

東京湾湾奥部における成層形成期の水環境特性に関する現地観測

八木 宏*・内山雄介**・鯉渕幸生**
日向博文***・宮崎早苗****・灘岡和夫*****

1. はじめに

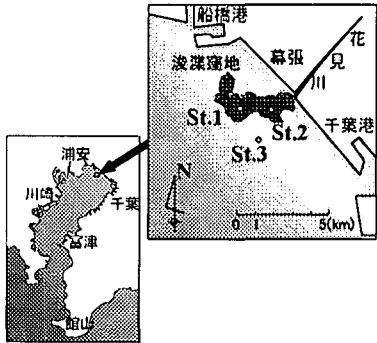
都市型の閉鎖性水域である東京湾は、周辺河川等からの流入負荷が多く、また海水交換率が低いために、植物プランクトンなどの低次生産生物が過剰に増殖し年間を通して慢性的な赤潮状態に悩まされている。特に、水温レベルの高い夏季には植物プランクトンの増殖が著しく、赤潮状態が長期間継続するようになるが、一方このような表層部における大量のプランクトン発生は底層の貧酸素化を促し青潮現象の発生原因にもなっている（例えば、小倉 1993）。このように、東京湾湾奥部の成層期の水環境の特徴は、①植物プランクトン等の過剰な増殖（赤潮）→②底層貧酸素化による湾奥部海底の無生物領域の形成→③無酸素底層水湧昇による魚介類のへい死（青潮）→④栄養塩湧昇による赤潮の再発生、といった生態学的にも極めて非調和な環境状態が互いに密接に関連しながら特有の水質－生態環境系を形成していることにあり、生物・化学過程も含めた水環境システムの解明が求められている。

一方、最近の宮崎ら（1995）の研究によれば、従来夏季に発生することが多いといわれている青潮が成層形成期の春季にも発生することが示されており、その原因として湾奥部に点在する浚渫窪地の存在が指摘されている。そこで本研究では、成層期を考える上でも重要でありながらこれまで実態把握があまり進んでいない東京湾湾奥部における成層形成期の水環境特性を現地観測を通して把握すること試みた。

2. 現地観測の概要

現地観測は、東京湾湾奥部に位置する千葉県幕張沖の海域を対象として行った（図－1）。観測期間は水温成層が形成される 1996 年 4 月 20 日～5 月 19 日の約 1 ヶ月間である。今回の観測では、湾奥部の水質環境の時間変動特性だけでなく、その平面構造をも把握するために

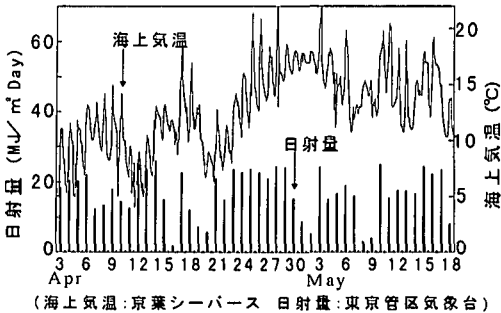
図－1 に示すように浚渫窪地も含めた 3 つの観測ステーション（浚渫窪地内：St. 1 水深 30 m，St. 2 水深 20 m，浚渫窪地外：St. 3 水深 10 m）を平面的に配置した。観測項目は水温・塩分・クロロフィル a 量・濁度・流速（ア



図－1 観測対象海域と観測ステーションの位置

表－1 設置した観測機器の鉛直位置（水面下の距離）
(m)

測定項目	St. 1	St. 2	St. 3
水 温	1, 3, 5, 7, 9, 12 15, 18, 21, 24, 29	1, 3, 5, 7, 9, 12 15, 19	1, 2, 4, 6, 8
塩 分	1, 5, 9, 15, 21, 29	1, 5, 9, 15, 19	1, 4, 8
クロロフィル a 量	1, 21	—	1
D O	1, 21	—	1, 8
濁 度	1, 21	—	—
流 速	6	—	—



図－2 観測期間の気象概況

* 正 会 員 博(工) 東京工業大学工学部 助教授
** 学生会員 東京工業大学大学院理工学研究科
*** 正 会 員 工 修 東京工業大学工学部 助手
**** 正 会 員 NTT データ通信(株)
***** 正 会 員 工 博 東京工業大学大学院情報理工学研究科 教授

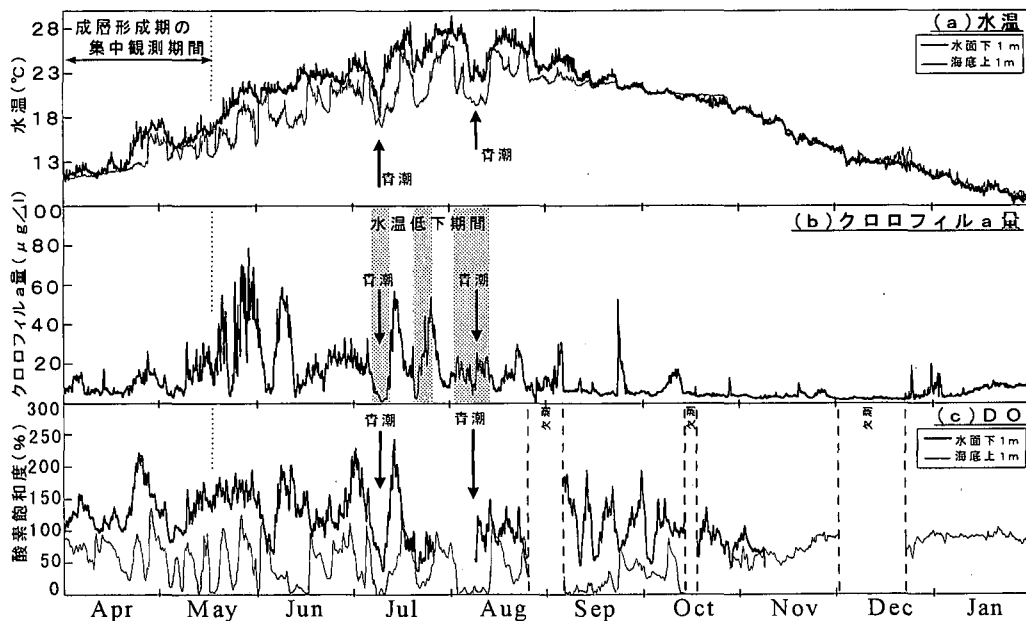


図-3 湾奥部における水温・クロロフィルa量・酸素飽和度の年間変動 (St. 3, 水深9m)

レック電子製 MDS-T, MDS-CT, ACL11-8M, ACM-8M)・DO (三洋測器製 MDO-I) である (表-1 参照)。ここでクロロフィルa量は、蛍光光度からの推定値であり、以下本論文ではウラニン換算の重量として表示する。また、St. 3 については、東京湾湾奥部における年間の水環境特性の把握を目的として、1996年4月2日から現在に至るまで長期連続観測を行っている。

観測期間の気象概況を示すために、図-2 に日射量と海上気温を示す。海上気温・日射量ともに4月20日ごろまでは10日前後の周期で変動を示しているが、4月20日ごろから晴天が続き気温が急激に上昇する。5月初旬には天候が一時くずれるが、5月10日から日射が回復し気温も上昇した。

3. 現地観測結果と考察

3.1 湾奥部水環境の年間変動特性

本節では、St. 3 において通年で行なわれている長期連続現地観測の結果を示し、湾奥部 (幕張沖) における水環境特性の基本的な特徴を明らかにしておく。

図-3 は、1996年4月2日から1997年1月27日までの (a) 水温 (水面下1m, 海底上1m), (b) クロロフィルa量 (水面下1m), (c) DO (酸素飽和度: 水面下1m, 海底上1m) の経時変化を示したものである。これを見るとまず水温については、4月下旬から水温成層化が進み、8月上旬に年間最高水温を示した後、9月下旬には水温成層がほぼ解消している。図中の縦矢印は、千葉県水質保全研究所によって青潮が確認された日を示している

が、この前後で表層・底層ともに大きな水温低下 ($5\sim 6^{\circ}\text{C}$) が発生している。のように水温成層が顕著となる7~8月の期間には、年間の水温変化から考えてもかなり大きな水温変動が発生することが特徴といえる。一方、クロロフィルa量については、4~8月の期間でそのレベルが高く、特に5月中旬から6月中旬までの期間で大きな値を示している。また7~8月には、青潮や底層水湧昇によるとみられる低温化の影響で大きく変動する様子がみられる。さらに、DO については表層では青潮時を除いて過飽和な状態が多く、底層では水温成層が形成される4月下旬から貧酸素化が始まっているが、貧酸素状態がかなり進行していると考えられる7~8月にも一様に低い値を示すのではなく、大きく変動しているのが特徴である。図中横矢印は成層形成期の集中観測を実施した期間を示しているが、この時期に比較的急激に高温化し成層状態へ移行している様子がわかる。本研究ではこうした成層化のプロセスの特徴を以下に詳しく検討した。

3.2 成層形成期における湾奥部海域の水環境特性

a) 水温と塩分の変動について

ここでは成層形成期の水環境特性を把握するために、まず水温・塩分の変動に着目しその基本的な特徴をおさえる。図-4 は St. 3 における (a) 水温と (b) 塩分の経時変化を示したものである。図には、鉛直方向2地点の水温・塩分の時系列を併せて表示している。ここで特徴的なことは、前節でも指摘したように水温の成層化が非常に急激に生じていることである。水温成層化の過程を

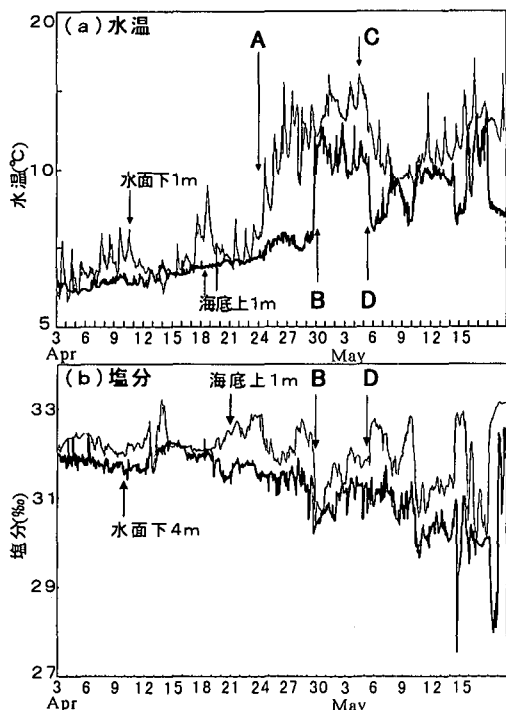


図-4 成層形成期の水温・塩分の経時変化 (St. 3)

詳しく調べると、4月中旬まで水深方向に変化の少ない水温構造が、4月24日頃からまず表層が急激に高温化し(図-4矢印A)、続いて底層水温も急激に上昇すること(図-4矢印B)で全水深にわたって高温化している。さらに、この高温状態が数日続いた後、5月4日頃から表層水温が低温化し(矢印C)、それに引き続き底層水温が5月5日(矢印D)に急激な低温化を示して、このような急激な成層化や水温の急激な上下動が湾奥部の水温環境の特徴といえる。

そこで、成層形成期の水温変動に影響を与える要素として、日射等の気象条件の効果を明らかにするために熱収支解析を行った。海面を通して大気側から水域内に運ばれる熱輸送量は式(1)を用いて算出できる。

$$Q_n = S_{\text{net} \downarrow} + L_{\text{net} \downarrow} - H \uparrow - IE \uparrow \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $S_{\text{net} \downarrow}$ ：短波放射、 $L_{\text{net} \downarrow}$ ：長波放射、 $H \uparrow$ ：顕熱輸送量、 $IE \uparrow$ ：潜熱輸送量である。なお、顕熱・潜熱輸送量はバルク法を用いて算出した(近藤, 1994 参照)。一方、実際の水域の熱変化量 Q_0 は、水温の観測値に基づいて式(2)により算出できる。

$$Q_0 = \rho \cdot C \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 ρ は海水の密度、 C は海水の比熱、 ΔT は底面が単位面積 (1 m^2) の水柱内の観測水温の変化量、 Δt は水温変化を定義した時間間隔である。図-5に、上記によ

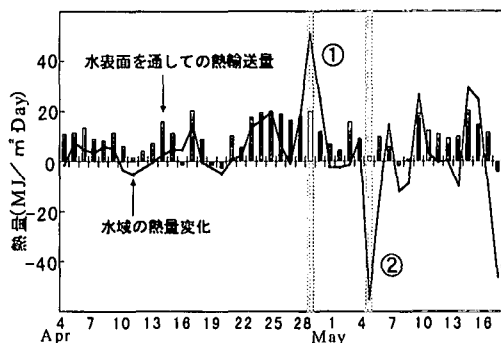


図-5 熱収支解析結果

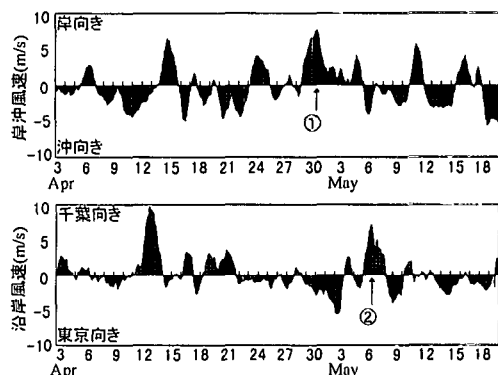


図-6 海上風の経時変化 (St. 3)

て求めた海面を通しての熱フラックス(図中棒グラフ)と水域の熱量変化(図中実線)の比較を示す。水温が日射等の影響のみによって上昇していれば、これらが一致するはずである(但し、ここでは底面からの熱の放出は微小と考え無視している)。しかしながら、両者は特に①、②といった期間で著しく差が生じている。この①②は先の急激な底層の水温変動B、Dに対応している。一方、前述の現象Aについては、表層水温が上昇する4月23~26日で Q_n と Q_0 が同等な大きさであることから、日射等の影響によるものと考えられる。

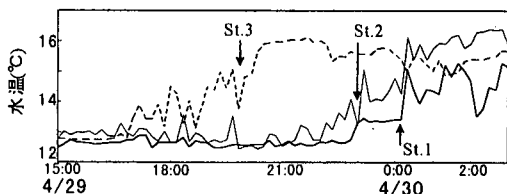
そこで、日射では説明できない現象B、Dについて様々な環境条件との関連を調べた。その結果、B、Dは海上風との相関が強いことがわかった。図-6は観測期間中の風速を24時間移動平均し、岸沖・沿岸各成分の時間変化として表したものである。これを見ると、現象Bが発生する時期には南からの比較的強い風(岸沖成分：岸向き、沿岸成分：東京向き)が連吹しており、現象Dが発生するときには風向が北西風(岸沖成分：沖向き、沿岸成分：千葉向き)に変化している。図-7に現象B、Dが発生する時のSt.1~St.3の水温時系列の比較を示す。これを見ると、水温の急激な上昇及び下降には観測ステーションごとに時間差があり、両者とも沖側のステーショ

ンから水温変化が起きている。このことは、沖からの水平方向の移流が水温変動の原因であることを示している。さらに、塩分変化との関係を調べると、現象 B が生じる時には低塩分化、現象 D が生じる時には高塩分化がそれぞれ対応している。以上の観測事実から考えると、日射の効果以上に高温化が進行する現象 B では、海上風によって表層水が湾奥部への吹き寄せられ、それによって底層まで高温・低塩分水で満たされた状態になる。一方、急激な水温低下を起こす D については、表層水を湾奥に吹き寄せていた風の方向が変化することで、表層水堆積と入れ替わるように底層水浸入が起こり低温・高塩分化すると考えられる。このように湾奥部においては成層形成過程においても海上風の影響が大きく、風の吹き寄せによる表層暖水の堆積や風向の変化による底層水の浸入といった海水流動により全水深的な水温変動を繰り返しながら成層を強化していく。ここでは、変化の大きい現象 B, D に着目したが、この他にも風に対応した小規模な水温変動は度々発生している。

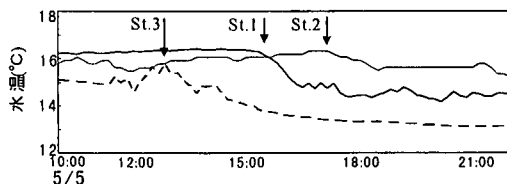
b) クロロフィル a 量と DO の変動について

図-8(a) は、St. 3 における表層 (水面下 1 m) のクロロフィル a 量の経時変化を示したものである。クロロフィル a 量は植物プランクトンの増減の指標であるが、観測期間内の傾向としては、4 月下旬と 5 月中旬以降に比較的大きな値を示している。この期間は両者とも、日射の影響によって表層水温が上昇する時期に相当しており、植物プランクトンへの水温の影響が示唆される (図-4 参照)。また、5 月中旬以降の期間については、明確な日周変動が現れている。千葉県水産試験場富津分場 (1996) によれば、4 月下旬から 5 月にかけて東京湾内の植物プランクトンの優占種が、珪藻類である *Cheateoceros* sp. から、渦鞭毛藻類である *Gonyaulax* sp. に変化したことが報告されており、このような優占種の変化がクロロフィル a の変動パターンに現れたものと推測される。

図-8(b) は、St. 3 における表層 (水面下 1 m) と底層 (海底上 1 m) の DO の経時変化を示したものである。表層 DO は観測期間全体にわたって過飽和状態になっており、その変動パターンは先に示したクロロフィル a 量と非常に似たものとなっている。このことは、表層付近の DO は植物プランクトンの影響によってほぼ支配されていることを示唆している。一方、底層 DO については、4 月上旬より徐々に貧酸素化が進行しているもののその変動が非常に大きい。そこでこの変動の原因を先に示した水温・塩分変動との関係から検討した。その結果、図中矢印④⑤⑥で示した急激な貧酸素化は、水温低下・高塩分化に対応しており、3 つの観測ステーションの位相関係からも底層水の湧昇に伴う底層貧酸素水塊の沖合いからの移流と考えられる。一方、矢印①②については、



(a) 図-4 中矢印 B に対応する底層の水温上昇過程



(b) 図-4 中矢印 D に対応する底層の低温低下過程

図-7 St. 1~St. 3 の水温変化の位相差

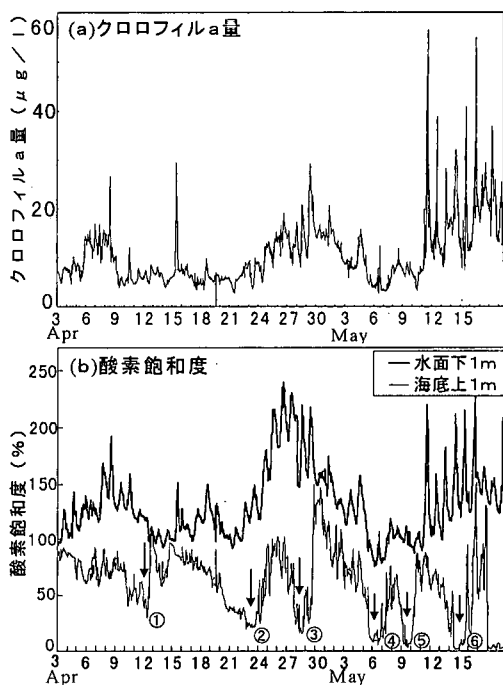


図-8 クロロフィル a 量・DO の経時変化 (St. 3)

DO の減少が緩やかであること水温・塩分との明確な関係が見えないことから底層における酸素消費が進んだためと考えられる。①~⑥で示した貧酸素状態は、表層水の湾奥部への吹き寄せなどによって解消されており、このように水平移流に強く支配された酸素供給と貧酸素化が繰り返されることで、DO に大きな変動が現れることが湾奥部の特徴といえる。

3.3 浅瀬窪地内の水質変動特性

前節で検討した湾奥部海域の水温成層形成過程に対応

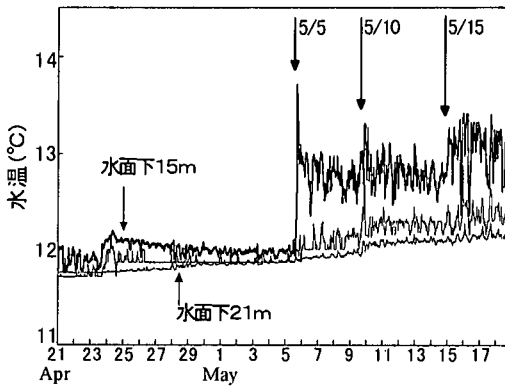


図-9 浚渫地内の水温の経時変化 (St. 1)

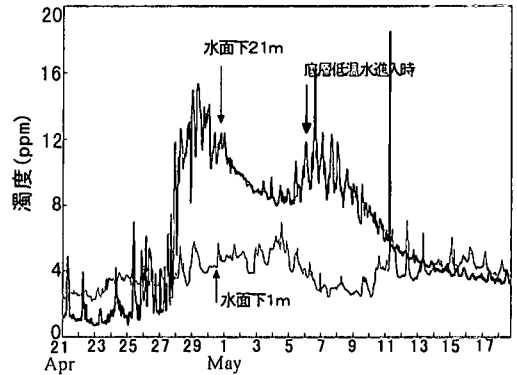


図-11 濁度の経時変化 (St. 1)

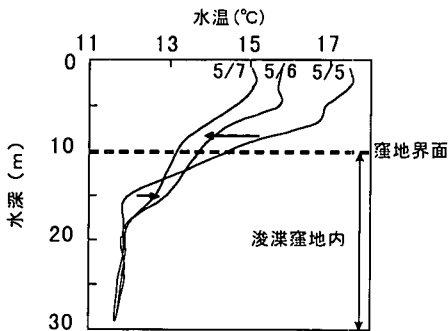


図-10 5/5~5/7の水温の鉛直分布 (St. 1)

7日)に対応している。このことは、底層水の浸入が浚渫地内の水温・塩分環境だけでなく、濁質の供給といった形でも影響を与えていることを示している。

4. まとめ

東京湾湾奥部における、成層形成期の水質環境に関する現地観測結果から以下のことが明らかになった。

(1) 湾奥部の水温成層形成期は、日射による局所的な加熱効果に加えて、海上風による表層水暖水堆積や底層冷水浸入などにより、急速に成層状態に移行し、全水深的に水温・塩分を大きく変動させながら成層化が進行する。

(2) 湾奥部における表層のDOの変動はクロロフィルaとの相関が高く、植物プランクトンの増減がDOの強い支配因子となっている。一方底層のDOは、海上風による表層水堆積や底層水浸入により大きく変動する。

(3) 浚渫地内の水温上昇は、浚渫地周辺の湾奥部海域において底層水浸入が発生するときに生じる。また、底層水浸入は窪地内の水温・塩分を変化させるだけでなく、窪地内への濁質供給といった作用も持っている。

謝辞: 本研究の解析を行うにあたり、千葉県水質保全研究所小倉久子主任研究員ならびに千葉県水産試験場富津分場から観測データを提供して頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 小倉紀雄: 東京湾—100年の環境変遷—, 恒星社厚生閣, 188 p.
- 近藤純正: 水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支, 朝倉書店, pp. 160-184.
- 宮崎早苗・八木 宏・小倉久子・澁岡和夫 (1995): 衛星画像解析に基づく東京湾の湾潮発生状況把握の試み, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 1076-1080.
- 千葉県水産試験場富津分場 (1996): 東京湾海況速報, 第1報, 第2報, 第3報.

して浚渫地内の水温・塩分等がどのように応答しているのかを調べた。図-9はSt. 1における浚渫地内(水面下15, 18, 21 m)の水温の時系列を示したものである。浚渫地内の水温変動の大きな特徴は、図の矢印の個所で水温が階段状に急激に上昇していることである。この浚渫地内部の水温上昇はいずれも、湾奥部全体の水温の高温化(図-4矢印B)ではなく、むしろ底層水湧昇による水温低下時(図-4矢印D)に対応していることがわかった。図-10は、窪地内部の水温が上昇する時刻前後の水温の鉛直分布を示したものである。これを見ると浚渫地上部では水温が低下し、それに伴い浚渫地内の水温が上昇していることがわかる。つまり浚渫地界面付近を中心に鉛直混合が発生していることをこの結果は示している。この期間が前述の底層水の浸入時期に対応していることとあわせて考えると、浚渫地内の水温上昇は、底層低温水の浚渫地上への浸入に伴って、浚渫地界面付近で発生する密度不安定に起因すると考えられる。さらに、図-11はSt. 1における浚渫地内(水面下21 m)と表層(水面下1 m)の濁度の時系列を示したものである。浚渫地内の濁度には2つの大きな濁度のピークが見られるが、このうち図中に矢印で示した後者の高濃度化は先に示した底層水浸入の時期(5月5～