

内湾域環境における連続モニタリング手法の 効率化に関する基礎的研究

BASIC STUDY ON THE MONITORING TECHNIQUES FOR BAY ENVIRONMENT BY SENSORS' DEPLOYMENT

工藤圭太¹・古川恵太²・岡田知也³

Keita KUDOH, Keita FURUKAWA and Tomonari OKADA

¹正会員 工修 (株)アルファ水工コンサルタンツ 環境保全室 (〒063-0829北海道札幌市西区発寒9-14
516-336)

²正会員 工博 国土技術政策総合研究所 海洋環境研究室長 (〒239-0826神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

³正会員 工博 国土技術政策総合研究所 海洋環境研究室主任研究官 (〒239-0826神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

It is important to know temporal and spatial change of environment to evaluate its status. Especially, vertical profile and temporal change of water quality are taking an important role on Tokyo Bay environment, since strong stratification and hypoxia in the bottom layer during summer are easily changed by wind driven mixing. However, it is not feasible to obtain a dense data for both vertical and temporal domains for wide area of the bay because of the cost. This research aimed to establish a cost-effective method for the monitoring of vertical profile of the hypoxia by a simple set of a thermistor chain and a dissolved oxygen (DO) sensor. The key factor of success of the method was based on similarity on vertical profile of temperature and DO.

Key Words : *Enclosed bay, Monitoring, Hypoxia, Dissolved oxygen, Water temperature*

1. はじめに

内湾域の環境を総合的に把握し評価するためには、長期的・広域的な環境変化を理解することが重要であり、現在、東京湾では様々なモニタリング調査が実施されている。これらの調査によって、夏季に頻繁に発生する貧酸素水塊の問題等が明らかとなっている¹⁾。貧酸素水塊がもたらす環境影響を把握するためには、溶存酸素(DO)濃度の鉛直分布の詳細な把握が重要である。しかし、湾内全域において鉛直方向に密なデータを連続観測することは、コストおよび維持管理等の面で容易ではない。したがって、効率的・経済的なモニタリングを行うために、DO濃度の鉛直構造を簡易に推定する手法を確立することが有効であると考えられる。

本研究では、水温とDO濃度の鉛直分布の相関性に着目し、東京灯標の水温の連続観測モニタリングデータを用いて、DO濃度の鉛直分布を推定する手法の検討を行った。また、千葉灯標の連続観測データおよび東京湾内複数地点の広域観測データを用い、本推定手法の適用性について検討を行った。

2. 水温の鉛直分布からDO濃度の鉛直分布を推定する手法の考案

(1) データの概要

東京灯標で観測された水温およびDO濃度の鉛直分布の連続データを使用した。東京灯標は、東京湾の湾奥の東京港側で、羽田沖約4km、荒川・江戸川沖約10kmに位置する(図-1)。データの測定期間は、平成19年8月27日0時から9月4日12時までの8.5日間である。測定には自動昇降式多項目水質計(ワイエスアイ・ナノテック社製6600V2)を用いた。測定時刻は毎正時、測定水深は水面下0.5mから底面直上1.0mまで0.5m間隔とした。測定地点の平均水深はおおよそ10mである。

(2) 水温およびDO濃度の変動特性

貧酸素水塊(DO濃度が3mg/l以下とする)の層厚は、8月27, 28日には約3~4m, 29日には一旦解消し0m, 30日には表層に達しており8m, 31日には再び解消し0m, 9月1日には2m, 2日には再び解消し0m, 9月3日から徐々に発達し4日には4mだった。このように、測定水域の貧酸素水塊の層厚は数日スケールで変動していた。

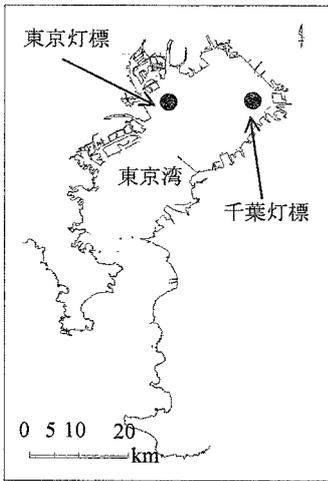


図-1 東京灯標および千葉灯標の位置図

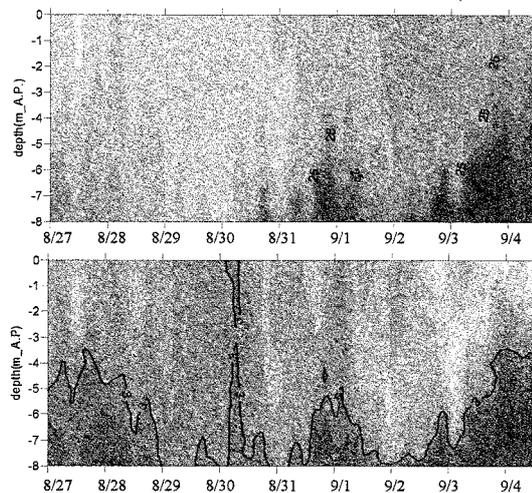


図-2 水温(°C) (上), DO濃度(mg/l) (下)の鉛直分布の時間変化(実線は3mg/lを示す)

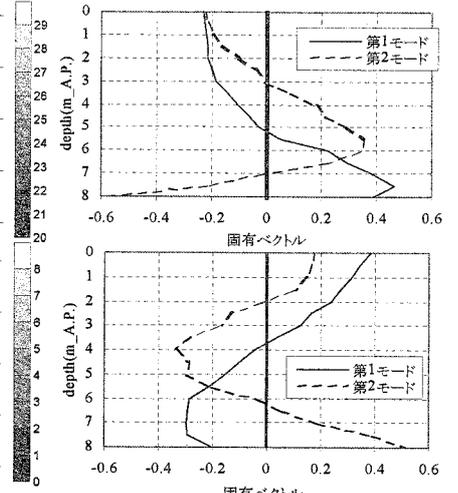


図-3 各モードの固有ベクトルの鉛直分布 (上段: 水温, 下段: DO濃度)

水温の時間変動は DO 濃度の時間変動に類似していた (図-2)。各時刻における水温と DO 濃度の相関係数の平均値は 0.94 だった。

(3) 検討手法

水温および DO 濃度の鉛直分布の変動特性を把握するため、EOF (Empirical Orthogonal Function) 解析を実施した。EOF 解析は多地点の時系列データの集まりから、主要な空間変動パターン (モード) を新しい時系列データとして抽出する方法で、データを持つ意味を理解しやすくする手法である。本研究では、EOF 解析を多層の時系列データに適用し、鉛直分布の変動パターンの抽出に用いた。

時刻 t_k ($k=1, \dots, K$) (K : 時間方向のデータ数) に水深 X_i ($i=1, \dots, N$) (N : 鉛直方向の層数) で観測された各水質項目 (水温・DO 濃度) の鉛直方向の平均値からの差 (偏差) $Y(X_i, t_k)$ は以下のように表される。

$$Y(X_i, t_k) = \sum_{n=1}^N E_n(t_k) \Phi_n(X_i) \quad (1)$$

$$E_n(t_k) = \sum_{i=1}^N Y(X_i, t_k) \Phi_n(X_i) \quad (2)$$

ここに、 $\Phi_n(X_i)$ は第 n モードの固有ベクトル、 $E_n(t_k)$ は各モードの振幅を表す。各モードの固有ベクトル $\Phi_n(X_i)$ ($j=1, \dots, N$) と固有値 λ_n は以下の方程式を解くことにより算出される。

$$\sum_{i=1}^N R(X_i, X_j) \Phi_n(X_i) = \lambda_n \Phi_n(X_j) \quad n=1, \dots, N \quad (3)$$

$$R(X_i, X_j) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K [Y(X_i, t_k) - \overline{Y(X_i)}][Y(X_j, t_k) - \overline{Y(X_j)}] \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N \Phi_n(X_i) \Phi_m(X_i) = \delta_{nm} \quad (5)$$

である。ここに、 $\overline{\quad}$ は時間平均を表す。全変動に対する各モードの寄与率 C_n は、固有値の総和に対する各モードの固有値の割合から求められる。

(4) 検討結果

a) 固有ベクトル分布

固有ベクトルの値は、水深の関数となる (図-3)。また、DO濃度の固有ベクトル分布は、水温の固有ベクトル分布の対称に近い形状 (正負を入れ替えた形状) となっていた。

水温の固有ベクトルの第1・2モードは共に、代表的な内部波のモード解の形状²⁾に類似していた。内部波のモード解は可付番無限個の成分波が存在し、モード番号が大きくなると成分波の形状も異なる (節の数が増える) が、共に密度の鉛直分布と深く関連する²⁾。したがって、内部波のモード解の形状と類似している固有ベクトル分布は、密度の鉛直分布に関連があると考えられる。

b) 寄与率

水温および DO 濃度の寄与率は、第1モードと第2モードで、それぞれ 88%、91%を占めていた。

c) 振幅と DO 濃度の勾配および曲率の関係

前述した DO 濃度の固有ベクトル分布を、第1モードは1次の直線、第2モードは2次曲線で近似できると仮定した。DO濃度の鉛直分布に対し、1次直線および2次曲線の特徴を示す代表値として、直線近似に対する勾配、2次曲線近似に対する2次の曲率をそれぞれ算出した。勾配の時間変化と第1モードの振幅の時間変化、および2次曲率の時間変化と第2モードの振幅の時間変化は、共に極めて良く一致していた (図-4)。つまり、DO濃度の固有ベクトル分布の第1モードは1次の直線、第2モードは2次曲線で近似でき、さらに DO 濃度の固有ベクトルの各モードに対する振幅は、DO濃度の鉛直分布における直線の勾配と2次曲線の曲率に定数1で比例する。

(5) 水温の鉛直分布を用いた DO 濃度の鉛直分布の推定

a) 水温と DO 濃度の時間変動比較および規格化

DO 濃度と同様に水温についても勾配・2 次曲率

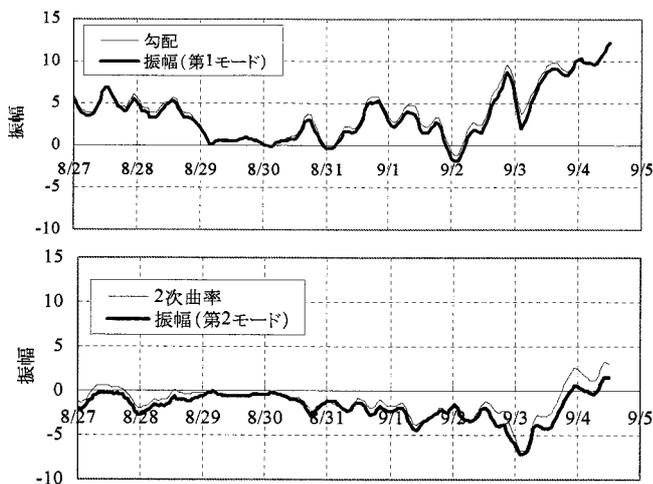


図-4 DO濃度の鉛直分布の勾配と第1モードの振幅(上)、DO濃度の鉛直分布の2次曲率と第2モードの振幅(下)の時間変化

を算出し、DO濃度と水温でそれぞれ比較した(図-5)。DO濃度の鉛直分布の勾配と水温の鉛直分布の勾配は、貧酸素水塊が発達していない期間では一致したが、貧酸素水塊が発達している期間では多少の差があった。DO濃度の鉛直分布の2次曲率と水温の鉛直分布の2次曲率も同様であった。水温およびDO濃度の鉛直分布は、相似形であるものの、両者の単位が異なっており、単純に両者の鉛直分布の勾配・2次曲率を比較するのではなく、分布形状の規格化(無次元化)が必要である。

そこで、各時刻の表層と底層の水温およびDO濃度が[0-1]となるような規格化を行った。時刻 t_k ($k=1, \dots, K$)(K : 時間方向のデータ数)、水深 X_i ($i=1, \dots, N$)(N : 鉛直方向の層数)における水温(またはDO濃度) $Z(X_i, t_k)$ は次式で規格化された。

$$Z'(X_i, t_k) = \frac{Z(X_i, t_k) - Z_b(t_k)}{Z_s(t_k) - Z_b(t_k)} \quad (6)$$

ここに、規格化後の値: $Z'(X_i, t_k)$ 、底層における水温(またはDO濃度): $Z_b(t_k)$ 、表層における水温(またはDO濃度): $Z_s(t_k)$ である。

b) DO濃度の鉛直分布の推定手法

以下にDO濃度の鉛直分布の推定手法を示す。

- ①規格化された水温の鉛直分布から勾配と2次曲率を求めた。前節で示したように、この規格化された水温の鉛直分布の勾配および2次曲率は規格化されたDO濃度の鉛直分布の勾配および2次曲率に一致する。そこで、規格化された水温の鉛直分布の勾配および2次曲率を、規格化されたDO濃度の鉛直分布の勾配および2次曲率とした。
- ②表層と底層のDO濃度および(6)式を用いて、①で求めた勾配と2次曲率をDO濃度のスケールに変換した。ここで、期間中の表層におけるDO濃度がほぼ飽和状態であったことから、表層DO濃度は、表層水温から算出された飽和DO濃度を用い

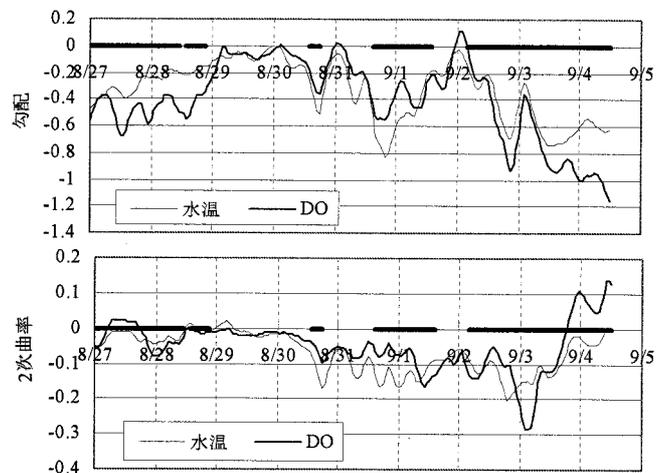


図-5 水温とDO濃度の勾配(上)および2次曲率(下)の時間変化(太線は貧酸素水塊が発達している期間)

た。底層のDO濃度は観測値を用いた。

- ③前節で示したようにDO濃度の第1および第2モードの固有ベクトルに対する振幅の時間変動は、それぞれDO濃度の鉛直分布における直線の勾配の時間変動および2次曲線の曲率の時間変動とみなすことが可能である。したがって、②で変換された勾配および2次曲率を、DO濃度の第1および第2モードの固有ベクトルに対する振幅とした。その第1および第2モードの固有ベクトルを用いて、DO濃度の鉛直分布の時間変動(鉛直平均からの差)を算出した。

- ④③で算出されたDO濃度の鉛直分布の時間変動(鉛直平均からの差)と底層のDO濃度を用い、DO濃度の鉛直分布の時間変動を推定した。

c) 手法の適用結果

貧酸素水塊が発達している期間において、各時刻における水深毎の実測DO濃度と再現DO濃度に対する両者の相関係数の時間平均値は0.70、両者の差の時間平均値および標準偏差は $0.4 \pm 0.4 \text{ mg/l}$ だった。貧酸素水塊の厚さに関しては、8月30日の表層にまで及ぶ状態は再現できなかったものの、その他の期間における貧酸素水塊厚さの時間変動は非常に良く一致していた(図-6)。

規格化を実施した場合の鉛直分布と規格化を実施しなかった場合の鉛直分布を比較すると、前者の方が貧酸素水塊の変動をより良く再現していた(図-6)。これは前項の規格化の妥当性を示していた。

(6) まとめ

東京灯標において、水温の鉛直分布の勾配・2次曲率、DO濃度の鉛直分布の固有ベクトルおよび規格化を用いて、DO濃度の鉛直分布、特に貧酸素水塊厚さを再現することができた。DO濃度の鉛直分布を把握する上で、本推定手法は十分な精度を有し

ていたと考える（相関係数：0.70，差：0.4±0.4 mg/l）。

3. 千葉灯標の連続観測データを用いた推定手法の適用性の検討

(1) データの概要

千葉灯標で観測された水温およびDO濃度の鉛直分布の連続観測データを用いた。千葉灯標は千葉港の南西沖約5.0kmに位置している（図-1）。千葉灯標では、海上保安庁により水温およびDO濃度等のデータが常時連続観測されている³⁾。

本検討では、前章と比較するために前章と同様の期間である平成19年8月27日0時から9月4日12時までの8.5日間のデータを用いた。千葉灯標では、データは毎正時に、水面下0.5mから底面直上1.0mまで1.0m間隔で測定されている。測定地点の平均水深はおよそ10mである。

(2) 推定手法を適用するための項目の検討

前章の検討によって、本推定手法を適用するためには、以下の4つの項目を検討する必要があることが示された。

- ①水温の鉛直分布とDO濃度の鉛直分布の相関が高い。
- ②DO濃度の固有ベクトル分布が水温の固有ベクトル分布の対称形（正負を入れ替えた形状）に近い。
- ③水温およびDO濃度の各モードの寄与率は第1モードおよび第2モードで高い割合を占める。
- ④DO濃度の固有ベクトル分布の第1モードは1次の直線，第2モードは2次曲線で近似できる。また，DO濃度の鉛直分布の勾配の時間変化と第1モードの振幅の時間変化が一致し，DO濃度の鉛直分布の2次曲率の時間変化と第2モードの振幅の時間変化が一致する。

水温およびDO濃度の鉛直分布は東京灯標と異なっていたが，各時刻における水温とDO濃度の相関係数の平均値は0.93であった。その値は，東京灯標の値とほぼ同じだった。

水温およびDO濃度の固有ベクトル形状は，第1モードは直線的，第2モードは中層にピークを持つ2次曲線であり，DO濃度の固有ベクトル分布は，水温の固有ベクトル分布の対称に近い形状（正負を入れ替えた形状）だった。

水温およびDO濃度の寄与率は，第1モードと第2モードで，それぞれ89%，79%を占めていた。東京灯標に比べると，水温の寄与率はほぼ同じだった。一方，DO濃度の寄与率は10%程度低かったが，80%程度の高い値を占めていた。

DO濃度の鉛直分布の勾配の時間変化と第1モードの振幅の時間変化は極めて良く一致していた。また，DO濃度の鉛直分布の2次曲率の時間変化と第

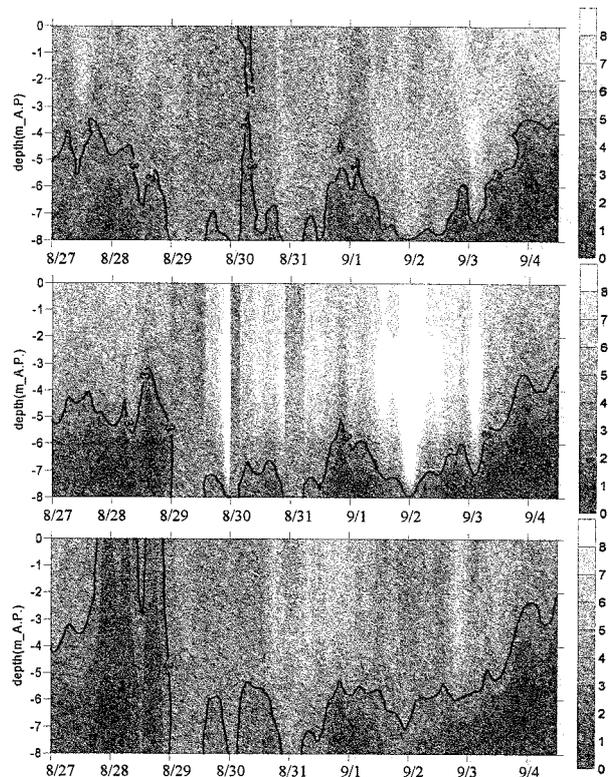


図-6 DO濃度 (mg/l) の鉛直分布の時間変化（上段：実測，中段：再現（規格化あり），下段：再現（規格化なし）（実線は3mg/lを示す）

2モードの振幅の時間変化も，良く一致していた。したがって，東京灯標と同様に，DO濃度の固有ベクトル分布の第1モードは1次の直線，第2モードは2次曲線で近似でき，さらにDO濃度の固有ベクトルの各モードに対する振幅は，DO濃度の鉛直分布における直線の勾配と2次曲線の曲率とみなすことができた。

このように千葉灯標の観測データは本推定手法を適用するための項目①～④のすべてを満たした。

(3) 推定手法の適用性

本推定手法を適用すると，貧酸素水塊が発達している期間において，各時刻における水深毎の実測DO濃度と再現DO濃度に対する両者の相関係数の時間平均値は0.76，両者の差の時間平均値および標準偏差は0.7±0.6 mg/lだった。貧酸素水塊厚さの時間変動は良く一致していた（図-7）。したがって，本推定手法は千葉灯標近傍の水域に対しても適用可能であることが示された。

4. 東京湾内複数地点の観測データを用いた推定手法の適用領域検討

(1) データの概要

平成14年度に実施した東京湾広域環境調査⁴⁾の採水調査結果（各月に実施）の中で，貧酸素水塊の発達している地点が最も多かった平成14年7月29日の

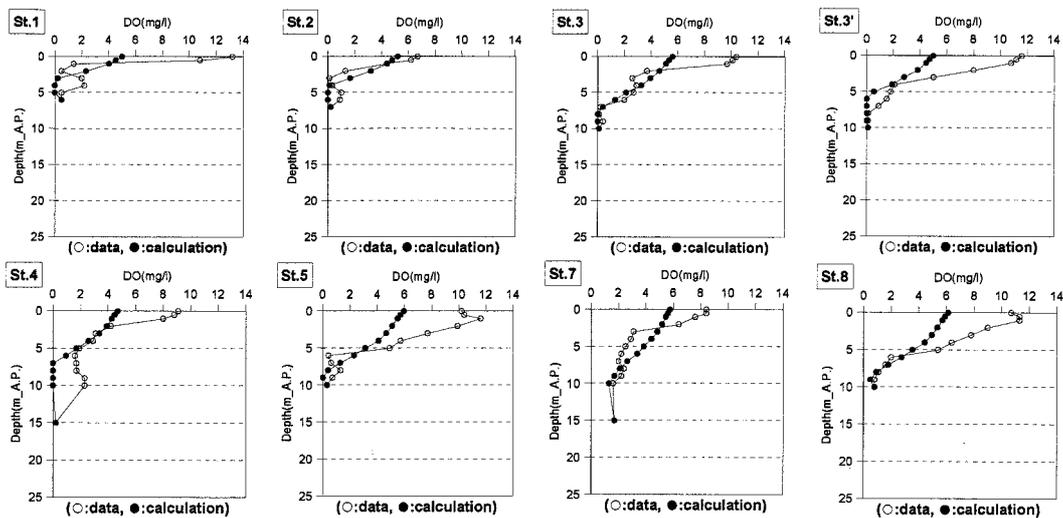


図-9 実測および再現DO濃度の鉛直分布 (St.1,2,3,3',4,5,7,8)

性は弱いと考えられる。

St.5 は荒川河口域に位置し、密度分布は河川水の影響を強く受ける水域であり、水温の鉛直分布とDO濃度の鉛直分布の関連性は弱いようである。

(4) まとめ

東京湾の湾奥部 (St.3,3',7,8) では本推定手法を適用できる可能性が比較的高い一方で、湾の最奥部 (St.1,2) や荒川河口周辺部 (St.5) では本推定手法を適用できる可能性が低かった。

5. まとめ

本研究では、水温の鉛直分布の連続観測データからDO濃度の鉛直分布を推定する手法を考案した。また、本推定手法の適用性および適用領域を検討することができ、湾内での連続観測モニタリングの効率的な運用に向けての一方策が示された。これらの結果は、湾内環境把握に伴うモニタリング運用コストの削減、および、運用システムメンテナンス作業等の効率化を検討する上で、有効な資料になると考えられる。今後、本推定手法の精度向上や実際のモニタリングの効率的運用へ向け、以下のような課題が挙げられる。

- (1) 本検討では、短期間のデータを用いた。そのため、長期的・季節的な変動の検討を行う場合は、長期間の連続観測データを使用して本推定手法の確認を行うことが望ましい。
- (2) 本推定手法では、DO濃度の鉛直構造が直線および2次曲線で近似できる点に着目しているため、密度分布が複雑な構造である地点に対する本推定手法の適用性は低かった。他の水塊からの流入や中層における貧酸素化、河川水の影響、異常時の変動等によって生じる複雑な密度構造の場でも貧酸素水塊の変動を推定できるような手法の改良が必要である。

表-1 実測DO濃度と再現DO濃度の相関係数および差の平均値・標準偏差

観測地点	実測と再現DO濃度の相関係数	差の平均値・標準偏差	
		mg/l	
広域調査	St.1	-0.13	1.5±1.0
	St.2	0.34	0.9±0.7
	St.3	0.91	0.5±0.4
	St.3'	0.70	0.6±0.6
	St.4	0.43	1.1±1.0
	St.5	-0.37	0.8±0.7
	St.7	0.82	0.7±0.6
	St.8	0.98	0.3±0.3
東京灯標	0.70	0.4±0.4	
千葉灯標	0.76	0.7±0.6	

謝辞：本研究を遂行するにあたり、国土技術政策総合研究所沿岸域システム研究室の日向博文室長にはEOF解析プログラムをご提供いただくと同時に、大変有益な助言をいただきました。また、同研究所海洋環境研究室の早川修研究官にも大変有益な助言をいただきました。さらに、海上保安庁第三管区海上保安本部および東京海上保安部の皆様方には、東京灯標の使用および観測機器の設置におきまして多大なご協力をいただき、関東地方整備局港湾空港部沿岸域管理官室の皆様方には、観測機器の設置や機器メンテナンス等におきまして多大なご協力をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 安藤晴夫ほか：1980年以降の東京湾の水質汚濁状況の変遷について-公共用水域水質測定データによる東京湾水質の長期変動解析-, 東京都環境科学研究所年報, pp.141-150, 2005.
- 2) 宇野木早苗：沿岸の海洋物理学, 東海大学出版会, pp.350-355, 1993.
- 3) 海上保安庁：東京湾リアルタイム水質データ, Webによる公開データ, <http://www4.kaiho.mlit.go.jp/kaihoweb/index.jsp>, 2007.
- 4) 国土交通省国土技術政策総合研究所：平成14年度東京湾広域環境調査, Webによる公開データ, <http://www.nilim.go.jp/>, 2002.