

沿岸海域汚染に関する調査研究活動

松本 英二 (海洋地質部)
Eiji MATSUMOTO

1. はじめに

地質調査所海洋地質部では 昭和49年度から51年度までの3ケ年で 沿岸海域における「汚染底質の調査技術に関する研究」を実施した。この研究を通じて 音響機器による堆積物広域探査技術 不攪乱採泥器 堆積物の処理・分析技術 堆積年代測定法 底質汚染度評価法等の開発を行った。これらの調査・分析・評価技術をもとにして 昭和52年度から54年度まで 駿河湾 志布志湾 噴火湾 富山湾 沖縄周辺および有明海において「汚染底質堆積機構に関する研究」を実施し 現世堆積物の分布と汚染底質との関連を明らかにした。

これに続く特別研究として 昭和54年度から「赤潮による底質汚染機構に関する研究」が開始された。この研究では 近年問題化している富栄養化・赤潮発生による内海・内湾の汚濁を対象とし 汚濁物質の沈降・堆積 底質汚染 堆積物からの溶出機構を明らかにすることを目的とし あわせて 底泥に記録されている海域汚染と生態系変化を歴史的に明らかにし 海域浄化・保全・制御に役立てる計画である。

昭和54年度は 調査技術 分析技術 解析手法の開発に重点を置き 不攪乱柱状採泥器の開発 鉛-210法による精密堆積年代解析法の確立 汚濁物質の迅速分析法の検討 生物遺骸分析法の検討を行った。本年度は 9月24日より10月1日まで 東海サルベージ(株)所属の第5海工丸を用船し 東京湾において 2.5マイル間隔で採泥 採水 音響地層探査を行った。現在 採取された試料の分析とデータ解析を行っている最中である。これまで得られた成果の一部を紹介する。

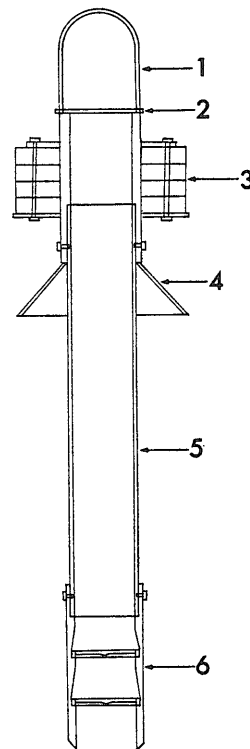
2. 不攪乱柱状採泥器

海底堆積物を 現場の状態のまま乱すことなく採取することは 底質汚染を研究するうえで 非常に大切である。内湾の底泥の表層は 柔らかく流動性があるため 採取時に逸散してしまうことが多い。内湾底泥の堆積速度の多くは 1年間に数mm程度であるため 底泥表層 5~6cm を採泥時に失った場合 採取された堆積物表面は 数十年前の堆積物となり 現在の汚染度を正しく評価できない。底泥に記録されている汚染の歴史を知るためには 底泥を柱状にとらねばならない。この場

合 底泥中に 採泥管を差し込むが 採泥管の貫入抵抗が大きいと 採泥管の底泥中への差し込みに供って 底泥が採泥管内部に十分に貫入しないことが多い。このような底泥試料からは汚染の変遷を正しく読みとることはできない。

軟弱な底泥を柱状に乱さずに採取する装置を試作し 船上テストを重ねたところ 次の点に考慮する必要があることがわかった。

- (1)底泥中に採泥管をゆっくり貫入させること。
- (2)採泥管を肉薄にし 管の口径を大きくし その口径に等しい水抜口を作ること。
- (3)目的の深さ以上に泥中へ貫入しないように 貫入止めを作ること。
- (4)採泥管内の底泥採取試料が流入しないように 保持装置(キャッチャー)をつけること。



第1図
不攪乱柱状採泥器

- (1)は吊り金具
- (2)は水抜き弁
- (3)はウエイト
- (4)は貫入止め
- (5)は透明アクリル製採泥管
- (6)は二段式キャッチャーである

上述の条件に加えて 底質汚染の研究のための試料採取装置としては

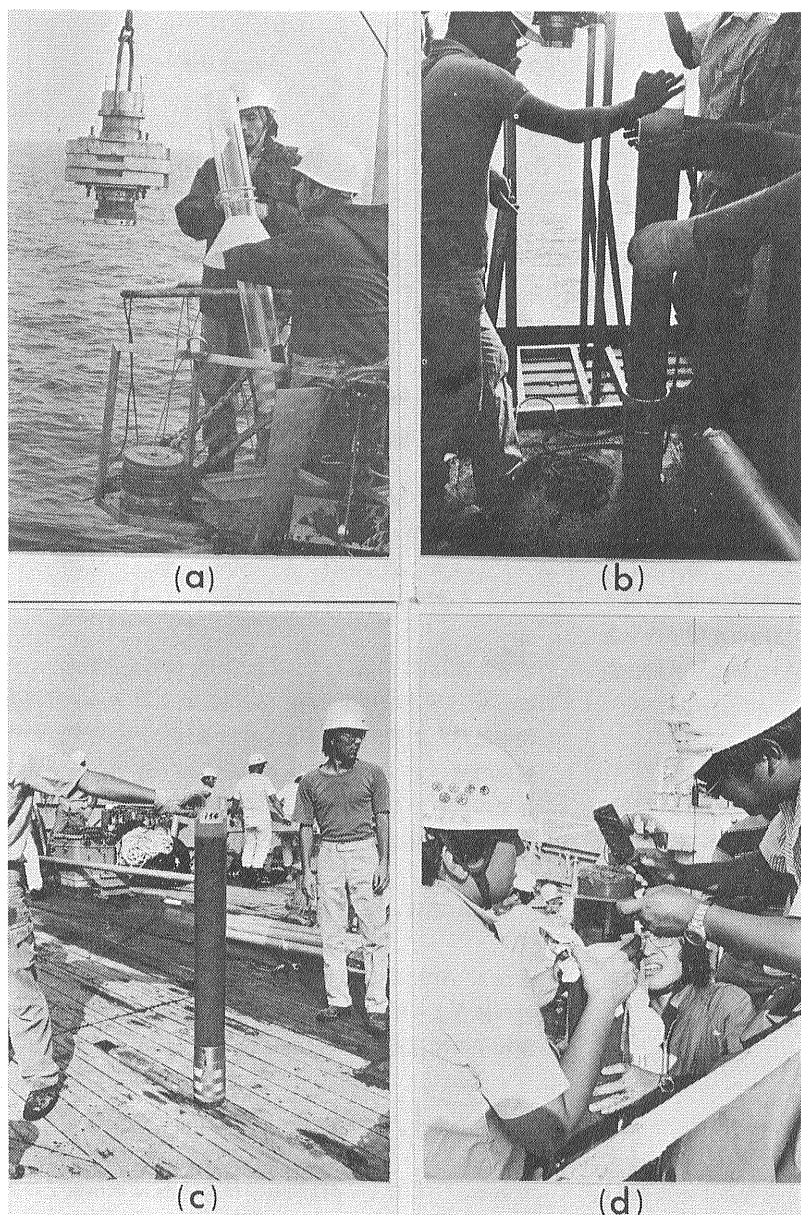
- (1)採取試料が採泥器によって汚染（コンタミネーション）されないこと。
- (2)堆積状態が 直接肉眼で観察できること。

が大切である。

上述の条件を満足するものとして 第1図に示す柱状

採泥器を製作した。採泥管をアクリル製 貫入止めをポリエチレン製にし ウェイト部 キャッチャー その他の金属部はすべてステンレス製とした。従来の採泥器には 鉛 銅 鉄等が使われているが これらの重金属は 試料を著しく汚染してしまうため 今回は これらの使用を排した。試料と接するキャッチャーやアクリルパイプは 重金属や機械油等によって汚染されないように注意する必要がある。使用前に十分洗浄し 使用直前までビニル袋等に入れて保管するほうがよい。

東京湾における汚染底泥は表面から最大50cmの深さまでである⁽⁴⁾⁽⁵⁾ので その下部の非汚染時のバックグラウンドの底泥まで得るように アクリルパイプの長さを1mとした。また 多目的用に大量の底泥が同時に採取されるように パイプの口径を12cm (内径11cm)とした。アクリルパイプの下端に 直接 ステンレス製の二段式キャッチャー⁽⁶⁾を取りつけた。一段式のキャッチャーでは 底泥が柔らかい場合 保持できないことが多い。パイプは 透明アクリル製であるので 採取された底泥は 外側から直接観察できる。ウェイトが不十分であると 底泥の粒度や間隙率によっては 採泥管が底泥中に十分貫入しないため ウェイトは積み重ね方式とした。1枚15kgのウェイトを5枚まで重ねることができる。ウェイトの上部には パイプの口径に等しい水抜き弁を取りつけ 貫入時に水が容易に抜け 揚取時に水の流入を防ぐ蓋となるようにした。ウェイト部とパイプの固定はネジ止めとし 船上に採泥器を揚取した際に ウェイト部からアクリルパイプを鉛



第2図 不攪乱柱状採泥器 (MA-L) 型による採泥作業過程 (a)ウェイト部に採泥管を接続 (b)採取後 ウェイト部からの採泥管の取り外し (c)採取試料 (d)採泥管からの試料の押し出し

直状態に保ったまま簡単に取り外せるようにした。少量の底泥試料の採取で目的が達せられる場合のために ウェイト下部にカップリングを取りつければ口径 6.5 cm (内径 5.5cm) または 4 cm (内径 3.4cm) のアクリルパイプが取り付けられるようにした。底泥試料は アクリルパイプを鉛直に保ったままパイプの下部から上部に向けて徐々に押し上げてパイプの上端で 1~10 cm の目的の厚さに切り取る。この際 採泥パイプと同じ口径で 1~10cm の長さの採取用リングをパイプ上端に乗せて切ると便利である。切り取った試料はスチロールビンに密封して冷蔵・冷凍保存するとよい。

上で述べた採泥器・採泥手法を用いると 汚染底質の研究のためのほぼ満足する底泥試料が採取される。以下この採泥器を MA 式 (松本・青木式)⁽⁴⁾ とし パイプの口径が 12cm のものを L 6.5cm を M および 4cm を S と単に述べることにする。第 2 図に MA-L 型を使った採泥作業過程を写真で示す。

3. 堆積年代測定

堆積年代を求めることは 堆積量の決定や海洋汚染の変遷を追跡するうえで不可欠である。堆積物の年代決定のうち 放射壊変を時計として使う方法が最も信頼できる。放射性炭素 (¹⁴C) は 半減期が 5700 年で 数百年から 3~4 万年の年代を決定することができる⁽⁵⁾。したがって 沖積世堆積物の年代を求めるために しばしば使われる。しかし 海洋汚染のように たかだか百年程度の年代を放射性炭素法で求めることは不可能である。過去百年以内の堆積年代を求める方法として 最近注目を集めているのは 放射性鉛 (²¹⁰Pb) を用いる方法である⁽⁶⁾。

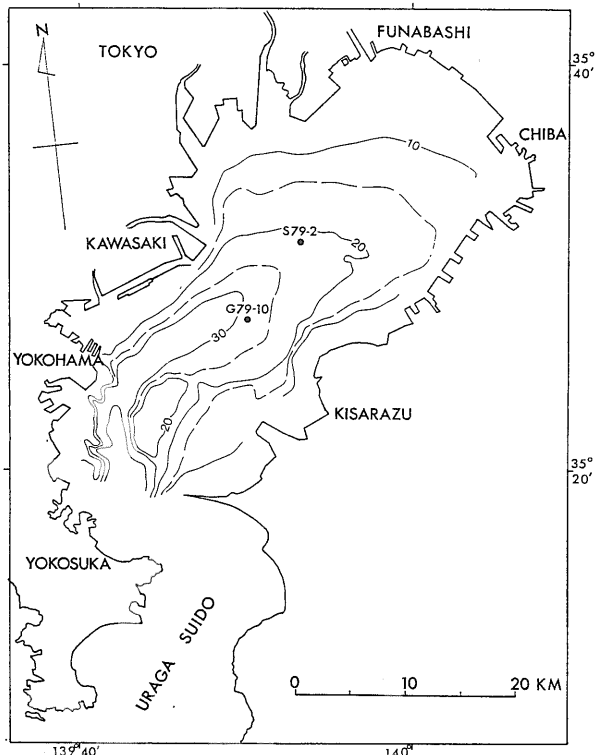
3.1 鉛-210 法による堆積速度の求め方

²¹⁰Pb の半減期は 22.2 年であり 半減期の約 5 倍が年代決定の限度であるため 約百年までの堆積年代を求めることができる。この方法は 堆積物中での ²¹⁰Pb の鉛直分布から堆積速度を求める方法である⁽⁷⁾。年代決定の概略を述べる。

放射性元素の最初の放射能の強さを A(0) とし t 年後の残っている放射能の強さを A(t) とすれば

$$A(t) = A(0) \exp(-\lambda t) \quad (3-1)$$

である。λ を放射壊変定数と呼ぶ。放射壊変にもとづく年代決定では A(0) と A(t) 値から年数 t を決める。底泥表面から深さ z (cm) までの単位面積当りの堆積粒子



第 3 図 東京湾の海底地形と底泥柱状試料採取地点

の積算重量を W (g/cm²) とすれば 深さ z における ²¹⁰Pb の放射能 A(W) (dpm/g) の強さは

$$A(W) = \{A(0) - A(\infty)\} \exp(-\lambda t) + A(\infty) \quad (3-2)$$

で表わされる。ここで λ は ²¹⁰Pb の壊変定数 (0.0311/年) w は平均堆積速度 (g/cm²/年) および A(∞) は堆積物中にバックグラウンドとして含まれている ²¹⁰Pb の放射能の強さで 通常 ²¹⁰Pb の放射能が一定値に達する深さでの値をとる。いま {A(W) - A(∞)} の値を A_{ex}(W) とし 過剰鉛-210 の放射能の強さと呼ぶ。3-2 式は

$$A_{ex}(W) = A_{ex}(0) \exp(-\lambda W/w) \quad (3-3)$$

となり W に対して log A_{ex}(W) をプロットすれば 直線の傾きより堆積速度 w が求まる。単位面積当りの堆積粒子の積算重量 W (g/cm²) は

$$W = \int_0^z (1-\phi) \rho_s dz \quad (3-4)$$

である。ここで φ は間隙率および ρ_s は堆積粒子の密度である。通常使われる堆積速度 S (cm/年) と w との

関係は

$$w = S(1 - \phi)\rho_s \quad (3-5)$$

であらわされる。

3.2 堆積速度と堆積年代

東京湾の湾中央 G79-10 地点より MA-L 型採泥器を使い S79-2 より MA-M 型を使って底泥を柱状に採取した (第3図)。第1表に柱状試料中の鉛-210放射能と間隙率を示した。G79-10の²¹⁰Pbの放射能の強さは深さとともに減少しているが一定値すなわちバックグラウンド値に達していない。他の試料からバックグラウンド値は約 0.6 ± 0.1 dpm/g であることがわかっているので鉛-210の測定値から 0.6 を差し引いて 過剰鉛-210の放射能の強さとした。第4図に示すように 積算重量に対して過剰鉛-210をプロットし 直線の傾きより堆積速度を求めた。G79-10では 0.27 g/cm²/年の堆積速度である。この試料の平均的な間隙率を0.84と仮定すると 3-5式より 0.66 cm/年の堆積速度となる。ある深さの泥の堆積年代は その深さまでの堆積粒子の積算重量を 堆積速度で割って得られる年数を 試料採取年から引くことによって求められる。たとえば G79-10の試料の 30cm までの積算重量 7.6 g/cm²を 堆積速度 0.27 g/cm²/年で割ると 28年となる。試料採取年代の1979年から 28年を引くと 1951年となり この値が 30

第1表 東京湾の G79-10 における柱状底泥中の鉛-210と間隙率

Depth (cm)	Pb (dpm/g)	Porosity
0-3	13.41 ± 0.44	0.933
3-8	12.40 ± 0.19	0.920
8-13	7.00 ± 0.16	0.899
13-18	10.40 ± 0.17	0.901
18-23	8.20 ± 0.19	0.886
23-28	6.91 ± 0.18	0.893
28-33	5.77 ± 0.15	0.878
33-38	5.11 ± 0.11	0.845
38-43	3.72 ± 0.12	0.839
43-48	3.42 ± 0.09	0.829
48-53	2.68 ± 0.08	0.845
53-58	2.18 ± 0.12	0.831
58-63	2.05 ± 0.11	0.828
63-68	1.84 ± 0.09	0.826
68-73	1.38 ± 0.12	0.827
73-78	1.24 ± 0.10	0.824

cm の深さの底泥の堆積年代である。第5図に 堆積年代を示した。

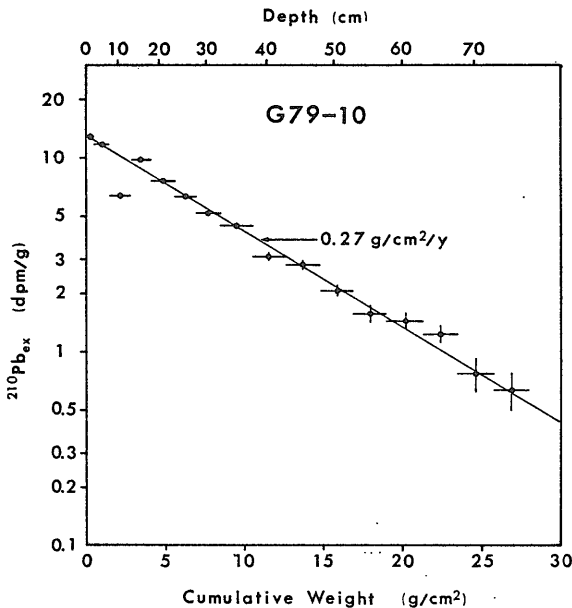
4. 底質汚染

第5図は 前述の放射性鉛による堆積年代測定が行われた東京湾中央部 G79-10 の底泥中の元素含量の鉛直分布である。図の右側に堆積年代を記した。

4.1 重金属汚染

亜鉛(Zn) クロム(Cr) 銅(Cu) 鉛(Pb) およびニッケル(Ni) の微量重金属元素の含量は 40 cm の深さより徐々に増え 20~30cmの深さから急増し 15cmの深さで極大となっている。これを年代的にみると 1930年頃より重金属汚染がはじまり 戦後の1950年頃より急激に汚染が進み 1967年前後にピークに達して それ以降は減少して今日に至っている。50 cm 以深の底泥中の含有量の一定値は 自然状態の値であり 50 cm 以浅では 自然量に人為的負荷量が上積みされている。アルミニウム(Al) 鉄(Fe) カルシウム(Ca) マグネシウム(Mg) 等のような地殻構成の主要金属元素は 深さに対して変化せず 人為的影響はみとめられない。微量金属元素は 主要金属元素とことなり その人為的利用と環境への放出が 容易に環境濃度を高め 汚染・公害に至るといえる。

ところで 海底に堆積した重金属の化学形態によっては 泥から再溶出したり 底泥中で移動して 底泥中の重金属の鉛直分布が 汚染の歴史に直接対応しないことがあろう。東京湾の底泥では 表層数mmに酸化層が

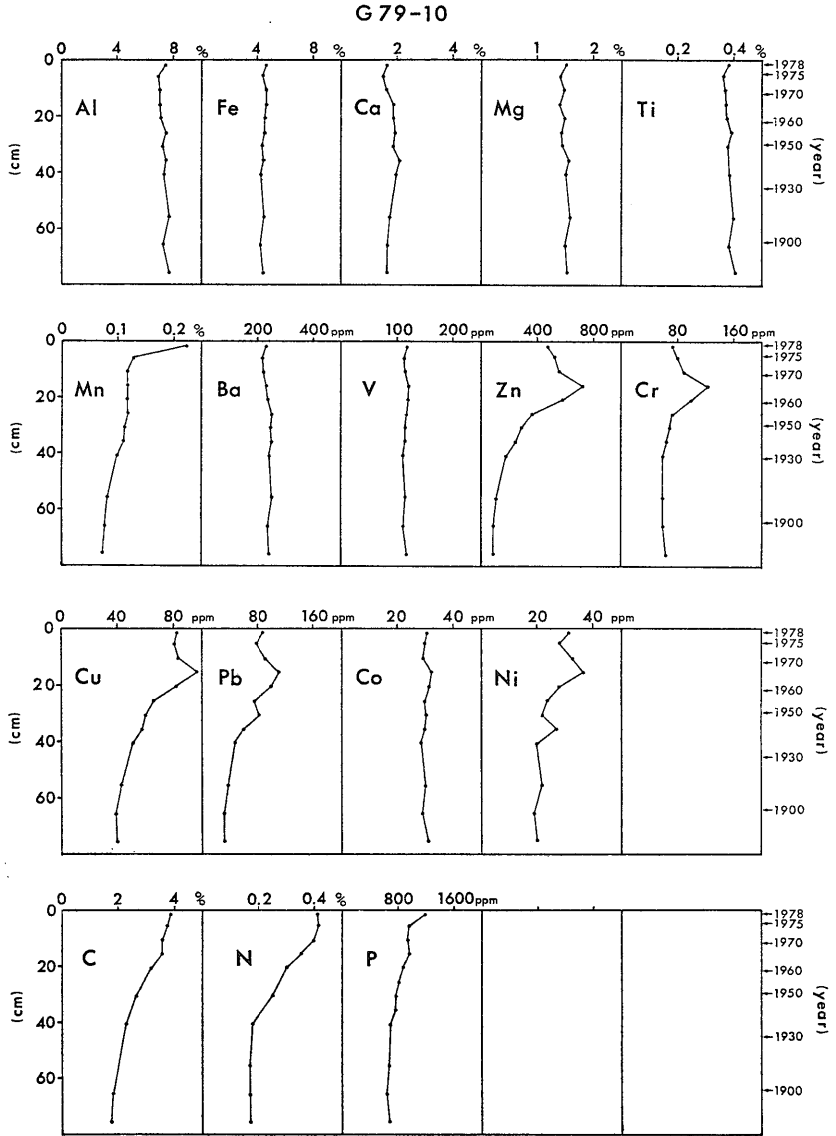


第4図 東京湾 G79-10 地点より採取された底泥中の鉛-210の鉛直分布 直線の傾きから 0.27 g/cm²/年の堆積速度が得られる

みとめられるほかは 嫌氣的 (無酸素状態) で硫酸イオンが還元されて 硫化水素が発生している。硫化水素は 重金属と反応して硫化物として沈殿する。東京湾底泥中の人為的に供給された銅 亜鉛等の重金属の大部分は 硫化物相を形成しており⁽⁸⁾ 重金属の硫化物の多くは 難溶性のため 重金属が底泥から溶出したり 底泥中で再移動する可能性はマンガンを除いて少ない⁽⁹⁾。

4.2 有機汚染

最近の東京湾の汚濁は 富栄養化によるプランクトン異常増殖 (赤潮) によるものである。有機粒子の生産量の増大は 当然 有機物の沈積量の増加をもたらし 有機物の分解によって底質環境を悪化させている。海洋のプランクトンの組成は 単に $(CH_2O)_{106} \cdot (NH_3)_{16} \cdot H_3PO_4$ と書き表わすことができる⁽¹⁰⁾。したがって 炭素 (C) 窒素 (N) およびリン (P) によって 赤潮等プランクトンの有機物の沈積量の指標とすることができる。第5図に底泥中の全炭素 全窒素およびリン含量の鉛直分布を示した。図から明らかなように 深さ40cmより徐々に増加して表面に至っている。有機物は 堆積後に分解をうけて無機化し 間隙水に溶けて底泥中を移動すると考えられるが その量はわずかと考えられるので 第5図の鉛直分布は 有機汚濁に対応するとみてよい。鉛-210による堆積年代からみると 1930年頃より増加の一途をたどって今日に至っている。50cm以深の一定値は 東京湾の自然値であり 50cm以浅では 自然値に有機汚濁による堆積量がうわずみされている。



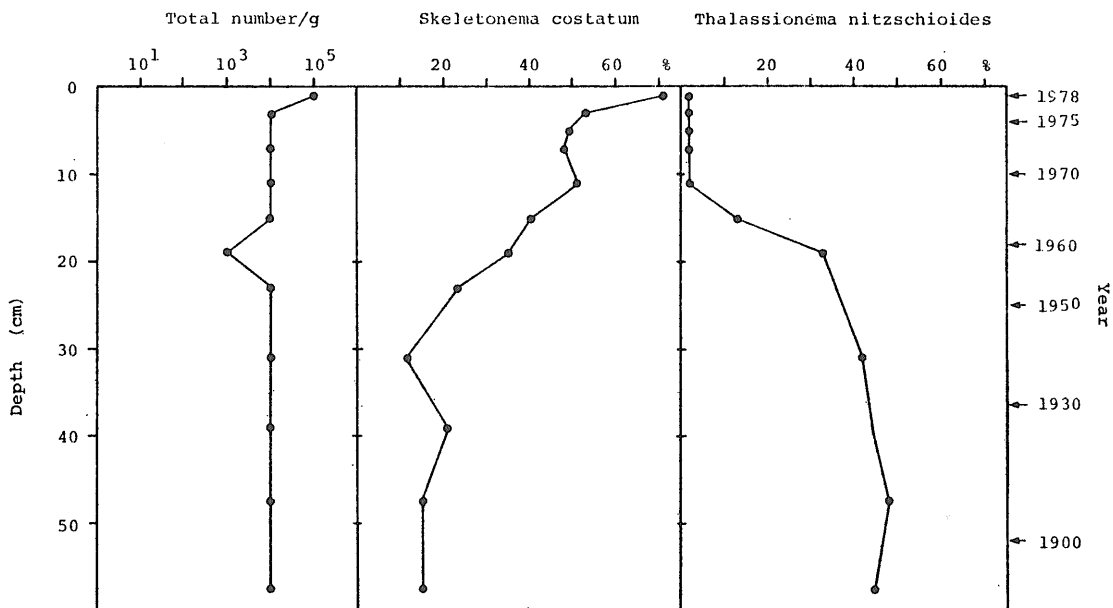
第5図 東京湾 G79-10 地点の底泥中の元素含量の鉛直分布 図の右側に鉛-210法より決めた堆積年代を記した

5. 生態系変化

汚染による水質・底質の変化は 海水や海底に生息する生物に大きな影響を与える。生物の遺骸が底泥中によく保存される珪藻と底生有孔虫について 汚染と群集変化との関係について 予察的な検討を行った。

5.1 珪藻

珪藻は 沿岸域では重要な植物プランクトンの1つとして認められている。これは珪藻が硝酸塩 磷酸塩 珪酸塩を消費して大增殖をするからであり また赤潮プ



第6図 東京湾 S79-2 地点の底泥中の珪藻遺骸の殻数と産出頻度の鉛直分布

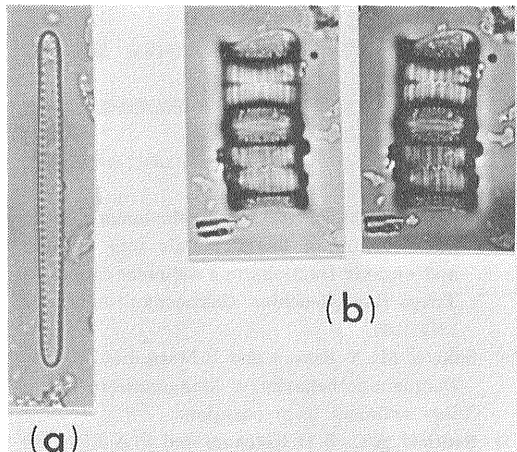
ランクトンの1つでもある。MA-M型採泥器を用いて東京湾中央部のS79-2より採取した試料について底泥の単位重量あたりの珪藻の殻数と主な珪藻の種別の産出頻度を求めた。第6図に示したように珪藻殻数は 10^4 個/gのオーダーで顕著な傾向は認められない。しかしながら *Skeletonema costatum* (Greville) Cleveの全個体数に対する割合は下層から上層に向かって著しく増加している。一方 *Thalassionema nitzschioides* (Grunow) Van Heurckの産出頻度は全く逆の傾向を示している。年代的にみると1950~60年を境と

して *Thalassionema nitzschioides* から *Skeletonema costatum* へと変化しており東京湾の富栄養化と関連づけられる。

5.2 底生有孔虫

前述のG79-10試料について5つの層準より底泥試料5~10gを採取し秤量したのち115メッシュ(125 μ)のフルイで水洗しフルイ上の残渣について有孔虫分析を行った。内湾の有孔虫には殻のうすいものや砂質殻のこわれやすいものが多いがこの試料では有孔虫の保存はよくほぼ十分な数の有孔虫が得られた。

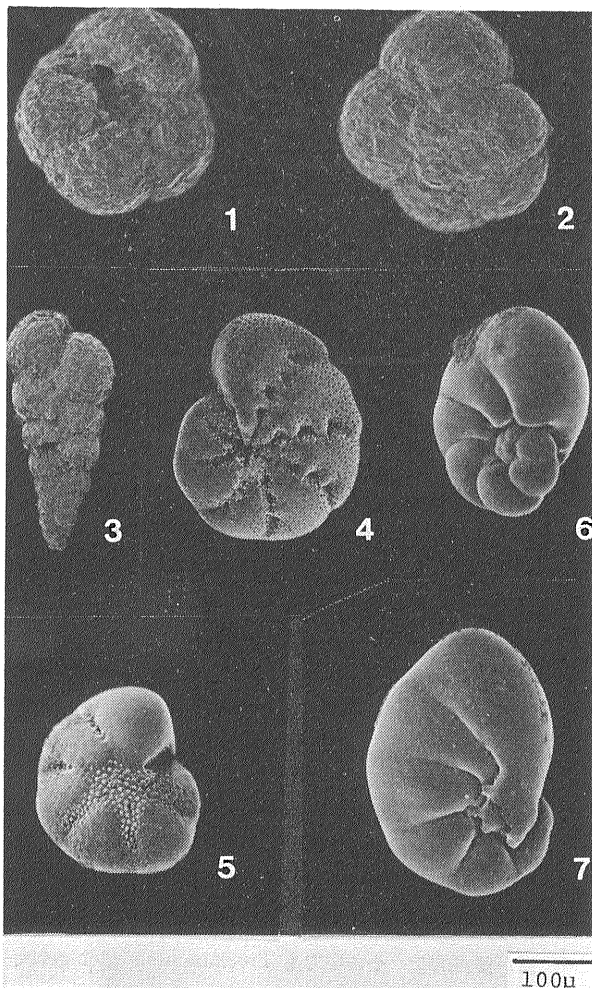
第2表に殻の性質により群集わけしその産出量を示した。底生有孔虫 (benthonic foraminifers) の総個体数は25~54個体/g・乾藻泥で比較的多い。底生有孔虫の群集は上層と下層で大きく異なっている。下層ではガラス状石灰殻 (hyaline calcareous form) の有孔虫が優占的でその中で *Nonionella miocenica stella* が50~70%を占める。*Nonionella miocenica stella* は上層にもみられるが産出頻度は15%程度である。一方上層では砂質殻 (arenaceous form) の有孔虫が優占的でその中でも *Trochammina globigeriniformis* が圧倒的に多い(第8図)。磁器質殻 (porcelaneous form) のものは下部から上部に向かって減少するがその産出量は低い。底生生物である貝形虫 (ostercoda) も底生有孔虫の鉛直変化に対応して著しい産出量変化を示す。底生有孔虫や貝形虫の変化は30~



第7図 東京湾底泥中の珪藻遺骸の顕微鏡写真 (1)は *Thalassionema nitzschioides* (2)は *Skeletonema costatum* (写真は国立科学博物館の谷村好洋氏による)

第2表 東京湾 G79-10 における底生有孔虫の産出量

Depth (cm)	Estimated age (year)	Benthonic foraminifers (number/g)			Ostracoda (number/g)
		Arenaceous form	Hyaline calcareous form	Porcelaneous form	
3-8	1977-1973	24.2	15.5	0.2	4.0
18-23	1964-1959	20.5	5.0	0.1	7.7
33-38	1948-1940	17.0	36.5	0.7	32.9
43-48	1933-1925	4.8	46.5	1.7	25.2
68-73	1893-1885	2.3	36.9	3.5	24.7



第8図 東京湾 G79-10 地点の底泥 3~8 cm の層中の底生有孔虫遺骸の走査電顕写真 (1) (2)は *Trochammina globigeriniformis* (砂質殻) (3)は *Textularia* sp. (砂質殻) (4)は *Elphidium* sp. (ガラス状石灰殻) (5)は *Buccella frigida* (ガラス状石灰殻) (6) (7)は *Nonionella miocenica stella* (ガラス状石灰殻)

40 cm を境におきている。これは 1940~1950の堆積年代に相当する。底質の重金属・有機汚染が1950年前後から急激に進んだことと関連づけることができる。

6. おわりに

調査・研究は緒についたばかりであるが 試料の分析 データ解析が進めば 内湾における汚染物質の循環のうちブラックボックスとして残されている堆積過程を解明することができよう。また 底泥による海域の水質・底質・生態系のモニタリングが可能となるであろうし 海域の望ましい姿に関する情報を得ることができよう。

参考文献

- (1) 松本英二・横田節哉 (1977) : 底泥からみた東京湾の汚染の歴史 地球化学 11 51-57.
- (2) 松本英二 (1979) : 底質からみた沿岸海域汚染の変遷. 地質ニュース 293 27-33.
- (3) 青木市太郎・木下泰正 (1976) : 柱状採泥器における試料防失装置. 実用新案登録番号 1343987.
- (4) 松本英二・青木市太郎 (1980) : 柱状採泥器. 実用新案登録出願番号 55-092002.
- (5) 木越邦彦 (1965) : 年代測定法. 紀伊国屋 東京 222 pp.
- (6) 松本英二 (1975) : ^{210}Pb 法による琵琶湖底泥の堆積速度. 地質学雑誌 81 301-306.
- (7) 松本英二・富樫茂子 (1980) : 噴火湾における堆積速度. 日本海洋学会誌 35 261-267.
- (8) Kitano, Y., M. Sakata and E. Matsumoto (1980) : Partitioning of heavy metals into mineral and organic fractions in a sediment core from Tokyo Bay. Geochim. Cosmochim. Acta, 44, 1279-1285.
- (9) Sakata, M., Y. Kitano and E. Matsumoto (1980) : Diagenetic behavior of Manganese in Tokyo Bay sediment in preparation.
- (10) Redfield, A. C., B. H. Ketchum and F. A. Richards (1963) : The influence of organisms on the composition of sea water. In, The Seas, Vol. 2, ed. by N. Hill, Wiley, London, pp. 27-77.