

夏季の東京湾における底層水の分布と挙動 : 低酸素水の流出における風の役割

著者	小池 義夫, 松山 優治, 林 敏史, 北出 裕二郎, 喜多澤 彰, 吉田 次郎
雑誌名	東京水産大学研究報告
巻	84
号	2
ページ	43-51
発行年	1997-12-25
URL	http://id.nii.ac.jp/1342/00000110/

夏季の東京湾における底層水の分布と挙動*

—低酸素水の流出における風の役割—

小池義夫*¹・松山優治*²・林 敏史*¹・北出裕二郎*²
喜多澤 彰*¹・吉田次郎*²

DISTRIBUTION AND BEHAVIOR OF BOTTOM WATER IN TOKYO BAY IN SUMMER —ROLE OF WIND ON OUTFLOW OF POOR OXYGEN WATER—

Yoshio Koike*¹, Masaji Matsuyama*², Toshifumi Hayashi*¹, Yujiro Kitade*²,
Akira Kitazawa*¹ and Jiro Yoshida*²

In Tokyo Bay, the bottom water are always occupied by the poor oxygen water or anoxic water for the remarked thermocline in summer. CTD casts were made along the bay-axis twice within five days in August, 1995. The distributions of temperature, salinity, density and dissolved oxygen changed between both observations significantly. The remarked change of the field is due to inflow in the upper layer and to outflow in the lower layer, *i.e.*, to vertical circulation along the bay-axis. During the observational periods, this vertical circulation is induced by the fairly strong south wind. The speed of the outflow in the lower layer is estimated as about 5.6 cm s^{-1} .

Key words: Tokyo Bay, Bottom water, Wind driven current, Stratification, Vertical circulation, Poor oxygen water

はじめに

大量の河川水の流入と海面を通して強い熱を受ける夏季に、東京湾では顕著な成層が発達する(例えば、宇野木・岸野, 1977)。成層の発達を上層から下層への酸素の供給を押さえ、湾口がくびれて狭く下層水と外洋水との交換が期待できないことから、湾内の底層水は貧酸素あるいは無酸素状態に陥っている。しかし、この状態は外的な作用、例えば海面上を吹く風の変化に伴い、大きく変わると云われている。例えば、南西の季節風の卓越する夏季に、風向が一時的に北寄りに変わると、湾奥部や東岸で湧昇が発生する。湧昇の著しい時は貧酸素水が海面まで上昇し、青潮現象を引き起こして、底棲生物、貝類を死滅させるなど多大な被害を及ぼす。湧昇に関する状況は、宇野木ら(1980)の湾内での複数の係留点での結果として紹介され、松山ら(1990)による二層モデルを用いた数値実験および3次元モデルによる数値実験(鈴木ら1997)により、風と湧昇の関係は明らかになってきている。横断方向に海底傾斜をもつ水道での吹送流の構造について解析的に解いた長島(1982)に依れば、陸岸の存在による傾斜流の形成と海底傾斜による東西非

* Received May 9, 1997.

*¹ Laboratory of Training Ship, Tokyo University of Fisheries, 5-7, Konan 4-chome, Minato-ku, Tokyo 108, Japan (東京水産大学練習船)。

*² Laboratory of Physics and Environmental Modeling, Tokyo University of Fisheries, 5-7, Konan 4-chome, Minato-ku, Tokyo 108, Japan (東京水産大学環境システム学講座)。

対称な流れの構造が期待される。さらに、弱風であっても地形が効果的な働きをして、運動に必要な圧力場が形成されうることを指摘している。長島・鈴木(1996)はこのアイデアを宇野木ら(1980)と同じデータに適用し、風と流れの変動の関わりを詳細に調べ、上記の湾内の海水流動に及ぼす風の影響を再確認している。これらの短期変動に対応しての水温や塩分などの連続観測の必要性は、すでに蓮沼(1979)に依って指摘されている。しかし、時間変動を知るための係留点での連続観測は可能だが、短時間に全域をカバーするような一斉観測は海上交通事情から考えて不可能で、船による観測はモニター点での月に1回程度の観測が主流である。我々は1995年夏季に湾軸にそった測線でCTD観測を5日間に2度行った。観測線は湾軸に沿って鉛直循環の可能性を探るために設けられ、短期間に2度の観測によって、海水特性の変化を見つけることを目指した。期待したように、わずか5日間で海水特性の分布が著しく変化していたので、ここに報告し、その原因について議論する。

観 測

1995年8月23日と28日にFig. 1に示す測点でCTD観測を実施した。ここでは便宜上、前者の観測をEX1、後者をEX2と呼ぶ。観測点は同一とし、測点6'ではEX1でのみ観測を行った。水温、塩分、溶存酸素濃度(DO)の測定はNeil Brown MK III型CTDおよび本器に取り付けられたベックマン社の溶存酸素センサーによって行われた。塩分とDOについては、CTD観測値と同時にロゼットサンプラーにより採水した海水サンプルを分析し、両者の比較から、できるだけ質の良いデータを得るよう努めた。塩分はポータサル(ギルドライン社)による分析値とCTD観

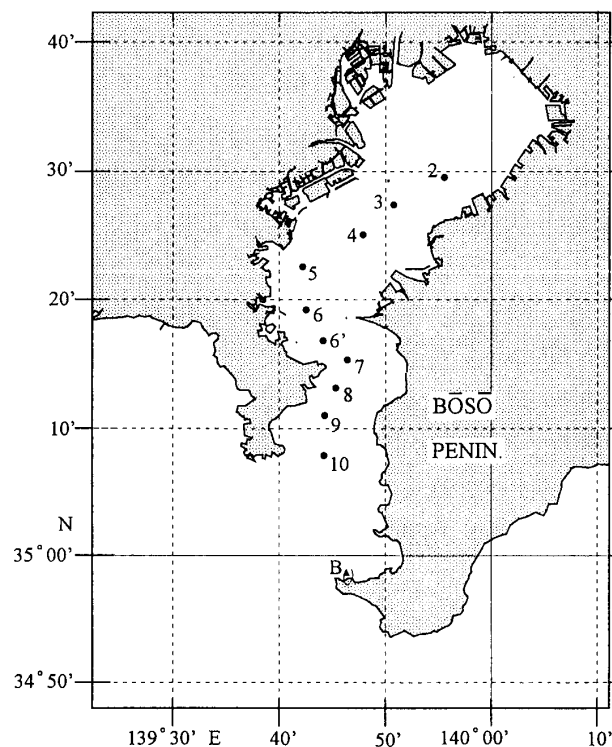


Fig. 1. Observation stations. Symbol “●” indicates CTD station and “▲” indicates the location of weather observation at Tateyama in Chiba Prefecture.

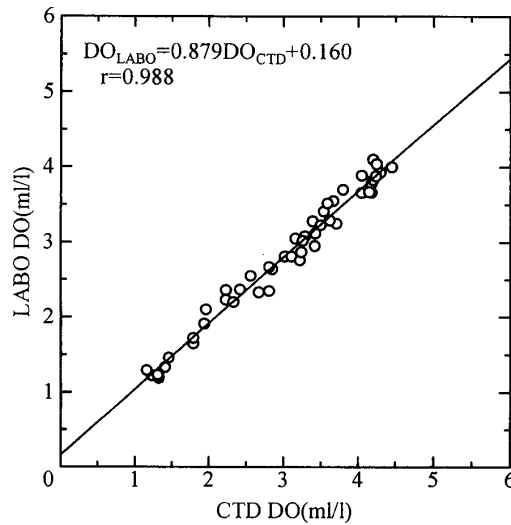


Fig. 2. Comparison of the dissolved oxygen obtained by CTD (CTD DO) and that measured by Winkler's method (LABO DO). Solid line is a regression line.

測値を比較した結果、相関係数 0.998 と非常に高い値を示した。そこで、一次直線で近似し、補正した値を現場塩分とした。ただし、塩分変化の大きな湾内水の挙動を議論することから、CTD で得られた塩分値をそのまま用いても本研究には支障が無いことが分かった。

一方、DO は観測期間中の 8 月 23 日に東京湾で採水し、ウインクラーの方法で測定した値と CTD の観測値を比較し、Fig. 2 に示した。両者の相関係数は 0.988 と高く、CTD の DO が 10% 強高く出ることが分かった。CTD で得られた値を Fig. 2 に示す一次式で補正し、補正値を現場の DO 値として使用する。

これらの結果の考察に際して、東京水産大学の千葉県館山市坂田実験実習場沖の気象観測ブイ (Fig. 1 の測点 B) で測定されている風向・風速資料を活用した。

結 果

Fig. 3 に EX1 で得られた水温、塩分、 σ_t 、溶存酸素濃度 (DO) の鉛直断面図を示す。ごく表層に注目すると湾奥から湾口に向かい次第に温度が低下しているが、26°C の等温線は海面に現れることはない。19~25°C で等温線の間隔が狭く、顕著な水温躍層が形成されている。躍層は湾奥の測点 2 から湾口の測点 10 に向かって、緩やかに深くなるとともに、弱くなっていく。測点 8 付近の水深急変部では 10 m 以深に水平スケールの小さな等温線の盛り上がりが見られる。細かな変動はあるが、全体として見ると、等温線はほぼ水平に分布していると考えて良い。塩分には上層と下層とで非常に大きな差が認められ、温度と同様に躍層が形成されている。表層では、湾奥部と測点 5 付近で低い値を示す。夏季であることから、河川水の影響が強く現れたものと推測されるが、測点 5 を中心とした海域に低塩分水が現れる理由は不明である。測点 5 から湾口に向かって下層には 34 psu の高塩分水が見られる。表層に高温・低塩分水、下層に低温・高塩分水が分布していることから、20 m 以浅に強い密度成層が存在している。等密度線は沖に向かって次第に海面に現れ、湾奥で成層が強く、湾口に向かって次第に弱くなる状況を表している。具体的に数値で見ると測点 2 では、海表面で $\sigma_t=17$ 、20 m 深で $\sigma_t=24$ 、測点 10 では海表面で $\sigma_t=21$ 、50 m 深で

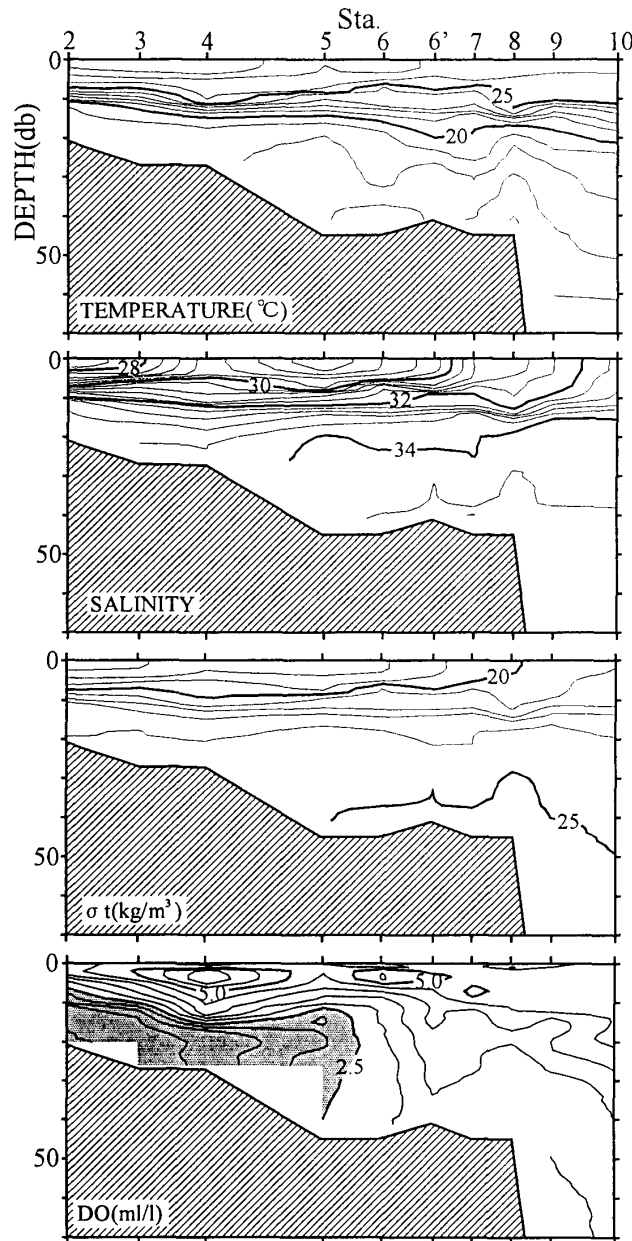


Fig. 3. Vertical distributions of temperature, salinity, σ_t and dissolved oxygen (DO) observed on 23 August, 1995.

$\sigma_t=25$ で、これらの値は非常に強い躍層であることを意味している。溶存酸素濃度の分布では $2.5 \text{ ml} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下の低酸素水領域に網掛けをしている。湾奥部の低酸素水は測点 5 付近あるいはそれより少し、外まで延びている。溶存酸素濃度の等値線の集中も温度躍層や塩分躍層とほぼ同深度に認められる。強い密度躍層が低酸素水の形成に寄与していることは十分理解できる。

Fig. 4 は Fig. 3 と同様の EX2 の水温、塩分、 σ_t 、DO の鉛直断面図である。4 断面とも Fig. 3 とは明らかに異なっている。これら 2 つの図を比較して、海況の変化の様子を調べる。Fig. 4 では集中した等温線、すなわち躍層は湾奥に向かって深くなり、測点 2 では海底付近に存在する。したがって、湾奥表層は高温で温度変化は小さい。下層は全域で高温化し、浦賀水道域の測点 7, 8 に

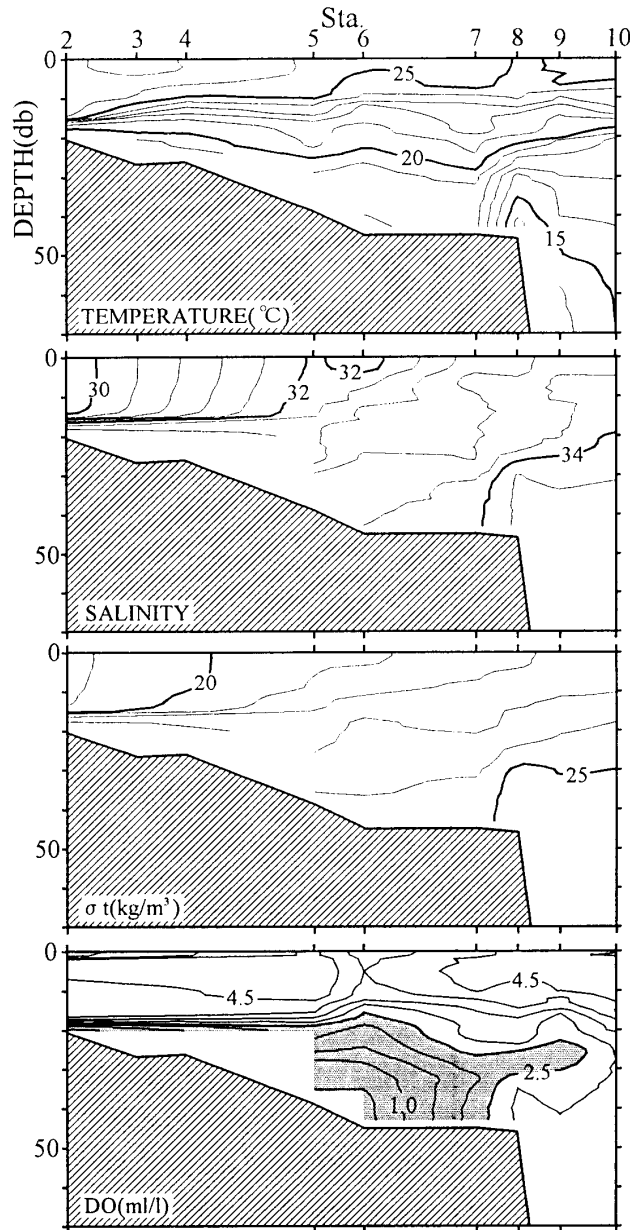


Fig. 4. Same as Fig. 2, but for on 28 August, 1995.

等温線の集中が見られる。湾口付近の海底急変域では深層からの低温水の上昇を示唆する 15°C 以下の海水が存在する。塩分分布も水温分布と同様に表層では高塩分へ、下層では低塩分へと変化している。このため、EX2 では EX1 に比べて、上下層の密度差が小さくなっている。EX2 での密度は湾口で大きく湾奥に向かって小さくなり、等密度線は全層にわたり湾口に向かって浅くなる傾向が見られる。両観測の比較から、EX1 と EX2 の間に水温・塩分・密度の分布の違いが見られ、これらは表層へ沖合水の流入、下層から沿岸水の流出、即ち、海水の鉛直循環が起こっていたことを示唆している。EX2 では低酸素水は湾口付近に分布し、測点 8~9 での海底急変域では中層に貫入するような形状が認められる。密度断面との対比から、貫入は $\sigma_t = 24$ 付近の等密度面に沿っている様に見受けられる。Fig. 3 で見られた低酸素水のコアを同じく密度分布と合わせ

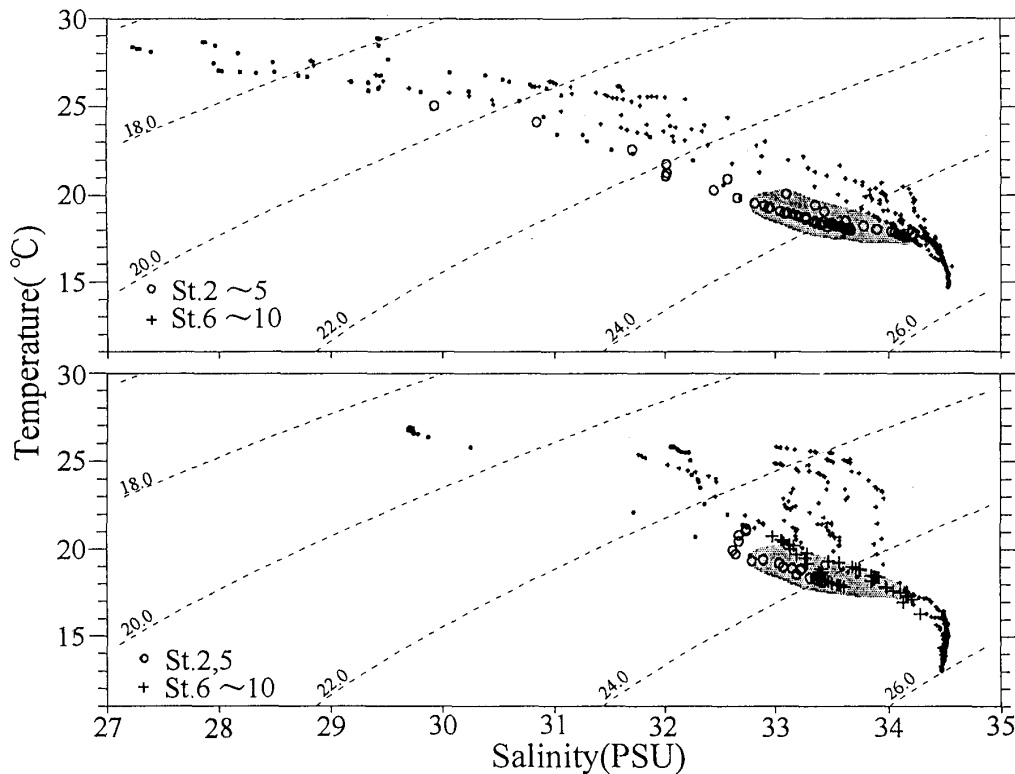


Fig. 5. T-S diagram for EX1 (upper panel) and EX2 (lower panel). Larger symbols indicate that the amount of DO is lower than $2.5 \text{ ml}\cdot\text{l}^{-1}$.

てみると、ほぼ同じ $\sigma_t=24$ の等密度線に沿っていることが分かる。次に、EX1 と EX2 で測定された低酸素水が同一のものであるかどうかを TS ダイアグラム (Fig. 5) により確かめる。EX1 の低酸素水のうち $\sigma_t=24$ 付近の領域を網掛けしている。EX1 では、大きなシンボルで示した溶存酸素濃度 $2.5 \text{ ml}\cdot\text{l}^{-1}$ 以下の低酸素水は測点 5 より湾奥寄りに存在していたが、EX2 ではほぼ同一の特性を持つ低酸素水が測点 6 より湾口側に広く存在していた事が分かる。これらのことから EX1 と EX2 の間に起こった大きな海況変動により、東京湾内の底層に存在した低酸素水が湾口付近へと移動したと判断できる。そこで、貧酸素水が湾口に向かう速度を、溶存酸素濃度はこの期間には保存されていたとして見積もってみる。Fig. 3 では測点 5 付近にあったコアの先端が Fig. 4 では測点 9 付近に達している。2 地点間の距離は約 13 マイル (約 25 km) と推算される。観測日は 5 日間 (120 時間) 異なるが、観測時間はほぼ同じである。低酸素水が一定の速度で移動したとして、下層水の湾口への平均移動速度を見積もると約 0.2 km h^{-1} (約 5.6 cm s^{-1}) となる。

まとめと考察

東京湾を縦断する同一測点で 1995 年 8 月 23 日と 28 日に CTD 観測を行った結果、水温、塩分、 σ_t 、溶存酸素量の分布に注目すべき変化が認められた。この 5 日間に生じた分布の変化は上層に沖合水が流入し、下層からは湾内水が流出する、いわゆる、湾軸方向の鉛直循環によって引き起こされたものであることが分かった。下層水の流出に伴い、湾内底層に停滞していた低酸素水は平均約 5.6 cm s^{-1} で湾口へと移動していた。

湾内に暖水が流入し鉛直循環を引き起こした原因として、(1) 沖合を流れる黒潮の接近と (2)

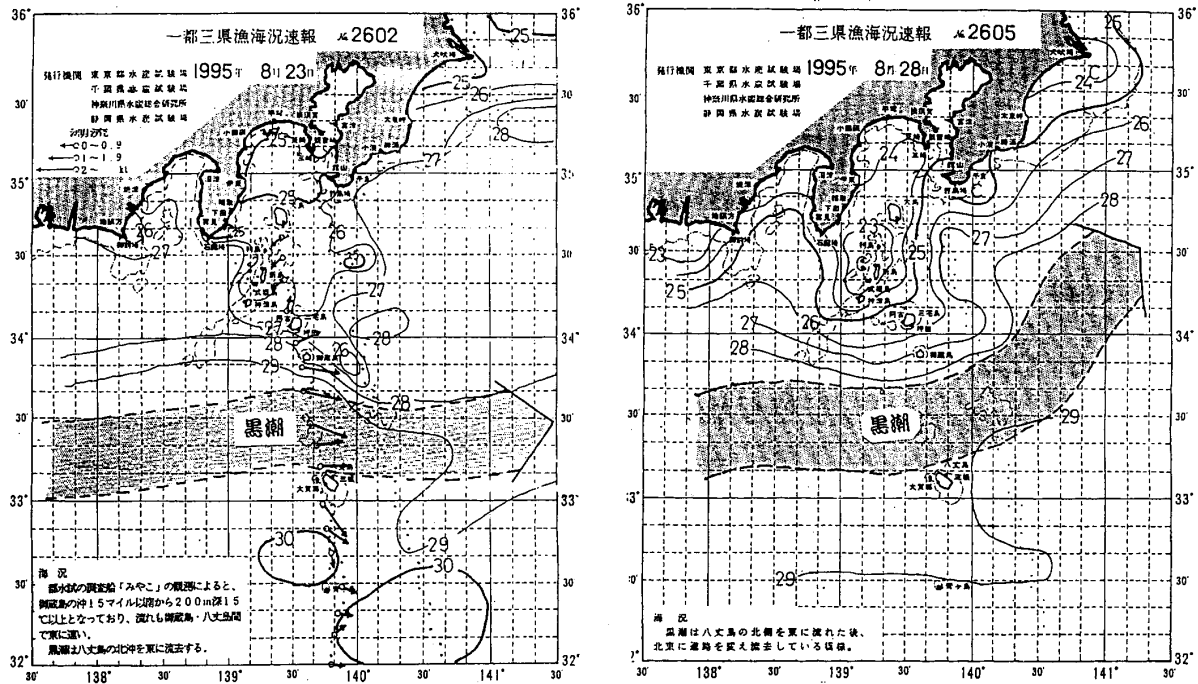


Fig. 6. Sea surface temperature distribution and path of Kuroshio on 23rd (left panel) and 28th (right panel) of August, 1995 (after Prompt Report of ocean condition prepared by Tokyo, Kanagawa, Chiba, Shizuoka Prefectures).

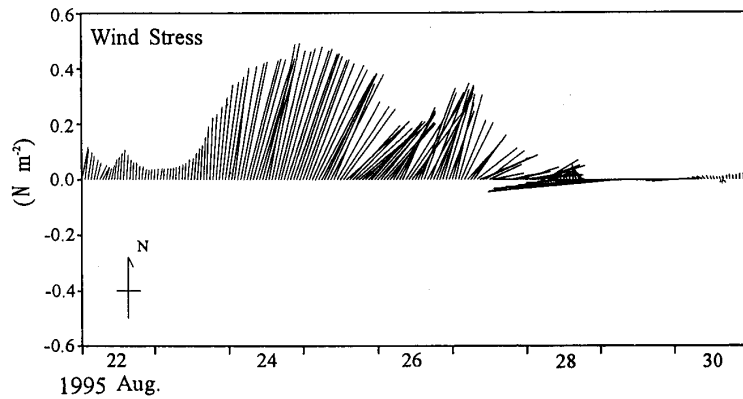


Fig. 7. Time series of 25-hours running averaged wind stress (Newton/m²) at Tateyama. Each wind stress vector indicates the direction toward the wind blowing.

海表面を吹く風の応力が考えられる。黒潮の影響を検討するため、その流路と周辺域の水温から海況変動を調べる。Fig. 6 は一都三県（東京・神奈川・千葉・静岡）の水産試験研究機関が毎日のデータから作成している黒潮流軸の位置と表面水温分布図である。8月23日から28日へかけて、黒潮流軸が房総半島へいくらか接近したことを除けば、大きな変化を見ることはできない。

次に、この期間の風の変化を坂田沖の気象観測ブイの記録から検討する。湾口での記録であるため、必ずしも東京湾を代表するものとは云えないが、連続記録として得られている貴重なものである。海水の運動との関わり合いを持つ風の応力の時系列を Fig. 7 に示す。これより、特に24日から26日に南よりの風が強いことが分かる。Fig. 3, 4, 7 を見て総合的に判断すると、南よりの風により、表層水が湾内に運ばれ、湾奥の下層水は湾口近くまで押し出されたと考えられる。南

風による吹き寄せ効果があったことを示唆する観測資料として Fig. 3 の密度断面がある。湾口に向かっての等密度線の上昇が示された。成層が強いことから、現象が傾圧的であることを考慮すれば、等密度線の上昇は海面の下降と、逆に等密度線の下降は海面の上昇と関連している。観測から、湾口から湾奥に向かって海面が上昇している様子が推定できる。

村上・森川(1988)は1983年9月の係留系による流速観測から、北風の連吹と共に、湾口での表層からの流出、下層からの流入が強められることを示している。今回の観測とは全く逆の風向により逆の鉛直循環が形成される可能性を示し、我々の結果を支持している。

湾内水の流出に関する物理過程として密度流と潮汐ポンプの研究がある。湾口西側では上層流出、下層流入の傾向を示し、この鉛直循環には密度流が深く関与し、流れの強弱には海面風が影響するとされている(例えば、宇野木1993)。実際に、東京湾の表層低塩分水が三浦半島沿いに相模湾へ流出する状況がしばしば見られるのは、表層の密度流に依るとして説明できる。一方、Yanagi *et al.* (1992) は冬季の湾口での係留観測記録の解析から、潮流と関連して湾内から沖合への物質輸送のしくみを説明し、潮流の役割の重要性を指摘している。今回の観測結果は、上の機構とは明らかに異なる新しいもので、下層の貧酸素水が湾外へ輸送される主要なメカニズムであると推測される。南風の頻度が高い夏季に注目される現象であり、今後、継続して観測することが望まれる。

謝 辞

本観測を実施するに当たり、ご協力をいただいた青鷹丸の乗組員の皆様に心から感謝いたします。本論文の作成に、種々のご協力とアドバイスを頂いた東京水産大学前田 勝助教授並びに適切なコメントを頂いた2名のレビュアーには心からお礼を申し上げます。

文 献

- 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.
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, **28**: 63-74.
村上和男, 森川雅行. 1988. 東京湾の長周期流れの特性について. 沿岸海洋研究ノート, **25**: 146-155.
長島秀樹. 1982. 傾いた底を持つ水道の吹送流. 理化学研究所報告, **58**(2): 23-27.
長島秀樹, 鈴木 亨. 1996. 東京湾の流動. 沿岸海洋研究, **34**: 37-44.
鈴木 亨, 松山優治, 長島秀樹. 1997. 成層期の東京湾における北東風による循環流および湧昇流の形成過程に関する数値実験. 沿岸海洋研究, **35**: 99-108.
宇野木早苗. 1993. 東京湾の水と流れ. 貝塚爽平(編). 東京湾の地形・地質と水. 東京. 築地書館. pp. 135-186.
宇野木早苗, 岸野元彰. 1977. 東京湾の平均海況と海水交換. 理化学研究所海洋物理研究室技術報告, No. 1, p. 89.
宇野木早苗, 岡崎守良, 長島秀樹. 1980. 東京湾の循環流と海況. 理化学研究所海洋物理研究室技術報告, No. 4, p. 262.
Yanagi, T., Shimizu, M., Saino, T. and Ishimaru, T. 1992. Tidal Pump at the Shelf Edge. *J. Oceanogr.*, **48**: 13-22.

夏季の東京湾における底層水の分布と挙動
—低酸素水の流出における風の役割—

小池義夫・松山優治・林 敏史・北出裕二郎・喜多澤 彰・吉田次郎

底層が貧酸素あるいは無酸素状態にある東京湾で、1995年8月下旬に5日間に湾軸に沿った同一測点で2度のCTD観測を行った。2回の観測の間に、水温、塩分、 σ_t 、溶存酸素量の各分布が著しく変化していた。分布は上層への湾外水の流入、下層からの底層水の流出による鉛直循環を示していた。下層での流出に伴い湾内底層の低酸素水塊が湾口に向かって移動したことが分かり、その平均移動速度は約 5.6 cm s^{-1} と見積もられた。鉛直循環を誘発したのは、2回の観測の間の強い南風の連吹に依ると判断される。これは低酸素水が湾外に輸送される主要なメカニズムのひとつと推察される。

キーワード：東京湾，底層水，吹送流，成層，鉛直循環，低酸素水