

千葉灯標モニタリングポストで観測された 東京湾の底層溶存酸素量の時間変化[†]

渡邊奈保子^{*1}, 松坂真衣^{*2}, 山尾理^{*2}

Temporal variation in dissolved oxygen in the bottom layer of Tokyo Bay observed by the
monitoring post at Chiba Light[†]

Naoko WATANABE^{*1}, Mai MATSUSAKA^{*2}, and Satoshi YAMAO^{*2}

Abstract

Japan Coast Guard has carried out continuous monitoring of sea water, sea current, and wind at the innermost of Tokyo Bay using the monitoring post at Chiba Light from 2003. We report temporal variations in dissolved oxygen (DO) in the bottom layer at a depth of 10 m from 2003 to 2015 (except for 2011 and 2013). Moreover, in order to estimate water quality improvements at Tokyo Bay, we removed from the DO values the influences of the submerging surface water caused by dominating south winds, which is one of the natural phenomena affecting the temporal variations. The compensated DO values remained at the same level during the observation period from 2003 to 2015, which suggests no significant improvements of water quality at Tokyo Bay.

1 はじめに

その流域圏に大都市を抱える東京湾では、陸域からの大量の汚濁負荷や海水交換が起りにくいといった地形的特性から、慢性的な富栄養化、赤潮の発生等が問題となっている。この問題に様々な機関が一体となって取り組むため、2002年に「東京湾再生推進会議」が設置され、2003年には「東京湾再生のための行動計画（第一期）」が策定された。「東京湾再生のための行動計画（第一期）」では「快適に水遊びができ、多くの生物が生息する、親しみやすく美しい「海」を取り戻し、首都圏にふさわしい『東京湾』を創出する」を目標理

念として掲げ、具体的な改善指標として「底層の溶存酸素量（DO：Dissolved Oxygen）」に注目した。この「底層のDO」が年間を通して底生生物が生息できる限度にまで回復させることを第一期の具体的な目標とし、様々な関係機関が本行動計画に基づき「陸域負荷削減策の推進」、「海域における環境改善対策の推進」、「東京湾のモニタリングの充実」といった各施策を進めた。2007年、2010年の2回の中間評価を経て、2013年5月には「東京湾再生のための行動計画（第一期）」期末評価がとりまとめられた。この期末評価では、「化学的酸素要求量（COD：Chemical Oxygen

[†] Received November 11, 2016; Accepted November 30, 2016

* 1 技術・国際課 海洋研究室 Ocean Research Laboratory, Technology Planning and International Affairs Division

* 2 環境調査課 Environmental and Oceanographic Research Division

Demand), 窒素, リンの発生汚濁負荷量は着実に減少し, 再生された浅場や干潟で生物の生息が確認されるなど, 取組に対する一定の成果が認められた」ものの, 「東京湾の底層の溶存酸素量(DO)に明らかな改善傾向は認められなかった」と結論づけられている. 同じく2013年5月には, 「東京湾再生のための行動計画(第二期)」が策定され, 現在は官のみならず企業や市民団体等多様な主体が連携し, さらなる東京湾再生のための取り組みが進められている.

海上保安庁は, 東京湾再生推進会議において東京湾のモニタリングを担う機関として, 千葉灯標にモニタリングポストを設置し, 水質等の連続監視を実施している. 千葉灯標モニタリングポストは2003年より運用されており, 現在に至るまで高頻度の観測を続けている.

本稿では, 「東京湾再生のための行動計画(第二期)」においても評価指標の一つとして位置づけられている「底層のDO」に着目し, 千葉灯標モニタリングポストのデータを解析し, 東京湾奥部における底層DOの時間変化を明らかにした. さらに, このDO時間変化の中から気象条件に起因する変動分を取り除くことで東京湾の水質改善状況の評価を試みた.

2 方法

千葉灯標モニタリングポストは, 東京湾奥部・千葉港沖合約5km, 水深約10mの千葉灯標に設置された連続観測装置である(Fig. 1). 千葉灯標モニタリングポストでは, 水質(水温, 塩分, DO, クロロフィル, 濁度), 海潮流(流向, 流速), 海上風(風向, 風速)を計測しており, 水質については海面から海底までを1m間隔で, 1時間に1回観測している.

本稿では, 2003年から2015年までに取得された水質データ(但し, 2011年及び2013年は欠測のため除く.)のうちDOに着目し, 全データから毎正時ごとの底層(最下層:水深約10m)のデータを抽出し, 東京湾奥部における底層DOの経年変化を明らかにした.

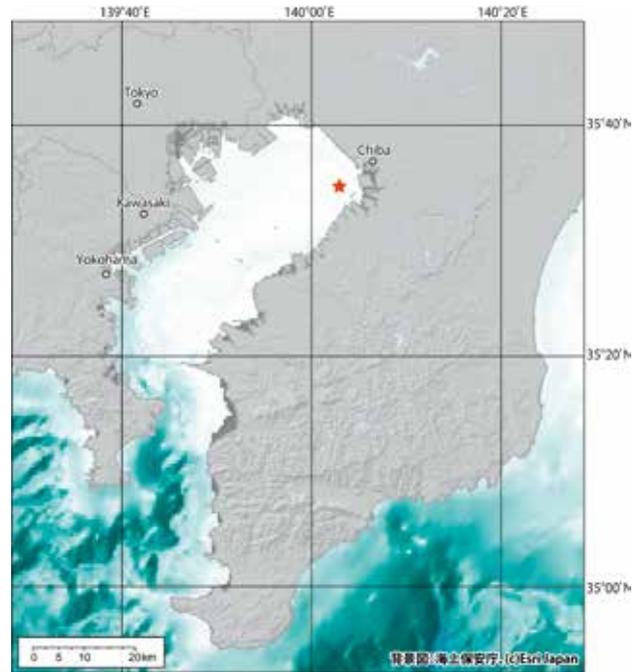


Fig. 1. Location of the monitoring point in Tokyo Bay. Red star indicates the position of Chiba Light.
図1. 東京湾内の観測点(千葉灯標)位置図.

3 結果

3.1 各年の貧酸素水塊の発生状況

Fig. 2に, 2003年から2015年までのDO鉛直分布図を示す. 青色が濃いほどDOが小さいことを示しており, すべての年において底層には濃い青色で示されるDOが少ない水塊, すなわち貧酸素水塊が発生していることがわかる. なお本稿では, 環境省の「生活環境の保全に関する環境基準(海域)」における溶存酸素量の基準値(項目類型:C, 利用目的の適応性:環境保全)に基づき, 2mg/L未滿を貧酸素水塊と定義した.

Fig. 2に示されるとおり, 濃い青色で示される貧酸素水塊は12月から3月の間はほとんど発生していない. 4, 5月頃から次第に底層の貧酸素化が始まり, その後10, 11月くらいまでは貧酸素水塊が認められる. 加えて, 貧酸素水塊が海面付近まで上昇し, その直後に緑色で示される海水が海底付近まで到達するという短期的変動が毎年複数回確認されている. これは, 千葉灯標付近で青潮が発生した可能性を示唆しており, 青潮発生直後は一時的に底層付近でも貧酸素状態が回復していることがわかる. 4, 5月から10, 11月の間,

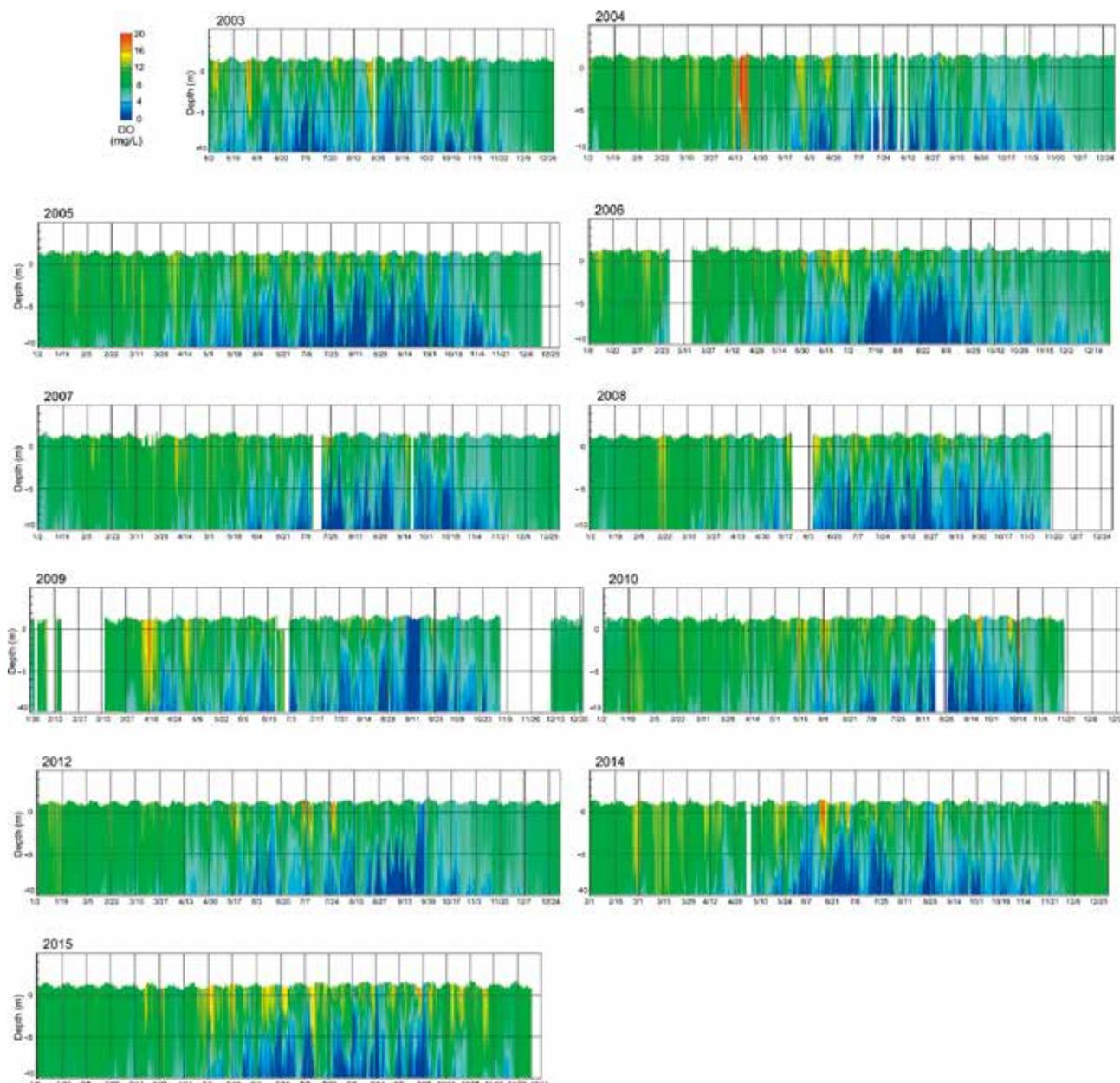


Fig. 2. Temporal variation in vertical distribution of DO.
 図 2. DO 鉛直分布の時間変化.

底層は常に貧酸素水塊に覆われているわけではなく、数日程度の短期的消長を繰り返し、その後、ほとんどの年で12月には完全に消滅していることがわかる。

ここで、Table 1 に、東日本大震災によりシステムが停止した2011年及び水質計の故障のため観測が実施できなかった2013年を除く2003年から2015年までの各年の貧酸素水塊の初観測日及び最終観測日を示す。Table 1の示すとおり、年によって多少の違いはあるものの、多くの年にお

いて5月から10月までの間は貧酸素水塊が発生していることがわかる。一般的な閉鎖性水域においては、密度躍層が発達する成層期（夏季）には貧酸素水塊が発生することが知られている（小倉, 1993）。Table 1 及び Fig. 2 で示されるように、東京湾奥部においても特に5月から10月を中心に貧酸素水塊の発生が確認されたことから、本稿では5月から10月を「夏季」とし、以降、夏季の底層DOに注目する。

Table 1. The first and last dates when hypoxia was observed in each year.

表 1. 各年の貧酸素水塊の初観測日及び最終観測日.

	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年
初観測日	5/13	4/21	3/30	6/2	5/28	5/8	4/12	6/8
最終観測日	11/24	11/25	11/15	11/6	11/6	11/10	10/31	10/28
	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年			
初観測日		5/16		5/18	5/8			
最終観測日		11/9		11/6	10/16			

3.2 夏季における底層 DO の時間変化

Fig. 3 に年ごとの底層 DO の時間変化を示す。底層 DO の値は 15 日移動平均値を用いた。15 日移動平均算出の際には、平均をとるデータ数が期間の半分 (7.5 日分 = 180 時間分) 以上存在する場合にのみ計算を実施しているため、この数を超える欠測が存在する場合にはグラフが断線する。

Fig. 2 の DO 鉛直分布図で示されたとおり、Fig. 3 においても底層の DO は短期的な変動を繰り返していることがわかる。しかしながらその変動のあり方は年により大きく異なっている。多くの年では底層の DO は短期的な変動を繰り返しており、15 日移動平均値における貧酸素水塊の継続時間、すなわち Fig. 3 において桃色で示される領域に連続して線が描かれる期間は、長くとも 1 ヶ月程度かそれ以下であることが多い。ところが、例えば 2005 年や 2006 年のグラフを見ると貧酸素水塊の継続時間が長く、特に 2005 年においては夏季のほぼ全期間において底層が貧酸素化していたことがわかる。また、2008 年のグラフを見ると、貧酸素水塊継続時間は他の年と同じく 1 ヶ月程度であるが、夏季の短期変動の触れ幅が非常に小さく、一定して DO の値が低い。多くの年では、夏季の間でも DO が 4 mg/L を超えるようなピークが複数回存在しており、すなわち、一時的に底層の貧酸素化が解消していたことを示している。2005 年や 2008 年はこのピークが小さく、かつ夏季における DO の値が全体的に低いことから、底層の貧酸素化が深刻な状態であった可能性が示唆される。

Fig. 4 に、2003 年から 2015 年における底層 DO の夏季平均値の推移を示す。平均値において底層が貧酸素化しているのは 2005 年 (1.87 mg/L)

のみであったが、全ての年において平均値は 3.5 mg/L 以下となっている。水産用水基準では、内湾漁場の夏季底層において最低限維持しなければならない DO を 4.3 mg/L としており (日本資源保護協会, 2005), いずれの年も底生生物の生息にとって厳しい環境であったことが考えられる。

4 考察

前項では、2003 年から 2015 年の間の底層 DO の時間変化を述べた。しかしながら、この底層 DO 時間変化には、気象条件等に基づく増減分が含まれており、単純にこの数字をもって東京湾の水質の改善状況を推測することは不適當である。

そこで本稿では、各年の夏季に見られる底層 DO の短期変動に着目した。多くの年で夏季のあいだに複数回のピークがあり一時的に底層 DO が回復している (Fig. 2)。この要因の一つとして、南偏風時の沈降流の発生が考えられ (山尾, 2004), 酸素が豊富な表層水が沿岸へ吹き寄せられることによりその表層水が底層へ沈み込み、一時的に底層 DO が回復していたと考えられる。Fig. 5 は 2015 年 7 月頃の海上風の風速・風向、海水の塩分の観測結果、及びその時期の天気図である。強い南風が吹いた 7 月 13 日～25 日頃の塩分の鉛直分布図を見ると、黄緑色で示される低塩分の海水が底層まで達しており、一時的に成層状態が解消していることがわかる。その前後の天気図を見ると、本州南岸に台風が存在しており、東京湾 (関東南岸) で南偏風が卓越する状況となっている。このような気象現象がもたらす底層 DO の回復は、水質改善状況を評価するうえでは取り除く必要がある。そこで、以下に概略を示すような山尾 (2006) の方法を用いて、表層水の沈み込みの影響を除外した底層 DO の時間変化を求めた。

①表層と底層の密度差を算出する。なお、本稿では、UNESCO (1981) に基づいて密度を算出、 σ_t で表している。その際、本海域は水深 10 m 程度であることから、 p (圧力) = 0 としている。

②①で求めた表層と底層の密度差が表層の密度

Temporal variation in dissolved oxygen in the bottom layer of Tokyo Bay

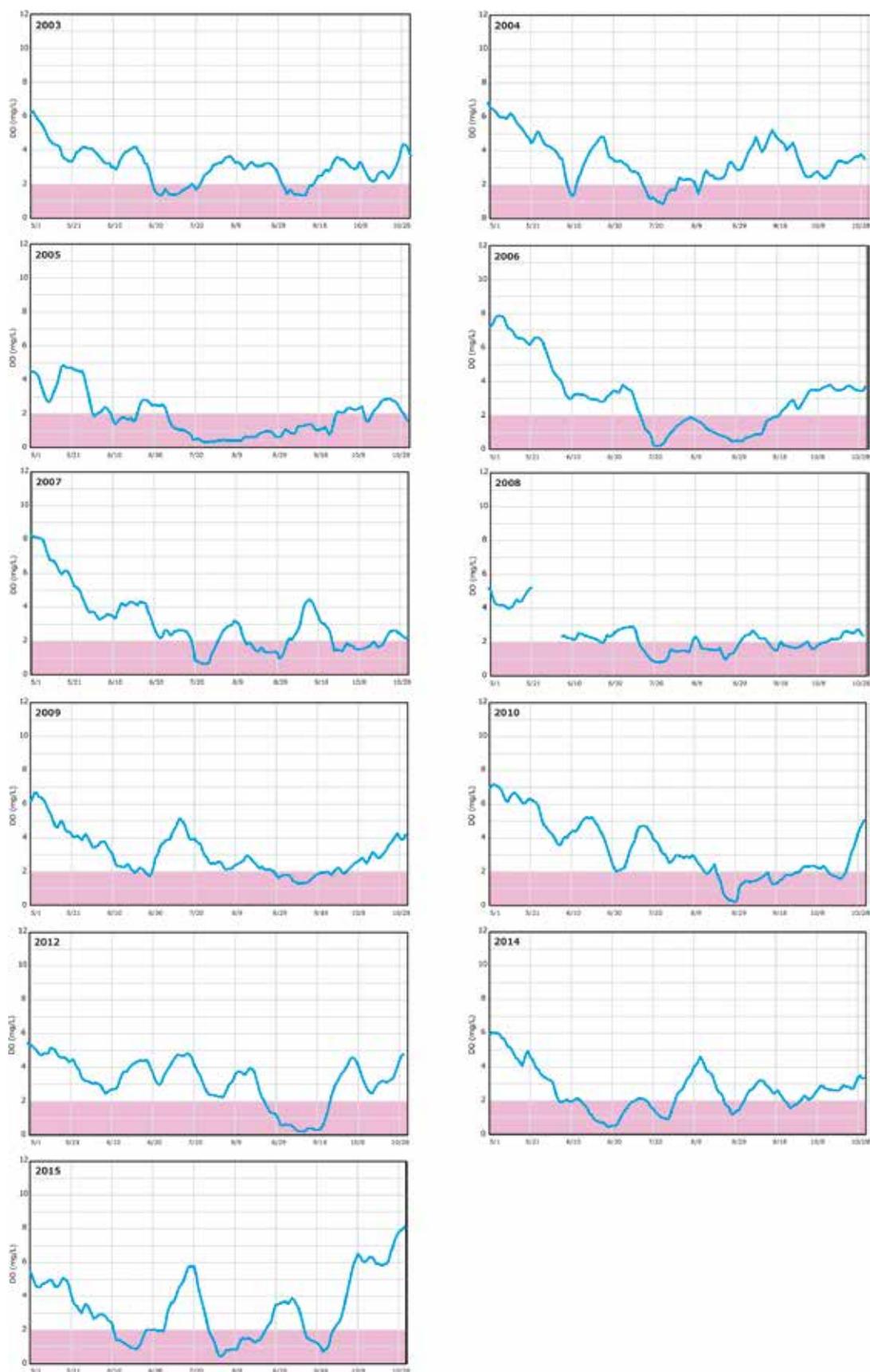


Fig. 3. Temporal variation in DO in the bottom layer in summer periods. The line shows moving average in fifteen days.

図3. 夏季の底層 DO 時間変化. 値は 15 日移動平均値を用いている.

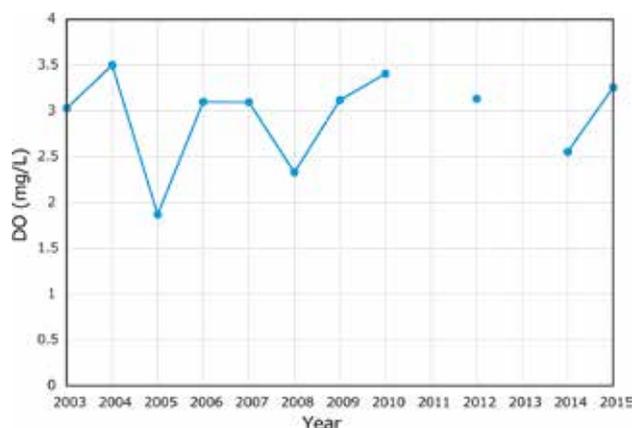


Fig. 4. Mean DO in the bottom layer for each summer period.

図 4. 夏季の底層 DO 平均値の経年変化.

の値の 5% 以下となった場合に海水の鉛直混合が発生して鉛直密度差がなくなったと判定し、その直前 25 時間の表層及び底層の密度の平均を算出する。

③表層と底層の密度差が表層密度の 5% 以下となった時点での底層密度の値が、直前 25 時間の平均表層密度と平均底層密度のどちらに近いかを比較する。平均底層密度よりも平均表層密度に近ければ、表層水の沈み込みによって表底の密度差の低下が発生したと判断する。

④③において、表層水の沈み込みと判断された場合、鉛直密度差がなくなった時点（表層と底層の密度差が表層密度の値の 5% 以下となった時点）から直後 24 時間のデータを観測データから削除する。

上記の方法で表層水の影響を取り除いた後の底層 DO の 15 日移動平均グラフを Fig. 6 に示す。青線が表層水の影響除外前、紫線が表層水の影響除外後である。ここでも、Fig. 3 と同様に、データ数が期間の半分（7.5 日分 = 180 時間分）以上存在する場合にのみ平均化を行っている。

表層水の影響除外前後を比較すると、影響除外後において底層 DO は全体的に低くなる傾向が見られる。加えて、表層水の影響除外前ではデータが存在している（グラフの青線が連続している）にもかかわらず、表層水の影響除外後にはデータが欠如している（グラフの紫線が断線している）

箇所が数箇所確認できる。これは、表層水の沈み込みによるデータの除外ともデータの欠測が組み合わさり、データ数が期間の半数に満たずに平均化が行われなかった場合と、もとデータは存在するが当該期間中に連続的あるいは断続的に表層水の沈み込みが生じていたためにデータが除外され平均化が行われなかった場合とが考えられる。今回の解析では、例えば 2009 年 6 月下旬や 2010 年 8 月下旬といった比較的大規模なデータの欠如は前者のケースであり、2004 年 6 月下旬や 2009 年 7 月中旬頃の小規模なデータの欠如は後者のケースであった。いずれのケースにおいても、青線が存在しているにもかかわらず紫線が断線している箇所では、連続的または断続的に表層水の沈み込みが発生しており、本方法で表層水の影響を適切に取り除くことができていると考えられる。夏季を通じての全体的な DO の変動傾向について、全体的に DO の値が低くなっているほか、小規模なピークが消失しているものの、大きな変化は見られなかった。

表層水の影響を除外後、各年の底層 DO の夏季平均値を求めた。その経年変化を Fig. 7 に示す。青線が表層水の影響除外前、紫線が除外後である。いずれの年においても、表層水の影響の除外後は除外前より DO が低くなっているが、2004 年のように約 0.8 mg/L 低くなる年もあれば、2007 年のように 0.1 mg/L しか変わらない年もあった。また、表層水の影響の除外前と後では長期的トレンドに大きな違いはなく、表層水の底層への沈み込みの影響はその年の貧酸素水塊の規模に影響を及ぼすほど大きなものではないことがわかった。平均値が 2.0 mg/L を下回るのは表層水の影響の除外前と同様に 2005 年のみであったが、除外後は全ての年において 3.0 mg/L を下回っている。2003 年以降、底層 DO は横ばい状態であり、明らかな改善状況は確認されなかった。

5 まとめ

本稿では千葉灯標モニタリングポストのデータを解析し、2003 年から 2015 年までの底層 DO の

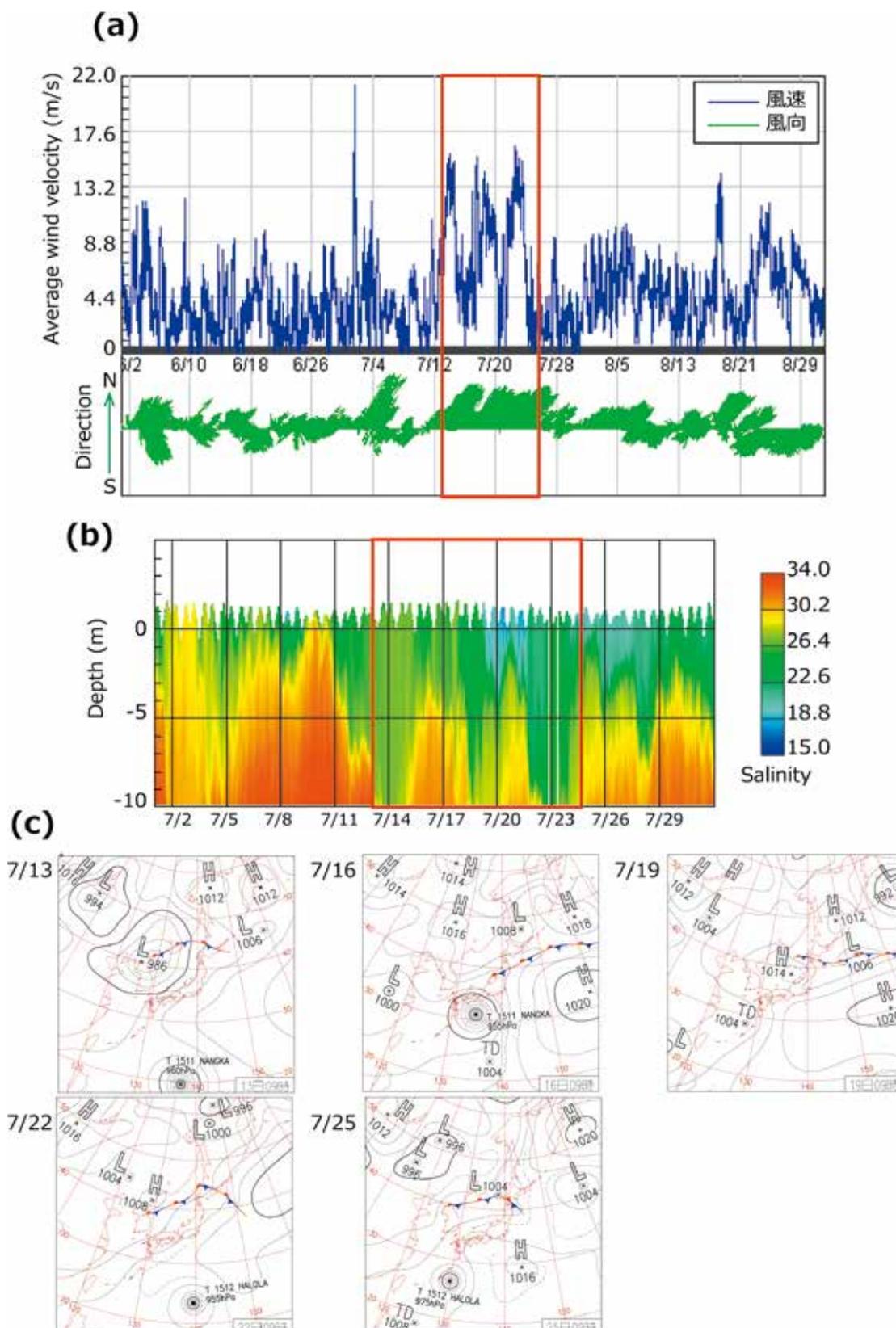


Fig. 5. (a) Temporal variation in average wind velocity and wind direction in the summer period in 2015, (b) Temporal variation in the vertical distribution in salinity in July 2015, (c) Weather map in mid-July 2015 (Source: Japan Meteorological Agency).

図5. (a) 2015年夏季における海上風の風速・風向の変化, (b) 2015年7月における塩分の鉛直分布の変化, (c) 2015年7月中旬の天気図 (気象庁HPより).

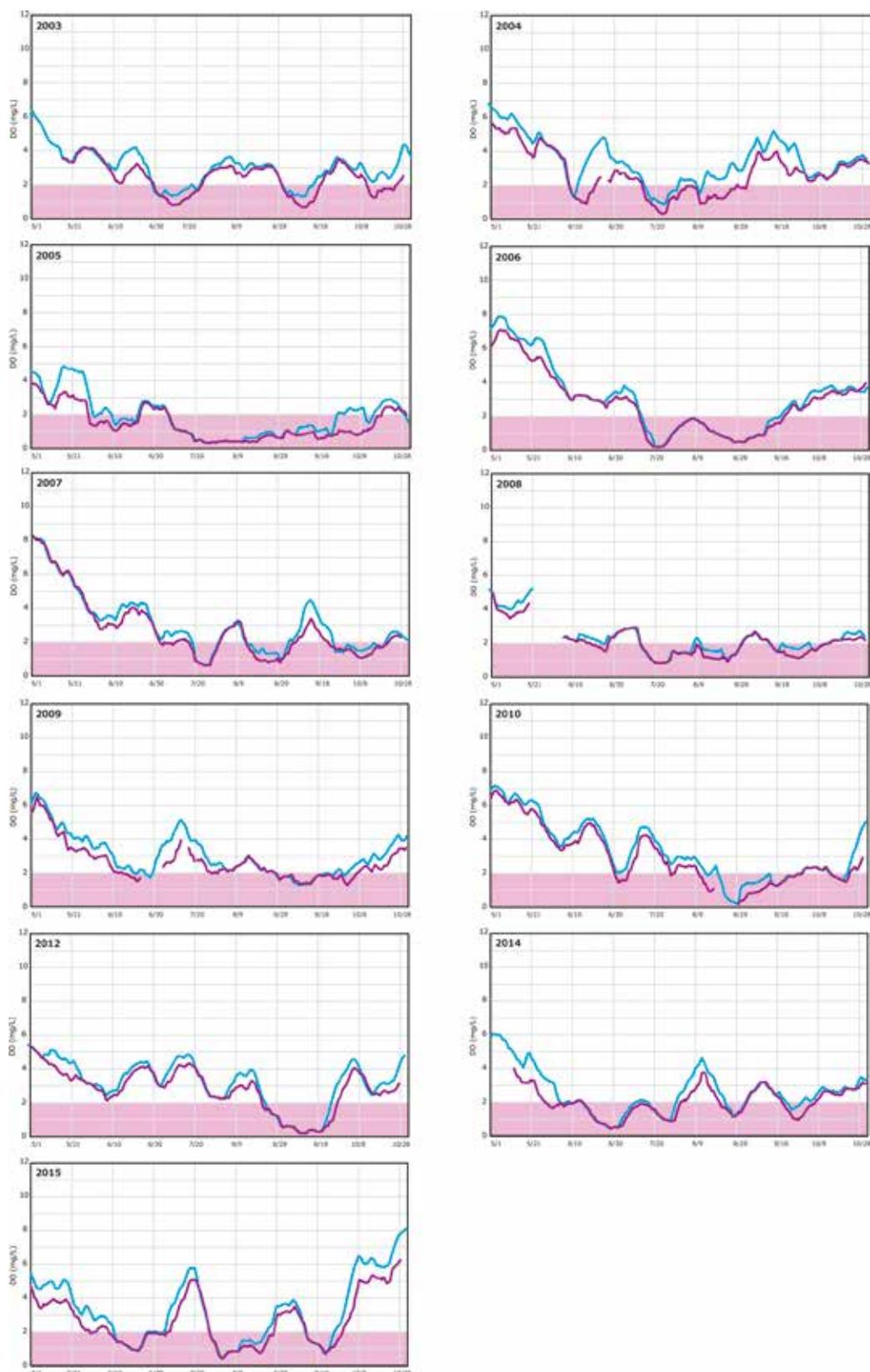


Fig. 6. Temporal variation in DO in the bottom layer after removing the effects of surface water in summer periods. The blue line indicates the mean DO, the purple line indicates the mean DO after removal of the effects of surface water. The both lines show moving averages in fifteen days.

図 6. 表層水の影響を除外した夏季の底層 DO の時間変化. 青色が除外前, 紫色が除外後の値を示す. 値は 15 日移動平均値を用いている.

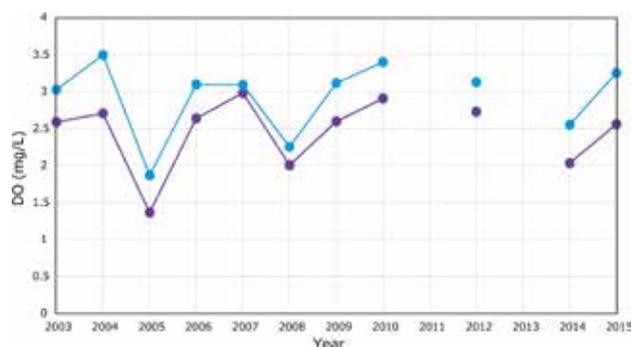


Fig. 7. Mean DO in the bottom layer after removing the effects of surface water for each summer periods. The blue line indicates the mean DO, the purple line indicates the mean DO after removal of the effects of surface water.

図7. 表層水の影響を除外した夏季の底層 DO 平均値の経年変化. 青色が除外前, 紫色が除外後の値を示す.

変化を明らかにした. その結果,

①すべての年において, 春 (4, 5 月頃) から DO が低下し, 冬 (11, 12 月頃) になると回復するというパターンが確認された. また, 底層が貧酸素化する夏季 (5 月~10 月) の間でも, DO が短期的な変動を繰り返し, 一時的に底層の貧酸素化が解消するタイミングが存在していた

②得られたデータから表層水の沈み込みの影響を除外したところ, すべての年において底層 DO は低下し, 夏季平均値はいずれの年も 3.0 mg/L を下回った

③ 2003 年から 2015 年までの夏季のデータを中心に解析した限りでは, 明らかな水質改善状況はみられない

という点が判明した.

本稿では, 底層 DO のデータから表層水の沈み込みに起因する DO 変動分を取り除き, 水質改善状況を確認することを試みたが, 当然ながらこれだけで十分であるとは言えない. 例えば, 海水中の DO は酸素の供給量と消費量のバランスによって決まるので, 水平移流や鉛直拡散といった物理過程を考慮したうえで底層の酸素消費速度を求める必要があるだろう. 加えて, 本稿では主として南偏風卓越時に発生する表層水の沈み込みの影響を除外したが, DO 変動に影響を及ぼす気象条件

がこの南偏風だけであるとは限らない. どのような気象条件が DO の変動に寄与するのかを特定し, その影響を除外したうえで底層 DO の変動を正確に把握し, 東京湾の水質は改善しているのか, 東京湾再生のための取り組みは成果をあげているのかを検証する必要がある.

文 献

- 小倉紀雄 (1993) 東京湾—100 年の環境変遷—, 恒星社厚生閣, p. 193, 東京.
- 日本水産資源保護協会 (2005) 水産用水基準 2005 年版, http://ay.fish-jfrca.jp/kiban/kankyuu/hourei/yousui/suisan_kijyun.html.
- 山尾理 (2004) 強成層期の東京湾奥における水質の短期変動に対する海上風の影響, 海洋情報部技報, 22, 78-84.
- 山尾理 (2006) 東京湾奥部における底層溶存酸素濃度の時間変化 (2003 年-2005 年), 海洋情報部技報, 24, 116-126.
- UNESCO (1981) Background papers and supporting data on the international equation of state of seawater 1980., Unesco Technical Papers in Marine Science, 38, 7-9.
- 気象庁 (2015) 日々の天気図 2015 年 7 月, <http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/data/hibiten/2015/1507.pdf>.

要 旨

海上保安庁海洋情報部では, 千葉灯標にモニタリングポストを設置し, 水質, 海潮流や海上風について 24 時間連続観測を実施している. 本稿では, 2003 年から 2015 年における, 東京湾奥部の底層溶存酸素量 (DO) の時間変化を明らかにした. さらに, この底層 DO の時間変化から, 表層水の沈み込みに起因する変動分を取り除き, 東京湾の水質改善状況の評価を試みた. その結果, 2003 年から 2015 年においては, 明らかな水質改善傾向は確認されなかった.