

東京湾における底層水塊の流動と千葉浚渫窪地に与える影響

Flows of the Bottom Layer in Tokyo Bay and Its Influence on the Bottom Water in Dredged Trench

田中陽二¹・有路隆一²・諸星一信³・鈴木信昭⁴・松坂省一⁵・鈴木高二朗⁶

Yoji TANAKA, Ryuichi ARIJI, Kazunobu MOROHOSHI, Nobuaki SUZUKI,
Shoichi MATSUZAKA and Kojiro SUZUKI

At the head of Tokyo bay, blue tides often occur from summer to autumn by the bottom layer upwelling. It is a factor of blue tides that the anoxic water in the bottom of dredged trench produces sulfide in high concentration. The purpose of this paper is to investigate behavior of the bottom water in Tokyo bay and its influence on the bottom water of the dredged trench. We surveyed water qualities from Aug.(2007)to Dec. across Tokyo bay. As a result, intrusion of oceanic water to the head of the bay develops density stratification, and produces the situation in which a blue tide occurs easily. The bottom water of dredged trench stays when density of the water is higher than the intrusive water. Additionally, the low salinity layer is newly observed near a density interface in the dredged trench.

1. はじめに

東京湾の湾奥部では植物プランクトンの大量増殖や、有機物に富んだ底泥による酸素消費によって、春から秋にかけて底層水塊の貧酸素化が発生する。さらに、北風の連吹によって底層の貧酸素水塊が湧昇して青潮が発生し、近隣の生態系に多大な悪影響を及ぼしている(佐々木, 1997)。一方、千葉幕張沖には水深30m程度の浚渫窪地(以下、窪地)が存在している。窪地の底層部は貧酸素化しているとともに硫化物が高濃度に溶存しており、青潮の発生要因の一つであることが佐々木ら(1996)、佐々木ら(2007)によって指摘されている。窪地の現地観測も八木ら(1997)、五明ら(1998)によって行われ、実態の解明が進みつつある。しかしながら、窪地内の貧酸素水塊の解消過程や、周辺の底層水塊との交換過程については十分に調査されておらず、その解明が望まれていた。

そこで本研究では、窪地内に形成されている貧酸素水塊の解消過程の解明を行うとともに、東京湾における底層水塊の挙動と窪地内に及ぼす影響について調査することを目的とした。

2. 観測の概要

東京湾の広域的な水質を把握するため、2007年8月～12月にかけて図-1に示す計30地点について現地観測を実施した。計測は多項目水質計(アレック電子社製

AAQ1183)を使用して、水温・塩分・溶存酸素(以下、DO)などの鉛直プロファイルを取得した。幕張沖の浚渫窪地であるN8の地点では、採水による水質分析(リン・窒素)も実施した。採水水深は、表層(0.5m)、中層(10m)、底層(底面上1m)である。なお、今回の観測では横浜港湾空港技術調査事務所の環境調査船を用いており、1週間に1回程度の頻度で観測を行うことが可能となった。

観測期間中には千葉港から幕張にかけて、少なくとも9/2～3、10/1、10/17の計3回青潮が発生した。9/2～3は千葉港・三番瀬で発生し、10/1は船橋港およびその地先、10/17は船橋・三番瀬で発生した(千葉県水産総合研究センター, 2007)。その他に、9/6～9/7には台風9号が東京湾に来襲した。

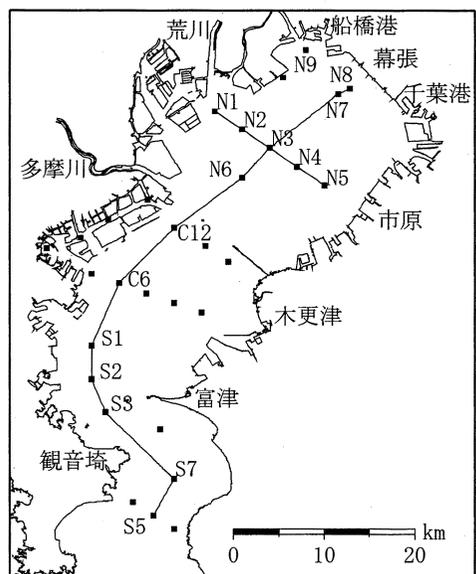


図-1 観測地点と縦断面・横断面観測ライン

- | | | | |
|-------|-------|---------------|----------------|
| 1 正会員 | 博(環境) | (独法)港湾空港技術研究所 | 海洋・水工部 |
| 2 正会員 | | (独法)港湾空港技術研究所 | 海洋・水工部 |
| 3 正会員 | 工修 | 関東地方整備局 | 横浜港湾空港技術調査事務所長 |
| 4 | 修(工) | 関東地方整備局 | 横浜港湾空港技術調査事務所 |
| 5 | | 関東地方整備局 | 鹿島港湾・空港整備事務所 |
| 6 正会員 | 工修 | (独法)港湾空港技術研究所 | 海洋・水工部 |

3. 観測結果と考察

(1) 東京湾の底層水塊の挙動と青潮の発生

8/14~16(以下8/15), 8/27~30(以下8/29)の塩分・DOの縦断面分布をそれぞれ図-2, 3に示す(窪地周辺は水平方向のスケールを大きくして表示している). 8/15は湾奥から湾口に向うにつれて塩分濃度が上昇しており, 塩分濃度は全体的に低い状態であった. それに対し, 8/29は水深およそ10m以深で塩分が33PSUとなっており, 外洋系の高塩分水塊が流入していた.

溶存酸素は8/15に湾中央部の底層にDOが2mg/L以下の貧酸素水塊(以下, 本論文ではDOが2mg/L以下を貧酸素水塊と定義する)が形成されていた. 対して, 8/29は湾中央部の中層, および湾奥の底層部に貧酸素水塊が形成されていた. 貧酸素水塊が底層ではなく中層に形成された理由として, 藤原ら(2000)は外洋系の高塩分水塊が底層に進入してくることでそれまで湾中央部の底層に形成されていた貧酸素水塊が持ち上げられ, 高塩分水塊と密度躍層の間に押し上げられる現象を指摘している. 8/29も外洋水の侵入によって, 湾中央部の中層に貧酸素水塊が押し上げられ, その一部は湾口側へ流出した状況となっている.

一方, 青潮発生前後である8/30, 9/3の湾奥横断面にお

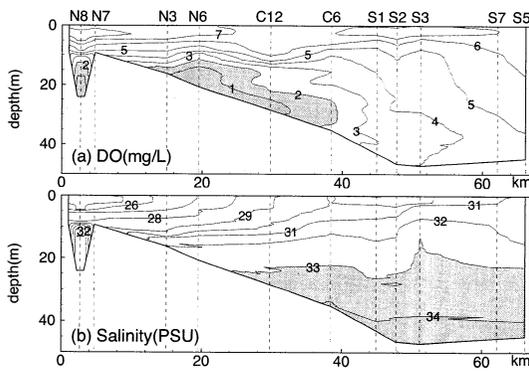


図-2 DO・塩分の縦断面分布 (8/14~8/16)

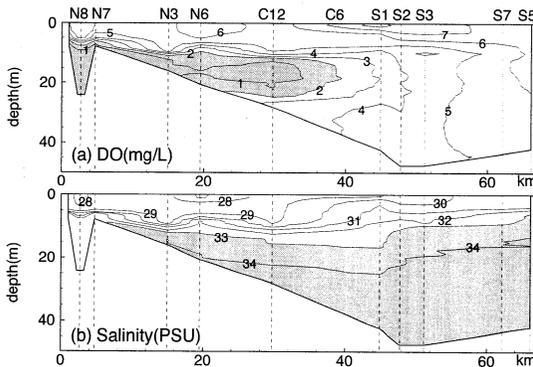


図-3 DO・塩分の縦断面分布 (8/27~8/30)

けるDOプロファイルを図-4に示す. 8/30は青潮発生前であるが既に貧酸素水塊は千葉側(N5)で湧昇していた. これは北東風が8/29頃から連吹し始めたことによって(図-5(a)参照), 表層水をエクマン輸送により東京港側へ輸送させ, 底層水が千葉側で湧昇し始めたものと考えられる. しかし, 青潮発生時の9/3では, 北風が連吹しているにもかかわらず千葉側の貧酸素水塊は下がり, 三番瀬(N9)を中心として東京港側(N1)へ貧酸素水塊がセットアップしていた. これは松山ら(1990)や中辻ら(1995)が指摘するように内部ケルビン波による貧酸素水塊の伝播と考えられる.

このような密度界面の湧昇には密度成層が発達している必要があり, 中辻ら(1995)は降雨や強い南風の連吹がその役割を果たしていると指摘している. しかし, 羽田での8/29~9/2の積算降雨は2mmであったため, 今回の場合では降雨の影響は弱いと考えられる. 9/2~3に発生した青潮の場合は, 外洋水の侵入による底層水塊の押し上げが密度成層の発達をさらに促している. また, 10/1の青潮発生時にも塩分33PSUの外洋系水塊が湾奥部(N3)まで侵入している様子が観測された. すなわち, 青潮の発生には気象条件の他に, 外洋水の侵入という外的要因が作用するケースがあることを示している.

以上より, 9/2~3に発生した青潮は次のようなシナリオであったと考えられる. 1) 湾中央部の底層に形成されていた貧酸素水塊は少なくとも8/27までに侵入してきた外洋水によって北上し, 一部は湾中央部中層に押し上げられて湾口側へ流出した. さらに外洋水の侵入は湾中央部, 湾奥部において水深10m付近に強い密度界面を形成させた. 2) 8/29からの北風の連吹は表層水を東京側へ輸送させ, 下層では底層水塊が千葉側で湧昇し始め, 青潮に至った. 3) 湧昇していた密度界面は内部ケルビン波によって東京港側へと反時計回りに伝播した.

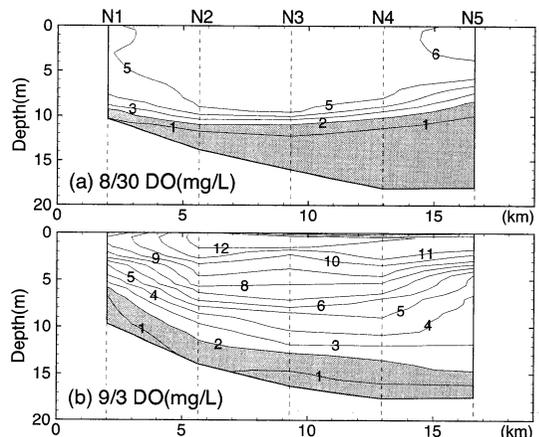


図-4 DOの湾奥横断面分布 (8/30, 9/3)

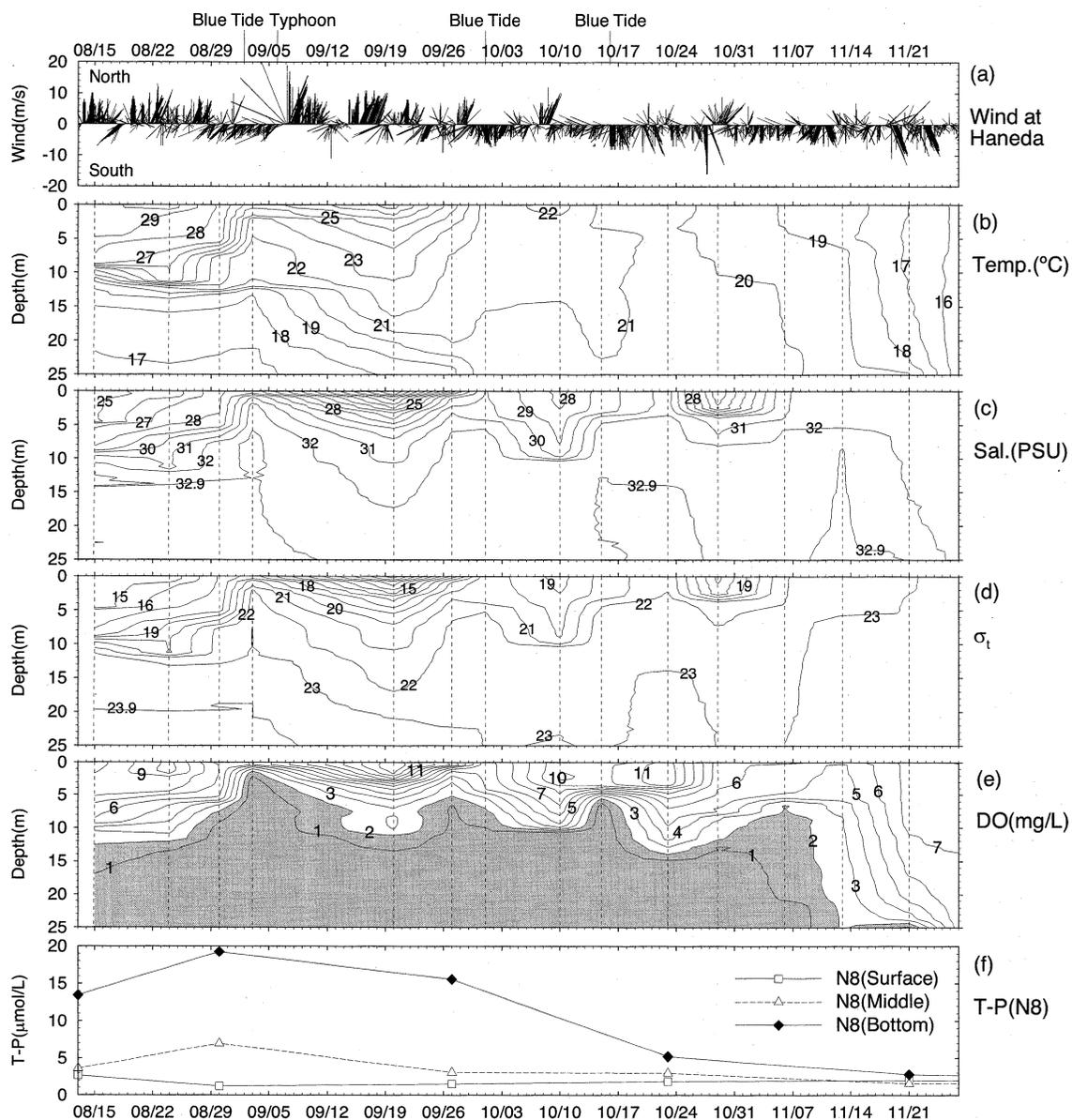


図-5 窪地における水質の時空間変動(点線は観測日を表す)

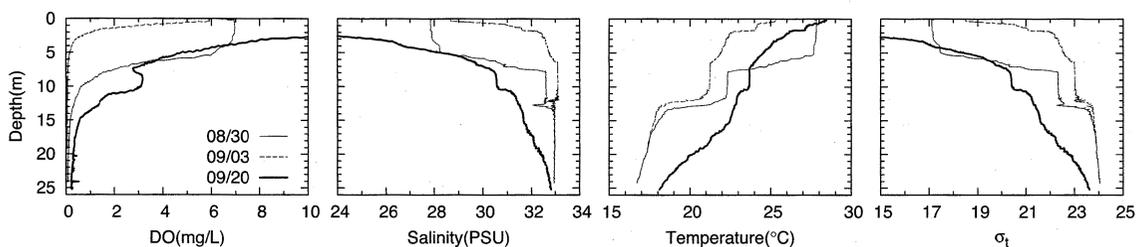


図-6 窪地における水質鉛直プロファイルの変動(8/30~9/20)

(2) 窪地内の水質構造と海水交換

窪地における水質の時空間変動を図-5に示す。窪地の底層部分には観測を開始した8/15から11/21まで貧酸素水塊が形成されていた。11月末での貧酸素水塊の解消は、気温低下による季節的な鉛直混合が発生したためである。

8/30~9/20の水質の鉛直プロファイルを図-6に示す。青潮が発生した9/3は8/30と比較して水深およそ16m以浅では高塩分・低温化しており、DOも表層1m付近まで貧酸素化していた。これは、表層付近まで貧酸素水塊が湧昇し青潮に至ったことを表している。しかしながら、水深16m以深では塩分・水温の変化はなかった。よって、青潮発生時でも窪地の底層水塊は停滞したままであり、9/3の青潮に寄与しなかったことを示している。

その後の9/20では窪地の底層まで塩分が低くなり、水温は高くなった。これは台風9号が9/6に東京湾へ来襲し、窪地内も鉛直混合されたことによる。このときの鉛直混合を1次元のボックスモデルで考える。浚渫窪地の水柱を鉛直方向にボックスで区切る(図-7)。そのときのボックス内の濃度変化を次式で表す。

$$\frac{\Delta V}{\Delta t}(C_k^{n+1} - C_k^n) + Q_{k+1/2}(C_{k+1}^{n+1} - C_k^{n+1}) + Q_{k-1/2}(C_{k-1}^{n+1} - C_k^{n+1}) = 0 \quad (1)$$

ここで、 ΔV はボックス体積、 Δt は時間間隔、 C はボックス内の濃度、 Q はボックス間の流量であり、上の添え字は時間、下の添え字は位置を表す。

9/3と9/20の塩分変化から、式(1)を用いてボックス間の流量 Q を求めた。その Q をもとに、9/20のDOを式(1)から計算した(図-8)。ただし、9/3で深さが足りない部分

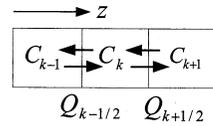


図-7 ボックスモデルの概念図

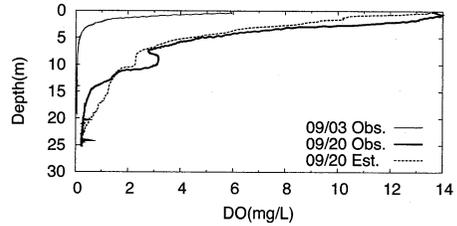


図-8 推定された9/20のDOプロファイル

は最深部の値を用いており、9/20の表層DOは既知とした。9/20の推定値は実測値とほぼ一致しており、9/3から9/20のDO変化は鉛直混合が支配的であったといえる。9/20での水深15mのDO推定値は1.25mg/Lであることから、台風9号の攪乱は窪地底層の貧酸素水塊を解消するほど大きい鉛直混合ではなかった。

9/20~10/1の水質鉛直プロファイルを図-9に示す。9/20から9/27にかけては窪地底層で水温が上昇し、水質が変化したことから、窪地全体の水塊が新しく流入してきた水塊と交換されている。その後、青潮が発生した10/1でも、塩分・水温が変わっており、窪地の全水塊が交換されたことが分かる。10/1の窪地底層水塊と他の観測点と比較したところ、9/27のN2, N3の底層と塩分・水温が一致していた。よって、外洋系水塊に押し上げられて北上した荒川河口沖の底層水塊が窪地に流入したことが分かる。9/27のN2, N3の底層は貧酸素水塊であっ

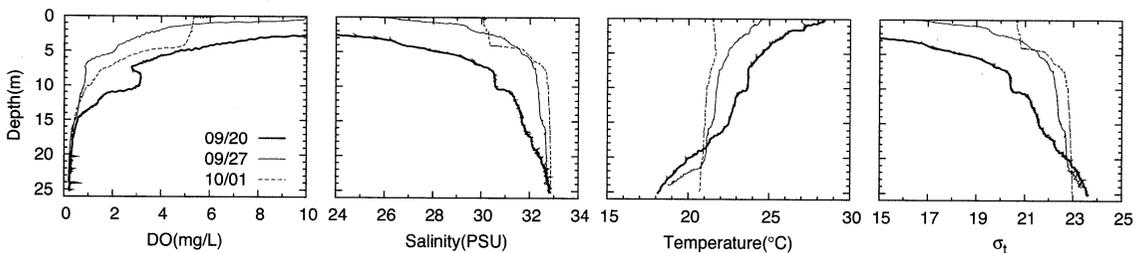


図-9 窪地における水質鉛直プロファイルの変動 (9/20~10/1)

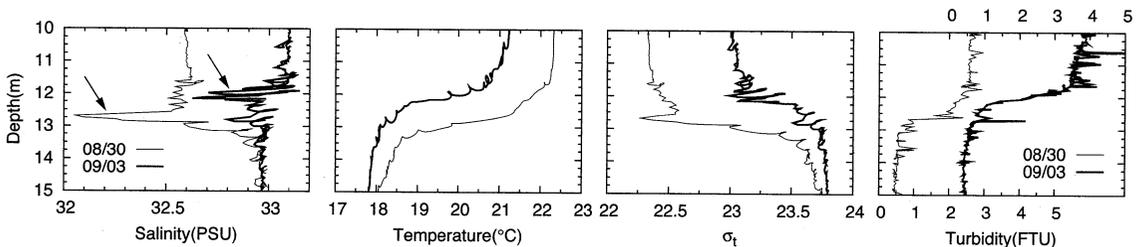


図-10 窪地で8/30と9/3に観測された塩分の極小層 (8/30の濁度は下軸, 9/3は上軸)

たから、窪地底層も貧酸素状態は継続された。また、窪地底層の全リン濃度も10/23に大幅に低下した(図-5)。それまで、窪地底層に停滞していた高濃度の栄養塩が押し出されて窪地外に流出したものと推察される。

9/27と10/1の現象は9/3の青潮と同様に高塩分の水塊が湾内に侵入し、さらに北風が卓越したことから、比較的高塩分の水塊が窪地に流入したものと考えられる。9/3の状況と異なることは窪地底層部の水塊が新たに流入してきた水塊に押し出されていることである。窪地の底層水塊が押し出された理由は流入してくる水塊よりも密度が軽かったためであり、密度が軽くなった理由は台風による鉛直混合が発生したためである。台風の来襲によって、結果的に窪地の底層水塊が流出しやすくなっている。佐々木ら(1996)は窪地水塊が押し出されて湧昇することで、青潮の規模が拡大することを指摘している。したがって、台風による攪乱がその後発生する青潮の規模を大きくしていることも可能性として考えられる。

2007年に発生した青潮と窪地の底層水塊の関係をまとめると以下ようになる。1) 8月中旬以前に窪地に低水温・高塩分水塊(水塊Aと呼ぶ)が流入した。2) 9/2~3に青潮となったが、水塊Aの密度が重いので停滞し、水塊Aは青潮に寄与しなかった。3) 台風9号が来襲して窪地の底層も鉛直混合が発生し、密度が低下した水塊となった(水塊B)。ただし、窪地底層の混合度合は小さく、貧酸素状態は維持された。4) 水塊Bの密度は軽いので、高い密度の水塊が窪地まで到達したときに水塊は交換された。しかし、流入してきた水塊も荒川河口沖底層の貧酸素水塊であるから貧酸素状態は継続された。5) 11月末に季節的な鉛直循環の発生によって貧酸素状態は解消された。

(3) 浚渫窪地内の塩分極小層

今回の観測で得られた一つの興味深い事項として、窪地内で塩分が一時的に低くなる層が観測された。図-10は8/30と9/3の観測結果である(水深10~15m部分)。8/30は水深12.7m付近、9/3は水深12m付近に上下の塩分より0.5PSU程度低い層が観測された(図-10の矢印)。層厚はともに0.5m程度であった。これを仮に塩分極小層と名付ける。水温と塩分より現場密度 σ_t を計算すると、塩分極小層は上下層より σ_t が逆転している。濁度に関しては値が振動しているため判断が難しいもの目立って高い濁度とその層で観測されることはなかった。また、船上から観測を行っているために船の動揺によって計測機が上下しているが、塩分極小層の周辺水深に塩分の低い水塊はなく、船の動揺による影響とは考えられない。

この塩分極小層の形成要因は定かではないが、一つの仮説として、底質から高濃度に鉄・マンガンを栄養塩が溶解することで密度の重い水塊となったことが考えられ

る。貯水池では、このような現象は水温逆転層として観測されている(道奥ら, 1997)。ただし、塩分極小層の密度差は250mg/L相当であり、非常に高濃度の溶存物質が必要となってしまう。濁度はあまり検出されていないが、SSによる密度増加の影響も考えられる。今後、採水を行って塩分極小層の水質を調べる予定である。

4. おわりに

本研究では東京湾の水質調査を2007年8月から12月まで実施し、東京湾の底層水塊の挙動と青潮の発生、およびそれらが浚渫窪地に与える影響などを調べた。本研究で得られた知見は以下の通りである。(1) 外洋水の湾内侵入は湾奥部の密度成層を発達させるために、青潮が発生しやすい状況を作り出す。9/2~3に発生した青潮は外洋水の侵入とその後の北風の連吹によるものと推測された。(2) 窪地の底層水塊が高密度(低水温・高塩分)の場合は青潮発生時でも停滞したままとなり、青潮に寄与しない。(3) 台風が発生しても窪地全層が混合しない場合は、その後に発生する青潮時に底層水塊が交換されやすくなる。(4) 台風後に窪地底層へ流入してきた水塊は荒川河口沖の底層水塊であった。(5) 窪地の密度界面付近で塩分が極小となる層が観測された。

謝辞：港湾空港技術研究所の井上主任研究官に水質分析についてご協力を頂き、有益な助言も頂いた。

参考文献

- 五明美智男・佐々木淳・磯部雅彦(1998)：東京湾湾奥の浚渫窪地における湧昇現象の現地観測，海岸工学論文集，第45巻，pp.981-985。
 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の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。
 佐々木淳・川本慎哉・吉本侑矢・石井光廣・柿野純(2007)：東京湾の青潮に及ぼす平場と窪地水塊の影響評価，海岸工学論文集，第54巻，pp.1041-1045。
 千葉県水産総合研究センター(2007)：貧酸素水塊速報。
 中辻啓二・尹鐘星・湯浅泰三・村岡浩爾(1995)：東京湾における吹送密度流と青潮発生機構との関連性，海岸工学論文集，第42巻，pp.1066-1070。
 藤原建紀・高橋鉄哉・山田佳昭・兼子昭夫(2000)：東京湾の貧酸素水塊に外洋の海況変動が及ぼす影響，海の研究，Vol.9，pp.303-313。
 松山優治・当麻一良・大脇厚(1990)：東京湾の湧昇に関する数値実験，沿岸海洋研究ノート，第28巻，pp.63-74。
 道奥康治・神田徹・伊藤達平・西川孝晴・石川勝久・東野誠(1997)：底部に逆転水温層を有する部分循環貯水池の水質構成に関する研究，土木学会論文集，No.572/II-40，pp.33-48。
 八木宏・内山雄介・鯉淵幸生・日向博文・宮崎早苗・灘岡和夫(1997)：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，海岸工学論文集，第44巻，pp.1076-1080。