

底生有孔虫化石に基づく約 130 年間の横浜港の環境変遷

豊田 和久・北里 洋

Paleoenvironmental changes of Yokohama Port since 1870 based on benthic foraminiferal fossils

Kazuhisa TOYODA and Hiroshi KITAZATO

ABSTRACT

Faunal changes of benthic foraminiferal fossils were analysed for a core which was collected from Yokohama Port in 1989. Eighty six species belonging to 40 genera of benthic foraminifera were identified from the core. *Ammonia beccarii* (Linne) form 3, *Ammonia japonica* Hada and *Buccella frigida* Cushman which are living in euhaline or well ventilated bottom environments were dominant in the lower part of the core. Instead of these species indicated above, *Trochammina hadai* Uchio, brackish water species, becomes dominant at upper horizons. This means that brackish water environments were developed at the upper part of the core. Build up of new piers at Yokohama Port created restricted environments at the area since 1950's. This probably causes to create the brackish environment.

Dissolved oxygen contents of sea water were probably decreased both in 1930 and around 1960's. Chamber shapes of benthic foraminiferal species, *Trochammina hadai* Uchio, *Ammonia beccarii* (Linne) forma 1, and *Ammonia japonica* Hada, indicated that oxygen poor environments were progressed at the time. Because, specimens which have smoothed chamber shape were dominated during the periods as stated above. Oxygenated bottom environment was developed during the Second World War, because both municipal and industrial activities were lowered during the period.

Environmental changes which were inferred from benthic foraminiferal fossils coincides well with the vertical distributions of heavy metal elements and chemical compounds which were related to water pollutions. Environmental changes were also concordant well with the environmental changes reconstructed by diatom frustules, ostracoda and dinoflagellates.

I はじめに

人間を取り巻く自然の環境は人間活動によって著しく影響を受けている。とくに大都市近郊の海や川では都市生活と産業活動による複合汚染によって自然の改変が進行し、社会問題となっている。このため、環境汚染が顕著に現れてからの自然環境の変遷は比較的よく調査されるようになってきた。一方、汚染が始まる以前の自然環境については歴史上の記録がわずかにあるに過ぎず、現在では推定する以外はほとんど知ることができない。

海底堆積物は過去の環境を記録しており、堆積物を時間を追って分析することによって過去の海洋環境の変遷を追跡することができる。とくに、堆積速度の速い堆積物を扱えば、数百年前程度までの近過去の環境変遷を明らかにできる。底生有孔虫は環境と良い相関をもって生息していることが知られており、優れた環境指標生物である。また、殻が化石として堆積物中に残ることから、過去の環境を復元するときに有用である(Alve, 1991 a,b)。

有孔虫化石を用いた環境汚染のモニタリングは、Seiglie(1968) や Schafer(1970) に始まるが、それほど例は多くない。最近、Alve (1991 a) はノルウェー西岸の Hardangerfjord の一角である Sorfjord において重金属汚染にともなった底生有孔虫群集の変化と汚染の殻形態への影響について研究を行い、重金属の汚染によって有孔虫の殻の奇形率が上昇していることを示した。また彼女は、この研究を通じて、底生有孔虫が近過去の環境変遷を辿る生物指標、とくに環境汚染指標として、極めて有用であることを主張した。

日本において、汚染と有孔虫群集との相関について言及した研究は限られている。地質調査所では、沿岸海域の環境汚染を調査し、東京湾、有明海などの湾における汚染の実態と歴史的経過を検討した(松本, 1979, 1982)。その一連の調査研究の中で、有孔虫を含む化石として残る微小生物が海域の汚染が進行するとともにどう変わっていくのかについて触れている。また、吉田ほか(1986) は、瀬戸内海播磨灘西方海域において、瀬戸内海の汚染が進んでいなかった1957年と、海洋環境がかなり悪化した22年後の1979年に、同一海域でそれぞれ採取した底質試料の底生有孔虫群集を分析した。その結果、22年間に有孔虫の総個体数や種数は余り変わらなかったものの、砂質有孔虫が増えるなど群集構成が大きく変化したことを示した。

横浜市環境科学研究所は、横浜市周辺の環境の推移をモニターする一環として、おもに第二次世界大戦後の横浜港の環境変遷を辿っている(横浜市環境科学研究所, 1992)。その結果、横浜港は高度経済成長にともなって1960年代に著しく水質・底質の汚染が進んでおり、横浜港内で採取された柱状試料の中の重金属(銅、鉛等)や有機汚濁物質(全炭素量、全窒素量等)は、いずれも決まった深度(1960年頃の層準と考えられる)より最近になって増加していることが明らかになってきた。では、もう少し古い時代の環境はどうだったのだろうか? また変わってきているのであろうか? 将来の環境予測を行う上でも、近過去からの環境変遷をたどる必要がある。

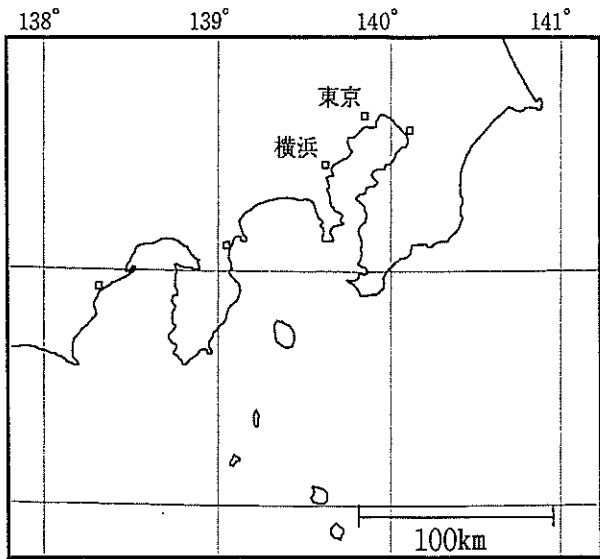
生物学的なデータは、化学指標のように汚染物質を特定することはできないが、生物が住みやすい環境であるかという全体的な生態指標を与える点で優れている。本研究では、開港以来の発展の歴史がよくわかっている横浜港について、人工的な攪乱がない堆積物中の底生有孔虫化石を解析することを通じて、約130年前から現在までの環境変遷を明らかにすることを試みた。

II 研究地域

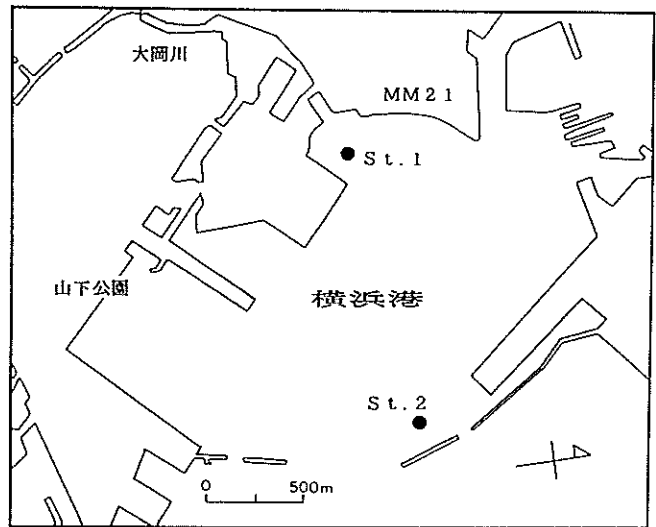
II-1. 概要

横浜港は東京湾の西北岸に位置し、港湾法に基づく港湾区域は北緯35度20~28分、東経139度37~43分である。第1図に東京湾内における横浜港の位置を、第2図に横浜港の拡大図を示す。港は東水堤と北水堤に囲まれた水面積約3.4 km²を内港地区と呼んでいる。内港地区は水深約10~12 mで、3~8 mの部分もある。水堤の外側は水深約12~15 mで、部分的に18~20 mになっている。横浜港のある一帯は、江戸時代には入り浜の自然海岸であったが、その後の埋立により現在では自然の海岸は全く残されていない。

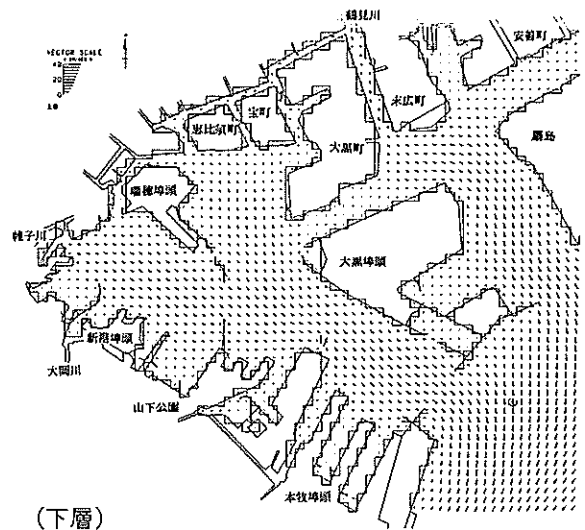
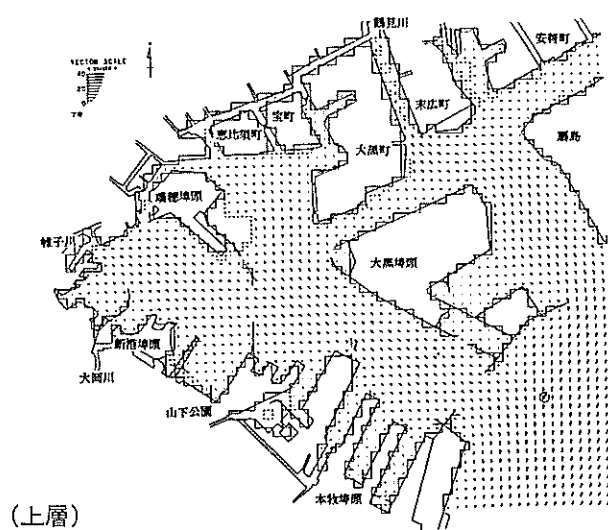
港を流れる潮流は、恒流が上層において港奥から港外に向かっており、下層は港外から港奥に向かう流れとなっている(第3図)。内港地区では、大岡川、帷子川などの流入河川からの淡水の影響により海水は密度成層しており、塩分は表層で約24‰、海底で約30‰である。



第1図 東京湾における横浜港の位置



第2図 横浜港の拡大図と柱状試料採取地点



第3図 横浜港の潮流(恒流)の分布

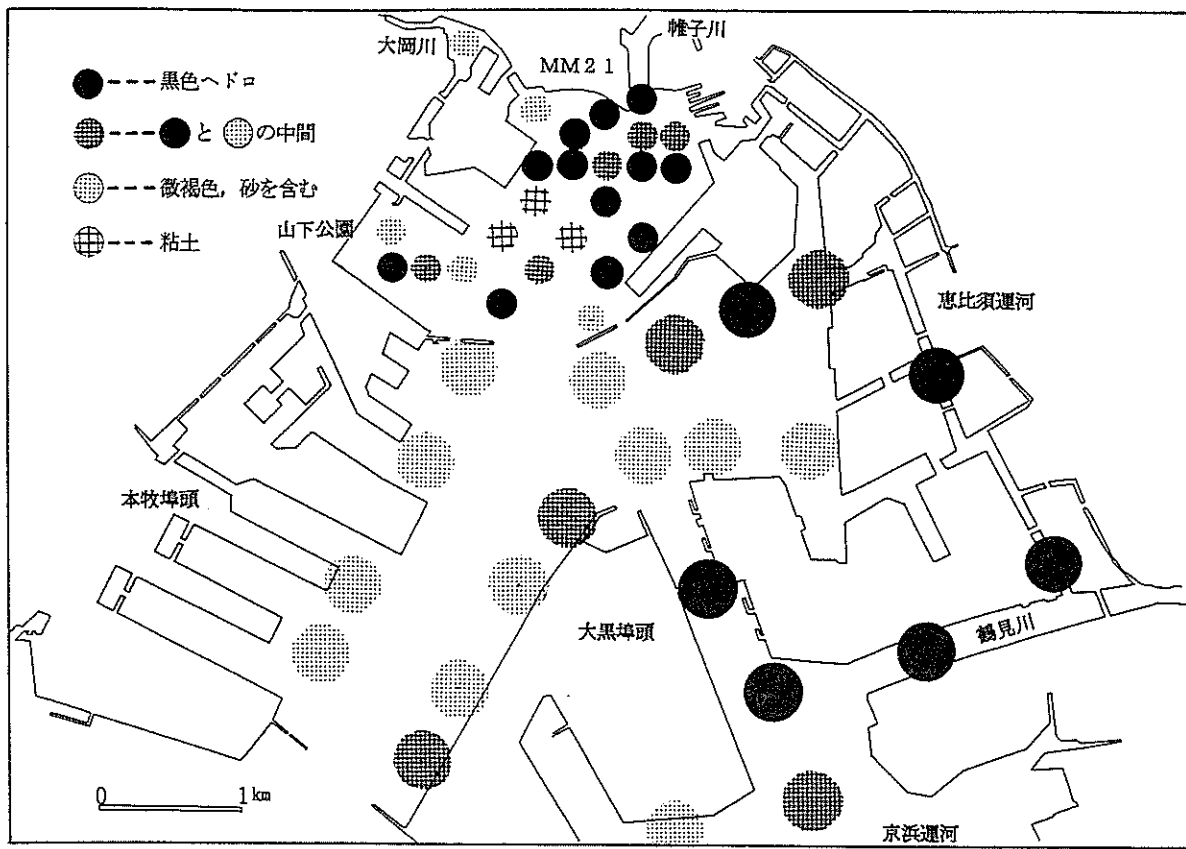
II-2. 底質の記載

第4図に現在の横浜港の底質分布を示した。港内の底質は、全体として砂混じりの微褐色の泥であり、酸化的な底層環境である。内港地区や恵比須運河のような運河地区、鶴見川河口周辺など、地形的に外界の水が入りにくい閉鎖的な環境になっているところでは、浚渫直後の場所を除いて有機物に富んだ黒色の腐泥が多い。また、このようなところでは汚染物質が底質に多く含まれている（横浜市環境科学研究所，1992）。

III 研究方法

III-1. 柱状採取地点

本研究で用いた試料は、横浜港・内港地区の2地点（St.1, St.2）から採取された堆積物柱状試料である。試料は横浜市環境科学研究所によって1989年9月30日にスキューバダイビングにより直径10cm, 長さ2mの亚克力パイプを海底に突き刺して採取された。第2図に試料採取地点を示す。採取地点は、堆積物の連続的な変化を調べるために、浚渫や覆砂の記録がない地点が選ばれている。



第4図 横浜港の底質分布

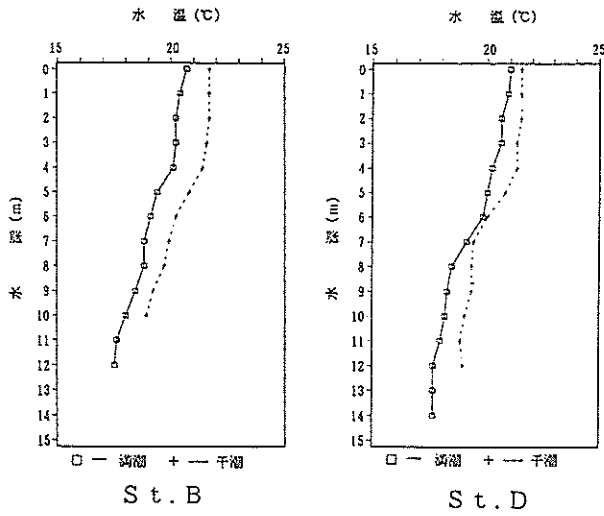
試料採取地点付近の7月の水温は、表層が21°Cで海底が18°C（第5図）であり、塩分は表層が24‰で海底が30‰である（第6図）。また、溶存酸素量はSt.1付近が5.7 mg/l, St.2付近が6.7 mg/lで、海底ではどちらも2.5 mg/l程度である（第7図）。

St.1は大岡川の河口部で、川からの汚濁物質の負荷が大きい場所である。水深は約10 mである。柱状試料は全長145 cmであるが、表層から50 cm前後のところに不整合面がある（第8図）。St.2は防波堤の西側に位置し、St.1から約1500 m離れている。水深は12 mである。柱状試料は全長133 cmで、不整合はない（第9図）。いずれの柱状試料も微褐色のシルトが主で、砂を少量含んでいる。

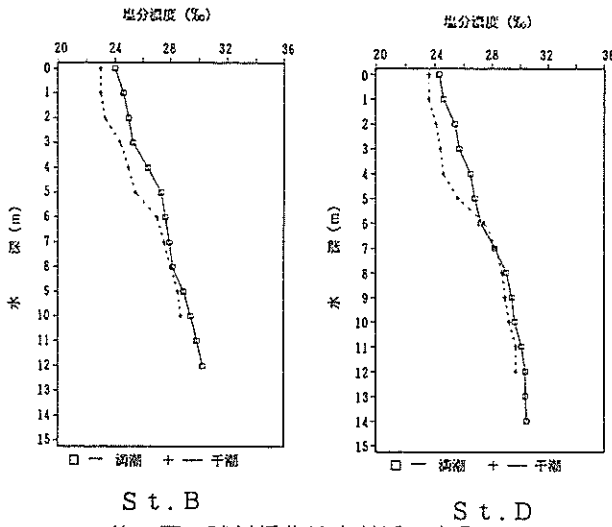
これらの柱状試料については、横浜市環境科学研究所により ^{210}Pb に基づく堆積速度が推定されており（第10図）、その堆積速度は年間約1 cmと見積もられている。従って、不整合がないSt.2では現在からおよそ130年前までの堆積物があると考えられる。St.2では深さ40 cmより浅いところから ^{137}Cs が検出されている（第10図）。 ^{137}Cs は天然の状態では大気中にほとんど存在せず、1955年以降にアメリカなどによる大気中核実験の影響で急激に増え始めた元素であることから、 ^{137}Cs が急激に増える深さ40 cm付近の層準は1955年頃に相当すると考えられる。この結果は ^{210}Pb による年代推定値とよく合致している。

III-2. 試料処理

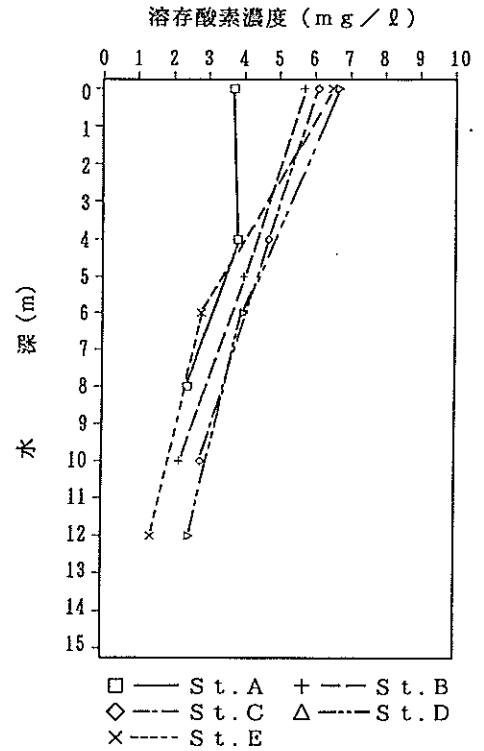
本研究では、コアに不整合がなく、また堆積年代が推定されているSt.2の試料について有孔虫化石の群集解析を進めた。コアは1989年に採取された後、横浜市環境科学研究所の低温室で立てた状態で保管されていた。コアは、立てたまま、1992年7月にコアカッターを用いて表層より1 cm毎に切断した。切断した試料は幾つかに分割し、有孔虫・介形虫・貝類・渦鞭毛藻類・珪藻・花粉の分析を行った。試料は、まず含水率を測り、その後泥化処理して微化石を拾い出した。試料は全体に固結していたために、お湯で煮る程度の処理では泥化できず、ナフサ法と硫酸ナトリウム法の2種類を交互に用いて泥化処理をした。それぞれの処理方法は微化石研究マニュアル（高柳ほか編、1978）にしたがった。泥化した試料は250 mesh (64 μm) の篩で水洗し、篩上の残渣を乾燥して検鏡に供した。



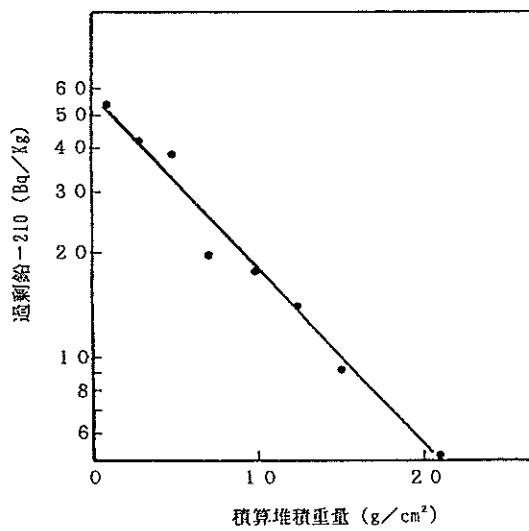
第5図 試料採集地点付近の水温の鉛直分布
St. B, D はそれぞれ St. 1, 2 に相当



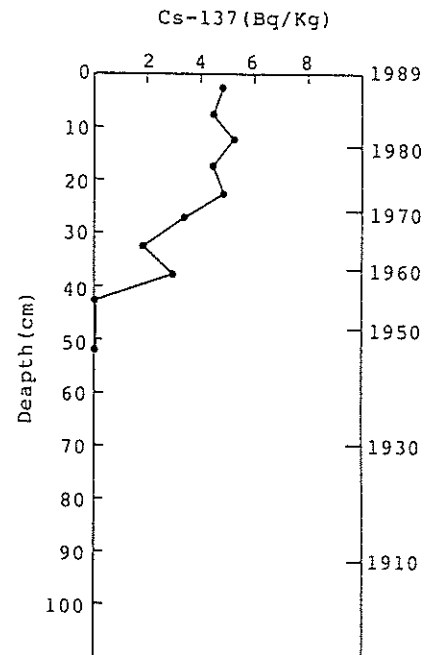
第6図 試料採集地点付近の塩分
St. B, D はそれぞれ St. 1, 2 に相当



第7図 試料採集地点付近の
溶存酸素量の分布
St. B, D はそれぞれ St. 1, 2 に相当

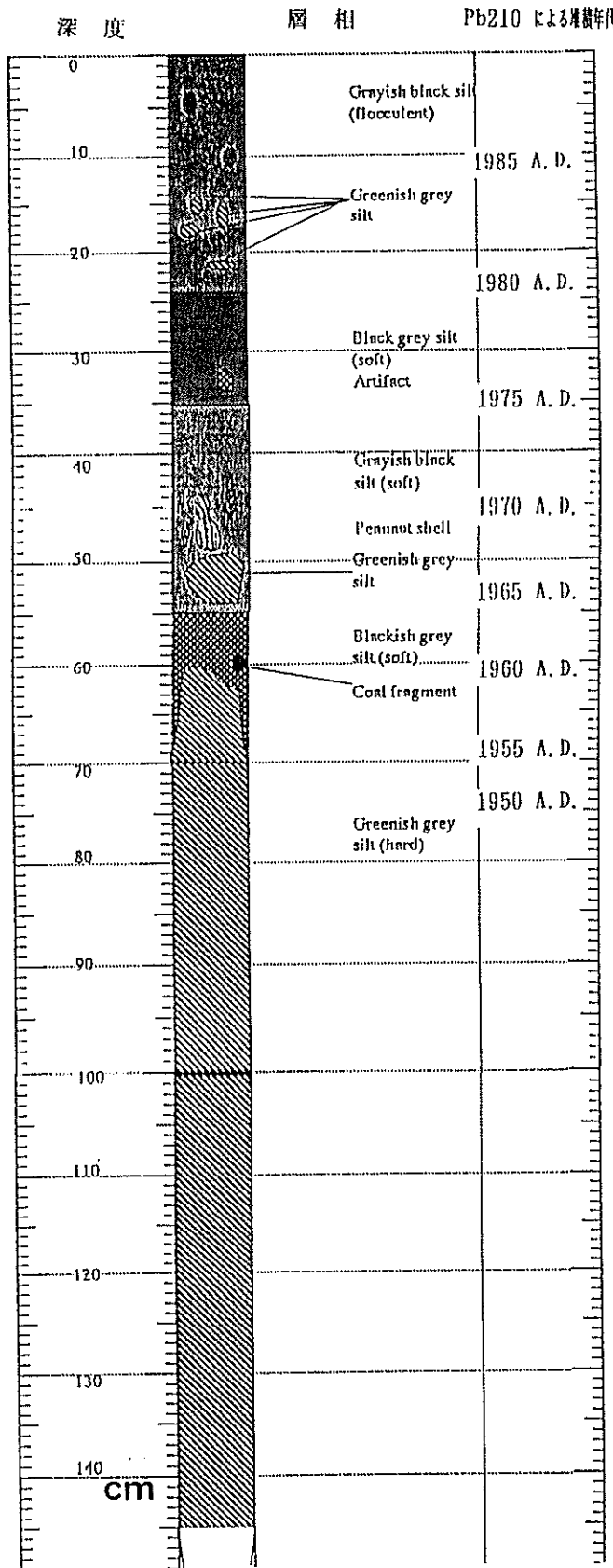


第10図 St. 2 の²¹⁰Pb, ²³⁷Cs と推定堆積年代

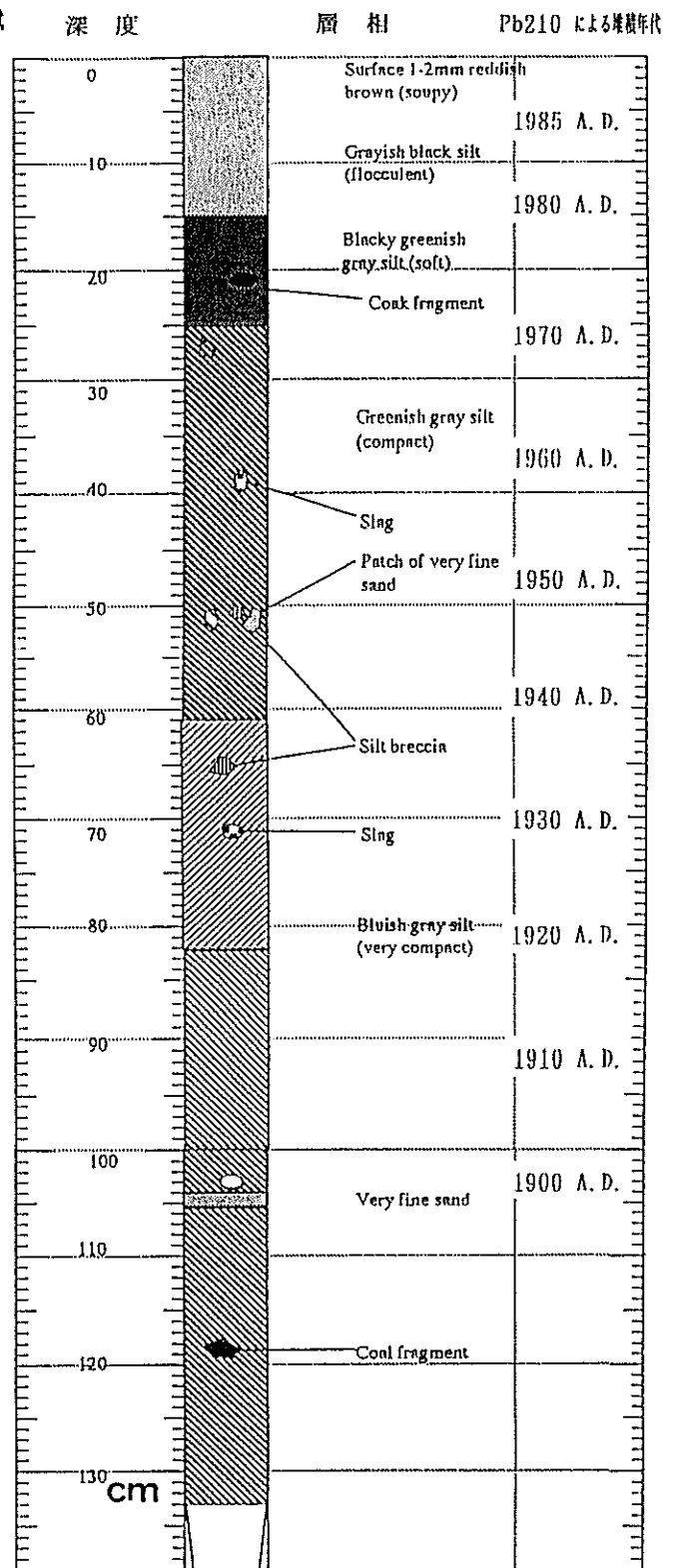


Core: Yokohama Port St. 1

Core: Yokohama Port St. 2



第 8 図 St.1 のコアの柱状図

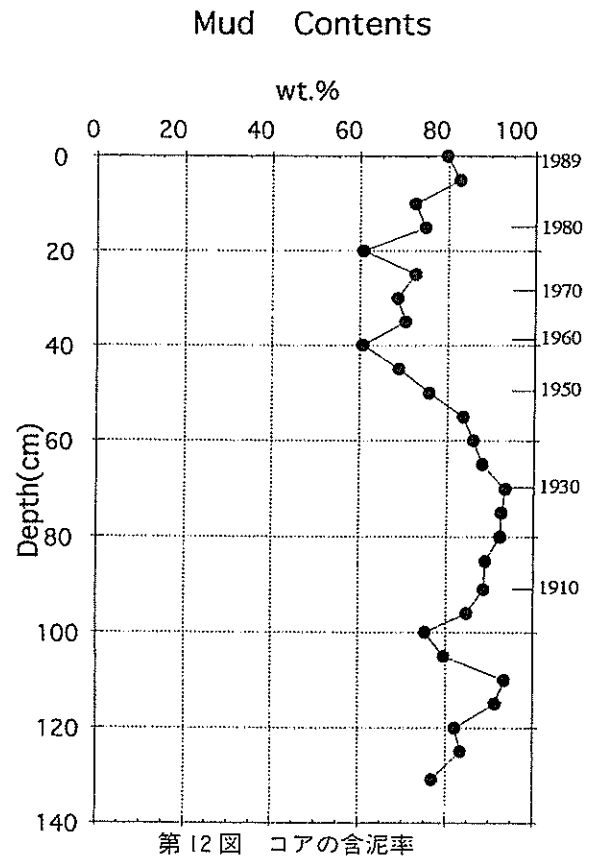
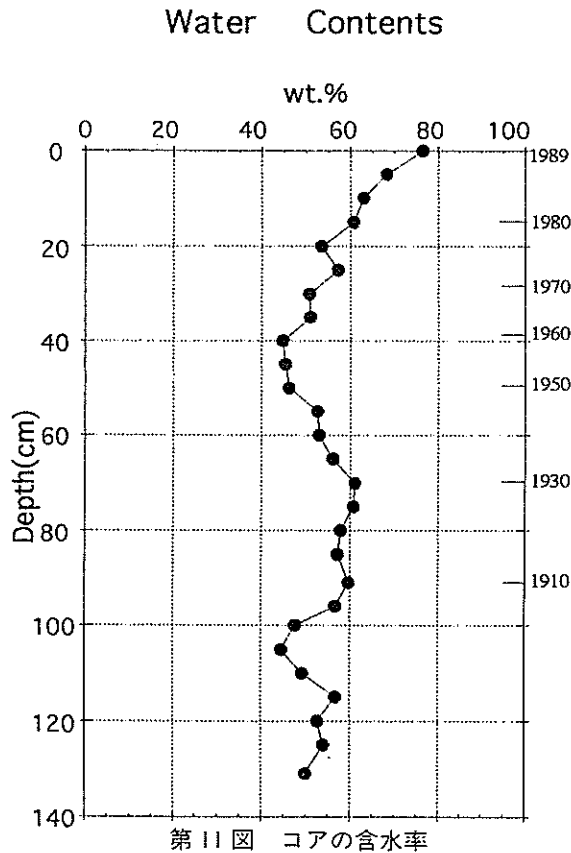


第 9 図 St.2 のコアの柱状図

IV 結果

IV-1. 含水率と含泥率

コアの各深度における含水率と含泥率を第 11, 12 図に示す。含水率は表層 10 cm 付近までは 70~80% で、それ以深では 40~60% であった。含泥率は表層 50 cm 付近までは 60~80% で、それ以深では 75~95% であった。含水率と含泥率は表層 10 cm 以深では同じような増加・減少傾向を示した。含水率、含泥率とも表層から 40 cm 付近までは低くなり、70 cm 付近で最大になった。また、100 cm 付近では一時的に低くなっている。試料(第 9 図)は 25 cm 以深ではよく圧縮されたシルトになっており、50 cm 以深で高くなる含泥率は堆積物の圧密作用の影響を受けたためと考えられる。



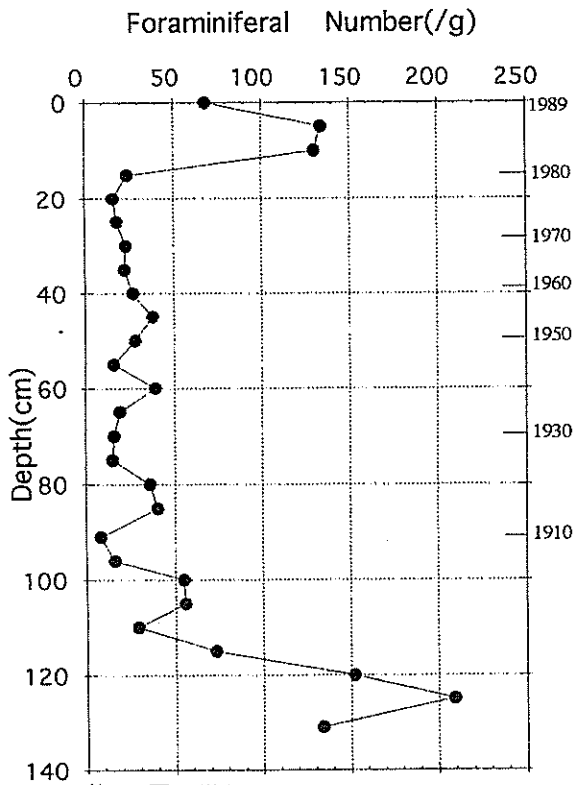
IV-2. 底生有孔虫群集

St.2 のコアの表層部より 5 cm 毎の試料を検鏡し、コア全体で、40 属 86 種の底生有孔虫を同定した(第 1 表)。各深度の 1 g あたりの有孔虫の総個体数(Foraminiferal Number)は第 13 図のようになった。深度 120 cm 以深では 1 g あたり 300 個体以上が産出するが、それよりも浅いところでは 200 個体以下であった。表層 10 cm 付近では 150 個体以上とやや多い。

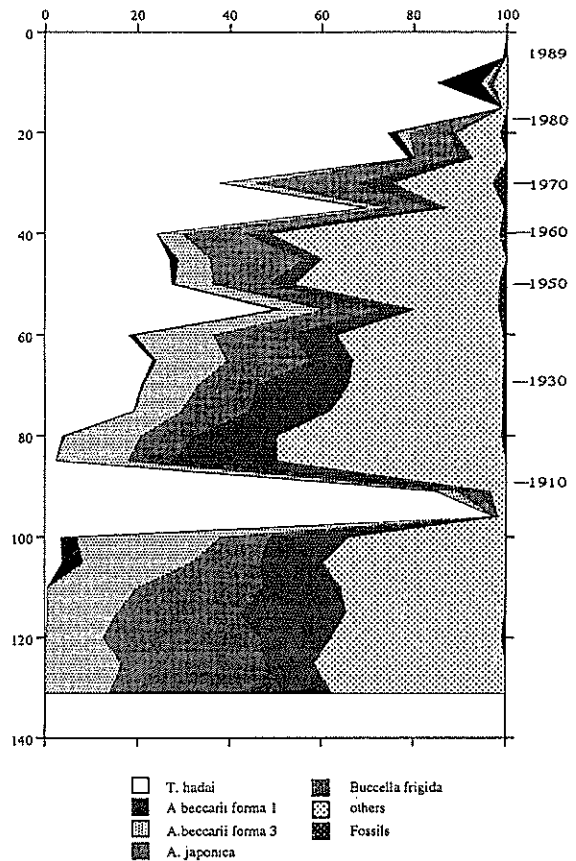
IV-2-A. 群集の特徴と変遷

各深度の群集を構成する底生有孔虫の種類の出産状況は第 14 図のようである。群集は石灰質有孔虫 *Ammonia beccarii* (Linne) forma 3, *Ammonia japonica* Hada, *Buccella frigida* (Cushman), 砂質有孔虫 *Trochammina hadai* Uchio 等を主体とし、石灰質有孔虫 *Elphidium jensenii* (Cushman), *Elphidium reticulosum* Cushman, *Elphidium somaense* Takayanagi, *Elphidium subgranulosum* Asano 等を随伴する群集である。群集間の相関係数を求めると、隣り合う深度同士の相関係数は高くなっている(第 2 表)。しかし、90 cm 台の群集は上下の群集とは低い相関を示し、むしろ表層域の群集との相関が高くなった。

Yokohama St.2



第 13 図 単位重量あたりの有孔虫数(N/g)



第 14 図 St.2 の有孔虫群集の相対頻度。

主要種のうち *Trochammina hadai* は比較的汽水的な環境を好む種で (Matoba, 1970), 日本中に広く分布する (Ikeya, 1977) ことが知られている。また, 東京湾では汚染が急激に進行し始めた 1960 年代からこの種類が増えてきている (松本, 1979)。 *Ammonia beccarii* forma 3, *Ammonia japonica* は *Trochammina hadai* よりも高塩分域に生息する種である (Matoba, 1970)。 *Buccella frigida* は比較的低温を好む寒冷種で, 東北地方沿岸部に多く分布する (Matoba, 1970)。

これらの指標種の分布はコア内で偏りがみられた。コアの下層, 130~75 cm では, 比較的高い塩分を好む種である *Ammonia beccarii* forma 3, *Ammonia japonica*, *Buccella frigida* 等が多かった。 90~100 cm には汽水的環境を好む *Trochammina hadai* が優占種となった。 *Trochammina hadai* は 90~75 cm の間で減少するが, 75 cm から上位ではまた徐々に高い割合を占めるようになった。 55 cm と 35 cm では *Trochammina hadai* が全体の 50%以上を占めるピークを示すが, それらを除くとほぼ同じような傾向で増えていき, 20 cm より浅いところでは全体の 90%以上を占めるようになる。 *Trochammina hadai* は, 塩分 25~30%の汽水環境に優占することが知られており (Uchio, 1962; Matoba, 1971; Matsushita, 1991 MS), 75 cm の層準以降, 淡水の影響が出てきたことを示している。 75 cm の層準は, ^{210}Pb から推定した年代によると 1930 年頃にあたる。

90~100 cm の層準では *Trochammina hadai* が 90%を超えて産出する。この層準の年代は 1910 年前後にあたり, 古い記録によるとこの頃に関東地方で大洪水があったようである。淡水の影響のために湾内が汽水化して *Trochammina hadai* が一時的に多くなると考えたいが, その状態が何年も継続するわけではないので, このときの洪水によって大岡川や帷子川の河口付近に生息していた汽水環境の群集が大量に St.2 付近まで押し流されてきたのであろう。

以上のような底生有孔虫群集の変化の傾向から, 横浜港内港地区は, 1870 年から 1930 年頃までは海水の入りがい比較的高い塩分の高い環境であったが, 1930 年以降塩分が低くなり, 1970 年代初めには既に現在と同

第2表 St.2の各深度群集間の相関係数

| | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 |
| 0 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 0.9902 | 1 | | | | | | | | | | | |
| 10 | 0.9852 | 0.979051621 | 1 | | | | | | | | | | |
| 15 | 0.9952 | 0.996524709 | 0.984307936 | 1 | | | | | | | | | |
| 20 | 0.9561 | 0.967638322 | 0.954967656 | 0.9669 | 1 | | | | | | | | |
| 25 | 0.965950855 | 0.970019263 | 0.959334167 | 0.972862469 | 0.99210582 | 1 | | | | | | | |
| 30 | 0.690961967 | 0.688230737 | 0.688250588 | 0.690802228 | 0.60658673 | 0.80376031 | 1 | | | | | | |
| 35 | 0.937650488 | 0.951394884 | 0.930650716 | 0.947091039 | 0.97951711 | 0.97373779 | 0.840134 | 1 | | | | | |
| 40 | 0.530687676 | 0.522702758 | 0.5331641 | 0.528639832 | 0.63314485 | 0.64113925 | 0.86490703 | 0.68751363 | 1 | | | | |
| 45 | 0.387863089 | 0.385685787 | 0.407762394 | 0.395783482 | 0.55494517 | 0.55076123 | 0.86935093 | 0.602365 | 0.84676768 | 1 | | | |
| 50 | 0.636138971 | 0.634222986 | 0.64377101 | 0.64242767 | 0.73916857 | 0.73674783 | 0.87430605 | 0.77262603 | 0.91534677 | 0.80612091 | 1 | | |
| 55 | 0.839467403 | 0.831883436 | 0.849445473 | 0.841970264 | 0.90804343 | 0.90411559 | 0.919525 | 0.9345248 | 0.81779321 | 0.87223201 | 0.87500478 | 1 | |
| 60 | 0.379610649 | 0.374687532 | 0.385857573 | 0.379919147 | 0.50795322 | 0.49331027 | 0.82670178 | 0.56380271 | 0.83773842 | 0.84169897 | 0.8179476 | 0.76086537 | 1 |
| 65 | 0.47655716 | 0.481065657 | 0.486679437 | 0.479146849 | 0.6062626 | 0.59583064 | 0.89394346 | 0.66455504 | 0.87244157 | 0.86162779 | 0.89110355 | 0.61926652 | 0.94040979 |
| 70 | 0.45232933 | 0.44627916 | 0.459586317 | 0.449220163 | 0.52744044 | 0.53839363 | 0.75155477 | 0.57117476 | 0.76501844 | 0.67214873 | 0.76218825 | 0.74045193 | 0.88232081 |
| 75 | 0.459014799 | 0.453626795 | 0.464986777 | 0.456739472 | 0.58578368 | 0.57113133 | 0.83362837 | 0.60768129 | 0.83770031 | 0.78479609 | 0.81781353 | 0.77066276 | 0.91598712 |
| 80 | 0.04218708 | 0.03837507 | 0.05834566 | 0.038086365 | 0.13900353 | 0.141924 | 0.51676465 | 0.20372169 | 0.60112744 | 0.58587341 | 0.56308444 | 0.42853673 | 0.8409382 |
| 85 | 0.017918231 | 0.013700332 | 0.028264514 | 0.013217696 | 0.09203897 | 0.10931517 | 0.45497287 | 0.15556546 | 0.54882795 | 0.55002575 | 0.46843111 | 0.37787575 | 0.78285326 |
| 91 | 0.988218271 | 0.98497355 | 0.979621339 | 0.991791109 | 0.97947463 | 0.98361651 | 0.75850315 | 0.96158049 | 0.59556483 | 0.47670782 | 0.70657141 | 0.88897938 | 0.47171375 |
| 96 | 0.993287621 | 0.982027546 | 0.978713454 | 0.991296554 | 0.96692493 | 0.97592411 | 0.70007163 | 0.94502632 | 0.53942012 | 0.41315914 | 0.65072808 | 0.85555504 | 0.38988586 |
| 100 | 0.031572827 | 0.027408507 | 0.063973725 | 0.027205056 | 0.12270593 | 0.10449529 | 0.46097554 | 0.19030188 | 0.50168941 | 0.51444634 | 0.53514931 | 0.47128735 | 0.80759311 |
| 105 | 0.043795856 | 0.03931824 | 0.082998146 | 0.042945602 | 0.16987113 | 0.1466755 | 0.56753502 | 0.24574433 | 0.57598254 | 0.67263673 | 0.58606134 | 0.47931238 | 0.86510569 |
| 110 | -0.02049206 | -0.02434527 | -0.00862887 | -0.0241231 | 0.1343476 | 0.12651501 | 0.64177093 | 0.2103461 | 0.6772051 | 0.75961546 | 0.58265408 | 0.45053523 | 0.88169157 |
| 115 | -0.01961619 | -0.02286646 | -0.00691343 | -0.02361555 | 0.12242141 | 0.12583822 | 0.60496572 | 0.19290655 | 0.673495 | 0.67086292 | 0.58648092 | 0.43487232 | 0.80824441 |
| 120 | -0.02604172 | -0.02984056 | -0.01991266 | -0.02969884 | 0.14343003 | 0.13920131 | 0.66339341 | 0.21369352 | 0.67450469 | 0.766985 | 0.57387333 | 0.4265291 | 0.79131843 |
| 125 | -0.03586631 | -0.0378924 | -0.02618898 | -0.03703835 | 0.13296788 | 0.12196736 | 0.64761612 | 0.20389856 | 0.68399761 | 0.78877268 | 0.56292596 | 0.42677142 | 0.83962718 |
| 131 | -0.03070195 | -0.0340044 | -0.0251622 | -0.0333941 | 0.14621999 | 0.13924619 | 0.66961943 | 0.21315083 | 0.68226058 | 0.81751036 | 0.56330465 | 0.42056403 | 0.79521433 |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|-----|
| | 65 | 70 | 75 | 80 | 85 | 91 | 96 | 100 | 105 | 110 | 115 | 120 | 125 | 131 |
| 0 | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | | | | | | | | | | | | | | |
| 25 | | | | | | | | | | | | | | |
| 30 | | | | | | | | | | | | | | |
| 35 | | | | | | | | | | | | | | |
| 40 | | | | | | | | | | | | | | |
| 45 | | | | | | | | | | | | | | |
| 50 | | | | | | | | | | | | | | |
| 55 | | | | | | | | | | | | | | |
| 60 | | | | | | | | | | | | | | |
| 65 | | | | | | | | | | | | | | |
| 70 | 0.82492283 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| 75 | 0.89252256 | 0.93677042 | 1 | | | | | | | | | | | |
| 80 | 0.73504017 | 0.82848638 | 0.85485427 | 1 | | | | | | | | | | |
| 85 | 0.85241985 | 0.80325651 | 0.82950955 | 0.92460828 | 1 | | | | | | | | | |
| 91 | 0.56769857 | 0.52086633 | 0.53404785 | 0.1227576 | 0.0865285 | 1 | | | | | | | | |
| 96 | 0.480411 | 0.45795269 | 0.46524843 | 0.04629559 | 0.01885888 | 0.98845197 | 1 | | | | | | | |
| 100 | 0.74067923 | 0.67327572 | 0.71754577 | 0.86449789 | 0.79300658 | 0.12282289 | 0.033112578 | 1 | | | | | | |
| 105 | 0.78869749 | 0.69796748 | 0.76339174 | 0.86012917 | 0.79901485 | 0.14169945 | 0.051611918 | 0.92619213 | 1 | | | | | |
| 110 | 0.81063444 | 0.73401073 | 0.81540991 | 0.87727014 | 0.82151742 | 0.08018226 | -0.01296128 | 0.82423987 | 0.88604599 | 1 | | | | |
| 115 | 0.76859717 | 0.74579995 | 0.79739917 | 0.83356471 | 0.75653526 | 0.0767801 | -0.01238824 | 0.77205994 | 0.80001819 | 0.94519493 | 1 | | | |
| 120 | 0.77293605 | 0.66219908 | 0.75825552 | 0.77191238 | 0.67690127 | 0.07061013 | -0.01666748 | 0.66916648 | 0.77968806 | 0.94852722 | 0.92820364 | 1 | | |
| 125 | 0.79167301 | 0.64321367 | 0.74573587 | 0.78952956 | 0.72763403 | 0.06403647 | -0.02479975 | 0.72297463 | 0.82640973 | 0.96637463 | 0.88882785 | 0.98579577 | 1 | |
| 131 | 0.77605891 | 0.6002253 | 0.72032945 | 0.72734263 | 0.65435043 | 0.06529004 | -0.02017914 | 0.64184767 | 0.76426144 | 0.94064387 | 0.86992255 | 0.97191798 | 0.9817481 | 1 |

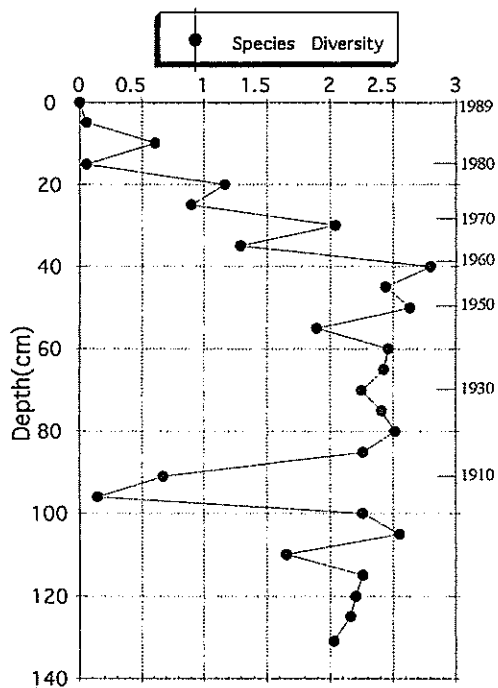
且小さくなる。それよりも上位では再び大きくなり、40~85 cmで最大になる。40 cmよりも上位では振動しながら小さくなっており、15 cm, 5 cm, 0 cm (表層)の層準で最も小さくなる。このことと²¹⁰Pbから推定した堆積年代から考えると、1910年頃を除いて比較的多様であった底生有孔虫群集が、1960年頃から多様性が低くなってきたと考えられる。

IV-3. 底生有孔虫の殻形態を用いた形態グループ解析
 IV-3-A. 殻形態

底生有孔虫の殻形態は、特定の環境要素と相関をもって変化する。底生有孔虫の殻は、生息に適した環境の下では房室の一つ一つが球に近いlobate typeになり、逆に生息に適さない環境の下では房室が扁平なsmooth typeになる(Wang and Lutze, 1986)。また、単位面積当たりに殻の壁孔が占める面積が変化する種もある(Koshio, 1992 MS)。したがって、溶存酸素量の変化と高い相関を持つ形態要素の変異を追跡することによって、過去の溶存酸素量の変化を辿ることができる。環境と底生有孔虫の殻の関係に関する過去の研究成果に基づいて、柱状試料中の特定の種類の底生有孔虫の殻について殻の形態変異の解析を行い、特定の環境要素の変化を検討してみた。検討に用いた種と、殻形態と環境との相関は次のようである。

a. *Trochammina hadai* Uchio

Shannon-Weaver Diversity Index



第 15 図 Shannon-Weaver 多様性指数の変化

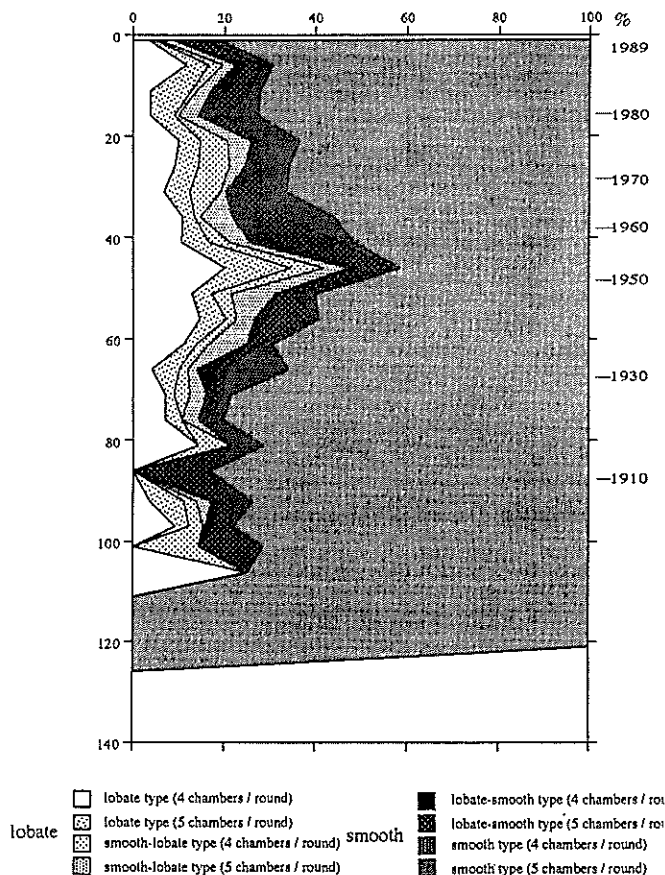
砂質有孔虫 *Trochammina hadai* Uchio は、海水の溶存酸素量が多い時には一巻あたりの房室の数が少なく、房室の形が球に近い殻の輪郭が lobate な型になる。逆に溶存酸素量が少ない時には一巻あたりの房室の数が多く、房室の形が扁平な smooth type になる (Matsushita and Kitazato, 1990)。即ち、殻形態が底層水に含まれる溶存酸素量の多少によって変化している (Matsushita, 1991 MS)。

この研究結果に基づいて、横浜港の柱状試料中に出てくる *Trochammina hadai* の形態分類を行った。形態は以下のような 8 グループに分けた。

- 1 殻の一巻の房室の数が 5 以上で、全ての房室が smooth なもの
- 2 殻の一巻の房室の数が 4 で、全ての房室が smooth なもの
- 3 殻の一巻の房室の数が 5 以上で、最後の一巻の房室が smooth なもの
- 4 殻の一巻の房室の数が 4 で、最後の一巻の房室が smooth なもの
- 5 殻の一巻の房室の数が 5 以上で、最後の一巻の房室が lobate なもの
- 6 殻の一巻の房室の数が 4 で、最後の一巻の房室が lobate なもの

第 3 表 St.2 の各深度の群集における有孔虫数と Shannon-Weaver 多様性指数

| Depth(cm) | Foraminiferal Number(/g) | Species Diversity |
|-----------|--------------------------|-------------------|
| 0 | 68 | 0.00000 |
| 5 | 134 | 0.05564 |
| 10 | 130 | 0.61163 |
| 15 | 24 | 0.05297 |
| 20 | 16 | 1.16820 |
| 25 | 18 | 0.90088 |
| 30 | 23 | 2.04096 |
| 35 | 22 | 1.29501 |
| 40 | 27 | 2.80056 |
| 45 | 38 | 2.43909 |
| 50 | 28 | 2.63331 |
| 55 | 16 | 1.89344 |
| 60 | 39 | 2.46053 |
| 65 | 19 | 2.42743 |
| 70 | 16 | 2.24750 |
| 75 | 15 | 2.40839 |
| 80 | 36 | 2.51373 |
| 85 | 40 | 2.25771 |
| 91 | 8 | 0.67345 |
| 96 | 16 | 0.14269 |
| 100 | 55 | 2.25475 |
| 105 | 56 | 2.55245 |
| 110 | 29 | 1.65393 |
| 115 | 73 | 2.25815 |
| 120 | 152 | 2.20062 |
| 125 | 209 | 2.15945 |
| 131 | 134 | 2.02970 |



第 16 図 *Trochammina hadai* Uchio の 8 つの形態グループの割合

7 殻の一卷の房室の数が5以上で、全ての房室が lobate なもの

8 殻の一卷の房室の数が4で、全ての房室が lobate なもの

この8種類のグループのうち、最終的に最後の一卷の房室が smooth なもの(1~4)を smooth type, lobate なもの(5~8)を lobate type とした。分類結果を第16図に示す。St.2のコアでは、どの層準でも smooth type が多数を占め、lobate type は少ない。しかし、その比率は深度によって異なっている。深度40~60 cm のところで lobate type が多い一つのピークがあり、その前後では少なくなっている。また、20 cm 付近でも lobate type がやや多くなる。

b. *Ammonia beccarii* (Linne) forma 1

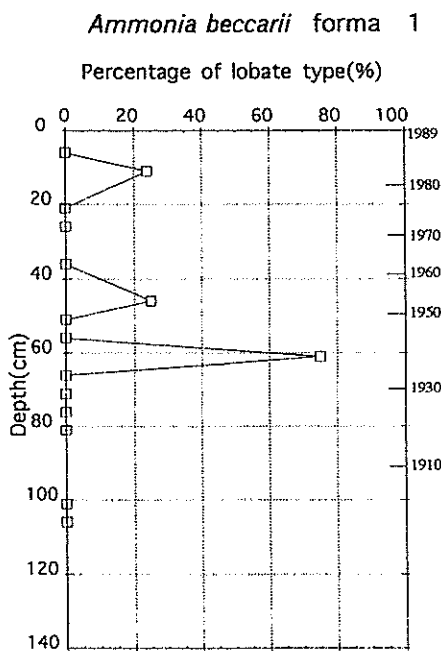
Koshio (1992 MS) によると、ガラス質石灰質有孔虫の *Ammonia beccarii* forma 1 は、海水の溶存酸素量が多い時には殻の房室が球体に近い lobate type になり、逆に溶存酸素量が少ない時には房室が扁平な smooth type になるというように、先に述べた *Trochammmina hadai* と同様な形態変化を示した。この現象は環境を制御した飼育実験でも確かめられている (Kitazato and Koshio, 準備中)。

横浜港の柱状試料中に出てくる *Ammonia beccarii* forma 1 の形態は、最後の3つの房室の形態で smooth type と lobate type の2種類のカテゴリーに分類した。結果を第17図に示す。St.2の中で *Ammonia beccarii* forma 1 の出現頻度は低いために、細かい変動は意味がないが、全体的に smooth type が多い。なお、深度45 cm と60 cm では、lobate type がそれぞれ25%、70%と多くなる。

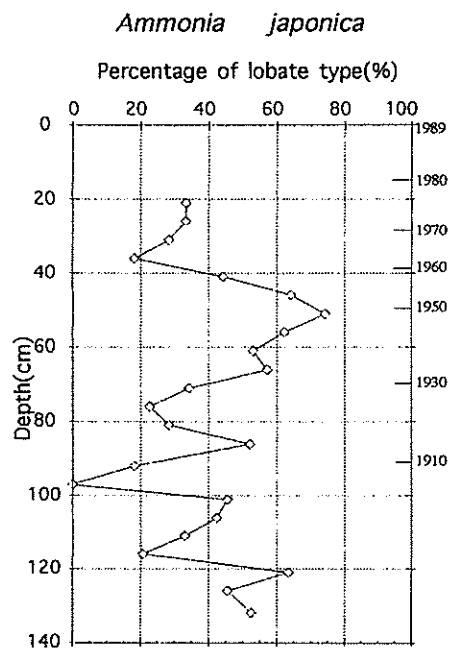
c. *Ammonia japonica* Hada

柱状試料から多産する *Ammonia japonica* は、*Ammonia beccarii* forma 1 と同属の近縁種であり、水深10 m 前後の湾口部などの、比較的塩分の高い環境に生息する (Matoba, 1970)。この種の形態変異と環境との相関は明らかではない。しかし、この種も *Ammonia beccarii* forma 1 と同様に溶存酸素量が多いと殻の外縁部の形態が lobate すると考え、形態解析を試みた。

形態は最後の3つの房室の形態で smooth type と lobate type の2種類のカテゴリーに分けた。結果を第18図に示す。*Ammonia japonica* は深度20 cm よりも浅い層準からは産出しない。lobate type は深度40~60 cm のところで全体の40~80%を占めるほど多くなり、その前後では少なくなった。また、20 cm 付近でも



第17図 *Ammonia beccarii* (Linne) forma 1 における lobate type と smooth type との比率



第18図 *Ammonia japonica* Hada における lobate type と smooth type との比率

多くなっている。85 cm 以深では lobate type の比率は 20~60 % の間で変化している。

d. まとめ

以上 3 種の底生有孔虫の殻形態の解析の結果は、いずれの種でも lobate type の比率が 40~60 cm において増加する傾向があることを示した。産出個体数の多い *Trochammina hadai* と *Ammonia japonica* は特によく似た傾向を示し、深度 20~80 cm の間の層準では lobate type の増加と減少がほぼ一致している。このことから、この 3 種の殻形態の変化は横浜港の底質環境の貧酸素化を記録しているものと考えられる。St.2 における溶存酸素量の変化は次のようだった。初めは比較的多かった溶存酸素量が、75 cm 付近が堆積する頃に一旦少なくなり、その後 40~60 cm のところが堆積するまでは多くなった。そして再び減少に転じ、35 cm のところが堆積する頃に最も低くなった後、現在は増減を繰り返している。

この変化を²¹⁰Pb による年代推定値に基づいた年代に置き換えると、1870 年頃に多かった横浜港の内港地区の海水の溶存酸素量は 1930 年頃に一時的に減少した後、1950 年頃までは増加したものの、1960 年頃に再び大きく減少し、現在は増減を繰り返しているということが推定できる。

このような殻形態の変化は、先に述べた深度毎の群集の多様性指数の増減と相関があり、群集の多様性が高い時には lobate type が多くなり、逆に多様性が低い時には smooth type が多くなる。このことから、底質の環境が底生有孔虫にとって住みやすい環境になると群集が多様になると考えることができる。

V 考 察

底生有孔虫化石から予想された横浜港の環境変遷について、他のデータ（介形虫、渦弁毛藻類、有機汚濁物質、重金属及び歴史記録）と比較し、考察を行う。

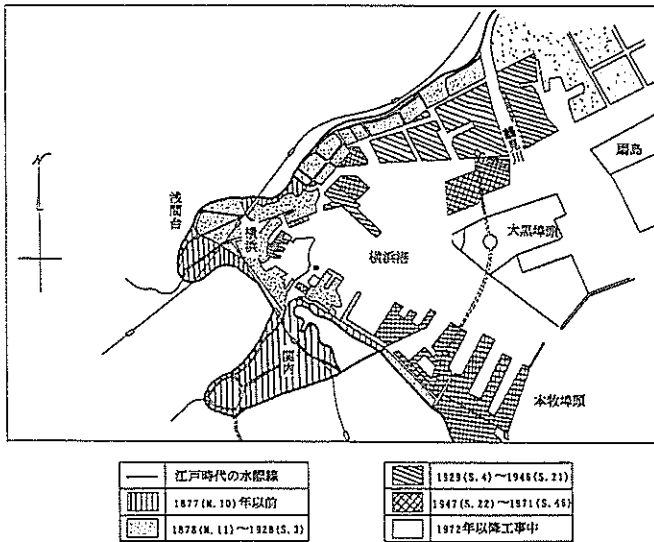
V-1. 横浜港の歴史記録と底生有孔虫

横浜港は 1859 年の開港以来、港湾施設の拡張・整備が行われ、埠頭や防波堤の建設が繰り返されてきた。これらの埋立は横浜港への海水の流入状況に影響を及ぼしている可能性が大きく、その環境変化は底生有孔虫化石群集にも現れていることが予想される。この予想に基づいて、横浜港の埋立の歴史と本研究の結果の対比を行った。

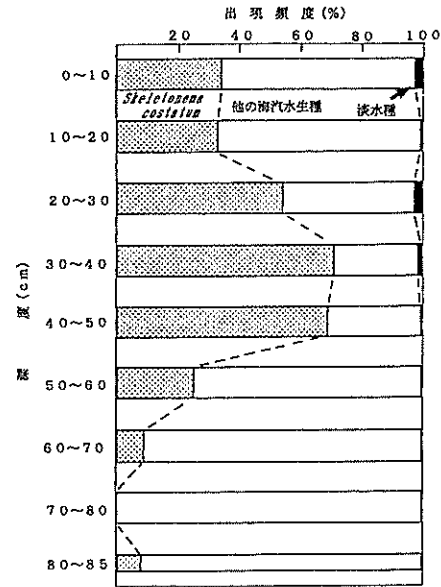
江戸時代には入り浜の自然海岸であった横浜港付近の海岸線は、港が整備されて、拡張されるにしたがって埋め立てられ、全体が閉鎖的な湾になった。特に 1947 年以降に本牧埠頭、1972 年以降に大黒埠頭ができたことで横浜港はより閉鎖的な環境になった（第 19 図）。埋め立ての歴史と有孔虫の群集の変化とを比較してみると、1955 年頃以降、*Trochammina hadai* が急激に増えている。この時期は本牧埠頭の埋立工事が始まった時期にあたり、この埠頭の埋立によって横浜港が閉鎖的になり、河川によって供給された淡水が排出されずに汽水化が進んだことを示していると考えられる。また、大黒埠頭などを埋め立てた 1972 年以降、*Trochammina hadai* が群集の 80 % 以上を超えている。これも大黒埠頭の埋立によって横浜港がさらに閉鎖的になり、汽水化が進んだことによると考えられる。このように、有孔虫の群集変化から推定される横浜港の環境変遷と、埋め立てによる埠頭建設の歴史とはよく符合する。

V-2. 横浜港底質の重金属類・有機汚濁物質と底生有孔虫

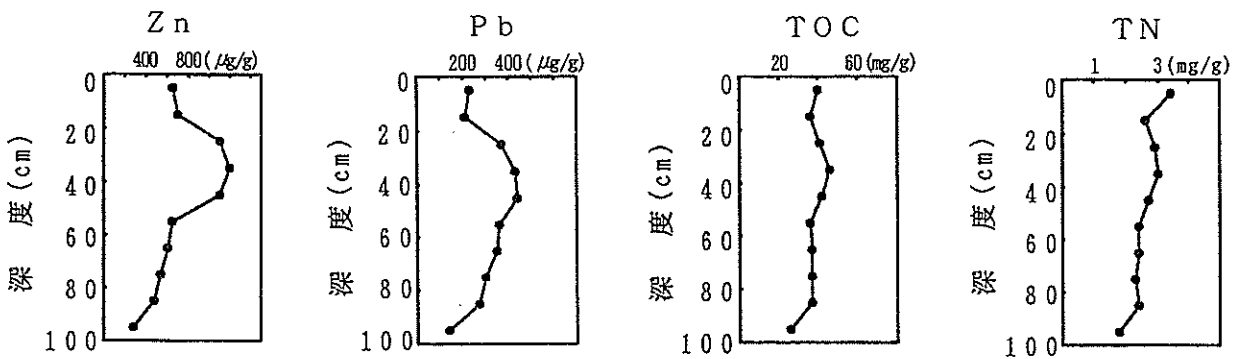
第 20 図は、横浜市環境科学研究所が横浜港内全域で行った底質汚濁の調査結果のうち、本研究での試料採取地点と同一地点における亜鉛、鉛、全炭素量、全窒素量の堆積物中での深度分布である。重金属はいずれも 30~40 cm で最大値を示し、全炭素量も同様の傾向である。この深度は 1960~70 年頃の堆積物にあたり、この時期に湾内の富栄養化が進行し、主に有機物による水質汚濁が非常に進んでいたことを示している。有孔虫の殻の形態解析の結果は、1960 年頃に横浜港が溶存酸素量が少ない貧酸素環境であったことを示しており、このことと有機質の汚濁物質の量が増えた時期とはよく一致している。



第19図 横浜港の埋め立ての歴史



第21図 横浜港内の堆積物中から得られた珪藻遺骸の深度分布



第20図 St.2 付近での亜鉛, 鉛, 全有機炭素量, 全窒素量の分布

V-3. 他の生物群と底生有孔虫群との比較

本研究で、水質や底質環境と底生有孔虫群集との間に強い相関があることを示した。このコアでは他の生物についての解析も行われているので比較する。

V-3-A. 珪藻

珪藻は死後も珪質の殻が残るため、海洋表層の基礎生産量を推察する時の指標として用いられている。横浜市環境科学研究所は、1986年8月に大岡川河口前面で採取した底質柱状試料について、珪藻群集の分析を行った。東京湾の代表的な赤潮生物である *Skeletonema costatum* が1950年頃の層準から出現率が増加し始め、1960~70年頃の層準に最大値を示し、その後は減少傾向にある(第21図)ことを示した。東京湾の赤潮発生回数は1955年頃から急に増え始めており、*Skeletonema costatum* の増加はこの時期とほぼ一致している。*Skeletonema costatum* は栄養塩の過大な供給ともなって blooming を起こすことから、1950-60年代から有機汚染が顕著になった事実と整合的である。

V-3-B. 介形虫

介形虫の個体数と種数は、深度90cmと70cm、および30cmよりも浅い層準で最低になっており、これ

らの層準が堆積した時期に底質が介形虫に適さない環境であったことが考えられている(池谷, 本号)。底生有孔虫は、深度 90 cm と 30 cm よりも浅い層準で *Trochammina hadai*, *Ammonia japonica* 等の lobate type が少なくなっており、溶存酸素量が低下したことが考えられる。このことと介形虫の個体数と種数が減少する層準とはよく一致する。

V-3-C. 渦鞭毛藻類

渦鞭毛藻類には、運動性接合子や休眠性接合子(シスト)を形成する種があることが知られており、シストに注目した研究が行われている(松岡, 本号)。渦鞭毛藻シストの単位重量あたりの産出数は 45 cm 以深の層準では 3000 cells/g 以上(最高 6000 cells/g)であるが、40 cm よりも浅い層準ではそれを超えることはない。また、種数は同じく 45 cm 以深では各深度で 30 種以上であるが、40 cm よりも浅い層準では 30 種を超えることは稀になる。これらのことから、40 cm 付近を境に水質が渦鞭毛藻類に適さない環境になったと考えられる。このことは底生有孔虫に基づく溶存酸素量の変化の傾向とよく合っている。

VI 結 論

過去 130 年間の横浜港の環境変遷を、底質の柱状試料中に産する底生有孔虫化石群集から推定した。

横浜港は、1870 年以降 1930 年までは比較的高塩分の通水性の良い環境であった。1930 年以降 1940 年ぐらゐまで溶存酸素量が減少したが、1940-1950 年までの第二次世界大戦前後には溶存酸素量は高かった。1955 年以降、新しい埠頭の建設に伴う海水の交換率の低下により、塩分が低下し始めた。1960 年代には港の富栄養化が進行し、底質の溶存酸素量が低下した。この時期には重金属の量も増加し、産業による重金属汚染も進行したことを示している。1970 年以降はあまり変わらずに推移している。

このように、横浜港内の水質は日本の高度経済成長期であった 1930 年代と 1960 年代とに悪化し、その後少し浄化している。また、1945 年前後の、第二次世界大戦の時期には、都市生活の停滞と産業の衰退のために一時的に港内の環境が好転したのは皮肉である。

以上のように、横浜港の底生有孔虫群集の解析結果は港の発展史や汚染史をよく反映した環境変遷を描き出した。このことは、堆積物中の底生有孔虫化石の分析は、数十年や数百年程度の近い過去の環境解析を行う時に有用であることを示している。

謝 辞

本研究を行うに当たり、神奈川県立生命の星・地球博物館、松島義章博士および横浜市環境科学研究所、白柳康夫氏には、貴重なコア試料を検討する機会を与えていただいた。静岡大学の太田朋生、小栗一将両氏にはコア試料の分割の手伝いをしていただいた。また、静岡大学、池谷仙之教授には結果の解釈に関して有益なご意見を賜った。地質調査所海洋地質部の西村昭博士には東京湾の環境汚染についての文献を教えてください。以上の方々に感謝する。

引用文献

Alve, E., 1991a, Benthic foraminifera in sediment cores reflecting heavy metal pollution in Sorfjord, eastern Norway: *Journal of Foraminiferal Research*, 21(1), 1-19.

Alve, E., 1991b, Foraminifera, climatic change and pollution: a study of late Holocene sediments in Drammensfjord, southeast Norway. *The Holocene*, 1(3), 243-261.

Buzas, M.A. and T.G. Gibson, 1969, Species diversity: benthonic foraminifera in western North Atlantic. *Science*, 163, 72-75.

Ikeya, N., 1977, Ecology of foraminifera in the Hamana lake Region on the Pacific Coast of Japan:

- Reports of Faculty of Science, Shizuoka University*, 11, 131-159.
- Koshio, M., 1992, Life history and test morphology of *Ammonia beccarii* (Linne) (foraminifer) in Hamana Lake, central Japan: Master Thesis, Institute of Geosciences, Shizuoka University, 74p.
- Matoba, Y., 1970, Distribution of recent shallow water foraminifera of Matsushima bay, Miyagi Prefecture, northeast Japan: *Science Report of Tohoku University, 2nd ser. (Geol.)*, 42 (1), 1-85.
- 松本英二, 1979, 底質から見た沿岸海域汚染の変遷。地質ニュース, 293, 27-33.
- 松本英二, 1982, 沿岸海域汚染に関する調査研究活動。地質ニュース, 331, 50-54.
- Matsushita, S., 1991, Life history and test morphology of *Trochammina hadai* Uchio (agglutinated foraminifer) in Hamana Lake, central Japan: Master Thesis, Institute of Geosciences, Shizuoka Univ., 115p.
- Matsushita, S. and H. Kitazato, 1990, Seasonality in the benthic foraminiferal community and the life history of *Trochammina hadai* Uchio in Hamana Lake, Japan. in Ch.Hemleben et al., (eds.), *Paleoecology, Biostratigraphy, Paleoceanography and Taxonomy of Agglutinated Foraminifera*, Kluwer Academic Publishers, Netherland, 695-715.
- Schefer, 1970, Studies of benthonic foraminifera in Restigouche Estuary: faunal distribution patterns near polluted sources. *Maritime Sediments*, 6, 121-134.
- Seiglie, G. A., 1968, Foraminiferal assemblages as indicators of high organic carbon content in sediments and of polluted waters. *Amer. Assoc. Petrol. Geol., Bull.*, 52(11), 2231-2241.
- 高柳洋吉 編, 1978, 微化石研究マニュアル。朝倉書店, 東京
- Uchio, T., 1962, Recent foraminifera thanatocoenoses of beach and nearshore sediments along the coast of Wakayama-ken, Japan: *Seto Marine Biological Laboratory Publications*, v. 10, no. 1, p.133-144.
- Wang, P. and Lutze, G. F., 1986, Inflate later chambers: Ontogenic changes of some recent hyaline benthic foraminifera. *Journal of Foraminiferal Research*, 16 (1), 48-62.
- 横浜市環境科学研究所, 1992, 横浜港の水質・底質汚濁に関する調査報告書: 横浜市環境科学研究所.
- 吉田静江, 加藤道雄, 多井義郎, 1986, 瀬戸内海播磨灘西方海域における有孔虫群集の変化: 月刊海洋科学, 18(9), 577-582