

東京湾柴沖と船橋沖における水温、塩分、D Oの短期変化の関係

1993年8月18日～9月1日の観測から

岩田 静夫・清水 顕太郎・柿野 純
田 辺 伸・仲 村 文夫・古 畑 和哉

Relation Between Temporal Variations of Temperature, Salinity and D O at Funabashi and Siba in Tokyo Bay

-Oceanographic Observation during the period 13 August to 1 September 1993-

Shizuo IWATA*, Kentaro SHIMIZU*, Jun KAKINO**,
Shin TANABE**, Fumio NAKAMURA** and Kazuya FURUHATA**

A B S T R A C T

In order to study the behavior of the oxygen-deficient water in Tokyo Bay, long-term continuous measurements of temperature, salinity and dissolved oxygen were carried out at Shiba of Yokohama-shi and Funabashi during the period from 18 August to 1 September 1993. The oxygen-deficient water observed at the surface layer of Funabashi is connected with the upwelling of the bottom water mass from the lower layer by the northeast wind blowing with more than the one day duration. The oxygen-deficient water mass (coastal upwelling region) at Funabashi cyclonically moves along the coast with nearly the same speed as the phase velocity of internal Kelvin wave after the north-east wind turning off.

はじめに

東京湾では、成層期の夏季に下層で硫酸化物を含んだ貧酸素水塊が形成される。この貧酸素水塊は表面付近まで湧昇すると、青白く光ることから「青潮」と呼ばれる。北よりの風により低温・高塩分・貧酸素の水塊が湾奥の千葉県側の表面に湧昇し、しばしば魚介類の斃死を引き起こすことから、漁業者に恐れられている現象である(蓮沼¹⁾、松村ほか²⁾、柿野ほか³⁾、風呂田ほか⁴⁾)。

宇野木⁵⁾は、湾内における係留系による流れ、水温、塩分の上・下層の連続観測から、北よりの風のときに上層では湾口に向かう流れ、下層では湾奥に向かう流れが観測されたこと、さらに湾東部の千葉県側では低温・高塩分水塊がみられたことなどから、千葉県側に湧昇が起こったことを明らかにした。さらに、宇野木⁵⁾は、この現象は地球自転の影響を受けていることを指摘した。

松山ほか⁶⁾は、「青潮」を風による沿岸湧昇とみなし

て、その発生・維持機構・消滅にいたる過程を数値実験的手法により明らかにした。彼らによると、北東風が吹くと、千葉県側の木更津～船橋付近にかけて湧昇、神奈川県側の川崎～横浜付近にかけて沈降が起こり、北東風が止んだ後は、湧昇域は弱まりながら30 cm/secの速度で岸に沿うように反時計回りに移動し、この速度は内部ケルビン波の移動速度と一致することを明らかにした。

岩田ほか⁷⁾は、1988年10月6日～31日に、川崎沖約2 kmの海面下20mで水温・塩分・溶存酸素計(SBE-16)による連続観測から、水温、塩分、溶存酸素量の記録に数日周期の顕著な変化がみられることを示した。この間に1.5 ml/L以下の貧酸素水塊が2回観測され、いずれも低温、高塩分であったこと、この現象が起こる1～2日前から、約2日間にわたり5 m/sec以上の北よりの風が連吹し、貧酸素水塊が現れたときには止んでいたことから、観測された低温、高塩分、貧酸素水塊は、北よりの風による底層水の湧昇が引き金になっていると考えられた。

神奈川県側で起こる貧酸素水塊は、(1)海岸に平行な南風によって底層水が湧昇した、(2)北風が吹くと、湾奥の船橋付近で底層水が湧昇し、風が止むと内部ケルビン波となって浅い方を右にみて神奈川県側に向かって伝播する、の二つが考えられる。これらのことを確かめるために、成層期に柴沖と船橋沖で水温、塩分、溶存酸素量の連続観測を行った。

観 測

観測点を Fig. 1 に示す。柴沖の St. TK (横浜市環

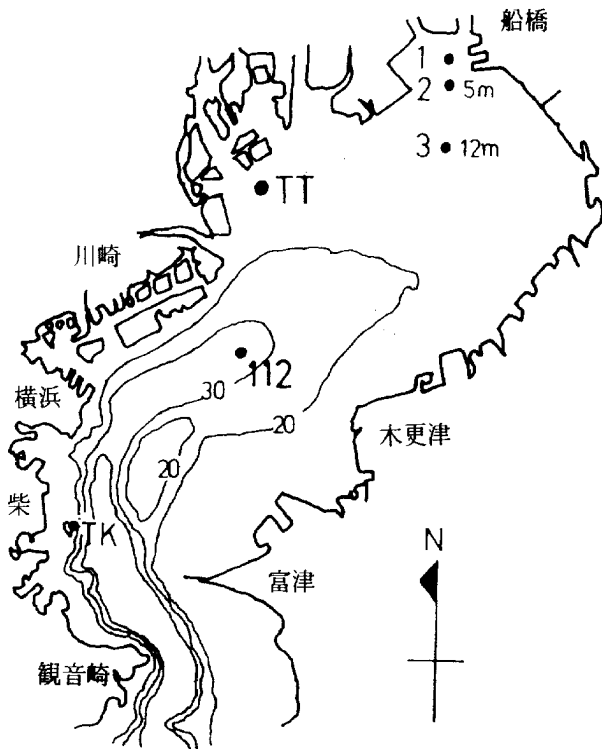


Fig. 1 Observation Stations

境保全局が設置した観測塔)の海面下10mに水温・塩分・溶存酸素計(SBE-16)を、船橋沖の St. 1の海面下1m, St. 2の海面下5m, St. 3の海面下12mに三洋測器社の水温・塩分・溶存酸素計を設置し、連続観測を行った。両観測点で同時に記録が得られたのは、1993年8月18日～9月1日の15日間である。

風向・風速は東京都港湾局が St. TT で測定した連続記録を用いた。7月、8月、9月における東京湾内の海洋構造について、St. 112 で CTD により測定された水温、塩分、溶存酸素量(以下DOとする)のデータを用いた。

結 果

1. 海洋構造

1993年7月8日、8月17日、9月2日に柴沖の St. 112 で得られた水温・塩分から求められた t と DO (溶存酸素量) の鉛直変化を Fig. 2 に示す。

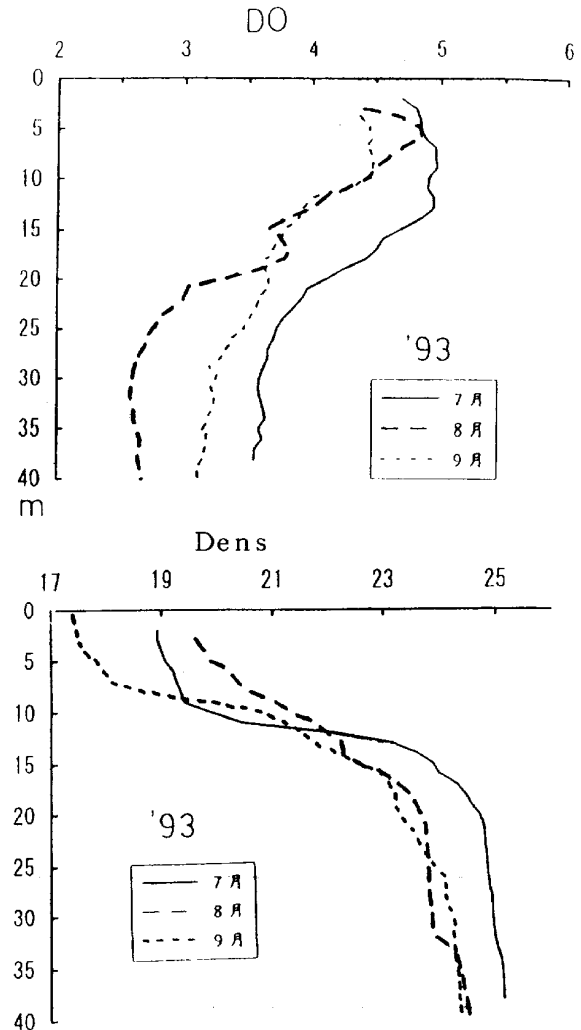


Fig. 2 Vertical distribution of dissolved oxygen and t at Stn. 112

の鉛直変化をみると、いずれの月も15m深付近を中心に密度躍層がみられる。密度躍層は、7月が10～15m深付近、8月が20m以浅に形成されているが、7月に比べてやや弱い。9月になると、7、8月に比べて密度成層は強く、深度はやや深い。

7月のDOは、8、9月に比べて高く、下層の30m以深になっても3.5ml/L以上である。躍層は、よりもやや深い15～20m深付近にみられる。8月は、15～20m深付近にDOの逆転がみられるものの、5～20m深付近に躍層が形成されている。25m以深のDOは7月よりも低く、約2.6ml/Lである。9月になると、密度成層

は最も顕著であるにも関わらず、DOは8月に比べて5 m以浅で低下し、25m以深で高く、DO躍層は最も弱い。

2. 水温、塩分、DOの時系列変化

図には示さなかったが、St.1、2、3とSt.Tで得られた水温、塩分、DOなどの生の時系列変化をみると、各測点の測定水深は異なるものの数日周期の変化が卓越し、この変化に1日よりも周期の短い変化が重なっている。本研究では数日周期の変化を問題にしていることから、生の記録に25時間の移動平均を施し、1日よりも周期の短い変化を除去した。

(1). 水温

25時間の移動平均を施した各測点の時系列変化を、Fig.3-(1)に示す。船橋沖の各St.の水温は、測定水

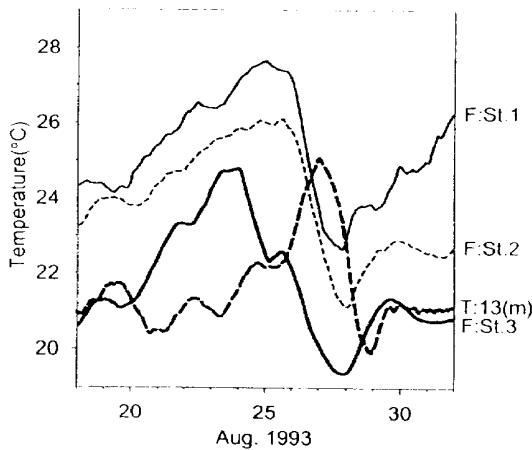


Fig.3-(1)

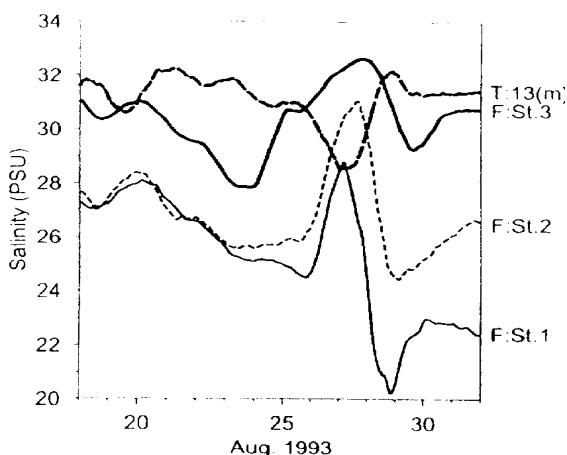


Fig.3-(2)

Fig. 3 Time series of the low pass filtered water temperature Salinity and DO(dissolved oxygen) at Shiba and Funabashi during the period from 18 August to 1 September ((1):Temperature, (2):Salinity, (3):DO)

深が異なるために水温差がみられるもののよく似た変化

を示し、20日からほぼ同時に上昇している。St.間の距離が短いにもかかわらず、上昇のピークに時間のずれがみられ、沖合の測定水深が深いSt.3が23日、岸よりの測定水深が浅いSt.1、2が24日であった。水温急下降にも時間のずれがみられ、St.3の水温は24日から、St.1、2では25日から急下降しているが、下降のピークはほぼ同時に起こり、28日0時頃であった。

船橋沖から約43 km南に位置する柴沖のSt.Tの水温変化は、船橋沖と逆位相の関係にあり、船橋沖で水温が下降しはじめた24日から急上昇し、27日0時頃にピークになった。その後急下降し、そのピークは船橋沖より約1日遅れの29日0時頃であった。

(2). 塩分

各St.の塩分の時系列変化をFig.3-(2)に示す。船橋沖の各St.の塩分は、水温と同様に差が見られるものの、よく似た変化を示す。船橋沖の各St.の塩分下降のピークはSt.2、3では23日、St.1では25日であった。St.3では24日から、St.1、2では25日から急上昇し、ピークは岸から沖に向かって数時間遅れているものの、27日に観測された。その後急下降し、下降のピークは上昇のピークと同様に岸から沖に向かって数時間遅れ、28日から29日に観測された。

一方、柴沖のSt.3では、船橋沖で塩分が低かった20日~23日に、高くなっている。24日から急下降し、下降のピークは27日で、船橋沖で上昇のピークがみられたときである。その後急上昇し、ピークは船橋よりも1日以上遅れて28日にみられた。

このように、水温と同様に船橋沖と柴沖の塩分変化に逆位相の関係がみられ、柴沖で塩分が高いときに船橋沖で低く、柴沖で低いときに船橋沖で高くなることが判った。

また、Fig.3-(2)の塩分の時系列にFig.3-(1)の水温の時系列を重ねてみると、各測点の塩分と水温変化は逆位相の関係にあることがよく判る。すなわち、塩分が高いときに水温は低く、低いときに高く、前者を底層水、後者を表層水と考えることができる。

(3). DO

各St.のDOの時系列変化をFig.3-(3)に示す。船橋沖では、測定水深が最も深いSt.3とSt.1、2との間に顕著な差がみられるものの、変化は似ている。St.3では18~20日に無酸素に近い1 ml/L以下であったDOは、21日から急上昇し、23日には一時的に約6 ml/Lまで上昇した。その後急下降し、24日以降1 ml/L以下の無酸素状態が続いた。St.2は、St.3と同様に23日に鋭いピークが観測されたが、その後急下降し、27日に1 ml/L以下になった。St.1では、他のSt.よりも

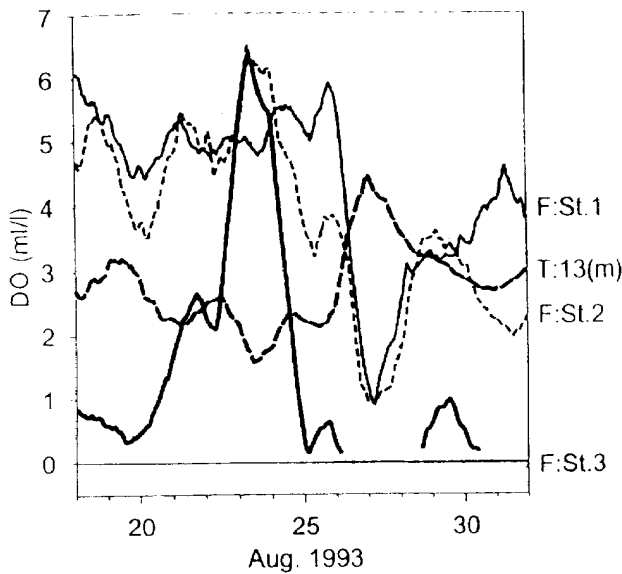


Fig. 3 - (3)

約2日遅れの26日から急下降し、27日にSt.2とほぼ同時に1ml/L以下の下降のピークが観測された。その後、St.2と同様に急激に回復している。

柴沖のDOの変化には、水温、塩分と同様に船橋沖と逆位相の関係がみられる。柴沖では、船橋沖で上昇しはじめた20日から下降し、23~25日には2ml/L前後まで下がったが、その後急激に回復した。27日には一時的に約4ml/Lのピークまで上昇したが、28日にかけて約3ml/Lまで下降した。

このように、柴沖で高温・低塩分水すなわち表層水が分布したときにDOは高く、低温・高塩分水すなわち底層水が分布したときにDOは低くなっている。

両海域の水温、塩分、DOの変化に、逆位相の関係がみられ、柴沖が高温・低塩分・高DO（表層水）のときには、船橋沖では低温・高塩分・低DO（底層水）になり、柴沖が低温・高塩分・低DOのときには、船橋沖では高温・低塩分・高DOになることが判った。

3. 東京灯標の風と柴沖、船橋沖の表層水、底層水との関係

東京灯標で得られた風の時系列をFig.4に示す。21~25日に5~10m/sの南偏風が吹続したが、その後風向は反転し、26~27日に最大10m/s以上の北偏風が吹続した。28日から再び弱い南偏風に変わった。

Fig.4にFig.3-(1),(2),(3)を重ねてみると、南偏風が強吹した時期にほぼ対応して、船橋沖で高温・低塩分・高DO水すなわち表層水が、柴沖で低温・高塩分・低DO水すなわち底層水が観測された。また、北偏風が強吹した後に、船橋沖で底層水が、柴沖で表層水が観測された。これらのことから、北偏風および南偏風が湧昇現象および堆積現象の発生に深く関わっていると云える。

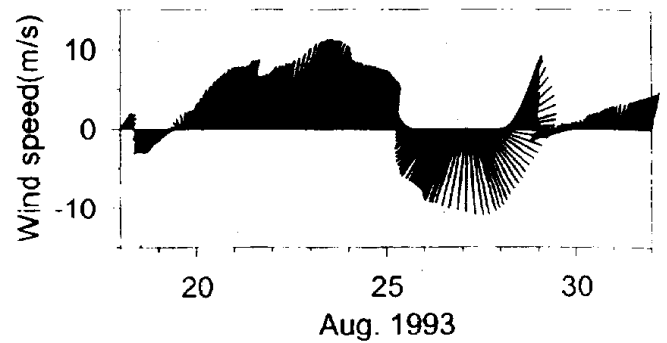


Fig. 4

Fig. 4 Time series of wind vector at Tokyo Light tower during the period from 18 August to September.

27日~29日にかけて船橋沖と柴沖に水温下降、塩分上昇、DO下降の鋭いピークが観測され、下層水の湧昇が最も顕著であったことを示す。湧昇のピークは、船橋沖では10m/s以上の北風が吹いていた27日午後~28日0時頃である。一方、柴沖では約5m/s以下の南偏風が吹いた29日0時頃に起こり、この程度の南偏風により湧昇したと云うよりも、船橋沖の湧昇域が関係したと考えられる。両海域の湧昇発生のピークに24時間以上の差がみられる。船橋沖で起こった湧昇域が、北風が止んだ後に岸に沿って柴沖へ移動したと仮定すると、両海域の距離は約45kmであることから、時間差24~30時間として距離を時間差で割ると、湧昇現象の移動速度が見積られる。移動速度は40~50cm/sになる。

まとめ

船橋沖と柴沖の水温、塩分、DOの変化に逆位相の関係がみられた。船橋沖で低温・高塩分・低DO水（底層水）のときには、柴沖で高温・低塩分・高DO水（表層水）が観測され、船橋沖で高温・低塩分・高DO水のときには、柴沖で低温・高塩分・低DO水が観測された。

両測点の水温、塩分、DOの変化は、東京湾上を吹く風に関係し、南偏風が吹き続いたときに、船橋沖で表層水が堆積、柴沖で底層水が湧昇していた。北偏風が吹き続いたときに、船橋沖で底層水が湧昇、柴沖で表層水が堆積していた。北偏風が止んだ1日以上後に、柴沖で湧昇域を観測した。このことから、柴沖の湧昇域は船橋沖から移動したと考えられ、その速度は約40~50cm/sになることが判った。

北偏風により起こされた湧昇域は、孤立した現象である。この現象は内部波であり、岸を右にみて移動したとみられることから、内部ケルビン波と考えられる。密度成層から推定される内部ケルビン波の位相速度は、

$$C = \sqrt{\frac{\Delta \rho}{\rho_2} \cdot \frac{H_1 H_2}{H_1 + H_2} g}$$

で、 H_1 、 H_2 は基本場の上層、下層の厚さを示す。

水深を30mとする。Fig.2の9月の鉛直変化から、 $H_1 = 10\text{m}$ 、 $H_2 = 20\text{cm}$ 、 $\rho_1 = 1.019\text{gr/cm}^3$ 、 $\rho_2 = 1.024\text{gr/cm}^3$ とすると、 $\Delta \rho = 5 \times 10^{-3}\text{gr/cm}^3$ になる。重力の加速度 $g = 980\text{cm/s}^2$ である。これら値を上式に代入すると、 $C = 56\text{cm/s}$ になる。この値は、水温、塩分、DOの変化から推算した湧昇域の移動速度に概ね一致する。

松山ほか(1990)は、東京湾上で成層期に北東の風が吹くと、千葉県側の木更津～船橋付近で底層の貧酸素水の湧昇、神奈川県側の川崎～横浜で表層水の沈降が起こること、湧昇域は北東の風が止んだ後は、次第に弱まりながら岸に沿うように反時計回りに移動すること、移動速度は盛夏で約35cm/s、初秋には約27cm/sで移動し、内部ケルビン波の位相速度と一致することを示した。

今回観測から明らかになった低酸素水塊の発生～移動は、松山ほか⁶⁾が湧昇の発生～消滅にいたる過程を数値実験的手法で示した結果を支持しているといえよう。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、適切な助言とご指導を

頂いた東京水産大学松山優治教授、同大学院の鈴木 亨氏に心から感謝いたします。柴沖観測塔に水温、塩分、溶存酸素計の設置に際し、多大なる便宜をはかって頂いた横浜市環境保全局の小野寺典好氏に感謝いたします。

引用文献

- 1) 蓮沼啓一(1979): 東京湾における流動の特徴. 沿岸海洋研究ノート, 16, 67 - 75.
- 2) 松村皐月・佐藤善徳・柿野 純(1981): 東京湾における青潮発生時の海況. 1981年度日本海洋学会春季大会講演要旨集, 205 - 206.
- 3) 柿野 純・松村皐月・佐藤善徳・加瀬信明(1987): 風による流れと青潮の関係. 日本水産学会誌, 53, 1475 - 1481.
- 4) 風呂田利夫(1987): 東京湾における青潮の発生. 水質汚濁研究, 10, 470 - 474.
- 5) 宇野木早苗(1987): 東京湾 物理. p.344 - 361. 日本全国沿岸海洋誌, 東海大学出版会.
- 6) 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. 青潮に関連して. 沿岸海洋研究ノート, 28, 1, 63 - 74.
- 7) 岩田静夫・池田文夫・清水詢道・小泉喜嗣・松山優治(1993): 東京湾川崎沖底層での洋存酸素量の連続測定結果について. 神奈川県水産試験場研究報告, 14, 61 - 64.