

東京湾湾奥の浚渫窪地における湧昇現象の現地観測

五明美智男*・佐々木 淳**・磯部 雅彦***

1. はじめに

東京湾湾奥に散在する浚渫窪地内の水塊は、成層期に高濃度かつ多量の硫化物を蓄積するため、平場や航路の底層水塊とともに青潮の原因として言及されることが多い。著者らが実施した 1994 年の現地観測においては、9 月の青潮発生時に、窪地内水塊の湧昇が確認されている(佐々木ら, 1996, 以下前報)。また、佐々木 (1997) のシミュレーション結果によれば、平場水塊の湧昇に対する時間的な遅れや三番瀬付近への集積が生じることにより、浚渫窪地から湧昇した水塊は三番瀬における漁業被害に深く関与していることが示唆されている。しかしながら、窪地を起源とする青潮発生域の水平スケールはかなり小さく、窪地水塊の湧昇は、湾奥全域に拡がるような大規模な青潮の直接の原因とはならないことも指摘されている。

一方、著者らは、青潮に対する浚渫窪地の水塊の影響について詳細に検討する目的で、前報に引き続いて 1995 年夏季に現地観測を実施した。観測期間中には、戦後最大となった台風 12 号が東京湾に接近し、小規模な青潮が発生した。図-1 に示すように、この台風後には浚渫窪地内で青潮の起源となる硫化物がほとんど消散していた。これら硫化物は台風による混合により湾奥で希釈・拡散

したものと考えられ、台風を契機に東京湾の水は成層期から循環期へと移行した。しかしながら、この時の浚渫窪地水塊の湧昇・混合のメカニズムは、1994 年の青潮発生時の湧昇とは明らかに異なるものと考えられるが、詳細については不明である。

そこで、本研究では、まず 1994 年と 1995 年における窪地水塊の湧昇・混合の過程を比較し、それらの相違点を明らかにする。さらに、密度成層した内湾の海底に存在する窪地水塊の風に対する応答として、1994 年、1995 年の観測結果について考察を加えるとともに、浚渫窪地水塊の湧昇と青潮との関連性について検討する。

2. 現地観測の概要

1994, 1995 年の 8~9 月の約 2 ヶ月間にわたり、図-2 に示す幕張前面の浚渫窪地(窪地水深 21~22 m: 周辺平場水深 7~8 m)およびその沖合いの平場において、係留系による現地観測を実施した。1994 年は st. 3 において 11 台の計器を使用し、また 1995 年には 3 地点で 42 台の計器を用い連続観測を行った。両年ともに、水温計にはアレック電子(株)製の MDS-T を、また塩分計、DO(溶存酸素濃度)計、PH 計にはそれぞれ三洋測器(株)製の MCI-I, MDO-I, MPH-I を使用した。さらに、1995 年には、st. 3 の海底に ADCP を設置し、浚渫窪地内および窪地直上の流速鉛直分布を測定するとともに、1 週間毎に各測点において底層硫化物濃度を測定した。

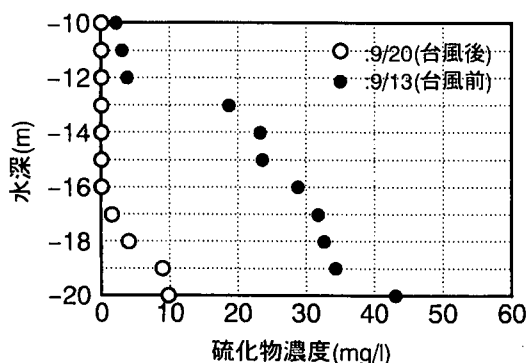


図-1 台風前後の浚渫窪地内硫化物の鉛直分布

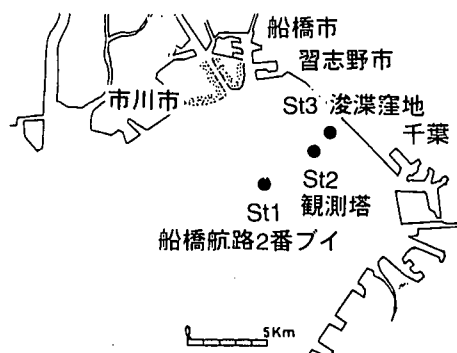


図-2 調査位置

* 正会員 水修 東亜建設工業(株)技術研究所
** 正会員 工博 東京大学助手 大学院研究科社会基盤工学専攻
*** 正会員 工博 東京大学教授 大学院研究科社会基盤工学専攻

表-1 現地観測期間中の青潮発生状況

発生期間	風	発生水域 (最大時)	規模	漁業被害等
1994 8/22 -8/25	北風系 連吹	千葉中央港～江戸川河口	中	小
1994 9/13 -9/19	北風系 連吹	千葉中央港, 市川航路東 側全域, 行徳漁場全域	大	大
1995 9/15 -9/21	台風	千葉中央港～浦安前面	小	なし

なお, 1994 年の同時期に平場の st.2 において環境庁 (1995) により同様の観測が行われており, これらのデータについても必要に応じ解析することとした。

3. 観測年の気象・海象, 青潮発生の概況

表-1 は, 小倉ら (1995), 小倉 (1996) を参考に, 観測期間中の青潮発生状況を整理したものである。以下, 観測年の概況を述べる。

1994 年の夏は, 記録的な猛暑に見まれ少雨であった。年間の青潮発生回数は, 平均的もしくはやや多めであったが, 発生延べ日数は 27 日となり 89～95 年では最多となった (小倉ら, 1994)。観測期間中には 2 度の青潮が発生しているが, 特に 9 月 13 日からのものは, 湾奥全体に拡がりかつ継続時間の長い大規模なもので, 大きな漁業被害をもたらした。

一方, 1995 年は, 7 月 20 日過ぎの梅雨明け後から 9 月 10 日頃まで非常に安定した天気が続いた。この間, 北よりの風が吹いたのはわずか 2 日であったことから, 観測期間中における青潮発生は, 9 月中旬に台風 12 号が房総半島沖を通過した時の 1 回だけとなった。この時の青潮は, 台風接近に伴って北よりの風となり気温が低下した後に, 千葉港前面と浦安前面の岸沿いに発生した。しかしながら, 台風前に確認されていた青潮発生範囲は, 台風通過に伴い拡大するようなことはなかった。また, 年間の青潮発生回数は, 安定した天気の影響により, 梅雨入り前の 6 月中旬と上述の台風時の 2 回のみであった (小倉, 1996)。

こうした概況をふまえ, 観測期間中の全データから, 表-1 に示した青潮発生期間のうちの 2 つの期間と典型的な南風系卓越時の安定期を選び, それぞれ以下に示すような約 2 週間分のデータを抽出し解析することにした。

- ① 1995 年 9 月 13 日-27 日 (台風 12 号通過)
- ② 1994 年 9 月 9 日-21 日 (北風系連吹)
- ③ 1995 年 8 月 23 日-9 月 6 日 (南風系連吹)

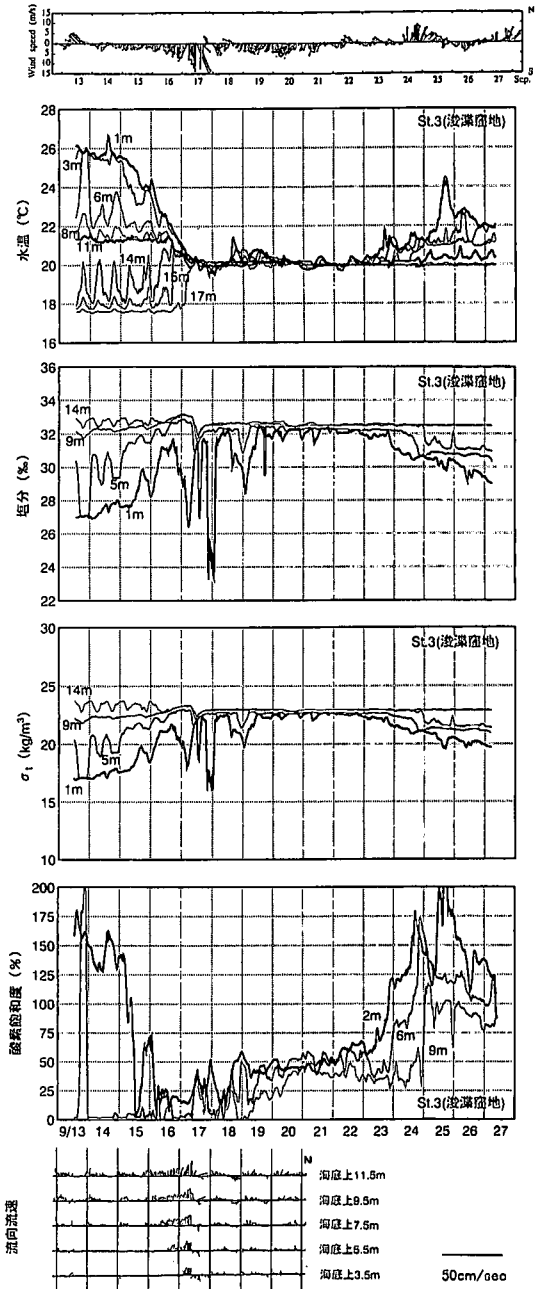


図-3 期間における風向風速, 水温, 塩分, σ_t , 酸素飽和度, 底層水平流速の経時変化

4. 1995 年 9 月 13 日-27 日 (期間 1) における湧昇

図-3 は, この期間における風向風速, 水温, 塩分, 現場密度 σ_t , 酸素飽和度および窪地内の水平流速を示したものである。

台風の接近に伴い, 14 日の午前 0 時頃から北寄りに風

向が変化し、台風が通過する16日午後から17日まで風速が徐々に強まっていった。こうした風速の増加および気温の低下に対応し、表層水温は26°Cから約20°Cまで急激に低下した。各水深における水温は、時間的な遅れはあるものの最終的にはほぼ同一となった。また、北風の連吹により沖合の高塩分水が流入したことにより、表層および中層の塩分が上昇し、17日には深度1mと14mの塩分差は0.5‰程度まで低減した。こうした水温と塩分の変化により、 σ_t は鉛直断面内ではほぼ均一となった。17日までの深度8m、17mの水温を見てみると、それぞれ1.5°C程度の低下、2.4°Cの上昇となっており、窪地直上水塊の混合のみならず窪地内でも顕著な混合が生じていたことがわかる。こうした窪地内の混合は、浚渫窪地内の底層において10 cm/s程度の北向き水平流速が観測されたことや、17日以降の深度9m、14mの塩分が17日以前の両深度の塩分の平均値にほぼ等しいことから明らかである。

台風による混合に伴い、各深度の酸素飽和度は0~20%となり貧酸素状態となった。しかしながら、図-1で示したように硫化物の希釈・消散が進んだこと、および完全に混合が進み酸素の供給が速やかに行われるようになったことにより、17日以降は各水深ともに徐々に酸素飽和度が増加していった。

以上より、この期間の浚渫窪地での現象は、沖合水塊の流入に伴う窪地全層にわたる混合および窪地内硫化物の希釈・消散による循環期への移行であったと考えられる。

5. 1994年9月9日-21日(期間2)における湧昇

図-4は、期間中の風向風速、水温、塩分、 σ_t 、酸素飽和度の変化を示したものである。期間前の6日から8日にかけて強い南西よりの風が吹いていたことから、この期間の最初の3日間には、風向きが変化した後の再成層化が見られた。その後、12日からの北風系の連吹により、深度12m以浅での水温の低下、深度14m付近での水温の上昇が見られたが、水温の一樣化は期間1ほど顕著ではなかった。14日正午で深度1m、深度10.7m間の水温差は約1°Cであった。一方、塩分変化についてみると、約33‰であった深度14m地点の塩分は、沖合水塊の流入により増加し、14日には32.5‰となった。図-5は、千葉県(1996)の海況情報より浚渫窪地沖合いの塩分変化を示したものであり、33‰以上の高塩分水が移動している状況がわかる。これより、期間2においては、期間1のように窪地内水塊の混合が進んだのではなく、沖合の水塊の流入により浚渫窪地内の水塊が押し出されるようにして湧昇し、深度8mから14mにかけて高塩分

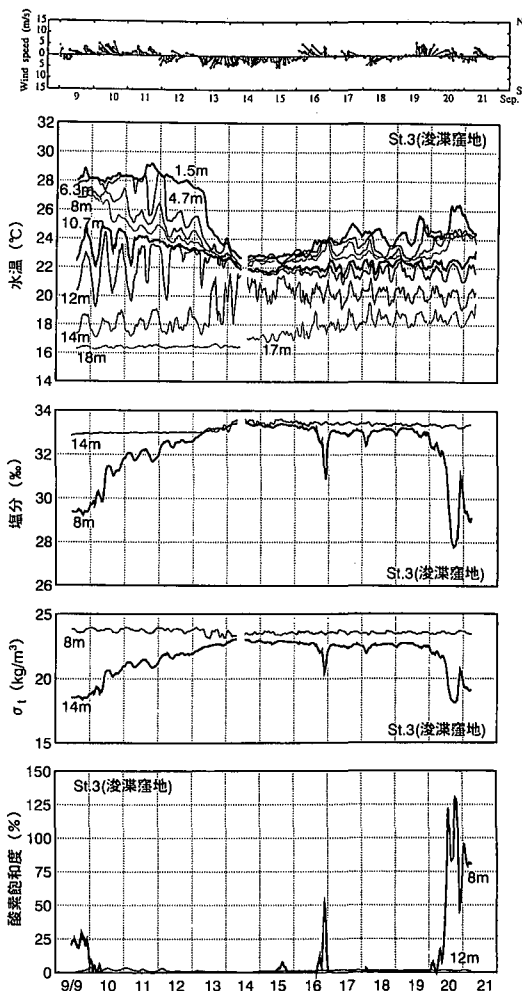


図-4 期間2における風向風速、水温、塩分、 σ_t 、酸素飽和度の経時変化

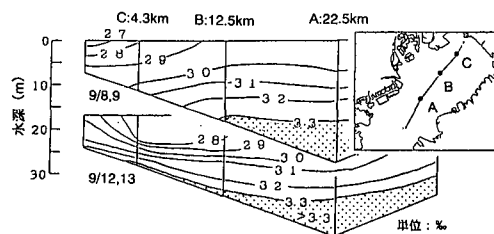


図-5 期間2前半における沖合いでの塩分変化(千葉県, 1996)

の水塊に置き換わったものと推測される。

なお、これらの過程においては、浚渫窪地内の上層に存在していた硫化物が窪地外へ流出しているものと考えられる。また、前報によれば、この時には湾奥平場からの湧昇も生じているため、酸素飽和度は改善されることなく貧酸素状態が長引く結果となっている。

以上より、この期間の現象は、沖合高塩分水の流入に

伴う窪地内水塊の湧昇とそれによる平場への硫化物の供給過程であったと考えられる。

6. 1995年8月23日-9月6日(期間3)に見られた水塊安定

この期間は、図-6に示すように、南風系が卓越しており、期間1、2とは異なった様相を呈する。水温変化について見てみると、深度11m以浅の水温に潮汐等による振動が見られるものの、北風系のような顕著な変動は見られなかった。表層と深度11m間の水温差、密度差は緩やかに減少している。

こうした期間では、浚渫窪地からの湧昇はなく、窪内

水塊は非常に安定した状態で維持され、夏季の東京湾の代表的な現象となっている。

7. 浚渫跡地内水塊の安定性

浚渫窪地内の水塊の挙動は、風の吹きはじめにおける密度構造(窪地上端での窪地内外密度差、窪地直上の成層状態、水平方向の密度差)および風向風速に大きく依存するものと考えられる。以下、これらの物理量に着目し、窪地水塊の安定性について考察する。

(1) 鉛直方向の安定度

表-2は、図-3、4、6の σ_t より、各期間における窪地内深度14m地点と上端8mまたは9mの間の密度勾配を計算し示したものである。1995年の台風時には窪地上端での密度勾配が小さくなっており、界面あるいは窪地上端での擾乱は、他の期間に比べて窪地内に伝達されやすいものと考えられる。また、1994年9月には密度勾配が大ききこともあり、沖合水塊が窪地に流入する際、窪地内水塊との混合が比較的生じにくくなっていたものと思われる。

表-2 窪地上端付近の鉛直密度勾配

	$\Delta\rho/\Delta z$ (深度14m-深度8または9m)	
	初期状態	風運吹後最小値
1995 9/13~	0.30	0.0
1994 9/ 9~	0.88	0.05
1995 8/23~	0.43	—

(単位: $\text{kg}/\text{cm}^3/\text{m}$)

(2) 沖合水塊の密度特性

表-3は、千葉県(1995)、千葉県(1996)による海況情報を用い、各期間の開始日に近い月日において、沖合平場の底層密度を推定したものである。

期間1の場合、浚渫窪地の深度9mより重い水塊が確認されたのは沖側22.5km地点のみであった。一方、期間2では、沖側12.5km、4.3km地点の水塊の σ_t は浚渫窪地内深度14m地点よりも小さく、また窪地上端付近8m地点よりも大きいことがわかった。これらのことから、1994年の期間2においては、北風運吹時に沖側底層水が移動してきた場合、浚渫跡地内への流入が生じやすい密度構造だったことが明らかである。

表-3 沖合平場における σ_t

	22.5 km 地点	12.5 km 地点	4.3 km 地点
1995 9/8	>24	22	20
1994 9/8	>23	22	19
1995 8/31	>24	24	22

(単位: kg/cm^3)

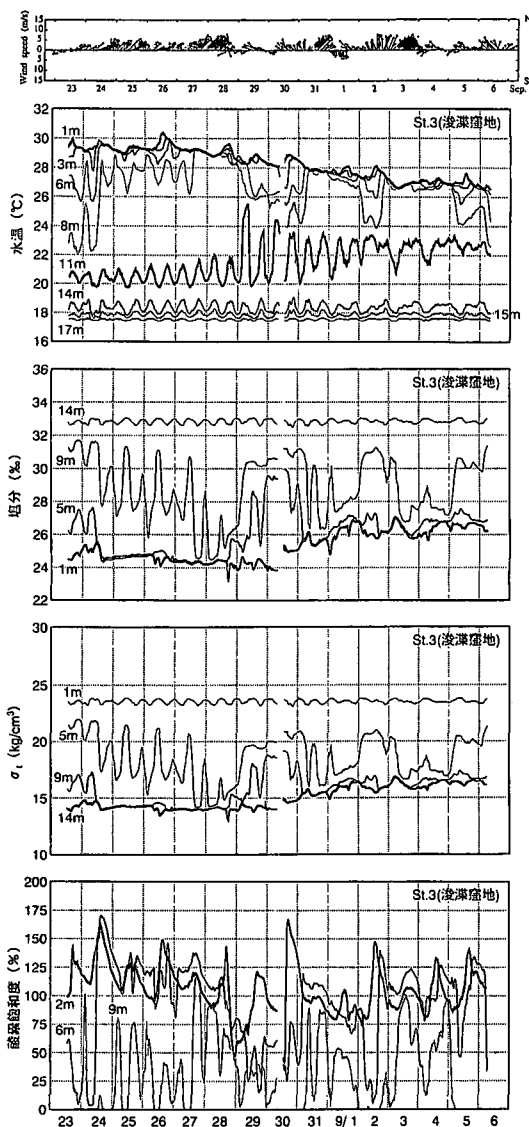


図-6 期間3における風向風速、水温、塩分、 σ_t 、酸素飽和度の経時変化

(3) 風に対する安定性

中辻ら (1991) は、青潮現象と 2 層成層した湖沼の混合現象との類似性から、Spigel・Imberger が提案した流動形態区分 (Fisher et. al., 1979) の適用可能性を指摘し、2 成層状態の水面に風を作用させた吹送流実験を実施した。また、藤原ら (1989) はこうした分類を瀬戸内海の各灘の風による成層崩壊現象に適用した。

そこで、各期間の初期状態について、流動形態区分の指標となるリチャードソン数 Ri およびアスペクト比 A 、およびこの 2 つの指標の比である Wedderburn 数をそれぞれ次式により求めた。

$$Ri = \Delta \rho g h_1 / \rho u_*^2$$

$$u_* = (C_D \rho_a U_{10}^2 / \rho)^{1/2}$$

$$A = L / 2h$$

$$W_e = Ri / A$$

ここに、 $\Delta \rho$ は上層と下層の密度差、 g は重力加速度、 h_1 は上層水深、 ρ は上層水密度、 ρ_a は空気密度、 U_{10} は海上 10 m の風速、 C_D は抵抗係数 (通常 1.3×10^{-3})、 L は海域の長さ、 h は水深である。

表-4 代表的な時刻における Wedderburn 数

	1995 9/14 0:00	1995 9/16 0:00	1994 9/12 0:00
$\rho(\text{kg/m}^3)$	1020	1022	1020
$U_{10}(\text{m/s})$	4	8	4
$\Delta \rho(\text{kg/m}^3)$	5	3	3
$h_1(\text{m})$	9	9	8
Ri	16670	2650	9420
W_e	6.4	0.9	3.0

表-4 は、 $L=50 \text{ km}$ とし、期間 1、2 の北風の吹きはじめおよび台風時の強風の吹きはじめの時刻における各指標値を示したものである。伊ら (1993) による実験結果から青潮の発生条件は $W_e \leq 12$ と推定されているが、各期間ともにこの条件を満足していることがわかる。また、期間 1、2 の吹きはじめにおいては、類似した形態で不安定化が進んだものと考えられる。しかしながら、1995 年の台風時における強風の吹きはじめの際には $W_e = 0.9$ となっており、内部波の発生・碎波による密度界面の変動、巻き上がりによる湧昇がより顕著になったものと推測される。

8. 青潮との関連性

1994 年、1995 年の 9 月の青潮発生初期はほぼ類似した湧昇過程となったものの、1995 年の場合には、成層が弱まってからの台風による強風に伴い鉛直混合が顕著になった。そのため、4. および 5. で記述したように異なった現象が見られたものと考えられる。すなわち、1994 年の場合には沖合高密度水との入れ替わりによる硫化物の供給現象であり、1995 年の場合には強風下での鉛直混合による硫化物の希釈・消散現象となっている。これらの結果、両年ともに浚渫窪地内の水塊が湧昇したにも関わらず、青潮の被災規模・継続時間の拡大に関与したのは 1994 年だけとなった。

9. おわりに

浚渫窪地内を中心とした連続観測結果から、窪地内水塊の湧昇・混合過程について検討した。窪地内水塊の挙動は、成層および風の状態、沖合底層水の密度特性などにより、異なった挙動を示すことが明らかとなった。また、今回示した 2 つの観測事例から、窪地内水塊の湧昇過程の相違によって、湾奥の青潮発生に関与する場合とそうでない場合があることがわかった。

参 考 文 献

- 小倉久子・飯村 晃・坂根清子 (1995): 東京湾の青潮発生状況 (1994 年), 千葉県水質保全研究所年報 (平成 6 年度), pp. 63-67.
- 小倉久子 (1996): 東京湾の青潮発生状況 (1995 年), 千葉県水質保全研究所年報 (平成 7 年度), pp. 85-88.
- 環境庁水質保全局 (1995): 青潮発生予測手法の確立調査, 平成 6 年度環境庁委託業務結果報告書.
- 佐々木淳・磯部雅彦・渡辺 晃・五明美智男 (1996): 東京湾における青潮発生規模に関する考察, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 1111-1115.
- 佐々木淳 (1997): 東京湾湾奥水塊の湧昇現象と青潮への影響, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 1101-1105.
- 尹 鍾星・中辻啓二・村岡浩爾 (1993): 開放性底層水域における吹送密度流に関する研究, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 241-245.
- 千葉県水産試験場 (1995): 東京湾海況情報集, 平成 6 年度版.
- 千葉県水産試験場 (1996): 東京湾海況情報集, 平成 7 年度版.
- 中辻啓二・長坂誠司・村岡浩爾 (1991): 東京湾の青潮の発生機構に関する基礎実験, 水工学論文集, 第 35 巻, pp. 603-608.
- 藤原建紀・高杉由夫・肥後竹彦 (1989): 風による成層崩壊現象の発生頻度と発生限界風速, 沿岸海洋研究ノート, 第 27 巻, 第 1 号, pp. 70-75.
- Fisher et. al. (1979): Mixing in Inland and Coastal Waters, Academic Press, New York, 483 p.