

2007 年度 修 士 論 文

東京湾湾奥部における海底柱状堆積物の珪藻化石分析
Study on fossil diatom assemblages in sediment core of head of
Tokyo Bay

國 分 佑 太
Kokubun, Yuta

東京大学大学院新領域創成科学研究科
社会文化環境学専攻

目次

1 序論	pp.3
1-1 研究の背景	pp.4
1-2 既往研究	pp.5
1-3 本研究の目的	pp.6
2 現地観測	pp.7
2-1 目的	pp.8
2-2 サンプル採取について	pp.9
2-3 サンプル処理について	pp.13
3 分析手法	pp.15
3-1 含水率・単位体積重量	pp.16
3-2 年代測定	pp.18
3-2-1 自然放射線強度測定の概要	pp.18
3-2-2 放射線強度の計算法	pp.18
3-2-3 Pb-210 法の原理	pp.21
3-2-4 Cs-137 法の原理	pp.24
3-3 粒径分析	pp.25
3-4 CN 比	pp.26
3-5 粘土鉱物組成	pp.28
3-5-1 粘度分離処理	pp.28
3-5-2 XRD 分析	pp.31
3-6 珪藻群集解析	pp.34
3-6-1 乾燥	pp.34
3-6-2 有機物除去	pp.34
3-6-3 鉱物除去	pp.34
3-6-4 プレパラート作り	pp.36
4 底質分析結果	pp.37
4-1 含水率・単位堆積重量	pp.38
4-2 年代測定	pp.40
4-3 粒度分析	pp.44
4-4 CN 比	pp.49

4-5	粘土鉱物組成	pp.53
4-6	CN と粒径の関係	pp.67
5	珪藻群集解析	pp.73
5-1	本研究で確認された珪藻種	pp.74
5-2	存在比で見る珪藻種変遷	pp.76
5-2-1	市川船橋における珪藻種変遷	pp.76
5-2-2	千葉灯標における珪藻種変遷	pp.78
5-2-3	湾中央における珪藻種変遷	pp.80
5-3	化石殻数で見る珪藻種変遷	pp.83
5-4	CN 各項目と珪藻群集変遷の関係	pp.87
5-5	粒径と珪藻群集変遷の関係	pp.92
6	考察	pp.95
6-1	淡水性種出現と湾内での河川水の影響について	pp.96
6-2	沿岸性種・浅海性種と赤潮発生範囲の関係	pp.98
6-3	まとめ	pp.99
7	引用文献	pp.101
	謝辞	pp.103

1. 序論

1-1 研究の背景

珪藻は植物プランクトンの一種で、海水・汽水・淡水に存在し、生息形態も浮遊性種・底生性種・付着性種が存在する。水柱に溶解した栄養分と太陽光を用いて光合成し、細胞分裂をして増殖する。死亡後海底に沈殿し、殻が化石として堆積物中に保存される。また、種によって主に存在する生息水域が大別できる。珪藻種の構成や化石殻数を調べることで、水塊の由来や水域の栄養状態などについて読み取ることが出来る。堆積物中のコアサンプルにも化石として珪藻は存在しているので、珪藻化石の種変遷を調べることで、水質データが無い時代まで遡って環境状態を評価することが出来ると言える。

東京湾では沿岸地域や流入河川の流域における都市化・工業化の進展に伴い、陸域からの負荷が増えて、環境汚染が増大していった。東京湾のように閉鎖性の強い内湾域においては、陸域からの負荷の大部分が内湾に留まり湾内の富栄養化につながっている。東京湾の富栄養化は1950年代後半から1970年代初頭にかけて、特に1960年代初頭から1970年代初頭にかけての約10年間に急激に進行した(宇野木・岸野, 1977; 高田, 1993; 野村, 1995)とされている。湾内の富栄養化は植物プランクトンの異常発生(赤潮)や貧酸素水塊の発生や湧昇(青潮)などの環境悪化現象を引き起こす原因となる。東京湾で夏季に発生する下層の貧酸素化は、約20年来、改善傾向が認められないという研究結果も出ている(安藤ら, 2005)。

また、東京湾およびその流域では、現在から遡って100年の間に、実に様々な環境の変化が起きた。東京港、横浜港等の大規模な港の建設、大型船の航路確保のための浚渫、商業・工業利用のための埋立てなどと言った地形的変化(遠藤, 2004)、外洋や河川からの流入量変化など、様々な要素が東京湾の水質環境に影響を与えている。

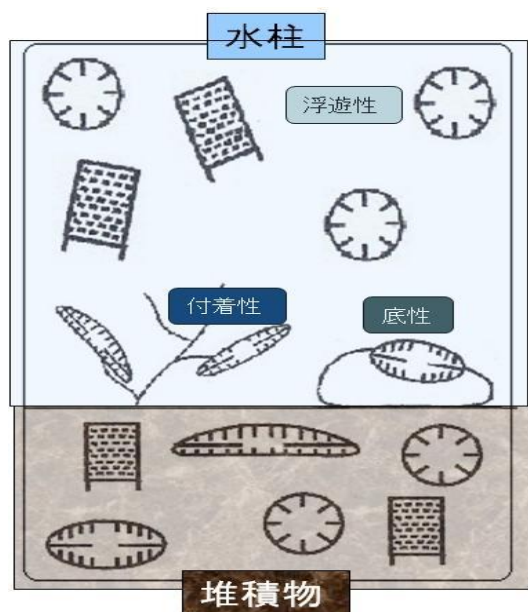


図 1-1 水柱での珪藻の生態と堆積物中に保存される珪藻化石

1-2 既往研究

1900 年代から 1940 年代までの東京湾には調和の取れた生態系が存在し、植物プランクトン群集は種数が多く均衡性の高い、多様性の高い構造であった（野村，1998）．しかし、この研究では文献をレビューして東京湾の変遷を追っているため、戦中戦後の資料が存在しないために、時系列が途切れてしまっている．また、戦前の文献には現在のように数値データが載っていないため、時代を遡る程定量的な議論が出来なくなっている．そこで、過去に遡って定量的な議論をするために環境状態を調べる方法の一つが、海底の柱状コアを採取して分析する方法である．東京湾において柱状海底堆積物を分析して、水質環境を復元させる研究は過去にいくつか例がある．松本(1983)は鉛 210 法による底質コアの年代推定より東京湾全域の底泥堆積速度図を作成している．横浜港にて渦鞭毛藻シストの群集解析を行っている松岡(1999)の論文では、時系列で渦鞭毛藻シストの群集を追ひ、独立栄養種の割合増加と富栄養化の関係性について考察している．ただ、プランクトン群集と並行して、堆積物から他のデータを取っていないため、東京湾における栄養塩濃度以外の環境因子とプランクトン群集の関係性については未知の部分が多い．

有明海では横瀬ら(2005)が、宇和海北灘湾では天野ら(2004)が、海底堆積物の柱状コアを植物プランクトン化石の群集解析を軸に、粒径分析、元素分析、年代測定など多角的に分析している．東京湾でもこのような調査が必要であると言える．

1-3 本研究の目的

既往の研究で述べた様に、東京湾の環境変遷についてははっきりと解明されていない部分があるというのが現状である。特に環境変遷の生物的側面については議論の余地があり、植物プランクトンの種変遷が環境因子からどのような影響を受けているかは未知である。

よって、沿岸部での環境変化が大きい湾奥地点を中心に海底堆積物を採取し、そこに保存された珪藻群集の時系列変化を調べて、最近 100 年の東京湾の環境変遷をどのように反映しているか考察するのが本研究の目的である。

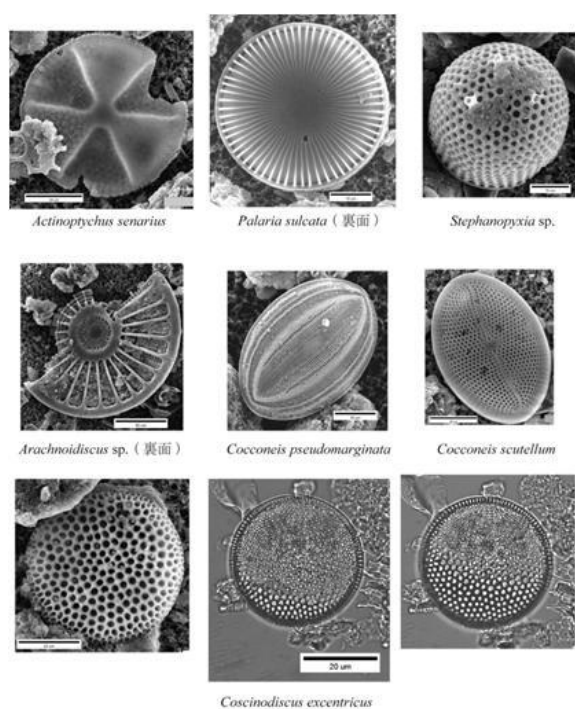


図 1-2：本研究で発見された珪藻種の中で全体の形が残っていたものを写真に撮った

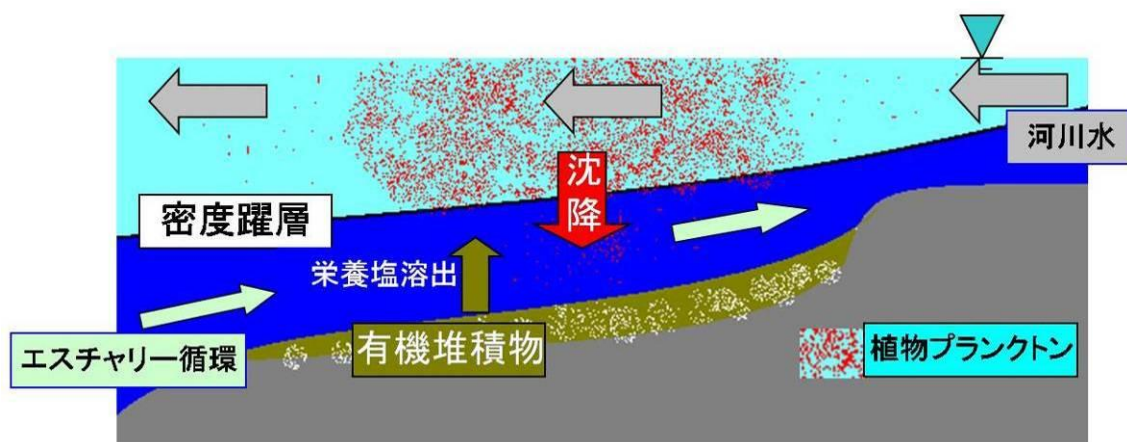


図 1-3：湾内環境モデル図

2. 現地観測

本章では東京湾における現地調査について述べる。コアサンプルを採取・分析し、100 年程前から現代まで東京湾がどのような物理的・化学的・生物的環境変遷を辿ってきたかを考察するためには、湾奥、湾中央、沿岸部の最低三地点の情報が必要である。また、浚渫や埋立ての影響を受けている地点だと、堆積物が攪乱されていて年代測定が上手く行かない可能性があるため、それらの影響がない地点でサンプル採取する必要がある。本研究でサンプル採取を行った 3 地点は上に挙げた条件を基準に選んだ。

2-1 目的

東京湾は主に人間活動による陸からの負荷によって水質が富栄養状態になっているが、水質は天候、河川水、外洋との海水交換などにより時空間的に大きく変動する。また、水質の変化は生物環境にも大きな影響を与える。

その一方で、海底の堆積物はその時々平均的な水質を半反映・保存しているため、長期間の変化を追跡するのに適している。ただ、堆積物は湾内に水平的に一様に堆積するわけではない。堆積速度は堆積粒子の海底への供給量と供給された粒子の再移動量の差として与えられる。供給量が多くとも再移動量が同様に多ければ実質的に堆積はしていないことになる。このような底質の時間的変遷を解明するためには堆積物の柱状断面調査が必要となる。

そこで、東京湾においてコアサンプルを採取して、年代測定、粒径、CN 比、粘度鉱物組成、珪藻群集などを解析して、物理的環境・化学的環境・生物的環境の変遷を解明する。

2-2 サンプル採取について

・サンプリング地点

東京湾で定期的に水質調査を行っている千葉県の調査船きよすみに同乗して市川船橋沖，湾中央でのサンプル採取を，千葉県水産試験場の調査船わかふさに同乗して千葉灯標でのサンプル採取を行った．以下図 2-1 と表 2-1 に，サンプル採取地点と採取日時の詳細を示す．

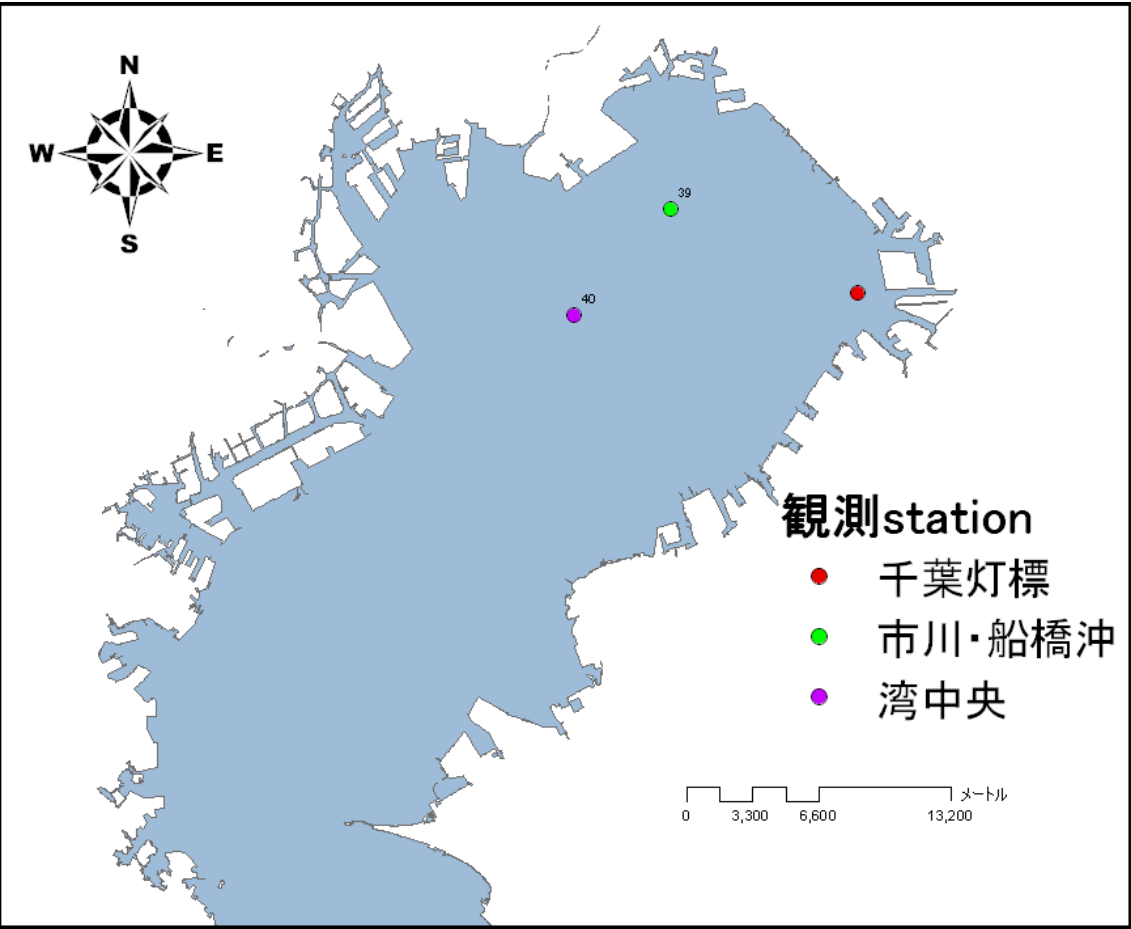


図 2-1 サンプル採取地点図

表 2-1 サンプル採取地点詳細

地点名	水深	サンプル採取方法	位置	地点の概要
市川船橋沖	9m	重力式採泥器	東経140° 04′ 24″ 北緯35° 33′ 54″	千葉県内では年間を通して，一番栄養塩測定回数が多い地点
千葉灯標	15m	ダイバー	東経139° 57′ 46.1″ 北緯35° 36′ 18″	千葉工業地帯の近くにある灯標．様々な水質データを毎日自動で測定している．
湾中央	16.4m	重力式採泥器	東経139° 54′ 20.2″ 北緯35° 33′ 15.9″	東京湾北半分のちょうど中央に位置している．

・ サンプル採取方法

千葉灯標ではダイバーによる潜水作業でのサンプル採取を行い、市川船橋沖と湾中央でのサンプル採取には、柱状採泥器を用いた。この採泥器はパイプが鉄製で、鉛の錘(15kg)がついており、パイプを内装する仕組みになっている。インナーパイプは長さ 1m の円形アクリルパイプ(内径 73mm)を使用した。船上のウインチから本体の上部にロープをつけ、水面近くまでおろし、制御落下方式で海底まで下ろした。着泥後自重でさらにつきささると考え、1 分間放置して引き上げた。図 2-2 は、サンプルを採取している風景である。左は、採泥器を引き上げている様子である。右は引き上げた後サンプルをパイプから取り出している様子である。

次にパイプを通じて海底の垂直方向の試料を柱状に採取する柱状採泥器の仕組みについて説明する。柱状採泥器は、パイプを地層中に貫入させる事により、底質をパイプ中に捕獲し、落下させないまま引き上げる事の出来る器具である。貫入機構として、重力型を採用した。重力型とは、柱状試料を収納するコアチューブと、荷重用の錘からなり、ワイヤーロープに吊り下げられながら、自重によって落下してゆくコアサンプラの運動エネルギーと位置エネルギーを利用して貫入させる方法である。

落下の仕方は、制動落下型を用いた。これはワイヤーロープにつながれたまま、ウインチの巻き下しのみによって制御される。この速度は、通常 1~3m/s 程度である。貫入の原動力はそのほとんどがコアラの運動エネルギーに負い、また、この運動エネルギーはコアラの平均質量と落下速度との積として得られるが、この程度の速度から大きな運動エネルギーを得るには、重量を大きくしなければならない。図 2-3 は採泥器の機構についての概略図である。

また、ダイバーによる採泥では、アクリルパイプを持ったまま海底に潜り、海底に到達したら、ダイバーの腕力によってパイプを貫入させ、その後ゴム栓によってパイプ上部に封をする。上端はゴム栓、下端は底泥によって密封されているため真空状態になっており、水中で垂直に持ち上げても底泥は漏れない。しかし、少しでも傾けると真空状態が崩れるので、垂直に持ち上げた後パイプ下端にもゴム栓を付ける。



A：採泥器を海面へ入れる．



B：引き上げたサンプルを外す．

図 2-2 サンプル採取風景

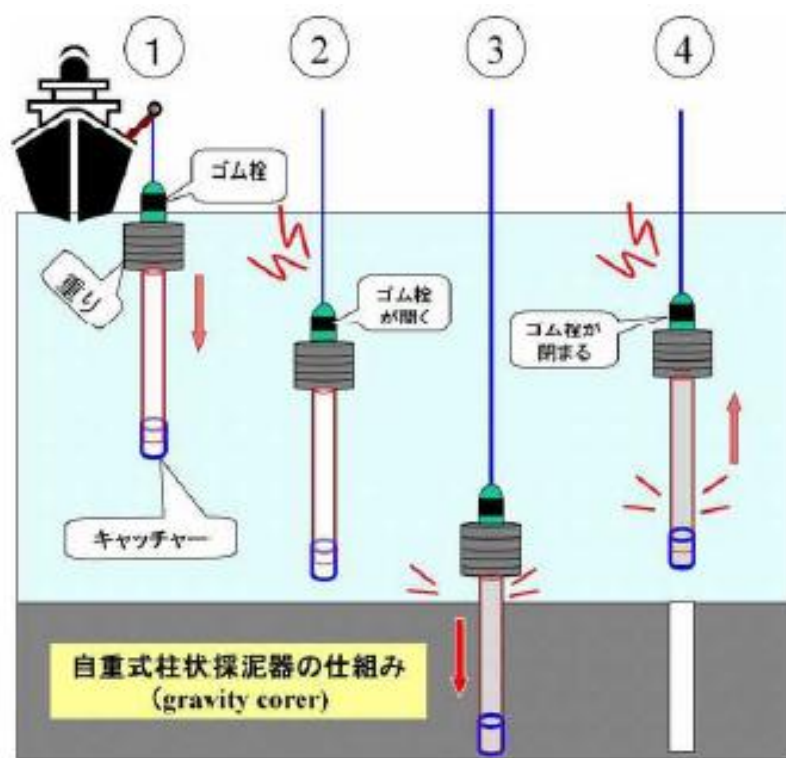


図 2-3 柱状採泥器仕組み



図 2-4 ダイバーが着水するところ



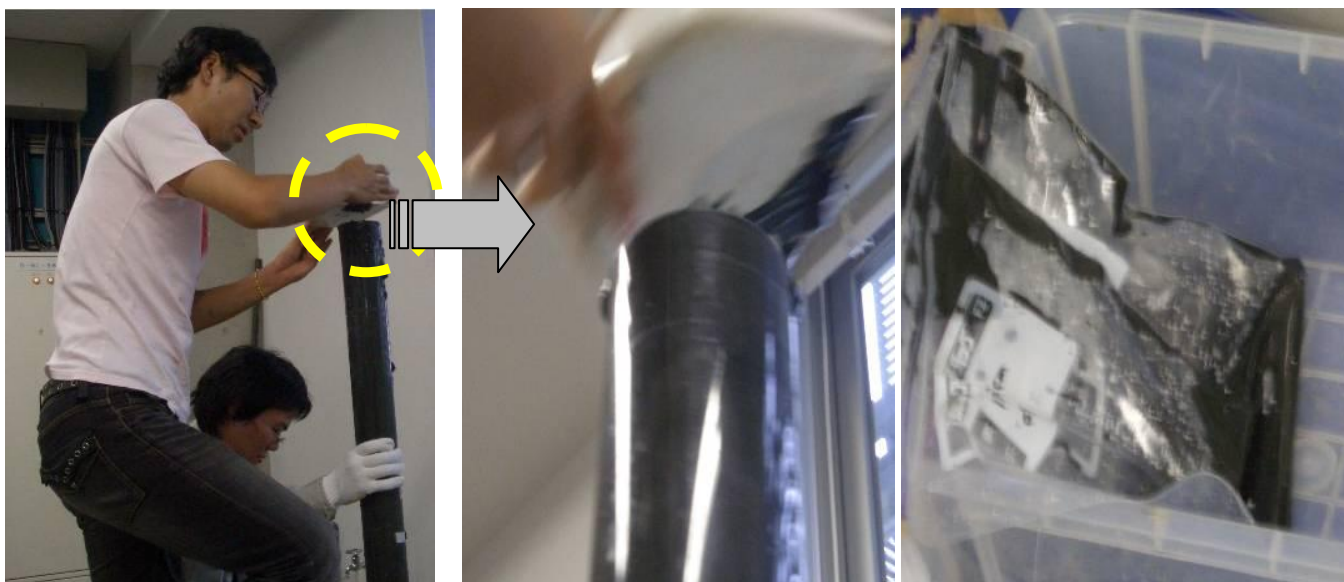
図 2-5 ダイバーにサンプル採取の道具を渡したところ

2-3 サンプル処理について

船上でサンプル採取を行い, 図 2-4 に示すように下船するまで鉛直を保つためビニールテープで固定して保管した. 下船後はアクリルパイプが丸ごと入る縦長のバッグに入れて, 鉛直を保つようにして抱えて持って, 徒歩と電車とバスで研究室まで帰った. その後, 厚さ 1cm の層を 5cm 間隔(0-1cm, 5-6cm という風に)で固いプラスチックの板を用いてサンプルを切断した. 切断したサンプルは密封可能な袋に入れて冷蔵庫にて保存した.



図 2-6 サンプル保管 コア立てにサンプルを垂直に保つためビニールテープで固定



A : 切断

B : 切断部アップ画像

C : サンプルを密封

図 2-7 切断の様子

3. 分析手法

本章では、東京湾三地点で採取してきた底泥コアサンプルを分析した目的や手法を述べる。3-1 では目的を含めた分析概要を、3-2 以降ではそれぞれ個別の分析手法について論じている。

3-1 含水率・単位体積重量

採取してきたサンプルの分析を行うためには、サンプルを乾燥させる必要がある。乾燥前後の体積・重量を測定する事でサンプルの含水率・単位体積重量を算出した。

まず、体積の目盛りが刻まれたプラスチック製のサンプル瓶に試料を移す。試料は水分を多く含むので、液面を水平にしてから体積を目視で確認する。その後、予めサンプル瓶自体の重さで電子天秤をキャリブレーションしてから、試料の入ったサンプル瓶を電子天秤に乗せて試料の重さを計る。計測の終わった試料は冷凍庫に入れて一度凍らせる。一昼夜掛けて凍結させたサンプルを、図 3-1-1 の凍結乾燥機で凍結乾燥させる。バキュームポンプでカバーの中の空気を排出して圧力が下げる事によって、水を固体から気体へと昇華させる。

乾燥終了後に、試料の重さを計る。湿状態から乾燥状態になった際に減少した重量は水の重量である。水の単位体積重量は 1g/cm^3 なので、次式のように重量の変化量から体積の変化量も割り出せ、乾燥状態の試料の体積を導ける。

$$Vd = Vm - (Wm - Wd) \times 1 \quad (3-1)$$

Vm : 湿状態の体積(cm^3)、 Wm : 湿状態の重量(g)、 Vd : 乾燥状態の体積(cm^3)、 Wd : 乾燥状態の重量(g)である。含水率は次式のようにして求める。

$$v = \frac{Wm - Wd}{Wm} \times 100 \quad (3-2)$$

v : 含水率(%)である。また、乾燥状態での単位体積重量は次式のようにして求める。

$$\rho = Wd / Vd \quad (3-3)$$

ρ : 単位体積重量(g/cm^3)である



図 3-1-1 凍結乾燥中のサンプル

3-2 年代測定

46.5keV(^{210}Pb)と放射率 84%の 661.6keV(^{137}Cs)の γ 線を検出することにより放射線強度を測定し、堆積物層毎の年代を算出した。 ^{210}Pb は、半減期 22.3 年であり、自然の大気中に一定の割合で存在するため、攪乱が起これば堆積傾向が続けば地層が深くなるに従って放射性強度が減衰していくことになる。また、 ^{137}Cs は、半減期 30 年の放射性核種であり、チェルノブイリ原子炉爆発が起こった 1986 年と核実験が世界で最も行われた 1963 年に放射線強度のピークが明らかにされている。そのピークからの減衰の仕方を追っていけば、年代測定をする事が可能になる。測定器は、 γ 線検出器(米国 ORTEC 社製, GMX29 HP-Ge)と SEIKO EG&G 社製の Spectrum Navigator を用いた。

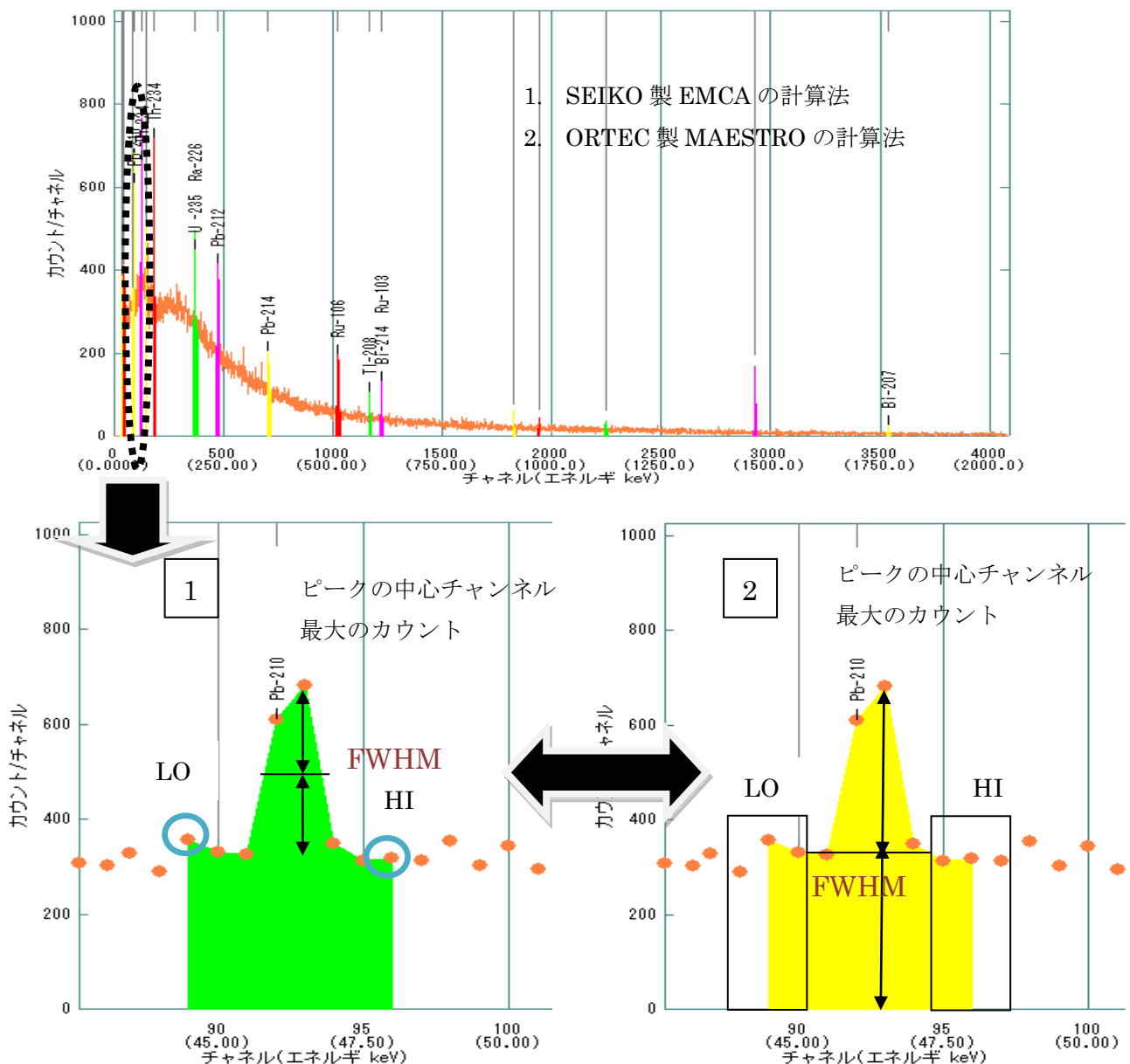
測定手順として、各試料の質量をアクリル製の専用容器に入れて測定し、その後容器に合わせて整形してから、1 サンプル 24 時間の測定を行った。試料の重さは 2g~20g である。

3-2-1 自然放射線強度測定の概要

年代測定では、測定によって得られた年代数値と実際の堆積物の年代との対応を的確に行うことが、最も重要なポイントである。ただ、人為的な改変(埋立や浚渫等)がある場所では、堆積物の攪乱が激しく、年代測定をしてもきちんとした年代数値が出てこない危険性がある。よって本研究では、東京湾において埋立てや浚渫の影響がないであろう地点で採泥を行い、100 年以下の年代測定において一般的に用いられる Pb-210 法を用いた。並行して ^{137}Cs 法でも年代測定を行い、Pb-210 法と ^{137}Cs 法で年代測定の整合を試みた。 ^{137}Cs 法とは、セシウムが検出される最深地点を核実験が始まった 1954 年、ピークを世界で核実験が最も多かった 1963 年、もう一つのピークをチェルノブイリ原子力発電所の事故が起きた 1986 年として、この三つの基準点から年代を測定する方法である。さらに、放射線強度測定のみならず、物理・化学的要素の項目も測定することで、堆積物の年代を総合的に判断することが出来る。

3-2-2 放射線強度の計算法

計算法は、ピークサーチを行って発見されたピーク中心を計算するとともに、ピーク面積を計算する。その計算法には、ROI の開始・終了チャンネルを挟んで 3 点を使ったネット評価を行い、そのネットピークカウントに対する FWHM(半値幅)を計算する SEIKO 製 EMCA 計算法を用いた。以下にその計算法を示す。



※ROI(Region of Interest):関心領域では、マルチチャンネル波高分析器において開始チャンネルから終了チャンネルにわたって指定されたチャンネル領域をいう。

図 3-2-1 SEIKO EMCA 計算法, ORTEC MAESTRO 計算法の概要

SN 測定器による自動計算法をまとめると、次の通りである。ピークの低チャンネル側のバックグラウンド領域は、ROI の開始チャンネルを挟み両側に 1 チャンネルずつ取った 3 チャンネルである。ピークの高チャンネル側のバックグラウンド領域は、ROI の終了チャンネルを挟み両側に 1 チャンネルずつ取った 3 チャンネルである((株)SEIKO EG&G, 2002)。 (図 3-2-1)

▼用語説明

◎ B = バックグラウンド面積

l=ROI の開始チャンネル

h=ROI の終了チャンネル

Ci=I チャンネルのカウント

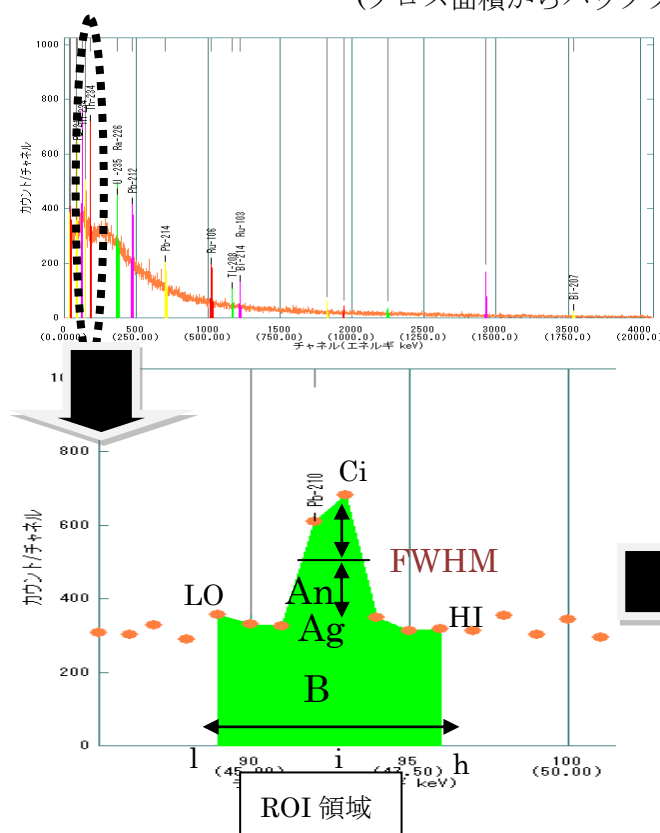
6=使用されるデータチャンネル数（高側，低側両 3 チャンネル）

◎ Ag = ROI のグロス面積

(ROI が設定されている全チャンネルの合計)

◎ An = ネット面積

(グロス面積からバックグラウンド面積を引いたもの)



バックグラウンド面積

$$B = \left(\sum_{i=l-1}^{l+1} Ci + \sum_{i=h-1}^{h+1} Ci \right) \frac{h-l+1}{6}$$

グロス面積

$$Ag = \sum_{i=l}^h Ci$$

ネット面積

$$An = Ag - B$$

図 3-2-2 SEIKO EMCA 計算法の図解

上記の SN 測定計算によるグロス面積からバックグラウンドで検出された値を引いたものが、ネット面積、つまり定量測定の総カウントである。定量総カウントを測定時間で割ると測定試料の全量(g)が 1 秒間に出すカウント数になる。またその値(count/s)を測定試料の全質量で割ると、堆積物の粒子 1g が 1 秒間に放出する放射線強度(count/s・g)を求めることができる。

3-2-3 Pb-210 法の原理

Pb-210 法による年代測定は、「日本海洋学会，1986」に定める原理に順ずるものである．地殻中に含まれるウラン ^{238}U から放射壊変で生成される ^{222}Rn は気体であるため大気中に放散される．大気中の ^{222}Rn の大部分は壊変して， ^{210}Pb となり，エアロゾルとして降水に取り込まれて再び地表に戻ってくる．降水となり湖水や海水に導入された ^{210}Pb は，水中の ^{226}Rn から生成してくる ^{210}Pb とともに，水中の懸濁粒子に吸着され，水中の懸濁粒子は水底に次々と積もっていく． ^{210}Pb および堆積粒子の底泥表面への沈降速度が一定で，かつ堆積後再移動しなければ，その底泥が表面にある時期を図 3-2-3 のように求めることが出来る．図 3-2-3 は， ^{238}U の放射性壊変系列である．

t 年前表面にあった底泥が，現在ある深さになるまでの t 年間で， ^{210}Pb が外部から川得られる事はなかったと考えられるので，放射性強度は減少するのみである．

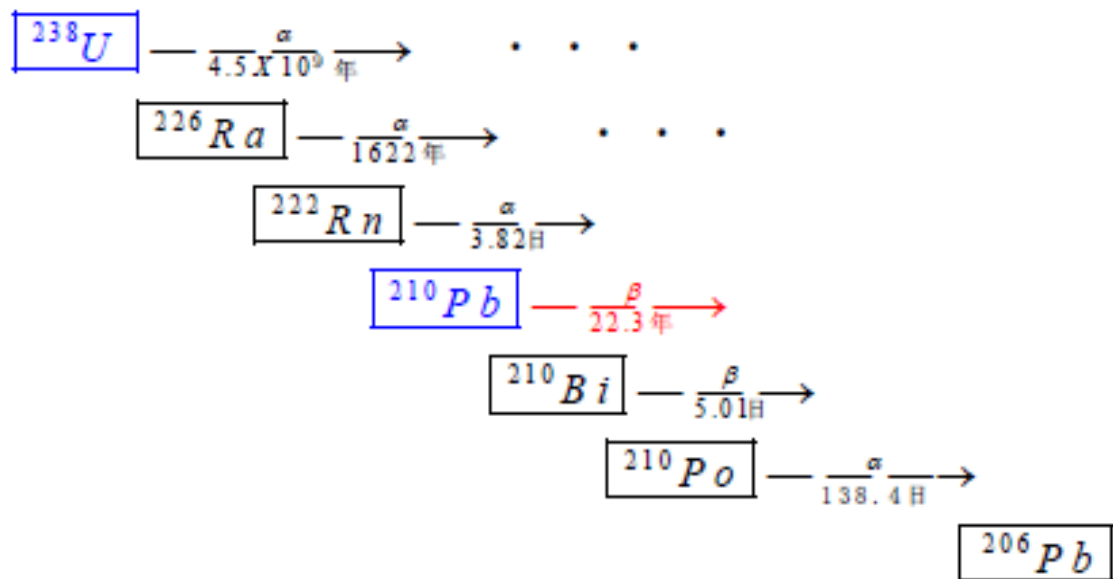


図 3-2-3 ウラン 238 の放射壊変系列

この底泥が t 年後に表面にあったときの ^{210}Pb 濃度は，現在表面にある底泥中の ^{210}Pb と同じであったはずである．式で示すと，

$$\frac{A(t)}{A(0)} = \exp(-\lambda t) \quad (3-4)$$

となる．ここで $A(0)$ は底泥表面での ^{210}Pb 濃度， $A(t)$ は t 年前に表面にあったある深さ $z(\text{cm})$ の底泥中の現在の ^{210}Pb 濃度である． λ は ^{210}Pb の壊変定数で半減期の 22.2 年を用いれば

$$\lambda = \frac{0.693}{22.2} (\text{year}^{-1}) \quad (3-5)$$

となる.

ただし t は現在から数えた年数である. 式(3-4)の右辺を測定して求めれば実際には ^{210}Pb および堆積粒子の底泥表面への沈降速度には多少の変動が考えられるので, 底泥中での ^{210}Pb の詳細な鉛直分布を測定して平均的な堆積速度を求め, 堆積年数を決定する.

平均堆積速度を $s(\text{cm/year})$ とすれば式(3-5)は,

$$\frac{A(t)}{A(0)} = \exp\left(-\frac{\lambda t}{s}\right) \quad (3-6)$$

で表せる.

ところで, ある深さの堆積物は, 上に降り積もった堆積物により, 間隙水が搾り出されて圧縮される. すると, 堆積速度 s は深くなるにつれ減少する事になる. この堆積速度の値に対する圧密の影響は, 単位面積当たりの堆積粒子の平均重量堆積速度 $w(\text{g cm}^{-2} \text{ year}^{-1})$ を考える事により除かれる. 底泥表面から深さ $z(\text{cm})$ までの単位面積当たりの堆積粒子の体積重量深度を $W(\text{g/cm}^2)$ とすれば, 深さ z における ^{210}Pb 濃度 $A(w)$ は式(3-6)より,

$$A(W) - A(\infty) = \{A(0) - A(\infty)\} \exp\left(-\frac{\lambda t}{s}\right) \quad (3-7)$$

$$W = \int_0^z (1 - \phi) \rho_s dz \quad (3-8)$$

となる.

ここでは ϕ は底泥の間隙率, ρ_s は堆積粒子の密度, $A(\infty)$ は堆積粒子の高山粒子中に含まれる ^{210}Pb 濃度であり, 通常 ^{210}Pb 濃度が一定値に達する深さでの値を取る.

$A_{ex}(W) - A_0(\infty)$ の値を過剰 ^{210}Pb と呼び, $A_{ex}(W)$ をプロットし, 直線の傾きより平均堆積速度 w が求められる. W/w より堆積年数 t が決定される. w と s の間には,

$$w = s(1 - \phi) \quad (3-9)$$

の関係がある.

本研究では, 上記の原理の基測定を行う. ^{210}Pb は β 崩壊に伴って, 放出率 4% で 46.5keV の γ 線を放出する. γ 線は物質への透過力が強いので, 堆積物を容器に入れたまま非破壊で測定できる. ただ, 低エネルギーまで測定可能で, 十分な遮蔽体をもった特別の γ 線検出器が必要である.



図 3-2-4 放射線強度測定器(米国 ORTEC 社製 GMX29PHP-Ge 検出器)
手前にあるグレーの容器は測定時に必要な液体窒素を入れるものである.



図 3-2-5 左：測定用のアクリル製容器とその中に封入された試料
右：放射線強度測定器を制御する PC

3-2-4 Cs-137 法の原理

Cs-137 法は、大気圏原子爆実験により地球上に放出された半減期 30 年の人工放射性核種である。1954 年のアメリカによるビキニ環礁での水爆実験に始まり、1963 年 7 月に米英ソ 3 カ国の部分的核実験停止条約が成立するまで、大気圏内の核実験が続行され、大量の放射性物質が地表に降下してきた。

図 3-2-6 に東京における ^{137}Cs の年間降下量の推移を示した。図から読み取れるように、1956 年の水爆の高空爆発実験から降下量が増大し、1963 年にピークとなり、1967 年まで減少を続けた。1986 年にはチェルノブイリ原子炉事故の影響を受けて、 ^{137}Cs の大きいピークが見られたが、翌年には事故前の平常レベルまで激減した。地表に降下した ^{137}Cs は、 ^{210}Pb と同様に海底に次々と積もり、堆積物の年代尺度となる。降下放射性核種のうち、 ^{137}Cs は量が一番多く、 γ 線を放出する測定も容易である。

^{137}Cs は、試料を乾燥して粉末にした後、プラスチック容器に密封する。プラスチック容器を γ 線検出器に密着し、放出率 84% の 622keV の γ 線を γ スペクトロメータにより測定する。 ^{137}Cs は試料の化学処理を行わず、容易に測定でき、 ^{210}Pb と同時に測定も出来る。

通常 ^{137}Cs が検出される最深の深さは核実験が始まった 1954 年、ピークは 1963 年とする。すなわち、この方法は、1954 年以降の堆積物、すなわち堆積物の表層にのみ適用が可能である。ところが、堆積物の表層はしばしば定生生物によって上下混合され、 ^{137}Cs の鉛直分布の形から表層混合の有無を見極め、適用することが必要である。

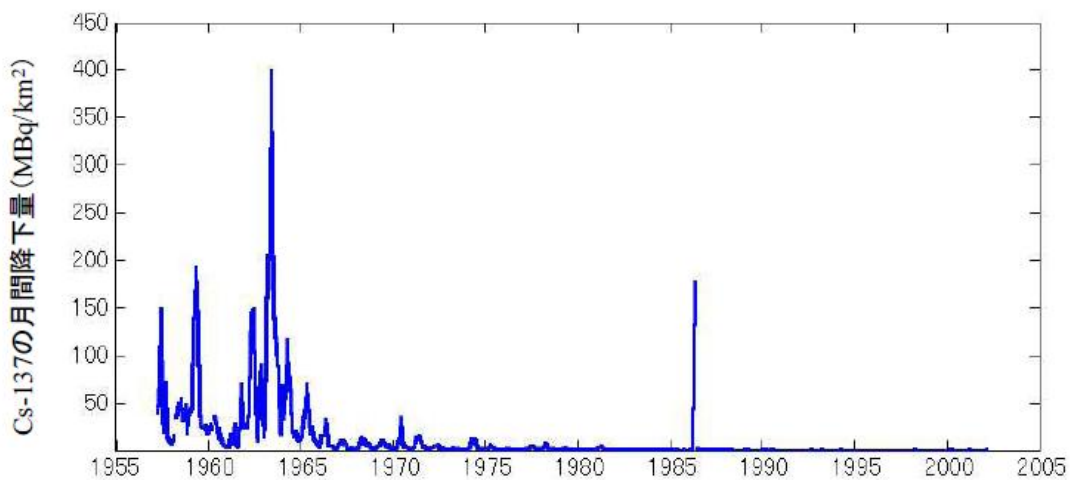


図 3-2-6 東京湾における ^{137}Cs の年間降下量の推移

3-3 粒径分析

粒径を把握する事は堆積物の研究にとって必須である。寒川喜三郎ら(1997)により粒子の侵食・運搬・堆積過程で重要な因子となると示されている。そこで、本研究では堆積物の粒子の大きさを特徴付けるため、粒子を直径に応じて分類される種類、すなわち砂、シルトおよび粘土に分ける事にする。

分析には島津製作所(株)製 SALD-3000 製レーザー回折式粒度分布測定装置を使用した(図 3-3-1)。レーザー回折式粒度分布測定とは、粒子群にレーザー光を照射し、そこから発せられる回折・散乱光の強度分布パターンから計算によって粒度分布を求める方法である。粒子にレーザービームを照射すると、その粒子からは前後・上下・左右と様々な方向に回折・散乱光が発せられる光。回折散乱光の強さは、光が発せられる方向に一定の空間パターンを描き、これを光強度分布パターンという。光強度分布パターンは、粒子の大きさによって様々な形に変化することが知られていて、これを検出して解析することで、どれくらいの大きさの粒子がどれくらいの割合で含まれているか、すなわち粒度分布を求めることができる。

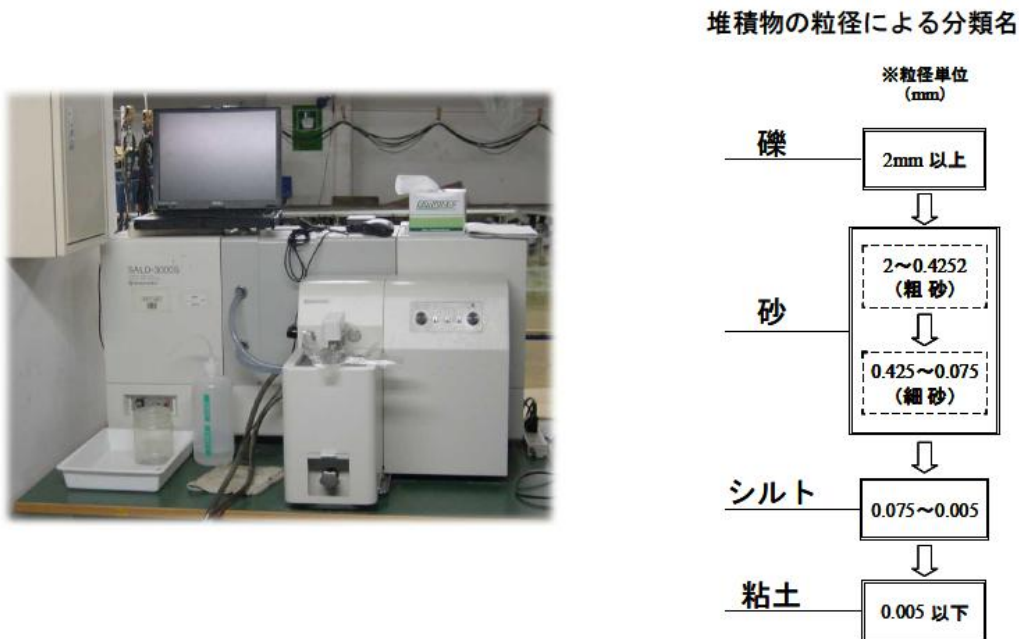


図 3-3-1 回折式粒度分布測定装置 SALD-3000S 及び粒径による分類(JISA1204)

3-4 CN 比

本研究では、堆積物から汚濁負荷の流入等による様々な影響を時系列的に調べるため、窒素、炭素、CN 比を測定した。測定方法は有機物の燃焼によって生じる二酸化炭素を測定する CN 分析が一般的である。

海洋堆積物中の有機物総量を知る方法として、有機物の燃焼によって生じる二酸化炭素を測定する CN 分析が一般的である。堆積物中の有機物総量を、燃焼によって生じる炭素量と窒素量を測定する事によって求められる。

この測定値は、有機炭素と窒素の比(CN 比)、ゆえに堆積物に残存する有機物の起源を論ずる場合に使われる(日本海洋学会編, 1986)。水中生物ではその比がほぼ 5~6 であるのに対して、陸上の生物(高等植物)では約 40 になることもある。水中生物の有機物が微生物分解を受けると、CN 比は増加し、陸上物質の場合は CN 比は低下するが、陸起源有機物と海起源有機物を区別するのに大体は使用できる。しかし堆積物中では、交換態や結合態の無機窒素が吸着して、CN 比が著しく低い値を示すものもあるので、結果の解釈には注意しなければならない。

分析には MT 型 CN コーダ(ヤナコ製)を用い(図 3-4-1)、全炭素量、全窒素量、無機炭素量、無機窒素量、有機炭素量、有機窒素量、CN 比を測定した。この装置は、試料内に含まれる炭素・窒素含有量および C/N 比を求める事が出来る装置で、1 回の運転につき 50 サンプルを分析することが出来る。分析に必要な試料量も 0.2g 以下と少ない。

測定の原理として、CN コーダは試料を燃焼し、燃焼ガスを完全酸化還元する燃焼部に通し、燃焼により生成された二酸化炭素、窒素ガスを搾取する定量ポンプ部で、二酸化炭素、窒素を測定する。使用する機械は、それらを測定する熱伝導度検出器(TCD)部およびこれらを自動的に制御する制御部より構成されている。分析は排気、燃焼、混合、記録のシーケンスの繰り返しにより進める。

燃焼シーケンスに試料をフラッシュ・ヒーターで 950℃まで加熱して分解させ、試料の分解により生成した燃焼ガスを約 850℃に加熱した銅還元層との接触により、水、二酸化炭素、窒素酸化物、窒素などにする。試料中のハロゲン、硫黄と水分はそれぞれサルフィックスと水吸収管により除去される。記録シーケンスに燃焼ガスが一定速度で還元路を経て TCD に送り込まれる。この時、燃焼ガスは 550℃に加熱された還元銅により、過剰な酸素の除去及び窒素酸化物の還元が行われ、二酸化炭素、窒素になる。TCD の検出素子はホイートストンブリッジを構成しており、二酸化炭素と窒素それぞれの濃度に比例した不平衡電圧が得られる。この不平衡電圧がインターフェースを介してシグナルとして出力される。



図 3-4-1 MT700 型 CN コーダ

3-5 粘土鉱物組成

土壌や堆積物の理化学的性質は、それが含む粘土好物の量と種類によって大きく影響される。したがって、粘土鉱物の同定は、土壌や堆積物の特性、母材の判定、風化過程を研究する上で重要な分析項目の一つである。本研究では第四紀試料分析法(1993) I.土壌堆積物編の 2.2 鉱物組成の同定の記述に従って処理を行った。

国際土壌学会は、直径が $>2, 2-0.2, 0.2-0.02, 0.02-0.002, <0.002\text{mm}(<2\mu\text{m})$ の土粒子をそれぞれ礫、粗砂、細砂、シルトおよび粘土と分類命名した。したがって、土壌や堆積物の粘土鉱物組成を調べるために、以下に示す手順で堆積物中の粘土を水中で完全に分散させ、粘土粒子を分離採取した。

3-5-1 粘度分離処理

・有機物処理

凍結乾燥させた試料($<2\text{mm}$)を 200ml のビーカーにとり、6%過酸化水素水を加え、はじめ室温で、次に徐々に加熱して、有機物を分解する。腐植の暗色がなくなるまで少量の 35% 過酸化水素水を加え、分離を反復する。

・脱鉄処理

有機物分解した試料約 5g を水洗後、遠心分離によって得られた沈殿部に 0.3M クエン酸ナトリウム水溶液 40ml と 1M 炭酸水素ナトリウム 5ml を加える。80℃まで加熱し、約 1g のハイドロサルファイトナトリウム($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$; ジオチナイト)を加え、1 分間攪拌し、その後は時々攪拌しながら、15 分間その温度に保つ(Tehra and Jackson, 1960)。遠心分離に掛けて上澄み液を捨て、この作業をもう一巡繰り返すと、約 1g の遊離鉄酸化物が除去できる。二巡目の作業が終わったらただちに遠心分離し、上澄み液を捨て、さらに 1M 塩化ナトリウムで 3 回洗浄する。

・超音波処理

堆積物中に火山灰の割合が多いと、安定凝集粒子が多く、完全に分散させることが困難な場合がある。そこで、超音波発振装置を用い、試料の懸濁液を約 20kHz の超音波で 10 分間処理する。有機物分解、脱鉄処理を行った試料を、粘土が分散し始めるまで、あるいは 3 回水で遠心分離により洗浄し、超音波処理に掛ける。

・粘土の分離採取

Stokes の式は、粒径 0.2mm 以下の場合に適用され、水中における粒子の沈降速度は次式によって示される。

$$v = \frac{1}{18} g r^2 (D - d) \eta^{-1} \quad (3-5-1)$$

ここで v : 粒子の沈降速度, g : 重力の加速度, r : 粘土粒子の直径, D : 粘土粒子の密度 (g/ml), d : 水の密度 (g/ml), η : 水の粘度 (poise) である。

Stokes の式が適用できる粒子の粒径は、その落下速度が上の仮定を満たす理想的な場合である。実際には、直径 $2\mu\text{m}$ の粒子が 20°C の水中を 8 時間に 10cm 沈降すると仮定して、それ以外の粒子の沈降速度は Stokes の式により、同温度で粒径の相違によってのみ異なるものとしている (船引・青峰, 1956)。

粘土及びシルト粒子が 10cm 沈降する時間と水温の関係より、粘土やシルトの沈降時間を読み取り、水面下 10cm 以内の部分でシリンジで反復採取する。

粘土部分をさらに細分すると、粒径ごとに粘土鉱物組成がかなり異なるのが普通である。一般には粘土部分一括あるいは粗粘土 ($2-0.2\mu\text{m}$) と細粘土 ($<0.2\mu\text{m}$) の区分がよく用いられる。

粒径別分離には、粒子の大きさによる水中沈降速度の違いを利用した沈降法により、まず粘土部分を分離する。次に遠心法により、細粘土を反復採取し、粗粘土と細粘土に分画するのが一般的である。遠心分離法で細粘土部分を採取する場合、次式により回転時間を求める。

$$t = \frac{63.0 \times 10^8 \times \eta \times \log_{10} R/S}{N^2 r^2 (D - d)} \quad (3-5-2)$$

ここで、 t : 回転時間 (分), η : 分散媒 (水) の粘度 (poise), R : 回転半径_I (回転状態における回転軸から沈降粘度表面までの距離, cm), S : 回転半径_{II} (回転状態における回転軸から懸濁液表面までの距離, cm), N : 回転数 (rpm), r : 粘土粒子の直径 (μm), D : 粘土粒子の密度 (2.50g/ml), d : 分散媒 (水) の密度 (1.00g/ml) である。

採取した粘土粒子は、飽和塩化ナトリウムを加えて凝集させる。

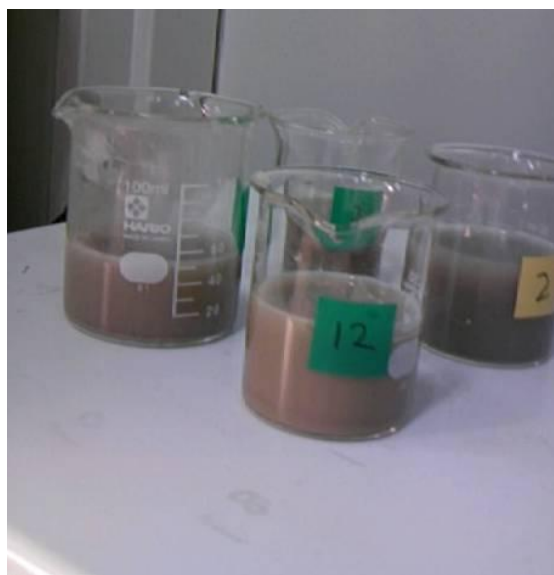


図 3-5-1 有機物分解を行っている様子．ホットプレートで加熱し，反応を促進している．



図 3-5-2 脱鉄処理を行っている様子．試薬を加えて鉄が分離させている状態．

3-5-2 XRD 分析

XRD とは X-Ray Diffraction の略語で、日本語で言うと X 線回折である。以下に分析の原理と手順を示す。

・原理

X 線は、真空中で電子を加速し、ターゲットに衝突させることによって発生する。発生した X 線を、試料に照射させると、散乱 X 線、蛍光 X 線、透過 X 線になる。XRD 分析は散乱 X 線を利用している（以後、散乱 X 線を X 線と呼ぶ）。なお、蛍光 X 線は元素の分析に、透過 X 線は医療機器に用いられている。

XRD で用いる X 線(一般的に $\text{CuK}\alpha$ 線の X 線が用いられ、その場合の波長(α)は $\alpha=1.5418$ Å である)は、その波長が原子やイオンの大きさと同程度であるため、結晶によって回折する。図 3-5-3 に Bragg の反射条件図を示した。面間隔 d の結晶構造に波長 λ の X 線がその結晶構造と角度 θ をなして入射されるとき、散乱角が入射角に等しければ、各散乱波の位相はそろっており、波は干渉し互いに強め合う。図 3-5-3 の格子面 I と II からの反射 X 線の位相がそろうのは、図中の $AB+BC$ 、すなわち $2d\sin\theta$ が波長の整数倍になるときであり、Bragg の条件($2d\sin\theta=n\lambda$)が満たされるときである。X 線は結晶により特定の方向に回折されるため、それにより間接的に d 値を求めることが出来、結晶構造の情報を得ることができる。

・測定

Rigaku の X 線回折装置 multiflex ASC10T で測定した。サンプルプレートにサンプルを詰めて、その後すり切り用のガラスを用いてサンプルの表面を均した。その際プレートからこぼれたサンプルは保存用の袋に戻し、すり切りガラスはエタノールを染込ませたキムワイプで拭いてサンプルのコンタミネーションを防いだ。表面を均したサンプルは 10 サンプルチェンジャーに乗せて、同様の作業をサンプル 10 個分繰り返す。サンプルをセットしたら、測定を開始する。1 サンプルにつき 1 時間掛かるので、10 サンプル測定終了までは約 10 時間を要する。

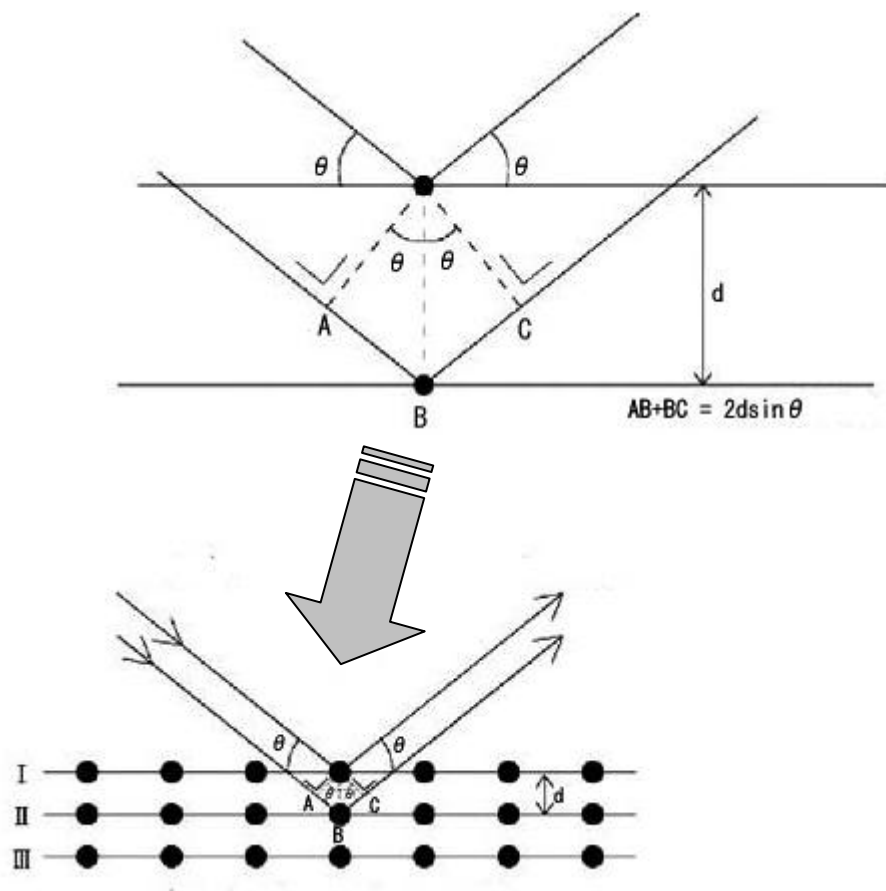


図 3-5-3 Bragg の反射条件図

Bragg の条件 : $2d(hkl)\sin \theta = n\lambda$

I , II , III : 格子面

D : 格子面間隔

(hkl) : 面指数(ミラーの指数)で等間隔の格子面の一群

θ : 入射および反射 X 線と(hkl)面との間の角度(Bragg 角)

n : 反射の次数(整数)

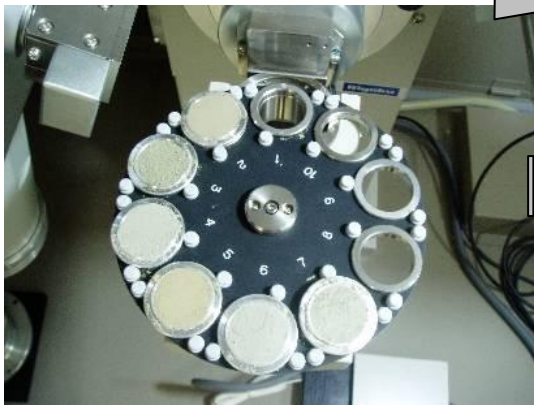
λ : X 線の波長



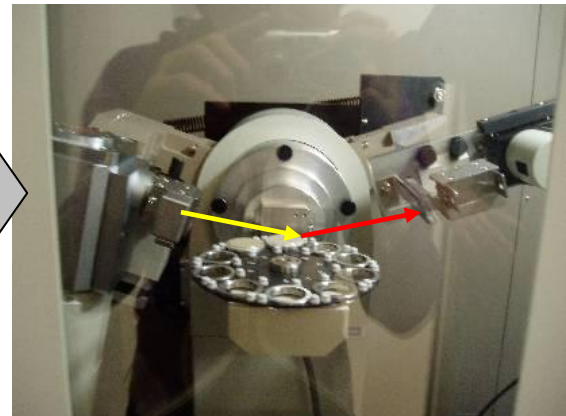
A : 空のサンプルプレート



B : サンプルの表面を均す作業



C : 10 サンプルチェンジャーにセット



D : 測定中(黄色は入射 X 線, 赤は反射 X 線)

図 3-5-4 XRD 測定を行う手順

3-6 珪藻群集解析

東京湾のここ 100 年間の生態系の変遷を辿るために、堆積物中から珪藻化石を抽出して、光学顕微鏡で観察する事によって種同定、計数を行い珪藻の群集解析を行った。前処理および分析の手順を以下に示す。

3-6-1 乾燥

まず、層毎に分取したサンプルを薬包紙を折り紙のようにして折って作った容器の中に詰めた。その後、薬包紙自体の重さを予め電子天秤に入力しておき、サンプルの入った容器を電子天秤に乗せて重量を計る。全サンプル計り終わったら、コンタミネーションを避けるためのプラスチック容器に各サンプルを別個に入れて、二日程凍結乾燥機に掛ける(サンプル数によって掛かる時間は変わる)…。乾燥が終わったら、サンプル番号のシールを貼った 10ml の試験管にサンプルを入れる。

3-6-2 有機物除去

サンプルの入った試験管に 15%過酸化水素水溶液を加えて、3-5-1 に述べた要領で有機物を分解する。有機物分解が終了した後、遠心分離をして上澄み液を捨てる。その後、純水を加えてサンプルと満遍なく混ぜてから遠心分離をして上澄み液を捨てるという作業を三回繰り返す。これでサンプル中に残留した過酸化水素はほとんど排除できる。

3-6-3 鉱物除去

サンプルが入っている試験管に二リン酸ナトリウム十水和物溶液を加える。珪藻よりも細かい粒子を排除する時は、二リン酸ナトリウム十水和物溶液を加えて、その水溶液を遠心分離に掛けてから上澄み液を捨てる。これで細かい粒子は大体排除できる。珪藻よりも粗い粒子を排除する時は、二リン酸ナトリウム十水和物溶液を加えてから 1 分程したら粗い粒子が試験管の底に積もるので、上澄み液をスクリー管に移し替えて底に積もった粒子を捨てれば粗い粒子は排除できる。この際気を付けなくてはいけないのが、スクリー管に移し替えるときに試験管の側壁に珪藻が残ってしまう事である。これは常に同じ面から別な容器に移し替えることで防ぐことが出来る。

なお、二リン酸ナトリウム十水和物は粒子を拡散させる作用があり、これによって水溶液中に混在する珪藻以外の鉱物が排除できる。ただ、Stokes の式(式 3-5-1)に従って粒径毎に篩い分けるので、珪藻と同じ位の大きさの鉱物までは排除できない。

4, 5 回鉱物を排除したら、サンプル番号が記入されたスクリー管に水溶液を移し替える。ここで、水溶液を 10 分程放置していると、底の方に粒子が溜まってくる。溜まってきた粒子の色と上澄み液の色が共に白っぽかったらほぼ珪藻のみになってきているという判断が出来る。粗い鉱物が残留していると底に溜まっている粒子が黒っぽく見え、細かい粒

子の場合は上澄み液が黒っぽく見えるで、まだ鉍物が充分排除できていない事が分かる。
この場合は再度、上で述べた作業を繰り返す。



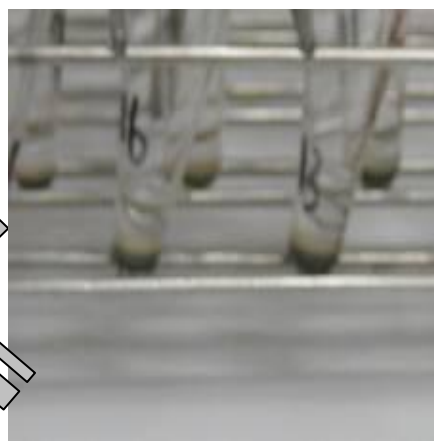
A：薬包紙で作った試料乾燥用の容器



B：過酸化水素水をサンプルに加える



C：有機物を分解中



D：遠心分離後に上澄み液を切る



E：拡散剤を加えて鉍物を取り除く



F：数回鉍物除去をして珪藻を抽出

図 3-6-1 珪藻抽出作業手順

3-6-4 プレパレート作り

図 3-6-1D のように珪藻を充分抽出できたら、ホットプレートで温めたカバーガラスの上に溶液を 0.5ml 垂らす。そのままホットプレートで溶液を温め続け水分を飛ばす。水滴が無くなったらカバーガラスの上にマウントメディアを 2,3 滴垂らし、それと同時にスライドガラスを温める。スライドガラスが温まったら、カバーガラスの上にスライドガラスを被せ、マウントメディアがカバーガラス全体に行き渡るように、竹串でカバーガラスを圧迫する。気泡が消えないようなら、アルコールランプで熱してから、竹串でカバーガラスを圧迫してスライドガラスとぴったりくっつくようにする。

4.底質分析結果

この章では各種分析の結果を示すと共にそれらについて論じていく。4-1 では含水率・単位体積重量，4-2 では年代測定結果，4-3 で粒径，4-4 で CN 比，4-5 で粘土鉱物組成，4-6 では CN と粒径の関係性について述べていく。

4-1 含水率・単位体積重量

三地点に共通しているのが，深度が深くなるに連れ含水率は小さく，逆に単位体積重量は大きくなっている事である。これは，堆積層が深くなるに連れて，上の堆積層の重みで圧密される事によって間隙がなくなっていき締め固められていくからだと考えられる。

千葉灯標，湾中央での含水率が市川船橋より高くなっているのは，市川船橋ではアクリルパイプ一杯に底泥が入ったが，千葉灯標，湾中央では 60cm しか入らず，間隙を埋めて密封状態にするために海水を加えたからである。サンプルを採取してから切り出すまでの数時間の間に，密封のために入れた海水がサンプルに浸透していったものと考えられる。

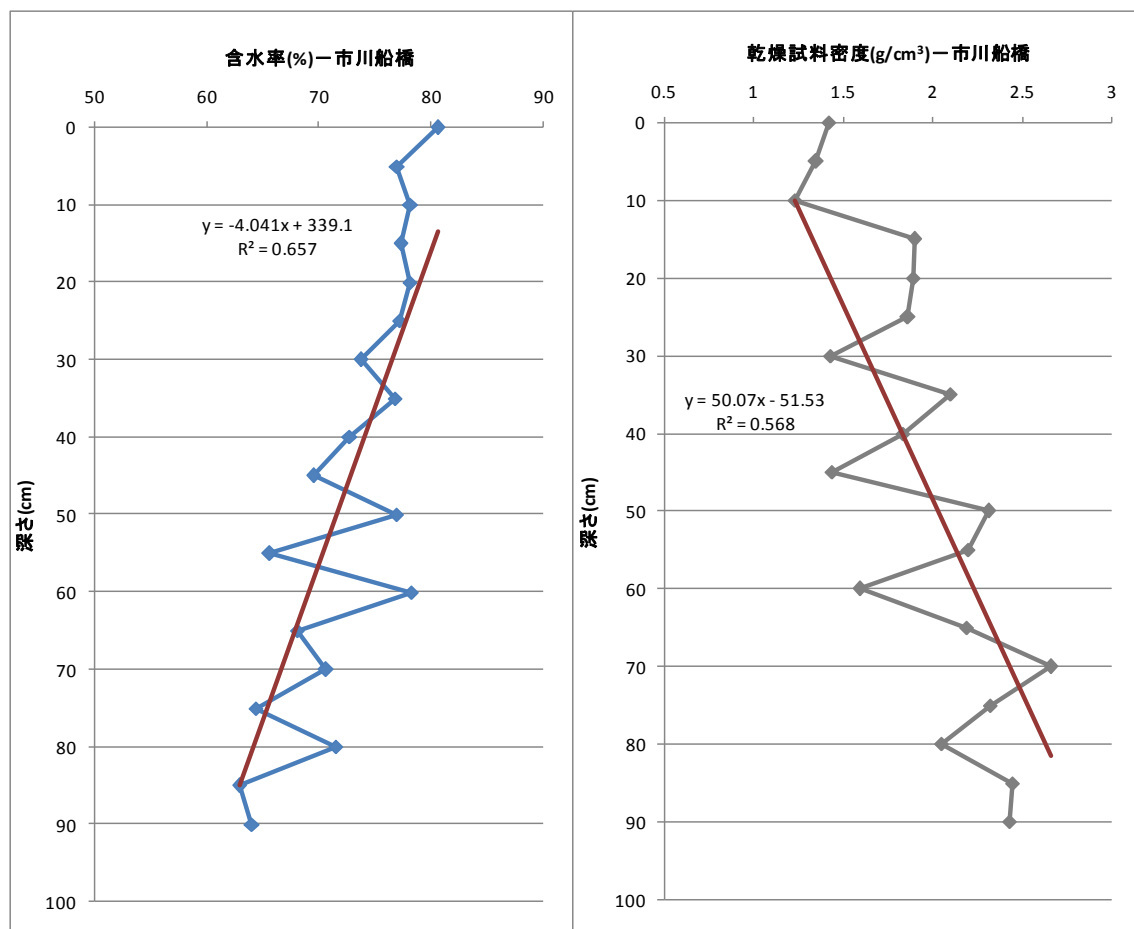


図 4-1-1 含水率・単位体積重量の鉛直プロファイル(市川船橋)

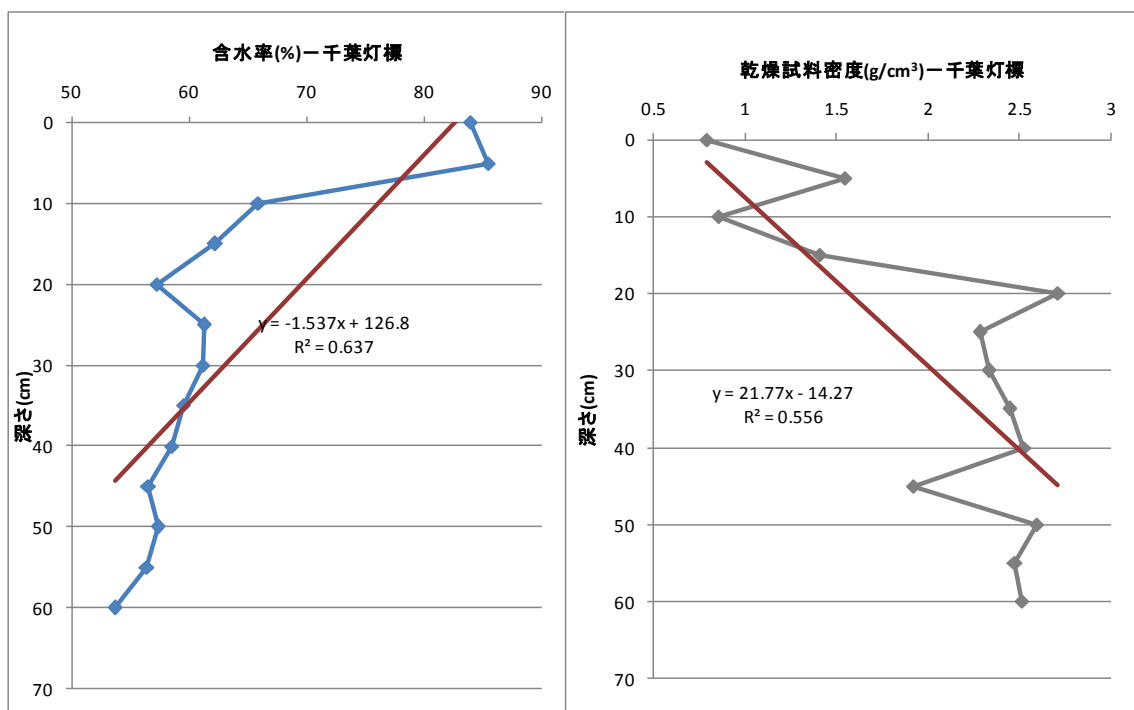


図 4-1-2 含水率・単位体積重量の鉛直プロファイル(千葉灯標)

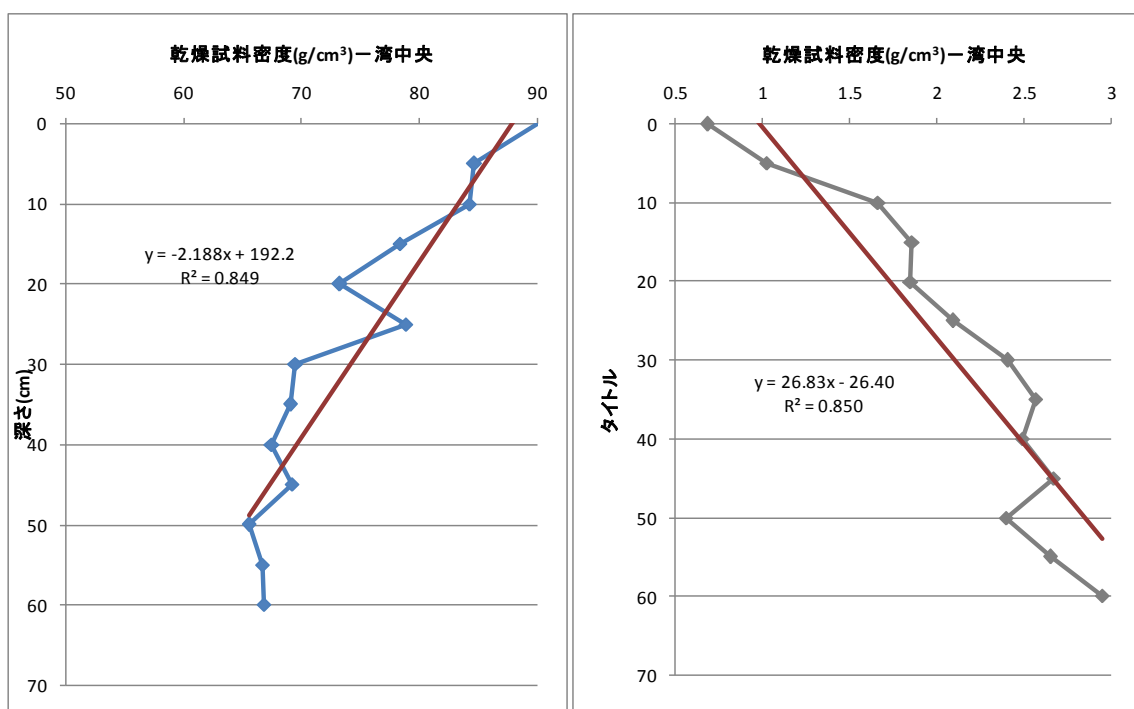


図 4-1-3 含水率・単位体積重量の鉛直プロファイル(湾中央)

4-2 年代測定

三地点で採取したサンプルについて、それぞれ Pb^{210} 、 Cs^{137} の放射線強度を測定して、グラフにした。 Pb^{210} については、深さ毎に放射線強度をプロットして、そのデータを **exponential** で近似した。近似したデータを基に 3-2-3 で述べた方法で、年代と堆積速度決定した。 Cs^{137} は決定した年代の正確性を検証するために用いた。

Pb^{210} の放射線強度は海底面からの深さが深くなるに連れ、三地点とも **exponential** の近似曲線に沿うように減衰している(図 4-2-1, 図 4-2-3, 図 4-2-5)。理論式と放射線強度の曲線がほぼ一致する形になり、三地点とも浚渫や埋立の影響を受けていないことが示唆される。海底面(0cm)での Pb^{210} 放射線強度は千葉灯標と湾中央では約 $1.0 \times 10^{-3}(\text{count/g/s})$ の差があるが、減衰の傾きが一緒なので表 4-2-1 の通り、堆積速度 $s(\text{cm/year})$ に大きな差が出ない。また、重量換算の堆積速度 $w(\text{g/cm}^2/\text{year})$ もあまり大きな差が出ていない。図 4-1-2 と図 4-1-3 から分かるように、この 2 地点の単位堆積重量鉛直プロファイルが似通っているため、重量換算の堆積速度 w でも差が出なかったものと考えられる。一方市川船橋沖では、他の 2 地点に比べて堆積速度が速い。同じ深さでも、市川船橋地点では年代が若い事が分かる(表 4-2-2, 表 4-2-3, 表 4-2-4)。

Cs^{137} のピークは 1962-1963 年と 1985-1986 年の二度出る。ピークが出た深さは市川船橋、千葉灯標、湾中央でそれぞれ 40cm・20cm, 30cm・10cm, 25cm・10cm である。 Pb^{210} を用いた年代決定法で換算すると、1967 年・1987 年, 1960 年・1991 年, 1968 年・1991 年であり、 Cs^{137} のピークで換算した年代との誤差は±5 年以内に収まっている。この事から、 Pb^{210} と Cs^{137} で換算した年代はある程度整合が取れている事が分かった。

表 4-2-1 三地点での堆積速度 $s(\text{cm/year})$, $w(\text{g/cm}^2/\text{year})$

	$s(\text{cm/year})$	$w(\text{g/cm}^2/\text{year})$
市川船橋	1.01	1.91
CLB	0.64	1.27
湾中央	0.64	1.29

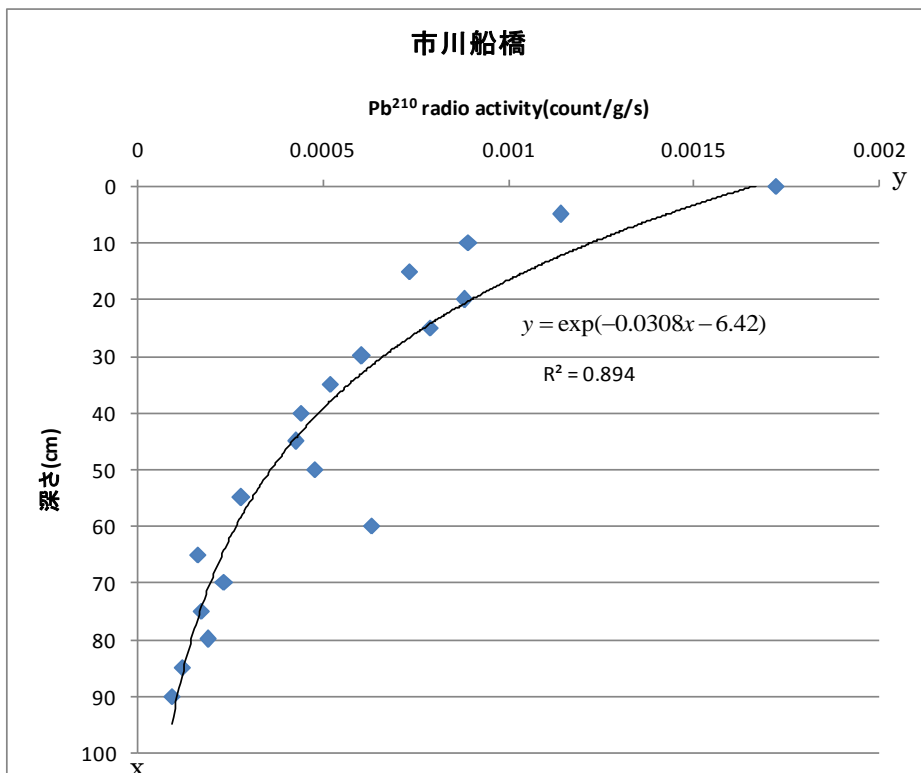


図 4-2-1 市川船橋地点での Pb²¹⁰ 放射線強度鉛直プロファイル (横軸が y 軸, 縦軸が x 軸)

表 4-2-2 深さ－年代対応表(市川船橋)

深さ(cm)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
西暦(年)	2007	2002	1997	1992	1987	1982	1977	1972	1967	1962	1957	1952	1947	1942	1938	1933	1928	1923	1918

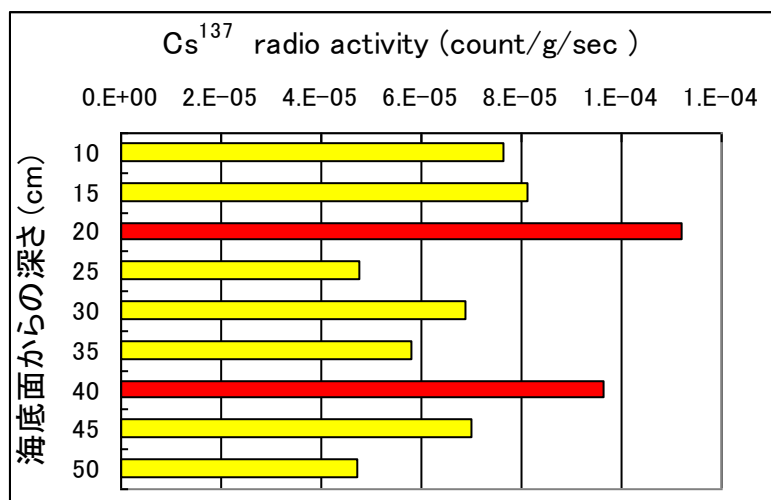


図 4-2-2 市川船橋地点での Cs¹³⁷ 放射線強度鉛直プロファイル (横軸が y 軸, 縦軸が x 軸)

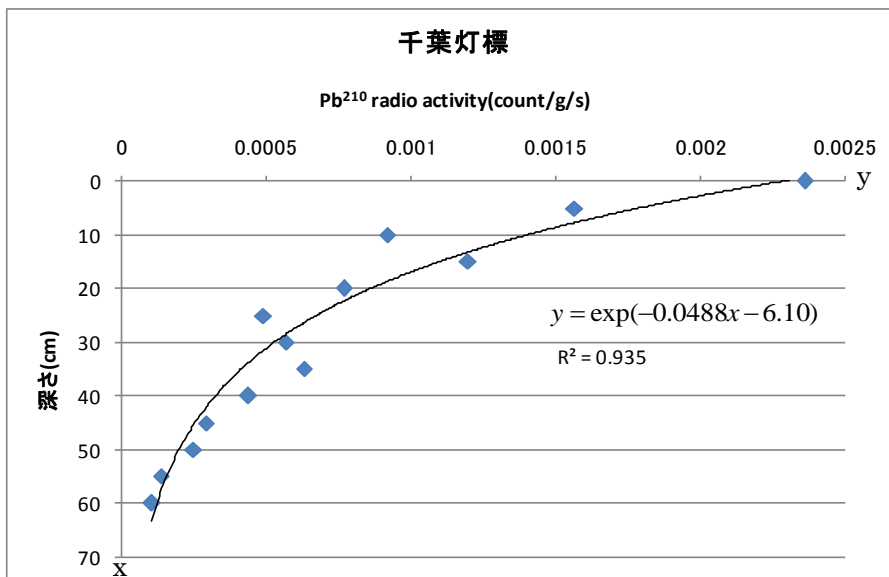


図 4-2-3 千葉灯標での Pb²¹⁰ 放射線強度鉛直プロファイル (横軸が y 軸, 縦軸が x 軸)

表 4-2-3 深さ－年代対応表(千葉灯標)

深さ(cm)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
西暦(年)	2007	1999	1991	1983	1976	1968	1960	1952	1944	1936	1928	1920	1913

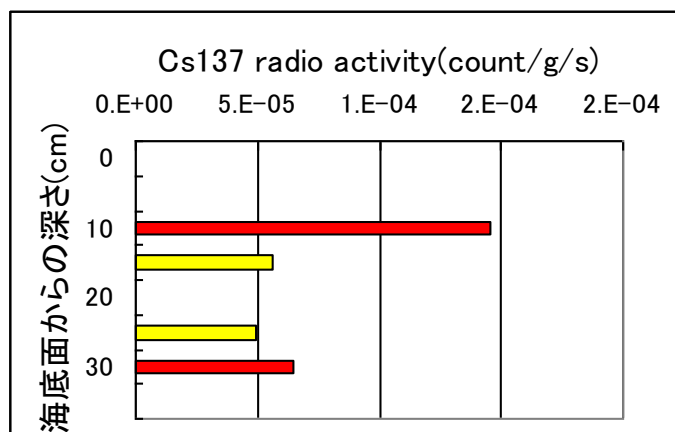


図 4-2-4 千葉灯標での Cs¹³⁷ 放射線強度鉛直プロファイル (横軸が y 軸, 縦軸が x 軸)

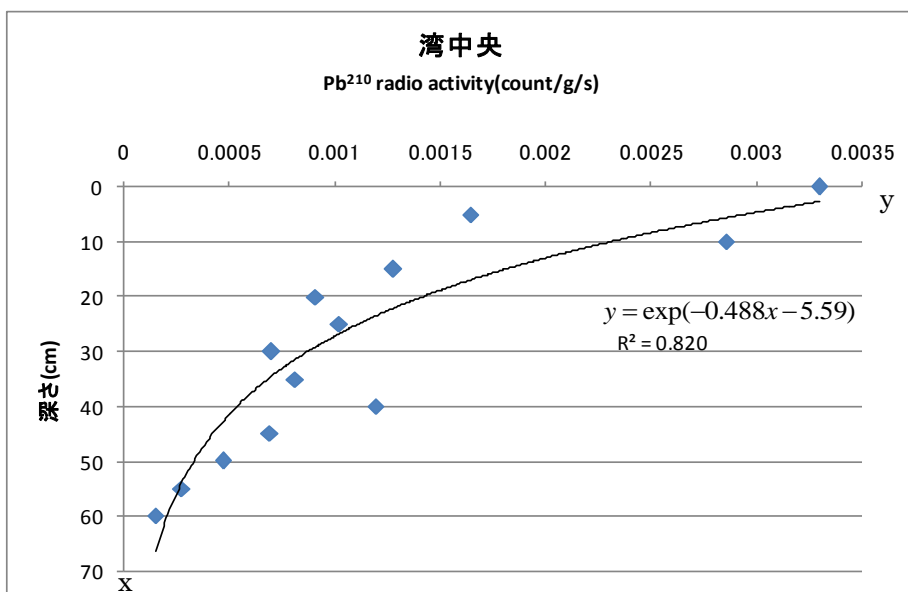


図 4-2-5 湾中央での Pb²¹⁰ 放射線強度鉛直プロファイル（横軸が y 軸，縦軸が x 軸）

表 4-2-4 深さ－年代対応表(湾中央)

深さ(cm)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
西暦(年)	2007	1999	1991	1983	1976	1968	1960	1952	1944	1936	1928	1920	1913

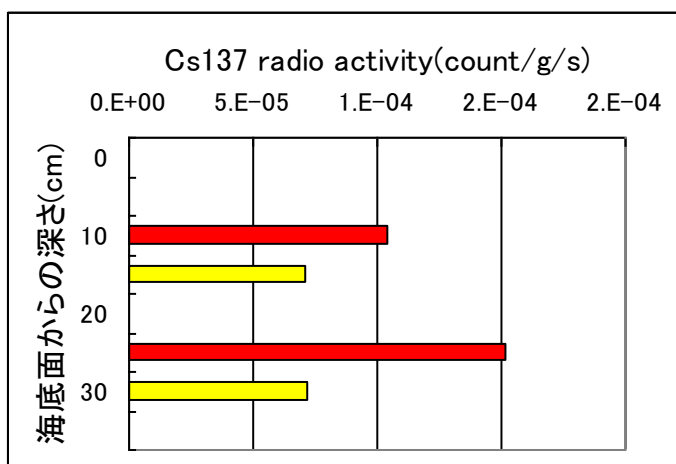


図 4-2-6 湾中央での Cs¹³⁷ 放射線強度鉛直プロファイル（横軸が y 軸，縦軸が x 軸）

4-3 粒度分析

本研究でサンプルを採取した三地点は、松本(1983)の底質分布図を見るといずれ泥質であり、粒径は東京湾の中でも細かい方である事が分かる。

市川船橋地点では、1970 年前後、1940 年代前半、1930 年前後を除いて、90%粒径が $100\ \mu\text{m}$ 以下である(図 4-3-2 左)。4-2 で述べたように市川船橋での堆積速度が速いのは、基本的に流れが遅い地点であるため堆積物が溜まりやすい事に起因していると考えられる。シルト質の割合が 60%以上を占める層がほとんどで、砂質が増える時は市川船橋へ向かう流れや河川水などが変化した可能性が考えられる。しかし、流況や河川水の実測データがない時代なので検証は出来ない。また、過酸化水素水で有機物を取り除いた粒子と、有機物が付着したままの粒子の粒径を比べたグラフが図 4-3-2 右である。1950 年代後半から現在に掛けて有機物の付着が顕著だが、それ以前の年代はほとんど有機物が粒子に付着していない。この事から、1950 年代後半から水柱の有機物濃度が増加した可能性が窺えるが、水柱の栄養塩濃度データは 1970 年代からしか存在せず、これについては検証することが不可能である。ただ、市川船橋では基本的に流れが遅いと考えられるので、有機物が鉱物由来の粒子に付着しやすい環境である事が言える。

千葉灯標では、1990 年～2000 年、1910 年代は 90%粒径が $200\ \mu\text{m}$ を越えているが、他の堆積層では $100\ \mu\text{m}$ 前後と粒子は細かいと言える(図 4-3-3 左)。 $200\ \mu\text{m}$ を越える層に関しては、千葉灯標は大規模河川の流下方向に位置しないので、河川由来の砂質が洪水などのイベントで流入河川から直接運ばれてきた可能性は考えづらい。また、1950 年～1960 年と 1980 年代前半～1990 年代前半を除いて、有機物付着による粒径の巨大化が起こっている(図 4-3-3 左)。元々の粒径が大きい時に有機物付着が起こっていたり、逆に元々の粒径が小さい時に有機物付着があまり無かったりと、千葉灯標においては元々の粒子の大きさと有機物付着についてはっきりとした関係性は見られない。図 4-3-4 を見ると、全層を通じてシルト質が底質に占める割合が多く、90 年代のみ砂の割合が上回っている。

湾中央では 90%粒径が $200\ \mu\text{m}$ に達している 1930 年代半ばの層と 1980 年代半ばの層、 $500\ \mu\text{m}$ に達している 2000 年前後の層以外は、 $100\ \mu\text{m}$ 以下の層になっている(図 4-3-5 左)。また、有機物付着による粒径の巨大化は上記の二地点と比べると湾中央ではあまり起こっていない(図 4-3-5 右)。東京湾の富栄養化の時系列変化とも連動しているようには見えず、元々の粒子の大きさと有機物付着の間にもあまり関連性がないように見える。図 4-3-6 を見ると、シルト質が全層を通して多く含まれている。その傾向が変わるのが砂質の割合が増える 1930 年代半ばの層、1980 年代半ばの層、2000 年前後の層なのだが、大規模河川の流下方向に湾中央が位置する事から、流入河川からの土砂の流出が何らかの作用で起こったのではないかと考えられる。江戸川や多摩川の流量時系列変化や、Kanae et al(2004)による首都圏での集中豪雨の変遷と比較してみたものの、双方とも粒径とのはっきりとした対応見られなかった。位置関係的に河川からの流入が湾中央に堆積する粒径分布

に影響を与えているものとは考えられるが、何の作用によって粒径が決まるかは説明しきれない。

三地点共に、平均的に見ると底質に溜まる粒径は細かい事が分かる。粒径が粗くなる層が存在するが、これは流況が変わった事を示しているのではないか。しかし、実際にどのイベントや環境変化を表しているかという検証は難しい。

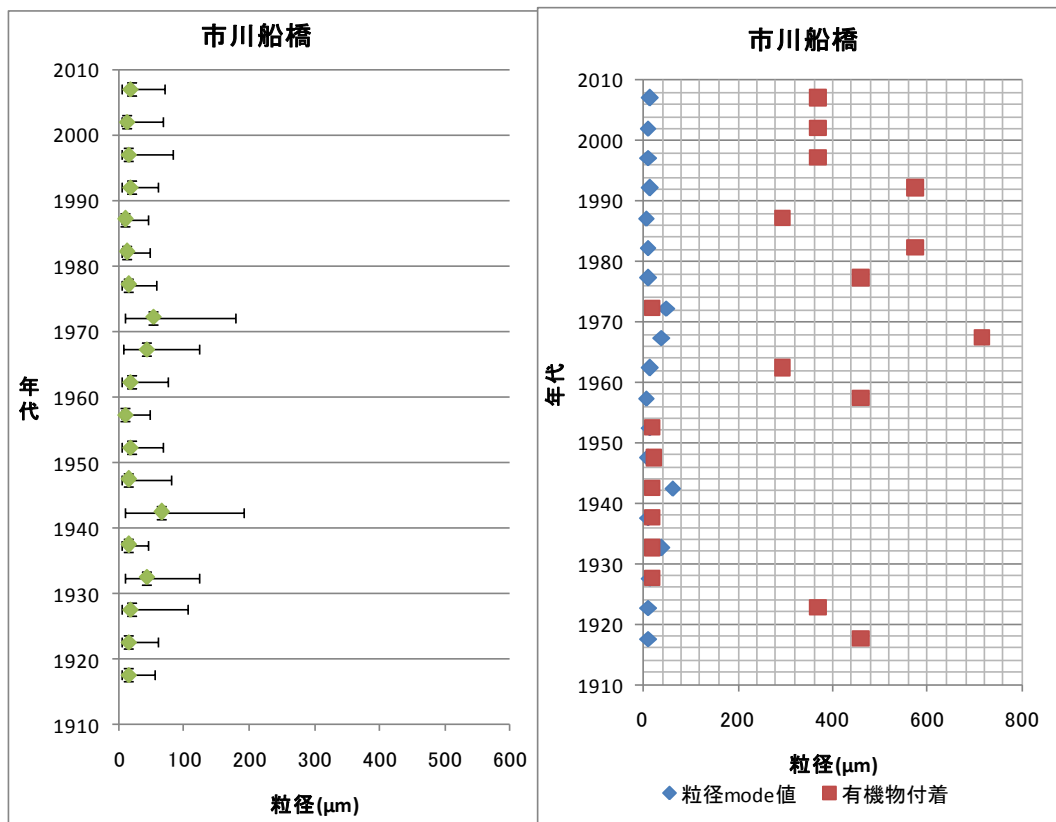


図 4-3-1 粒径(左)と有機物付着時の粒径と有機物除去時の粒径比較(右)の鉛直プロファイル (市川船橋)

左図のドットは mode 値, エラーバー左端は 10%粒径, 右端は 90%粒径

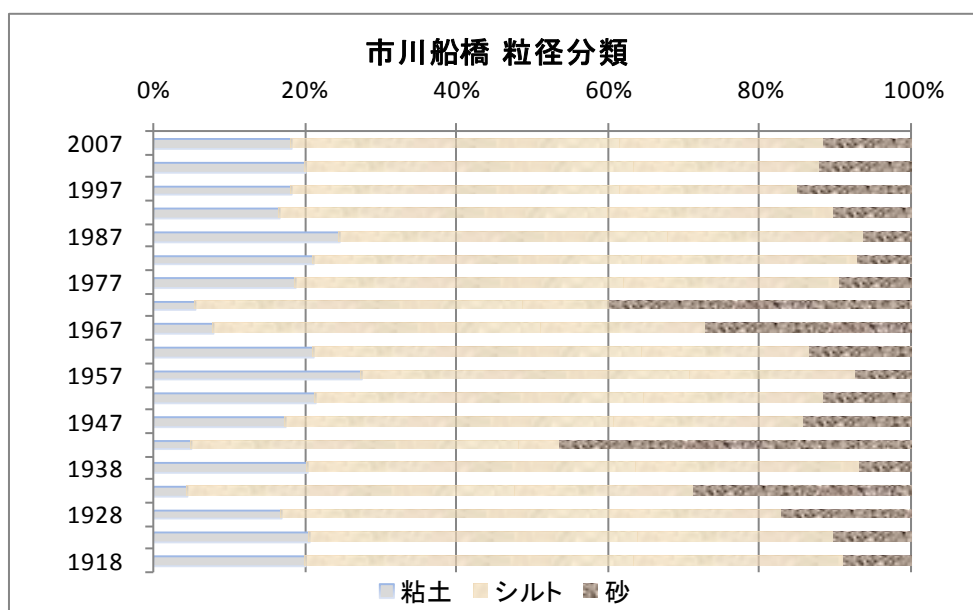


図 4-3-2 粒径による分類(市川船橋)

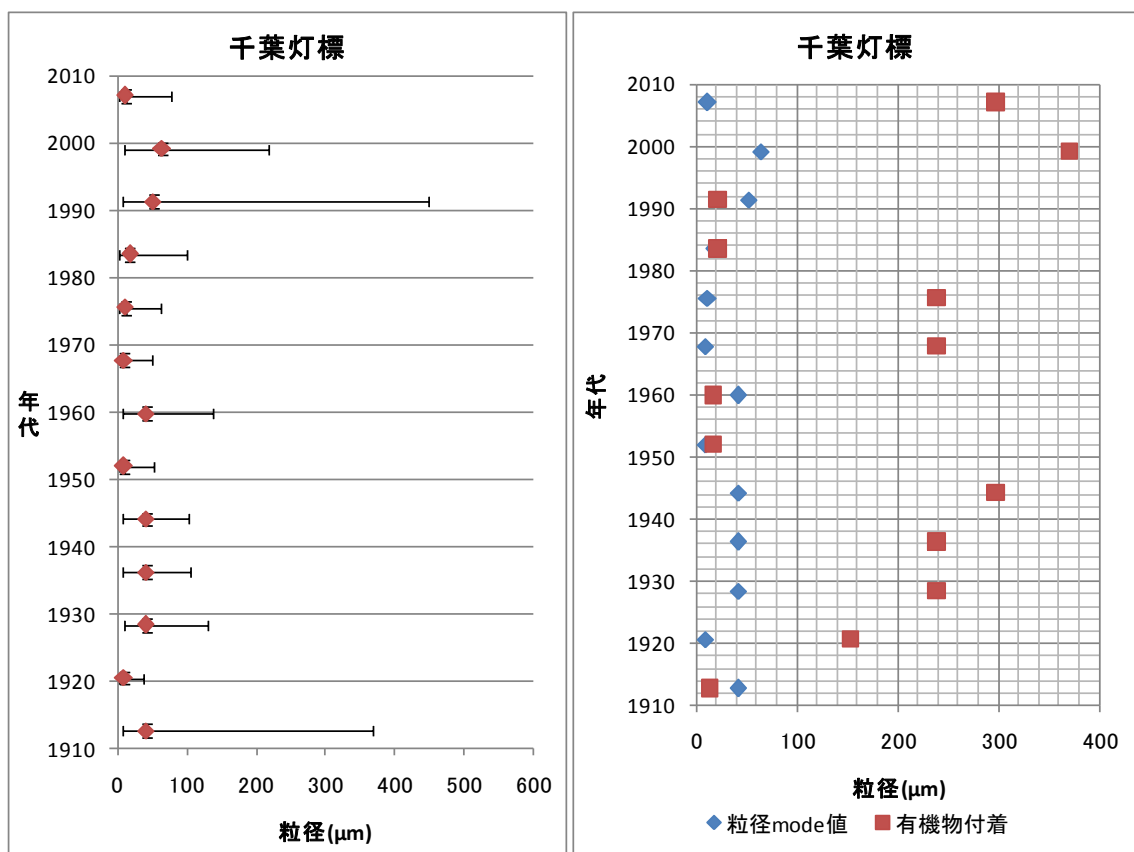


図 4-3-3 粒径(左)と有機物付着時の粒径と有機物除去時の粒径比較(右)の鉛直プロファイル (千葉灯標)

左図のドットは mode 値, エラーバー左端は 10% 粒径, 右端は 90% 粒径

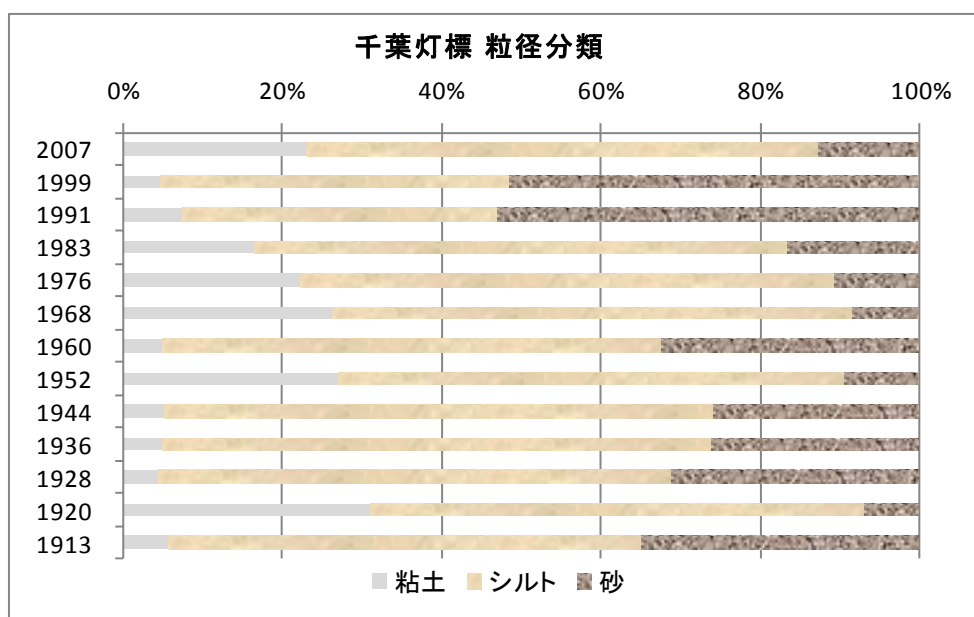


図 4-3-4 粒径による分類(千葉灯標)

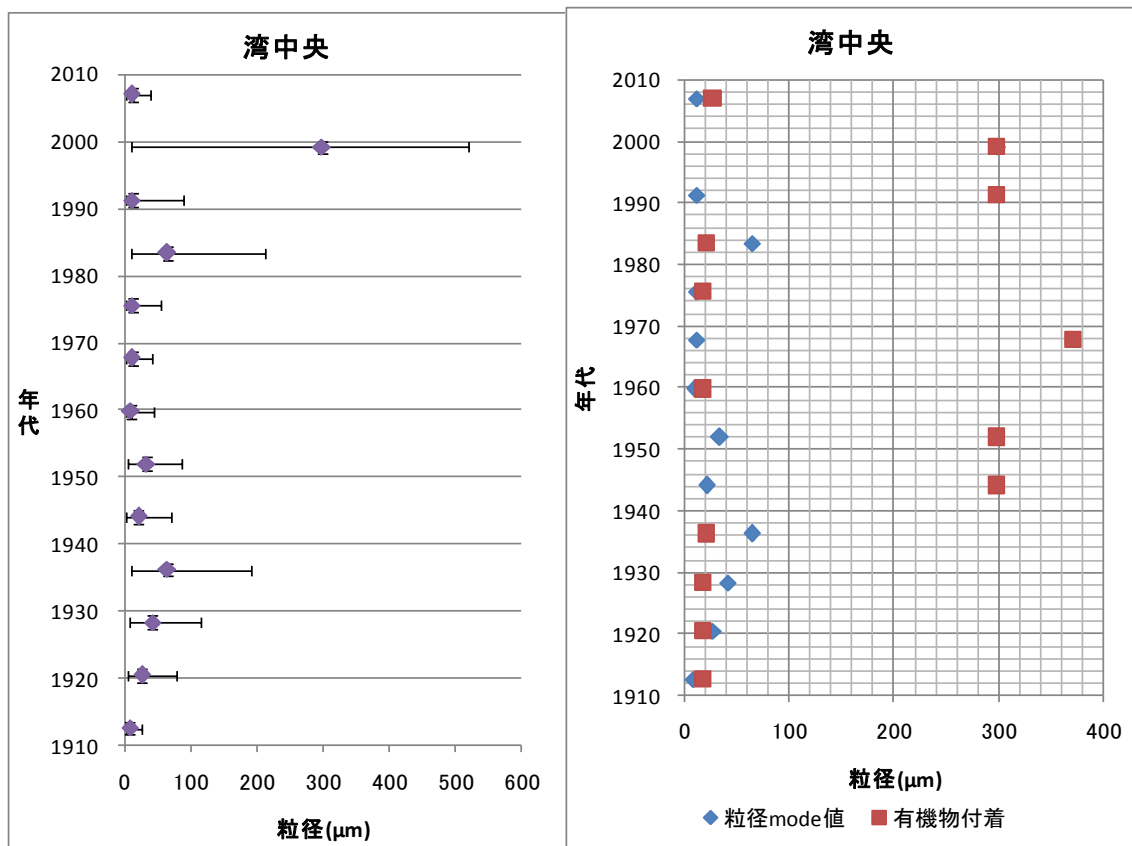


図 4-3-5 粒径(左)と有機物付着時の粒径と有機物除去時の粒径比較(右)の鉛直プロファイル (湾中央)

左図のドットは mode 値, エラーバー左端は 10%粒径, 右端は 90%粒径

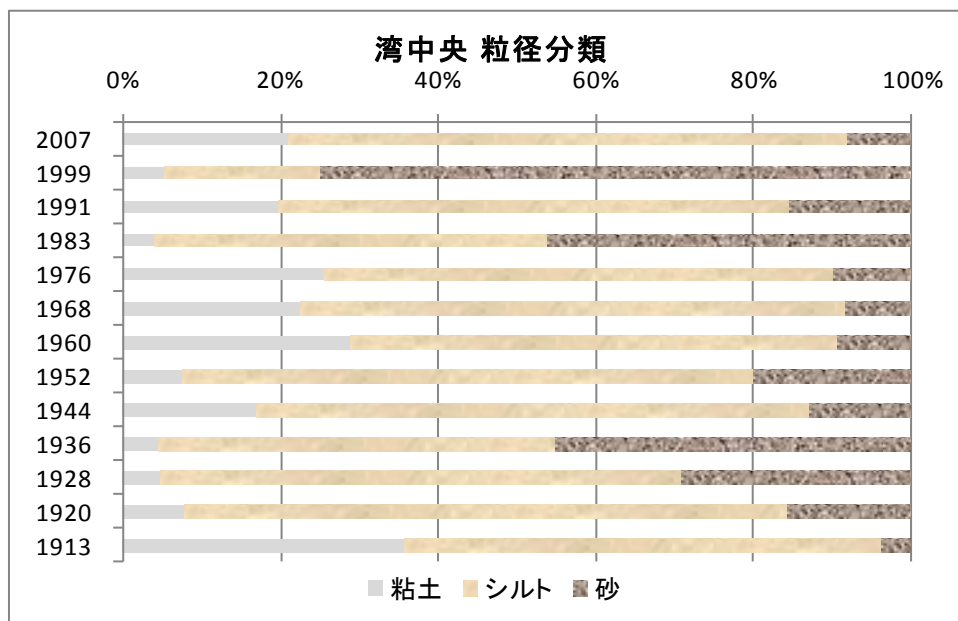


図 4-3-6 粒径による分類(湾中央)

4-4 CN 比

この節では、地点毎の全炭素、無機炭素、有機炭素、全窒素、無機窒素、有機窒素の時系列変化と、三地点での CN 比時系列変化の対比について論ずる。なお、全炭素と全窒素は、サンプルを乾燥させただけの状態で計測し、無機炭素と無機窒素は乾燥させた後に過酸化水素水で有機物を除去した状態で計測した。有機炭素と有機窒素はそれぞれ、全炭素と無機炭素、全窒素と無機窒素の差分値である。

底泥の CN 比を決める重要な変数は懸濁物質の沈降フラックス F_{sed} および沈降フラックス中の各物質の濃度である。また底泥の攪乱計数もプロファイルに影響する。炭素は分解すると最終的に CO_2 になるので測定された炭素のほとんどは生物起源の有機炭素であり、図 4-4-5(左)を見てもそれが読み取れる。しかし、湾中央の 0cm-20cm の層では、全炭素中の有機炭素の割合が 50%前後になっている。これは陸域からの負荷により、人工物が紛れ込んでいる可能性が示唆される。図 4-4-5(右)を見て分かるように、全窒素における有機態窒素の割合はかなり変動が大きい。全体的に見ると、無機態窒素の主要部分を占めるアンモニア態窒素 NH_4-N も底泥と結合あるいは吸着する部分と、有機態窒素を比較すると 50%以上が有機態窒素が占める層が多い。ただ、湾中央の 0cm, 10cm, 20cm, 千葉灯標の 45cm-60cm の層で有機態窒素の割合はかなり低くなっている。湾中央の 0cm, 10cm, 20cm では下水処理の高度化によって、水柱の有機態の窒素が減り無機態の窒素が増えて、結果底泥に吸着する無機態窒素の割合が増えたものと考えられる。千葉灯標の 45cm-60cm の層に関しては有機態窒素が微生物による分解を受けて、無機態窒素がその割合を徐々に減らして行ったと考えられる。なお、有機態の炭素や窒素は分解のしやすさによって易分解性、難分解性を分けることによって現象をよく説明できる。

沈降フラックスおよびその中に含まれる各物質の濃度が一定であれば時間の経過と共に易分解性、難分解性の部分が分解されるので深くなるに従って含有率は減少するはずである。本研究で採取した三地点のサンプルについてはその傾向が顕著な地点と、25cm で濃度のピークを迎える地点がある。

市川船橋では、0cm から 25cm の層で全炭素全窒素とも濃度が徐々に上昇していき、深層に行くにしたがって揺れは大きいものの、徐々に減衰していく(図 4-4-1)。炭素量窒素量の変動は共に、有機態の変動に支配されているように見える。千葉灯標と湾中央では 0cm から深層に向かうにつれて全炭素、全窒素共に減衰していく(図 4-4-2, 図 4-4-3)。2 地点共に炭素量の変動は有機炭素の変動に支配されているように見えるが、窒素量は 20cm 以深では有機態に影響を受けているが、20cm 以浅では無機態からより強い影響を受けているように見える。

3 地点共に CN 比 10~15 の間を推移しているが、湾内での一次生産の方が流域からの有機物流入よりは、有機物増加に寄与している事が分かる。

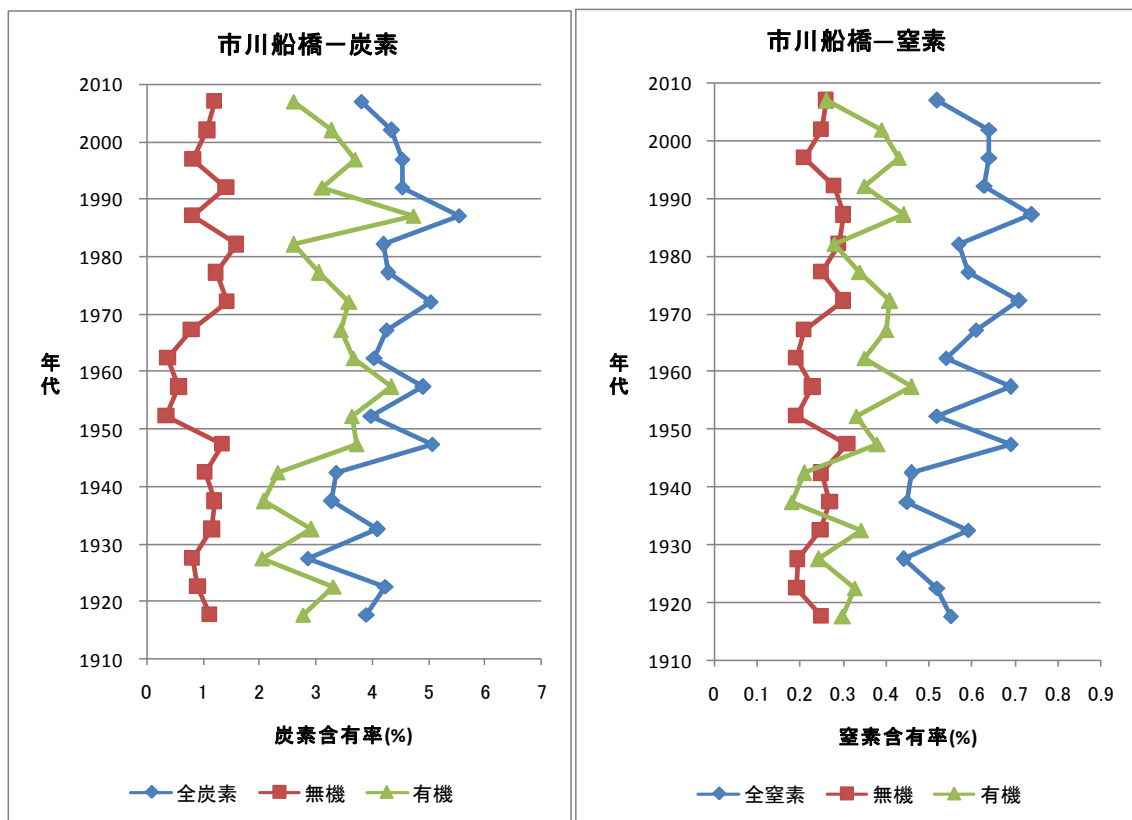


図 4-4-1 市川船橋で採取したサンプルの乾燥試料中の炭素含有率(左)と窒素含有率(右)

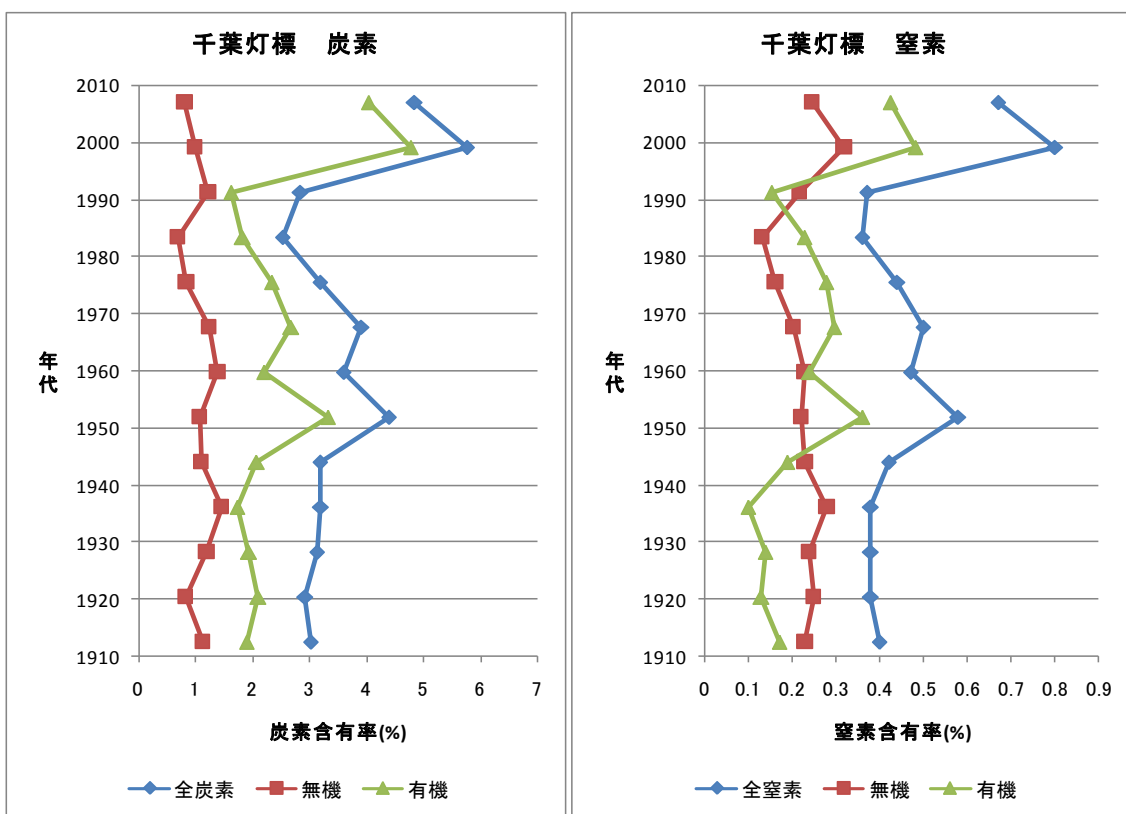


図 4-4-2 千葉灯標で採取したサンプルの乾燥試料中の炭素含有率(左)と窒素含有率(右)

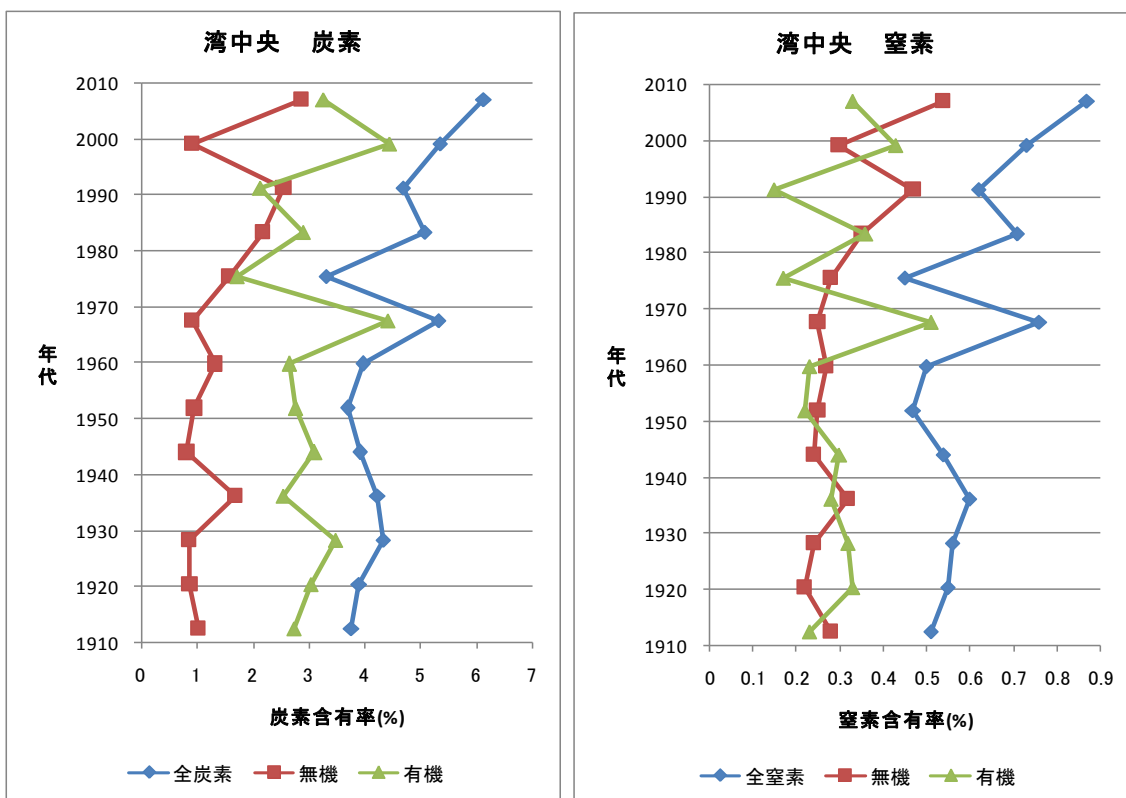


図 4-4-3 湾中央で採取したサンプルの乾燥試料中の炭素含有率(左)と窒素含有率(右)

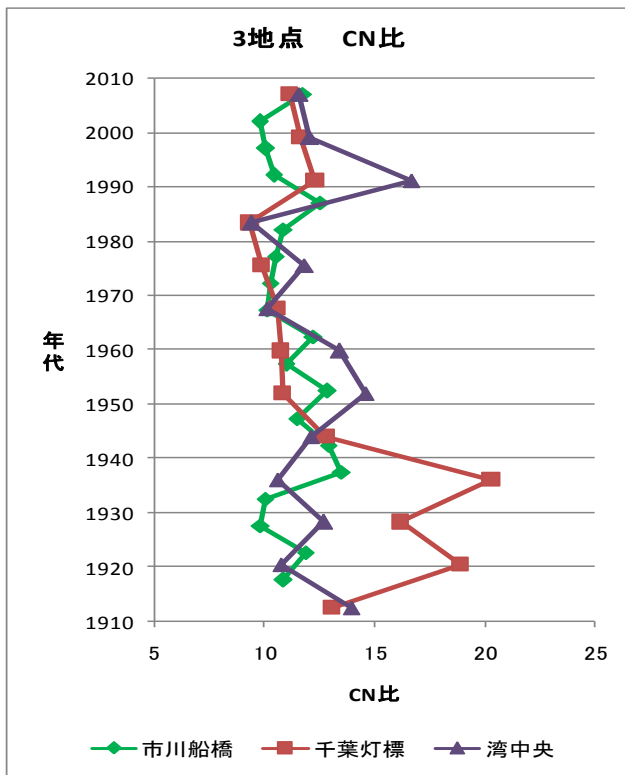


図 4-4-4 3 地点の CN 比鉛直プロファイル

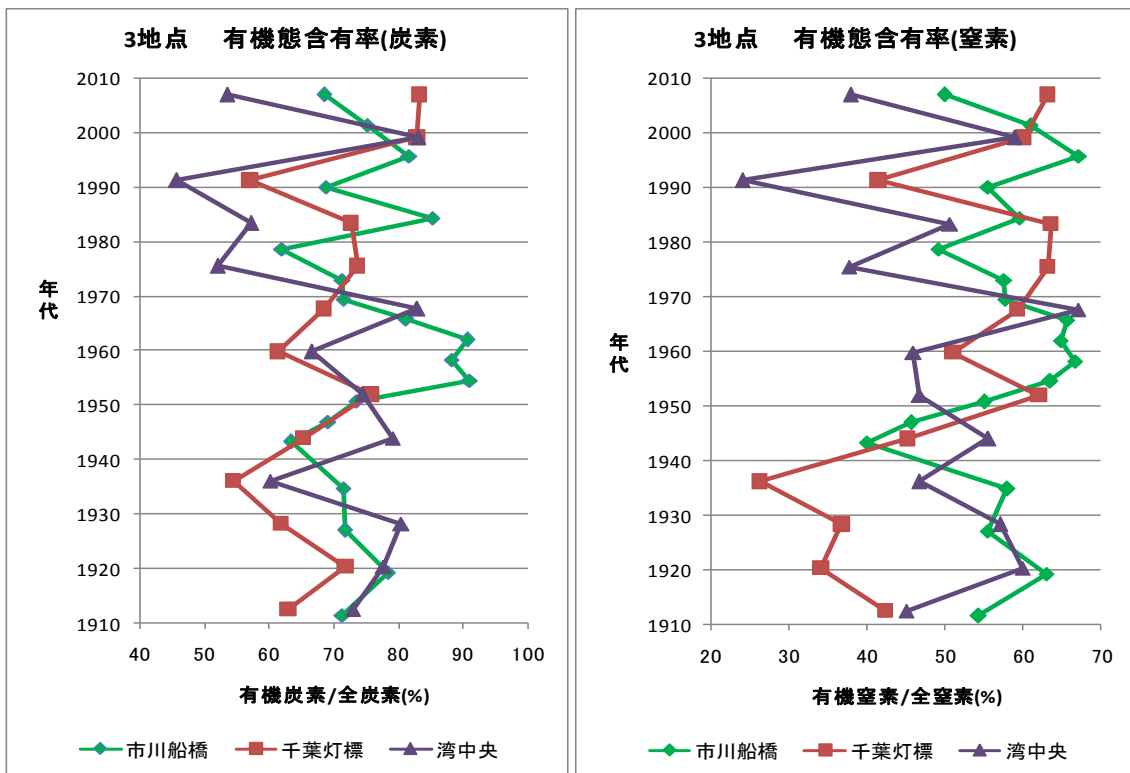


図 4-4-5 3 地点の有機態含有率. 左が炭素, 右が窒素

4-5 粘土鉱物組成

この章では乾燥させた試料を X 線回折機に掛けて得られたデータと、検出された粘土鉱物種毎にまとめたインデックスを示す。X 線回折では試料中に含まれる鉱物の違いを、どの角度からの X 線を入射した時に、反射の位相差が大きくなるかという事を、角度を横軸、強度を縦軸にしたグラフによって表す。X 線回折のピークがどうなるか種毎に記された JCPDS カードというものがあるが、今回の実験では未知試料のサンプルを扱ったので、ピークがどの程度一致するかは、**rigaku** の定性分析ツールで判断されたものを用いた。また、試料の中にどの種類が入っているかという定性的な分析や、反射の強度によって含有量の大小はある程度まで読み取る事が出来るが、定量的な分析は出来ない。

3 地点共にどの深さの試料においても、 $2\theta=26.5^\circ$ 、 31.7° 、 45.4° に強いピークがあり、試料中の鉱物組成がある程度共通していることが窺える。検出強度(cps)は場所や深度によって違うがピークが出る角度には共通点がある。

青木(2002)によると、イライト(本研究では雲母群としてまとめている)の含有率とクロライト含有率の分布パターンは東京湾内では湾奥部の含有率が高く、湾口部では最も低くなっていて、スメクタイト含有率とカオリナイト含有率の分布パターンは東京湾内では、湾口部で含有率が高く、湾奥部で低くなっている。

東京湾を囲む周辺陸域の地質は、第三系及び第四系の堆積岩及び堆積物を主としている。東京湾に流入する荒川上流には変成岩も分布している。したがって東京湾には、これらの地質特性に由来した粘土鉱物が周辺陸地から搬入されることが考えられる。主な堆積岩類や堆積物からはイライトやクロライトが、火山岩及び火山砕屑岩類からはスメクタイトやカオリンが、また変成岩類からはクロライトが主に河川を通して海域へ運搬されていると考えられる。

鉱物種毎に検出強度を記した表を作った(図 4-5-18, 図 4-5-32, 図 4-5-46)。市川船橋では、緑泥石群と雲母群の変遷が似通っていて、スメクタイト群はその二つとはあまり連動して変遷はしていない。千葉灯標で特徴的なのがカオリン群の検出である。0cm30cm, 35cm で検出されている。また、雲母群は全ての層で検出され、千葉灯標の粘土を構成する主要な粘土鉱物である事が窺える。湾中央では、雲母群、スメクタイト群、緑泥石群の三種類共に検出強度が強い。流域と外洋からの流入、双方から流入の影響を受けてこれらの鉱物が湾中央に沈殿している事が示唆される。

なお、X 線回折を行う前にサンプルの下処理を行ったのだが、その時点でサンプルの量が足りなかった市川船橋地点 45cm, 60cm でのデータは取ることが出来なかった。

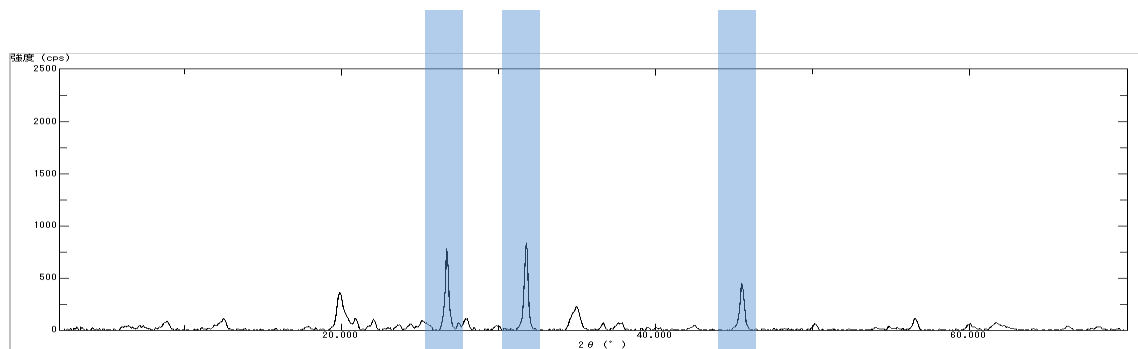


図 4-5-1 市川船橋地点海底面から 0cm の X 線回折図

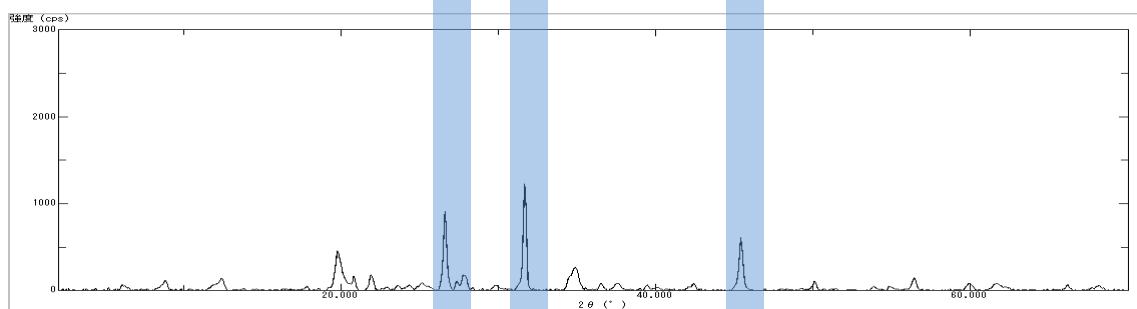


図 4-5-2 市川船橋地点海底面から 5cm の X 線回折図

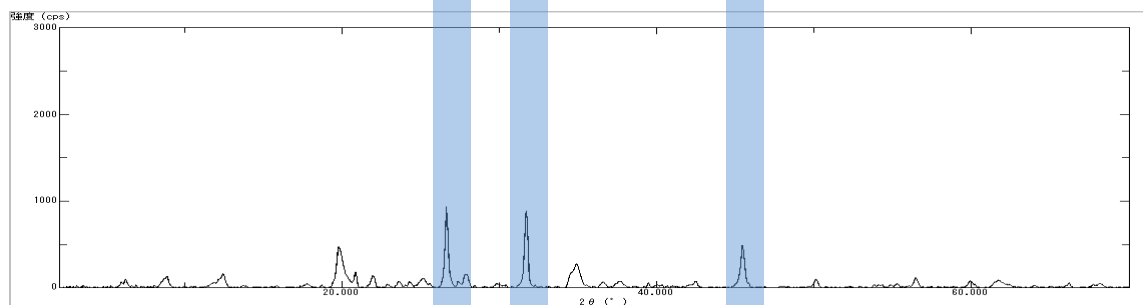


図 4-5-3 市川船橋地点海底面から 10cm の X 線回折図

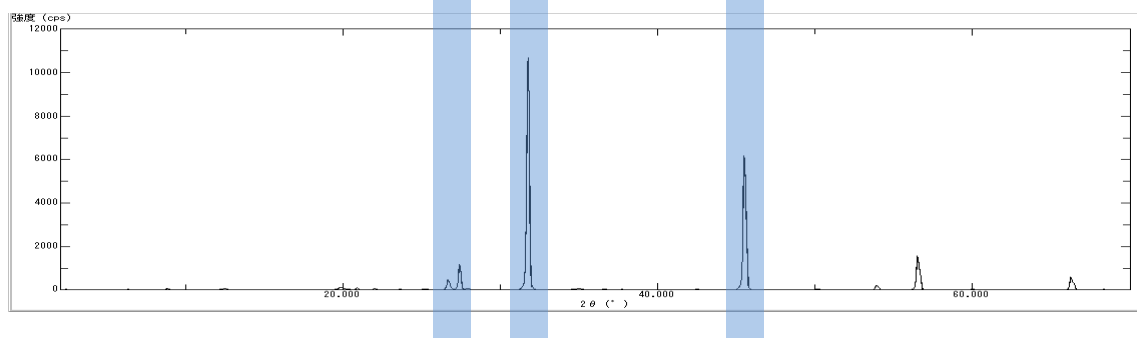


図 4-5-4 市川船橋地点海底面から 15cm の X 線回折図

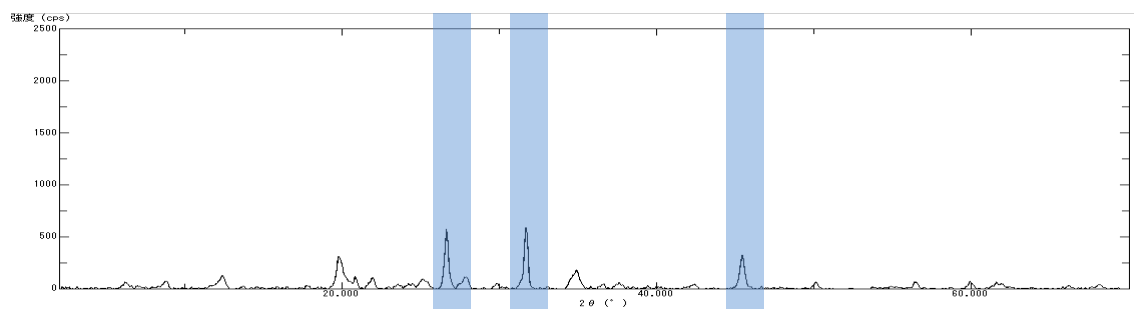


図 4-5-5 市川船橋地点海底面から 20cm の X 線回折図

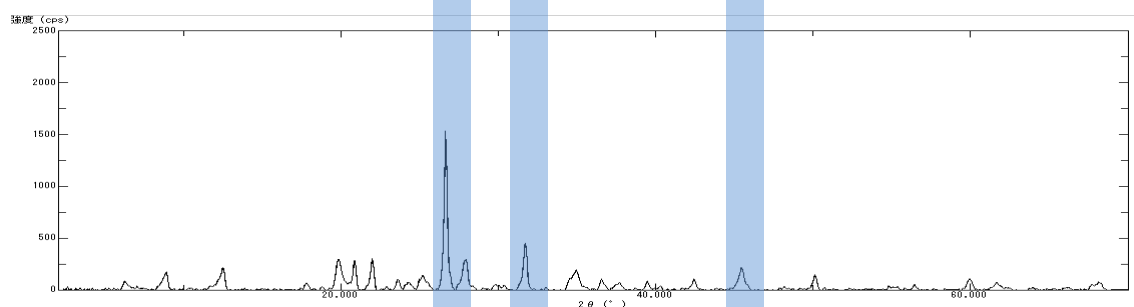


図 4-5-6 市川船橋地点海底面から 25cm の X 線回折図

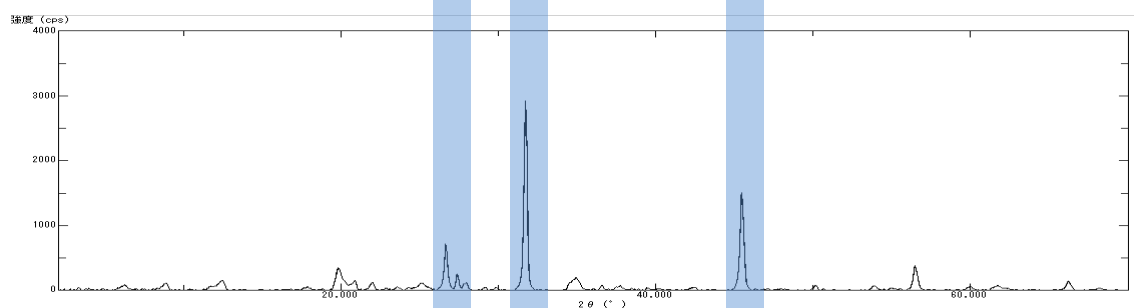


図 4-5-7 市川船橋地点海底面から 30cm の X 線回折図

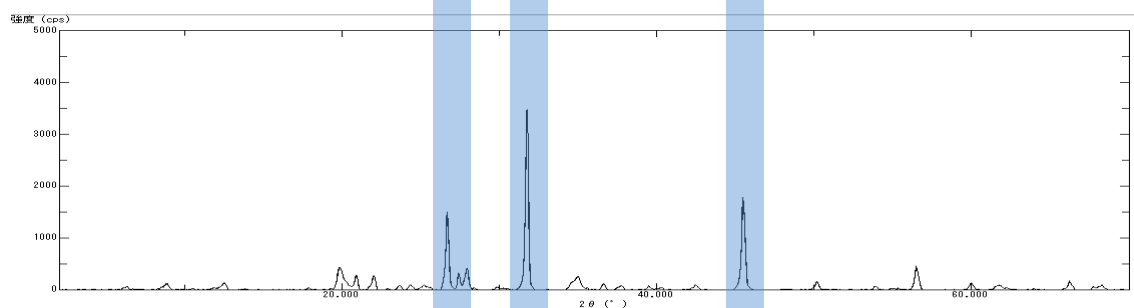


図 4-5-8 市川船橋地点海底面から 35cm の X 線回折図

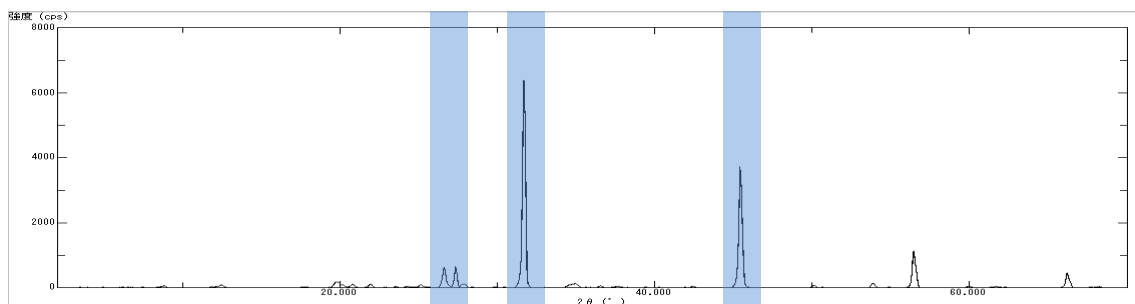


図 4-5-9 市川船橋地点海底面から 40cm の X 線回折図

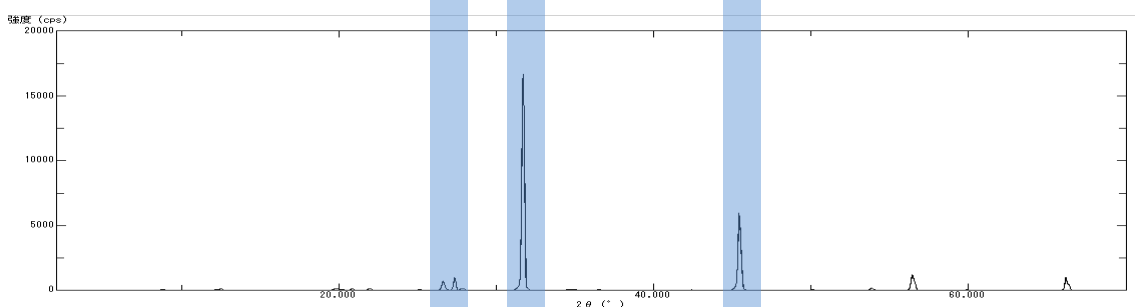


図 4-5-10 市川船橋地点海底面から 50cm の X 線回折図

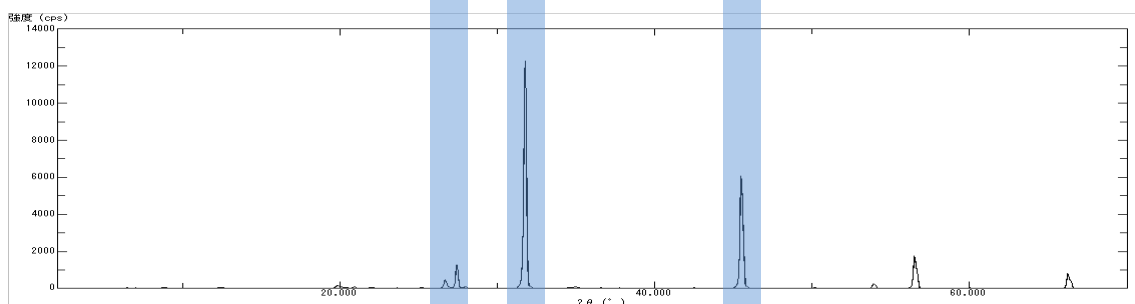


図 4-5-11 市川船橋地点海底面から 55cm の X 線回折図

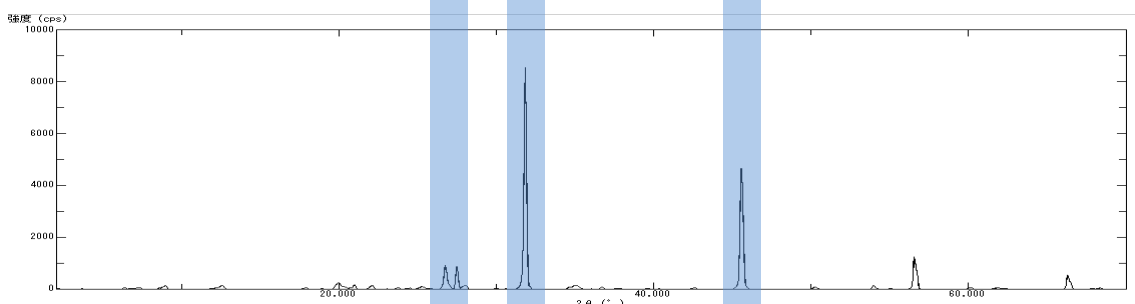


図 4-5-12 市川船橋地点海底面から 65cm の X 線回折図

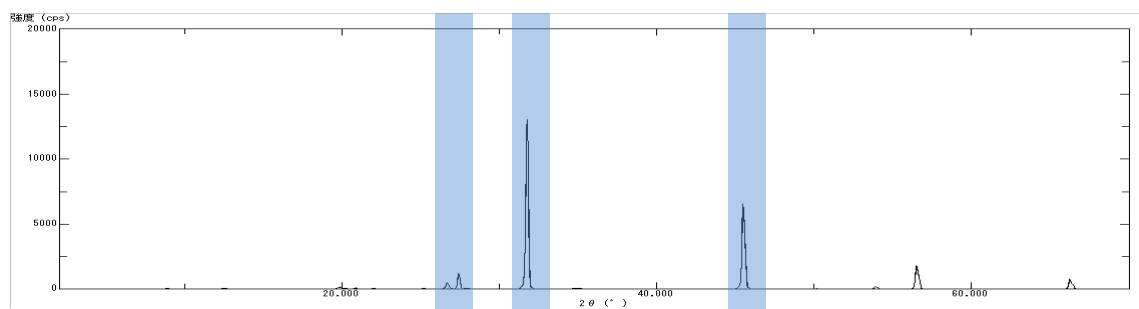


図 4-5-13 市川船橋地点海底面から 70cm の X 線回折図

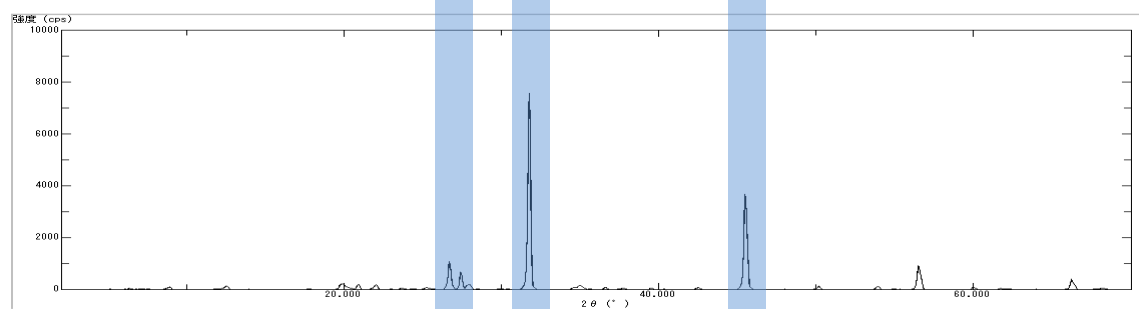


図 4-5-14 市川船橋地点海底面から 75cm の X 線回折図

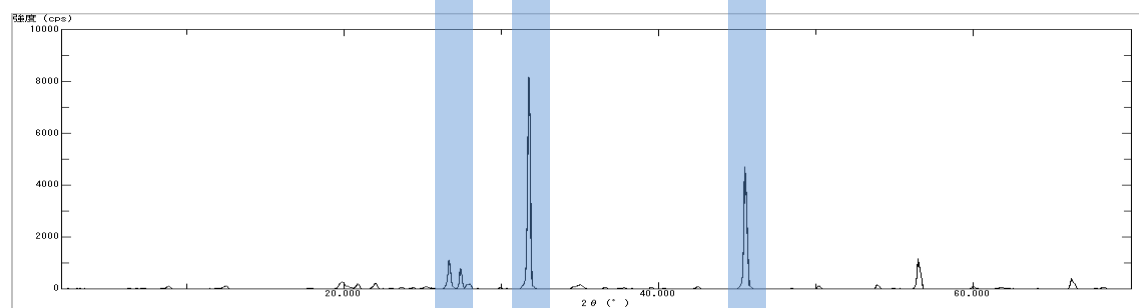


図 4-5-15 市川船橋地点海底面から 80cm の X 線回折図

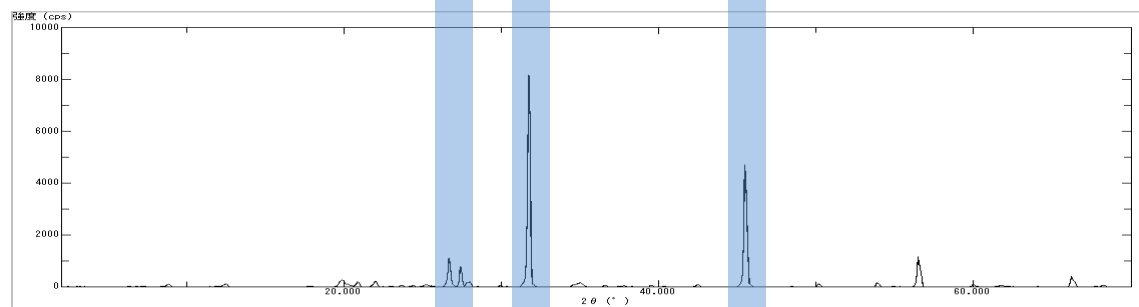


図 4-5-16 市川船橋地点海底面から 85cm の X 線回折図

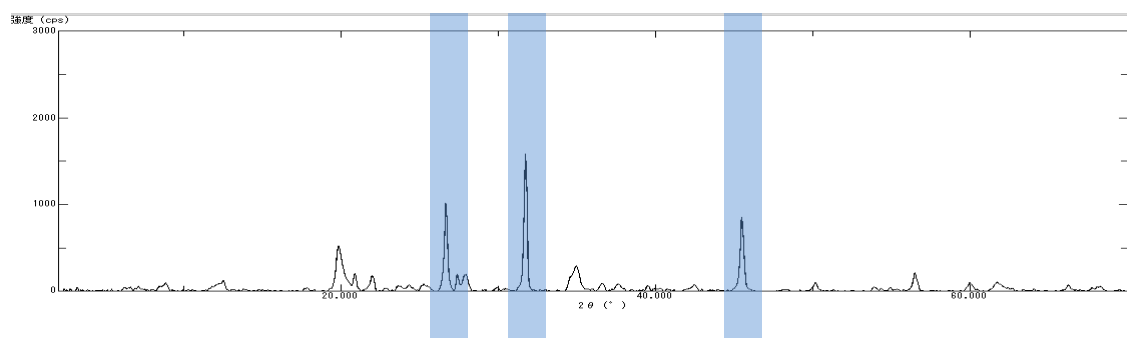


図 4-5-17 市川船橋地点海底面から 90cm の X 線回折図

市川船橋 深さ(cm)	雲母 mica	スメクタイト smectite	緑泥石 chlorite
0	○	△	△
5	△	○	△
10	○	○	◎
15	△	—	△
20	◎	△	◎
25	—	*	△
30	○	△	○
35	○	△	○
40	△	—	△
45	—	—	—
50	△	△	△
55	△	*	△
60	—	—	—
65	○	△	◎
70	○	○	△
75	△	△	—
80	—	△	○
85	△	—	—
90	○	—	○

図 4-5-18 市川船橋地点での粘土鉱物プロファイル

—：検出なし，*：微量，△：少量，○：多量，◎：非常に多量

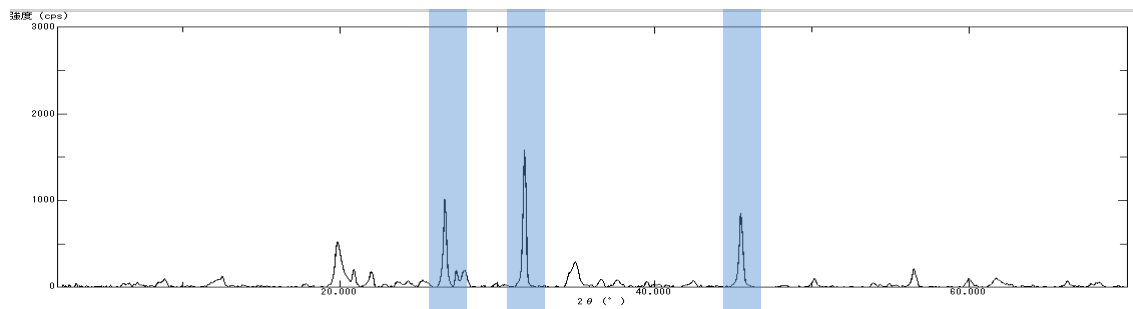


図 4-5-19 千葉灯標海底面から 0cm の X 線回折図

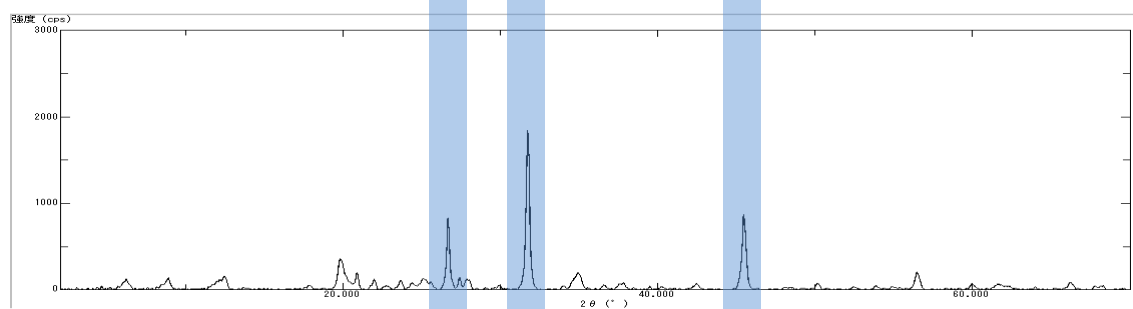


図 4-5-20 千葉灯標海底面から 5cm の X 線回折図

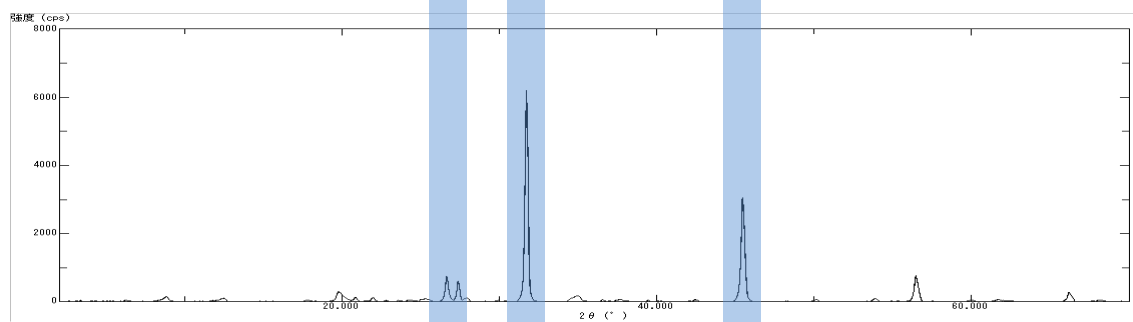


図 4-5-21 千葉灯標海底面から 10cm の X 線回折図

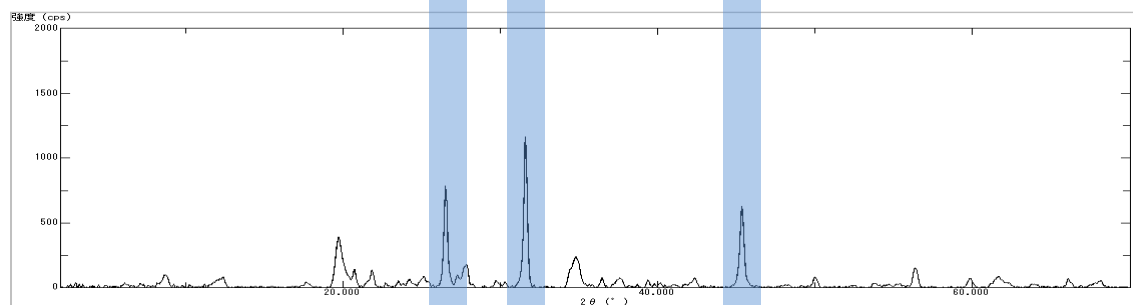


図 4-5-22 千葉灯標海底面から 15cm の X 線回折図

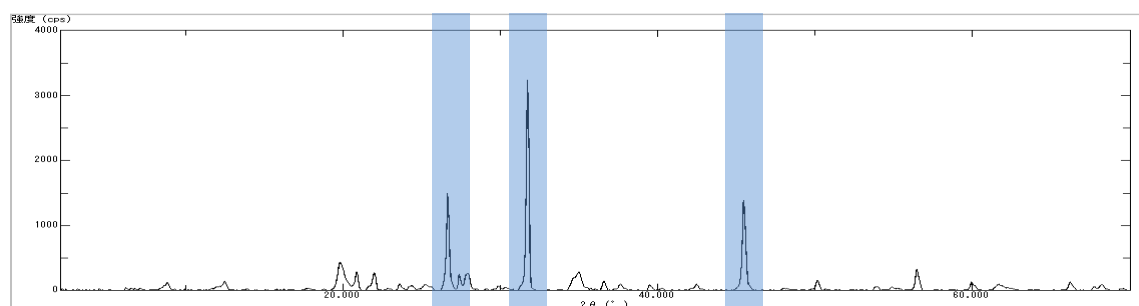


図 4-5-23 千葉灯標海底面から 20cm の X 線回折図

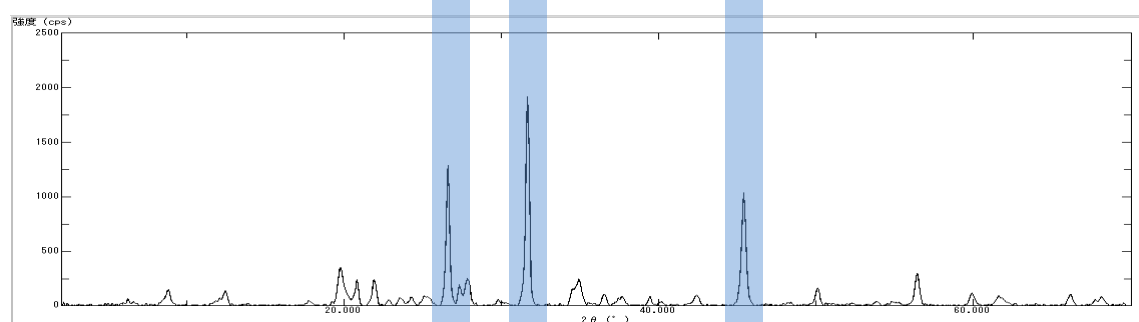


図 4-5-24 千葉灯標海底面から 25cm の X 線回折図

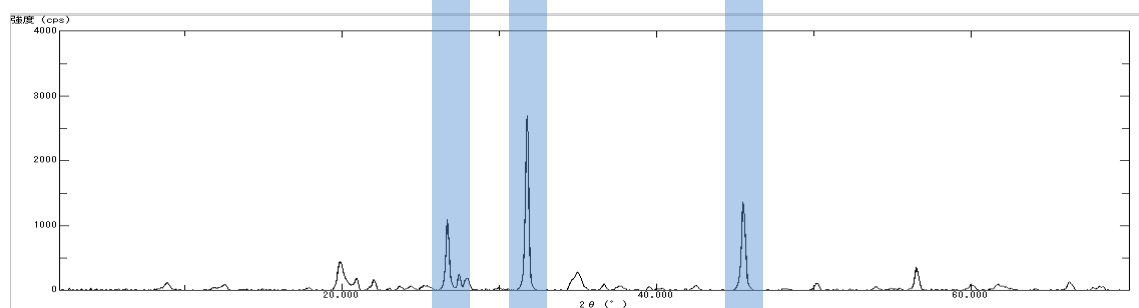


図 4-5-25 千葉灯標海底面から 30cm の X 線回折図

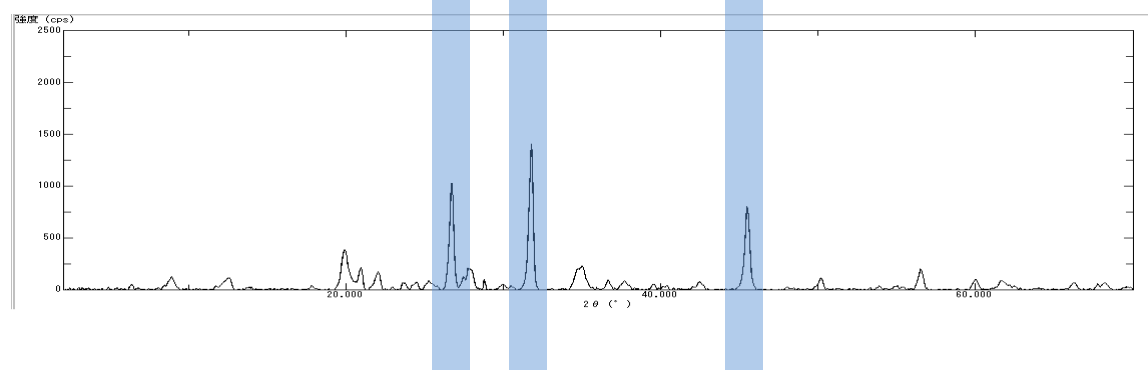


図 4-5-26 千葉灯標海底面から 35cm の X 線回折図

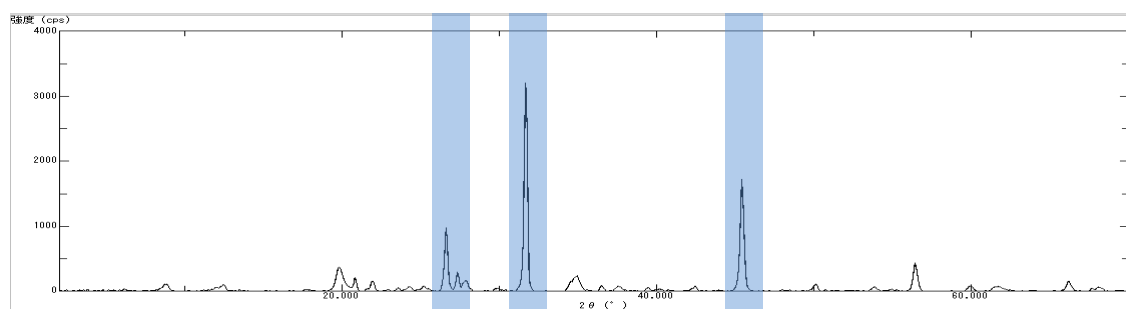


図 4-5-27 千葉灯標海底面から 40cm の X 線回折図

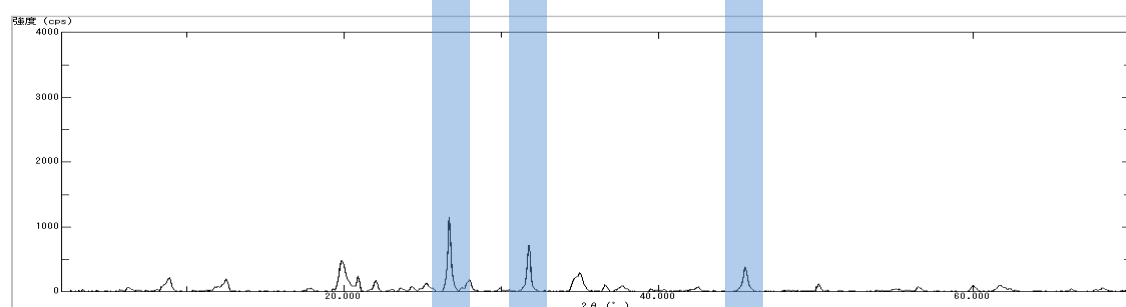


図 4-5-28 千葉灯標海底面から 45cm の X 線回折図

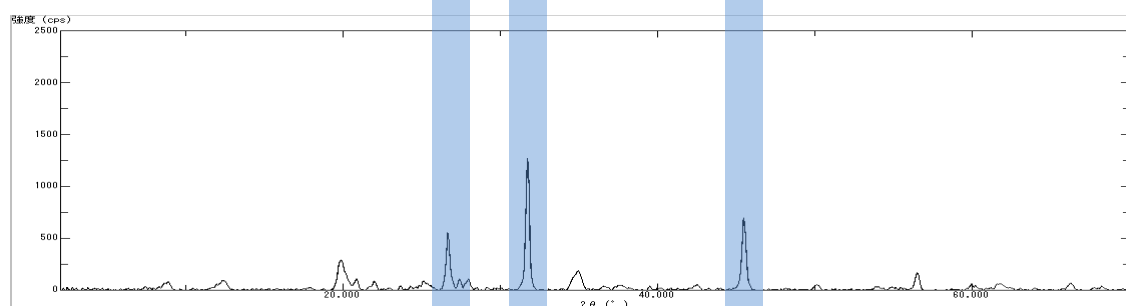


図 4-5-29 千葉灯標海底面から 50cm の X 線回折図

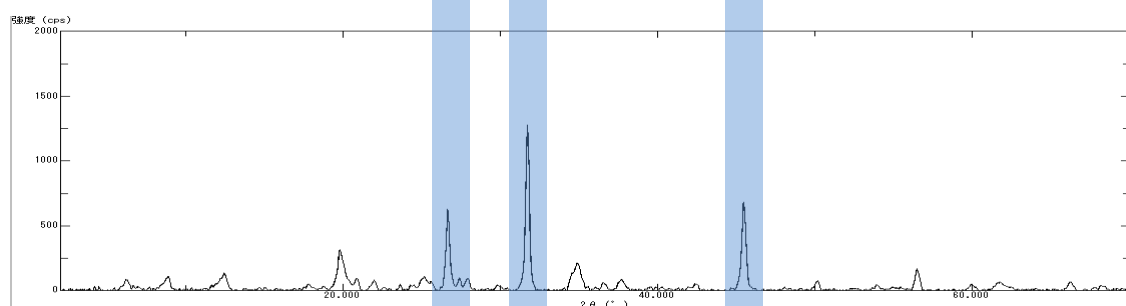


図 4-5-30 千葉灯標海底面から 55cm の X 線回折図

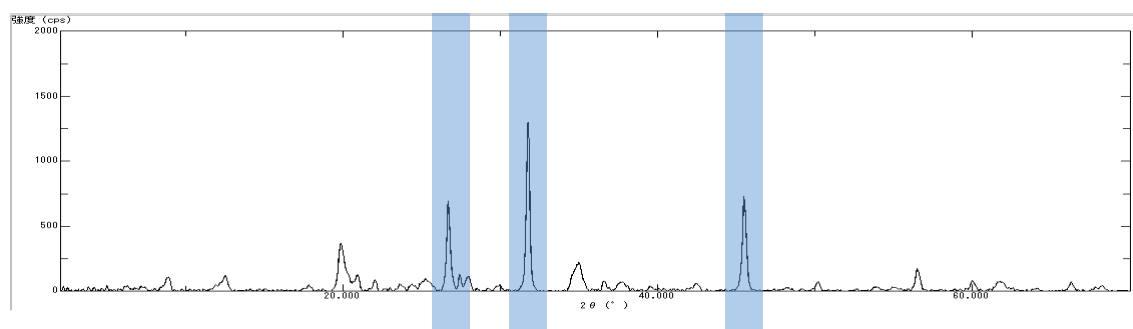


図 4-5-31 千葉灯標海底面から 60cm の X 線回折図

千葉灯標	雲母	スメクタイト	緑泥石	カオリン
深さ	mica	smectite	chlorite	kaolin
0	○	△	*	○
5	○	*	○	—
10	△	△	△	—
15	△	△	△	—
20	○	△	△	—
25	○	△	◎	—
30	○	—	△	△
35	○	△	◎	△
40	○	—	△	—
45	△	○	◎	—
50	△	○	—	—
55	○	—	○	—
60	△	—	△	—

図 4-5-32 千葉灯標での粘土鉱物プロファイル

- : 検出なし, * : 微量, △ : 少量, ○ : 多量, ◎ : 非常に多量

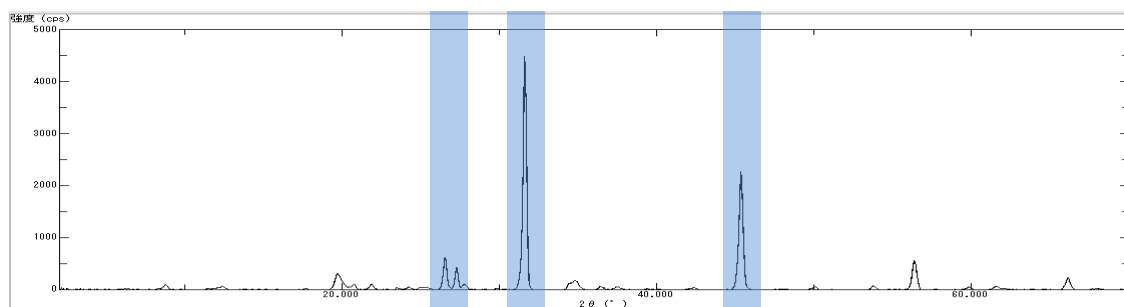


図 4-5-33 湾中央海底面から 0cm の X 線回折図

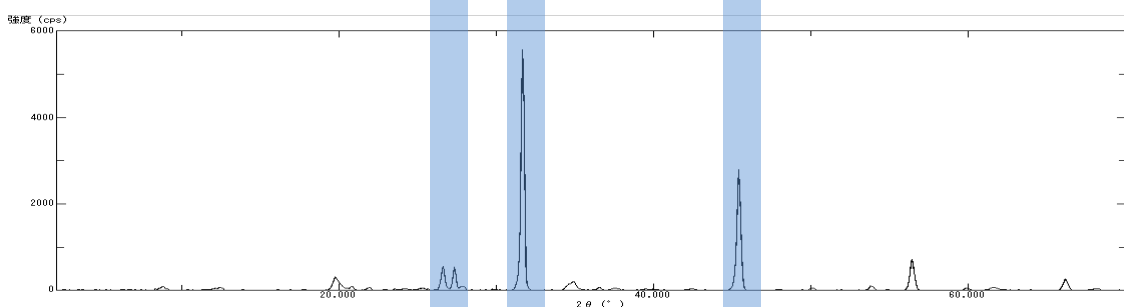


図 4-5-34 湾中央海底面から 5cm の X 線回折図

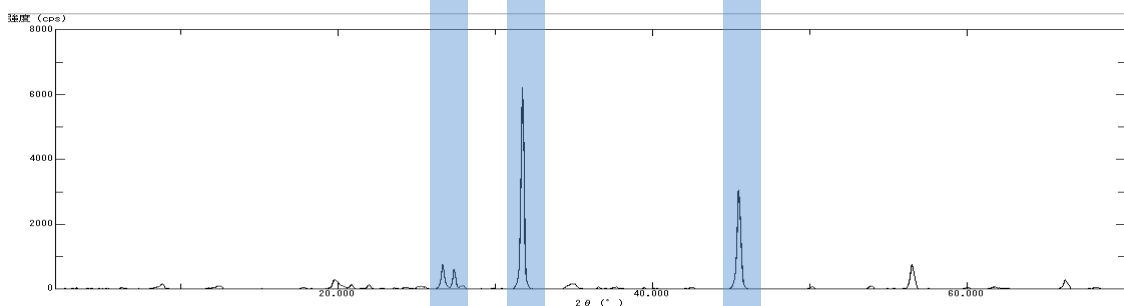


図 4-5-35 湾中央海底面から 10cm の X 線回折図

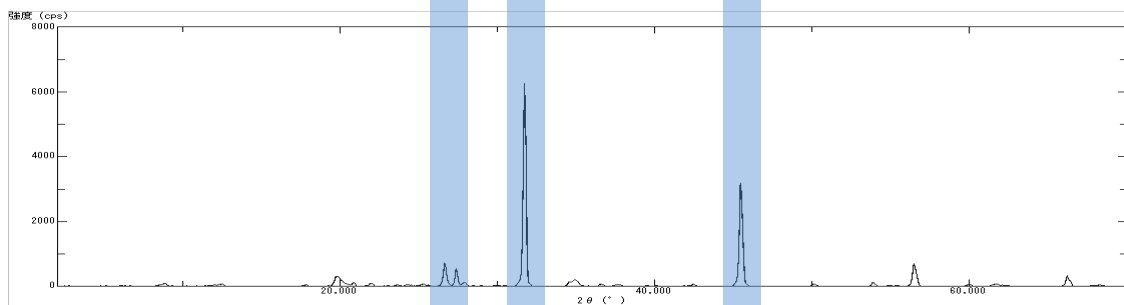


図 4-5-36 湾中央海底面から 15cm の X 線回折図

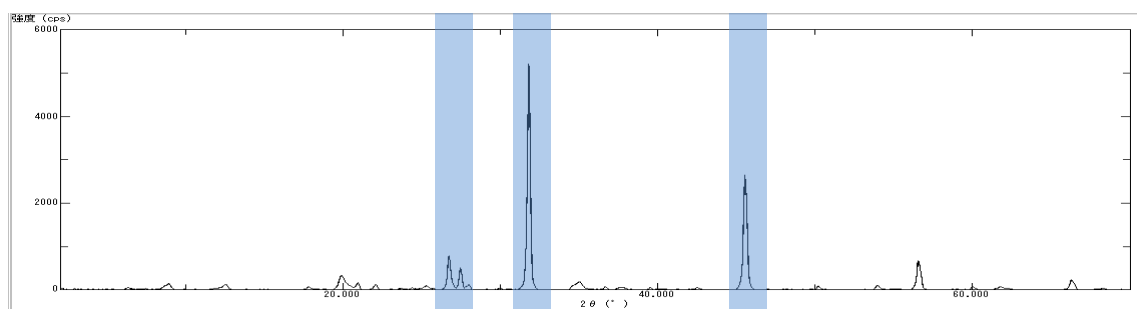


図 4-5-37 湾中央海底面から 20cm の X 線回折図

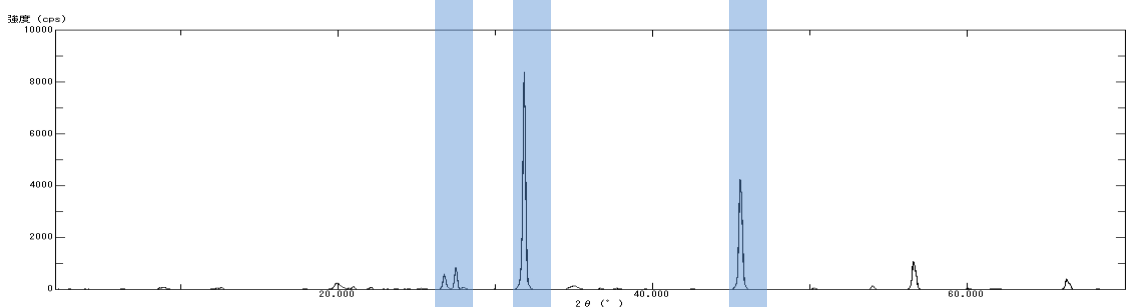


図 4-5-38 湾中央海底面から 25cm の X 線回折図

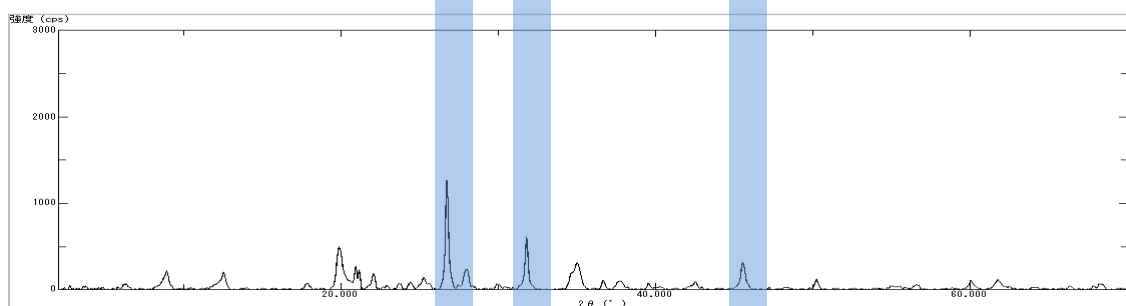


図 4-5-39 湾中央海底面から 30cm の X 線回折図

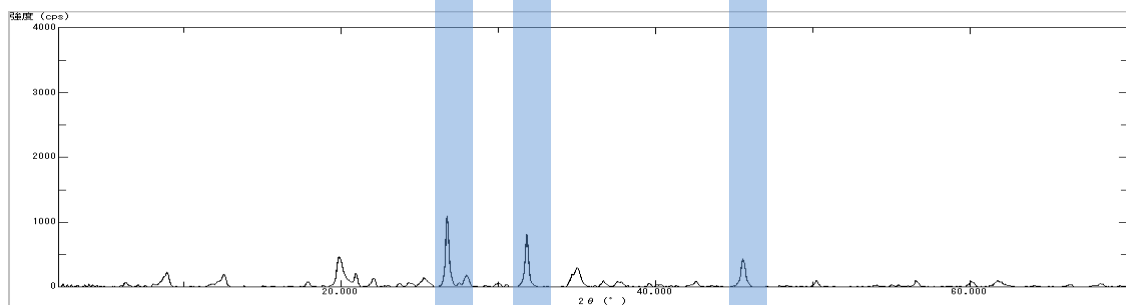


図 4-5-40 湾中央海底面から 35cm の X 線回折図

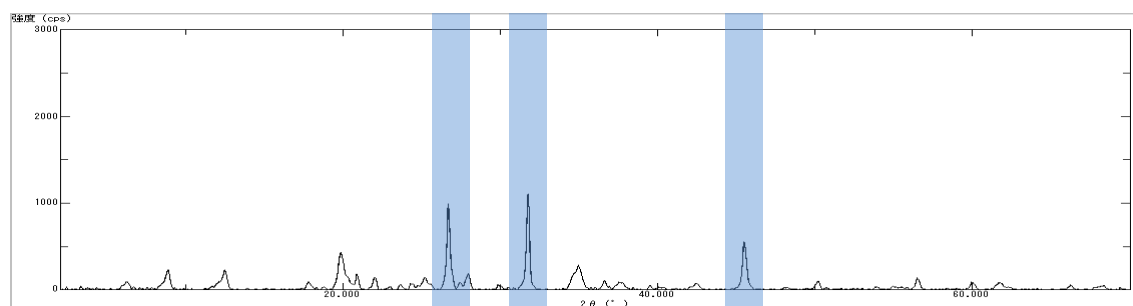


図 4-5-41 湾中央海底面から 40cm の X 線回折図

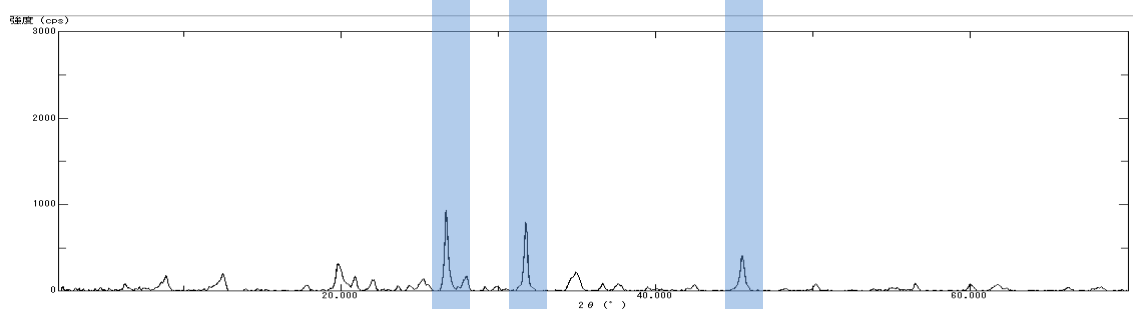


図 4-5-42 湾中央海底面から 45cm の X 線回折図

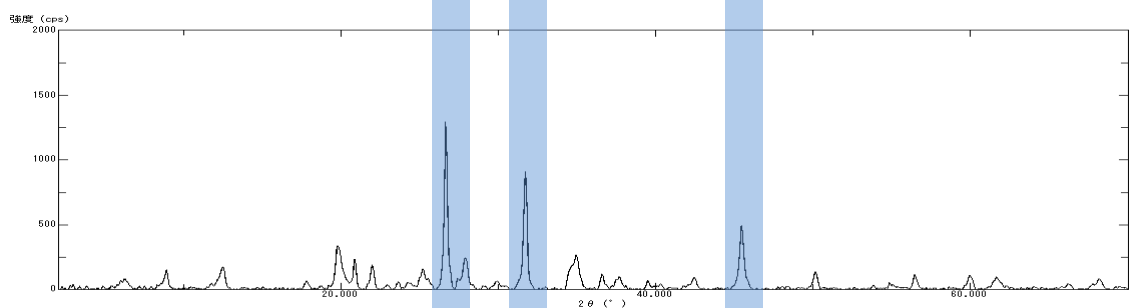


図 4-5-43 湾中央海底面から 50cm の X 線回折図

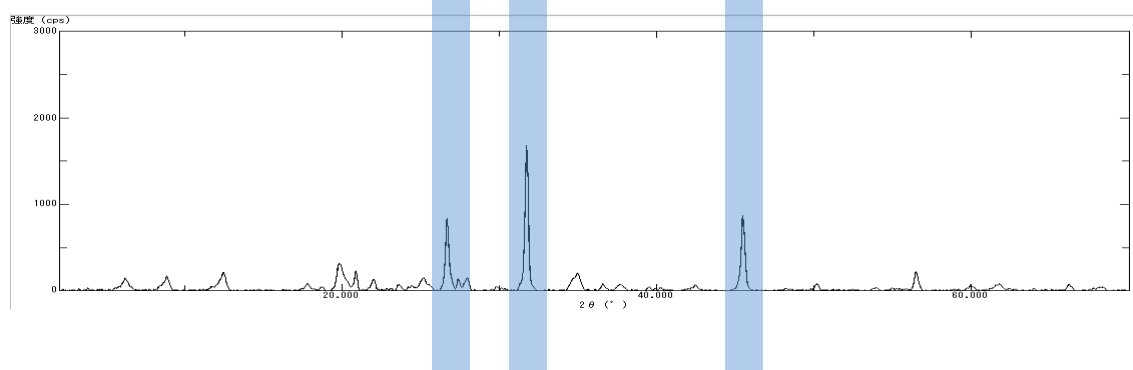


図 4-5-44 湾中央海底面から 55cm の X 線回折図

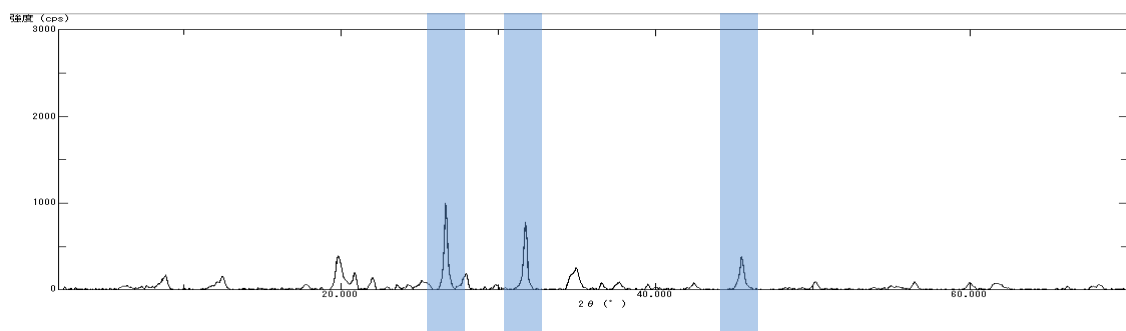


図 4-5-45 湾中央海底面から 0cm の X 線回折図

湾中央 深さ	雲母 mica	スメクタイト smectite	緑泥石 chlorite
0	△	*	—
5	○	△	△
10	△	△	△
15	○	△	△
20	◎	△	◎
25	◎	*	△
30	◎	△	○
35	◎	○	○
40	◎	◎	○
45	◎	△	◎
50	◎	○	◎
55	◎	○	○
60	◎	—	△

図 4-5-46 湾中央での粘土鉱物プロファイル

- : 検出なし, * : 微量, △ : 少量, ○ : 多量, ◎ : 非常に多量

4-6 CN と粒径の関係

この節では、CN 各項目(全炭素、全窒素、有機炭素、有機窒素、無機炭素、無機窒素、CN 比)と粒径の相関を取って、両者の関係について論ずる。粒径の mode 値と CN 各項目の相関を取って R 値を表にしたものが表 4-6-1 でそれに対応するグラフが図 4-6-1 である。更に細かく現象を分析するために、粘土含有率、シルト含有率、砂含有率といった粒径分類と CN 各項目との相関も取った(表 4-6-2, 表 4-6-3, 表 4-6-4, 図 4-6-2, 図 4-6-3, 図 4-6-4)。

市川船橋では、総じて粒径 mode 値と CN 各項目との相関が低い事が分かる。粘土含有率、シルト含有率、砂含有率との相関を見てもはっきりとした関係性は見られない。粒子の大きさと底泥の CN 各項目濃度の間にはあまり関連性がないものと考えられる。

千葉灯標では粒径 mode 値と TIC, TIN に正の相関が出ている。粒径が大きくなるほど、TIC と TIN の値も大きくなるという事は、粒径の大きいものに無機物が多い可能性が考えられる。更に細かく見ていくと、粘土含有率と TIC, TIN の間に負の相関関係が見られ、砂含有率と TIC, TIN の間に若干の正の相関関係が見られた。つまり、粒径の大小は流入してくる無機物質による事が示唆される。

湾中央では、TOC と TON に正の相関が見られる。粒径分類毎に見ていくと、粘土とシルトは、TOC と TON に弱い負の相関を示し、砂は TOC と TON に弱い正の相関を示した。粒径が大きい時の方が、つまり流れの強さが強い時の方が有機物量も若干大きくなる可能性が示唆されたが、あくまで弱い相関なので、粒径の大きさが有機物量の支配的な要因とは言いきれない。

どの項目どの地点でも共通して強い相関が得られた項目は見られなかった。粒径と CN の間に関連性が存在するならば、全地点で共通して同じ程度の相関が出るべきだが、実際にそのような項目は発見されなかった。つまり、粒径と CN 各項目の値同士では、あまり影響を与えていないと言え、粒径と CN はお互いにとってお互いが支配的な要因であるとは言えない。

表 4-6-1 CN 各項目と粒径 mode 値との相関表

R値	TC	TN	TOC	TON	TIC	TIN	CN
市川船橋	-0.17	-0.12	-0.23	-0.16	0.136	0.051	-0.03
千葉灯標	0.118	0.092	-0.01	-0.12	0.494	0.552	0.18
湾中央	0.333	0.301	0.537	0.429	-0.2	-0.05	-0.15

表 4-6-2 CN 各項目と粘土含有率との相関表

R値	TC	TN	TOC	TON	TIC	TIN	CN
市川船橋	0.182	0.087	0.3221	0.154	-0.32	-0.11	0.263
千葉灯標	0.08	0.107	0.2089	0.262	-0.55	-0.35	-0.15
湾中央	-0.17	-0.17	-0.267	-0.32	0.092	0.118	0.33

表 4-6-3 CN 各項目とシルト含有率との相関表

R値	TC	TN	TOC	TON	TIC	TIN	CN
市川船橋	0.068	0.026	-0.003	-0	0.134	0.059	-0.07
千葉灯標	-0.3	-0.32	-0.27	-0.22	-0.06	-0.36	0.12
湾中央	-0.3	-0.28	-0.339	-0.29	0.019	-0.06	0.15

表 4-6-4 CN 各項目と砂含有率との相関表

R値	TC	TN	TOC	TON	TIC	TIN	CN
市川船橋	-0.14	-0.06	-0.184	-0.09	0.113	0.031	-0.11
千葉灯標	0.12	0.116	0.0186	-0.05	0.399	0.444	0.031
湾中央	0.307	0.285	0.3795	0.377	-0.06	-0.02	-0.28

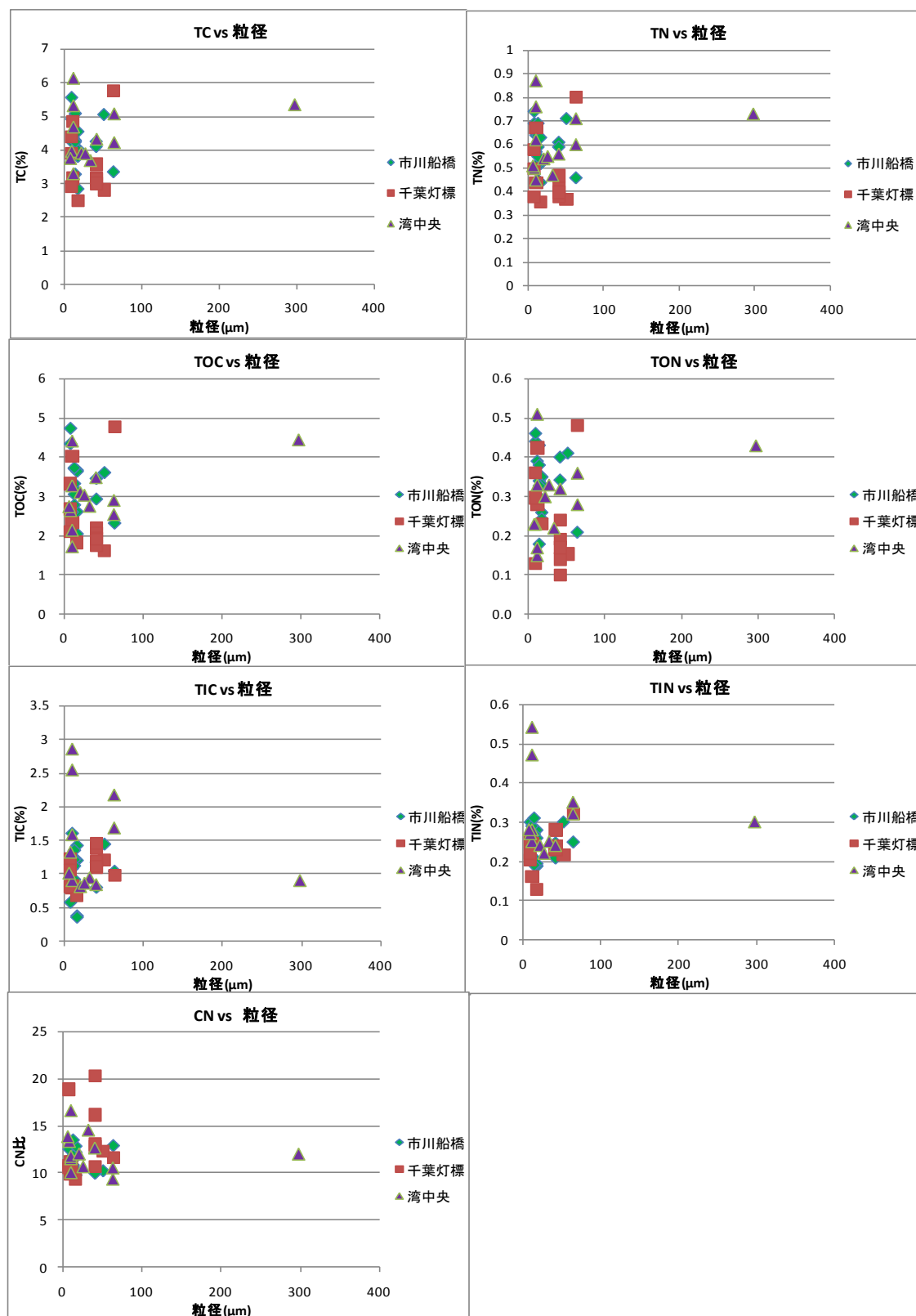


図 4-6-1 CN 各項目と粒径 mode 値との相関図. 左上から下に向かって, 全炭素, 有機炭素, 無機炭素, CN 比, 全窒素, 有機窒素, 無機窒素それぞれと粒径 mode 値との相関.

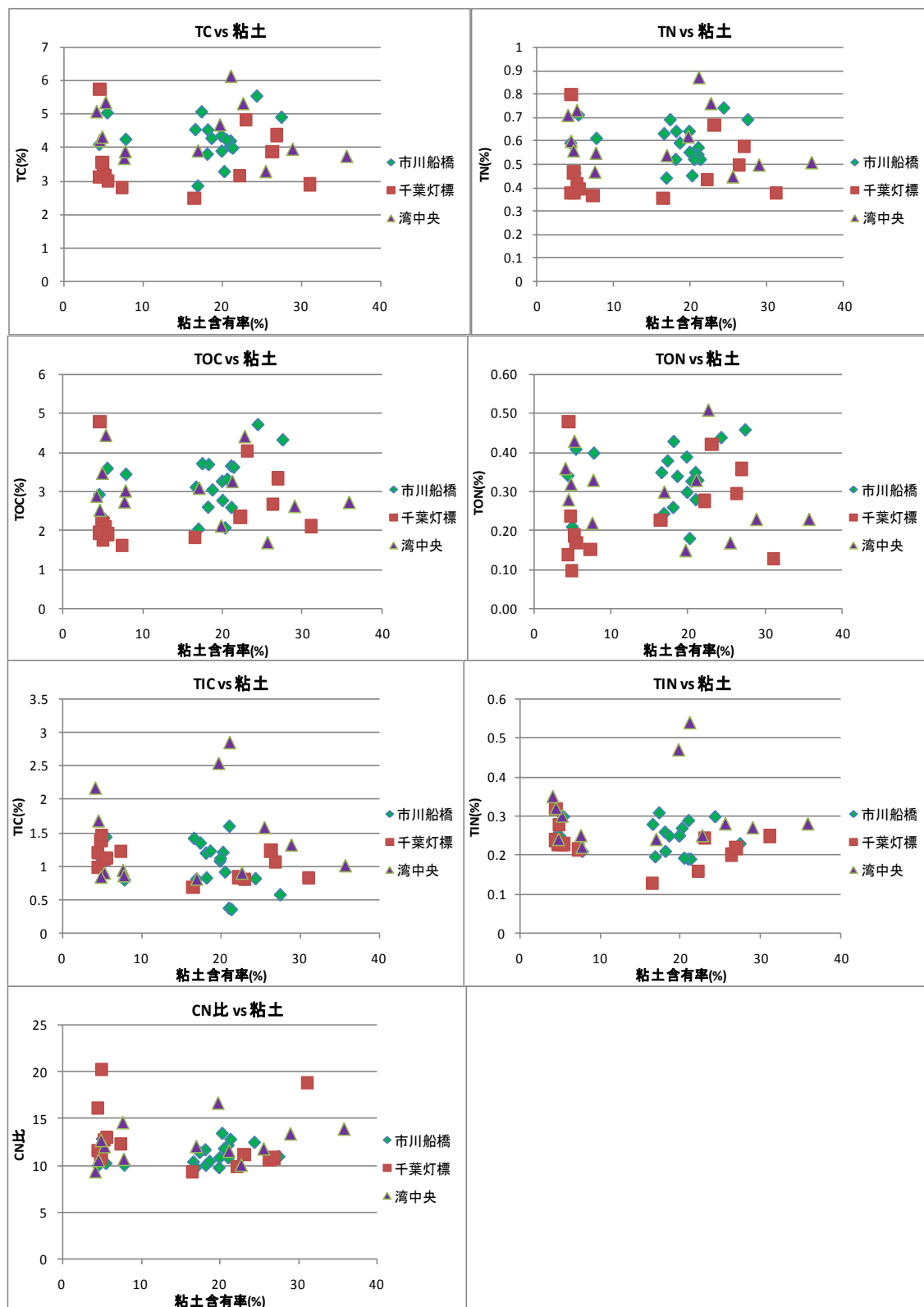


図 4-6-2 CN 各項目と粘土含有率との相関図. 左上から下に向かって, 全炭素, 有機炭素, 無機炭素, CN 比, 全窒素, 有機窒素, 無機窒素それぞれと粘土含有率との相関.

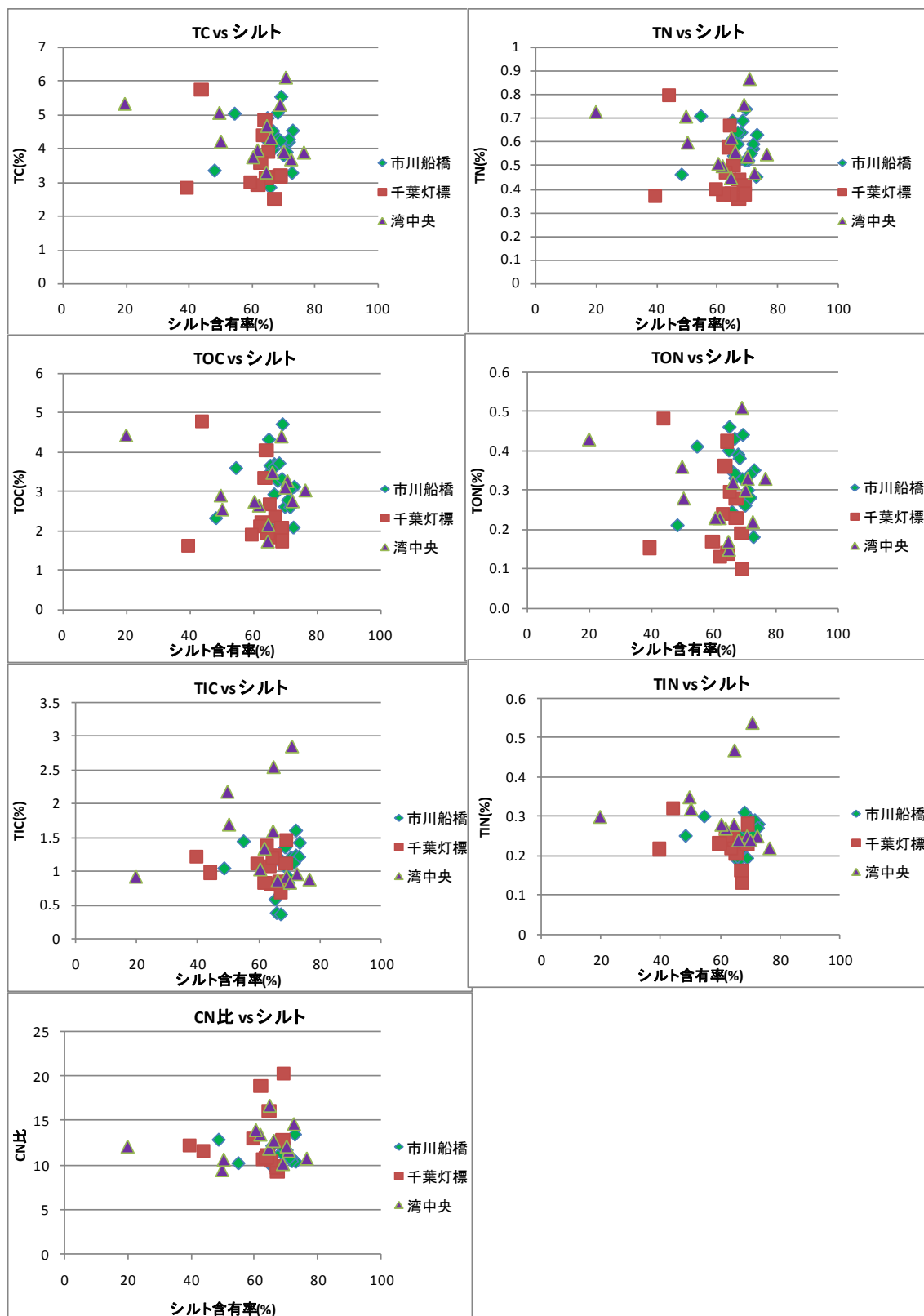


図 4-6-3 CN 各項目とシルト含有率との相関図. 左上から下に向かって, 全炭素, 有機炭素, 無機炭素, CN 比, 全窒素, 有機窒素, 無機窒素それぞれとシルト含有率との相関.

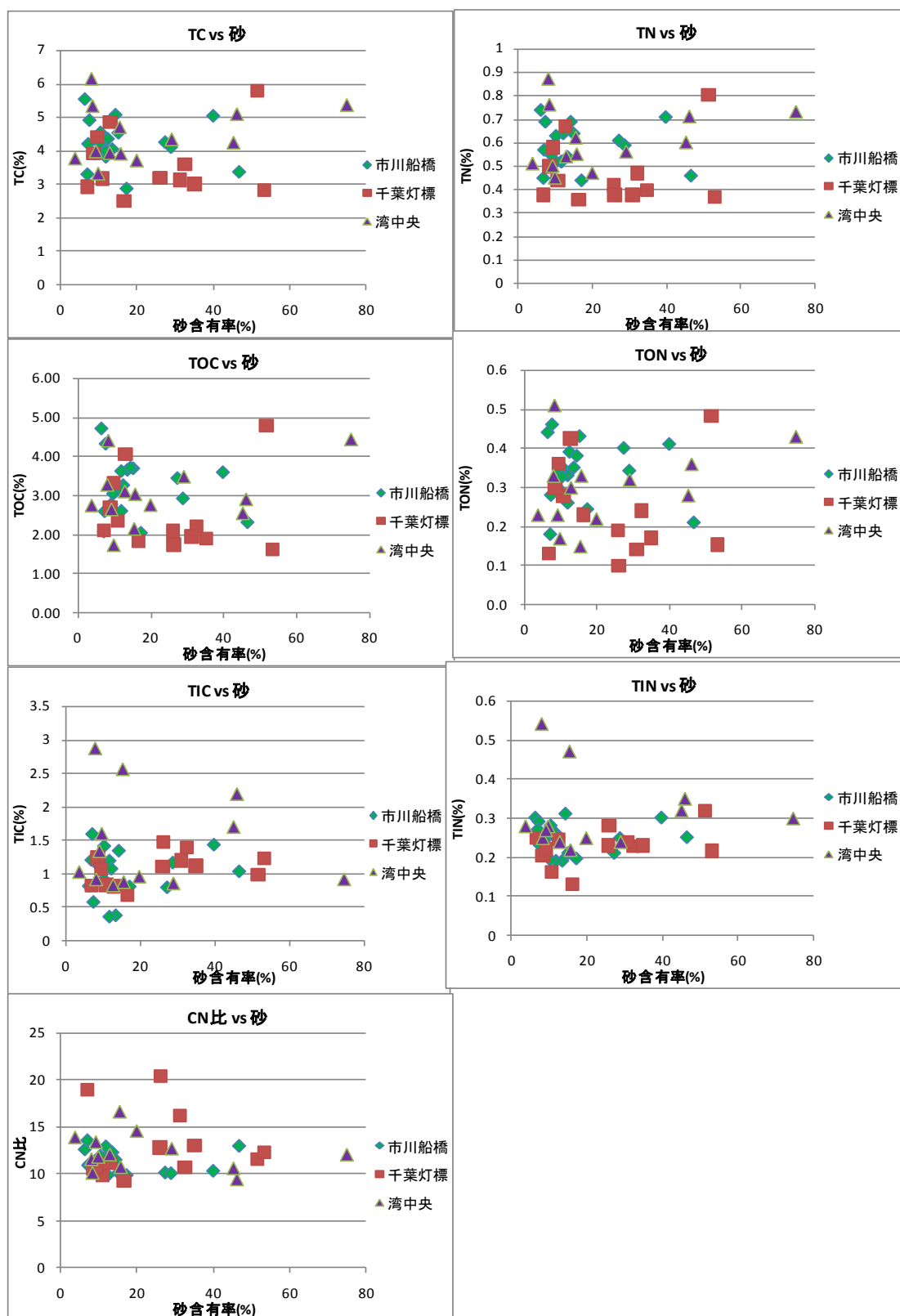


図 4-6-4 CN 各項目と砂含有率との相関図. 左上から下に向かって, 全炭素, 有機炭素, 無機炭素, CN 比, 全窒素, 有機窒素, 無機窒素それぞれと砂含有率との相関.

5. 珪藻群集解析

この章では、本研究で発見された珪藻種やその時系列変化について論じていく。珪藻化石は光学顕微鏡を用いて、3-6 の手順で作成したプレパラートを観察した。珪藻種の同定を行い、サンプル毎に珪藻化石殻数を計数した。

5-1 本研究で確認された珪藻種

本研究で存在が確認された種を表 5-1 にまとめた。表 5-1 を見ていくと、海水性種が一番その割合が多く、海水—汽水性種、汽水性種、汽水—淡水性種、淡水性種という順に存在比が推移していく。その種が好む塩分濃度帯の違いによって、分類されている。生息形態で分類すると、水柱に浮遊して生息する浮遊性種の割合が一番多く、次に海底や陸沿いの岸壁等に生息する底生性種の割合が多く、植物に付着して生息する付着性種は *Cocconeis placentula* しか確認されなかった。生息水域で分類すると、外洋性種、浅海性種、沿岸性種、淡水性種が種数としては同じくらいの割合になっている。また、生息する気候帯で分類すると、北方性種が一番多く、次に南方性種、熱帯性種の順に推移していく。ただ、既往文献において気候帯に関して記述されていなかった種、および種同定の際に特定しきれなかった種については、クエスチョンマークで記してある。また、プレパラートを作成する際に、化石殻数が多いためにカバーガラスに対して斜めになったままの珪藻化石もあったため、種同定を仕切れなかったものは *sp.*や *spp.*と記してある。

表 5-1 本研究で発見された珪藻種

Species		Ind.1	Ind.2	Ind.3	Ind.4
<i>Actinoptychus splendens</i>	(Shadbolt) Ralfs	M	pl	O	NB
<i>Coscinodiscus asteromphalus</i>	Ehrenberg	M	pl	O	SB
<i>Coscinodiscus centralis</i>	Ehrenberg	M	pl	O	
<i>Coscinodiscus centralis</i> var. <i>pac</i>	(Ehrenberg) Gran & Angst	M	pl	O	?
<i>Coscinodiscus curvatulus</i>	(Grunow) Hendey	M	pl	O	NB
<i>Coscinodiscus excentricus</i>	(Ehrenberg) Cupp	M	pl	O	NB
<i>Coscinodiscus gigas</i>	Ehrenberg	M	pl	O	?
<i>Coscinodiscus marginatus</i>	(Ehrenberg) Allen and Cupp	M	pl	O	NB
<i>Coscinodiscus radiatus</i>	(Ehrenberg) Hendey	M	pl	O	SB
<i>Rhizosolenia</i> spp.		M	pl	O	?
<i>Thalassionema nitzschioides</i>	Cleve	M	pl	O	NB
<i>Actinoptychus senarius</i>	(Ehr.) Ehrenberg	M	pl	N	NB
<i>Arachnoidiscus ehrenbergi</i>	Bailey	M	pl	N	NB
<i>Coscinodiscus</i> sp.1	This study	M	pl	N	?
<i>Coscinodiscus</i> sp.2	This study	M	pl	N	?
<i>Thalassiosira oestrupii</i>	Ostenfeld) Proskina-Lavrenk	M	pl	N	NB
<i>Thalassiosira</i> sp.1	This study	M	pl	N	?
<i>Thalassiosira</i> sp.2	This study	M	pl	N	?
<i>Thalassiosira</i> sp.3	This study	M	pl	N	?
<i>Cestodiscus robustus</i> ?	Jousé	M	pl		?
<i>Auliscus caelatus</i>	Bailey	M	b	L	TR-NB
<i>Diploneis</i> sp.1	This study	M	b	S	?
<i>Actinocyclus ehrenbergii</i> var. <i>ca</i>	(W.Smith) Hustedt	MB	pl	N	NB?
<i>Thalassiosira decipiens</i>	(Grunow) Joeegensen	MB	pl	N	NB
<i>Thalassiosira rotula</i>	Meunier	MB	pl	N	TR-SB?
<i>Actinocyclus ehrenbergii</i> var. <i>ter</i>	(Brébisson) Hstedt	MB	pl	S	NB?
<i>Aulacosidcus beeveriae</i>	(Jhonson) Ralfs	MB	pl	S	?
<i>Coscinodiscus rothii</i>	(Ehrenberg) Grunow	MB	pl	S	SB
<i>Cyclotella stylorum</i>	Brightwell	MB	pl	S	NB
<i>Synedra tabulata</i>	(Agardh) K_tzing	MB	b	S(L)	SB
<i>Skeletonema costatum</i>	(Grev.) Cleve	BM	pl	N	SB
<i>Cyclotella striata</i>	(Kützing) Grunow	BM	pl	L	?
<i>Diploneis smithii</i>	(Brébisson) Cleve	BM	b	S(L)	NB
<i>Nitachia tryblionella</i>	Hnatzsch	B	b	S	?
<i>Pleurosiguma</i> sp.		BF	b	L	?
<i>Stauroneis</i> sp.		BF	pe	L	?
<i>Cyclotella meneghiniana</i>	Thwaites	FB	pl	L	?
<i>Melosira varians</i>	Agardh	F	pl	L	?
<i>Cocconeis placentula</i>	Ehrenberg	F	pe	L	?
<i>Fragilaria construens</i>	(Ehrenberg) Grunow	F	b	L	?
<i>Fragilaria</i> sp.		F	b	L	?

Ind.1> M; Marine, B: Brackish water, F; Fresh water.

(生息分布域が領域を跨ぐ場合、より分布量の多い水域を先頭に記載する)

Ind.2> pl: planktonic species, b: benthic species, pe: periphytic species

Ind.3> O: oceanic species, N: neritic species, S: sublittoral species, L: littoral species

Ind.4> NB: north-boreal species, SB: south-boreal species, TR: tropical species

5-2 存在比で見る珪藻種変遷

この節では、種毎の存在比ダイアグラムと生息水域毎の存在比ダイアグラムを示して、珪藻の種変遷について論じていく。存在比で見ることで、種間のパワーバランスについて読み取ることが出来る。

5-2-1 市川船橋の群集変遷

コア全体を通して見て行くと、取り立てて大きな種変遷は見受けられない(図 5-1)。市川船橋地点における珪藻群集は、百年を通して変化が少なかったものであったと考えられる。

強いて層位的に分類していくと、大きく分けて四つの段階に分類できる。75cm-90cm(年代で換算すると 1918 年～1938 年)を A 層，35cm-70cm(1938 年-1977 年)を B 層，15cm-30cm(1977 年～1997 年)を C 層，0-10cm(1997 年～2007 年)を D 層，という四層で分けて見る事が出来る。まず、図 5-1 に記された A 層(1918 年～1938 年)であるが、外洋性種や浅海性種よりも、沿岸性種の方が優占している。そして、淡水性種も僅かながら確認された。淡水性種は海水では生息できないため、死亡した細胞が流されて堆積したものと考えられる。河川水が何らかの形で市川船橋地点に達していた事が示唆される。B 層(1938 年-1977 年)は明確な傾向が見え辛い層である。この時期の珪藻の種変遷は単純な相関関係では表せない複雑な動きをしている。C 層(1977 年～1997 年)は外洋性種の割合が他の層と比べると高い。また、この時期から Littoral benthos の *Auliscus caelatus* がコンスタントに出現し始めた。D 層(1997 年～2007 年)では淡水性種の出現が確認されたほか、外洋性種、浅海性種、沿岸性種がほぼ同じ割合で存在している。河川水と、外洋からの水塊の影響が混在していると言える。表 5-2 を見ると、外洋性種と沿岸性種、浅海性種と沿岸性種が負の相関を示している。淡水性種と他の種の相関については、淡水性種の出現する時期が限られているので、ここでは論じない。浅海性種と沿岸性種については、生息水域が重なる部分があるので、競合関係にある事が示唆される。淡水からの流入が大きくなると、流れてされてくる淡水性種と淡水に含まれる栄養塩を先に使って増大する沿岸性種によって、相対的に浅海性種の割合が減ると考えられる。外洋性種と沿岸性種の関係についても競合関係と捉えて 良いのではないかな。

また、生息水域が同じ種同士で見ていくと、外洋性種の *Coscinodiscus* 属同士や浅海性種の *Actinopterychus senarius* と *Thalassiosira* 属は相互補完の関係にある。つまり、同じ水域を好む種同士で競争している事が窺える。その競合関係は沿岸性種の *Actinocyclus ehrenbergii* var. *carassa*, *Thalassiosira decipiens*, *Actinocyclus ehrenbergii* var. *tenella*, *Cyclotella stilorum* の 4 種の間でも見られる。違う水域を好む種同士より、同じ水域を好む種同士での競争が多いと言う事は、ここ 100 年での市川船橋の水環境の変化の少なさを示しているのではないかな。

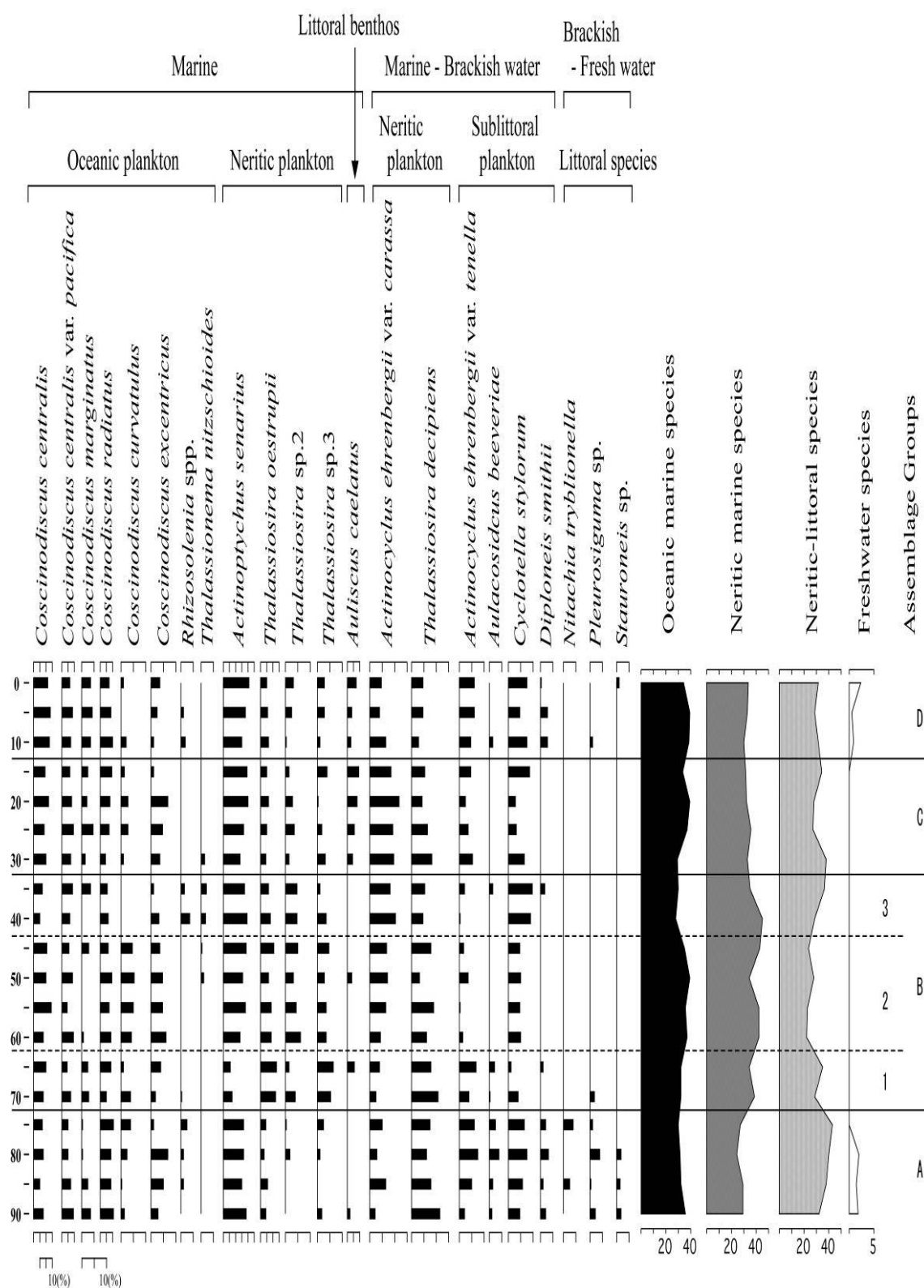


図 5-1 市川船橋地点における珪藻群集変遷

5-2-2 千葉灯標の群集変遷

コア全体を見ていくと、常に沿岸性種は同じ位の割合で存在し、20～30年周期で外洋性種と浅海性種が交互に優占になっている(図 5-2)。そして、三地点の中で、千葉灯標だけの層でも淡水性種が現れないのが特徴的である。

層位的に分類していくと、4つの段階に分けられる(図 5-2)。45cm-60cm(年代換算すると1913年～1944年)をA層、30cm-40cm(1944年～1968年)をB層、20cm-25cm(1968年～1983年)をC層、0-15cm(1983年～2007年)をD層という風に分けることが出来る。A層(1913年～1944年)であるが、初期は浅海性種が優占していて、次に沿岸性種、外洋性種と言う順に割合を占めている。後期は沿岸性種と浅海性種がその割合を減らし、段々外洋性種が増えているが、依然として浅海性種が優占である。B層(1944年～1968年)は外洋性種が優占していて、A層と比べると浅海性種がその割合を減らしている。この時期においては、千葉灯標付近では外洋性種が種間の競争に勝ち抜きやすい条件が揃っていた事が考えられる。また、A層で見られた *Auliscus caelatus* がB層では確認されなかった。C層(1968年～1983年)では浅海性種が再び優占となり、沿岸性種も若干存在比を増やす一方で、外洋性種はその存在比を減らしている。この時期はB層とは逆に、外洋性種よりも浅海性種が競争に勝ち抜きやすい環境状態にあった事が窺える。B層で見られなかった *Auliscus caelatus* が再びC層から現れるようになった。D層(1983年～2007年)では、外洋性種と浅海性種が同じ位の割合で存在し、沿岸性種はその他の層と似たような推移を示している。外洋性種と浅海性種の競争のパワーバランスが拮抗していた事が考えられる。

表 5-3 を見ると、外洋性種と浅海性種、外洋性種と沿岸性種が負の相関を示していて、浅海性種と沿岸性種が正の相関を示している。

生息水域が同じ種同士で見ていくと、外洋性種の *Coscinodiscus* 属同士や浅海性種の *Actinoptychus senarius*, *Arachnoidiscus ehrenbergi*, *Thalassiosira* 属は、増減が一致する傾向にある。一方沿岸性種の *Actinocyclus ehrenbergii* var. *carassa*, *Thalassiosira decipiens*, *Thalassiosira rotula*, *Actinocyclus ehrenbergii* var. *tenella*, *Cyclotella stylorum*, *Cyclotella striata* の6種の間では相互補完に近い関係が見られる。ただ、沿岸性種は全体に占める割合は少なく、外洋性種と浅海性種の競争の方がメインとなっているように見える。同じ水域を好む種同士より、違う水域を好む種同士での競争が多いと言う事が言えるのではないかな。

以上の事より、千葉灯標では外洋性種と浅海性種は競合関係にあり、沿岸性種は他の水域を好む種との競合関係はないが、沿岸性種の中での競合関係があったものと考えられる。この結果から、千葉灯標に流入してくる水塊や水質が時代毎に変化していた可能性が読み取れる。

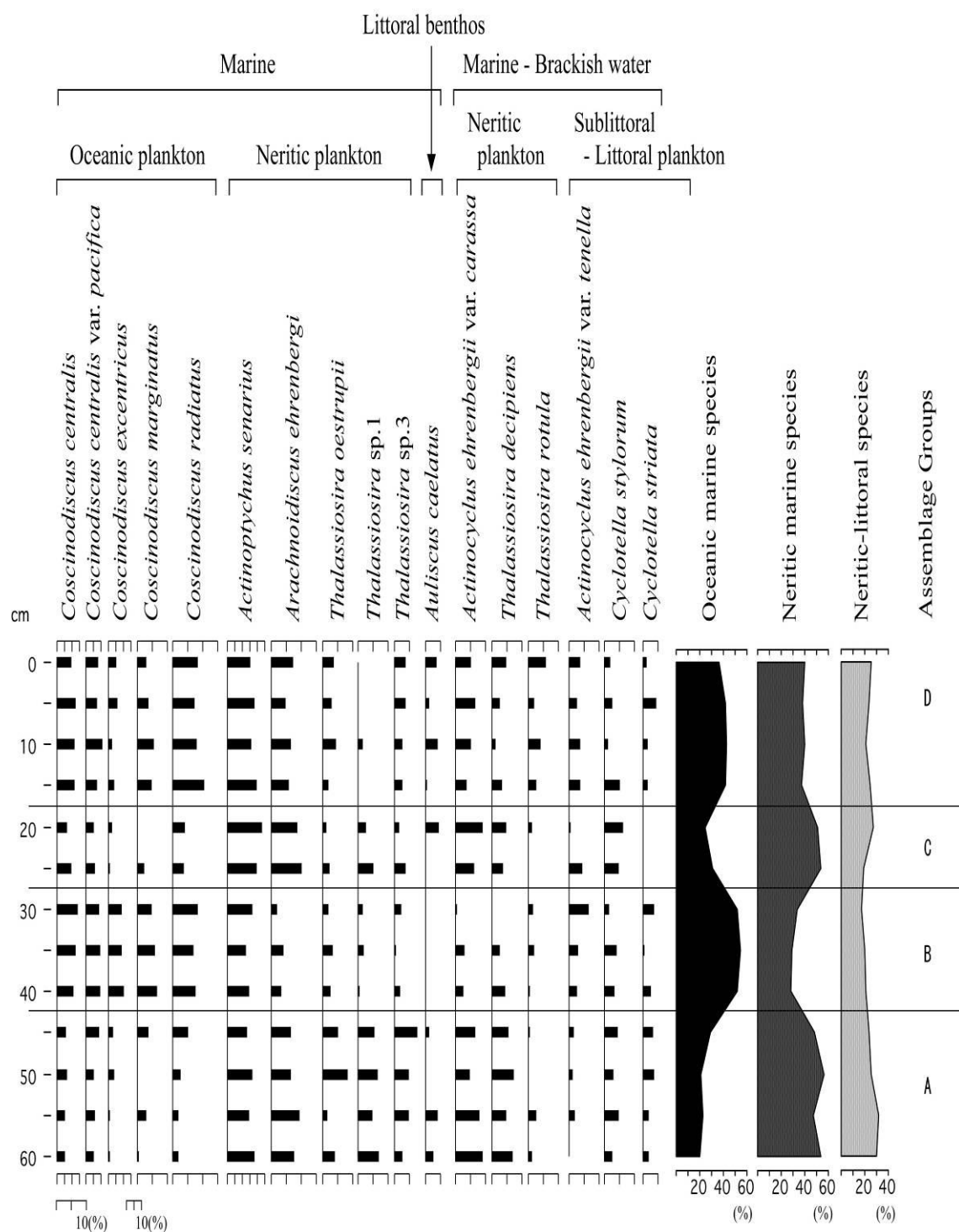


図 5-2 千葉灯標地点での珪藻群集変遷

5-2-3 湾中央での群集変遷

コア全体を見ていくと、他の 2 地点と比べて種変遷の頻度と規模が大きい事が分かる。20cm-25cm の層を境に、外洋性種が優占していた群集が大幅に変わり、沿岸性種や浅海性種が大きい割合を占める群集に変わってきた事が読み取れる。

層位的に分類していくと、3 つに分けられる(図 5-3)。50cm-60cm(年代換算すると 1913 年～1928 年)を A 層、25cm-45cm(1928 年～1968 年)を B 層、0cm-20cm(1968 年～2007 年)を C 層という風に分けることが出来る。A 層では、外洋性種、次いで沿岸性種、浅海性種、最後に淡水性種という順になっている。他地点のサンプルを全層通して見ても、淡水性種が 5%以上存在するのは湾中央だけである。この事から本研究でサンプルを採取した 3 地点の中で湾中央が一番淡水流入の影響を受けている事が分かる。いずれかの種が偏って存在する事はなく、外洋性種を中心に様々な種が少しずつ存在している。B 層では、外洋性種が A 層に引き続き優占していて、次いで浅海性種、沿岸性種と存在している。外洋性種の中でも、*Coscinodiscus centralis*, *Coscinodiscus centralis* var. *pacifica*, *Coscinodiscus marginatus*, *Coscinodiscus radiatus* の 4 種が占める割合が特別多い。なお、この層では淡水性種の存在が見られず、河川水が湾中央まで届いていなかった事が窺える。淡水種が確認されなかった事と、上で挙げた種が多くなった事は無関係ではないと考えるのが自然だろう。この時期の湾中央は河川水からの影響が弱く、水環境状態が外洋に近いものだったと推測される。C 層では外洋性種がその割合を大きく減らし、沿岸性種が優占している。次いで浅海性種と淡水性種が存在している。この層で目に付くのは、10cm 層-20cm 層での特定種の増大である。浅海性種の *Thalassiosira oestrupii*, 沿岸性種の *Actinocyclus ehrenbergii* var. *tenella*, *Coscinodiscus rothii*, *Cycrotella stylorum*, *Cycrotella striata* の増え方は、上下の層と比べても、それまでと変わらない環境下で種間競争に勝った結果とは言えない。この時期に湾中央において、大きな水環境の変化が起きたと考える方が妥当性が高い。この群集の偏りは現在に近づくに従って収束していき、存在比が種毎に分散するようになってきた。だが、外洋性種の存在比は低いまま推移していて、10cm-20cm の層を境に生態系が別な段階にシフトしたものと考えられる。

また、表 4-6-4 を見ると、外洋性種と浅海性種が負の相関を示し、外洋性種と沿岸性種が強い負の相関を示している。つまり、外洋性種と浅海性種、外洋性種と沿岸性種がそれぞれ競合関係にあったと考えられる。

生息水域が同じ種同士で比べると、種同士の競合や増減の同調という面で考えるよりも、ある時期に爆発的に細胞数を増やす種がいくつかあったと解釈する方が分かりやすい。外洋性種の *Coscinodiscus centralis*, *Coscinodiscus centralis* var. *pacifica*, *Coscinodiscus marginatus*, *Coscinodiscus radiatus* の 4 種は 1930 年頃～1960 年代終わり頃、海性種の *Thalassiosira oestrupii*, 沿岸性種の *Actinocyclus ehrenbergii* var. *tenella*, *Coscinodiscus rothii*, *Cycrotella stylorum*, *Cycrotella striata* は 1970 年頃～1980 年終わり頃にそれぞ

れ細胞数を一気に増やしたものと考えられる。

以上の事より，1910 年代～1930 年頃は河川水の影響が存在し，1930 年頃～1960 年代終り頃には河川水の影響がなくなり外洋に近い状態になり，1970 年頃～1980 年終り頃には淡水流入の影響が再び現れて沿岸性種や浅海性種の特定期が割合を増やし，1990 年頃～現在は，沿岸性種と浅海性種を中心に種毎に存在比が分散した状態と，時代毎に水環境も様々に変遷してきたと考えられる

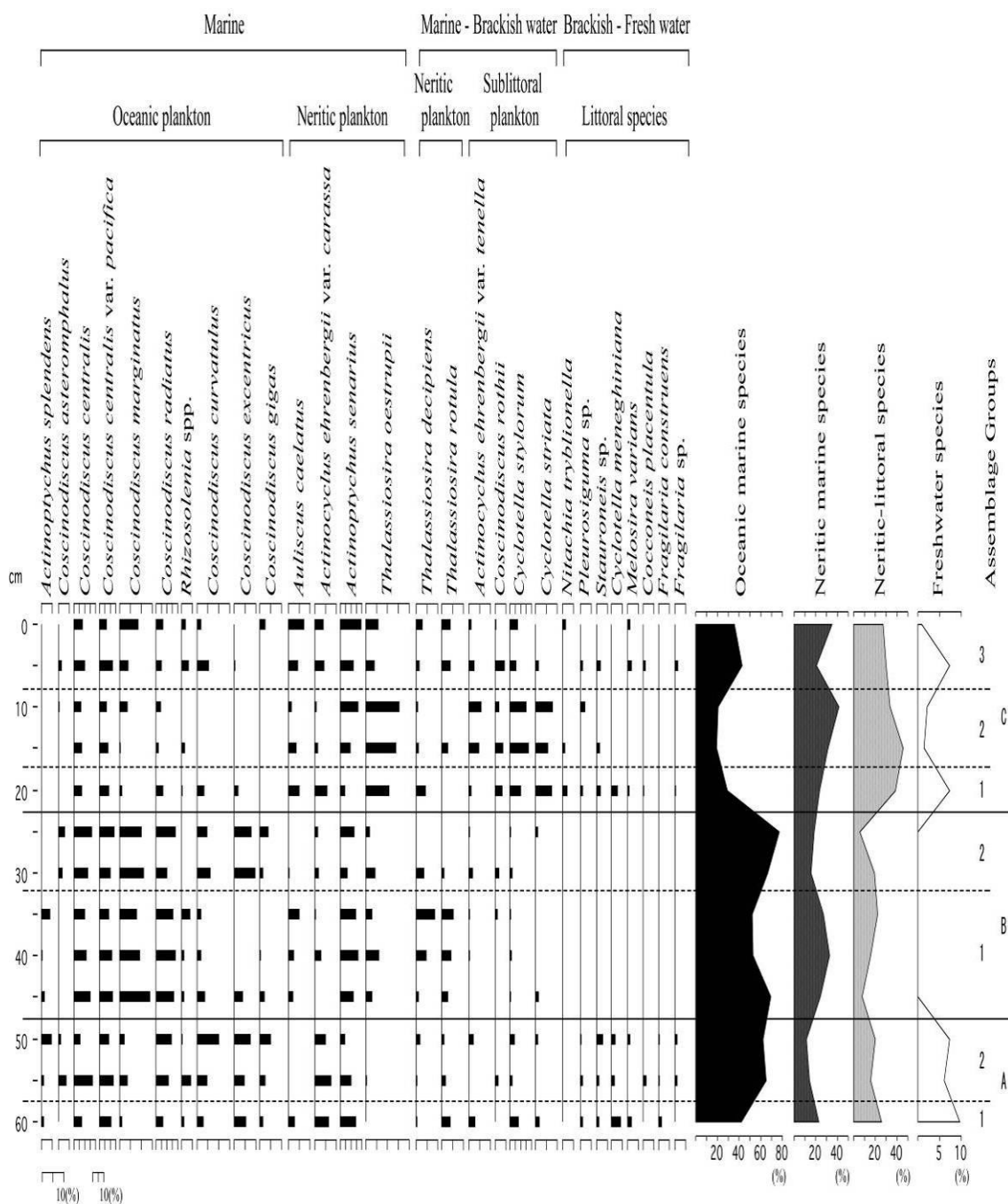


図 5-3 湾中央での珪藻群集変遷

外洋性種	1			
浅海性種	-0.02355	1		
沿岸性種	-0.59681	-0.7659	1	
淡水性種	0.038424	-0.54231	0.302473	1
R値	外洋性種	浅海性種	沿岸性種	淡水性種

表 5-2 珪藻種同士の相関関係(市川船橋)

外洋性種	1		
浅海性種	-0.9437	1	
沿岸性種	-0.76599	0.517227	1
R値	外洋性種	浅海性種	沿岸性種

表 5-3 珪藻種同士の相関関係(千葉灯標)

外洋性種	1			
浅海性種	-0.71151	1		
沿岸性種	-0.93299	0.444422	1	
淡水性種	-0.2015	-0.38438	0.315581	1
R値	外洋性種	浅海性種	沿岸性種	淡水性種

表 5-4 珪藻種同士の相関関係(湾中央)

5-3 化石殻数で見る珪藻種変遷

存在比は地点毎の相対数なため、地点毎の珪藻種間の関係性しか論じられなかったが、化石殻数は絶対数なので、地点を比較する議論が出来、時系列変化に加えて東京湾における珪藻群集の平面分布についても触れることが出来る。珪藻化石殻数の単位としては堆積物乾質量 1g あたりの化石殻数を意味する、個/g(dry)を用いる。

図 5-4 を見ると、千葉灯標での化石殻数が全層を通じて多いことが分かる。珪藻化石殻数は 1910 年代後半から 1960 年頃にピークを迎えるまで、漸次的に化石殻数が増加している。ピーク時には、化石殻数が 90 万個/g(dry)を越えるほど存在している。他の二地点ではこれほど殻数が多い層は存在せず、千葉灯標においては珪藻を含むプランクトンが細胞数を増やすのに適した環境であり、更にそれらのプランクトンが死後に堆積物中にそのまま溜まりやすいことを示唆している。ピークが終わった直後は殻数が減少するが、その後再び現在に向かって漸次的に殻数が増加していつている。ピーク時は特にだが、それ以外の時代も千葉灯標においては、水柱に存在するプランクトンの細胞数が多かった事が窺える。市川船橋では、1930 年代前半、1960 年代半ば、1980 年代後半に、化石珪藻殻数の増加のピークが見られる。1930 年代前半のピーク後の 1940 年代後半には、化石殻数が 10 万個/g(dry)未満にまで落ち込むが、それを境に 2007 年を除いて殻数が 30 万個/g(dry)未満になることはない。また 1960 年代半ばと 1980 年代後半のピーク時には化石殻数が 50 万個/g(dry)を越えていて、当時の水柱に存在したプランクトンの細胞数の豊富さを示唆している。湾中央では、1910 年代～1940 年代半ばまで外洋性種を中心に化石殻数が多い傾向にある。1950 年代前半から全種類合わせても殻数が 20 万個/g(dry)以下にまで落ち込み、その傾向は 1970 年代半ばまで続いている。一つ目のピークは 1980 年代半ばで、殻数は 1910 年代～1940 年代と同じ程度だが、沿岸性種と浅海性種がその数を増やしているのが特徴的である。1990 年代前半に一度、殻数の減少が起きているが、2000 年頃に再びピークを迎え、殻数は 50 万個/g(dry)に達し、外洋性種も再びその数を増してきている。

図 5-5、図 5-6 はそれぞれ、外洋性種の変遷、浅海性種と沿岸性種の変遷を示しているが、市川船橋と千葉灯標では、外洋性種と浅海性種、沿岸性種のピークは同調している。つまり、殻数が増える時は珪藻種全部の殻数が増えて、殻数が減る時は珪藻種全部の殻数が減るという傾向が読み取れる。しかし、湾中央では 1910 年代～1940 年代は外洋性種が多いものの、それ以外の種は殻数が少なく、逆に 1980 年代半ばのピーク時には、浅海性種と沿岸性種のみが飛躍的に増えて、外洋性種はむしろ数を減らしている。1990 年代後半からは外洋性種も数を増やし、全種類の殻数が多い状態になっている。

図 5-7 は淡水性種の化石殻数のグラフだが、湾中央は全層通して淡水性種が発見されていない。市川船橋では 1910 年代～1930 年頃と 1990 年代前半～2007 年までの二つの期間に確認された殻数を平均すると、淡水性種の化石殻数はそれぞれ 2400 個/g(dry)と 2600 個/g(dry)確認された。他の種と比べると、個数のオーダーが二桁違い、それらと比べると微

量と言えるだろう。湾中央では、1910 年代～1930 年頃と 1990 年代前半～2007 年までの二つの期間に確認された殻数を平均すると、淡水性種の化石殻数はそれぞれ 23000 個/g(dry)と 16000 個/g(dry)であった。市川船橋の同時期と比べるとオーダーが一桁違うので、河川水の影響が市川船橋よりは強かった事が考えられる。1970 年代～1980 年代後半までの殻数の平均は、7100 個/g(dry)で上記の二つの期間と比べると、河川水の影響は弱かったと考えられる。

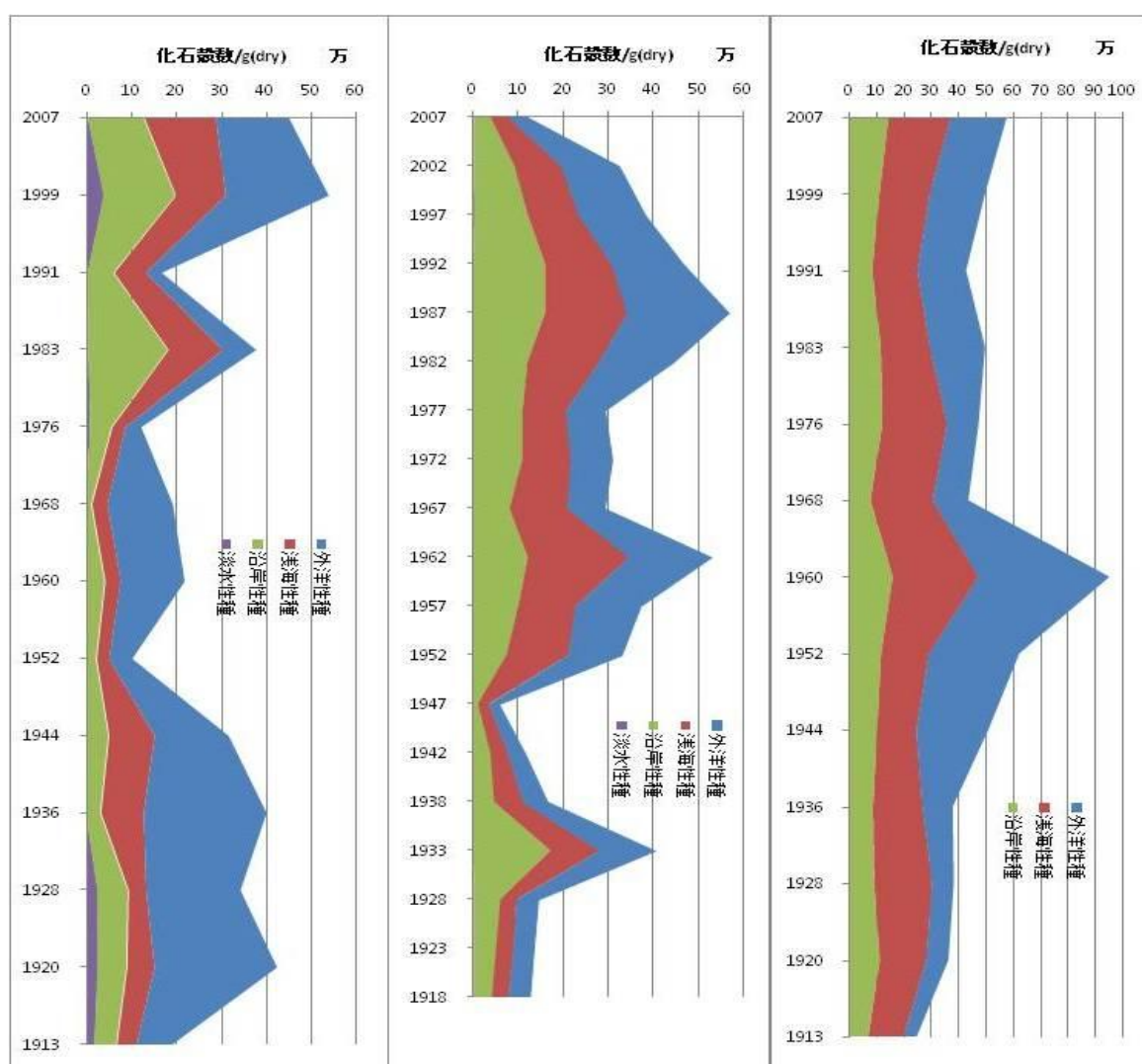


図 5-4 珪藻化石殻数(青：外洋性種，赤：沿岸性種，緑：沿岸性種，紫：淡水性種)の変遷，左から湾中央，市川船橋，千葉灯標。横軸は海底堆積物の乾燥試料 1g 中の化石珪藻殻数，縦軸は年代である。

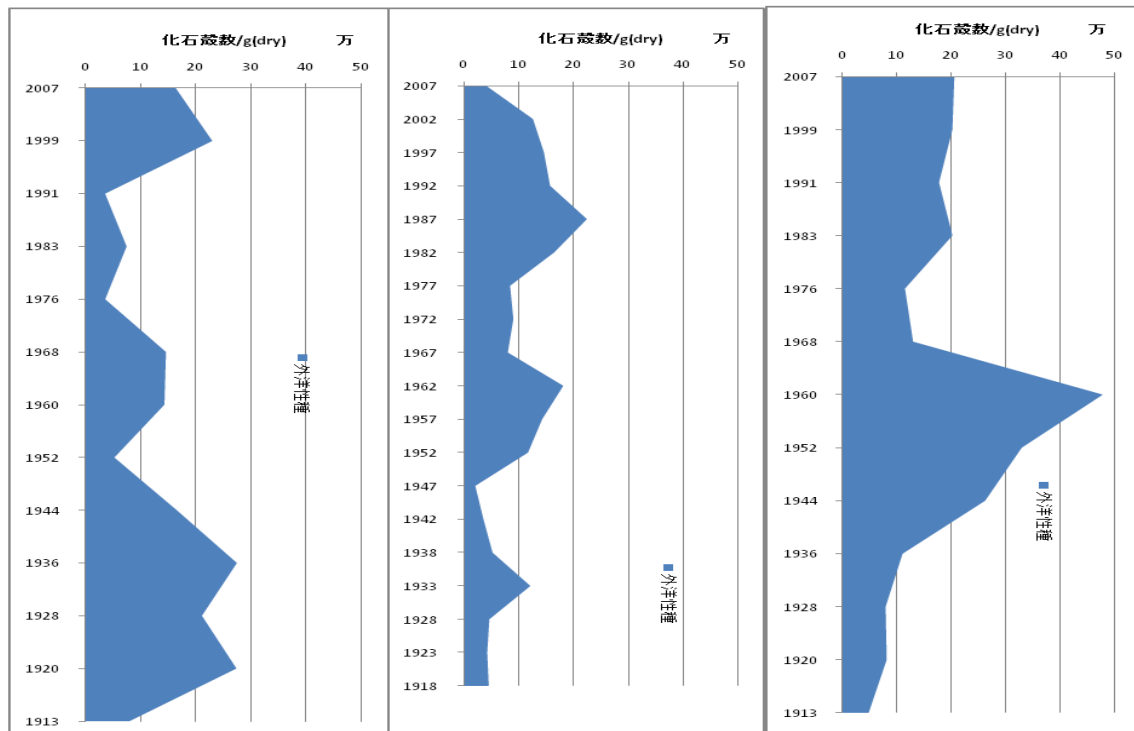


図 5-5 外洋性種の珪藻化石殻数の変遷，左から湾中央，市川船橋，千葉灯標．横軸は海底堆積物の乾燥試料 1g 中の化石珪藻殻数，縦軸は年代である．

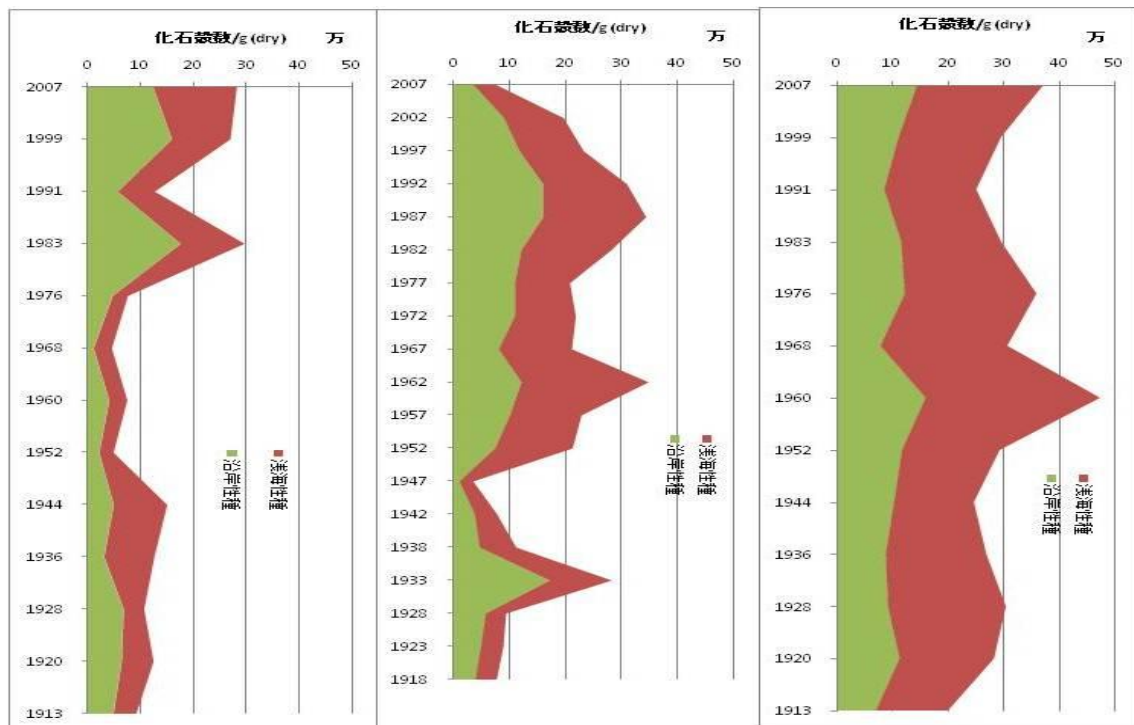


図 5-6 浅海性種(赤)と沿岸性種(緑)の珪藻化石殻数の変遷，左から湾中央，市川船橋，千葉灯標．横軸は海底堆積物の乾燥試料 1g 中の化石珪藻殻数，縦軸は年代である．

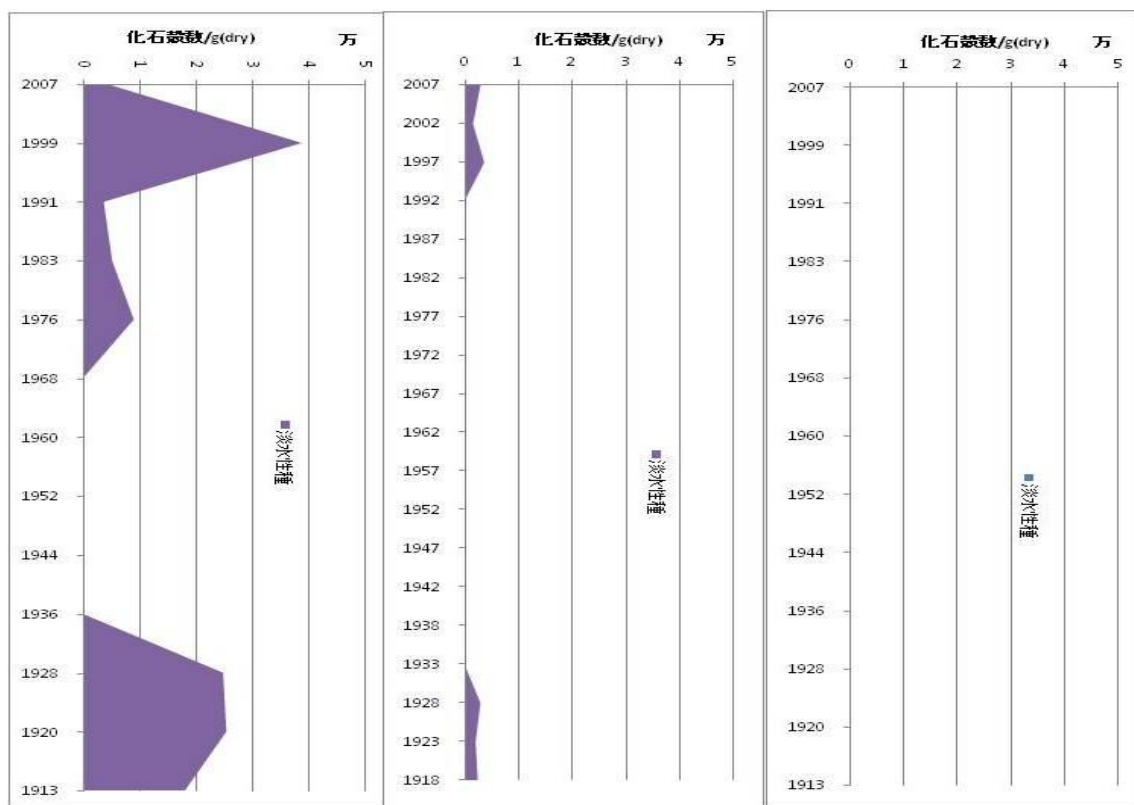


図 5-7 淡水性種の珪藻化石殻数の変遷，左から湾中央，市川船橋，千葉灯標．横軸は海底堆積物の乾燥試料 1g 中の化石珪藻殻数，縦軸は年代である．

5-4 CN 各項目と珪藻群集変遷の関係

CN 各項目と珪藻種の変遷とで相関を取った。CN 各項目の内訳は 4-6 の通りで、珪藻種の内訳は外洋性種、浅海性種、沿岸性種、淡水性種の 4 つである。ちなみに、千葉灯標では淡水性種が確認されなかったもので、千葉灯標は外洋性種、浅海性種、沿岸性種の 3 つと CN 各項目の相関を取った。

表 5-5 を見ると、市川船橋では外洋性種と TC, TN, TOC, TON の間に弱い正の相関が見られる。図 5-8 を見ると、TC, TN, TOC, TON に対しての傾きはそこまで大きくないものの、正の相関があるように取れる。そこで、市川船橋地点での炭素窒素の推移を示した図 4-4-1 と市川船橋地点での珪藻種変遷を示した図 5-1 を比べると、この二つの要素が連動して推移しているようには見えない。少なくとも市川船橋地点では、明確な傾向を読み取る事が出来ない。CN 各項目に対して珪藻種の変遷はランダムな動きををすると言って良いだろう。一方淡水性種と TC, TN, TOC, TON との間に弱い負の相関が出ている。ただ、淡水性種は確認されている層とされていない層がはっきりしている。相関を取って考察するよりは閾値を見た方が傾向は見えるのかも知れない。ただ、底泥の CN 分析は深度が深ければ深くなるほど、微生物の分解などによって、堆積した頃の濃度とは差が出てくる。よって、本研究で算出したデータだけでは考察までは至れない。

表 5-6 を見ると、千葉灯標では沿岸性種と TIC との間に負の相関が出ている。沿岸性種が無機態の栄養塩を消費して増殖しているため負の相関が出ていると考えられなくはないが、そうすると沿岸性種と TIN の相関の低さが説明できない。CN 比と外洋性種に負の相関、浅海性種と CN 比、沿岸性種と CN 比に正の相関が出ているのは、日本海洋学会編(1986)に記された陸上高等生物とプランクトンの CN 比の違いによるものと推察される。浅海性種と沿岸性種が多い事は、千葉灯標においては淡水からの影響が強いことを意味すると考えれば、矛盾はない。ただ、相関があるとは言っても強い相関だとは言えないので、淡水から運ばれてきた陸上高等生物とプランクトンの CN 比の違いから相関が出ているとは断言出来ない。

表 5-7 を見ると、湾中央では浅海性種と TIC, TIN との間に比較的強い正の相関が見られ、沿岸種と TIC, TIN にやや正の相関が見られる。逆に外洋性種と TIC, TIN の間には負の相関が見られる。これは、淡水から多量の無機態栄養塩が運ばれてきたときに、それを使って浅海性種と沿岸性種が増殖し、相対的に外洋性種の割合が下がると言う現象が起きているとも考えられる。湾中央での炭素窒素の推移を示した図 4-4-3 と湾中央での珪藻種変遷図 5-3 を見ると、特に 1970 年以降において、浅海性種、岸性種の割合推移と無機態炭素と無機態窒素の鉛直プロファイルが連動していることがわかる。また、1970 年代は東京湾の富栄養化とそれに伴う赤潮発生が湾全体に拡がり始めた時期でもある。これらの事から、栄養物質の流入量が強くなって、湾中央でも内部生産の量が多くなり、相対的に浅海性種、沿岸性種の占める割合が大きくなっていったと推察できる。なお、底泥の CN 値

は微生物の分解などによって、堆積直後の値と堆積から時間が経ってからの値に差が出る可能性があるが、ある程度は底泥への CN の流入フラックス量を反映している。よって、本研究では底泥の CN 値と堆積当時のフラックス量と捉えて、論を展開している。

市川船橋と千葉灯標では、CN 値と珪藻各種の間に、明確な関係性が見えなかったのに対し、湾中央でそれが見えたのが興味深い。

表 5-5 市川船橋地点での珪藻種と CN 各項目の相関

R値	外洋性種	浅海性種	沿岸性種	淡水性種
TC	0.400498	0.171536	-0.29971	-0.40606
TN	0.3773	0.098685	-0.22895	-0.39503
TOC	0.464821	0.264173	-0.428	-0.36532
TON	0.359687	0.10378	-0.22495	-0.3033
TIC	-0.19992	-0.21952	0.314493	-0.01528
TIN	0.137935	0.017068	-0.07059	-0.28801
CN	0.119394	0.406116	-0.41785	-0.16059

表 5-6 千葉灯標での珪藻種と CN 各項目の相関

R値	外洋性種	浅海性種	沿岸性種
TC	0.297614	-0.26664	-0.23846
TN	0.319524	-0.31204	-0.19506
TOC	0.258674	-0.27899	-0.10198
TON	0.37363	-0.34822	-0.24186
TIC	0.106163	0.100293	-0.52054
TIN	-0.02455	-0.01773	0.049453
CN	-0.47267	0.365208	0.433745

表 5-7 湾中央での珪藻種と CN 各項目の相関

R ² 値	外洋性種	浅海性種	沿岸性種	淡水性種
TC	-0.159	0.27727	0.085713	-0.25726
TN	-0.13512	0.278374	0.045538	-0.25245
TOC	0.412059	-0.34968	-0.36053	-0.00268
TON	0.395577	-0.33584	-0.32787	-0.10135
TIC	-0.64063	0.709615	0.498253	-0.297
TIN	-0.59996	0.727207	0.408814	-0.22841
CN	-0.26034	0.307619	0.148895	0.106759

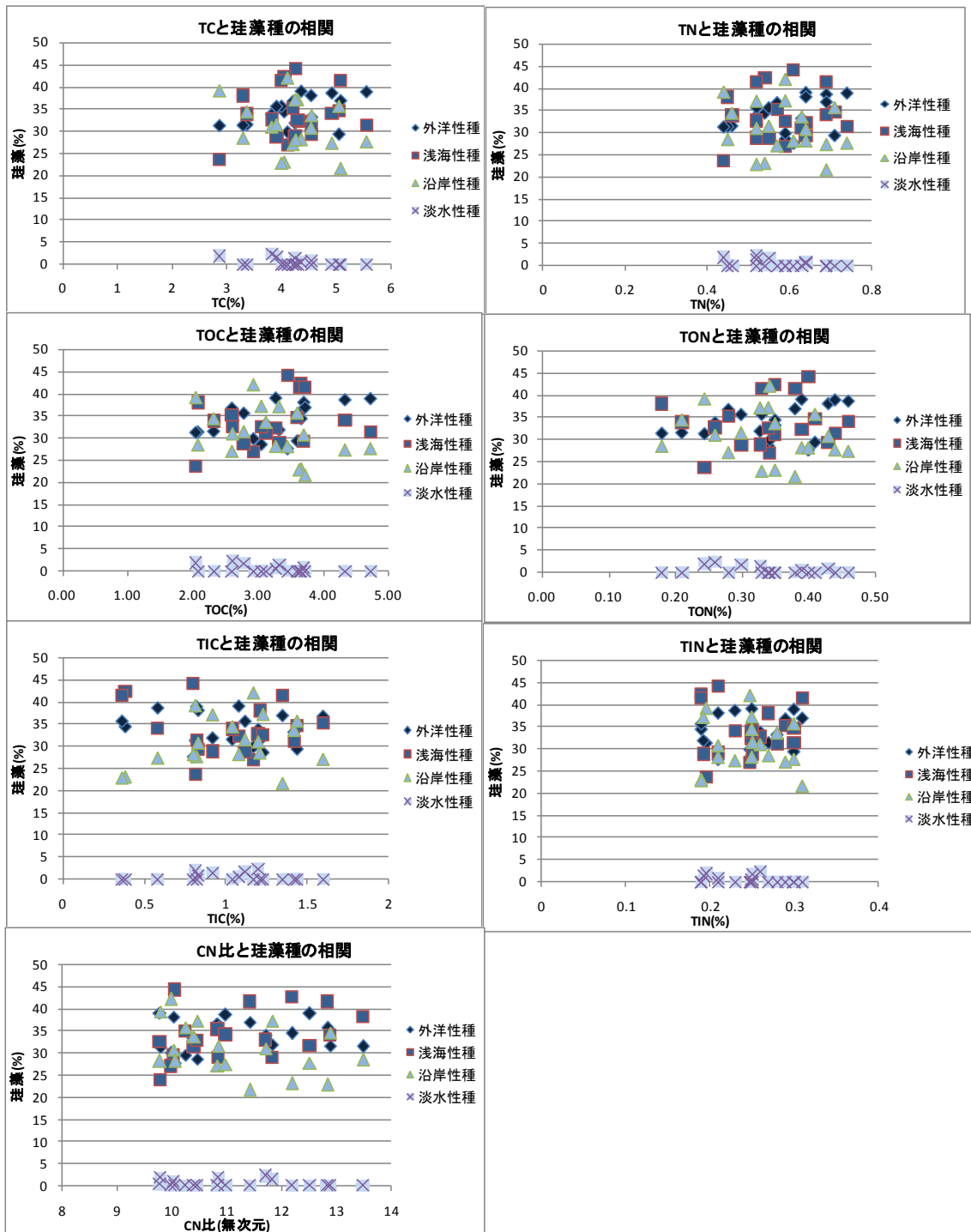


図 5-8 CN 各項目と珪藻種との相関関係(市川船橋)。左上から下に向かって、全炭素，有機炭素，無機炭素，CN 比，全窒素，有機窒素，無機窒素それぞれと珪藻種との相関。

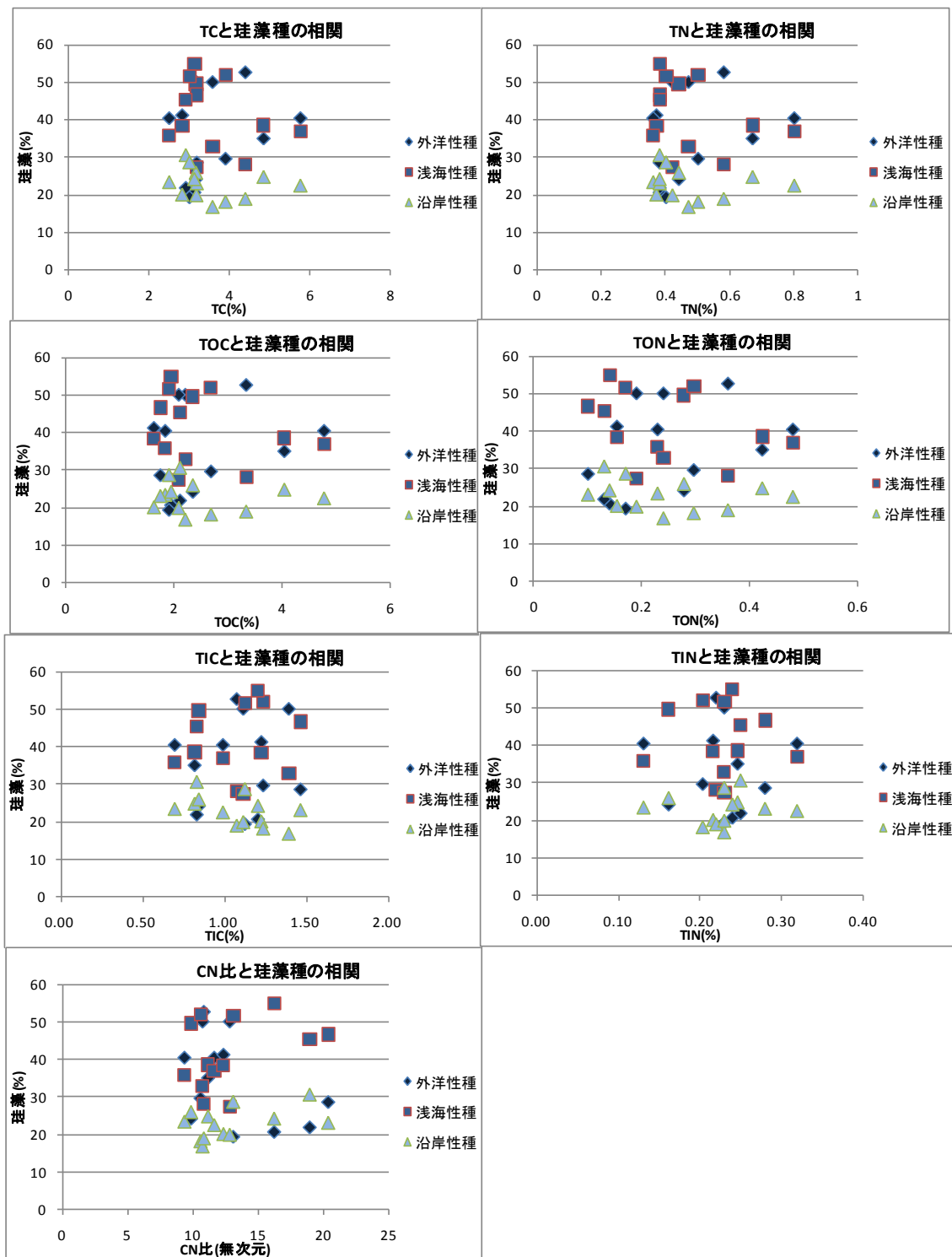


図 5-9 CN 各項目と珪藻種との相関関係(千葉灯標). 左上から下に向かって, 全炭素, 有機炭素, 無機炭素, CN 比, 全窒素, 有機窒素, 無機窒素それぞれと珪藻種との相関。

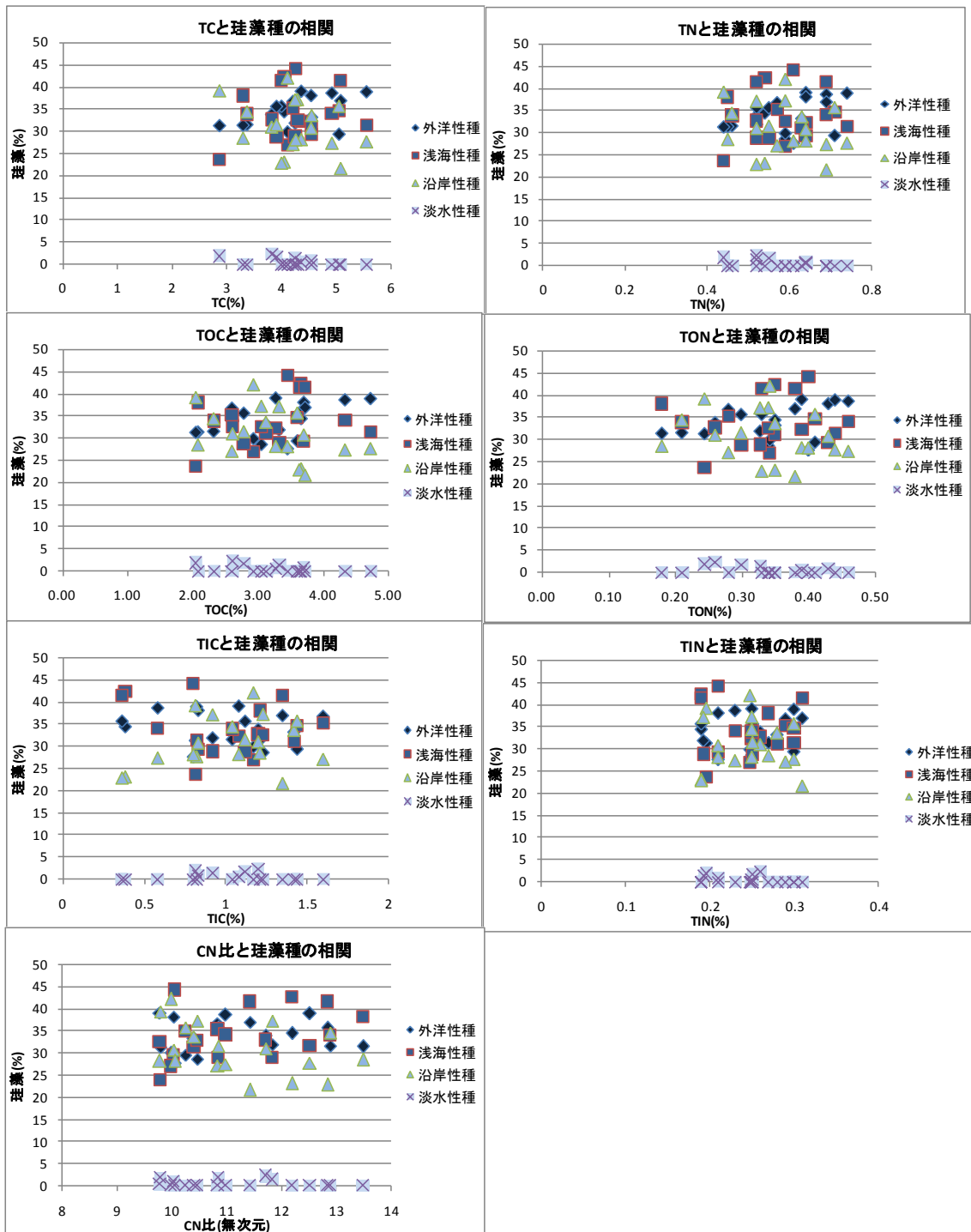


図 5-10 CN 各項目と珧藻種との相関関係(湾中央). 左上から下に向かって, 全炭素, 有機炭素, 無機炭素, CN 比, 全窒素, 有機窒素, 無機窒素それぞれと珧藻種との相関。

5-5 粒径と珪藻群集変遷の関係

市川船橋，千葉灯標，湾中央の三地点について珪藻種と粒径の相関関係を調べた．粒径の各項目は，mode 値，粘土，シルト，砂で，珪藻種の分類は外洋性種，浅海性種，沿岸性種，淡水性種である．

表 5-8 を見ると，市川船橋では粒径と珪藻種の増減に関しては，どの項目も相関が見て取れない事が分かる．図 5-11 は粒径と珪藻の各項目同士の相関を表しているのだが，データのばらつきには法則性がないように見える．沈降してくる粒子の大きさと保存される珪藻の間には，さして関係性が無いことが分かる．

表 5-9 を見ると，千葉灯標でも粒径と珪藻種の増減は，相関を持っていない事が分かる．図 5-12 は粒径と珪藻の各項目同士の相関を表しているが，市川船橋と同様にデータのばらつきには法則性がないように見える．

表 5-10 を見ると，淡水性種と mode 値，沿岸性種と mode 値，沿岸性種と砂に若干の正の相関が出ていて，沿岸性種とシルトに若干の負の相関が出ている．まず，淡水性種と mode 値の相関についてだが，淡水性種は当然河川水によって運ばれてくる．その淡水性種が mode 値と正の相関を持つという事は，湾中央においては粒径の大きな粒子は河川から運ばれてくる傾向にあると考えられる．そこで，砂と淡水性種の相関は $R=0.49$ で，強くはないが正の相関が認められる．また，粘土やシルトと淡水性種はそれぞれ $R=-0.28$ ， $R=-0.48$ と負の相関は出ている．粒径が大きい時は河川水が大きく，その流れに乗って淡水性種が運ばれてくると考えられるが，その論を裏付けるには相関が弱く，断定しきれない．沿岸性種は，mode 値と砂と正の相関を示し，シルトと負の相関を示す事から淡水性種の時と同じ仮説が立てられる．粒径の大きな時は河川水も強いとして，沿岸性種がその河川水に含まれる栄養塩を使って増殖した可能性もある．ただ，粒径と CN の値にそこまで強い相関が見えないことから，これも推測の域を出ないと言える．

表 5-8 市川船橋での珪藻種と粒径の関係

R値	淡水	沿岸	浅海	外洋
mode	-0.27979	-0.01745	-0.14174	-0.27983
粘土	0.163089	-0.03984	0.214813	0.332653
シルト	0.162657	0.135383	0.111185	0.185625
砂	-0.18079	-0.04916	-0.1832	-0.29087

表 5-9 千葉灯標での珪藻種と粒径の関係

R値	沿岸	浅海	外洋
mode	-0.23953	-0.17094	0.0748
粘土	0.202836	0.083146	-0.1059
シルト	0.172097	0.188132	0.002263
砂	-0.23546	-0.16511	0.06921

表 5-10 湾中央での珪藻種と粒径の関係

R値	淡水	沿岸	浅海	外洋
mode	0.657694	0.587109	0.344159	0.374061
粘土	-0.27597	-0.3767	-0.30607	-0.47531
シルト	-0.48346	-0.59027	-0.34839	-0.21345
砂	0.487094	0.615325	0.406593	0.398346

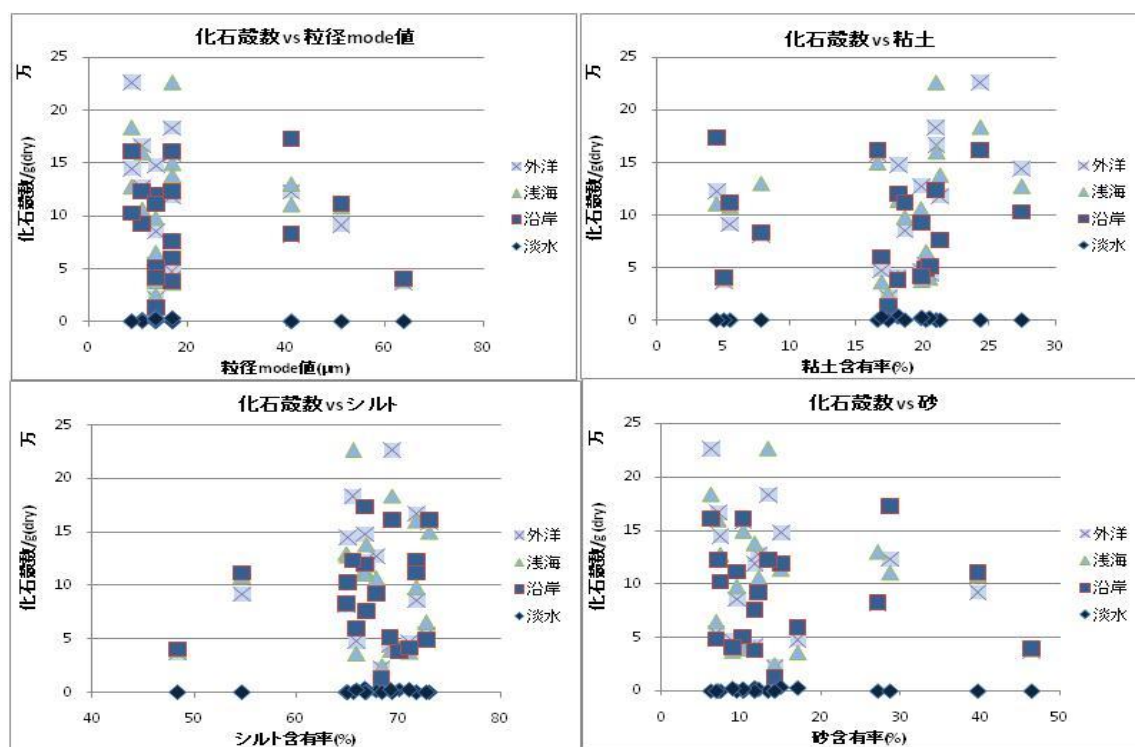


図 5-11 市川船橋での珪藻と粒径の相関関係。左上が粒径 mode 値，右上が粘土，左下がシルト，右下が砂，それぞれと珪藻の相関図

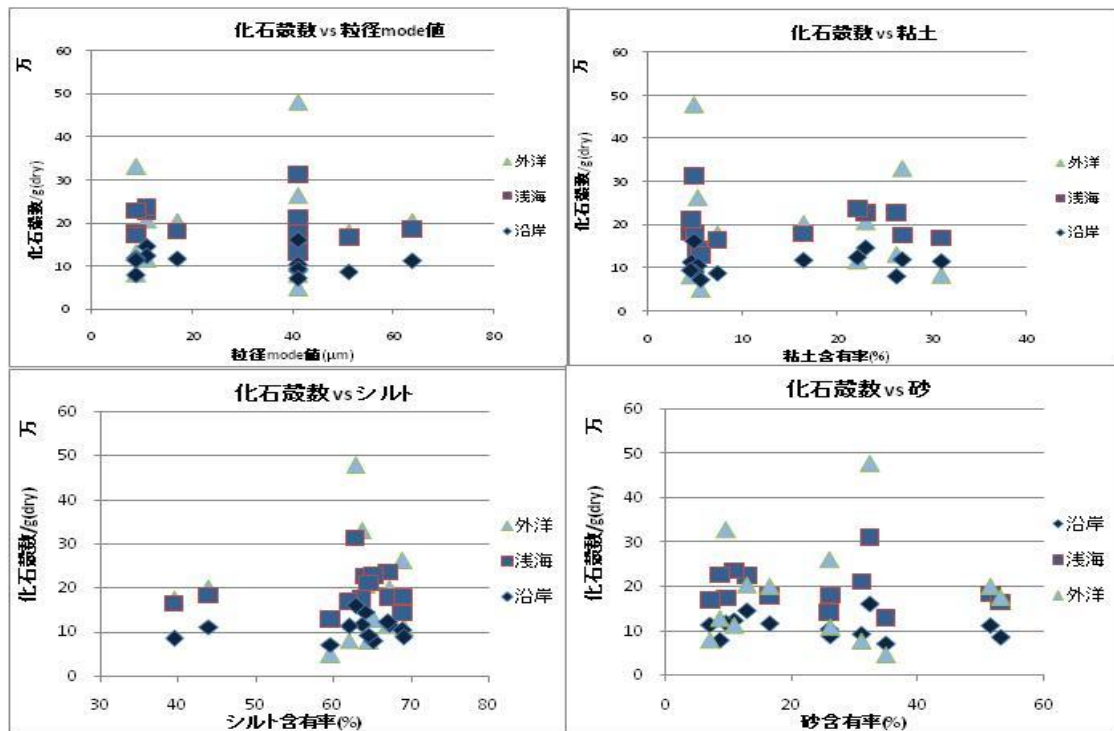


図 5-12 千葉灯標での珪藻と粒径の相関関係. 左上が粒径 mode 値, 右上が粘土, 左下がシルト, 右下が砂, それぞれと珪藻の相関図

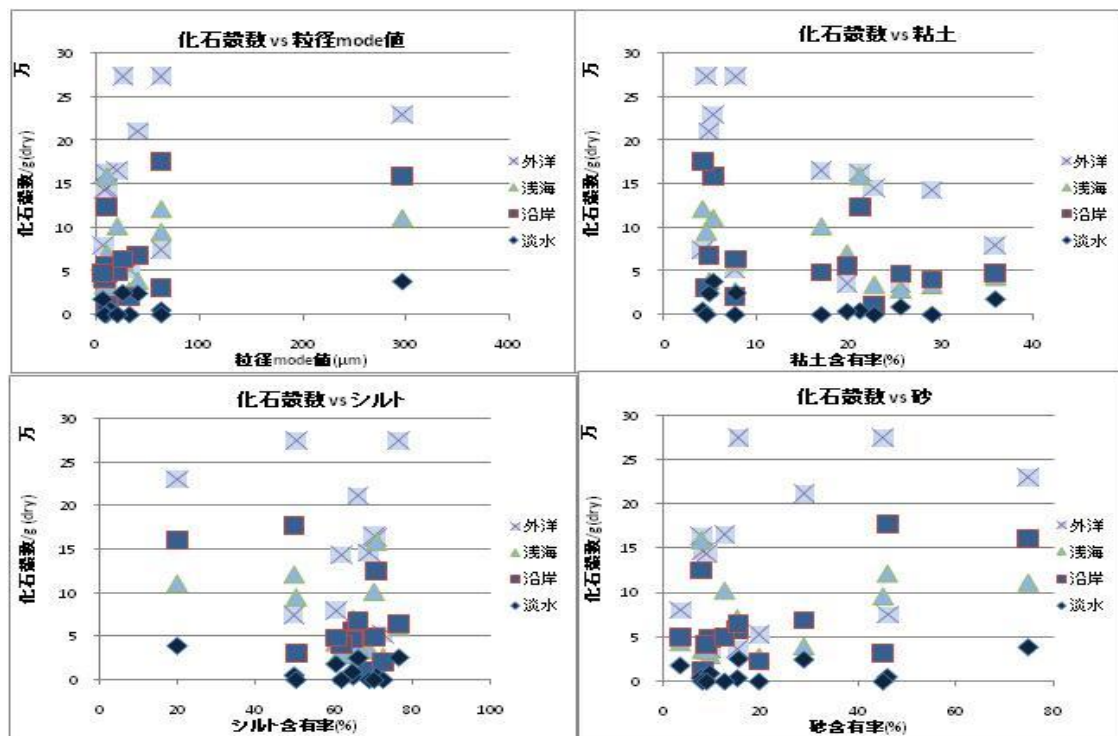


図 5-13 湾中央での珪藻と粒径の相関関係. 左上が粒径 mode 値, 右上が粘土, 左下がシルト, 右下が砂, それぞれと珪藻の相関図

6. 考察

この章では、本研究から得られたデータの中で、東京湾の環境変遷について特に重要なポイントになりそうなものについて議論する。淡水性種が河川水の影響を反映している事、沿岸性種と浅海性種のピークが赤潮発生を示している事を中心に議論する。

6-1 淡水性種出現と湾内での河川水の影響について

まず、市川船橋と湾中央両方で淡水性種が確認された 1910 年代～1930 年頃と 1990 年代前半～2007 年について議論を進めていく。湾中央は多摩川、荒川、江戸川それぞれの河口からの直線距離は 11.7km, 11.5km, 9.8km である。市川船橋は荒川と江戸川からの直線距離は 11.3km と 10.7km で湾中央とさほど変わらないが、河口との間に陸地が存在するので、湾中央よりは河川水が届きにくくなっているものと考えられる。1910 年代～1930 年の層と 1990 年代前半～2007 年の層における淡水性種の化石殻数を比べると、湾中央の方が市川船橋よりも化石殻数が多い。よって、1910 年代～1930 年と 1990 年代前半～2007 年では、河川水の影響は、湾中央の方が市川船橋よりも大きかったと考えられる。河川水の影響は河口から離れるに連れその影響が弱まっていくと考えると、三地点の中では多摩川、荒川、江戸川から近い位置に存在する湾中央の方に、より強い影響が出たとしても矛盾はない。更に市川船橋に、河川水の影響が及んでいた事から、1910 年代～1930 年頃と 1990 年代前半～2007 年はその他の時期より、河川水の及ぶ範囲が広がった事が窺える。

1970 年代前半～1980 年代後半は、湾中央で淡水性種が確認されている(図 5-7)。多摩川、荒川、江戸川それぞれの河口からの距離が三地点では最も近く、河川からの影響が及びやすい湾中央でのみ河川水の影響があったと考えられる。

1930 年～1960 年代後半は、市川船橋、千葉灯標、湾中央いずれの地点でも淡水性種が確認されなかった。従って、多摩川、荒川、江戸川、それぞれの河口付近の水域にしか河川水の影響が及んでいなかったと解釈できる。

表 6-1 多摩川河口・荒川河口・江戸川河口から各地点までの直線距離

	市川船橋	千葉灯標	湾中央
多摩川からの距離	18.1km	26.1km	11.7km
荒川からの距離	11.3km	23.0km	11.5km
江戸川からの距離	10.7km	20.9km	9.8km

仮説の一つとして考えられるのが、河川流量の差が河川水の影響が及ぶ範囲を決定していると言う事である。その検証として、国土交通省の水文水質データベースから、1968年～2001年の多摩川の石原観測所での流量、1954年～2001年の江戸川の流山観測所での流量を得て時系列変化を図化し(図 6-1)、仮説の妥当性について議論する。1910年代～1953年はデータが無いので検証できない。1953年～1960年代後半は、河川水の影響が及ぶ範囲が狭かった時代であり、江戸川での年平均流量を見ると、1954年から1959年のピークまで流量は150 m³/s以上で推移し、ピーク時は200m³/sに達している。それ以降は100m³/s前後を推移している。1970年代前半～1980年代後半は河川水の影響が湾中央まで及んでいた時代であり、江戸川での年平均流量を見ると、1980年代半ばまで年平均流量100m³/s前後を推移し、1989年に156 m³/sとピークを迎えている。1990年代前半～2007年は河川水の影響が市川船橋まで及んでいた時代で、江戸川での年平均流量を見ると1992年に172m³/s、2000年に160m³/sを記録した以外は、120m³/s前後で推移している。河川流量が一番多いのは1954年～1959年にかけてだが、この時期は三地点ではどこも淡水性種が確認されていない。それ以外も淡水性種の出現と流量のピークが一致しない点があるので、河川流量によって、どの地点に淡水性種が出現するか決定されているとは言い難い。河川流量の差が河川水の影響が及ぶ範囲を決定していると言う仮説は成り立たないと言える。

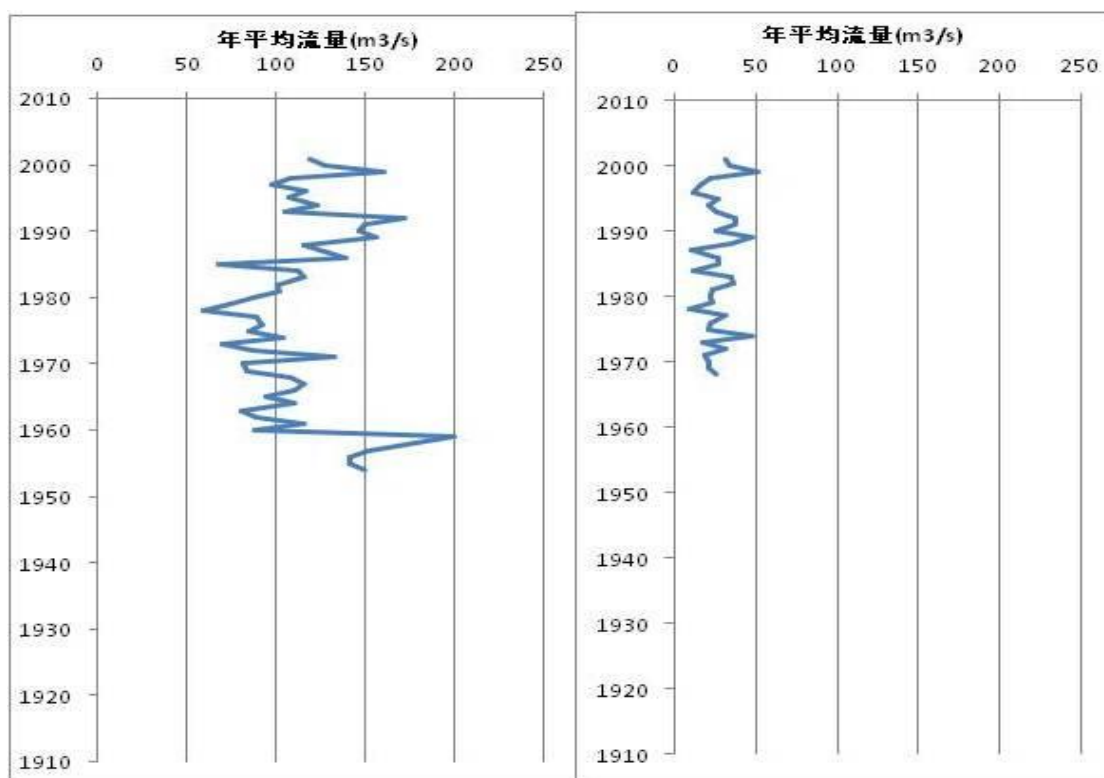


図 6-1 江戸川(左)・多摩川(右)の河川流量の年平均値

一方、河口での混合が強混合か弱混合かによって、河川水の影響が及ぶ範囲が変わる可能性も考えられるが、検証できるデータがないため、仮説の域を出ない。

以上のように、湾内における河川水の影響範囲を決める要因までは特定できなかったが、河川水の影響が及ぶ範囲が時系列変化している事は確かである。1910年代～1930年頃は湾中央と市川船橋まで河川水の影響が見られるため、河口から距離がある地点にも淡水が届いていると言える。1930年～1960年代後半は三地点のどこにも河川水の影響が見られないため、淡水は河口付近の狭い水域にしか届いていないと言える。1970年代前半～1980年代後半は湾中央にのみ河川水の影響が見られるため、淡水は河口より少し離れた水域に届いていると言える。1990年代前半～2007年は湾中央と市川船橋まで河川水の影響が見られるため、河口から距離がある地点にも淡水が届いていると言える。

6-2 沿岸性種・浅海性種と赤潮発生範囲の関係

沿岸性種と浅海性種の化石殻数のピークを見ていくと、市川船橋と千葉灯標では1960年代でピークが一致していて、湾中央と市川船橋では1980年代にピークが一致している。沿岸性種は、潮間帯や潮下帯、陸から近い沿岸部に好んで生息している。また、浅海性種は潮下帯から大陸棚にかけて好んで生息している。東京湾においては、河川水からの栄養負荷増大が赤潮発生の一因と言われているので、赤潮発生時は陸に近い水域を好む種が増えやすいものと考えられる。珪藻の中でも、赤潮種の *Skeletonema costatum* は汽水—海水域を好む浅海性種と言えるし、沿岸性種の *Cyclotella stylorum* も赤潮に伴って種を増やす傾向にあると言われている。よって、上記の1960年代、1980年代の沿岸性種と浅海性種のピーク出現は、赤潮がそれぞれの地点で発生した事を示している。

まず、1960年代の赤潮発生状況について述べる。野村(1998)によると、赤潮の本格化は1960年代からと考えられ、東京湾湾奥北部から岸沿いに湾奥の船橋に拡大し、夏季には高密度な赤潮水塊は東京湾東岸の千葉県木更津付近まで南下するようになった。この時期、沿岸性種と浅海性種のピークは、市川船橋と千葉灯標で確認されている。陸地からの距離は市川船橋が4.5km、千葉灯標が2.0km、湾中央が7.2kmであり、陸地から一番遠い湾中央には赤潮水塊が及ばなかったが、湾奥北部から岸沿いに拡大した赤潮の影響が、市川船橋と千葉灯標において、沿岸性種と浅海性種のピークという形で現れたと考えられる。

1980年代の赤潮発生状況だが、野村(1998)によると1980年代前半においては発生する赤潮の、少なくとも40%は東京湾全域に展開しており、1989年以降は東京湾表層において時間的にも空間的にもクロロフィル濃度の変動幅が小さくなってきている。この時期、湾中央と市川船橋で沿岸性種と浅海性種のピークが見られ、千葉灯標でも化石殻数は多い。これは、湾内全域に広がった赤潮を表しているものと考えられる。

1960年代以前についても赤潮は確認されているが、流入河川の河口付近などの淡水流入域に限られていた。ただ、市川船橋において、1930年代前半に沿岸性種と浅海性種のピーク

クが出ているのが興味深い。東京湾での水質の調査は松江(1936)や阿部(1935)が品川湾で行ったものしか見つからず、市川船橋に出たピークが赤潮を示すものかどうかは確認できなかった。赤潮の発生時は外洋性種、浅海性種、沿岸性種は全て化石殻数を増やしているが、この時期の市川船橋でも例外ではない(図 5-6)。赤潮には至らないまでも、大規模な blooming が起こっていた可能性は高い。

6-3 まとめ

赤潮の本格化が始まった 1960 年代(野村, 1998)は、河川水の及ぶ範囲が狭く、岸沿いにならしか赤潮は広がらなかったものと考えられる。1970 年代には河川水の及ぶ範囲が広がり始めた。1970 年代後半に、東京湾の水環境は好転し(江角, 1979)、水産生物相も若干回復が見られたが(清水, 1987)、その後の栄養塩類の時系列変化や赤潮の発生状況を見ると一過性のものと考えられる。河川水の栄養塩負荷はこの時期がピークだったので、河川水の広がりが水環境の好転に寄与したとは考えられない。外洋水の流入量増加によって水質が良化したとも考えられるが、化石殻数を見るとその時期に外洋性種が細胞数を増やした形跡はない。この時期の水環境好転の要因は特定するに至っていない。1980 年代には赤潮の発生が東京湾の全域に広がり始めたが、高濃度の栄養塩を含む河川水の影響が広がり、それに伴い赤潮の発生範囲も広がったものと考えられる。1990 年代からは河川水の影響範囲は更に広がり、赤潮の発生範囲も東京湾全域に広がったままである。

赤潮の発生範囲の広範化は、高濃度の栄養塩を含んだ河川水の及ぶ範囲が広がる事に起因すると考えられる。河川水の影響が及ぶ範囲が狭かった 1960 年代は赤潮が岸沿いに留まっていたが、その影響が広がり始めた 1970 年代から徐々に赤潮が広がり始め、1980 年代には赤潮が東京湾全域に広がったものと考えられる。1990 年代～現在も河川水の影響範囲は広く、赤潮の発生範囲も東京湾全域に及んでいる。1910 年代～1930 年までの期間は、現在と同じ淡水性種が確認されているが、沿岸性種と浅海性種の化石殻数に大きな差がある。1910 年代～1930 年は河川水の影響範囲は現在と同じ位だが、栄養塩濃度が現在よりも低かったために、赤潮が東京湾全域に広がる事が無かったものと考えられる。

本研究で明らかになった事項を以下に箇条書きにした。

- ・淡水性種の出現時期や出現地点から、東京湾において河川水が届く範囲が変化している事が分かった。
- ・沿岸性種と浅海性種のピークは東京湾での赤潮発生範囲を示唆している事が分かった
- ・陸域からの栄養負荷増大と、河川水の届く範囲が広がった事が、東京湾全域に赤潮が広がった要因である可能性が高い。

7. 引用文献

- 遠藤毅(2004)：東京都臨海域における埋立地造成の歴史，地学雑誌，113(6)，pp.785-801
- 安藤晴夫，柏木宣久，二宮勝幸，小倉久子，川井利雄(2005)：1980 年以降の東京湾の水質汚濁状況の変遷について—公共用水域水質測定データによる東京湾水質の長期変動解析—，東京都環境科学研究所年報，pp.141-150
- 宇野木早苗・岸野元彰(1977)：東京湾の平均的海況と海水交流，Technical Report of the Physical Oceanography Laboratory，The Institute of Physical and Chemical Research，No.1，pp.89
- 高田秀重(1993)：水質，東京湾：100 年の環境変遷．小倉紀雄編，恒星社恒星閣，東京，pp.39-44
- 野村英明(1995)：東京湾における水域環境構成要素の経年変化．Lamer，33，107-118
- 野村英明(1998)：1900 年代における東京湾の赤潮と植物プランクトン群集の変遷．海の研究，Vol.7，No.3，pp.159-178
- 松本英二(1983)：東京湾の底質環境(総説)，地球科学 vol.17，No.1 pp.27-32
- Matsuoka.K(1999)：Eutrophication process recorded in dinoflagellate cyst assemblages – a case of Yokohama Port, Tokyo Bay, Japan. The science of the Total Environment, 231, 17 -35
- 横瀬久芳，百島則幸，松岡 数充，長谷 義隆，本座 栄一(2005)：海底堆積物を用いた有明海 100 年変遷史の環境評価．地学雑誌，114 (1)，pp.1-20
- 天野敦子，井上卓彦，岩本直哉，塩屋藤彦，内美郎 (2004)：愛媛県南部宇和海北灘湾における過去約 100 年間の底質環境変遷．地質学雑誌,第 110 巻,第 9 号,pp518-527
- 日本海洋学会編(1986)：沿岸環境調査マニュアル，底質生物編恒星社厚生閣
- 井上克弘(1993)：粘土鉱物の同定．第四紀試料分析法，I -2.2，pp.58-69
- Kanae. S, T. Oki and A. Kashida(2004)：Change in hourly heavy precipitation at Tokyo from 1890 to1999, J. Meteor. Soc. Japan, 82, 241-247.
- 青木三郎(2002)：海洋堆積物中の粘土鉱物．粘土科学，第 42 巻，第 2 号，pp.97-102
- 国土交通省水文水質データベース(2008 年 2 月 2 日閲覧)：<http://www1.river.go.jp/>
- 松江吉行(1936)：品川湾浅草海苔養殖場の海洋化学的性状．水産学会報，6，242-243
- 阿部竹之助(1935)：品川湾口に於ける海水化学成分の季節変化に就て．海洋時報，8，137-153
- 江角比出郎(1979)：東京湾の水質．沿岸海洋研究ノート，16，101-105
- 清水誠(1987)：東京湾の魚介類(4)シャコの個体群生態．海洋と生物，9，340-347

謝辭

謝辞

この修士論文は僕，國分佑太が 2006 年 4 月～2008 年 1 月までの間に行った研究をまとめたものです。

何よりもまず，この研究室に僕を入れてくれた鯉渕先生に感謝の言葉を伝えたいです。この二年間の中で時には優しく，時には厳しく接して頂き，その中で色々考えながら成長していったと思います。最後の半年間はアメリカに旅立たれてしまい，直接ご指導頂けなかったのが心残りです。あのキング三浦カズのように「魂みたいなものは柏に置いてきた」と，先生がアメリカ人の友達に言ったかどうか定かではありませんが，アメリカに居ても変わらず接してくださいました。本当にありがとうございました。

ゼミでお世話になった黄先生と磯部先生にもお礼を言いたいです。黄先生は堅苦しくなりがちなゼミの雰囲気，そのユーモアで和やかにしていたのがとても印象的です。到底無理なのは分かっていますが，ユーモアという点では常に黄先生の背中を追ってしまう気がします。研究に関しても度々励ましを頂きました。磯部先生は，僕がゼミで発表をすると，いつもの確かなアドバイスを下さるので，その都度感服しておりました。また，研究で悩みがある時はミーティングの機会を設けてくださいました。理知的な立ち居振る舞い，頭の回転の早さ，社会人になってからも磯部先生からは学ぶべきところは多いです。本当にありがとうございました。

辻研究室の村田さんには，違う研究室にも関わらず本当によく面倒を見てもらいました。村田さんなしでは珪藻分析もままならず，研究テーマも本来やりたい事とは違うものになっていたと思います。珪藻分析の前処理など，ともすれば集中力を欠きがちな単純作業ですが，村田さんと話しながらやっていると苦ではなかった事が思い出されます。また，行き詰まるとすぐに滅入りがちな僕を励ましてもくれました。僕が修士論文を書く年に新領域に來たと言う事に運命を感じずにはられません。この運命に感謝したいと思います。当然運命なんて事だけにではなく，何よりもまず村田さんに感謝をしたいです。ありがとうございました。

そして，粒度分析をさせて頂いた東京理科大学の水理研究室の二瓶先生と，本郷の海岸研の佐藤先生，XRD 分析をさせて頂いた自然環境学専攻の須貝先生，資料室で作業をさせて頂いた辻先生にはこの場を借りてお礼を言いたいです。他の研究室の人たちと一緒に研究できた事はかけがえのない財産です。

一緒に研究した研究室の仲間達にもお礼を言いたいです。隣の席で下らない話から真面目な相談までしてくださった佐藤さん，僕の事を常に心配してくれた神野さん，いつも笑顔だった寺田さん，一緒に作業をして苦しみを分かち合った木村さん，北大時代から何も変わらない篠原君，向かいの席で実は僕の事をチラ見してた俵山さん，いつも真面目に研

究に取り組んでいた三浦さん，ダークな話が好きな大久保君，悟りの境地へまっしぐらな笠松君，アップルボーイ垣内君，哲学的な近藤君，夜のファンタジスタ大城君，練馬の番人藤井君，神戸の猛牛牟田原君，皆さん本当にありがとうございました．後輩の皆にはあまり先輩らしい事も出来ず，先輩の皆さんにはあまり力になれなかったかなと思います．また，その時の気分がつい表情に出てしまうため，接しづらい時もあったはずですが，皆さんはそんな僕を寛大に扱ってくれました．そして，観測を手伝ってくれた皆さん，皆さんの力なしには僕の研究は始まりませんでした．本当にありがとうございました．それと，あと一人忘れていました．吉田君です．大事なものはなくしてから気付くと言いますが，吉田君が正にそんな存在ではないかと思います．社会人になってきっと彼の不在が身に染みて分かるでしょう．生協に行こうと言えばほぼ 100%付いてきてくれ，集中力が切れて彼の席に話に行っても嫌な顔一つせず話してくれました．本当にありがとう．多分よっしーがいなかったら，大学院生活はもっとつまらないものだったでしょう．

かしわもちの皆の存在も大きかったです．研究室以外の人と仲良くできたのは本当に素晴らしい事です．研究の良い息抜き，いや，皆という時間の息抜きに研究をやるくらいの勢いでした．辛いことでもあまり辛くないような錯覚に陥らせてくれたのは皆です．本当にありがとうございました．

そして，柏で知り合った人たち全員に感謝を伝えたいです．本当に刺激的な大学院生活を送る事が出来たと思います．僕の選択は間違っていなかったと胸を張って言えます．

最後に，北海道の一人暮らしから帰ってきて，気ままぶりに拍車が掛かった僕の面倒を見てくれた家族にお礼を言いたいと思います．皆さんのおかげで，無事修士論文を提出する事が出来ました．ありがとうございました．

國分 佑太