

2003年～2008年の東京湾奥部の底層溶存酸素濃度時間変化

渡邊奈保子, 山尾 理 : 海洋研究室

Temporal variation in dissolved oxygen concentration in the bottom layer in the innermost of Tokyo Bay (2003–2008)

Naoko WATANABE, Satoshi YAMAOKA : Ocean Research Laboratory

Abstract

In Tokyo Bay, because of the huge amount of organic matter, nitrogen, and phosphorus, loaded from land, as well as the semienclosed shape of the bay that prevents watermass exchange with the adjacent open ocean, eutrophication such as red tides and hypoxia is a chronic problem. Japan Coast Guard has carried out continuous monitoring of various environmental parameters of Tokyo Bay at the monitoring post at Chiba Light from 2003, as part of “Tokyo Bay Renaissance Project”. We report the data from 2003 to 2008 obtained at the monitoring post in this paper, showing a good correlation between the temporal variation in dissolved oxygen (DO) and that in intensity of stratification. We then estimate the effect of the policy to improve the water quality of Tokyo Bay by removing the influence of natural phenomena such as annual variation in the climate. Removing the influence of the temporal variation in intensity of stratification from that in bottom DO, it is suggested that bottom DO tends to have increased slightly in Tokyo Bay during the study period.

1 はじめに

背後に大都市を抱える東京湾は、流域からの汚濁負荷が多く、さらに海水交換が起こりにくい閉鎖性海域であることから、富栄養化に伴う赤潮、貧酸素水塊といった問題が発生している。このような背景をふまえて平成15年3月に策定された「東京湾再生のための行動計画」では、水質改善の目標として「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」を掲げている。その改善の指標として「底層の溶存酸素濃度 (DO)」を挙げられており、改善の目標を「年間を通して底層生物が生息できる限度」と定めている。この行動計画は10ヵ年計画で、3年毎に中間評価を実施することとなっており、2009年は2度目の中間評価の年にあたる。

本行動計画に基づき、東京湾周辺の地方自治体と関係省庁は「陸域負荷削減策の推進（高度処理施設の導入促進、総量削減の着実な実施）」、「海域における環境改善対策の推進（有機汚泥の除去、浅場の造成等）」、「東京湾のモニタリング（モニタリングの充実、モニタリングデータの共有化及び発信等）」といった取り組みを進めている。海上保安庁は、東京湾再生推進会議の下に設置されたモニタリング分科会の主査を環境省とともに担当しており、2003年より千葉灯標モニタリングポストの運用を開始し、現在にいたるまで頻度の高い長期連続観測を続けている。

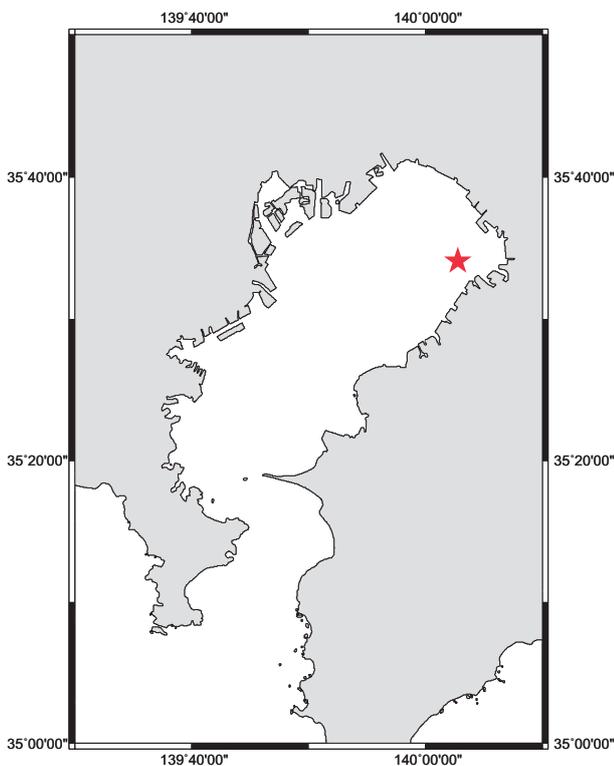
そこで本稿では、行動計画において指標とされている底層のDOに着目し、東京湾のDOの時間変化を解明することを目的とした。しかし、DOの変動には、施策による人為的な効果以外にも気象変化等

天然の現象の影響が含まれており、より正確な意味で環境改善の指標としてDOを用いるには、これらの影響を取り除く必要がある。そこで、本稿では、東京湾の底層DOの時間変化から気象変化等天然の現象に起因すると思われる変動を取り除き、現在の東京湾の水質改善状況を評価する。

2 方法

千葉灯標 (140°02′45″ E, 35°34′05″ : 第1図) に設置されたモニタリングポストを用いて観測を実施した。千葉灯標モニタリングポストでは、水温、塩分、溶存酸素濃度 (DO)、クロロフィル蛍光、濁度、海潮流の流向・流速、海上風の風向・風速の連続観測を行っており、水質の各項目については、1時間に1回、海底から海面まで1m間隔で測定を実施している (山尾, 2003)。

本稿では、このモニタリングポストのデータのうち、特にDOに着目し、東京湾の底層DOの時間変化を明らかにした。さらに、他のデータも用い、東京湾の底層環境の現状を評価することを試みた。



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

3 結果

3.1 各年のDO鉛直分布の時間変化

本稿では、柳 (2004) にならい、DO 3.6 mg/l以下の水を貧酸素水塊と定義した。

第2図に、2003年から2008年までのDO鉛直分布の時間変化を年毎に示す。濃い青色で示されている部分がおよそ貧酸素水塊に対応し、どの年も夏に底層を中心に貧酸素水塊が発生していることがわかる。しかし貧酸素水塊は、夏の間常に海底を覆っているわけではなく、短期的な変動を繰り返している。また、いずれの年にも、貧酸素水塊が海面にまで達している時期が数回存在しているが、このような時は千葉灯標周辺で青潮が発生している可能性がある。

さらに、海底直上のデータに注目すると、底層における貧酸素状態の継続時間にも年による違いがあることがわかる。例えば2004年では、底層に貧酸素水塊が発生した後、1週間から10日間程で、緑色で示される比較的酸素を含む海水が海底に到達しており、貧酸素水塊は短期の消長を繰り返していることが多い。一方2006年では、7月中旬に底層に発生した貧酸素水塊は9月中旬まで継続して海底を覆っており、底層は長期にわたり貧酸素化していたことがわかる。このように、貧酸素水塊の発生パターンは一様ではない。

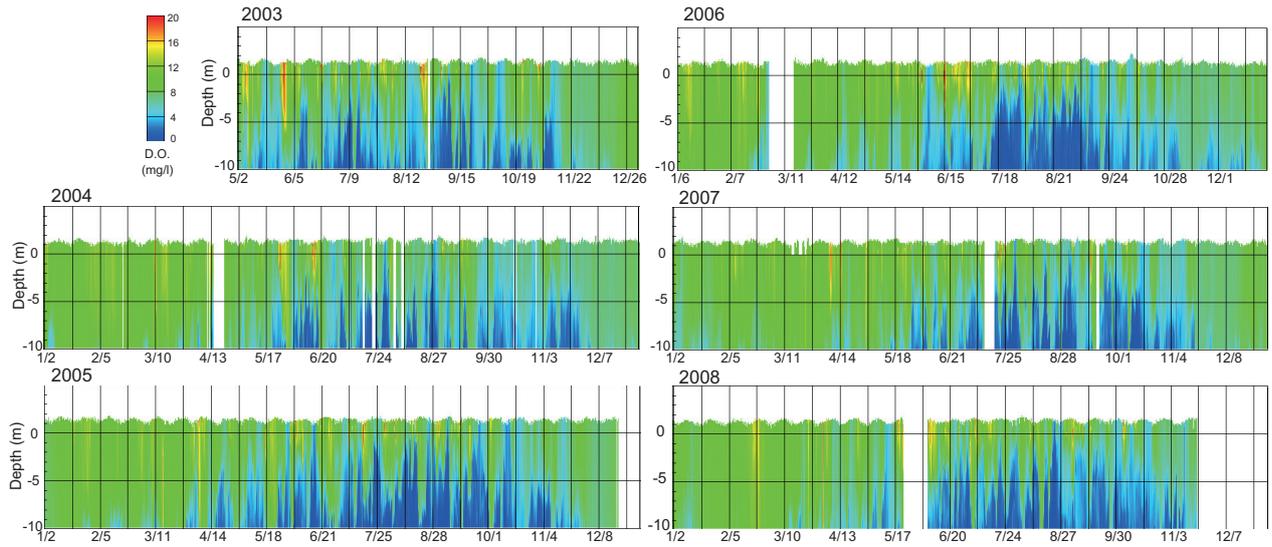
3.2 各年の夏季の底層DO時間変化

ここで、1年のうちでどの時期に貧酸素水塊が底層に存在しているかをみるために、各年の貧酸素水塊の初観測日、最終観測日をまとめた (第1表)。初観測日は、2005、2006年には2月、2003、2007年には5月であり、発生のタイミングが年により異なっ

第1表 貧酸素水塊の初観測日及び最終観測日
Table 1 The first and last dates that hypoxia observed in every year

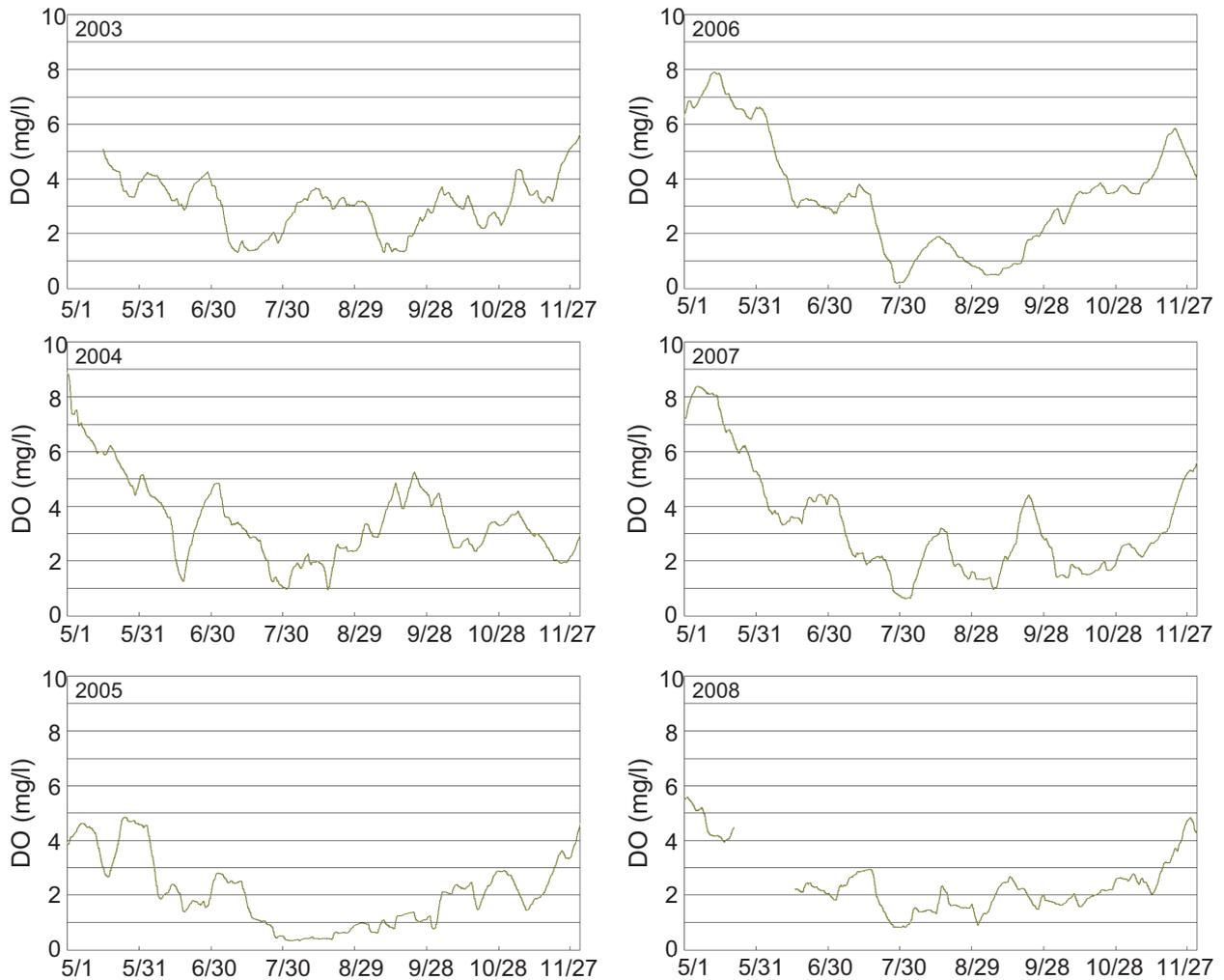
	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年
初観測日	5/5	4/5	2/15	2/20	5/11	3/18
最終観測日	11/25	12/4	11/27	12/21	11/28	11/18

2003年～2008年の東京湾奥部の底層溶存酸素濃度時間変化



第2図 DO鉛直分布時間変化

Fig. 2 Temporal variation in the vertical distribution in DO



第3図 夏季の底層DO時間変化

Fig. 3 Temporal variation in DO in the bottom layer in summer period

ている。最終観測日は、2006年を除き、ほぼ同様の時期になっている。

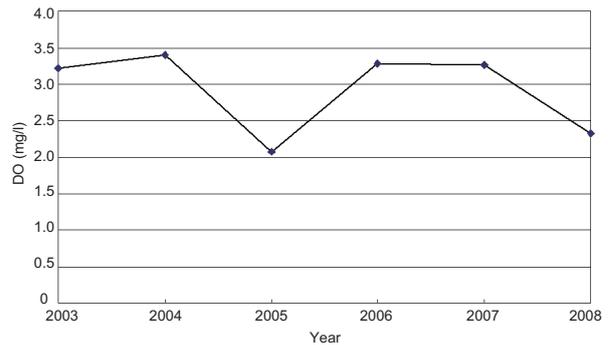
一般的に、多くの閉鎖性水域では、密度躍層が発達する成層期（夏季）には貧酸素水塊が発生することが知られている（小倉，1993）。東京湾においても、2003年から2008年までのいずれの年にも、5月から11月にかけて底層に貧酸素水塊が存在している（第2図，第1表）。そこで、以降、5月から11月を「夏季」とし、この夏季の底層DOの変動に着目する。

2003年から2008年における各年夏季の底層DOの時間変化を第3図に示す。このグラフでは、底層DOの値として15日の移動平均値を用いている。

期間初めの5月上・中旬から7月下旬にかけて値が減少するパターンは、いずれの年においても共通している。一方で、夏季後半の底層DOの変動パターンは一様でない。例えば、2006年には、9月中旬から期間終わりの11月に向けて回復する様子が明確である。しかし、2004年には8月下旬から回復し始め、9月下旬に極大値をとり、その後再度減少している。11月末でも底層は貧酸素化しており、他の年に共通する夏季後半の回復は見られない。

このように、底層DOは年毎に異なった季節変化を示す。また、数週間～1ヶ月という、より短期的なタイムスケールでも年によって異なった様相を示す。例えば、2003年には夏季のうち特に7月中旬・下旬および9月中旬頃に1.5 mg/lと低い値を示すが、その期間には含まれる8月から9月上旬にかけて3～3.5 mg/lと値が回復している。一方で、2005年には7月下旬から9月下旬にかけて0.5 mg/l～1.0 mg/l程度と一定して値が低い。両年7月～9月のDO平均値を比較したところ、その差は最大で3 mg/lになっている。また、2005年および2008年には他の年に比べて、変動の振れ幅が小さい。

さらに、夏季の底層DOを年毎に平均し、経年変化を調べた（第4図）。いずれの年にもDO期間平均値は3.6 mg/l以下であり、平均値でも底層水は貧酸素化している。また、2003，2004，2006，2007年には3 mg/l台前半であるのに対し、2005年および2008年には2 mg/l台前半であった。



第4図 夏季の底層DO平均値の経年変化
Fig. 4 Mean DO in the bottom layer for each summer period

4 考察

第3節で示したとおり、底層DOは短期変動や極小値をとる時期、また貧酸素水塊の発生・解消のパターン等、年によって変動のパターンが異なっていることがわかった。

しかしながら、年による気象条件の違い等の天然の現象が及ぼす影響をこれらの変動から取り除かなければ、東京湾の水質改善状況を評価することはできない。そこで、本章では、底層DOの変動に影響を及ぼしていると考えられる要素を特定し、底層DOの経年変化からその影響を取り除く方法を考察する。

4.1 夏季底層DOと成層強度

底層が貧酸素化する要因として、成層化による表層から底層への酸素供給量の減少、水塊内での酸素消費量の増加等が挙げられる。

一般的に夏季の内湾は成層化するため表層から底層への酸素供給量は減少する。海底付近では酸素消費が酸素供給を上回る状態が続くと、貧酸素水塊が発生する（小倉，1993）。また、貧酸素水塊の消長は水塊内での酸素消費速度とも関連があるため、夏季の底層水温の上昇による水塊内の酸素消費の増加が貧酸素化につながる可能性がある（小倉，1993）。このように底層の貧酸素化には、成層強度や底層の水温が影響していると考えられる。

そこで、底層DOと成層強度及び底層DOと底層の水温の関係についてそれぞれ調べた（第5図）。

ここでは、海面と海底直上（水深約10 m）との密度差を成層強度の指標とした。

その結果、密度差が大きいほど、すなわち成層強度が強いほど、夏季の底層DOの平均値は低くなる傾向が見られた（第5図）。相関係数（R）は0.75であった。一方で、底層水温と底層DOとの間には相関は認められなかった（R=0.29）（第5図）。

2005年及び2008年では、夏季の底層DOの平均値が他の年に比べ低く（第4図）、どちらの年もDOの短期変動の振れ幅が他の年に比べて小さい（第3図）。変動の振れ幅が大きいということは、酸素を多く含んだ水塊の移流、あるいは底層に存在していた水塊と酸素を多く含む水塊との混合が考えられ、変動の振れ幅が小さいということは、逆に移流、混合が小さかったと考えられる。つまり、2005年及び2008年は、底層に存在する水塊への酸素供給量が他の年より少なかったため、底層DOの夏季平均値が低くなったと考えられる。以上のことから、夏季平均値というスケールでみると、成層強度が強いほど底層DOは小さくなるといえる。

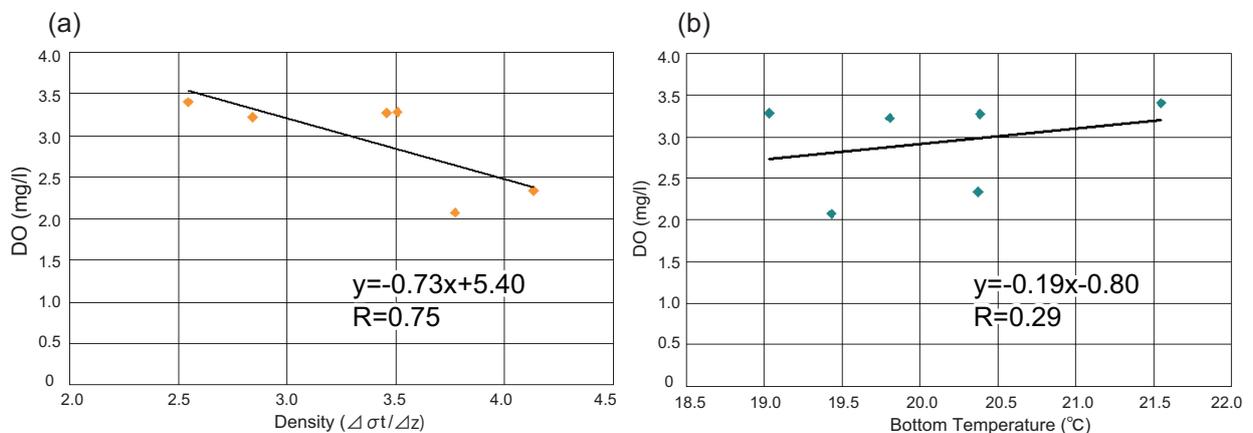
さらに、成層強度には何が影響しているのかを調べるため、成層化に関係すると考えられる「表層水温」「底層水温」「表層塩分」「底層塩分」の4項目の夏季平均値と、密度差の夏季平均値との関係をそれぞれ調べた（第6図）。その結果、密度差は表層の塩分と非常に高い相関を示し、逆にそれ以外の3項

目とは、相関は弱かった。

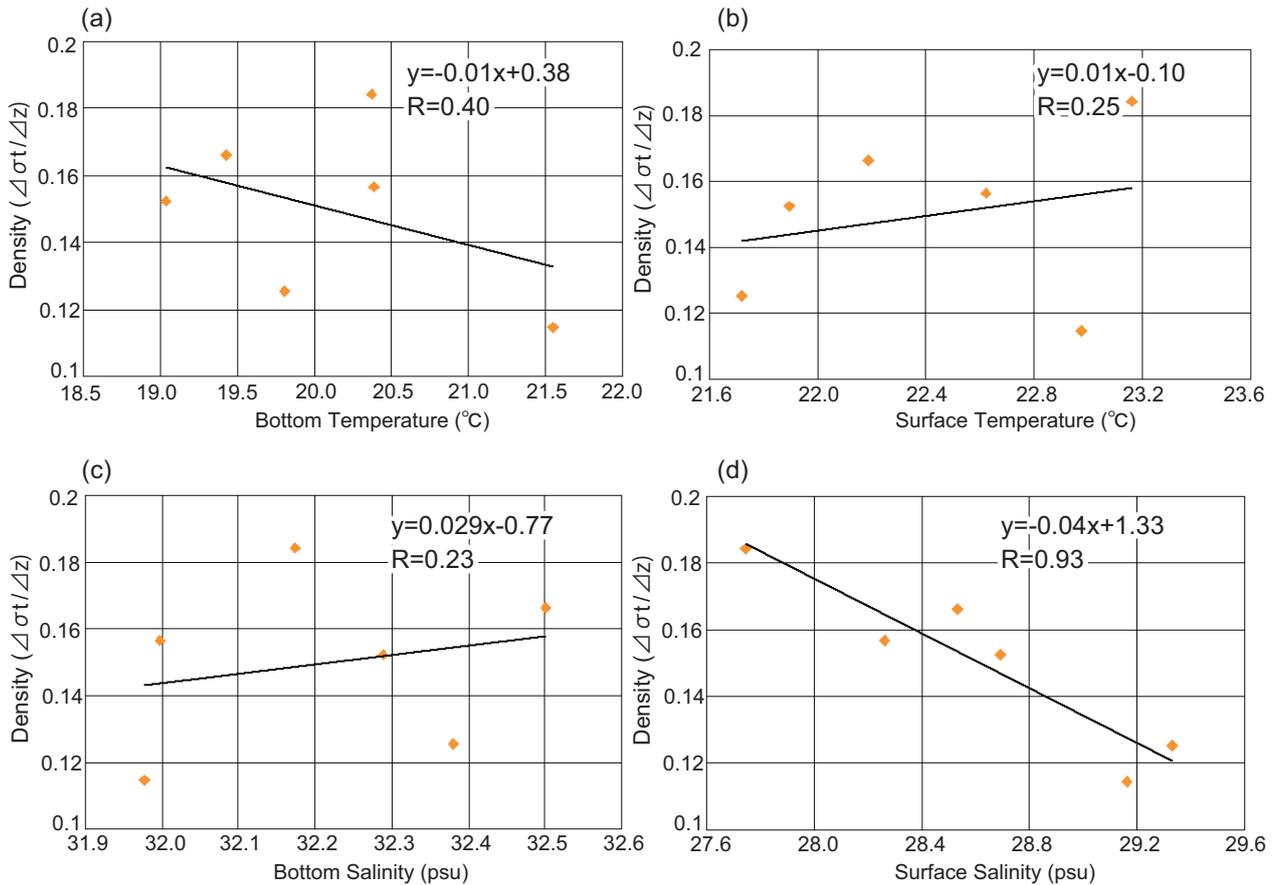
ここまで明らかにになったとおり、夏季平均値というスケールでは、底層DOの時間変化には成層強度（密度差）の変動が大きく影響する。つまり、東京湾の水質改善状況を正しく評価するためには、まずは底層DOの経年変化から成層強度の変化に起因する変動を取り除くことが重要であると考えられる。そこで、密度差と底層におけるDO夏季平均値との回帰直線（第5図）を用いて、底層DO時間変化から成層強度の変動に起因する影響を取り除くことを試みた。その考え方を第7図に示す。

まずある年のDOの夏季平均値（A）を求める。続いて、その年の表底の密度差の夏季平均値から回帰直線を用いて推定される底層DOの値（B）を求める。Bの値は、密度差だけで底層DOが決定すると仮定した場合の底層DOの値であると考えられる。そこで、この実際の夏季平均値（A）と回帰直線から得られた値（B）との差（A-B）に注目する。ここでの（A-B）は、底層DOの夏季平均値のうち、成層強度（密度差）以外の要因によってもたらされた部分であり、ここには水質改善のための施策に伴う効果も含まれると考えられる。

この方法により計算した、成層強度以外の要因で説明される底層DOの経年変化を第8図に示す。夏季平均値で見た場合、底層DOは2005、2008年において他の年より低い値をとり、その他の年はいずれ

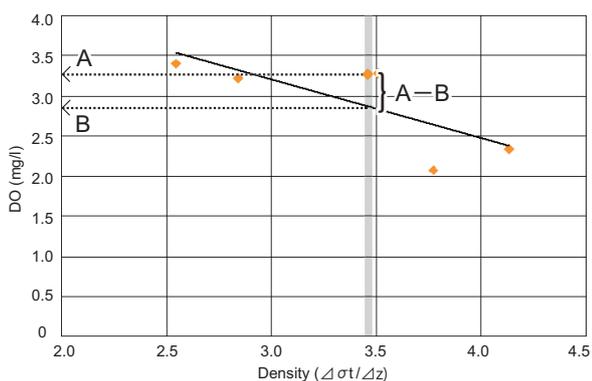


第5図 (a) 底層DOと成層強度及び、(b) 底層DOと底層水温の関係。値はそれぞれ、夏季平均値を示す。
Fig. 5 Relationship of mean DO in the bottom layer between (a) mean intensity of stratification and (b) mean water temperature in the bottom layer. Mean values for each summer period are shown.



第6図 成層強度と (a) 底層水温, (b) 表層水温, (c) 底層塩分, (d) 表層塩分との関係。値はそれぞれ、夏季平均値を示す。

Fig. 6 Relationship of mean intensity of stratification between (a) mean water temperature in the bottom layer, (b) mean water temperature in the surface layer, (c) mean salinity in the bottom layer and (d) mean salinity in the surface layer. Mean values for each summer period are shown.

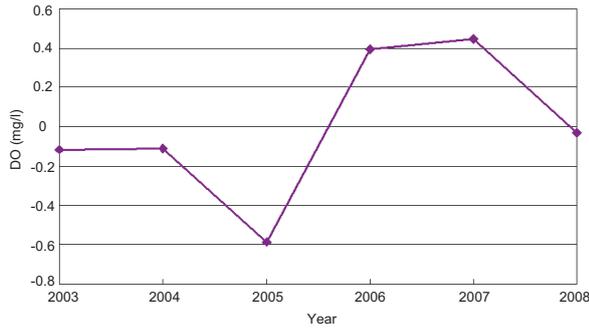


第7図 底層DOの夏季平均値から成層強度の影響を取り除く方法

Fig. 7 Diagram showing the method for removing the influence of intensity of stratification from mean DO in summer period

も同様の値となっている (第4図)。しかしながら夏季平均値ではほぼ同程度であった2005年・2008年及び2003年・2004年・2006年・2007年は、成層強度の影響を取り除くと夏季平均値とは異なった傾向を示した。すなわち、2008年には、夏季平均値は他の年より約1 mg/l低い値を示していたが、成層強度以外の要因で説明される底層DOでは、2008年は2003, 2004年よりも高い値を示した (第8図)。

成層強度以外の要因で説明される底層DOの経年変化について、2003年から2005年までを期間前半、2006年から2008年までを期間後半とし前期・後期それぞれの平均値を求めると、後期が前期を0.5 mg/l上回った。すなわち、2003年から2008年までの全体的な傾向としては、わずかではあるが底層DOは増加傾向にあると推測された。



第8図 成層強度以外の要因で説明される底層DOの経年変化

Fig. 8 Secular variation of mean bottom DO explained by other factors than intensity of stratification

しかしながら、若干の増加傾向にはあるものの、いずれの年にも夏季の底層DO平均値は3.6 mg/lを下回っており（第4図）、今後も更なる対策を進めていく必要があるといえる。

また、本稿では成層強度の影響を取り除くことを試みたが、実際の底層DOの変化には成層強度以外の要因も影響を及ぼしており、それらを特定し取り除くことで、より正確に改善状況を評価する必要がある。

5 まとめ

①2003～2008年の底層DOの夏季平均値をみると、成層強度（密度差）と相関があり、さらに成層強度は表層の塩分と強い相関にあることから、底層のDOは表層の塩分の変動に影響を受けると考えられる。

②成層強度の影響を除いたうえで、期間前半（2003～2005年）と期間後半（2006～2008年）の差をとると0.5 mg/lの増加となり、わずかではあるが底層DOは増加傾向にあると考えられる。

③今回は、底層DOの値から成層強度の変化に起因する変動分を取り除くことで東京湾の改善状況の評価を試みた。しかしながら、底層DOの変化には成層強度以外の天然の現象も寄与している。それらの要素を特定し、その影響を取り除くことで、施策による底層環境の改善状況をより適切に評価するこ

とが可能となる。

参 考 文 献

- 小倉紀雄：東京湾—100年の環境変遷—，恒星社厚生閣，193（1993）。
- 山尾理：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（2），137-141（2003）。
- 柳哲雄：貧酸素水塊の生成・維持・変動・消滅機構と化学・生物的影響，海の研究，13，451-460（2004）。