

## 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）

山尾 理：技術・国際課 海洋研究室

### Temporal variation in dissolved oxygen concentration in the bottom layer in the innermost of Tokyo Bay (2003—2005)

Satoshi Yamao: Ocean Research Laboratory

#### はじめに

昭和53年の水質汚濁防止法改正に伴い、汚濁負荷量の総量を統一的かつ効果的に削減するための水質の総量規制制度が制定され、東京湾は伊勢湾・瀬戸内海とともにこの指定海域とされている。当制度は、CODを対象に4次まで実施されたが、富栄養化の問題を解決すべく、第5次より窒素・リン含有量も対象物質となり、現在この3物質を対象に第6次が実施されている。しかし、東京湾におけるCOD、窒素、リンの環境基準の達成率は十分な状況になく、赤潮や貧酸素水塊といった、富栄養化にともなう問題が依然として発生している。

こうした状況の下、2002年2月に「東京湾再生推進会議」が設置され（伊藤，2002），2003年3月に「東京湾再生のための行動計画」が策定された。この行動計画に基づいて2003年より10年間、東京湾の環境改善に国、地方自治体等が連携して取り組むこととなっている。この行動計画では、赤潮や青潮の発生・消滅メカニズムの解明および環境改善施策効果の把握がモニタリングの目的として掲げられている。また、2004年6月には国土交通省環境行動計画が策定され、この中で全国海の再生が進められることとなった。

東京湾再生プロジェクトを推進する体制として、東京湾再生推進会議、同幹事会の下に、陸域対策・海域対策・モニタリングの三分科会が設けられており、海上保安庁海洋はこのうち、モニタリング分科会の主査を環境省と共に担当している。

当庁では東京湾再生プロジェクトの一環として、多項目の水質鉛直分布を自動的に連続観測する、モニタリングポストを、平成15年3月に千葉灯標に整備し、その後現在に至るまで運用を継続している。「東京湾再生のための行動計画」では、東京湾再生の具体的な目標の一つとして、「貧酸素水塊の発生をなくす」ことが謳われている。そのため、本稿では、モニタリングポスト設置以降、約2年7ヶ月間観測された、底層溶存酸素濃度（D.O.）の観測結果について報告する。

#### 方法

観測は千葉灯標（北緯：35°34′05″，東経：140°02′45″）に設置したモニタリングポストを用いて行われた。第1図に千葉灯標の位置を示す。モニタリングポストは、自動昇降式水質測定システム・流向流速プロファイラー測定システム・風向風速測定システムの3つの観測システムで構成されており、海潮流の流向・流速、海上風の風向・風速の連続観測が2003年4月1日より、水温、塩分、D.O.、クロロフィル蛍光、濁度の連続観測が同年5月3日より行われている（山尾，2003）。本研究ではこのうち、2003年～2005年の各年における、5月3日から11月30日までの観測結果を比較することで、夏期の東京湾奥における底層D.O.の現況を明らかにし、千葉灯標周辺海域における底層D.O.の年変化の要因および、底層D.O.の評価方法について考察を行った。



第1図 観測点（千葉灯標）の位置  
Fig. 1 location of monitoring point

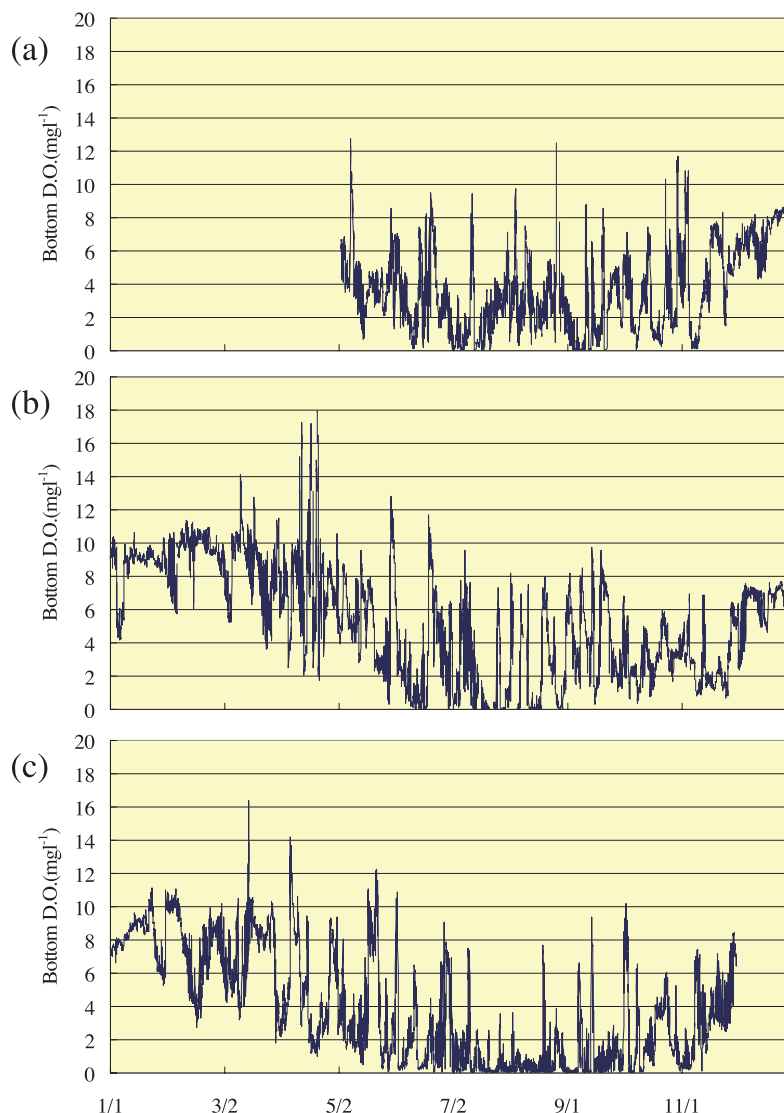
結果

水中のD.O.が $4.3\text{mg l}^{-1}$  ( $3\text{ml l}^{-1}$ )を下回ると、魚類・甲殻類に生理的変化が発生し、底生魚類の漁獲に悪影響が及ぶとされている（日本水産資源保護協会, 2000）。そこで本研究では、観測された水塊のD.O.が $4.3\text{mg l}^{-1}$ 以下である場合、その水塊を貧酸素水塊と定義する。

底層D.O.の時間変化

2003年5月3日から2005年11月30日までの底層におけるD.O.の変化を年ごとに第2図に示す。各年とも、D.O.は冬に高く、夏に低いという季節変動を示

すが、こうした季節変動と比べて、短い時間間隔での濃度変化の振幅が大きいという観測結果が得られた。各年5～11月の貧酸素水塊観測時間は、2003年に3,631時間、2004年に3,411時間、2005年に4,885時間であり、2005年には他の2年と比較して貧酸素水塊の発生期間が長かった。年によっては欠測が存在するが、欠測時間は2003年に全観測時間の1.34%、2004年に3.56%、2005年に0.34%でしかなく、この貧酸素水塊観測時間は経年比較に用いても問題ないと考えられる。また、5月から11月の底層D.O.平均値は、2003年に $3.20\text{mg l}^{-1}$ 、2004年に $3.39\text{mg l}^{-1}$ 、2005年に $2.04\text{mg l}^{-1}$ であり、夏季の底層D.O.平均値でも2005年は他の2年よりも低い値を示



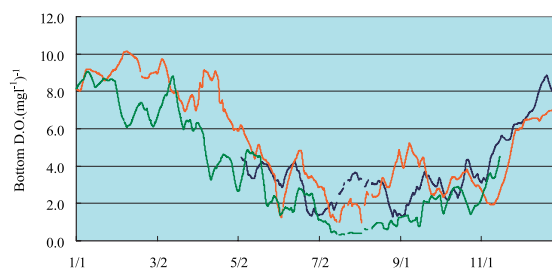
第2図 底層におけるD.O.変化 (a) 2003年, (b) 2004年, (c) 2005年  
 Fig. 2 temporal variation in D.O. in the bottom layer in (a) 2003, (b) 2004 and (c) 2005

した。

季節的な貧酸素水塊の発生・消滅 (時期, 期間)

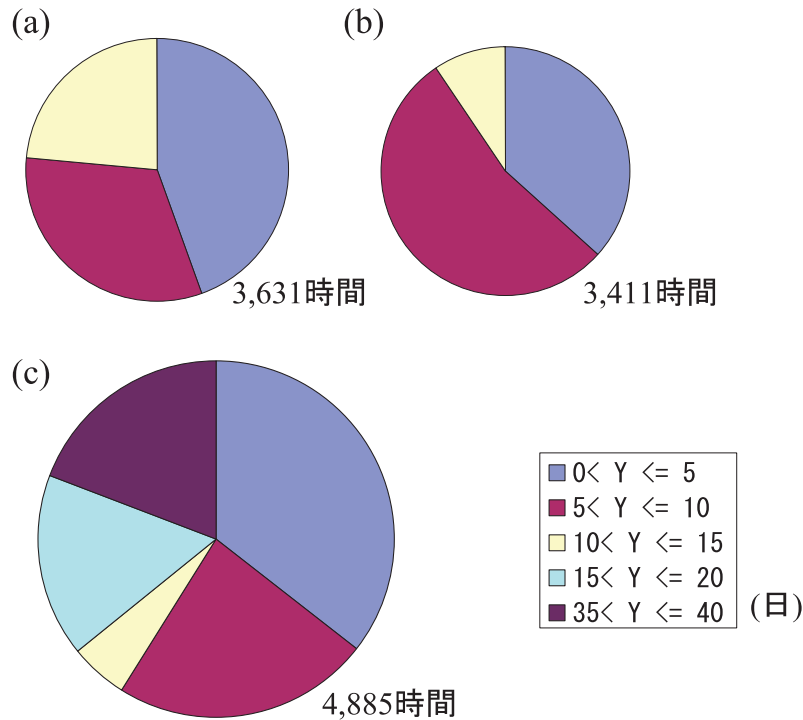
朔望周期以下の短期変動の影響を除去し, 季節的な貧酸素水塊の消長をみるために, 底層におけるD.O.の15日間移動平均値の変化を示す (第3図)。2003年には観測を開始した5月上旬に底層D.O.の15日間移動平均値が $4.3\text{mg l}^{-1}$ を下回り, 貧酸素水塊が発生した。2004年には5月下旬に, 2005年には4月上旬に最初の貧酸素水塊が観測され, 年によって貧酸素水塊の発生時期が大きく異なっていることがわかった。

ここで, 各月1日~10日からの15日間移動平均値



第3図 底層におけるD.O.15日間移動平均値の変化。青は2003年, 橙は2004年, 緑は2005年の値を示す。

Fig. 3 temporal variation in 15 days moving averaged D.O. in the bottom layer. Blue line shows 2003 data, orange line 2004 and green line 2005.



第 4 図 各年の貧酸素水塊観測延べ時間数に占める，階級別貧酸素水塊観測延べ時間数の割合．円グラフ右下の時間数は各年の貧酸素水塊観測延べ時間数．(a) 2003年，(b) 2004年，(c) 2005年  
 Fig. 4 classified hypoxic time in totally observed hypoxic time in (a) 2003, (b) 2004 and (c) 2005. Totally observed hypoxic time in each year was shown in right lower side of each circle.

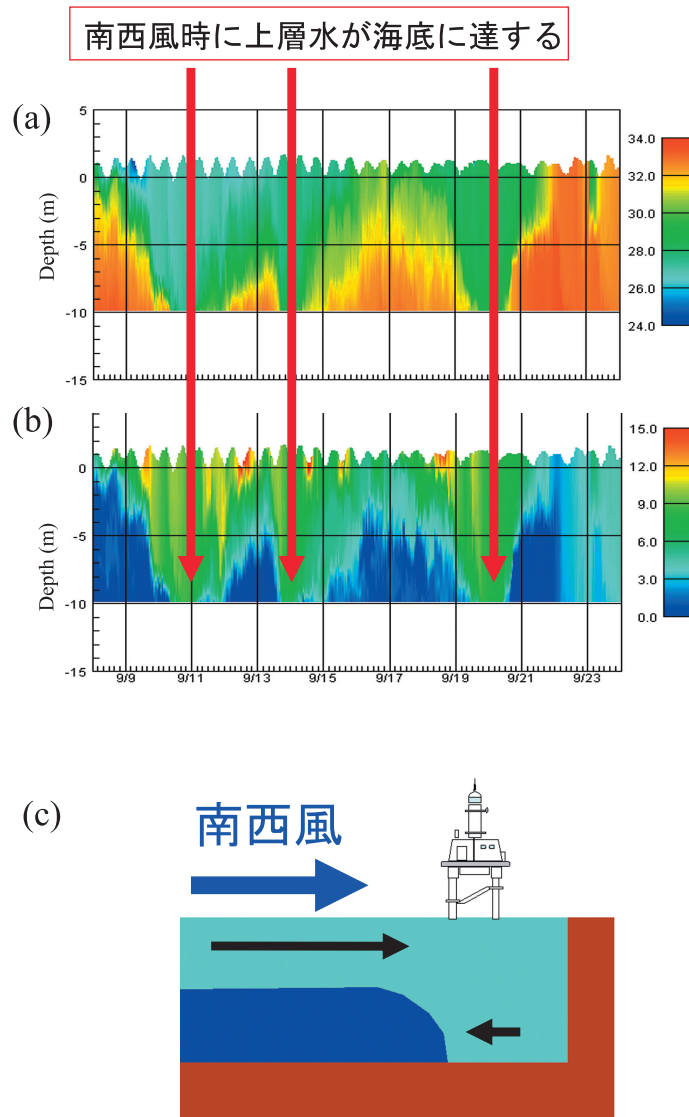
が $4.3\text{mg l}^{-1}$ を下回ったケースを当月上旬の貧酸素水塊発生，11日～20日からのケースを中旬，21日～末日からのケースを下旬と定義した．また，2003年には11月上旬，2004年には11月下旬，2005年には11月中旬にD.O.平均値は $4.3\text{mg l}^{-1}$ を上回り，これ以降各年内にはD.O.平均値が $4.3\text{mg l}^{-1}$ を下回ることなく，これらの時期に貧酸素水塊が季節的に解消したといえる．この3年間について年による貧酸素水塊の解消時期に大きな違いはみられなかった．各年とも夏季には千葉灯標周辺の底層は概ね貧酸素水塊に覆われていたと考えられるが，2004年には6月中旬，9月上旬から中旬にかけての二度，15日平均値でも底層D.O.は $4.3\text{mg l}^{-1}$ を上回り，15日間移動平均値でも貧酸素水塊が一時的に解消していた．

貧酸素水塊の短期変動

移動性の低い底棲生物にとっては，底層に貧酸素水塊が継続的に存在する期間，生息域に酸素が供給される時間間隔に，生存可能性が大きく影響される

ため，モニタリングポスト底層のようにD.O.短期変動の大きい環境では，底層貧酸素水塊の継続期間が生物的に重要なデータとなる．また，水中で酸素がなくなり（無酸素水塊），かつまだ有機物が存在する場合には，硝酸還元によって有機物分解が起こり，その後無酸素水塊中で硝酸塩もなくなると有機物の硫酸還元が起こる．硫酸還元の過程では，有害な硫化水素が発生し，これによっても底棲生物がダメージを受ける（Boyd and Tucker, 1998）．そのため，貧酸素水塊の継続時間，言い換えれば貧酸素水塊発生期間において底層に酸素が供給される時間間隔は，貧酸素水塊中での硫化水素発生を予測する上でも，重要な基礎データである．

モニタリングポストでは毎時観測を行っており，時間的な観測密度が高いため，観測結果から，底層D.O.が一旦 $4.3\text{mg l}^{-1}$ を下回ってから， $4.3\text{mg l}^{-1}$ を上回るまでを貧酸素水塊の継続時間と定義した．年による貧酸素水塊の継続時間の傾向を把握するために，貧酸素水塊を継続日数ごとに分類し，この階級



第5図 南偏風時の (a) 塩分 (b) D.O. 鉛直分布時間変化の一例. (c) 流動構造変化の模式図  
 Fig. 5 An example of temporal variation in the vertical distribution in (a) salinity and (b) D.O. in the case of southern wind. (c) Conceptual figure of variation in current structure.

別に、貧酸素水塊が観測された延べ時間数を求めた。第4図に、各年の貧酸素水塊観測延べ時間数に占める、階級別貧酸素水塊観測延べ時間数の割合を示す。円グラフの大きさは各年の貧酸素水塊観測延べ時間数に対応している。2003年には貧酸素水塊継続時間が5日までの階級が全体の約44%、2004年には、5日から10日の範囲の階級が全体の約54%と、卓越する階級に違いがみられた。しかし、全ての貧酸素水塊が15日以内に一度終息しており、継続時間に大きな違いはみられなかった。一方、2005年には、底層水が15日以上継続して貧酸素化した状態が貧酸素水塊観測時間全体の約38%を占め、他の2年

よりも底棲生物にとって厳しい生存環境にあったことが示唆される。

#### 冬の貧酸素水塊

季節的には各年とも4～5月に貧酸素水塊が発生し、11月に消滅していたが、これ以外の冬季にも、2004年には、1月5日23時から1月6日12時にかけてと、12月1日6時から12月5日3時にかけての2回、2005年には2月13日5時から2月18日7時にかけてと3月9日6時から3月12日9時にかけての2回、貧酸素水塊が断続的に観測された(第2図)。冬季の東京湾でこれまでに貧酸素水塊が観測

された事例はなく、モニタリングポストによって一時間に一回という高頻度で観測を行った結果、初めて捉えられた現象である。

考察

自然現象の影響を除去した、底層D.O.の評価手法

千葉灯標周辺海域における底層D.O.変化に影響を及ぼす物理現象には、南偏風時に発生する表層水の吹き寄せがある(山尾, 2004)。これは、南偏風によって北東岸に吹き寄せられた表層水が底層に達することで、底層の貧酸素水塊が一時的に解消する現象である(第5図)。しかし、これは自然現象であるため、経年的な環境変化を見積もり、環境改善の指標として底層水中のD.O.回復度合いを判断するためには、吹き寄せによるD.O.の上昇を除いた上で評価を行う必要がある。

一般的に夏季の内湾では、海面からの加熱、表層への淡水流入によって、密度成層が形成されるが、表層水が吹き寄せられ、底層に達するケースでは、一時的・局所的に成層状態がなくなり、鉛直方向の密度差が小さくなる。モニタリングポストでは各水質項目の鉛直分布が連続して得られるため、本研究では、鉛直密度差を指標として、底層データから表層水吹き寄せ沈降現象によるD.O.上昇を除去する方法を開発した。詳細を以下に説明する。

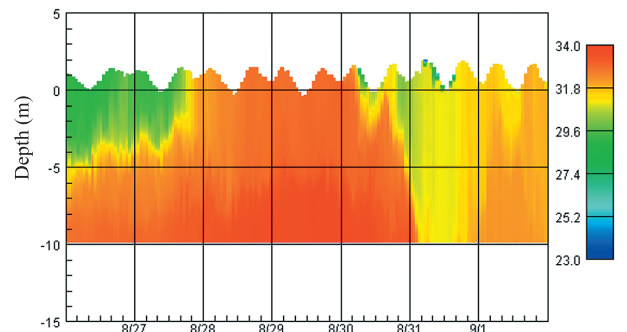
表底の密度差が表層密度の5%以下となった場合に、鉛直密度差がなくなったと判定する。ただし、表層水が底層に達するケースに加え、底層水が湧昇する場合にも、鉛直密度差は小さくなる。このケースにおいて、海底近辺は元々存在した底層水に覆われたままである(第6図)。そのため、表層水吹き寄せ沈降のケースと底層水湧昇のケースとを区別し、底層水湧昇のケースだけを、以降の評価において考慮に入れる必要がある。そこで、鉛直密度差がなくなる直前25時間の表層・底層それぞれにおける平均密度を算出し、鉛直密度差がなくなった時点での底層密度が、直前25時間の平均表層密度に近ければ、表層水の吹き寄せと判断した。逆に、鉛直密度差がなくなった時点での底層密度が、直前25時間の平均表層密度よりも平均底層密度に近ければ、底層水の

湧昇が発生していると判断し、考察に入れるという方法をとった。

2003年~2005年夏季の底層データに上記の処理を施した結果得られた底層D.O.の時間変化を第7図に示す。青は底層水中の、ピンクは吹き寄せで底層に達した表層水中のD.O.を表している。底層に達した表層水の影響を除く前(第2図)に、5月から11月の底層D.O.平均値は2003年に $3.20\text{mg l}^{-1}$ 、2004年に $3.39\text{mg l}^{-1}$ 、2005年に $2.04\text{mg l}^{-1}$ であった。しかし、表層水の影響を除くと、底層D.O.平均値は2003年に $2.89\text{mg l}^{-1}$ 、2004年に $3.00\text{mg l}^{-1}$ 、2005年に $1.86\text{mg l}^{-1}$ となった。全ての年について下層水塊中のD.O.平均値は操作前より低下しており、より正確に底層水中のD.O.のみを捉えていると考えられる。この操作によって、表層水吹き寄せの多発する年においても自然現象の影響を受けずに底層水中のD.O.のみの時間変化を捉えることが可能となる。

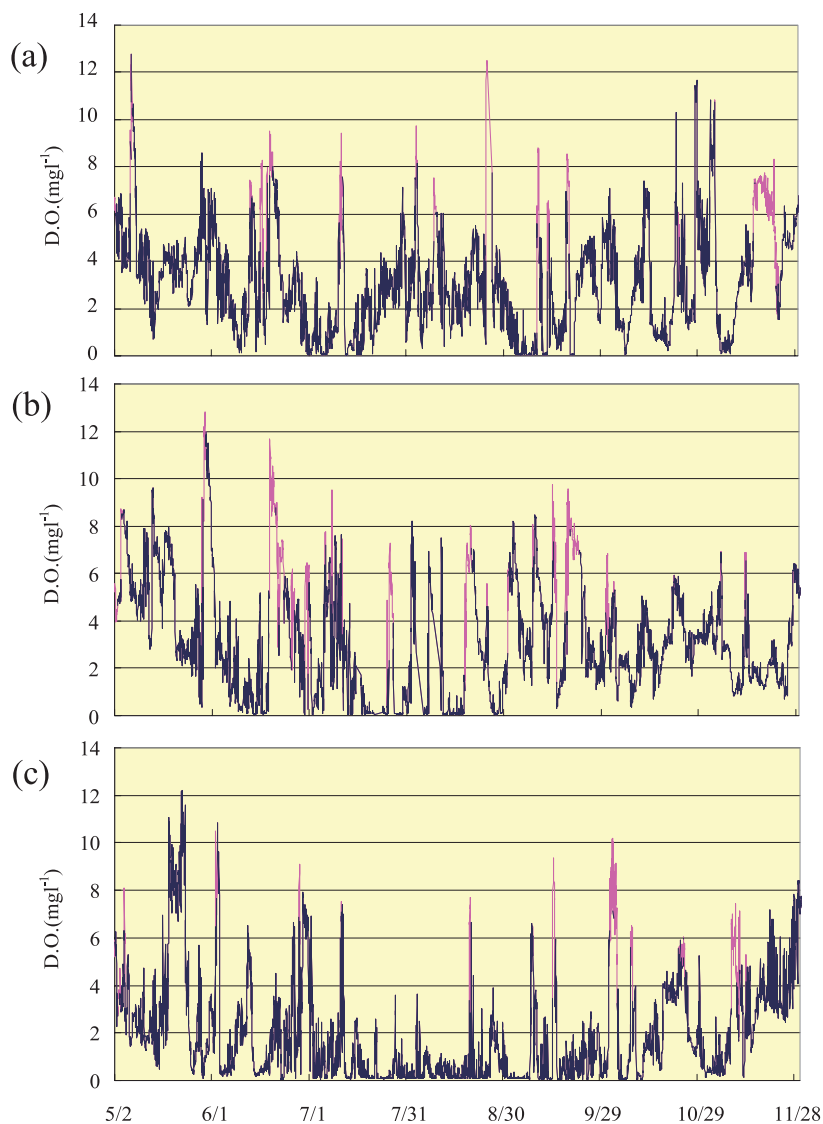
冬の貧酸素水塊発生要因に関する考察

冬季に貧酸素水塊が発生した2004年1月上旬の塩分およびD.O.鉛直分布時間変化を第8図に示す。貧酸素水塊は海底から上方3m程度までの範囲に存在し、貧酸素水塊中では貧酸素水塊外よりも高塩分であった。同じく貧酸素水塊の観測された2005年2月にも、同様にD.O.の低い水塊は高塩分水塊と一致していた(第9図)。冬季に観測された貧酸素水塊の起源を明らかにするため、貧酸素水塊の発生した



第6図 底層水湧昇時の塩分鉛直分布時間変化の一例

Fig. 6 An example of temporal variation in the vertical distribution in salinity in the case of upwelling.

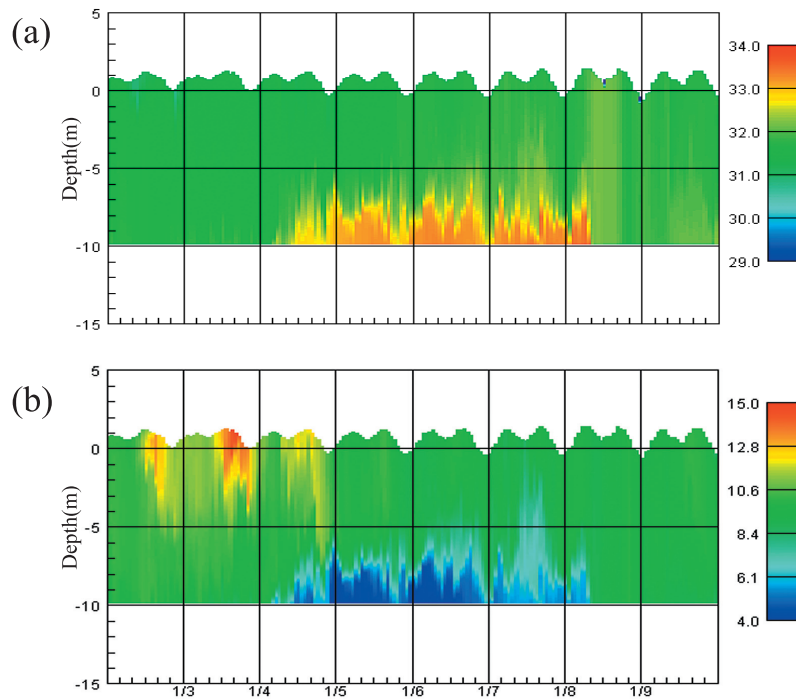


第7図 底層におけるD.O.変化。青は底層水。桃色が底層に沈降した表層水を示す。(a) 2003年, (b) 2004年, (c) 2005年

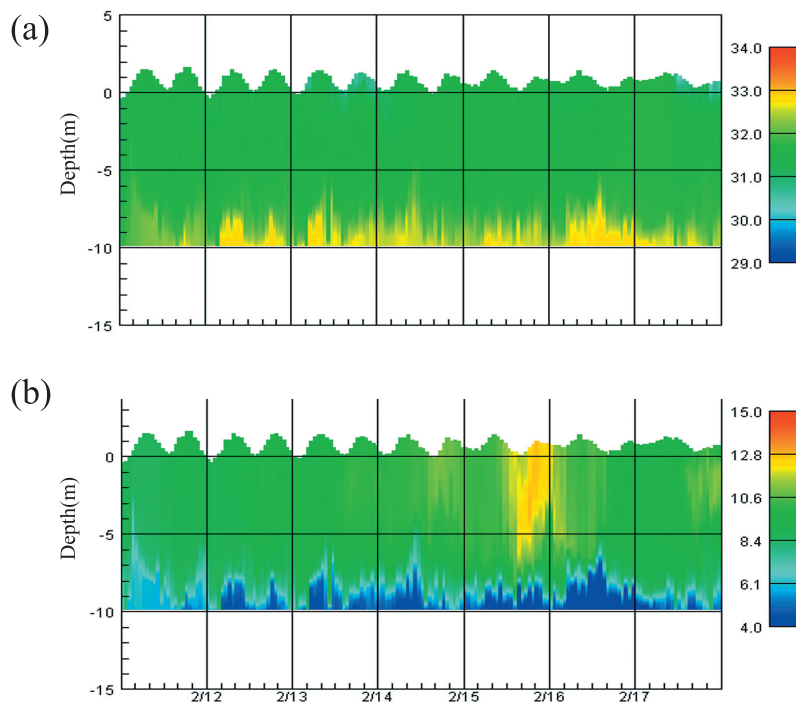
Fig. 7 Temporal variation in D.O. in the bottom layer in (a) 2003, (b) 2004 and (c) 2005. Blue line corresponds to the stratified bottom water and pink line to sink surface water.

2004年1月, 2005年2月の底層水についてTSダイアグラムを描いた(第10図)。貧酸素水塊中では, D.O.の豊富な水塊よりも水温・塩分ともに高く, 水温は冬季にも関わらず2004年で約15℃, 2005年には約12℃に達していた。また, 貧酸素水塊中の塩分は2004年に33psu以上, 2005年には32.5~32.7psuであった。貧酸素水塊発生以前の2005年2月3日に千葉県水産研究センターによって観測された底層の水温・塩分分布では, これらの水温塩分をもった水塊は東京湾湾口の富津岬周辺以南にしかみられない。つまり, なんらかの駆動力が働いて, これらの外海

水が湾内に流入し, 周囲の水塊との水温塩分差によって一時的に密度成層が発達し, 海面での酸素供給から取り残された底層水が貧酸素化したものと考えられる。この水塊輸送を裏付けるように, 貧酸素水塊発生直前のモニタリングポスト周辺における底層では, 10cms<sup>-1</sup>程度のやや強い北向きの流れが観測された(第11図)。夏季の東京湾奥部では流動構造に海上風が強く影響することが知られている(松山ほか, 1990, 小田巻ほか, 1991, 山尾, 2004)。北偏風時には南西~西向きの流れが表層に発生し, 底層ではその補流として北東~東向きの流れが発生

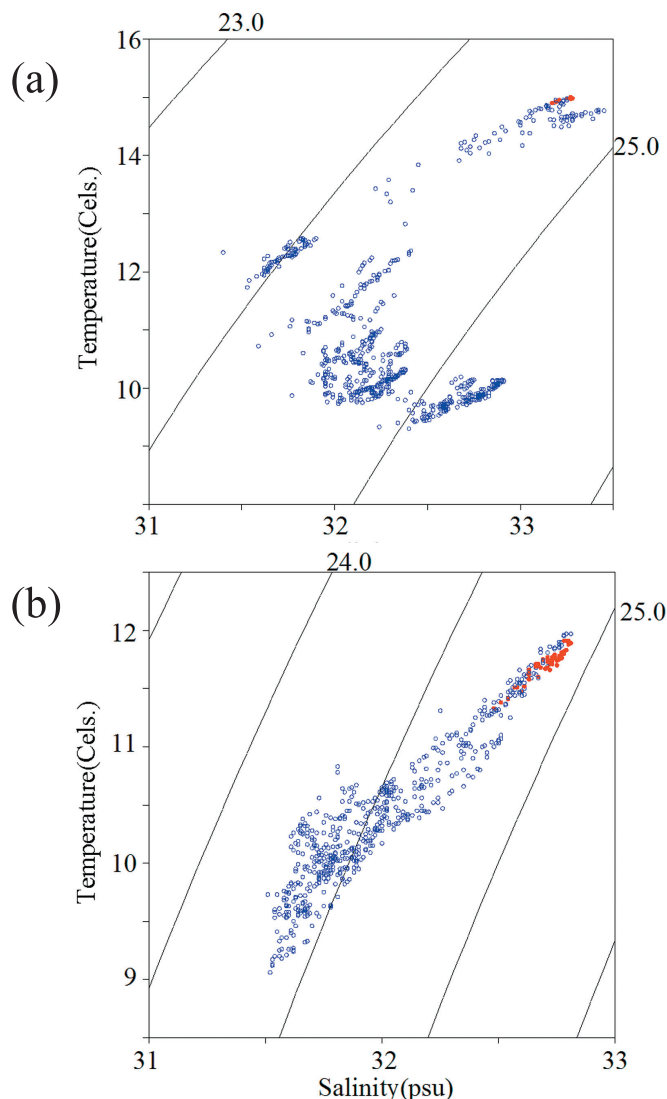


第 8 図 冬季貧酸素水塊発生時（2004年 1 月）における，(a) 塩分，(b) D.O.鉛直分布の時間変化。  
 Fig. 8 Temporal variation in the vertical distribution in (a) Salinity, (b) D.O. in the case of winter hypoxia in January, 2004.



第 9 図 冬季貧酸素水塊発生時（2005年 2 月）における，(a) 塩分，(b) D.O.鉛直分布の時間変化。  
 Fig. 9 Temporal variation in the vertical distribution in (a) Salinity, (b) D.O. in case of winter hypoxia in February, 2005.





第10図 (a) 2004年1月, (b) 2005年2月に観測された底層水のTSダイアグラム. 赤は貧酸素水塊のデータ, 青はそれ以外を表す.

Fig. 10 TS diagram in the bottom layer in (a) January, 2004 and (b) February, 2005. Red circle shows hypoxic water, blue shows other.

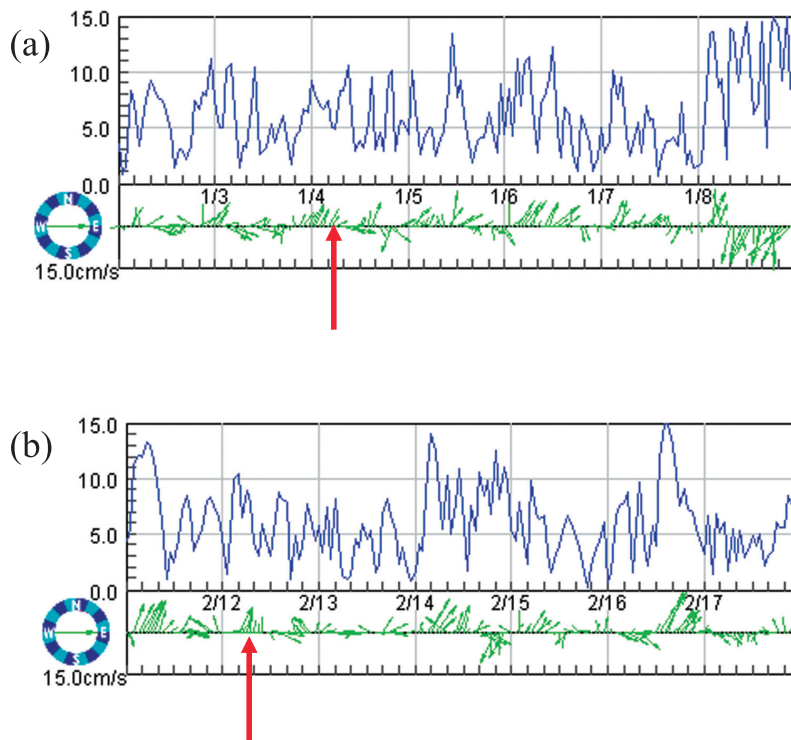
する. 今回貧酸素水塊が観測された2004年1月および2005年2月には北偏風が卓越し, 底層水は北東~東向きに輸送されやすい状態であったことがうかがえる (第12図).

まとめ

① 東京湾奥部における底層D.O.は短期変動が非常に激しく, 季節的に貧酸素水塊の発生する夏季においても, 表層水の吹き寄せによって, 底層へは間欠的な酸素供給が頻発することが明らかになった. しかし, 底層水のD.O.経年変化を評価する上では, データに対する自然現象の影響を除去する

必要があり, 本研究ではこの手法を開発した.

- ② 2005年夏季には, 2003, 2004年よりも貧酸素水塊観測時間が長く, 平均D.O.が低く, 季節的な貧酸素水塊発生時期が早く, 一回の貧酸素水塊継続期間も長かった. 総じて, 2005年には2003, 2004年よりも底棲生物にとって悪い酸素環境であったことが予想される.
- ③ これまで観測例の無かった, 冬季に発生する貧酸素水塊を捉えた. 外海由来の高温・高塩水の流入による一時的な成層の発達が生じたことが貧酸素水塊の発生に寄与していると示唆された.



第11図 冬季貧酸素水塊発生時 (a) 2004年1月, (b) 2005年2月の底層 (D.L.-10.3m) における流速時間変化。矢印は貧酸素水塊が発生した時刻を示す。

Fig. 11 Temporal variation in current velocity in bottom layer in case of winter hypoxia (a) January, 2004 and (b) February 2005. Red arrow shows the time hypoxia observed.

引用文献

Boyd C.E. and Tucker C.S. (1998), Pond aquaculture water quality management. Kluwer academic publishers, Boston, 700pp.

伊藤國男 (2002), 東京湾再生推進会議について, 水環境学会誌, 25, 580-584

小田卷実, 佐藤敏, 松島弘, 西田浩志, 下平保直 (1991), 夏期の東京湾の流動の観測 一閉鎖性水域の風による流動及び物質移動等の調査・評価手法に関する研究一, 水路部技報, 9, 67-76

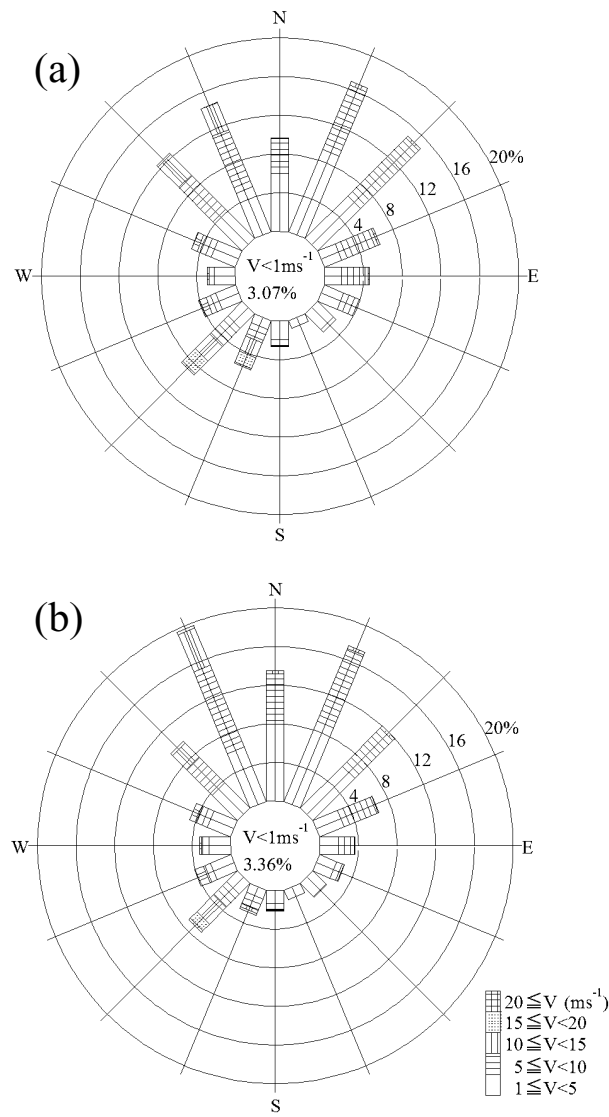
(社)日本水産資源保護協会 (2000), 水産用水基準. 2000年版, pp21-22.

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

山尾理 (2003), 千葉灯標モニタリングポストによる水質・流況・海上風の常時モニタリング,

海洋調査技術, 15, 137-141

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



第12図 (a) 2003年11月～2004年3月, (b) 2004年11月～2005年3月の風向別風速頻度分布.

Fig. 12 Wind velocity frequency in 16 direction (a) from November, 2003 to March, 2004 and (b) from November, 2004 to March 2005.