

ISSN 1346-7301

国総研研究報告 第35号

平成 20 年 3 月

国土技術政策総合研究所 研究報告

RESEARCH REPORT of National Institute for Land and Infrastructure Management

No.35

March 2008

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

工藤圭太 古川恵太 岡田知也

Basic Study on the Monitoring Techniques for Bay Environment
by Sensors ' Deployment

Keita KUDOU, Keita FURUKAWA, Tomonari OKADA

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

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

工藤圭太*・古川恵太**・岡田知也***

要 旨

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捉えることが重要である。特に東京湾のように強い成層が形成され貧酸素水塊の挙動が問題となる閉鎖性内湾においては、水質の鉛直構造およびその時間変化を把握することが重要である。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容易なことではなく、効率的なモニタリング手法の確立が必要である。

そこで、本研究では水温および溶存酸素（DO）濃度のモニタリングを対象とし、両項目の鉛直分布の類似性に着目して、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検討を行った。

検討により、以下の検討結果が得られた。

- (1) 東京灯標における水温とDO濃度の連続観測モニタリングデータを対象とし、容易に測定できる水温の鉛直分布からDO濃度の鉛直分布を推定する手法を考案した。
- (2) 千葉灯標における連続観測モニタリングデータを用いて検討を行い、上記推定手法の適用性を確認した。
- (3) 東京湾内の複数の地点にて観測された鉛直プロファイルデータを用いて検討を行い、東京湾内において上記推定手法の適用領域を検討した。

キーワード：内湾域，モニタリング，貧酸素水塊，溶存酸素，水温

*沿岸海洋研究部海洋環境研究室交流研究員（株式会社アルファ水工コンサルタンツ）
**沿岸海洋研究部海洋環境研究室長
***沿岸海洋研究部海洋環境研究室主任研究官
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国土交通省国土技術政策総合研究所
電話：046-844-5023 Fax：046-844-1145 e-mail: furukawa-k92y2@ysk.nilim.go.jp

Basic Study on the Monitoring Techniques for Bay Environment by Sensors' Deployment

Keita KUDOU*
Keita FURUKAWA**
Tomonari OKADA***

Synopsis

It is important to know temporal and spatial change of environment to evaluate its status. Especially, vertical profile and temporal change of water quality is 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.

Followings were major accomplishments of this study;

- (1) By using a dense data set obtained at the Tokyo Light Beacon, the method for the monitoring of bottom hypoxia by a simple deployment had been established.
- (2) The applicability of the proposed method was tested on the other dense data set obtained at the Chiba Light Beacon. Both of sites were located at inner part of Tokyo Bay. The data set shows a good applicability of the method.
- (3) The applicability of the proposed method was tested for wide area of Tokyo Bay by using a limited data set obtained by STD casts by boats. Limited areas had a good applicability of the method.

Key Words : enclosed bay, monitoring, hypoxia, dissolved oxygen, water temperature

* Visiting Researcher of Marine Environment Division, Coastal and Marine Department. (Alpha Hydraulic Engineering Consultants Co., Ltd.)
** Head of Marine Environment Division, Coastal and Marine Department.
*** Senior Researcher of Coastal and Marine Department.
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5023 Fax : +81-46-844-1145 e-mail: furukawa-k92y2@ysk.nilim.go.jp

目 次

1. はじめに	1
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	2
2.1 データの概要	2
2.2 水温およびDO濃度の変動特性	2
2.3 検討手法	2
2.4 検討結果	3
2.4.1 固有ベクトル	3
2.4.2 寄与率	5
2.4.3 振幅とDO濃度の勾配および曲率の関係	5
2.5 水温の鉛直分布を用いたDO濃度の鉛直分布の推定	5
2.5.1 水温とDO濃度の時間変動比較および規格化	5
2.5.2 DO濃度の鉛直分布の推定手法	6
2.5.3 手法の適用結果	6
2.6 まとめ	7
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	7
3.1 データの概要	7
3.2 推定手法を適用するための項目の検討	7
3.2.1 水温の鉛直分布およびDO濃度の鉛直分布の相関性	8
3.2.2 水温の固有ベクトル分布とDO濃度の固有ベクトル分布の対称性	8
3.2.3 水温およびDO濃度の各モードの寄与率の割合	8
3.2.4 DO濃度の鉛直分布の勾配および2次曲率の時間変化と各モードの振幅の時間変化	8
3.3 推定手法の適用性	9
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	9
4.1 データの概要	9
4.2 推定手法を適用するための項目の検討	10
4.3 推定手法の適用性	10
4.4 まとめ	13
5. まとめ	13
6. おわりに	14
謝辞	14
参考文献	14
付録A 東京灯標へ設置したシステムの概要	16

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る。そこで、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。1970年に制定された水質汚濁防止法を受ける形で開始されたモニタリング調査は、沿岸の都県市により、周辺環境の監視や施策効果の評価等を目的とし、人の健康の保護に関する環境基準項目および生活環境の保全に関する環境基準項目を対象にしている。その調査の調査地点数は、環境基準点・補助点合わせて105箇所であり、各地点においてほぼ月1回のモニタリング調査が実施されている。また、これらのモニタリング調査以外にも、環境省による広域総合水質調査（環境省、2007）、国土交通省関東地方整備局による各種水質のモニタリング調査（国土交通省関東地方整備局、2007）、海上保安庁による海洋汚染調査（海上保安庁、2007）、沿岸の都県市による底生生物調査や赤潮・青潮の発生状況の調査が毎年実施されている。

これらの調査によって、例えば東京湾では、次の様なことが明らかとなっている。安藤ら（2005）は、東京湾における1980年以降の水質汚濁状況の推移を検討し、環境基準に係る類型別に、溶存酸素（DO）濃度が2mg/l以下となる水域の割合を経年的に整理した（図-1）。その結果、貧酸素水域の割合は、長期的にはいずれの類型においても横ばいか、もしくはやや増加の傾向があることが示された。また、夏季に湾奥部全域が貧酸素化する状況、および湾口部に近い海域におけるDO濃度の低下傾向等、貧酸素水塊の広域的な変化についても示された。

貧酸素水塊は、東京湾に限らず閉鎖性の強い内湾では夏季に頻繁に発生する。その理由として、①閉鎖性内湾では、夏季に強い成層構造が形成され、鉛直混合が抑制され、表層から底層へ酸素が供給され難いこと、②富栄養化によって生じた大量のプランクトンなどの死骸や有機汚泥の沈降・腐敗等により、底層の酸素消費速度が高くなることが挙げられる。

内湾域の生態系の観点から見ると、貧酸素水塊が貝類・甲殻類・底魚等の底生生物に対して酸素の欠乏という致命的な影響を与えると同時に、様々な二次的現象を引き起こしている（中村ら、1988）。例えば、無酸素化した底泥直上ではリンおよび硫化物が生成される。リンの溶出は富栄養化を助長する。また、硫化物の生成は青潮の要因となる。硫化物を含んだ底層水が、風および水域の成層条件によって海面に湧昇すると表層で酸化されて硫黄となり、海表面を青白く変色させる。これが青潮

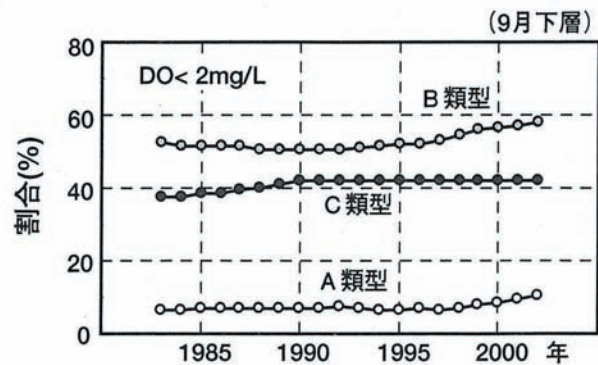


図-1 東京湾における環境基準に係る類型毎の貧酸素化した水域面積の割合の経年変化（安藤ら、2005）

であり、回遊性のある魚類に被害を与え、漁業に対して深刻な影響を及ぼす。

このような貧酸素水塊がもたらす環境影響を把握するためには、DO濃度の鉛直構造の詳細な把握が重要である。しかしながら、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。効率的なモニタリング手法の確立が必要である。

モニタリング機器のコストおよび維持管理に着目すると、DO計は比較的高価であり、かつ精度維持のための高頻度のメンテナンスが不可欠である。一方、水温計は比較的安価であるため、鉛直方向に複数台設置することが可能であり、また、水温計は生物付着によるデータ精度の劣化は小さい（生物付着の影響を受けにくい）ため、高頻度のメンテナンスは不必要である。なお、塩分計の生物付着による劣化は非常に大きく、例えば東京湾では、週に1回程度の塩分計のメンテナンスが必要となっている。したがって、複数台の水温計を用いた水温の鉛直データから、DO濃度の鉛直構造を推定する手法を確立することができると、効率的・経済的なモニタリングが可能となる。水温とDO濃度の類似性について、中村ら（1988、1990）は、底層におけるDO濃度と水温の鉛直構造には強い相関があることに着目し、水温およびDO濃度の分布を記述することのできる鉛直一次元モデルを開発した。そのモデルを使用することにより、DO濃度は密度躍層を通して上層から鉛直下方に供給されるという仮定のもと、大阪湾奥部における観測値を良好に再現した。また、村

上・長坂（1996）は、閉鎖度の強い大船渡湾を例に、水温とDO濃度の鉛直一次元モデルによる数値実験を行い、水温の鉛直分布によって形成される成層構造が貧酸素水塊の形成に重要であることを示した。その他にも多くの研究において、水温とDO濃度の高い関連性について言及されている（例えば、村岡ら，1992；佐々木ら，1993；佐々木，1996）。

そこで、本研究では水温とDO濃度の鉛直分布の類似性に着目し、水温の連続観測モニタリングデータから、DO濃度の鉛直分布を推定する手法について検討を行った。

本稿の章構成は以下のとおりである。2章では、東京灯標における水温の鉛直分布の観測データからDO濃度の鉛直分布を推定する手法について示す。上記推定手法の適用性を確認するために、千葉灯標の連続観測データを用いた検討および東京湾内複数地点の広域観測のデータを用いた検討を、それぞれ3章および4章に示す。最後に、5章にまとめを示す。

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

本章では、東京灯標において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使用し、それらの変動特性を把握するために、EOF（Empirical Orthogonal Function）解析を実施した。さらに、それらの変動特性を用いて、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検討を行った。

2.1 データの概要

本研究で用いた水質計は東京灯標に設置された。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-2）。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。なお、本研究で使用した水温およびDO濃度の鉛直分布連続観測データは、東京灯標へ設置されたシステムのうち、鉛直方向全層の連続データを取得可能な「(1) 鉛直プロフィール観測機器」のシステムにより取得したデータを用いている。東京灯標へ設置したシステムの詳細については付録Aを参照されたい。

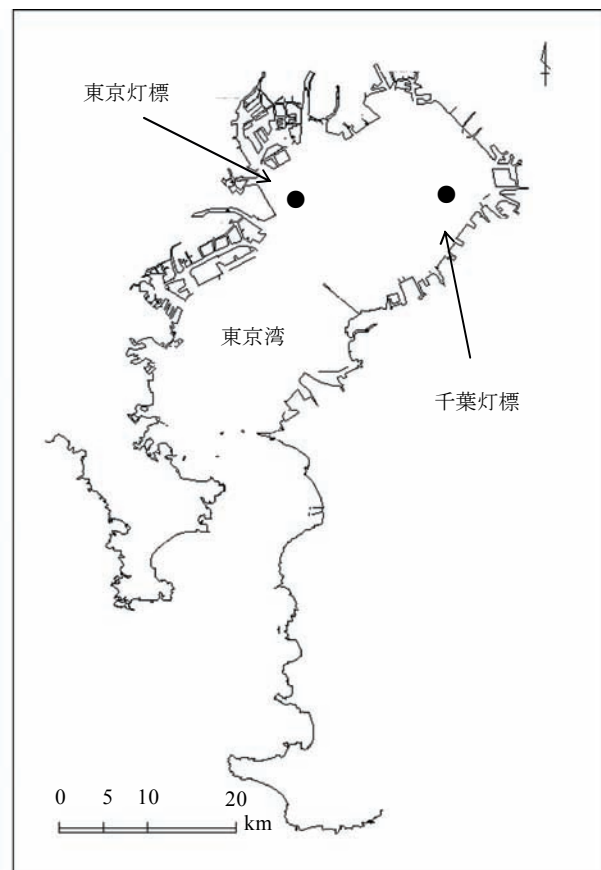


図-2 東京灯標および千葉灯標の位置図

2.2 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。

水温の時間変動はDO濃度の時間変動に類似していた（図-3）。各時刻における水温とDO濃度間の相関係数の平均値は0.94だった。また、塩分の変動も水温とDO濃度の時間変動に類似していた。

2.3 検討手法

水温およびDO濃度の鉛直分布の時間変動特性を把握するために、EOF解析（例えば、柳，1993）を実施した。EOF解析は多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、データの持つ意味を理解しやすくす

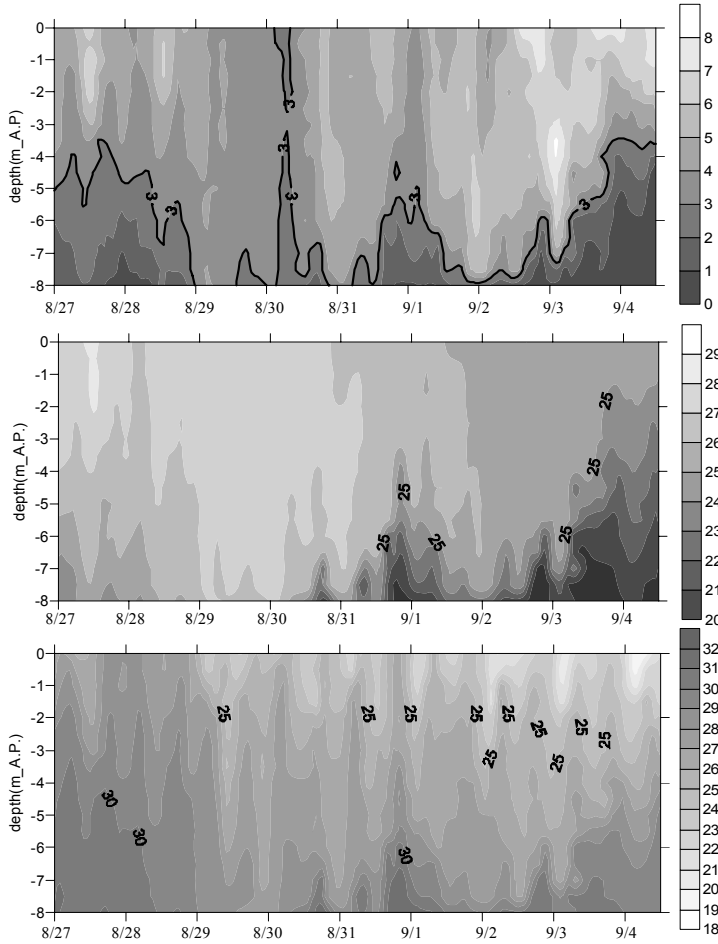


図-3 DO 濃度 (mg/l) (上), 水温 (°C) (中), 塩分 (‰) (下) の鉛直分布の時間変化 (実線は 3mg/l を示す)

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て、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 は時間方向のデータ数) に水深 X_i ($i=1, \dots, N$) (N は鉛直方向の層数) 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 $\Phi_n(X_j)$

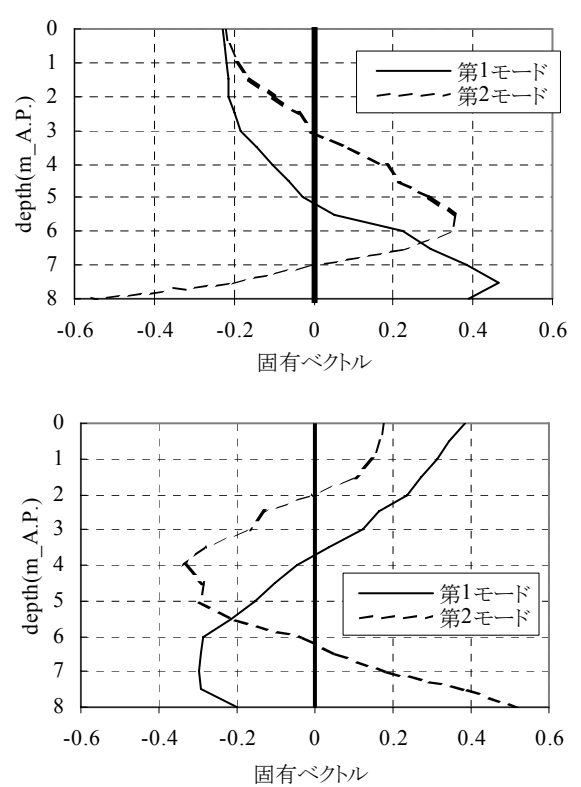


図-4 各モードの固有ベクトルの鉛直分布 (上段：水温，下段：DO 濃度)

($j=1, \dots, N$) 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、 $\overline{}$ 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。

2.4 検討結果

2.4.1 固有ベクトル

固有ベクトルの値は、水深の関数となり (図-4)，固有ベクトルに対する振幅の値は時間の関数となる (図-5)。

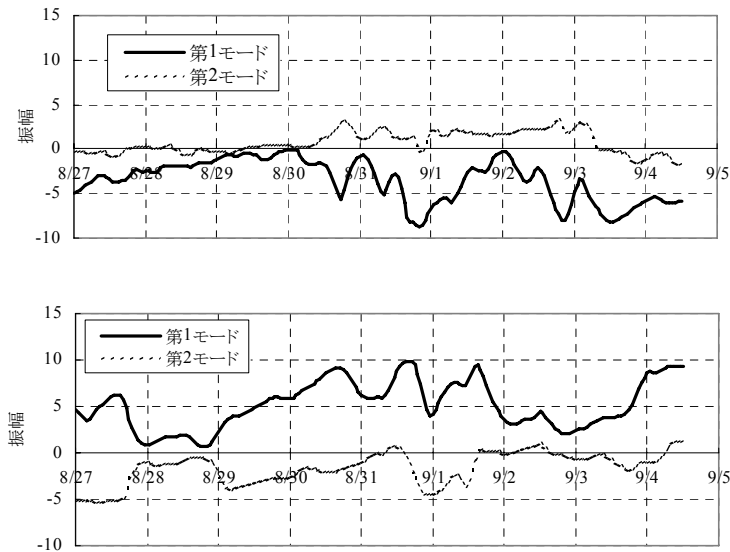


図-5 各モードの固有ベクトルに対する振幅の時間変化
(上段：水温，下段：DO濃度)

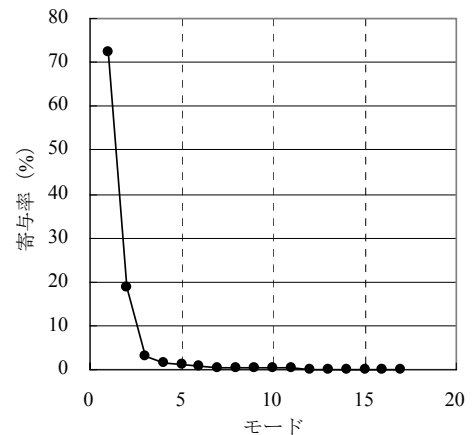
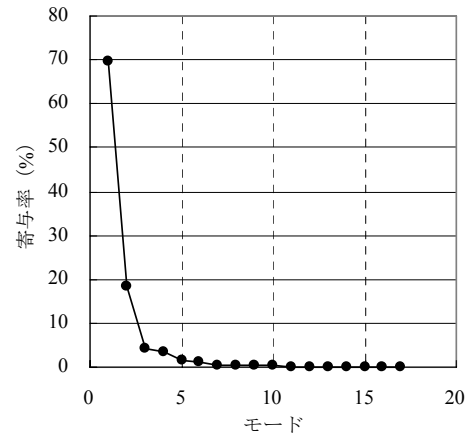


図-6 各モードの寄与率
(上段：水温，下段：DO濃度)

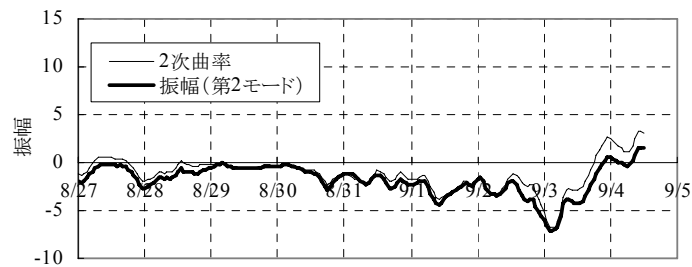
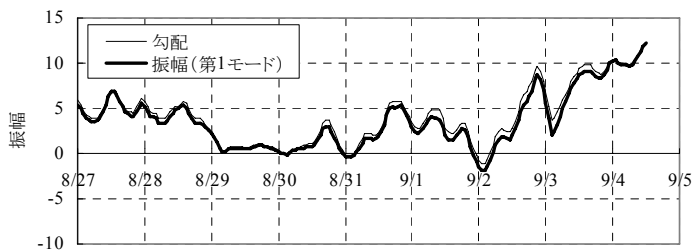


図-7 DO濃度の鉛直分布の勾配と第1モードの振幅(上)，DO濃度の鉛直分布の2次曲率と第2モードの振幅(下)

水温の固有ベクトルの第1モードは、表層から底層へ向けて増加し、7～8mの水深帯においてピークをとっていた。水温の固有ベクトルの第2モードは、表層から底層へ向けて増加し、5～6mの水深帯でピークをとり、底層へ向けて減少していた(図-4)。一方、DO濃度の固有ベク

トルの第1モードは、表層から底層へ向けて減少し、6～8mの水深帯においてピークをとっていた。DO濃度の固有ベクトルの第2モードは、表層から底層に向けて減少し、4～5mの水深帯でピークをとり、底層へ向けて増加していた(図-4)。このように、DO濃度の固有ベクトルの値は、水温の固有ベクトルの値と比較して第1・2モード共にピーク位置が1～2m程度浅かった。

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。また、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(例えば、和達清夫, 1987; 宇野木, 1993)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。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。

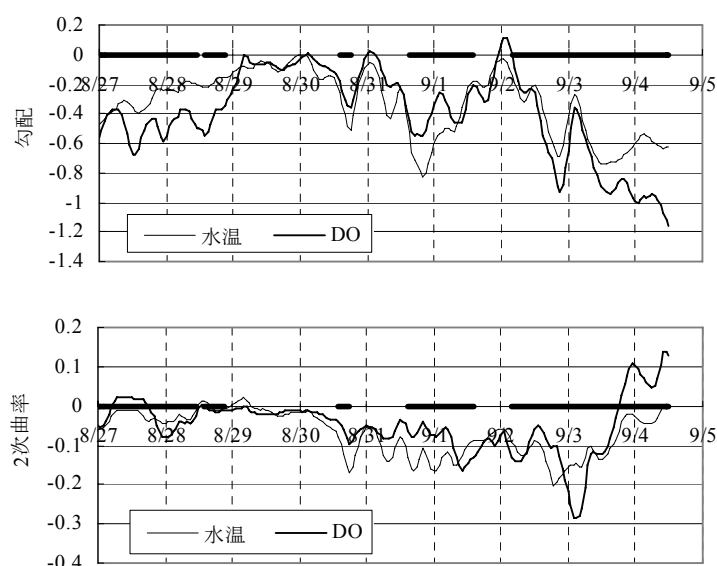


図-8 水温とDO濃度に対する勾配（上）および2次曲率（下）の時間変化（太線は貧酸素水塊が発達している期間を示す）

2.4.2 寄与率

水温の寄与率は、第1モード：70%，第2モード：18%，第3モード以上は4%未満だった。一方、DO濃度の寄与率は、第1モード：72%，第2モード：19%，第3モード以上は3%未満だった（図-6）。水温およびDO濃度ともに、第1モードと第2モードで、それぞれ88%，91%を占めていた。

2.4.3 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次曲線の特性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-7）。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。

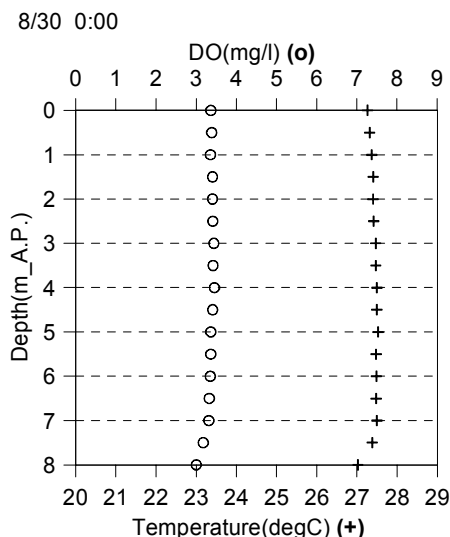


図-9 貧酸素水塊が発達していない場合の水温およびDO濃度の鉛直分布

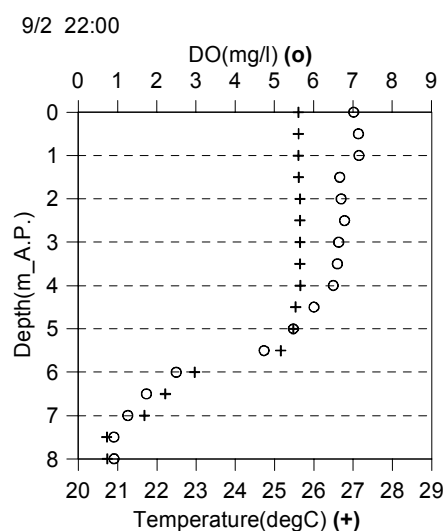


図-10 貧酸素水塊が発達している場合の水温およびDO濃度の鉛直分布

2.5 水温の鉛直分布を用いたDO濃度の鉛直分布の推定

2.5.1 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次曲率を算出し、DO濃度と水温でそれぞれ比較した（図-8）。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。同様に、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。貧酸素水塊が発達していない場合の水温およびDO濃度の鉛直分布はほぼ同じ分布形状だった（図-9）。一方、貧酸素水塊が発達している場合の水温および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（図-10），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濃度の差が[0-1]となるような規格化を行った。時刻 t_k ($k=1, \dots, K$) (K は時間方向のデータ数)，水深 X_i ($i=1, \dots, N$) (N は鉛直方向の層数) 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。

2.5.2 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 まず、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。前節で示した様に、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 次に、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濃度を用いた。底層のDO濃度は観測値を用いた。
- ③ さらに、前節で示した様に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に対する振幅とDO濃度の

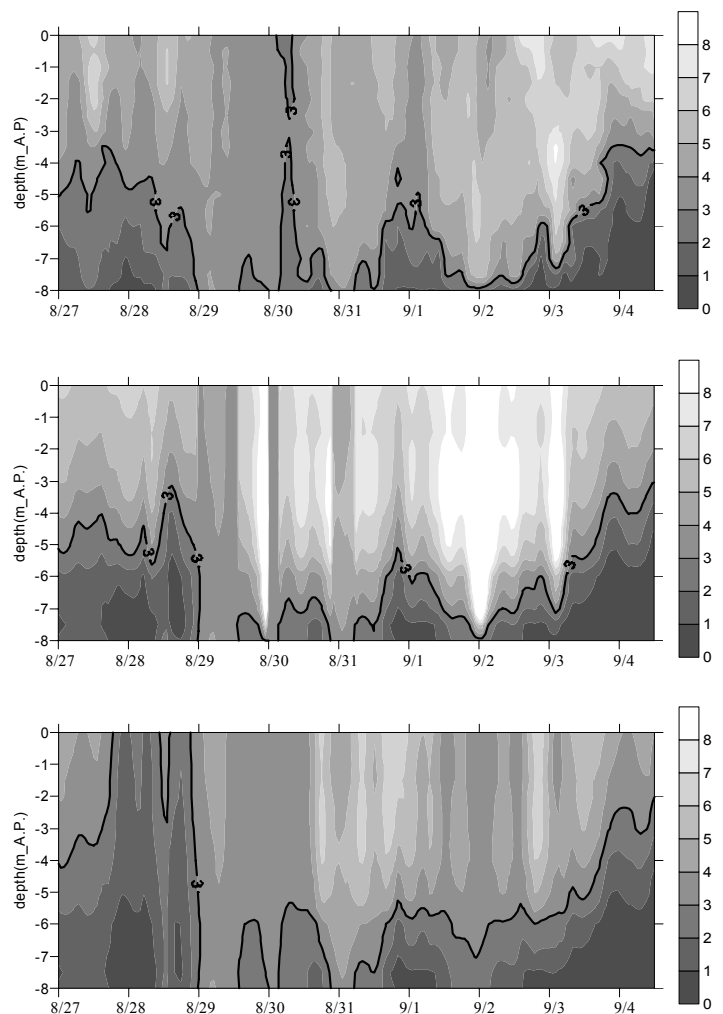


図-11 DO濃度（mg/l）の鉛直分布の時間変化

（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）

固有ベクトル（図-4）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。

- ④ 最後に、③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濃度を用いて、DO濃度の鉛直分布の時間変動を推定した。

2.5.3 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 ± 0.4 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

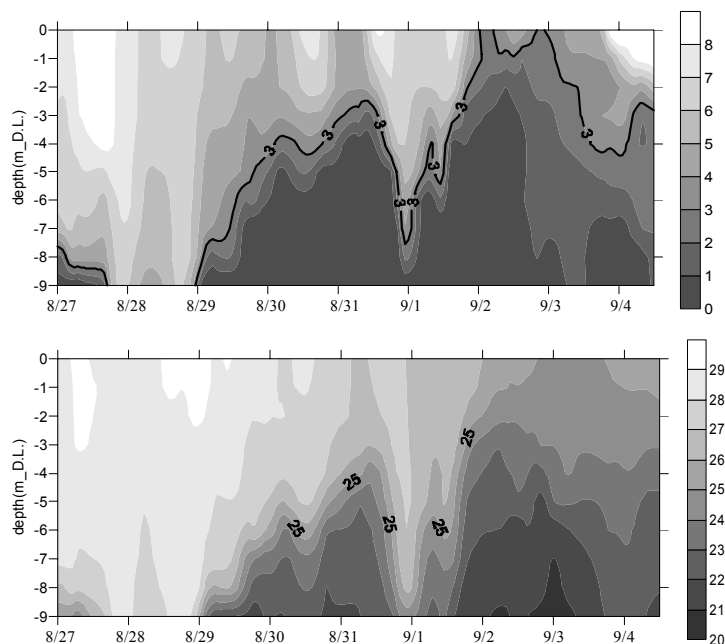


図-12 DO 濃度 (mg/l) (上), 水温 (°C) (下) の鉛直分布の時間変化 (実線は 3mg/l を示す)

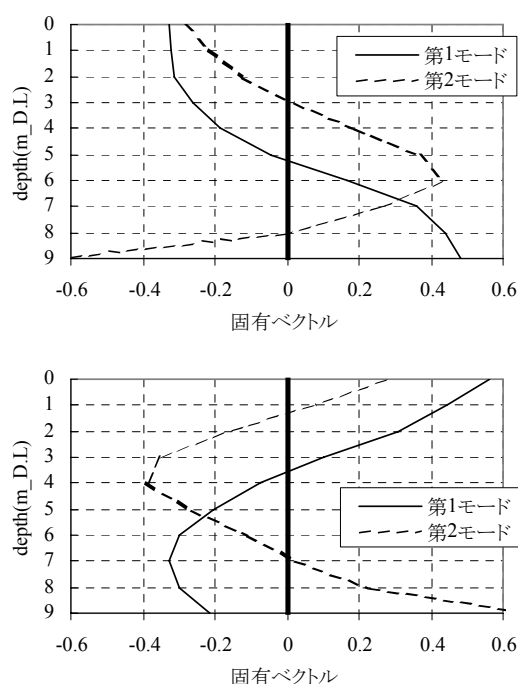


図-13 各モードの固有ベクトルの鉛直分布 (上段：水温，下段：DO 濃度)

なかったものの、その他の期間の時間変動は非常に良く一致していた(図-11)。この両者の相関係数および差の値、および貧酸素水塊厚さの時間変動の一致の程度は、十分実用可能な精度である。

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-11)。これは、前項の規格化の妥当性を示していた。

2.6 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

本章では、2章で考案された手法の適用性を確認するために、千葉灯標において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て検討を行った。

3.1 データの概要

千葉灯標は、千葉港の南西沖約5.0kmに位置している(図-2)。千葉灯標では、海上保安庁により水温、塩分およびDO濃度等のデータが常時観測され、それらのデータはインターネット上のWebページにて公開されている(海上保安庁，2007)。

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。

3.2 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。
- ② DO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。
- ④ DO濃度の固有ベクトル分布の第1モードは1次の直

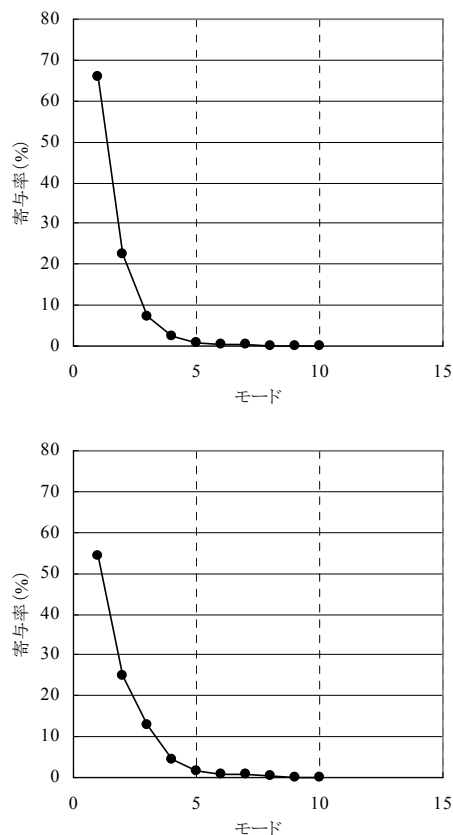


図-14 各モードの寄与率
(上段：水温，下段：DO濃度)

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次曲線の時間変化と第2モードの振幅の時間変化が一致する。

以下に各項目に対する検討結果を示す。

3.2.1 水温の鉛直分布およびDO濃度の鉛直分布の相関性

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。貧酸素水塊の層厚は，8月27日は1m，28日には一旦解消し0m，29日には徐々に発達し31日には6m，9月1日に一旦解消しかけ1～2m，そこから徐々に発達し9月2日には表層に達しており9m，9月4日にかけて徐々に解消し5～6mだった。このように，両者の鉛直分布は東京灯標と異なっていたが，水温の時間変動はDO濃度の時間変動に類似していた（図-12）。各時刻における水温とDO濃度間の相関係数の平均値は0.93であり，東京灯標の値とほぼ同じだった。

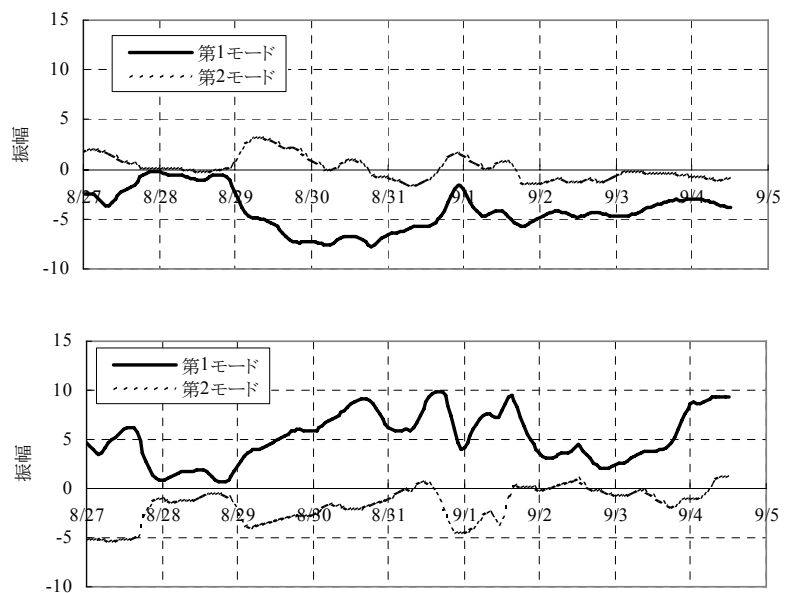


図-15 各モードの固有ベクトルに対する振幅の時間変化
(上段：水温，下段：DO濃度)

3.2.2 水温の固有ベクトル分布とDO濃度の固有ベクトル分布の対称性

前章と同様に，水温およびDO濃度の鉛直分布に対してEOF解析を行った。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（図-13）。

3.2.3 水温およびDO濃度の各モードの寄与率の割合

水温の寄与率は，第1モード：66%，第2モード：23%，第3モード以上は8%以下だった。DO濃度の寄与率は，第1モード：54%，第2モード：25%，第3モード以上は13%以下だった（図-14）。水温およびDO濃度ともに，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濃度の寄与率は東京灯標に比べて10%程度低かったが，80%程度の高い値を占めていた。

3.2.4 DO濃度の鉛直分布の勾配および2次曲率の時間変化と各モードの振幅の時間変化

各モードの固有ベクトルに対する振幅の時間変化は図-15のとおりである。DO濃度の鉛直分布の勾配の時間変

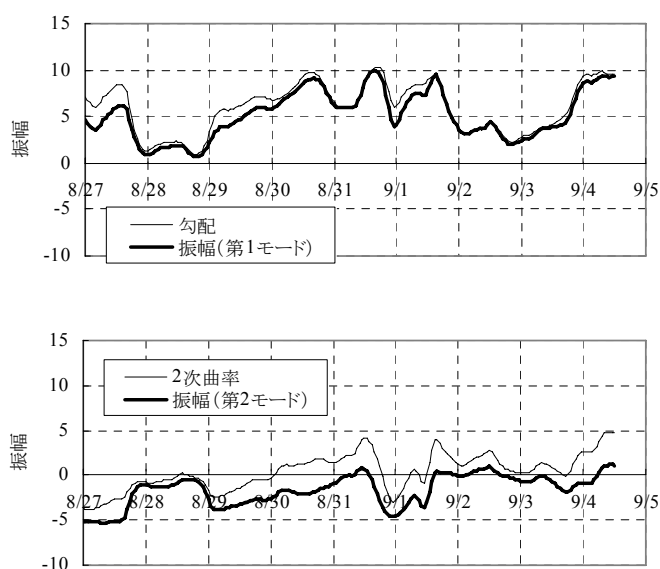


図-16 DO濃度の鉛直分布の勾配と第1モードの振幅（上），DO濃度の鉛直分布の2次曲率と第2モードの振幅（下）

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。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も、良く一致していた（図-16）。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。

3.3 推定手法の適用性

前節のとおり、千葉灯標で本推定手法を適用するための条件の検討結果が示されたので、本推定手法を適用した。

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。貧酸素水塊厚さに関しては、9月2、3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-17）。この両者の相関係数および差の値、および貧酸素水塊厚さの時間変動の一致の程度は、十分実用可能な精度だった（相関係数：0.76、差： 0.7 ± 0.6 mg/l）。したがって、本推定

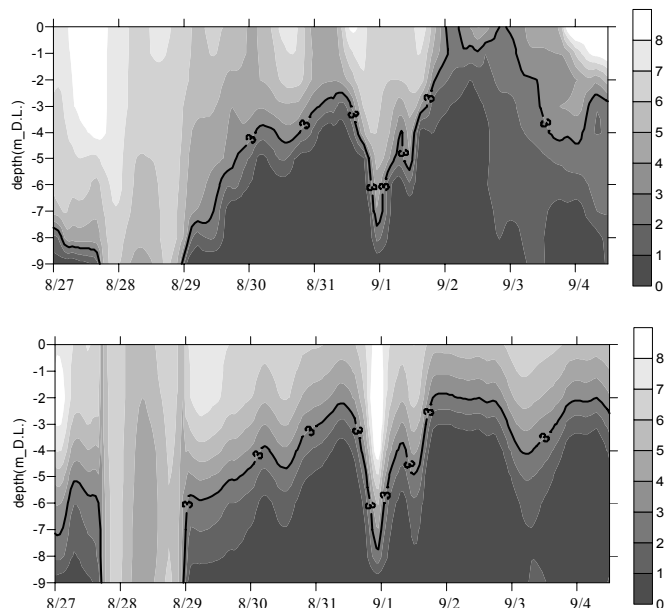


図-17 DO濃度（mg/l）の鉛直分布の時間変化（上段：実測，下段：再現）（実線は3mg/lを示す）

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

本章では、湾内で同日に観測された水温とDO濃度の鉛直分布の観測データを対象として、東京湾内における本推定手法の適用領域について検討を行った。

4.1 データの概要

本検討では、平成14年度に実施した東京湾広域環境調査（国土交通省国土技術政策総合研究所，2002）の採水調査結果（各月に実施）の中で、貧酸素水塊が発達している地点が最も多かった平成14年7月29日の観測結果を使用した。観測地点は東京湾内に22地点（St.1-20，St.3'，St.1）であった（図-18）。各地点において、水温およびDO濃度の鉛直分布が測定されていた。測定間隔は、表層から水深1.0mまでは0.5m間隔、水深1.0mから10mまでは1.0m間隔、10m以深は5.0m間隔であった。各地点の全水深は表-1に示す。なお、調査の方法および結果の詳細については、国土交通省国土技術政策総合研究所のWebペ

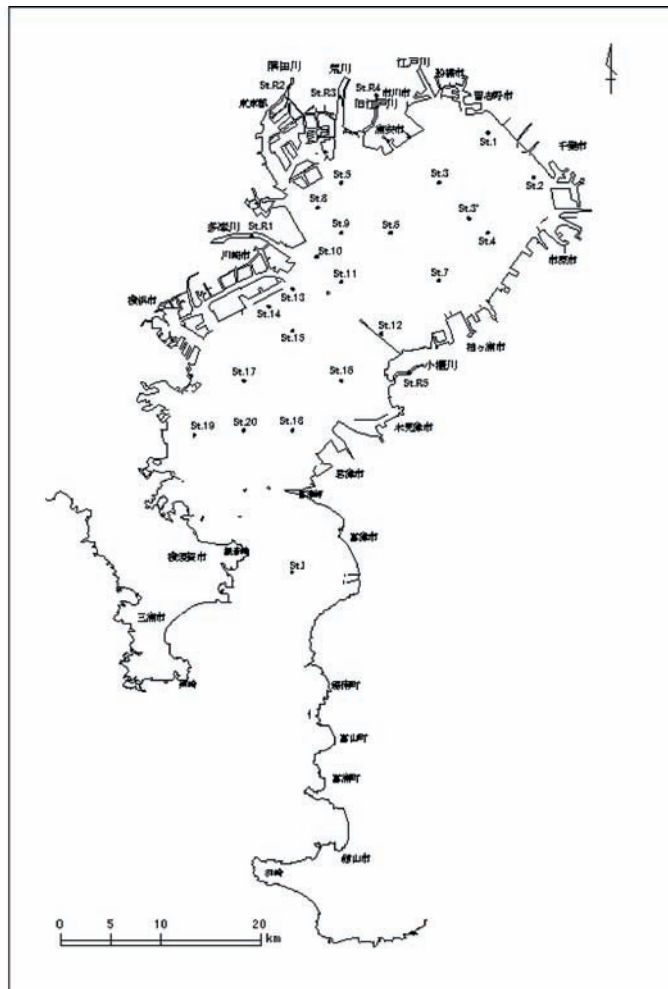


図-18 観測地点図（国土交通省国土技術政策総合研究所の Web ページより抜粋）

ージ（港湾環境情報：http://www.nilim.go.jp/）に示されている。

4.2 推定手法を適用するための項目の検討

前章で示したように、本推定手法を適用するためには、①から④の各項目（2章5節参照）を検討する必要がある。ここでは、連続観測データではなくある一時点の観測データを用いたため、各観測地点における水温およびDO濃度の鉛直分布に対してEOF解析を行わなかった。したがって、EOF解析結果が必要となる②、③および④の各項目の検討は行わず、「①水温の鉛直分布とDO濃度の鉛直分布の相関が高い」の項目に限り検討を行った。

全地点の中で底層が貧酸素化していたSt.1, 2, 3, 3', 4, 5, 7, 8の8地点のデータを検討対象とした（図-19）。各地点の水温とDO濃度の相関係数は、貧酸素化している水深

表-1 各観測地点における全水深および水温とDO濃度の相関係数

観測地点	全水深	貧酸素水塊	水温とDO濃度の相関係数
	m		
St.1	7.5	有	0.20
St.2	8.1	有	0.35
St.3	13.3	有	0.90
St.3'	16.4	有	0.95
St.4	16.7	有	0.76
St.5	11.5	有	-0.10
St.6	19.1	無	
St.7	20.6	有	0.83
St.8	15.5	有	0.96
St.9	20.2	無	
St.10	23.3	無	
St.11	26.8	無	
St.12	19.0	無	
St.13	25.4	無	
St.14	23.0	無	
St.15	33.0	無	
St.16	20.8	無	
St.17	30.6	無	
St.18	13.9	無	
St.19	43.3	無	
St.20	18.9	無	
St.I	34.2	無	

帯のデータに対して求められた。St.3, 3', 4, 7, 8の各地点で高い値（>0.7）であった。一方、St.1, 2, 5の各地点での相関係数は低い値だった（表-1）。

4.3 推定手法の適用性

底層が貧酸素化していた上記8地点に対して、DO濃度の鉛直分布の算出を行った。水温の勾配・2次曲率を算出し、次にそれらと東京灯標におけるDO濃度の固有ベクトルを用いて、DO濃度の鉛直分布を算出した。ここでは連続観測データではなくある一時点の観測データを用いたため、EOF解析により固有ベクトルを算出することができず、東京灯標の固有ベクトルを代用したことに注意が必要である。

各地点の貧酸素水塊が発達している水深のデータに対する実測DO濃度と再現DO濃度の相関係数、および各水深における実測DO濃度と再現DO濃度の差の平均値・標

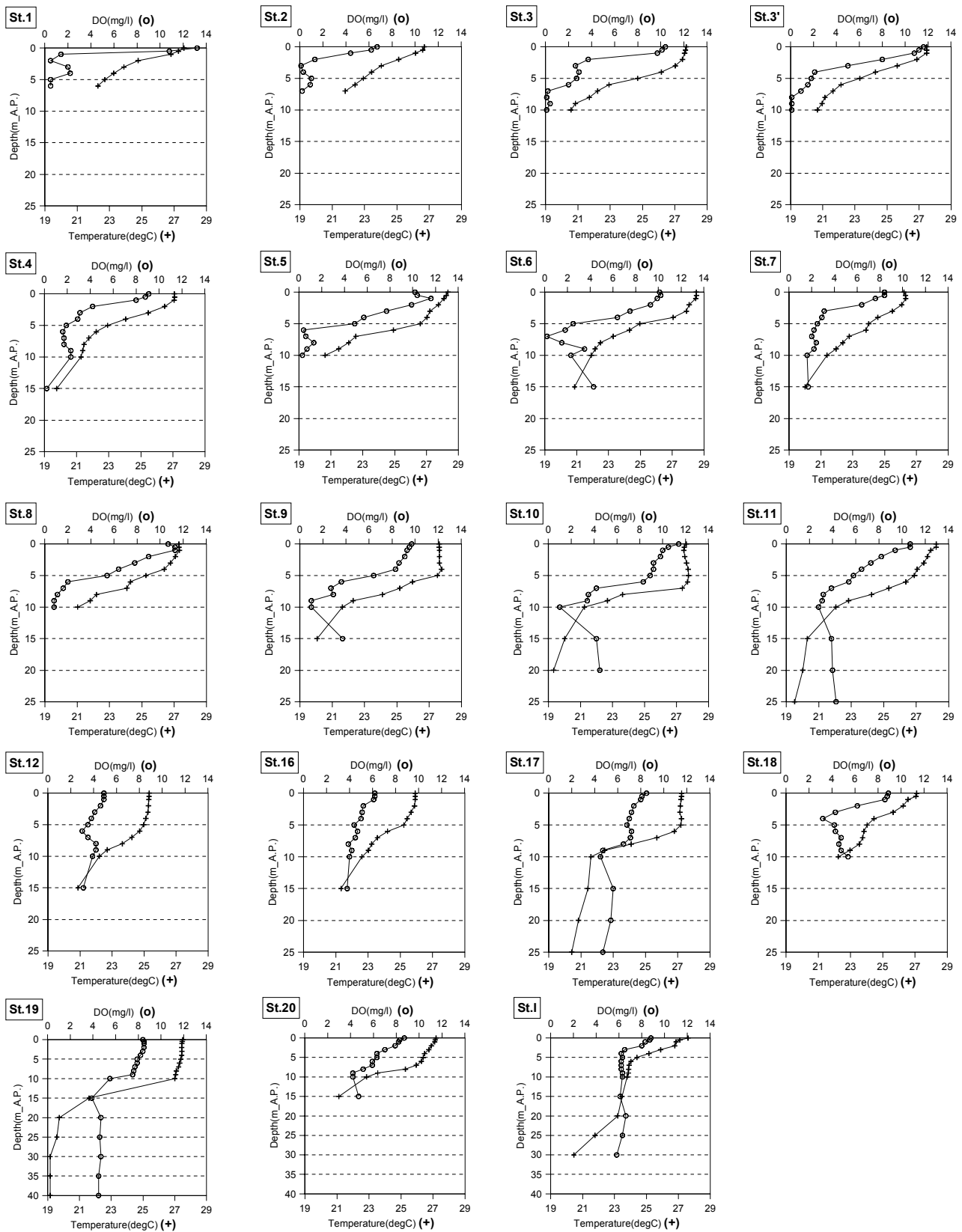


図-19 水温および DO 濃度の鉛直分布

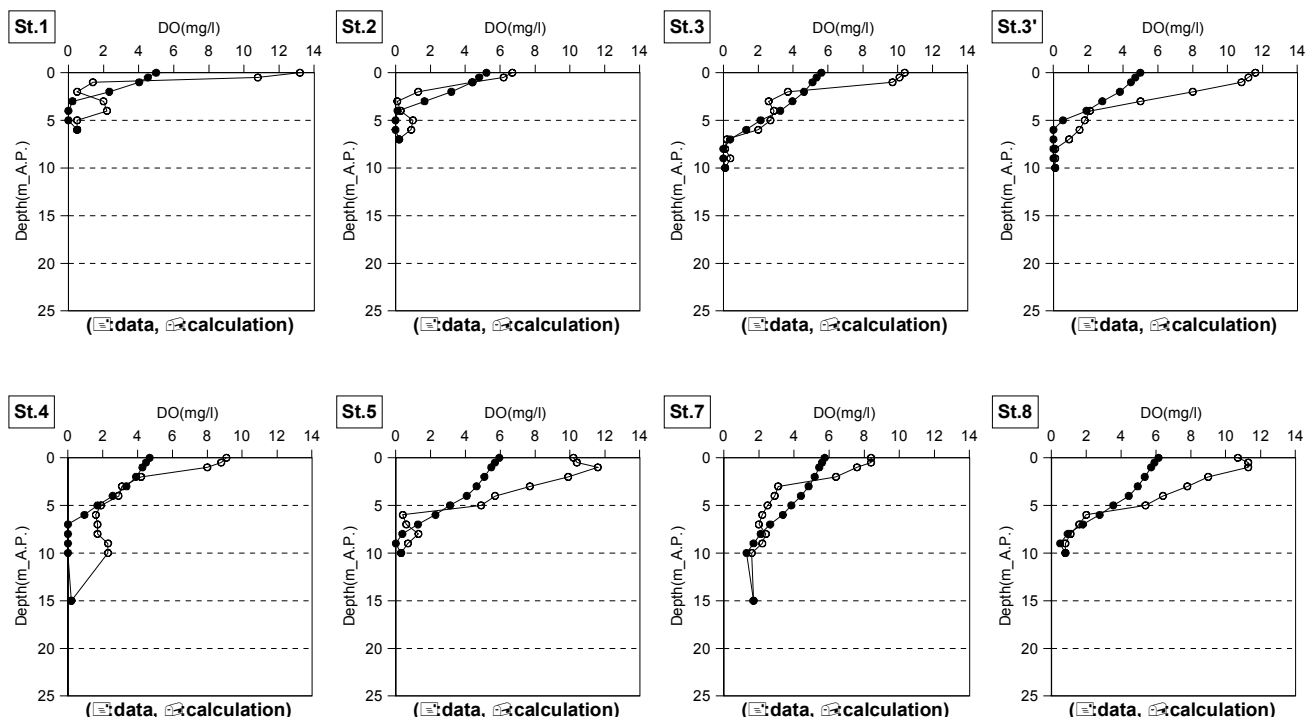


図-20 実測および再現 DO 濃度の鉛直分布 (St.1, 2, 3, 3', 4, 5, 7, 8)

表-2 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

準偏差は、St.3, 3', 7, 8においては、東京および千葉灯標と同程度の値だった(表-2)。また、貧酸素水塊が発達している水深のデータに対する推定結果は、St. 3, 3', 7, 8で観測値に比較的良く一致したが、St.1, 2, 4, 5においては、それほど良く一致しなかった(図-20)。したがって、St.3, 3', 7, 8においては、本推定手法を適用できる可能性が高い。

この結果は、St.4を除けば、項目①に対する検討結果と同じである。St.4の近くに位置する千葉灯標のデータによると、貧酸素水塊が発達している期間中に稀に高めの濃度(2mg/l程度)を示すことがあった。例えば、図-17の9月3日前後である。今回の検討に用いたSt.4のDO濃度の鉛直分布の特徴はこの分布に似ていることから、今回の検討に用いたデータは、稀な現象時のデータであった可能性がある。したがって、この結果から、St.4では本推定手法の適用性が低いとは言えない。他のデータセットを用いた検討が必要であろう。

St.1,2は湾の最奥部に位置し、他の地点に比べ海底勾配が急である。そのため、その地点よりも水深が浅い周辺海域の貧酸素化した底層水がその地点の中層に流入し、中層に貧酸素水の層を形成することがある。また、その

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.6		
	St.7	0.82	0.7±0.6
	St.8	0.98	0.3±0.3
	St.9		
	St.10		
	St.11		
	St.12		
	St.13		
	St.14		
	St.15		
	St.16		
	St.17		
	St.18		
	St.19		
	St.20		
	St.I		
東京灯標		0.70	0.4±0.4
千葉灯標		0.76	0.7±0.6

地点よりも水深が深い周辺海域の貧酸素化していない中層水が、その地点の貧酸素化した下層に流入し、下層に貧酸素化が弱い層を形成することもある。このような現象が起こり易い場では、水温の鉛直分布とDO濃度の鉛直分布の関連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。

4.4 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。

また、本検討では、連続観測データではなくある一時点の観測データを用いたため、EOF解析によりDO濃度の固有ベクトルを算出せず、東京灯標での固有ベクトルを使用した。したがって、本推定手法を適用する場合には、固有ベクトルに関係しない「①水温の鉛直分布とDO濃度の鉛直分布の相関が高い」の項目に限り検討を行い、固有ベクトルに関係する②、③および④の各項目（3章2節参照）についての検討は行わなかった点に注意が必要である。

なお、貧酸素水塊の発生機構から東京湾内を複数の領域に区分する検討については、環境省の水・大気環境局により実施されており（環境省 水・大気環境局, 2007）、参考とされたい。

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検討し、以下の結論を得ることができた。

(1) 東京灯標における水温の鉛直分布からDO濃度の鉛直分布を推定する手法を考案した。

- 東京灯標における連続観測データを使用して検討を行った結果、水温とDO濃度の相関係数が高い値を示し、水温の時間変動はDO濃度の時間変動に類似していた。
- EOF解析により算出された水温およびDO濃度の固有ベクトル分布は対称に近い形状（正負を入れ替えた形状）であった。

- EOF解析により求めた水温およびDO濃度の各モードの寄与率は、両者ともに第1モードと第2モードで90%前後の高い割合を占めていた。
- 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次曲線で近似できた。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した。
- 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。その推定精度は、十分実用可能なものであった。

(2) 千葉灯標のデータを用いて、本推定手法の適用性を検証した。

- 東京灯標と同様に、水温とDO濃度の相関係数が高い値を示し、水温の時間変動はDO濃度の時間変動に類似していた。
- 東京灯標と同様に、水温およびDO濃度の固有ベクトル分布は対称に近い形状（正負を入れ替えた形状）であった。
- 水温の各モードの寄与率は、第1モードと第2モードで90%前後、DO濃度の各モードの寄与率は、第1モードと第2モードで80%前後であり、どちらも高い割合を占めていた。
- 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次曲線で近似できた。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した。
- 本推定手法を適用した結果、貧酸素水塊厚さの時間変動を概ね再現することができ、本推定手法が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。

(3) 東京湾内複数地点の観測データを用いて、本推定手法の適用性および適用領域を検討した。

- 東京湾の湾奥部（St. 3, 3', 4, 7, 8）では水温とDO濃度の相関係数が高かった。一方、湾の最奥部（St.1, 2）や荒川河口周辺部（St.5）での相関係数は低かった。

- ・ 本推定手法を適用した結果、東京湾の湾奥部の比較的広い範囲 (St. 3, 3', 7, 8) に対しては、本推定手法を適用できる可能性が比較的高いことがわかった。一方、湾の最奥部 (St. 1, 2) および荒川河口周辺部 (St. 5) といった水温の鉛直分布とDO濃度の鉛直分布に関連性が弱い水域に対しては、本推定手法を適用できる可能性が低いことがわかった。

6. おわりに

本研究により、水温の鉛直分布からDO濃度の鉛直分布を推定する手法を考案することができ、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。

- ・ 本検討では、短期間のデータを用いた。そのため、長期的・季節的な変動に対する検討を行う場合は、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。
- ・ 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。
- ・ 本推定手法で使用する固有ベクトルの形状は元になるデータ数に依存する。つまり、検討地点における時間方向のデータ数や鉛直方向の層数が重要となるため、データの期間や検討地点の水深についても検討する必要がある。
- ・ 本推定手法では、検討期間中の表層におけるDO濃度がほぼ飽和状態であったため、DO濃度の鉛直分布を推定するには、表層水温から算出された飽和DO濃度を用いた。時期によっては過飽和となることも考えられることから、表層DO濃度値の扱いに対する検討が必要である。

(2008年2月14日受付)

謝辞

最後に、本研究を遂行するにあたり、国土交通省国土技術政策総合研究所沿岸海洋研究部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、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、国土交通省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および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

- 安藤晴夫・柏木宣久・二宮勝幸・小倉久子・川井利雄 (2005) : 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 2005, pp.141-150.
- 宇野木早苗 (1993) : 沿岸の海洋物理学, 東海大学出版会, pp.350-355.
- 海上保安庁 (2007) : 東京湾リアルタイム水質データ (水温・溶存酸素濃度他), Web による公開データ, <http://www4.kaiho.mlit.go.jp/kaihoweb/index.jsp>.
- 海上保安庁 (2007) : 海洋汚染調査, Web による調査報告, <http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/OSEN/gaiyo/osen.html>.
- 環境省 (2007) : 水環境総合情報サイト, Web によるデータ公開, <http://mizu.nies.go.jp/index.asp>.
- 環境省 水・大気環境局 (2007) : 平成18年度東京湾貧酸素水塊発生機構解明調査報告書, pp.III-28 - III-29.
- 国土交通省関東地方整備局千葉港湾事務所 (2007) : 清掃兼油回収船「べいくりん」による水質監視, Web による概要報告, <http://www.pa.ktr.mlit.go.jp/chiba/bay.htm>.
- 国土交通省国土技術政策総合研究所 (2002) : 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/>.
- 佐々木淳・磯部雅彦・渡辺晃・五明美智男 (1993) : 東京湾における貧酸素化現象および水温・溶存酸素の季節変動モデル, 海岸工学講演会論文集, Vol.40,

pp.1051-1055.

佐々木淳(1996):東京湾における青潮の発生機構に関する研究, 東京大学学位論文

中村由行・西村肇(1988):沿岸域における貧酸素水塊の形成機構, 海岸工学講演会論文集, Vol.35, pp.802-806.

中村由行・西田克司・早川典生(1990):閉鎖性水域における温度成層の形成のモデル化, 海岸工学講演会論文集, Vol.37, pp.794-798.

村岡浩爾・中辻啓二(1992):閉鎖性水域の水質環境と青潮発生との相関性, 閉鎖性内湾における密度流に関する研究成果報告書, pp.21-24.

村上和男・長坂猛(1996):熱交換を考慮した鉛直一次元モデルによる貧酸素水塊の形成, 海岸工学講演会論文集, Vol.43, pp.1126-1130.

柳哲雄(1993):海洋観測データの処理法, 恒星社厚生閣, pp.78-84.

和達清夫(1987):海洋大事典, 東京堂出版, pp.375-377.

付録A 東京灯標へ設置したシステムの概要

東京湾のように閉鎖性の高い湾内においては、水質の鉛直構造およびその時間的な変化を把握する必要がある。鉛直方向に密なデータを連続観測するためには、水質計測器の組み合わせにより様々なシステムが考えられる。ここでは実際に東京灯標に設置した各システムを紹介する。

東京灯標の位置は図-2に示したとおりである。各システムは東京灯標南西側の栈橋部に設置した（図-A.1, 図-A.2）。

東京灯標へ設置したシステムは3種類で構成されている（図-A.3, 図-A.4）。それぞれ「（1）鉛直プロファイル観測機器」、「（2）定点観測機器」、「（3）水温モニタリング装置」と称し、以下に各機器の特徴を示す。なお、各システムの制御装置は、すべて「（1）鉛直プロファイル観測機器」が設置された架台上へまとめて配置した。

（1）鉛直プロファイル観測機器

測定に用いた機器はワイエスアイ・ナノテック社製の自動昇降式多項目水質計であり、多項目の水質を鉛直方向に密に連続観測することができる。高い利用価値がある反面、ウィンチ部を有する精密機器であることから十分なメンテナンスが必要となり、価格も高価である。また、全体的に規模の大きな装置となるため、設置場所および設置方法に制約がある。

（2）定点観測機器

測定に用いた機器はアレック電子社製の各種水質計およびリーフ社製の伝送装置である。水温計や溶存酸素計等を、それぞれ測定を行う必要のある水深へ設置することができる。また、装置には稼動部が無いため比較的安全である。設置する計測器数が多い場合、各計測器をひとつずつメンテナンスする必要がある。

（3）水温モニタリング装置

測定に用いた機器は日油技研工業社製の水温計である。ロープ状の装置に水温センサーが適当な間隔で配置されており、高い空間分解能が見込める。装置がロープ状であるため、メンテナンスが比較的容易である。水温のみの計測であることから、他の水質項目を測定する場合は、別途水質計を取り付ける必要がある。



図-A.1 東京灯標概観

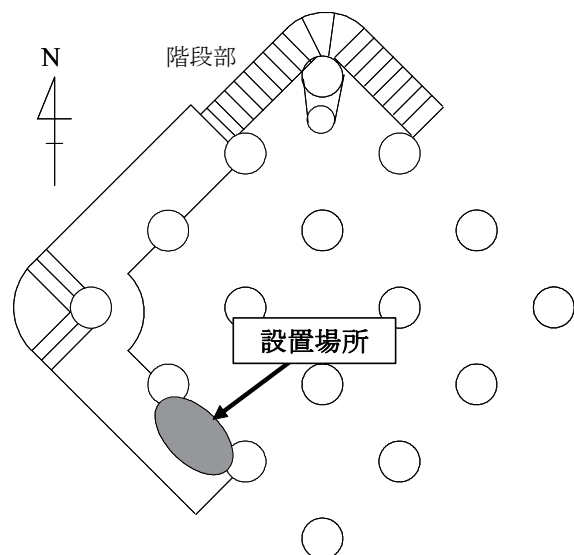


図-A.2 東京灯標平面図および機器設置位置

別途行った検討により、水温の鉛直分布を用いて DO 濃度の鉛直分布を推定する手法を考案し、その推定手法が適用できる領域（東京湾奥部）およびできない領域（東京湾最奥部および荒川河口周辺部）があることが示唆された。

これらの領域に対して、実際にシステムを設置する際には、それぞれ水温および DO 濃度の鉛直分布の時間変化を測定し、固有ベクトルを算出する必要がある。したがって、検討で用いた「（1）鉛直プロファイル観測機器」



図-A.3 システム全体写真

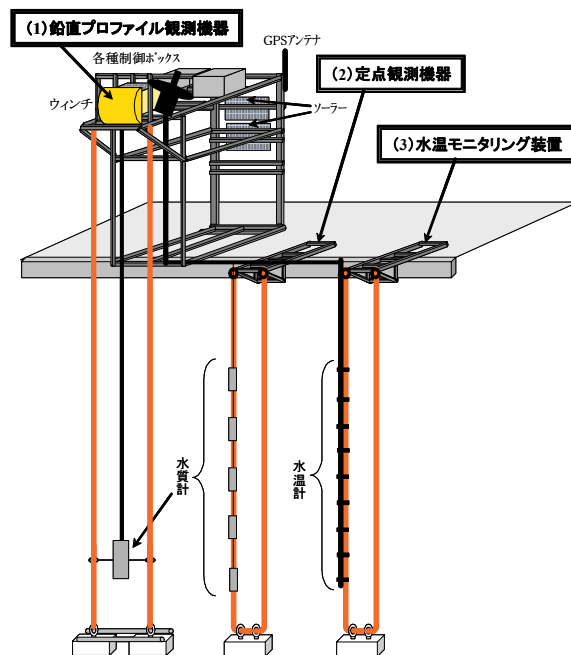


図-A.4 システム全体図

のシステムを使用することが考えられる。

また、同じ領域内でも貧酸素水塊の厚さは異なっている。これらの地点において上記の推定手法を用いるためには、水温の鉛直分布と底層の DO 濃度を測定する必要がある。したがって、それらを効率的に測定することができる「(2) 定点観測機器」および「(3) 水温モニタリング装置」を単独あるいは組み合わせて使用することが考えられる。

国土技術政策総合研究所研究報告

RESEARCH REPORT of NILIM

No. 35 March 2008

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは

〔 7239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5018 〕