

# 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

Temporal and spatial variations of hypoxic water mass in Tokyo bay governed by the coastal upwelling at bay mouth and wind-driven current

八木 宏<sup>1</sup>・Tanuspong POKAVANICH<sup>2</sup>・安井 進<sup>3</sup>・灘岡和夫<sup>4</sup>・有路隆一<sup>5</sup>  
 ・松坂省一<sup>6</sup>・鈴木信昭<sup>7</sup>・諸星一信<sup>8</sup>・小田遼子<sup>9</sup>・二瓶泰雄<sup>10</sup>

Hiroshi YAGI, Tanuspong POKAVANICH, Susumu YASUI, Kazuo NADAOKA, Ryuichi ARIJI, Shoichi MATSUZAKA, Nobuaki SUZUKI, Kazunobu MOROHOSHI, Ryoko ODA and Yasuo NIHEI

Temporal and spatial variations of hypoxic water mass in Tokyo Bay were investigated based on intensive field surveys coupled with numerical simulation in Summer 2007. Measurements results showed that the hypoxic water mass existed in the bottom layer from the head to the mouth of the bay in the beginning of August. It was lifted up to the middle layer in the mid of August and disappeared in the beginning of following month. The analysis of observed seawater characteristics (temperature and salinity) and numerical simulation results suggested that these variations of hypoxic water mass were regulated by the combination between the upwelling phenomenon at the mouth of Tokyo bay and wind-driven current.

## 1. はじめに

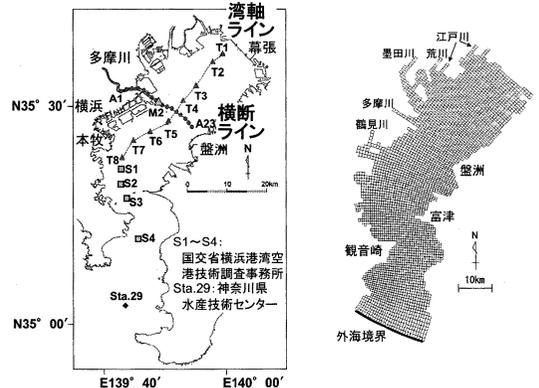
東京湾湾奥部では夏季に広範囲で貧酸素水塊が発達し、ベントスを中心とした生態系に大きな影響を与えていることが知られている(例えば, 日本海洋学会, 1994)。一方, 多摩川河口に位置する東京湾羽田周辺水域では, 現在, 東京国際空港再拡張事業が進められており, これによって周辺水域における貧酸素水塊が変化し, 豊かな生態系を有する多摩川河口浅場・干潟への影響が懸念されている。著者らは2006年に実施した現地調査結果に基づき多摩川河口沖斜面部に発達する貧酸素水塊の挙動についてその基本的な性質を示したが(八木ら, 2007), 本研究では多摩川河口周辺域の貧酸素動態にも大きく影響する東京湾内湾域全体の貧酸素水塊の挙動について現地観測と数値計算による検討を行ったのでその結果を報告する。

## 2. 現地観測

### (1) 現地観測概要

本研究では, 東京湾内及び多摩川河口周辺水域の貧酸素水塊の空間構造とその変動特性を把握するために, 東京湾湾軸に沿った湾軸ライン(幕張沖～本牧沖), 多摩川河口域からその沖合に向けて東京湾を横断する横断ライン(多摩川河口域～盤洲沖)の2つの観測線を設け, それぞれの観測線上に設定された観測点(T1～T8:湾軸ライン, A1～A23:横断ライン)における多項目水質計を用いた計測によって水質量の湾軸断面・横断面分布の計測を行った。観測期間は2007年5月～10月であり, 期間中の大潮期に6回, 小潮期9回の合計15回の断面計測を実施した。観測項目は, 水温, 塩分, 濁度, 蛍光光度, DOである。さらに貧酸素水塊の発達が顕著になる2007年8月23日～9月20日の約1ヶ月間については, 港湾空港技術

- 1 正会員 博(工) (独法)水産総合研究センター水産工学研究所水産土木工学部水理研究室長
- 2 M.Eng 東京工業大学大学院博士課程情報理工学研究科情報環境学専攻
- 3 修(工) 九州電力(株)
- 4 フェロー 工博 東京工業大学大学院教授情報理工学研究科情報環境学専攻
- 5 正会員 (独法)港湾空港技術研究所海洋・水工部沿岸環境研究領域研究官
- 6 国土交通省関東地方整備局鹿島港湾・空港整備事務所保全課長
- 7 修(工) 国土交通省関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所調査課長
- 8 正会員 工修 国土交通省関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所長
- 9 学生会員 修(工) 東京工業大学大学院博士課程理工学研究科国際開発工学専攻
- 10 正会員 博(工) 東京理科大学准教授理工学部土木工学科



(a)現地観測点 (b)計算領域と計算格子  
 図-1 対象海域と現地観測点及び計算領域

研究所によって多摩川河口沖観測点M2の流速及び水質量(水温, 塩分, 濁度, 蛍光光度, DO)の連続計測が実施されているので(中川ら,2008), 東京湾内湾域全体を対象とした断面計測に多摩川河口沖の定点観測データを組み合わせることで東京湾内の貧酸素水塊の時空間的な変動特性の把握を試みた。

なお, 現地観測データの解析や後述する数値シミュレーションを行うにあたっては, 本研究の観測範囲外である東京湾湾口部, 湾口沖の観測データが必要となる。本研究では, 観測期間中に実施された他機関の観測データの提供を受け(国土交通省横浜港湾空港技術調査事務所: 観測点S1~S4, 神奈川県水産技術センター: 観測点Sta. 29, 図-1参照), 本観測結果と併せて解析を行った。

(2) 現地観測結果

a) 観測期間中の貧酸素水塊の基本的な挙動

はじめに横断・湾軸両ラインの計測結果から本観測期

間全体にわたるDOの基本的な変動特性を検討した。図-2に, 横断及び湾軸ラインの代表的な観測点におけるDOの時空間コンターを示す。まず, 横断ラインについては, 多摩川河口沖の斜面域(A13, A15)で貧酸素水塊が発達しやすく, 貧酸素状態が長期化しやすい傾向があることがわかる。一方, 湾軸ラインについては, 5月から10月まで貧酸素状態が長期にわたりDOの短期変動も顕著な湾奥部(T2), 夏季を中心に貧酸素化し中層化などの貧酸素水塊の変動が大きい湾口側海域(T6, T8), 両者の中間的な性質を持った湾央域(T4)でDOの時空間変動特性に相違があることがわかる。本研究では, 湾口側海域まで貧酸素化が進む7~9月の期間に着目し(図-2中横矢印), 次節以降貧酸素水塊の挙動に関する検討を行った。

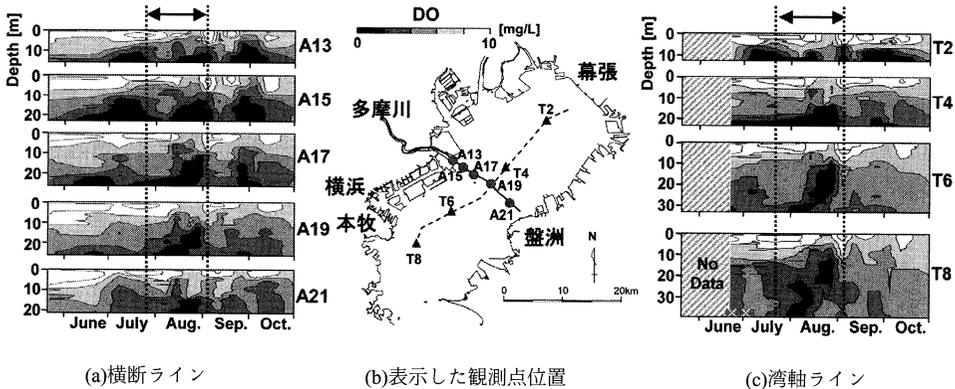


図-2 横断・湾軸ラインの代表観測点におけるDO時空間コンター

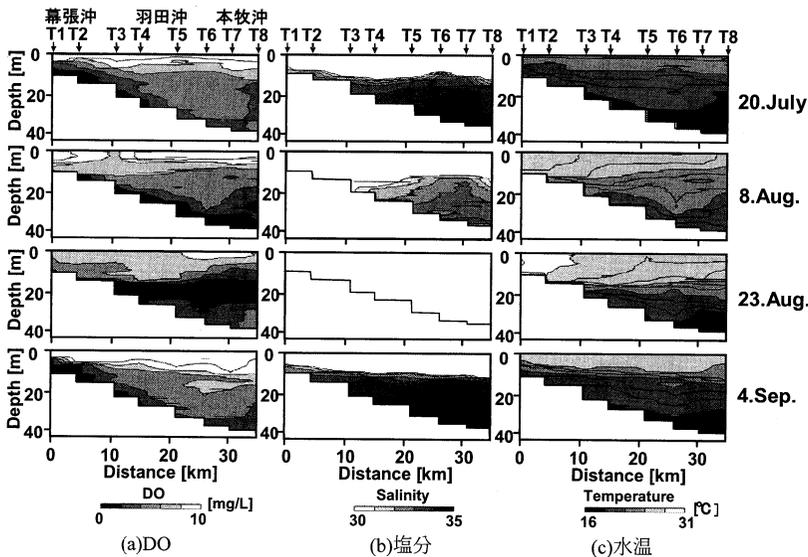


図-3 DO・塩分・水温の湾軸断面分布

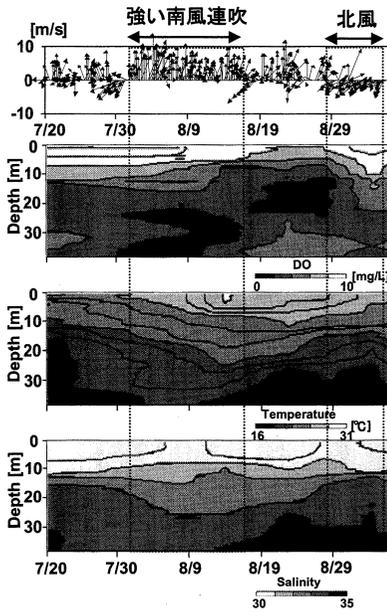


図-4 風速ベクトルと湾口側観測点T8におけるDO(上段)・水温(中段)・塩分(下段)の時空間コンターと風速

b) 夏季(7~9月)の貧酸素水塊の挙動

図-3に、湾口側海域まで貧酸素化が進む7~9月のDO, 塩分, 水温の湾軸断面分布を示す。これを見ると、7月後半には湾奥部底層に位置していた貧酸素域が(7/20)、8月上旬には湾口側海域まで内湾域底層全体に拡がり(8/8)、それが中層化(8/23)した後、9月初旬(9/4)に中層貧酸素水塊が消滅している。これを水温、塩分と比較すると、7月後半には内湾域下層で低温・高塩分的な状態であったものが、湾口側海域まで貧酸素水塊が拡がる8月初旬に湾内全体で高温・低塩分化し、その後貧酸素水塊が中層化する時期に底層で低温・高塩分化、9月初旬には躍層以深全体で高塩分化することで中層貧酸素水塊が消滅していることがわかる。

図-4は、7月後半から9月初旬までの湾口側観測点T8のDO, 水温, 塩分の時空間コンターを風速ベクトル(羽田, 気象庁)と併に示したものである。これを見ると、内湾域が全体的に高温・低塩分化し、貧酸素水塊が湾口側まで拡がる8月前半には強い南風が連吹しており、貧酸素水塊が中層化する8月後半は南風が不安定になり、中層貧酸素水塊が解消する9月初旬は北風の連吹へと変化している。東京湾では、南風が湾奥方向、北風が湾口方向にあたることから、強い南風の連吹は表層の高温低塩分水(低密度水)の湾奥側への輸送と下層低温高塩分水(高密度水)の湾口側への後退を生じ、一方、北風は底層の低温高塩分(高密度水)の湾外水の進入を引き起こす可能性があり、本観測で捉えた貧酸素水塊の時空間変動には海上風の影響がまず考えられる。

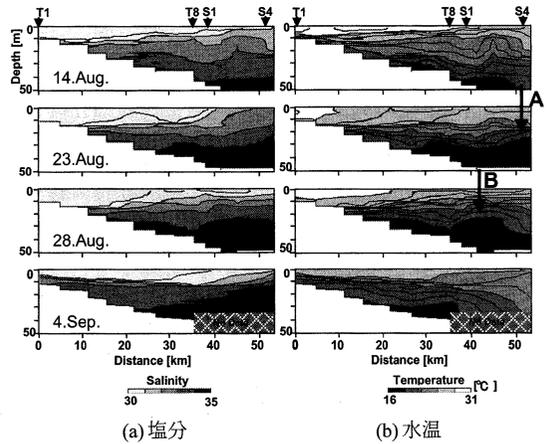
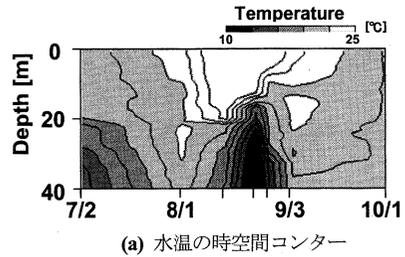
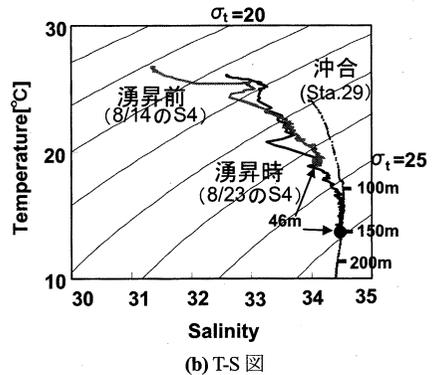


図-5 中層貧酸素水塊発生前後の湾口部海域も含めた塩分・水温の湾軸断面分布



(a) 水温の時空間コンター



(b) T-S 図

図-6 湾口部観測点S4における水温の時空間分布とT-S図

一方、内湾域の貧酸素水塊の挙動には外海からの影響も指摘されている(藤原ら, 2000)。図-5は、本研究で実施した湾軸ライン観測の結果に、同時期に実施された他機関の観測結果を加え、湾口部まで含めて塩分及び水温の湾軸断面分布を示したものである(計測が行われた水面下40~50mまで表示)。これを見ると、東京湾内で貧酸素水塊の中層化が発生していた8/23には、湾口部で低温高塩分水が上昇しており(矢印A)、それが8/28には内湾側へ移動しているように見える(矢印B)。図-6(a)は、湾口部の観測点S4における水温の時空間コンターを示したものである。これを見ると、8月初旬には水深

40mまで比較的高温な状態であったものが、8/23に低温水塊が急激に上昇しており、9月初旬には再び高温の状態に戻っている。図-6(b)には、貧酸素水塊中層化が発生する前の8/14、中層化が発生した8/23の湾口部観測点(S4)におけるT-S図を示す。図中には、参考のために東京湾口沖観測点Sta.29(図-1(a)参照)のT-S特性も併せて表示しているが、中層化時(8/23)には湾口部で水塊特性が低温・高塩分化(高密度化)しており、湾口部の8/23の水深40m付近のT-S特性は、湾口沖海域の水深150m程度のT-S特性にほぼ一致している。これらの事実を、中層化が生じた8/23を中心として、東京湾湾口部周辺に低

温・高塩分の高密度水(湾口沖海域では水深150m程度に存在)が短期間湧昇した可能性を示しており、湾口部の湧昇に伴う東京湾内への湾外水の進入挙動の変化も貧酸素水塊の中層化とその解消を引き起こした重要な要素と考えられる。

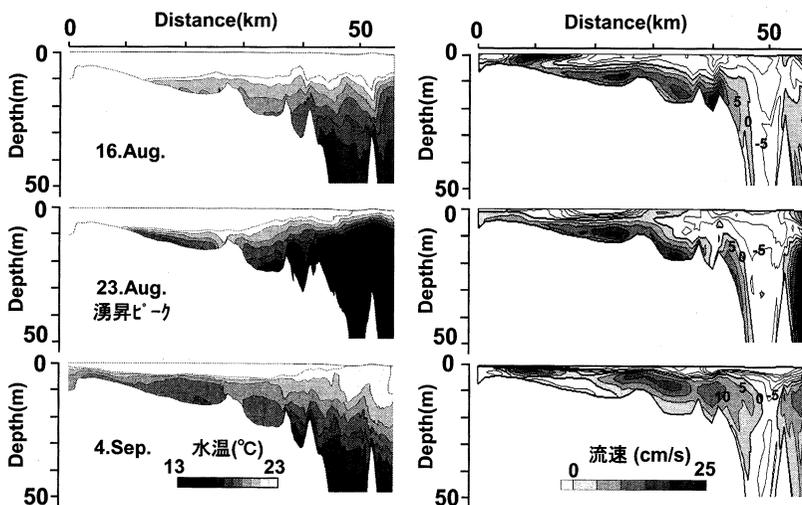
### 3. 数値シミュレーション

#### (1) 数値シミュレーション概要

現地観測結果の検討によって、2007年夏季に発生した東京湾内における貧酸素水塊の中層化とその解消過程が海上風や湾口部の湧昇の影響である可能性が示されたが、本節では、中層化やその解消過程の詳細を理解するために3次元流動モデルとしてDelft3D(Delft Hydraulics, 1999)を用いた流動シミュレーションを行った。計算期間は、2007年6月1日～9月20日までの約4ヶ月間であり、貧酸素水塊の中層化とその解消が生じた8/16～9/4を主な解析期間とした。計算モデルの概要、計算条件及び計算領域は表-1、図-1に示す通りである。ここで、内湾の流動を考える上で重要となる海上風の評価と外海境界条件については、前者については、米国国立大気センター(NCAR)等によって開発されたメソ気象モデルWRFを東京湾周辺に適用した計算結果(小田ら, 2008)に基づき時空間的な変化を考慮して与えている。また、外海境界条件については、神奈川県水産技術センターによって毎月1回実施されている東京湾口沖観測点Sta.29の観測値(水温・塩分鉛直分布)を時間的に補間して与えた。但し、月1回観測値では前節で示したような短期的な湧昇現象を表現することができないため、ここでは月1回の湾口沖観測点Sta.29の観測値をベースとして、その表層部

表-1 計算条件

計算期間	2007年6月1日～9月20日
初期条件	水温:25°, 塩分:34.5
格子数&層数	132×44(水平格子数), 25(鉛直層数)
外海境界条件	水位:布良観測値(気象庁) 水温・塩分:湾外観測点(神奈川県水産技術センター, Sta.29)の水温・塩分鉛直分布(月1回)を時間補間。解析対象の夏季は時間解像度を上げるため、湾口部観測点(S4)の観測値(週1回)を参考に外海境界の水温・塩分鉛直分布を補正
陸水流入条件	流量:多摩川,荒川,江戸川,隅田川,鶴見川は毎時の観測値,その他中小河川は流出解析から算出した日平均値,下水量は年平均観測値。 水温:多摩川の観測値を全河川に一律に与える。 塩分:0
気象条件	風向・風速:メソ気象モデルWRF計算結果(水平解像度1km) 気温・雲量・湿度:東京地方気象台&アメダス(羽田)観測値
水平渦動粘性・拡散係数	Smagorinskyモデル
鉛直渦動粘性・拡散係数	k-εモデル
底面摩擦係数	シェジャー係数 150



※残差流は、コンター間隔5cm/s, 正流速(湾奥向き)のみグレースケール表示

図-7 中層貧酸素水塊発生前後の水温(左図)と残差流湾軸成分(右図)の湾軸断面分布の計算結果

(水深40mまで)に毎週観測が行われている湾口部観測点S4の塩分水温鉛直分布を組み合わせたものを外海境界条件として与え湾口部の湧昇の効果を数値シミュレーションに導入した。

## (2) 数値シミュレーション結果と考察

図-7は、湾口部で湧昇が発生した8/23を中心にその前後の8/16, 9/4における水温と残差流(湾軸方向成分)の湾軸断面分布の計算結果を示したものである。これを見ると湾口部の湧昇に対応するように、湾内底層で湾奥向きの残差流が発生、低温の湾外水が湾内底層に進入している。一方、湧昇終息後(9/4)は、湾奥向き残差流の発生位置が底層から中層へと上方にシフトしており、このような湧昇発生前後での湾奥向き残差流の発生位置、すなわち湾外水の進入深度の変化が貧酸素水塊の中層化とその解消を引き起こしたと考えられる。さらに比較のために海上風を考えない仮想的な条件で計算を行い残差流構造を比較すると、海上風を考慮しないケースの方が残差流の流速レベルが小さいことを確認しており、このことは、湾口部の湧昇に伴う密度流的な効果に海上風の影響が重なることで、湾外系水の進入挙動が支配され、それが貧酸素水塊の挙動に影響を与えていることを示している。以上の結果から、本観測結果で捉えた貧酸素水塊の中層化とその解消過程は、図-8のように考えられる。

## 4. まとめ

多摩川河口周辺域の貧酸素動態にも大きく影響する東京湾内湾域全体の貧酸素水塊の挙動について現地観測と数値計算による検討を行い以下の知見を得た。

- (1) 2007年の現地観測から夏季の比較的短期間(1ヶ月程度)に生じた①底層貧酸素水塊の内湾域全体へ拡大、②拡大した底層貧酸素水塊の中層化及びその解消を捉えた。
- (2) 観測結果の解析及び数値シミュレーションから観測で捉えた貧酸素水塊の中層化とその解消は、湾口部の湧昇現象と海上風の影響が重なることで発生している可能性を示した。

謝辞：現地調査を行う上で協力頂いた『羽田周辺水域環境調査研究委員会』の関係各位、東京湾湾口沖の貴重な観測データを提供して頂いた神奈川県水産技術センター

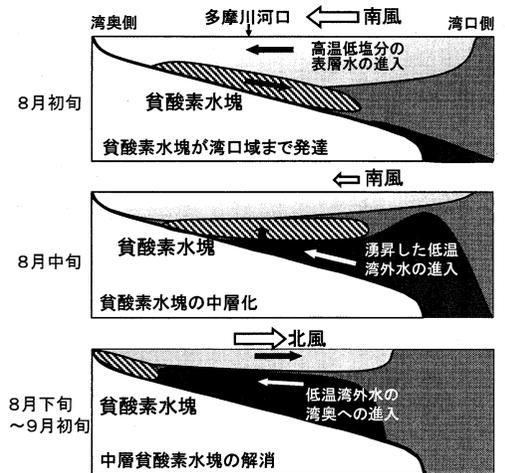


図-8 中層貧酸素水塊の発生とその解消のメカニズムに関する概念図

資源情報部樋田史郎氏、また現地調査に協力してくれた東京工業大学大学院情報理工学研究科大学生(当時)、松村航裕君、大橋 暁君、平綿雄一郎君、工学部土木工学科学生(当時)出口朋子さん、辺昊鵬君に対してここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 小田僚子・神田学・森脇亮(2008):直接測定に基づく東京湾海表面温度が都市の気温へ及ぼす影響, 水工学論文集, 第52巻, pp.283-288.
- 中川康之・有路隆一・松坂省一・諸星一信・八木宏・灘岡和夫・田中晋(2008):東京湾多摩川河口沖における底泥の巻き上げに関する現地観測, 海岸工学論文集, 第55巻(投稿中)
- 日本海洋学会編(1994):海洋環境を考える, 恒星社厚生閣, pp.69-93.
- 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, Vol.9, No.6, pp.303-313.
- 八木 宏・江連伸明・井瀬 肇・Tanuspong POKAVANICH・灘岡和夫・諸星一信・古土井健・有路隆一・森重輝政・小林 聡(2007):東京湾羽田周辺水域における貧酸素水塊と懸濁物質の時空間変動特性, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.1036-1040.
- Delft Hydraulics (1999): DELFT 3D-FLOW, A simulation program for hydrodynamic flows and transport in 2 and 3 dimensions; release 3.05.