

## 東京湾の盤洲干潟沖における貧酸素水塊の分布とその要因

大畑 聡<sup>1a†</sup>, 梶山 誠<sup>1</sup>, 八木 宏<sup>2b</sup>

## Factors affecting distribution of hypoxia off the Banzu tidal flat in Tokyo Bay

Satoshi OHATA<sup>1a†</sup>, Makoto KAJIYAMA<sup>1</sup> and Hiroshi YAGI<sup>2b</sup>

2007–2008年の観測データから、東京湾の盤洲干潟沖へ貧酸素水塊が分布する現象は、2つのパターンに類別されることを明らかにした。その一つは、南偏風が連吹するときに外海から冷たく重い海水が浸入するときに発生し、それまで湾中央部の底層に分布していた貧酸素水塊が同域で中層へ分布深度が変わるとともに、盤洲干潟沖へも移動した。このとき盤洲干潟沖では、貧酸素水塊がごく浅い水深にまで及ぶため、これが干潟へ波及する危険性が高まった。もう一つは、北偏風が数日以上吹き続く時に、湾中央部の底層に分布していた貧酸素水塊が盤洲干潟沖へ移動する現象であった。この時、盤洲干潟沖では貧酸素水塊はごく底層にのみ分布するので、干潟の貝類に影響を与える可能性は低い。しかし、同海域にはトリガイ等有用生物が生息しており、これらの漁場形成には影響を与えたと考えられた。

The phenomenon of hypoxia distribution off the Banzu tidal flat of Tokyo Bay was classified into two patterns from 2007–2008 observation data. One pattern occurred when cold and heavy seawater entered the bottom layer from outside the bay when a south wind persisted. At this time, hypoxia that was distributed in the bottom layer of the bay center moved to the middle layer in the same sea area and also moved off the Banzu tidal flat. In the offshore area of the Banzu tidal flat, hypoxia was distributed very shallowly, so the risk of this spreading to the Banzu tidal flat increased. The other pattern was that when a north wind continued blowing for more than a few days, hypoxia distributed in the bottom layer of the bay center moved off the Banzu tidal flat. At this time, hypoxia was distributed only in the bottom layer off the Banzu tidal flat, so it was unlikely that hypoxia affected shellfish in the tidal flat. However, fishery resources such as Japanese cockles are located in this area, and it seemed that these fishing ground formations could be influenced by hypoxia.

**Key words:** hypoxia, Tokyo Bay, Banzu tidal flat, oceanic water

## はじめに

東京湾の木更津市沿岸に広がる盤洲干潟は、アサリ *Ruditapes philippinarum* を採集する漁場になっており、1964–2006年まで毎年2,000 t以上漁獲されてきた。2007年にカイヤドリウミグモ *Nymphonella tapetis* の大量寄生によりアサリがへい死したため (小林・鳥羽, 2014)、2008–2010年の

漁獲量は100 t台まで減少したが、2011–2013年には300–600 tまで回復した (千葉県農林水産統計協会, 1965–2013)。このように、カイヤドリウミグモの寄生による一時的な大量へい死が見られたものの、その漁獲量は多く、盤洲干潟は東京湾において重要なアサリの漁場になっている。また、盤洲干潟沖 (水深10–20 mほど) には、例年、春から

2016年9月8日受付, 2017年5月18日

<sup>1</sup> 千葉県水産総合研究センター東京湾漁業研究所

Tokyo Bay Fisheries Laboratory, Chiba Prefectural Fisheries Research Center, 3091 Kokubo, Futtsu, Chiba 293–0042, Japan

<sup>a</sup> 現所属: 千葉県水産総合研究センター

Chiba Prefectural Fisheries Research Center, 2492 Hiraiso, Chikura-cho, Minamiboso, Chiba 295–0024, Japan

<sup>2</sup> 国立研究開発法人水産研究・教育機構水産工学研究所

National Research Institute of Fisheries Engineering, 7620–7 Hasaki, Kamisu, Ibaraki 314–0408, Japan

<sup>b</sup> 現所属: 防衛大学校

National Defense Academy, 1–10–20 Hashirimizu, Yokosuka, Kanagawa 239–8686, Japan

† s.oohat@pref.chiba.lg.jp

初夏にトリガイ *Fulvia mutica* を採集する漁場が形成されている (大畑, 2015).

このように盤洲干潟およびその沖合は、いずれも貝類を採集する好漁場となっている。しかし盤洲干潟では、夏から秋季にかけてしばしば海水中の溶存酸素濃度 (以下, DO とする) が低下し、アサリ等の貝類がへい死する事例が起きている (柿野ほか, 1984)。最近でも、2008年8月にアサリ、ハマグリ *Meretrix lusoria* およびマテガイ *Solen strictus* がへい死する現象が発生したが、これには貧酸素水塊が関わった可能性が指摘されており (土屋, 2009)、同水塊によるへい死もアサリの漁獲量に影響を与えている可能性がある。また盤洲干潟沖では春から初夏にトリガイが漁獲され、これは前年の秋季に同海域で貧酸素水塊が解消した後に着底した個体になっている (大畑, 2015)。着底後のトリガイの成長の速さが毎年ほぼ同じであることから (大畑ほか, 2013)、貧酸素水塊の解消時期が翌年春季の漁期開始に直接関わっていると考えられている。

このように、盤洲干潟および盤洲干潟沖はいずれも貝類の好漁場であるにもかかわらず、貧酸素水塊の影響を受けやすい海域となっているが、どのような時に盤洲干潟沖に貧酸素水塊が分布し、これが干潟へ波及するかについて、詳細は明らかになっていない。

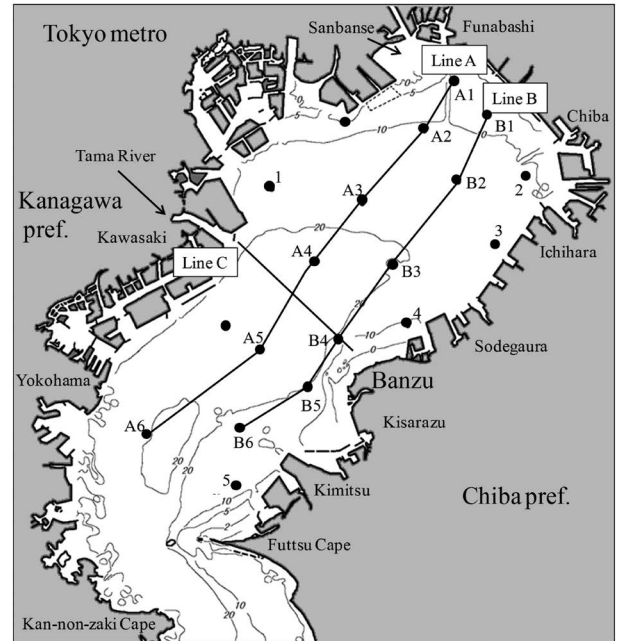
東京湾では貧酸素水塊に関する様々な研究がおこなわれており、これまでに風に対する貧酸素水塊の挙動 (松山ほか, 1990; 蔵本・中田, 1991; 中辻ほか, 1995, 宇野木・久保田 1996) や外海水の底層侵入による貧酸素水塊の中層化 (藤原ほか, 2000; 八木ほか, 2008) が示されている。このような外海水の侵入による貧酸素水塊の中層化は、伊勢湾でも確かめられている (高橋ほか, 2000)。また大村湾では、外海水が浸入することにより湾内の貧酸素水塊が湾奥へ移動することが明らかになっている (須崎ほか, 2013; 2015)。

千葉県水産総合研究センター (以下、千葉水総研セ) では、貧酸素水塊が発生する春から秋季に、東京湾内の全域で定期的に水質観測を実施している。そこで、前述した既往知見も踏まえて、上記の水質データを解析することにより、どのようなときに盤洲干潟沖に貧酸素水塊が分布し、干潟に波及するのかを解析した。

なお、貝類は海水中の DO が  $1.5 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$  以下になると生息が危険になる (柳, 1989)。本研究は、DO の低下が貝類の生残に及ぼす影響を検討するため、DO が  $1.5 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$  以下の海水を貧酸素水塊とした。

## 材料と方法

水質観測は、千葉水総研セの沿岸調査船わかふさにより東京湾内 19 観測点で実施した (Fig. 1)。観測には多項目水質計 (MWQ-2, 三洋メトロジクス社製) を使用し、各観測点で海面から底層まで鉛直的に測定した。観測項目は水温、



**Figure 1.** Map of the study area. Closed circles show the water quality observation stations. Wind speed and direction are observed at station 2. The isobaths 0, 2, 5, 10 and 20 m are indicated with gray lines.

塩分および DO であり、多項目水質計の降下時に 0.5 秒間隔で測定された値から 1 m 間隔の鉛直データを得た。いずれの観測も、水質の鉛直方向での急変を正確に捉えられるよう、多項目水質計は  $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以下の速度で降下させた。また、DO センサーはエアレーションによる酸素飽和海水および亜硫酸ナトリウム水溶液で作成した無酸素海水で検定し、適時補正をおこなった。データの解析期間は 2007–2008 年で、観測の頻度は 2 週間に 1 回であった。

貧酸素水塊が分布する深さの変化は、湾内に設定した 2 本の縦断ラインで把握した (Fig. 1)。このうちライン A は、湾奥の船橋沖 (St. A1) から湾軸に沿って南下し St. A6 へ至るように設定した。ライン B は、盤洲干潟沖の Sts. B4, B5 を含み、かつライン A と平行して湾を縦断するように設定した。

千葉水総研セでは、Table 1 に概要を示す三次元マルチレベル流動モデルと低次生態系モデルを組み合わせた数値モデルで 6 時間おきに貧酸素水塊の分布を推定し、漁業者へ情報を発信している (Table 1)。このモデルは、推定値を観測値で同化することにより、推定値と観測値の決定係数 ( $R^2$ ) が 0.73 と高い精度を有している (石井ほか, 2011)。そこで、この数値モデルの推定値を使用することにより、観測期間 (2 週間) より短い数日規模での貧酸素水塊の挙動を解析した。モデルの計算領域は東京湾を含む  $50 \times 70 \text{ km}$ 、水平方向のメッシュサイズは 1 km であった。鉛直方向は 20 層で、各層の厚みは 0–30 m では 2 m、30–50 m では 5 m

**Table 1.** Conditions and parameters used in the numerical model.

Content	Condition/Parameter
Grid size and number	1 km, 3500 (50×70)
Layer number	20
Boundary condition of temperature and salinity	Based on the harmonic analysis data observed by the Chiba Prefectural Fisheries Research Center
River discharges	Quality volume water of 3 rivers which was converted from the water level by Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Japan
Meteorological data	Observed data by Japan Meteorological Agency, Hydrographic and Oceanographic Department and Chiba Federation of Fisheries Co-operative Associations
Horizontal eddy viscosity/diffusivity	$2.0 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$
Vertical eddy viscosity/diffusivity	Predicted by the turbulence closure model
Bottom coefficient friction	0.0026

であった。計算に使用する気象、河川水位のデータは、気象庁のアメダスデータや国土交通省の水文水質データベースを使用した。また、計算期間中は千葉水総研セ等の水質観測データで推定値を同化した。

東京湾の流況は風の影響を強く受けることから(宇野木, 1993), 海上保安庁海洋情報部がSt. 2で1時間おきに測定した風向、風速のデータを使用し、風と貧酸素水塊の分布との関係を調べた。

## 結果

### 現地観測結果

#### 盤洲干潟沖の底層DOの年間変動

盤洲干潟沖の3観測点(Sts. 4, B4, B5)における2007–2008年の底層DOの経時変化をFig. 2に示す。St. 4では、1–4月の底層DOは $4 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上の値を示したが、5月を過ぎるとDOは次第に減少し、7月中旬になると $1.5 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下もしくはそれに近い値まで低下した(2007年は7月18日に $1.29 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ , 2008年は7月15日に $1.55 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ )。その後、2007年は、8月6日を除くと、10月1日までおおむね $1.5 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下で推移し、2008年は9月29日に再び $1.5 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下が観測された。11月になると両年ともDOは上昇し、12月になると1–4月と同水準にまで回復した。Sts. B4, B5の底層DOもSt. 4とほぼ同様な変化を示し、7–10月に貧酸素水塊がたびたび観測された。

これらから、盤洲干潟沖で貧酸素水塊が観測された7–10月を対象期間として解析を進めた。

#### 底層における水温およびDOの空間分布

2007, 2008年の7–10月に観測された底層水温および底層DOの平面分布図をFig. 3に示す。湾西部から中央部では、2007年7月2日と同8月20日に $17^\circ\text{C}$ 以下、同9月18日に $18^\circ\text{C}$ 以下の冷水域が分布し、比較的水温が高い湾北部と水温差が大きくなった。このうち8月20日、9月18日には、盤洲干潟沖(Sts. 4, B4, B5)で底層のDOは $1.5 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下を示した(Fig. 2)。2008年は、7月2日、7月15日および

8月18日に湾西部から中央部に $17^\circ\text{C}$ 以下の冷水域が分布し、湾北部との水温差が顕著になった。このうち7月15日、8月18日に、盤洲干潟沖の底層DOは、8月18日のSt. 4を除くと、 $1.5 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下もしくはそれに近い値を示した(Fig. 2)。

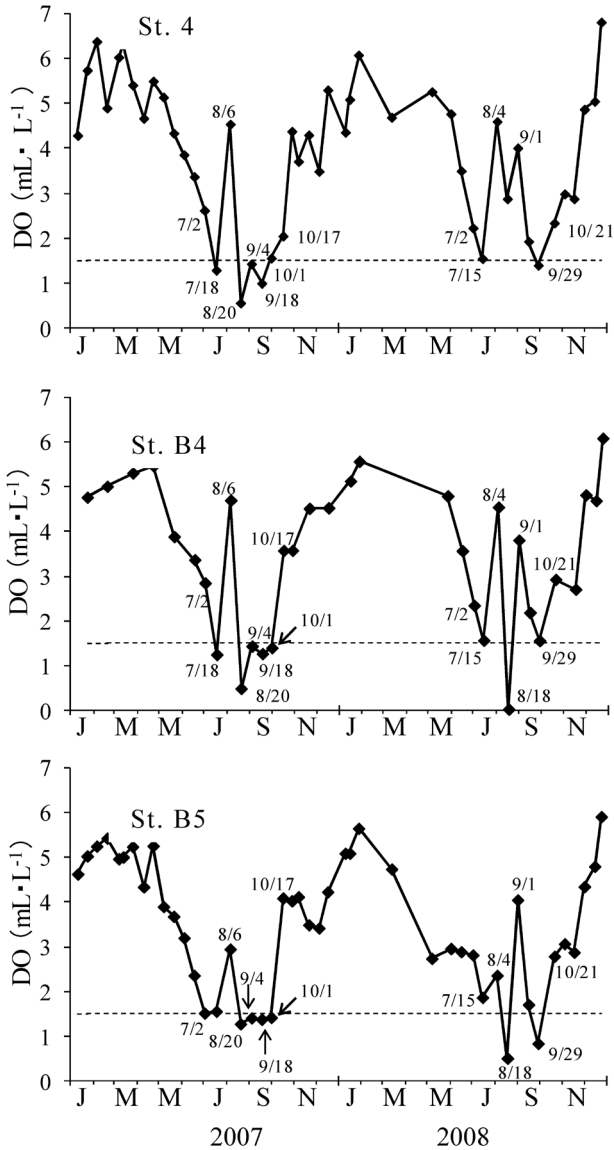
一方、盤洲干潟沖では、上記の観測日以外にも底層のDOが $1.5 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下もしくはそれに近い値を示した。このうち2007年7月18日は、底層水温に前述した湾西部から中央部での水温低下や湾北部との顕著な水温差が見られず、 $20\text{--}21^\circ\text{C}$ の海域が湾北東部のSt. 2から富津沖まで東岸沿いに分布した。同じく盤洲干潟沖で底層のDOが低かった2007年9月4日、同10月1日および2008年9月29日もそれぞれ $20\text{--}21^\circ\text{C}$ ,  $21\text{--}22^\circ\text{C}$ ,  $23\text{--}24^\circ\text{C}$ の海域がほぼ同様に分布し、湾北東部から盤洲干潟沖にかけての東岸沿いで水温はほぼ一様になった。

Fig. 3から、盤洲干潟沖に貧酸素水塊が分布するとき、底層の水温分布は大きく2つに分類された。そこで、湾西部から中央部で水温が低下し北部との水温差が顕著になった2007年8月20日、同9月18日、2008年7月15日および同8月18日をパターン1、湾東岸沿いで水温がほぼ同じになり、北部と中央部の水温差が小さい2007年7月18日、同9月4日、同10月1日および2008年9月29日をパターン2とし、それぞれのパターンについて盤洲干潟沖の貧酸素化の状況を解析した。

#### ラインA, BにおけるDOの鉛直断面分布

ラインA, Bで2007年7–10月に観測されたDOの鉛直分布をFig. 4に示す。なお、図中のI, IIはそれぞれ前述した水温分布のパターン(パターン1, 2)が見られたことを示している。パターン1に分類された8月20日および9月18日に、ラインAでは、それぞれSt. A5およびSts. A4, A5で底層DOは $1.5 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上あり、貧酸素水塊はそれより浅い層(8月20日は水深11–22 m, 9月18日は16–18 m)に分布した。またラインBでは、8月20日の盤洲干潟沖(Sts. B4, B5)で、貧酸素水塊が底層から水深11 mまで鉛直的に厚く





**Figure 2.** Changes of dissolved oxygen at bottom layer during the two years in the stations 4, B4 and B5. Dashed lines indicate the hypoxia standard ( $1.5 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ ).

分布した。なお、底層の水温分布ではパターン1に該当したものの盤洲干潟沖に貧酸素水塊が分布しなかった7月2日 (Fig. 3) は、ラインAで貧酸素水塊の中層分布は見られなかった。一方、パターン2に分類された7月18日、9月4日および10月1日に、ラインAのSt. A5で貧酸素水塊は見られず、同水塊はそれより北部 (7月18日ではSts. A2–A4, 9月4日ではSts. A1–A4, 10月1日ではSts. A1–A3) に分布した。またラインBの盤洲干潟沖 (Sts. B4, B5) では、貧酸素水塊はおおむね水深20 mより深い層のみに分布した。

ラインA, Bにおける2008年7–10月のDOの鉛直分布を Fig. 5に示す。パターン1に分類された7月15日に、ラインAのSts. A4, A5ではそれぞれ水深10–13 m, 14–20 mに貧

酸素水塊が分布した。同じくパターン1に分類された8月18日に、ラインAのSts. A4, A5ではそれぞれ水深12–22 m, 水深15–19 mに貧酸素水塊が分布した。またラインBのSts. B4, B5では、7月15日、8月18日には水深10 m付近に貧酸素水塊が分布し、特に8月18日のSt. B5では同水塊が水深5 mにまで及んだ。なお、底層の水温分布ではパターン1に該当したものの盤洲干潟沖に貧酸素水塊が分布しなかった7月2日 (Fig. 3) は、ラインAで貧酸素水塊の中層分布は見られなかった。一方、パターン2に分類された9月29日に、ラインAでは湾北部のSts. A1–A3の底層のみに貧酸素水塊が見られ、ラインBのSts. B4, B5では、それぞれ水深15 m, 12 m以深のみに貧酸素水塊が分布した。

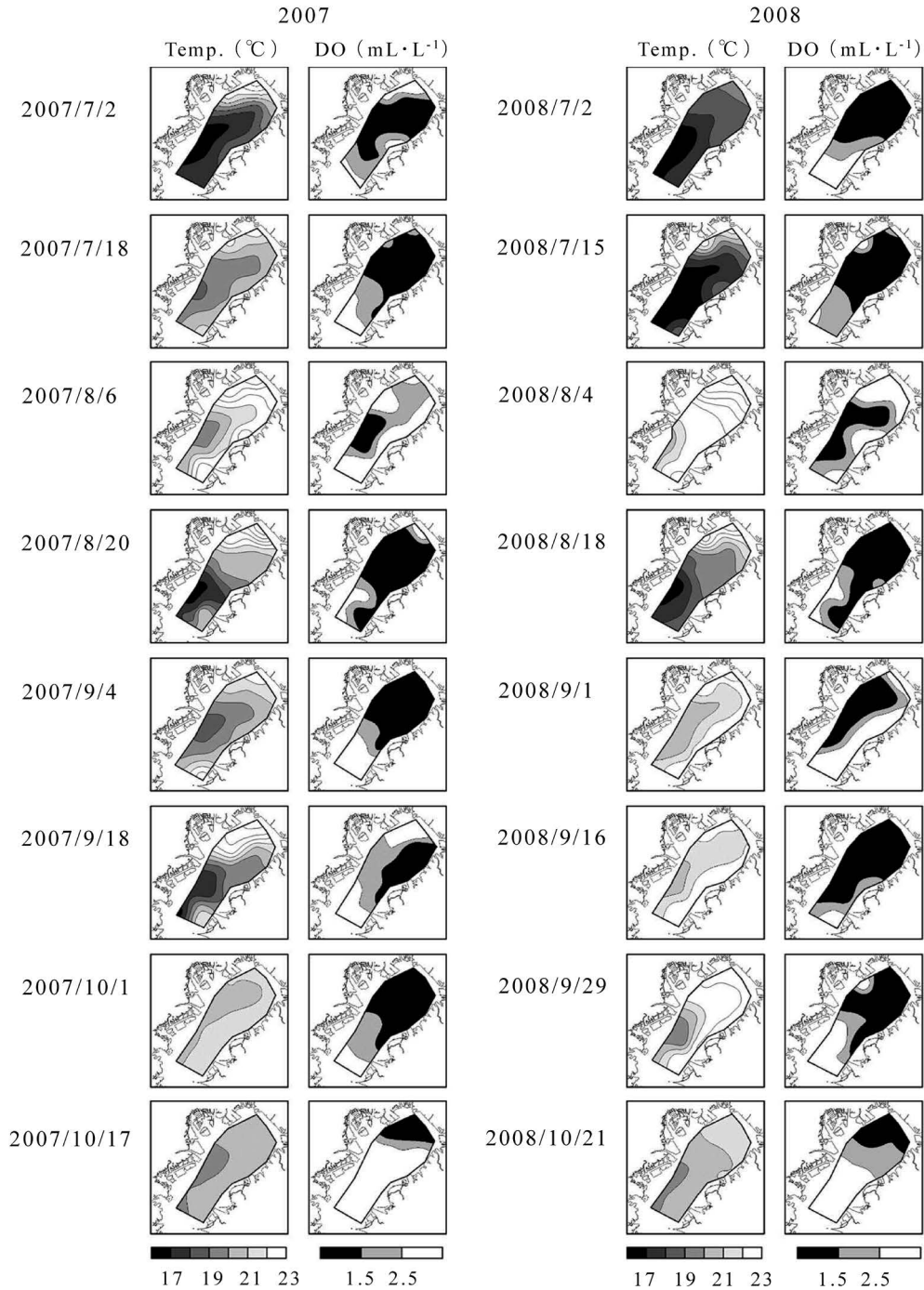
**パターン1, 2の発生時の水塊特性**

パターン1, 2の発生時について、観測された海水の特性をT-S図として整理しその構造の特徴を調べた。パターン1のうち、貧酸素水塊の中層化および盤洲干潟沖の貧酸素化が顕著であった2007年8月20日、2008年8月18日について、盤洲干潟沖 (St. B5) および湾中央部 (St. A5) の塩分、水温の鉛直分布をT-S図として示す (Fig. 6)。グレーおよび黒色の線はそれぞれSts. A5, B5を示し、そのうち太線の部分は貧酸素水塊が分布した層を表している。両日とも、貧酸素水塊が分布した層では2地点の水温、塩分の曲線は重なり、水塊特性はほぼ同一であった。このことは盤洲干潟沖の貧酸素水塊は湾中央部の中層化した貧酸素水塊と関係が深いことを示している。

一方、パターン2について、盤洲干潟沖 (Sts. 4, B4, B5)、湾北東部 (Sts. 2, 3)、湾南部 (Sts. A6, B6, 5) および湾中央部 (Sts. A4, A5) の底層水温、底層塩分の水塊特性をT-S図として Fig. 7に示す。2007年7月18日 (Fig. 7a) に、盤洲干潟沖3点 (△) と湾北東部2点 (□) の水温、塩分は、図中の方角枠で示す領域 ( $19.74\text{--}20.03^\circ\text{C}$ ,  $32.43\text{--}32.78$ ) に見られ、水温、塩分はほぼ同じであった。その他の3事例においても、湾北東部 (□) と盤洲干潟沖 (△) の水温、塩分は方角枠で示す領域内に集中しており、2海域の水温、塩分はほぼ同じであった。

**風向および風速の観測結果**

St. 2における風向および風速を Fig. 8に示す。図中のI, IIはそれぞれパターン1, 2が見られた日を表している。また、N, Sはそれぞれ北偏風、南偏風を表している。パターン1に分類された4事例のうち2007年8月20日は、一時的に北偏風が吹くことはあったが、8月1日 (19日前) からほぼ継続して南偏風であった。2007年9月18日は観測開始時刻の3.6日前 (87時間前) から南偏風であった。2008年7月15日は、13.9日前 (7月1日) からほぼ南偏風であった。また2008年8月18日は、16日以降は北偏風だったものの、8月1日から16日まではおおむね南偏風が連吹した。一方、底層の水温分布ではパターン1に類型されたものの貧酸素水塊の中層分布が見られなかった2007年7月2日および



**Figure 3.** Distributions of the temperature and dissolved oxygen at bottom layer in Tokyo Bay, (a) July-October, 2007 and (b) July-October, 2008.

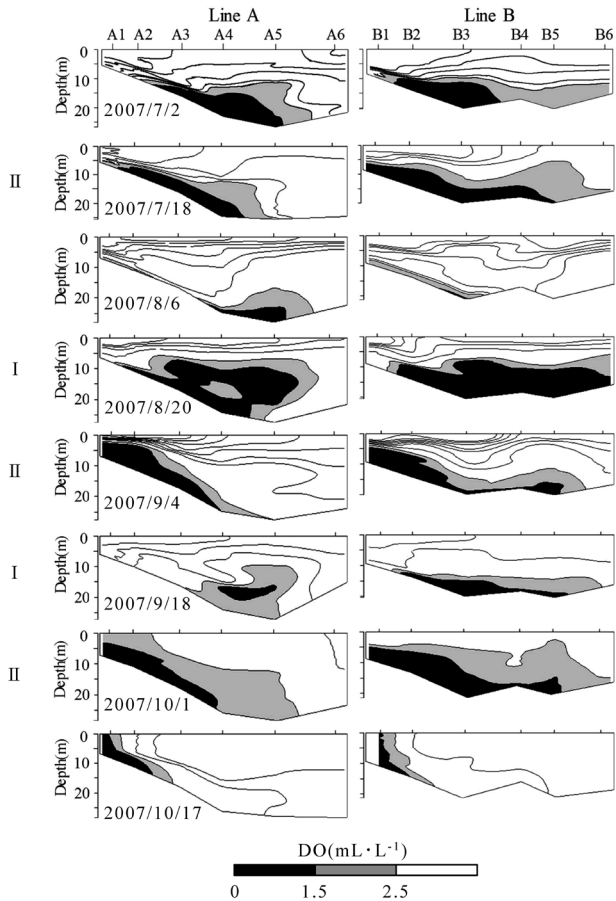
2008年7月2日の直前には、強い南偏風が数日にわたって連吹することはなかった。

パターン2に分類された2007年7月18日、2007年9月4日および2007年10月1日は、それぞれ観測開始時刻の4.4日前（105時間前）、6.6日前（159時間前）および2.9日前（69時間前）から北偏風であった。なお、2007年8月24日か

ら8月28日の期間は欠測であったが、気象庁の千葉特別地域気象観測所の観測データ<sup>1</sup>によると同期間中は南偏風であった。また、2008年9月29日は観測開始時刻の3.0日前（71時間前）から北偏風であった。

**数値モデルによる計算結果**

現地観測はおよそ2週間の間隔で行っており、観測間の貧

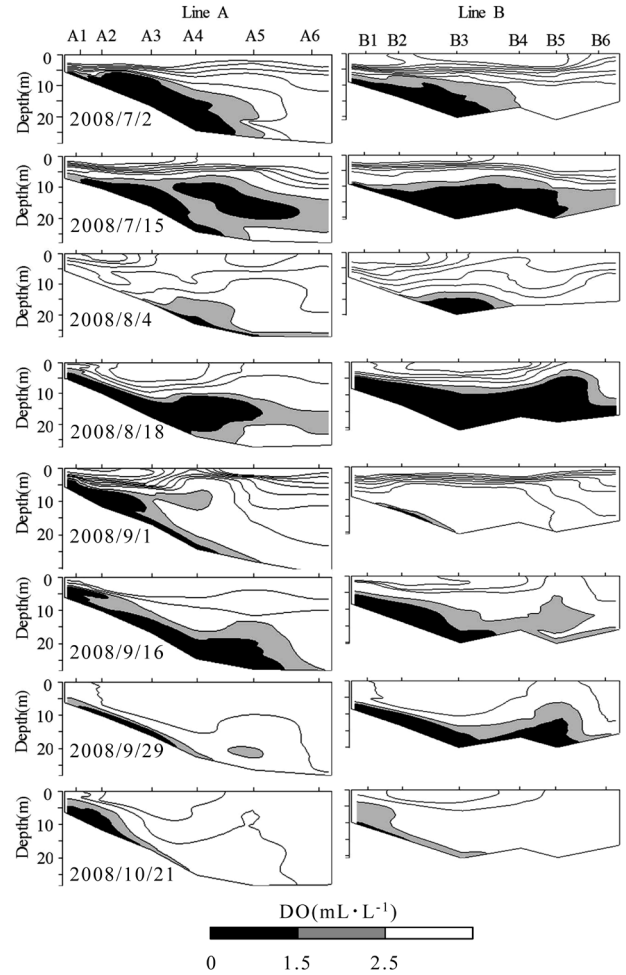


**Figure 4.** Vertical distributions of dissolved oxygen at lines A and B from July-October, 2007. Black and gray regions indicate where the dissolved oxygen is under 1.5 and 1.5–2.5  $\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$ , respectively. I and II indicate the pattern 1 and 2, respectively.

酸素水塊の挙動は把握できない。そこで、現地観測結果を補完し、より詳細にその挙動を確かめるために数値モデルで貧酸素水塊の分布を把握した。

#### パターン1発生時

パターン1の4事例のうち2008年8月18日前後について、数値モデルで盤洲干潟沖の貧酸素化を調べた (Fig. 9)。8月6日の時点では、ラインAで貧酸素水塊の中層化は起きていなかった。また、盤洲干潟からSt. B4を経て多摩川へ向かうように設定したラインC (Fig. 1) を見ると、盤洲干潟沖 (St. B4) に貧酸素水塊は見られなかった。しかし8月10日になると、ラインAで貧酸素水塊の中層化が起これ、ラインCのSt. B4から盤洲干潟にかけては水深5 mまで貧酸素水塊が及んだ。この後、ラインAでの貧酸素水塊の中



**Figure 5.** Vertical distributions of dissolved oxygen at lines A and B from July-October, 2008. Black and gray regions indicate where the dissolved oxygen is under 1.5 and 1.5–2.5  $\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$ , respectively. I and II indicate the pattern 1 and 2, respectively.

層分布は8月14日にも見られた。また、St. B4から盤洲干潟にかけては、8月14, 18日にも貧酸素水塊が水深5–10 mの浅場に分布していた。

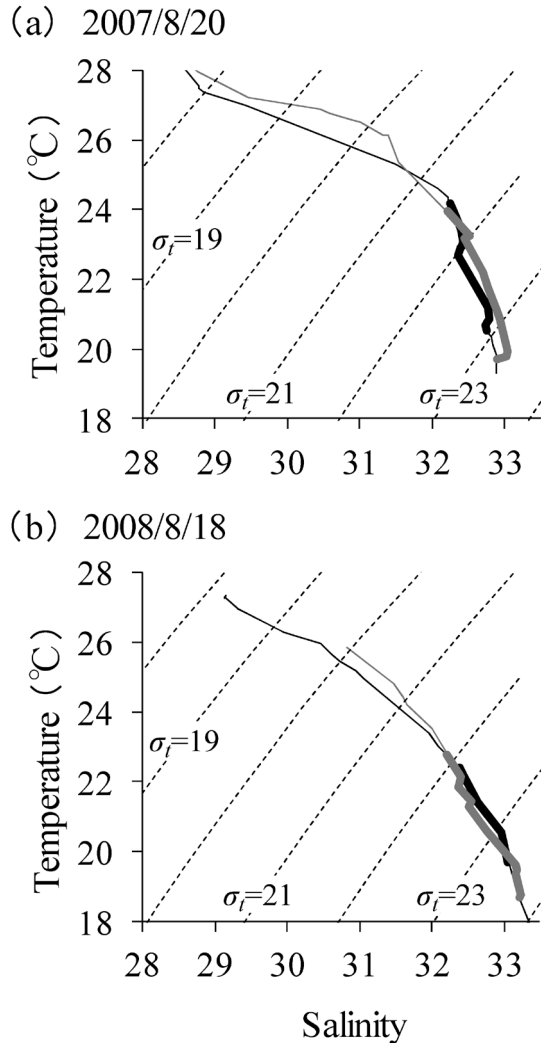
同じ数値モデルで求めた8月のSts. B4, B5の水深5 m層の流況をFig. 10に示す。図では、25時間移動平均を施すことにより潮汐成分を除去している。これによると、8月13–16日にかけて、Sts. B4, B5では盤洲干潟へ向かう北東への流れが3日ほど継続して起きていた。

#### パターン2発生時

パターン2では、湾北東部から東岸沿いで底層の水温が一樣になり (Fig. 3)、湾北東部と盤洲干潟沖の底層水温、塩分はほとんど同じになった (Fig. 7)。またいずれの事例でも、観測時刻の3日前から北偏風が吹いていた (Fig. 8)。そこで、北偏風に伴う底層水の動きを把握するために、数値モデルで、底層の水温、DO分布および湾東岸沿い (Sts.

<sup>1</sup> [http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/daily\\_s1.php?prec\\_no=45&block\\_no=47682&year=2007&month=08&day=&view=g\\_wsp](http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/daily_s1.php?prec_no=45&block_no=47682&year=2007&month=08&day=&view=g_wsp), 2014年6月6日





**Figure 6.** T-S diagram at the time of pattern 1, (a) on 20 August, 2007 and (b) on 18 August, 2008. Gray and black lines indicate the stations A5 and B5, respectively. Bold lines indicate where dissolved oxygen is under  $1.5 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ .

2-4, B3-B5) の日平均流況を求めた。北偏風による底層水の挙動は4事例いずれも同様であったため、一例として2007年9月4日の1週間前の計算結果をFig. 11に示す (Fig. 11)。なお、図中のDOで黒く表示された海域は底層に貧酸素水塊が分布した海域を表している。また、図中の矢印は各観測点での日平均の流向、流速を表している。南偏風が吹き続けた8月28日には (Fig. 8)、水温 $21\text{--}22^\circ\text{C}$ の水塊および貧酸素水塊は湾中央部を中心に分布していた。また、湾東岸沿いの日平均の流況はおおむね湾口もしくは湾西岸へ向かう流れであった。29日から風向きが北偏風に変わり (Fig. 8)、それから1日後の30日になると、水温 $21\text{--}22^\circ\text{C}$ の水塊は28日より北部へ分布が変わった。貧酸素水塊も28日には見られなかった北部へ移動するとともに、28日より盤洲干潟へ向かって分布が広がった。さらに北

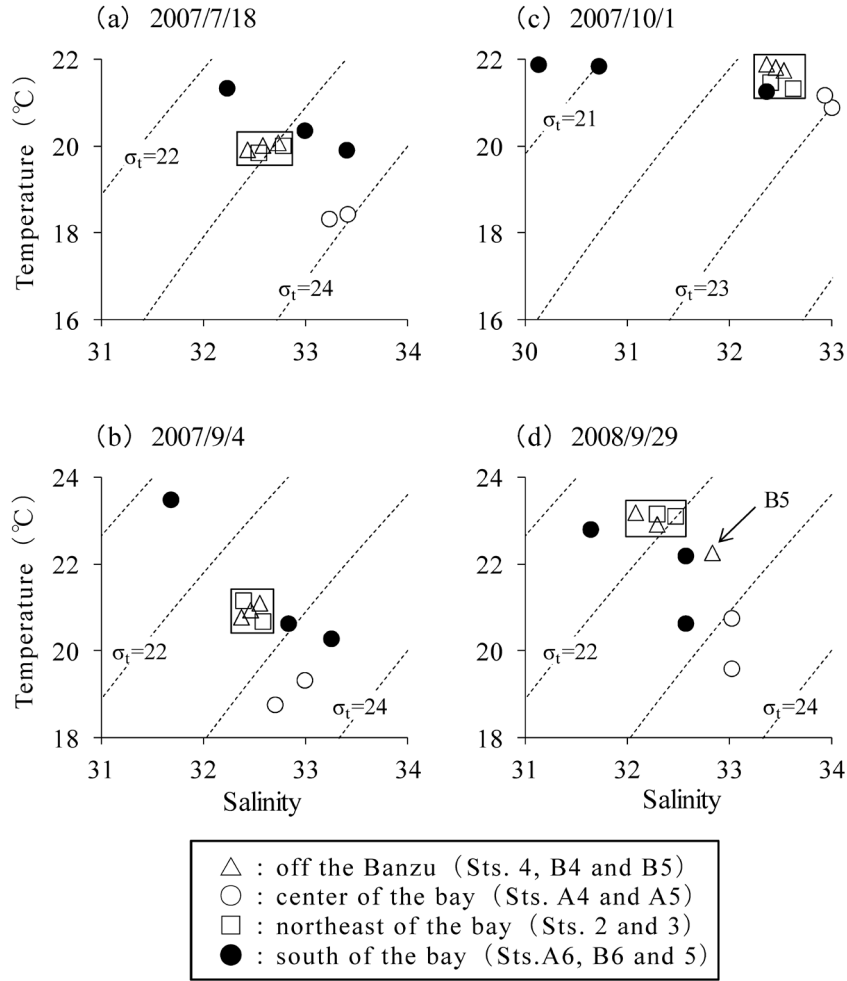
偏風が吹き続けた9月3日になると、湾北東部と盤洲干潟沖の水温は $21\text{--}21.5^\circ\text{C}$ でほぼ同じになり、 $21^\circ\text{C}$ の等水温線が湾軸に沿って分布した。また、貧酸素水塊は、8月30日と同様に北部を中心に分布するとともに、盤洲干潟のすぐ前面にまで及んだ。東岸沿いの流況は、北偏風になってから1日後の8月30日にはSt. 4以外の観測点で湾奥 (北東) へ向かう流れが強まったが、北偏風になってから5日後の9月3日にはSts. 2, 3, B3の流況は湾東岸へ向かう流れに変わった。

#### 考察

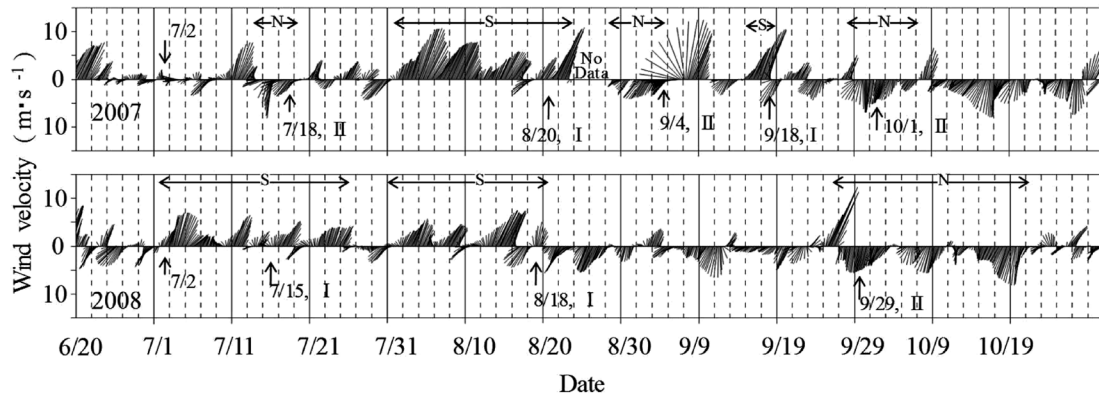
2007, 2008年に、盤洲干潟沖では7月中旬から貧酸素水塊が分布し始め、その後10月までたびたび同水塊が分布した (Fig. 2)。この時、底層の水温分布は2つのパターンに分けられ、このうちパターン1では、湾西部から中央部で底層の水温が低下し、水温が高い北部との差が顕著になった。また湾中央部では、貧酸素水塊は中層に分布し (Figs. 4, 5)、底層には低温で高塩分な海水が分布した (Fig. 3)。

東京湾では、外海水が侵入することにより湾内の貧酸素水塊が短期的に拡大、変動することが示されている (鬼塚, 1989)。また、低温、高塩分で密度が重い外海水が底層から侵入することにより、湾中央部でそれまで底層に分布していた貧酸素水塊が同域で中層に移動することも明らかになっている (藤原ほか, 2000; 八木ほか, 2008)。パターン1の4事例はこれらの知見と同様な現象なので、外海水の侵入による現象と解釈できる。

外海水が侵入することにより貧酸素水塊が中層に分布深度を変えるのは、伊勢湾でも確かめられている (高橋ほか, 2000)。また、大村湾では外海水が底層から侵入することによりそれまで湾内の底層に分布していた貧酸素水塊が湾奥へ移動するが (須崎ほか, 2013)、その際湾奥に向かう北風が吹いているとそれに伴う鉛直循環により貧酸素水塊が湾奥へ移動するのが抑制されることが数値実験で明らかになっている (須崎ほか, 2015)。今回、パターン1の4事例の前はいずれも南偏風であった (Fig. 8)。東京湾では、南偏風により表層水は湾奥へ、底層水は湾口へ向かう鉛直循環が起こるので (小池ほか, 1997)、大村湾の数値実験と同様に、このとき底層水の湾奥への移動は抑制されると考えられる。この条件下で、湾外から密度の重い海水が侵入すると、それまで湾中央部の底層に分布していた貧酸素水塊は、湾奥への移動が妨げられるため、同域で中層へ分布深度が変わることが推測される。前述の大村湾の数値実験では、湾口に向かう南東風が吹くと、それに伴う鉛直循環により底層では湾奥へ向かう流れが強まるので、外海水が侵入するとそれまで湾内の底層に分布していた貧酸素水塊が湾奥へ移動した (須崎ほか, 2015)。これから類推すると、東京湾でも湾口へ向かう北偏風が吹いているときには、外海水が侵入しても、貧酸素水塊は湾中央部で中層へ

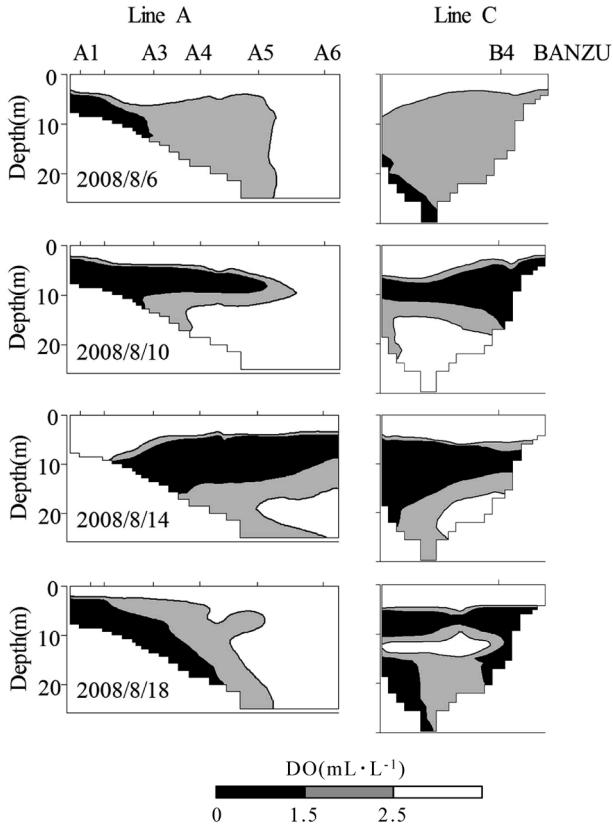


**Figure 7.** T-S diagram of bottom layer at the time of pattern 2, (a) on 18 July, 2007, (b) on 4 September, 2007, (c) on 1 October, 2007, and (d) on 29 August, 2008. Triangles indicate areas off the Banzu tidal flat (stations 4, B4, B5). Squares indicate center of the bay (stations A4 and A5). Open circles indicate northeast of the bay (stations 2 and 3). Closed circles indicate south of the bay (stations A6, B6 and 5).



**Figure 8.** Time series of 25-hours running mean averaged wind at station 2 from June-October, 2007 and from June-October, 2008. N, S and I, II indicate the north, south wind and pattern 1, 2, respectively.



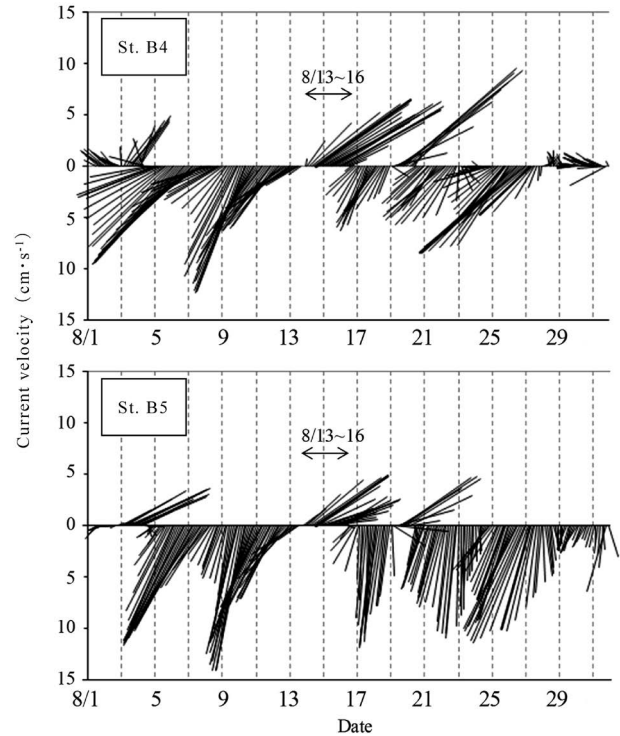


**Figure 9.** Vertical distributions of calculated dissolved oxygen at lines A and C from 6–18 August, 2008. Black and gray regions indicate where the dissolved oxygen is under 1.5 and 1.5–2.5  $\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$ , respectively.

分布深度を変えず、湾奥へ移動する可能性が高まる。湾内での貧酸素水塊の中層化は、外海水の底層侵入を発端とするが、その発生には侵入時の風向きが大きな影響を及ぼしていると考えられる。

パターン1が発生するとき、盤洲干潟沖の貧酸素水塊と湾中央部で中層に分布した同水塊の水温、塩分はその差が小さく、水質の特性がきわめて似ていた (Fig. 7)。このため、盤洲干潟沖と湾中央部に分布した貧酸素水塊は同一の水塊であった可能性が高い。これらから類推すると、南偏風時に湾外由来の冷水が進入すると、それまで湾中央部の底層に分布していた貧酸素水塊は、同域で中層へ分布深度を変えるとともに、盤洲干潟沖へも移動すると考えられる。

このとき、盤洲干潟沖ではごく浅い水深にまで貧酸素水塊が及ぶので (Figs. 4, 5)、これが干潟に波及し底層生物に影響を与える危険性が高まる。特に、2007年8月20日、2008年7月15日および同8月18日に、盤洲干潟沖の Sts. B4, B5 では貧酸素水塊が水深 5–10 m の浅い層にまで及んでおり、干潟へ波及しやすい状況になっていたと考えられる。実際、2008年8月18日には盤洲干潟の北部でアサリ、ハ

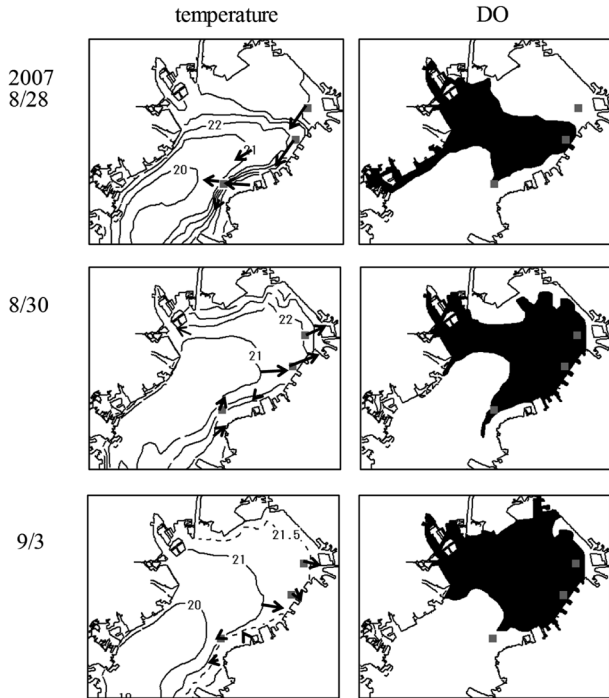


**Figure 10.** Distributions of the calculated 25-hours running mean flow at 5 m depth layer at stations B4 and B5 of August, 2008.

マガリ、マテガイなど二枚貝のへい死が確認されている (土屋, 2009)。数値モデルによると、8月10, 14日にはラインAで貧酸素水塊の中層化が起これ、St. B4から盤洲干潟にかけては10, 14, 18日に水深5–10 mにまで貧酸素水塊が及んだ (Fig. 9)。この期間中の8月13–16日には Sts. B4, B5 の水深 5 m 層で盤洲干潟へ向かう流れが3日ほど続いたことから (Fig. 10)、8月10日以降、盤洲干潟沖でごく浅い水深にまで分布した貧酸素水塊が8月13–16日に干潟へ向かって移動したために、干潟の底層生物が同水塊の影響を受けた可能性が推測される。

パターン2では、湾北東部から東岸沿いで底層の水温が一様になり (Fig. 3)、湾北東部と盤洲干潟沖の底層水温、塩分はほとんど同じになった (Fig. 7)。したがって、この現象が起これるとき、湾北東部から東岸沿いの底層水は、ほぼ同じ水塊になっている可能性が考えられる。パターン2が起きた2007年9月4日の1週間前からの水温、DO分布および日平均流況によると (Fig. 11)、風向きが北偏風になると、湾中央部に分布していた貧酸素水塊は北部へ移動するとともに、干潟の方へも広がった。また、水温21°Cの等水温線が湾軸に沿って分布した。さらに、東岸沿いの流況は、北偏風になった直後は湾奥へ向かったが、5日後 (9月8日)には湾東岸へ向かう流れになった。

東京湾でこれまでにおこなわれた数値実験では、北偏風



**Figure 11.** Distributions of the calculated temperature and dissolved oxygen at bottom layer on 28, 30 August and 3 September, 2007. Black regions indicate where the dissolved oxygen is under  $1.5 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ . Arrows indicate the calculated daily averaged flow in bottom layer at the stations 2–4 and B3–B5.

時に、水深10 m以深では湾中央部から東岸に向かう流れが発生することが示されている（蔵本・中田, 1991; 中辻ほか, 1995）。このとき、底層でも等密度線は湾軸と平行に伸び、これはエクマン輸送による表層水の沖出し流とそれを補償する流れにより起こるとされている（中辻ほか, 1995）。ここで報告した湾東岸へ向かう流れや湾軸に沿った水温分布（Fig. 11）はこれら知見によく対応している。

パターン2は、北偏風が連吹する前に湾中央部の底層に分布していた貧酸素水塊が、北偏風の連吹で発生する湾東岸向きの流れにより、盤洲干潟沖へ移動する現象と考えられる。しかし、さらに北偏風が連吹すると、風による鉛直循環（村上・森川, 1988; 宇野木・久保田, 1996）で底層の貧酸素水塊は次第に湾奥へ向かうので、湾中央部には同水塊が分布しなくなる（Figs. 4, 5）。このため、湾中央部から東岸へ向かう流れは継続するが、盤洲干潟沖には貧酸素水塊が見られなくなると考えられる。

盤洲干潟沖には例年春から初夏にトリガイの漁場が形成される。このトリガイは、秋季に産卵された個体と推定されており（大畑, 2015）、実際9–11月に湾内に浮遊幼生が分布することが確かめられている（千葉水総研セ, 2016）。湾内を浮遊する幼生は、北偏風が十分に連吹した後に盤洲干潟沖に着底すれば、貧酸素水塊によるへい死から免れる

可能性が高まる。このことから言えば、北偏風の十分な連吹がいつ頃から起こるかが、翌春の漁場形成に大きな影響を及ぼしていると考えられる。

本論文での解析結果から、盤洲干潟沖への貧酸素水塊の分布は2つのパターンにより起きると考えられる。このうちパターン1は、発生時の風向きによっては貧酸素水塊が盤洲干潟へ波及し、二枚貝の生残に影響を及ぼし漁業被害が生じる可能性が高まる。これについては、今後さらに詳細な解析をおこない、干潟への波及条件を精査する必要がある。

## 謝 辞

本研究では、調査および沿岸調査船運行のために石田文雄氏に多大な労力を提供していただきました。ここに記して、感謝の意を表します。

## 引用文献

- 千葉県農林水産統計協会（1964–2013）海面漁業生産量 魚種別漁獲量（市町村別）。千葉県農林水産統計年報, 1965–2014.
- 千葉県水産総合研究センター（2016）東京湾における有用魚介類の卵稚仔に貧酸素水塊が及ぼす影響の解明。平成27年度漁場環境・生物多様性保全総合対策委託事業のうち赤潮・貧酸素水塊対策推進事業（東京湾における貧酸素水塊の影響解明）, 5–15.
- 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, 9, 303–313.
- 石井光廣・古川恵太・佐々木 淳・柿野 純・増田修一・小森明裕・桃井幹夫・麻生晃也（2011）東京湾底層DO分布の短期予測システムの水産分野への活用に向けた実証的研究。土木学会論文集B2（海岸工学）, 67, 1236–1240.
- 柿野 純・竹脇 博・鈴木和良（1984）最近の東京湾におけるアサリへい死現象とへい死調査に関する考察。千葉水試研報, 42, 23–28.
- 小林 豊・鳥羽光晴（2014）東京湾盤洲干潟におけるカイヤドリウミグモの大量寄生によるアサリの死亡と漁業への影響。千葉水研セ研報, 8, 27–33.
- 小池義夫・松山優治・林 敏史・北出裕二郎・喜多澤 彰・吉田次郎（1997）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—。東京水産大学研究報告, 84, 43–51.
- 蔵本武明・中田喜三郎（1991）東京湾における流動と底層DO濃度シミュレーション。沿岸海洋研究ノート, 28, 140–151.
- 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, 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.
- 中辻啓二・尹 鍾星・白井正典・村岡浩爾（1995）東京湾における残差流系に関する三次元数値実験。海岸工学論文集, 42, 386–390.
- 大畑 聡・石井光廣・梶山 誠（2013）東京湾におけるトリガイの稚貝の着底時期と成長。日水誌, 79, 977–986.
- 大畑 聡（2015）東京湾のトリガイ資源の現状。東京湾の漁業と環境, 6, 17.
- 塚塚正光（1989）東京湾の貧酸素水塊。沿岸海洋研究ノート, 26, 99–100.
- 須崎寛和・三宅陽一・中田英昭（2013）大村湾における貧酸素水塊消滅期の海況変化。沿岸海洋研究, 51, 79–89.
- 須崎寛和・田口浩一・中田英昭（2015）大村湾における青潮発生の物理的なメカニズム。沿岸海洋研究, 53, 65–72.
- 高橋鉄哉・藤原建紀・久野正博・杉山陽一（2000）伊勢湾におけ

東京湾の盤洲干潟沖における貧酸素水塊の分布とその要因

- る外洋系水の進入深度と貧酸素水塊の季節変動. 海の研究, **9**, 265–271.
- 土屋 仁 (2009) 東京湾の水質モニタリング調査について. 第9回東京湾シンポジウム報告書, 国土技術政策総合研究所, 21–25.
- 宇野木早苗 (1993) 東京湾の水と流れ. 「東京湾の地形・地質と水」貝塚爽平編, 東京, 135–186.
- 宇野木早苗・久保田雅久 (1996) 「海洋の波と流れの科学」東海大学出版会, 東京, 140–143.
- 八木 宏・Tanuspong Pokavanich・安井 進・灘岡和夫・有路隆一・松坂省一・鈴木信昭・諸星一信・小田遼子・二瓶泰雄 (2008) 東京湾湾口部の湧昇現象に伴う湾内貧酸素水塊の中層化とその解消過程. 海岸工学論文集, **55**, 1081–1085.
- 柳 哲雄 (1989) シンポジウム「貧酸素水塊」のまとめ. 沿岸海洋研究ノート, **26**, 141–145.