

大阪湾における海底高濁度層の季節変化*

坂本 亘**・川名 吉一郎***

Seasonal Change of Bottom High Turbidity Layer in Osaka Bay

Wataru SAKAMOTO** and Kichihiro KAWANA***

Abstract

Seasonal change of suspended-sediment particles in bottom boundary layer of Osaka Bay was discussed using total suspended matter (TSM) concentration pattern at a height of 1 m above the bottom and beam attenuation coefficient at an anchored station. During summer bottom suspended matter concentration increases owing to detritus brought euphotic zone and bottom high turbidity water is arisen. The TSM concentration gradually decreases from shallower area during autumn. Tidal front in Osaka Bay seems to be the cause particles displacement below stable stratified layer. In winter the high turbidity water disappears due to the vertical mixing of water induced by the seasonal northwesterly wind blow.

1. はじめに

海底付近には、その上層にくらべて高濃度に懸濁物質が分布していることは、古くは SVERDRUP ほか (1942) の *The Oceans* にもべられている。その堆積学的意義については FREMING and ROVELLE (1955) でもとりあげられており、海洋物理学、堆積学的に関心を持たれていた。特に海底付近の懸濁物質が鉛直的には指数関数的な濃度分布を示すことから、海底摩擦にともなう鉛直渦動拡散と粒子の重力沈降の均衡として取りあつかわれている (ICHIYE *et al.*, 1972; KAJIHARA *et al.*, 1974; KAWANA *et al.*, 1986)。

しかし、年間を通じてこの懸濁物質がどのように変化するのか、その生物生産に果たす役割はなにか、あるいは水塊構造とどのように対応しているのか、という方向から研究したものは少ない。沿岸域に限ってのべると、この層は冬季にはほとんど消滅するのに、夏期には上層の水塊分布と対応した濃度分布を示すことが多いことから見ても、上層の生物生産を反映していると考えられる。発想を逆にすれば、ある時期の水平的な海底懸濁物

質濃度分布から、各水塊のもつ生物生産量の見積りをすることも可能であることを示唆し、水産海洋学研究で情報の少ない月単位、水塊単位の時空間生物生産変化を知るためのいくつかの手がかりを与えてくれる。

なお、海底付近の高濃度に懸濁物質が存在する層は、光学的手法で確認されたことや、光束消散係数が一般に濁りの指標、いわゆる濁度とよばれていることなどから、海底高濁度層とよばれることが多い。本論文でも、海底高濁度層としてのべることとする。

2. 方法

海底高濁度層の特徴は、海域や季節により多少の差はあるが、鉛直的に指数関数的な濃度分布となることが多く、海底上約 2 m 以内はその上層にくらべて濃度に明らかな差が見出せることである。船上からの測定精度を考慮すると、正確な水深ごとの分布変化を知るには限界があり、特定の水深に着目して季節変化を記述するほうが現象を明瞭にしやすい。これより詳細な資料を得るには海底に固定した測器によることが多い (坂本, 1985; KAWANA *et al.*, 1985)。しかし、測器保守管理が困難なことから、特殊な例をのぞいて 1 ヶ月以上時系列的観測をしたものはなく、そのため時系列資料から長期間にわたる懸濁物質の変化や移動を知る試みは報告されていない。ここで示す結果は船上から測定したもので、海底上 1 m の値をあらわしている。高濁度層の濃度については別に定義はないが、大阪湾では $5.0 \text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ の値が季

* 1988年8月1日受理

** 京都大学農学部水産学教室 Department of Fisheries, Faculty of Agriculture, Kyoto University, Kyoto, 606, Japan

*** 中国工業技術試験所 Government Industrial Research Institute, Chugoku 2 Hiromachi Kure Hiroshima 737-01, Japan

大阪湾における海底高濁度層の季節変化

節的推移を調べるのに適しているように思われたので、この濃度分布域に着目して考察した。

空間分布の資料は、1972年から'79年にかけて大阪府水産試験場が行った結果（城ほか、1979）と、1985年から'86年にかけて豊潮丸（広大所属）で行った結果を組

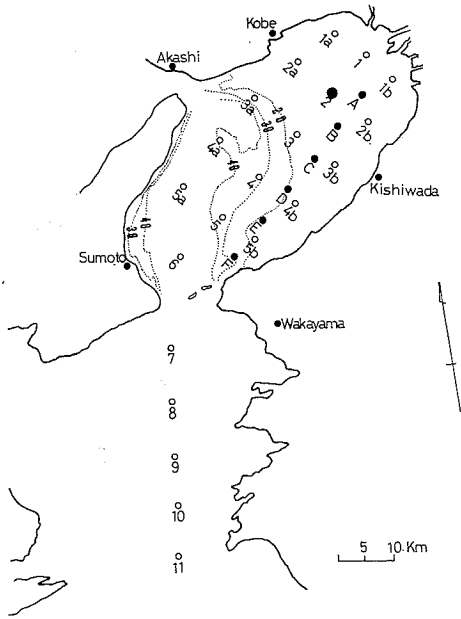


Fig. 1. Observation stations by T&R/V Toyoshio-maru. Dotted line is depth contours in meters.

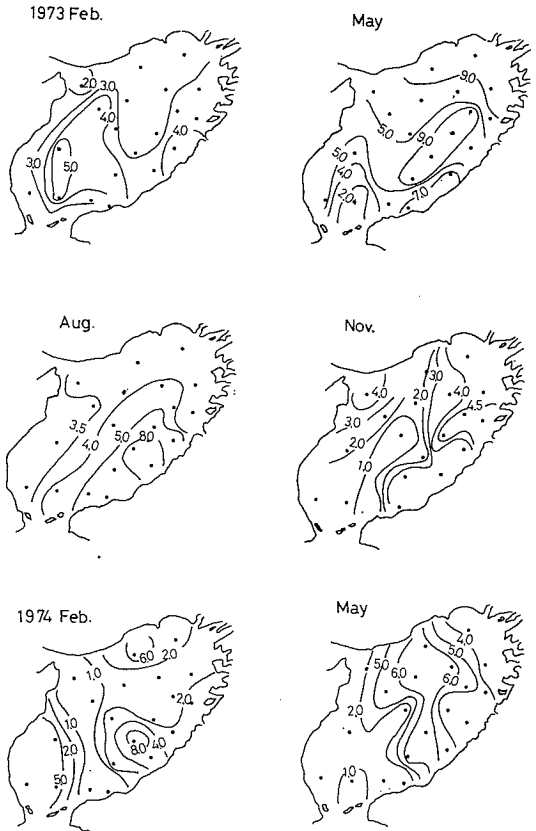
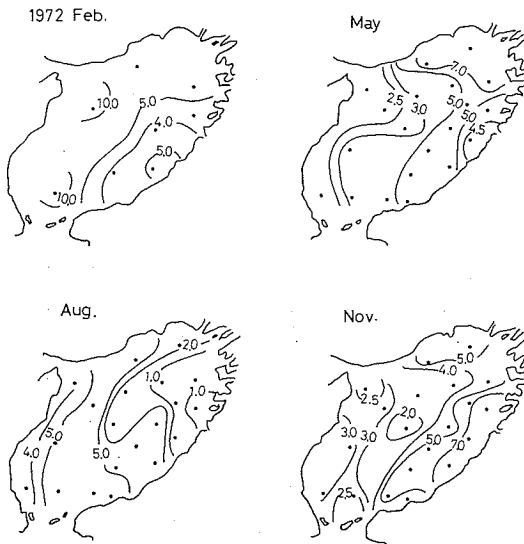


Fig. 2. Horizontal distribution of total suspended matter (TSM) concentration ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) at a height of 1.0m above the bottom measured by Osaka Prefectural Fisheries Observatory.

合わせて考察した。Fig.1は1985年に行った調査測点を示し、英字の大文字は大阪府水産試験場で行った定点の一部であり、特に1978年から'79年の季節変化を示すのに必要なため記入した。1985年と我々が'86年の資料はあらかじめ瀬戸内海の懸濁物質濃度で更正しておいた光束透過率計（KAWANA *et al.*, 1985）を用いて鉛直的に各測点で光束消散係数を調べ、この値を単位体積当り（ l ）

の懸濁物質濃度に換算した。大阪府水産試験場で行った1972年から'74年迄の観測点は Fig. 2 に示したが、この時の資料は採水、ろ過法により乾重量を直接測定した。全く異なった機関で個別に測定したにもかかわらず、二つの測定値はほぼ等しい濃度変化を示していた。

3. 結果と考察

分布の特徴と季節変化 1972年から'74年迄の大阪湾における海底懸濁物質濃度変化を Fig. 2 に示す。濃度が $5 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以上の等値線に着目して検討すると、分布の特徴にはすべての年に共通してみられる現象と、年ごとに相違するものがあることに気づく。共通した現象としては、冬季2月に湾の南西側水深40m層に高濃度層が局所的にあらわれること、及び5月には湾奥部から湾中央部にかけて東西に湾を横断するようにして高濃度層があらわれることなどがあげられる。この高濃度層はいずれの年の8月にも、分布の形はちがうけれど湾中央部から南東側に移っている。1985年の夏と冬に行った実験結果を Fig. 3 に示したが、この図と Fig. 2 を合わせて比較すると、5月から6月にかけて大阪湾の海底は全域にわたり $8 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以上の懸濁物質でおおわれる。恐らく、5月中旬から6月下旬にかけて海底高濃度層の濃度が増大しはじめるのであろう。基礎生産による植物プランクトンが増殖している間に海底でも濃度が増加することからみ

て、この物質は表層を中心とした生物生産によるデトリタスの沈降したものが主体をなしている。8月以降には、表層の基礎生産活動がゆるやかとなるため、デトリタスの海底への沈降が減少し、全域にわたり、濃度が減少しはじめている。11月に湾東部の岸寄りに若干高濃度層が残ることが、'72, '73, '85年には見られた。この現象は観測時の気象条件や播磨灘から海底を通じて大阪湾にもたらされる懸濁物質も考慮しなくてはならないので、後で再び検討する。

夏と冬の鉛直断面分布 湾中央にそった鉛直断面における濃度分布を Fig. 4 と 5 に示す。6月には1985, '86年とも海底上2~3mは $5 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以上である。測点6と7で不連続となっているのは、この付近で外海の紀伊水道からくるやや高塩分の水と大阪湾内の水が不連続に接する境界域となっているのが原因である。この状態は鉛直混合のある冬季でも塩分分布から推定することが可能なので、多少図が煩雑になるが Fig. 4 の冬季の懸濁物質分布と同じ図中に示した。懸濁物質の分布は大阪湾では塩分分布に似ているが、細かい分布、特に海底付近では相違し、これは保存量である塩分と、粒状物との流れに対する対応が異なることによるのであろう。Fig. 4, 5 ともに

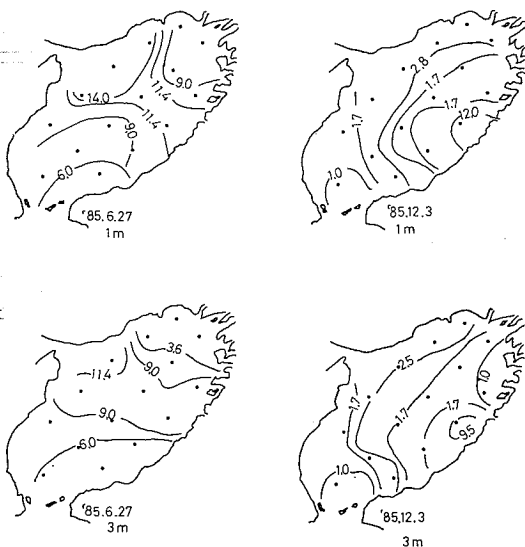


Fig. 3. Horizontal distribution of TSM concentration at heights of 1.0m and 3.0m above the bottom.

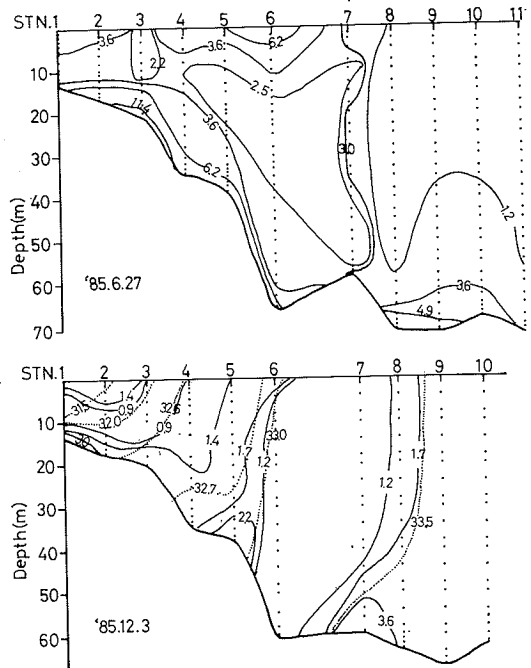


Fig. 4. Vertical distributions of TSM (solid line) and salinity (dotted line) along the center line of Osaka Bay, on June and December, 1985.

大阪湾における海底高濁度層の季節変化

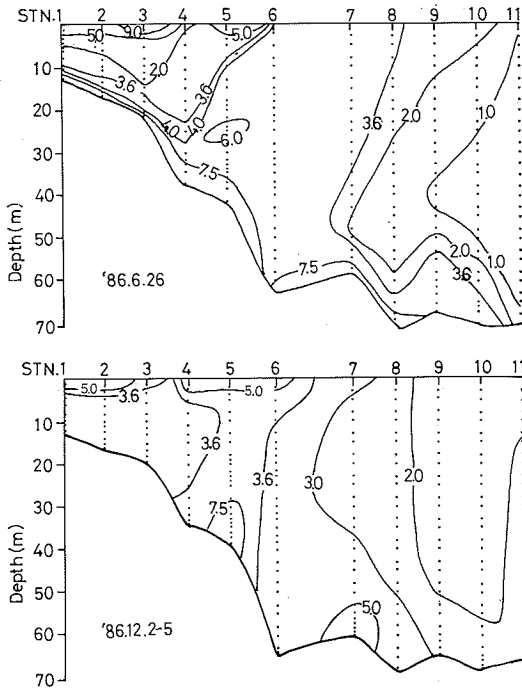


Fig. 5. Vertical distributions of TSM along the center line of Osaka Bay on June and December, 1986.

夏季の海底には海底傾斜に平行に $5 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以上の高濁度層が底上 2~3 m 迄をおおっており、大阪湾における一般的な状態であることをうかがわせる。いっぽう冬季には等濃度線は海底傾斜に対して直交するようになり、水深別に鉛直的な分布の差が、湾奥から湾口に向かってあらわれる。そして共通して測点 5 と 7 の海底上に局所的に周辺域より高濃度となる部分が見られる。

海底高濁度層の移動と潮汐フロント 海底高濁度層は周年を通じて一定の値を保っているのではなく、季節的にも海域によっても変わる。一般に 5 月頃浅海域から濃度が増し、6 月から 7 月にかけて全域にわたって最高濃度に達するが、冬季にはほとんどの海域で消滅してしまう。海底付近の濃度変化について横軸に時間を、縦軸に湾奥からの測点をとって示したのが Fig. 6 である。1972 年から '74 年の資料でみると 5 月には、浅い方から深い方にかけて全域で $5 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以上となっており、これはすでにのべた通りである。

季節的には 8 月から 11 月にかけて、表層からのデトリタスの供給がなくなると湾奥から減少している傾向がみられる。

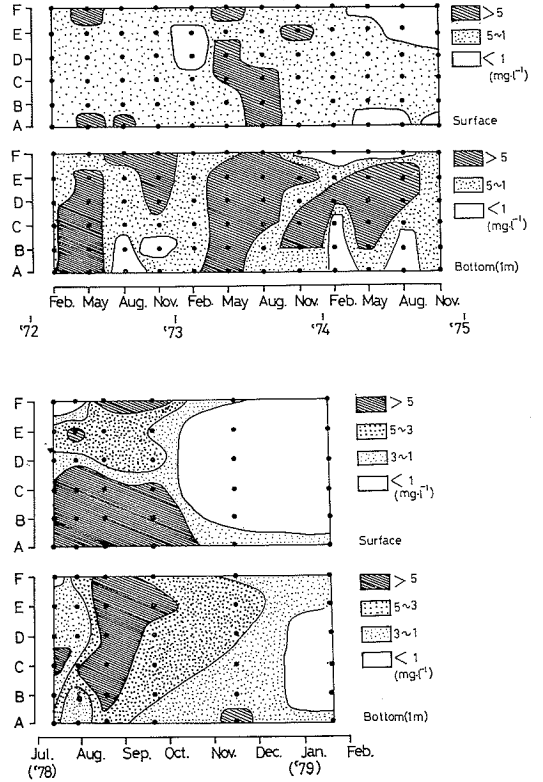


Fig. 6. Seasonal surface and bottom layer TSM displacement along line A to F.

1978年から'79年にかけては、測定間隔を密にして測定しているため、その結果も同じ方法で整理した。この年は大阪湾に大規模な赤潮が発生した年であり、湾奥の表層はこの結果を反映していることがうかがえる。又、海底高濁度層は 8 月に見られ、9 月から消滅しはじめ、11 月には湾口の一部にのみ存在するだけである。9 月から 11 月にかけての測定間隔はやや長い等値線で推定すると、時間的空間的な変化に関する勾配が示され、この勾配は翌年 1 月には完全になくなり、海底は Fig. 4 にみられる状態となる。

湾奥から高濁度層が消滅してゆく理由としては、二つの可能性が考えられる。それは、

- 1) デトリタスが分解しつつ海底境界層にそって深部へ移動する。
- 2) 深部ほど分解速度がおそく、表層からの供給が止まると、浅海域よりおそく迄懸濁態のまま残るため、見かけは浅海から移動しているように見える、である。

Fig. 6にあるBとEの水深は16mと20mで差はわずかに4mであり(Fig. 8参照), 分解をおくらせるほどの差とは考えられない。むしろ海底境界層にそった移動を考えた方が妥当であろう。冬季には季節風の吹送や海面冷却にともなう鉛直混合のため、海底堆積物が再浮上することは十分予想される。しかし夏期に湾奥から湾口にむかって海底傾斜にそった移動が見られるとすれば、その原因となる現象について指摘しておかなければならない。一つには、周辺の海水より比重の大きい粒子群によって形成されている層であるから密度流的な現象により、ゆるやかに移動することが考えられる。さらに他の原因としては沿岸域に見られるフロントの存在があげられる。柳・吉川(1987)は大阪湾に水深と M_2 潮流振幅の対数

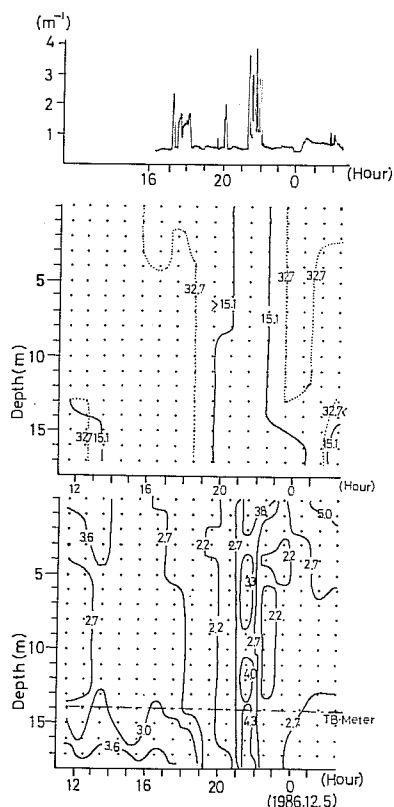


Fig. 7. Salinity and beam attenuation coefficient at anchored station (Stn. 2) in winter.

upper panel: Time series of beam attenuation coefficient measured at a height of 3m above the bottom.

middle panel: Isohaline (dotted line) and isotherm (solid cine) as a function of depth and time.

lower panel: Isometric vertical displacement in $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ as a function of depth and time.

比が 2.5-3.0 の等値線に沿って潮汐フロント (Tidal front) が存在することを報告している。大阪湾には淀川や大和川等から河川水が流入するため、海水密度は水温だけでなく、淡水流入量によっても影響を受けるため、このフロントが SIMPSON and HUNTER (1974) の定義した Irish 海の Tidal front と同じ考え方で説明できるかどうかは、さらに研究を進めねばならない。しかし、すくなくとも Fig. 1 の測点 2 と 3 及び A から E迄はフロントの水平移動をする範囲内に含まれている。

Fig. 7は測点 2 における懸濁物質濃度と水温・塩分の鉛直分布及び海底上 3 m における光束消散係数の時間変化を示している。特に冬期の結果を示したのは、水温・塩分と光束消散係数又は懸濁物質濃度による水塊表示の差を示すためである。水温・塩分では、海水の鉛直混合によってフロントの特徴を明確に表現できないが、懸濁物質濃度変化からはフロントの通過を確認できる。フロントは1986年12月4日21時から22時30分にかけて通過し、その時間帯海底付近では1時間にわたって急激な光束消散係数の増加があらわれる。

つまり、冬季にもこの海域にはフロントが存在し、その通過にともない急激な海底堆積物の再浮上がおこっている。当然夏にもこの現象は見られ1日2回海底付近は砂あらしに似た高濃度の懸濁物質でおおわれる。このような海底堆積物を巻き上げる乱流エネルギーがどのような流体力学的機構によってもたらされるかは現在のところ不明だが、すくなくともフロントの通過にともなって激しい乱流が海底にもたらされていることは確実である。夏期には大阪湾の10m以浅は $\sigma_t=21.0$ の安定成層が形成される(柳, 1987)。フロントの通過にともなう海底付近の乱流エネルギーは、Fig. 7から判断すると海底5m以内に影響を及ぼしている。海底高濁度層内の物質はフロントの通過とともに再浮上し、成層下部を完全に表層まで浮上できないまま底層付近で浮上と沈降をくり返し、次第に深部へ輸送されて行くことも、原因の一つである。

季節風と懸濁物質分布 冬季の粒子の移動には季節風が関与していることは否定できない。季節風による粒子の再浮上を知るために、Fig. 8, 9を示す。Fig. 8は城ほか(1979)が報告した結果であり、1978年8月と'79年1月の試水中の粒子について密度を検討したものである。単位体積の試水中の粒子はコーンカウンタにより総体積が計測され、その乾重量との比較を“見かけの密度”と定義し、季節的な差を比較した。海底付近ほど粒子の密度は大きく、表層付近では小さい。季節的には冬の方

大阪湾における海底高濁度層の季節変化

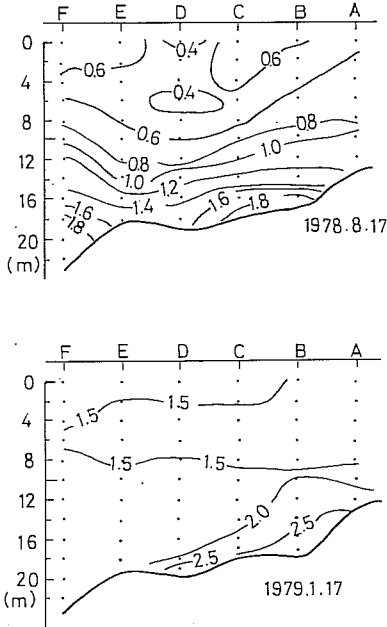


Fig. 8. Seasonal difference of "apparent specific gravity" of suspended particles in the vertical section along A to F.



Fig. 9. LANDSAT image of Osaka Bay at 09⁰⁰ JST on 9 December, 1986. Light color indicates distribution area of surface suspended matter.

が夏より密度は大きく、この時期懸濁態のうち分解するものはすでに分解してしまっている。測点別にみると、水深の浅いAからDにかけて2.5となり、それ以深と様相がちがう。この密度は粘土鉱物の密度(2.65)に近く、明らかに堆積物中の鉱物質を含んでいる。有機懸濁物質の密度を1.80、粘土鉱物の密度を2.65とすると、冬季の海底付近の懸濁物質における両者の混合比は有機物18%粘土鉱物82%となる。80%以上の鉱物質を含むことは、地形的な特徴、特に河口域の影響を無視することはできず、河口付近に堆積した鉱物粒子のうち再浮上したものを含んでいることが考えられる。

Fig. 9は1986年12月9日のLANDSATによる大阪湾表層の状態を示しているが、これをFig. 5の結果と比較してみると風との対応についていくつかの情報が得られる。気象条件から見ると12月4日と12月9日に北西風が強く吹き、同じような環境であり、降雨はなく、当時琵琶湖は異常濁水の状態であった。両図を比較すると、測点1-3及び4-6の表層にみられる $5 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ の懸濁物質分布が季節風による再浮上の特徴を示している。測点1-3の表層をおおう物質は淀川河口から同心円的に広がっている物質を起源としている。ビルの林立する都会の大河川は一種の風洞に似た状態となっているので、必ずしも風向に対応した方向に懸濁物質を輸送していないかもしれないが、Fig. 9で見ると、河口の線にそって沖合いへ移動している。更に測点4-6においては湾東部から筋状に西に向かって張り出している懸濁物質が原因である。

Fig. 2, 3には冬季の海底高濁度層が形成される海域として湾東部沿岸域がある。供給源についてはまだ十分確かめることはできないが、再浮上して筋状に表層を移動することはFig. 9から確かめることができる。このように冬季には浅海域を中心に季節風により、堆積物は再浮上し表層を湾口部へ移動して行く。Fig. 9から表層懸濁物質の行方を追うと、測点6と7の間に不連続となるのを見ることができる。Fig. 5ではこの測点間は 3.0 と $3.6 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ の濃度線がこま切れ、この等値線は海底傾斜に対して鉛直的に交わっている。湾奥から表層を移動してきた物質の一部が、水平移流を阻げられて沈降している。その結果として、友ヶ島水道をはさんだ南北両側の海底に局所的に高濁度層が形成されることになる。

4. 結論

このように見ると、海底高濁度層の季節的推移としては、

- 1) 5月から8月にかけてのデトライタスの沈降による海底付近への集積
- 2) 夏から秋にかけての溶解にともなう全湾的な濃度低下, 及び浅海域からの海底境界層にそった移動
- 3) 冬季の季節風による表層からの移動と, 補流による底層からの再流入

の過程が考えられる。冬季に水深40m以深に見られる懸濁物質には播磨灘から移動してきたものも含まれる可能性がある。これらすべての過程には物理的な移流や拡散だけでなく, 分解や堆積もある。たとえば夏期の瀬戸内海では懸濁しているデトライタスのうち80%から40%は堆積に寄与していない(川名, 未発表)。

移流や拡散による高濁度層の変化の割合や季節的な堆積に寄与するデトライタスの割合等については別の機会にのべることを考えている。

5. 謝 辞

大阪府水産試験場には貴重な資料を参考にさせていただいたことに感謝いたします。観測の一部は広島大学所属豊潮丸によって行われた。観測に御協力いただいた船長と乗組員の皆様に心から感謝いたします。なお, 本研究の一部は文部省環境科学特別研究“海域の利用と緩衝容量(研究代表者 国司秀明)”によって行われたものである。

文 献

FLEMING, R. H. and R. REVELLE (1955) Relation

of oceanography to sediment. Physical process in the ocean. in "Recent marine sediment. ed. by P. D. Trask". p. 48-141. George Banta Pub. Wisconsin.

ICHIYE, T., N. BASSIN and J.E.HARRIS (1972) Diffusivity of suspended matter in the Caribbean Sea. *J. Geophys. Res.*, **77**, 6576-6588.

城 久・阿部恒之・矢持進 (1979) 大阪湾泉州沖における濁りの構造. 大阪府水産試験場報告, p.78-122.

KAJIHARA, M., K. MATSUNAGA and Y. MAITA (1974) Anomalous distribution of suspended matter and some chemical composition in sea water near the sea bed. Transport processes. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **30**, 232-240.

KAWANA, K., T. TANIMOTO and T. ICHIYE (1986) Entrainment of bottom sediment in the Seto Inland Sea in summer. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **42**, 381-388.

坂本 亘 (1985) 沿岸生態系における懸濁物質・堆積物の役割. 沿岸海洋研究ノート, **22**, 136-148.

SIMPSON, J. H. and J. R. HUNTER (1974) Fronts in the Irish Sea. *Nature*, **1250**, 404-406.

SVERDRUP, H. U., M. W. JOHNSON and R. H. FLEMING (1942) The oceans: Their physics, chemistry and general biology. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New York, 1087.

YANAGI, T. (1987) Seasonal variation of water temperature and salinity in Osaka Bay. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **43**, 244-250.

柳 哲雄・吉川和輝 (1987) 燧灘・大阪湾の潮汐フロント. 水産海洋研究会報, **51**, 115-119.