pH、強熱減量、COD、硫化物、T-N、T-P、O-N、O-P、I-N、I-P、Al-P、Ca-P、Fe-P
間隙水質調査	COD、硫化物イオン、T-N、T-P、I-N、I-P
溶出速度調査	窒素・リンの溶出速度
酸素消費速度調査	底泥による酸素消費速度(SOD)
分解速度調査	有機窒素・リンの分解速度

(2) 分析方法

a) 底 質

採取した不攪乱柱状泥を 0～2、2～4、4～6、6～8、8～10、19～21、39～41 cm の 7 層に分けて分析を行った。粒度組成、含水比、ORP (酸化還元電位)、pH、強熱減量、COD、T-N、T-P、硫化物、O-N、I-N、O-P、I-P を、とくに I-P については陽イオンと

* 正 会 員 博(工) (株)ハイドロソフト技術研究所
** フェロー 工博 大阪大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻
*** 正 会 員 工博 大阪大学助教授 大学院工学研究科土木工学専攻

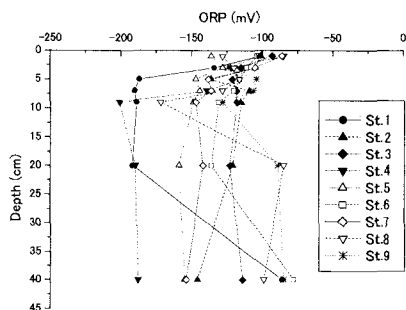


図-2 酸化還元電位の鉛直分布

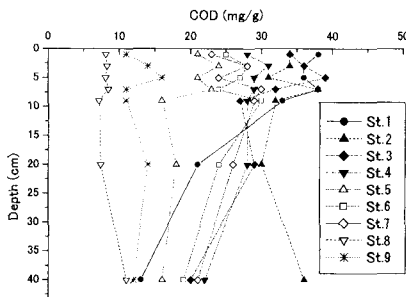


図-3 COD の鉛直分布

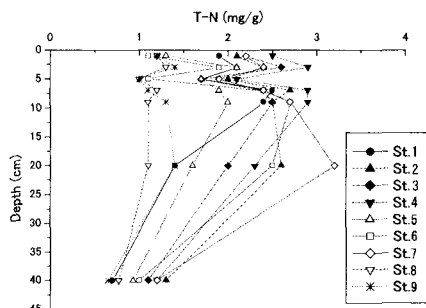


図-4 T-N 濃度の鉛直分布

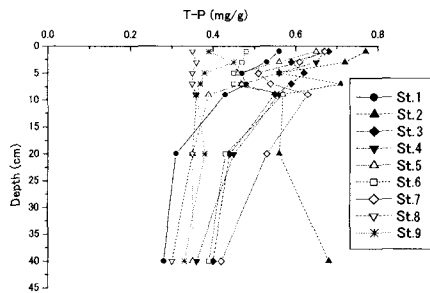


図-5 T-P 濃度の鉛直分布

の結合態を考慮し、Al-P、Ca-P、Fe-P に分けて分析した。

b) 間隙水質

採取した不攪乱柱状泥を底質の分析と同様に7層について、間隙水中のCOD、T-N、T-P、硫化物、I-N、I-P、とくにI-Nについてはアンモニア態窒素、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素に分けて分析を行った。

c) 溶出速度

底泥からの窒素・リンの溶出速度を求めるために、0～30 cmの不攪乱柱状泥を用いて、直上水を現地水温、現地DO濃度に維持しながら室内溶出実験を行った。実験期間は10日間とし、実験開始後0、1、3、5、10日目の計5回、実験装置内の直上水のI-N、I-Pの濃度を分析した。

d) 底泥によるDO消費速度

底泥による酸素消費速度(SOD)を求めるために、0～30 cmの不攪乱柱状泥を用いて、直上水は現地水温を維持しながら室内実験を行った。実験期間は5日間とし、実験開始後0、2、4、8、24、40、72、120時間目の計8回、実験装置内の直上水のDO濃度を分析した。

e) 分解速度調査

底泥中の有機態窒素・リンの分解速度を求めるために、採取した不攪乱柱状泥のうち0～5、5～10、15～20 cmの3層の底泥を、気相が残らないようにガラス瓶に満たして密閉し、現場泥温を維持して室内実験を行った。実験期間は10日間とし、実験開始後、0、3、6、10日目

の計4回各試料1本ずつのガラス瓶を実験装置内から取り出し、間隙水中のI-N、I-P濃度を分析した。

3. 結果および考察

(1) 底 質

a) 酸化還元電位(ORP)

図-2に示すように、各調査点での酸化還元電位(ORP)は-201～-78 mVの範囲にある。この結果から、底泥は酸素のほとんどない還元状態にあり、脱窒が起りやすく、また、底泥からのリンの溶出が起りやすい状況であるとも言える。

b) 化学的酸素要求量(COD)

図-3に各調査点でのCODの鉛直分布を示す。湾奥沿岸部のSt. 1、St. 2、St. 3ではCODの値は35～37 mg/gであるのに対し、淡路島沿岸のSt. 8、9では10 mg/g前後の値を示している。この傾向は、湾奥部での高い内部生産によるものと推察でき、海水水質とも強く関連している。しかし、鉛直方向にはあまり明確な変化は見られない。一般に底泥のCOD値が20 mg/gを越えると、汚染されている(水産用水基準)と分類される。この基準にしたがえば、大阪湾の底泥は淡路島沿岸部を除き全域的に汚染されており、湾奥沿岸部の底泥は汚染度が高いことがわかる。

c) 全窒素(T-N)

図-4は各調査点におけるT-N濃度の鉛直分布を示す。防波堤内のSt. 1を除いて、T-Nは湾奥で2.5 mg/g前

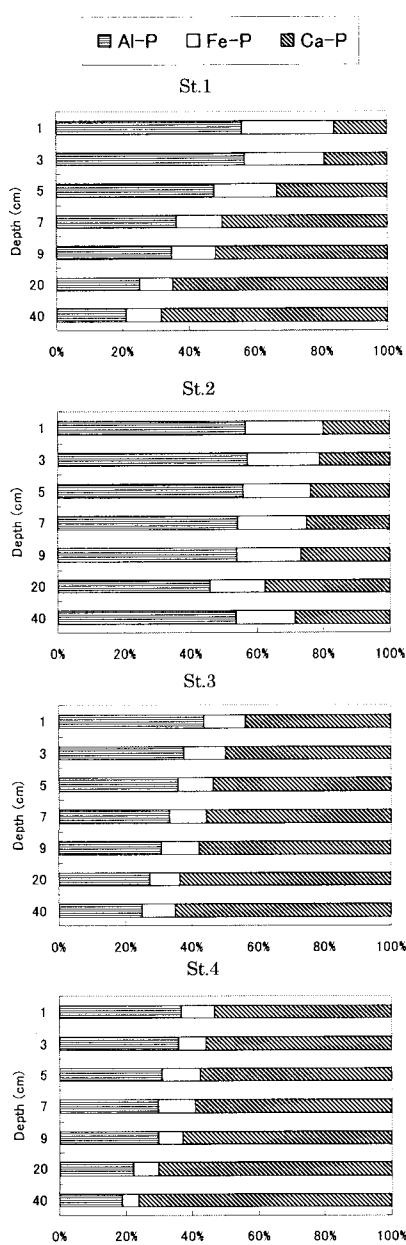


図-6 I-P の形態別構成比の鉛直分布

後の値をとり、淡路島沿岸部 (St. 8 と St. 9) で 1.2 mg/g である。つまり、湾奥部から湾口部にかけて徐々に T-N の値は低くなる傾向にある。鉛直分布は、全体的に底泥表層から泥深が深くなるにつれ濃度が減少していく傾向が見てとれる。

d) 全リン (T-P)

図-5 は各調査点における T-P 濃度の鉛直分布を示す。COD や T-N 濃度の鉛直分布と同様に、T-P も湾奥部から湾口部にかけて濃度が徐々に減少していく傾向にあ

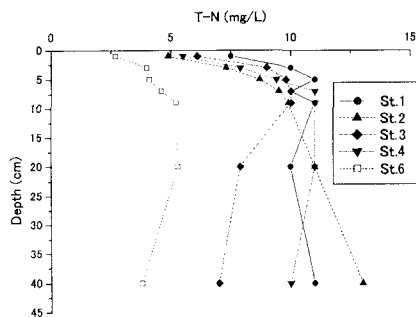


図-7 間隙水中 T-N 濃度の鉛直分布

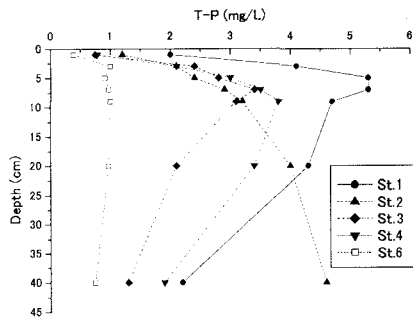


図-8 間隙水中 T-P 濃度の鉛直分布

る。湾奥沿岸部で約 0.6 mg/g、淡路島沿岸部で約 0.4 mg/g の値となっている。鉛直分布の傾向としては、泥深 10 cm 程度までの濃度分布にばらつきは見られるが、全体的には深さ方向に濃度が減少する傾向を示している。

e) 無機態リン (I-P)

図-6 は I-P の形態別構成比の鉛直分布を示す。Al-P および Fe-P の濃度は表層で高く、下層に向かって構成比の占める割合は低下している。しかし、Ca-P の構成比は Al-P、Fe-P と異なり、表層で低く、下層で高くなる傾向を示す。このことから、表層における Al イオン、Fe イオンと結合しているリンはある条件で脱着されるが、その一部は、海水中的 Ca イオンと結合され、また海底へ沈降されているものと考えられる。

(2) 間隙水質

図-7、図-8 は、それぞれ間隙水中の T-N、T-P 濃度の鉛直分布を示す。各調査点ともに、0～2 cm 層で最も値が低く、5 cm 層で最も高い値を示す。調査点別にみると、湾奥沿岸部で高く、湾央部で低い値を示す。0～2 cm の表層で濃度が低いのは直上水への溶出に原因していると考えられる。

(3) 溶出速度

底泥からの窒素やリンの溶出は、間隙水中の濃度と直上水の濃度勾配により生じる拡散現象である。間隙水中の溶存態窒素やリンの濃度は直上水に比べて非常に高い。また、間隙水中への物質の供給は有機物の分解などによ

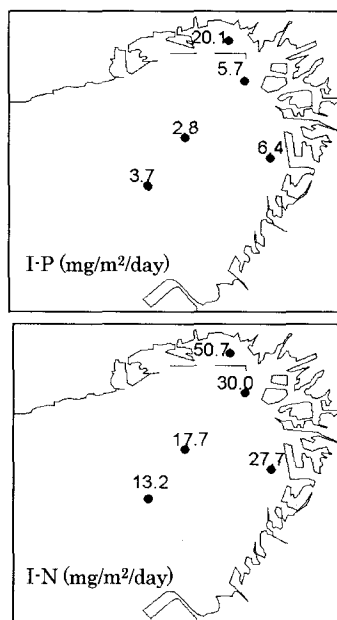


図-9 無機態窒素とリンの溶出速度の水平分布

り十分行われている。このため、溶出速度は間隙水濃度に比例すると考えられ、実験期間中の間隙水濃度の変動が小さければ、その間の溶出速度はほぼ一定であったとみなすことができる。

溶出速度は各実験ケースの直上水の濃度変化を直線式に近似して求めた。すなわち、 n 回目の採水日までの溶出量 (R_n) を、分析のための採水による物質量の減少を考慮した次式を用いて求め、 R_n と経過日数の一次回帰式の傾きを溶出速度と定義した。

$$R_n = \frac{\sum_{i=1}^n \left\{ \left(V_0 - \sum_{j=1}^n V_{j-1} \right) \times (C_i - C_{i-1}) \right\}}{S} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 R_n : n 回目の採水日までの溶出量 (mg/m^2)、 V_0 : 初期直上水量 (l)、 V_i : i 回目の採水量 (L)、 C_i : i 回目の直上水濃度 (mg/l)、 S : 実験装置内底泥面積 (m^2)

上記の式に基づき、実験開始後 0～10 日間の期間を対象に、底泥からの窒素・リンの溶出速度を算出した。

図-9 は各調査点における底泥からの窒素とリンの溶出速度の水平分布を示している。窒素・リンともに停滞水域である防波堤の内側の St. 1 で高い値を示している。St. 1 における下層の DO 濃度は $2 \text{ mg}/l$ 以下で貧酸素化されていたため、底泥からのリンの溶出が促進され他の調査点に比べて非常に高い値を示していると考えられる。調査点別にみると、湾奥部沿岸の St. 1, St. 2, St. 3 で高く、St. 4 と St. 6 で低い値を示している。

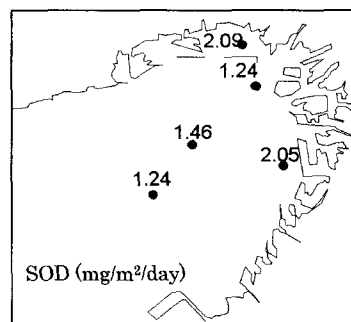


図-10 底泥による酸素消費速度の水平分布

(4) 底泥による DO 消費速度 (SOD, Sediment Oxygen Demand)

底泥の有機物の分解による酸素の消費速度は、各実験ケースの直上水 DO 濃度の変化を直線式に近似して求めた。 n 回目の採水日までの酸素消費量 D_n と経過日数の一次回帰式の傾きを DO 消費速度とした。

$$D_n = \frac{\sum_{i=1}^n \left\{ \left(V_0 - \sum_{j=1}^n V_{j-1} \right) \times (C_i - C_{i-1}) \right\}}{S} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 D_n : n 回目の採水日までの酸素消費量 (mg/m^2)、 V_0 : 初期直上水量 (l)、 V_i : i 回目の採水量 (L)、 C_i : i 回目の直上水 DO 濃度 (mg/l)、 S : 装置内底泥面積 (m^2)

上記の式に基づき、実験結果のうち直上水の濃度が直線的に減少している期間を対象に底泥による酸素消費速度を算出した。

DO 濃度は経過時間とともにほぼ直線的に減少する傾向を示し、St. 1 では実験開始後 40 時間後 (約 1.7 日後)、St. 2 では 72 時間後 (約 3 日後) にはほぼ無酸素に近い状態となった。

各調査点における底泥による酸素消費速度の水平分布を図-10 に示す。COD の水平分布と同じく、SOD の水平分布も湾奥部で、とくに防波堤の内側の St. 1 で高い値を示している。しかし、淀川河口部の St. 2 は低い値となっている。

(5) 泥率組成と底質項目の関係

先に示した、COD や窒素、リンといった汚染指標項目の分布は基本的に泥率組成の分布と類似していた。泥率の高い湾奥部でいずれの項目の濃度も高く、湾央より西側の泥率の低い海域で低い濃度を示すといった共通したパターンがみられた。これは底質中に含まれる各項目の濃度が微細粒子の体積状況と関連を持つことによるものと考えられる。底泥表層における泥率 5μ 以下の泥率組成と COD, T-N, T-P の各関係をプロットしたのが図-11 である。各項目とも同じ傾向を示し、泥率組成の

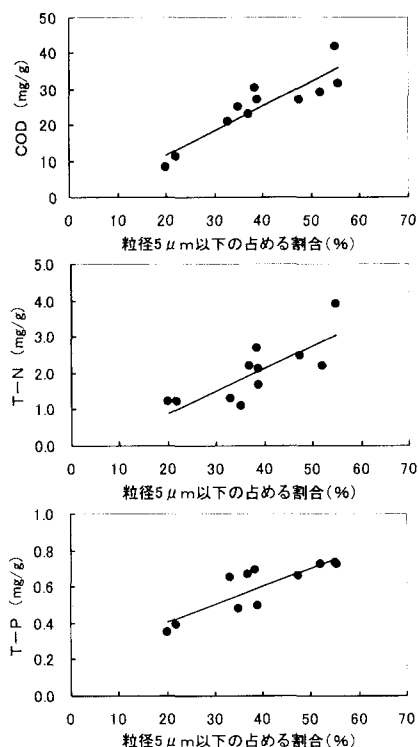


図-11 底泥表層における泥率組成と各底質項目との関係

増加に比例して濃度が増加する傾向がみられる。とくに、泥率組成とリン濃度との相関が強い。この関係を利用することにより、泥率組成からおよその底質の汚染状況を判定することが可能であると考えられる。

(6) 底質と間隙水質の関係

図-12は調査から求められた底泥中のI-Pと間隙水I-Pの関係および底泥中のFe-P+Al-Pと間隙水I-Pの関係を示す。また、底泥中のI-Nと間隙水I-Nの関係を示す。底泥中のI-Pと間隙水I-Pとの間には明確な相関が見られない。しかし、底泥中のFe-P+Al-Pと間隙水I-Pとの関係は非常によい相関を示している。還元条件下で底泥から脱着され、間隙水中に拡散しその後海水中に溶出する成分は、I-P中のFe、Alと結合している成分のみであり、脱着されない成分はCaなどと結合している成分と考えられる。

無機態窒素については、底泥中のI-Nと間隙水I-Nの関係を示している。データのばらつきのあるものの、比例関係の相関がみられる。窒素はリンと異なり結合態による溶出速度の差がないものと考えられる。

4. ま と め

大阪湾における底泥の特性と底質が湾内の水質に及ぼす影響を把握するために、大阪湾奥部を中心に調査、分析を行った。主な結論をまとめると、以下のようになる。

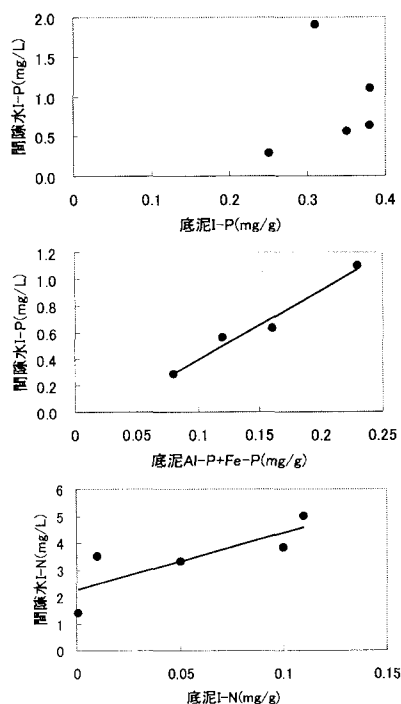


図-12 底質と間隙水質との関係

- (1) 底泥CODは、湾奥沿岸部で高く、淡路島沿岸で比較的低い値を示しており、海水水質と強く関連していることが明らかになった。
- (2) 底泥I-Pの形態別構成比の鉛直分布から、表層におけるAlイオン、Feイオンと結合しているリンは還元条件下で脱着されるが、その一部は、海水中のCaイオンと結合され、再び海底へ沈降するものと考えられる。
- (3) 無機態窒素とリンの溶出速度は、停滞水域において高い値を示した。さらに下層の貧酸素化により、底泥からのリンの溶出が促進されていることが明らかになった。

参 考 文 献

- 呉 海鐘・磯部雅彦・佐藤慎司・渡辺 晃(2003): 東京湾三番瀬の猫実川河口における底質環境の現地観測, 第50回海岸工学論文集, pp. 1046-1050.
- 西條八束・奥田節夫(1996), 河川感潮域 (その自然と変貌), 名古屋大学出版会.
- 城久(1989): 大阪湾における富栄養化の構造と富栄養化が漁業生産に及ぼす影響について, 大阪府水産試験場研究報告, 第7号, pp. 28-38.
- 西村 肇・平泉 泰(1978): 水圏, 底質を含めた物質の循環過程のモデル化, 昭和52年度関西国際空港漁業環境影響調査報告, 日本水産資源保護協会, pp. 390-522.
- 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.
- Edberic, N., B.V.Hofsten: Oxygen uptake of Bottom Sediment Studied In Situ and the Laboratory, Water Research, 7, pp. 1285-1294, 1973.
- Friedl, G.: Benthic fluxes of Nutrients in the Northwestern Black Sea, Marine Chemistry, 62, pp. 77-88, 1998.