

現地観測による東京湾北西部における 貧酸素水塊の回復過程に関する考察

The recovery process determination of hypoxia based on long-term observation
at northwestern Tokyo Bay, Japan

中島 剛¹・鈴木弘之²・堀江岳人³・古川恵太⁴

Gou NAKAJIMA, Hiroyuki SUZUKI, Takehito HORIE and Keita FURUKAWA

To determine the recovery process of hypoxia of bottom water at northwestern Tokyo Bay, Japan, the seawater characteristics, climate condition and flow regime have been monitored for three years. Following results were obtained that (1) the recovery process of hypoxia could be triggered by the intrusion of high density and oxygen rich bottom water from the bay mouth, (2) the typical velocity of those water mass was estimated as $2.7(\pm 1.2)$ km/day from the change of the isopycnic line, and (3) associated increment of the density and oxygen recovery were observed with short term tidal motion. Thus, the recovery process of the hypoxia of bottom water could be influenced and triggered by the wind and the flow regime of concerned area.

1. はじめに

東京湾の湾奥部では、春から秋にかけて、底泥の分解時における酸素消費と密度成層による鉛直混合の抑制より貧酸素水塊が発生する。その回復過程を明らかにするためには、水質、気象・海象の現地観測を複数の地点で高頻度を実施することにより、空間的・時間的に動的な水塊構造を明らかにすることが重要である。

東京湾では、冬季に卓越する北風は湾内表層水を湾外に排出し、下層から外洋水を導入する働きをして、湾内水の交換を促進させる。一方、夏季に卓越する南風は高温水を湾内に滞留させる等、季節風の変化が湾内水の循環や交換に重要な役割を果たしている(平野ら, 1986)。貧酸素水塊の挙動と、これに大きく影響すると考えられる気象・海象との関係を示す観測結果としては、成層期から対流期に移行すると考えられている秋季の流況と水温・塩分の現地観測を基に、卓越する北風の影響に伴い上層の平均流が、南西流となり、下層ではこれと逆の流れが観測された状況で、上層の水温低下、塩分増加により成層が弱められ対流期に向かう状況(森川・村上, 1985)や、9月の湾中部(川崎から木更津のライン)における同項目の観測結果から、卓越する北風により、上層で湾口方向に流出傾向、中層以下では、神奈川県寄りでは流入、千葉県寄りでは流出する時計回りの循環流の観測

結果(中川ら, 1997)などが報告されている。

また、東京湾全体の貧酸素水塊の挙動に関して、秋季に一度湾内の底層に流入した外洋水が後退すると、中層から外洋の上層水が浸入し、湾内下層にあった貧酸素水塊が南下する現象(藤原ら, 2000)や、湾口部の湧昇現象に伴い、湾奥向きの残差流が発生し、湾内の底層に湾外水が浸入するシミュレーションの結果(八木ら, 2008)などが報告されている。

本研究では、約3年間の水質、気象・海象の詳細な現地観測結果を用いて、秋季の北風の卓越による表層水の湾口方向への移動と、中層以下の湾奥方向への流れが、東京湾北西部の貧酸素水塊の解消にはたす役割・規模を明らかにすることを目的とした。

2. 現地観測の手法

観測は東京湾北西部の計8地点で行った(図-1)。2007

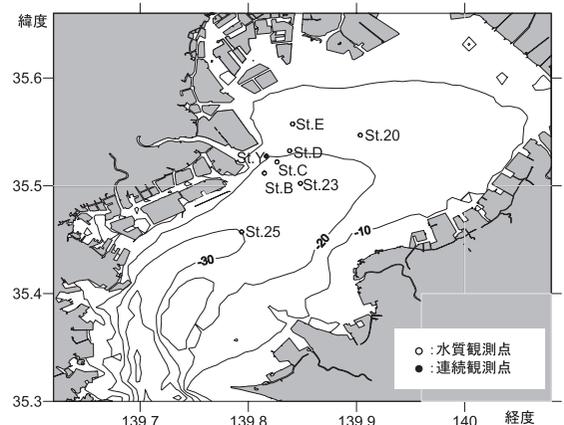


図-1 現地観測点

1	正会員	工修	国土交通省 関東地方整備局 京浜港湾事務所 第一建設管理官室
2		工修	国土交通省 関東地方整備局 東京空港整備事務所 所長
3	正会員	工修	国土交通省 国土技術政策総合研究所 沿岸海洋研究部 交流研究員
4	正会員	工博	国土交通省 国土技術政策総合研究所 沿岸海洋研究部 海洋環境研究室長

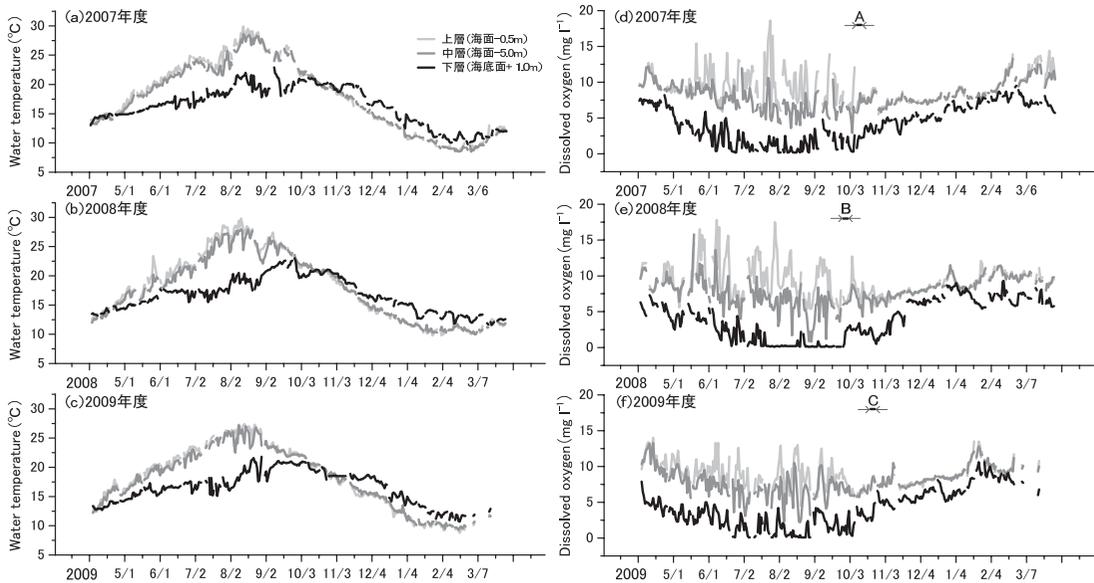


図-2 St.Cにおける水質観測結果 (2007年4月から2010年2月の水温とDO)

年4月から2010年2月の荒天を除く毎日午前中に、St.BからSt.25の7地点の3層(上層:海面-0.5m, 中層:海面-5.0m, 下層:海底面+1.0m,)において、船上から多項目水質計(JFEアドバンテック社製 AAQ1183)を用いて、水温T, 塩分S, 溶存酸素濃度DOの水質観測を行った。

2007年9月から2010年2月に、St.Yに観測槽を設置し、この槽に取り付けた多項目水質計(JFEアドバンテック社製 AAQ1182)を1時間毎に海底面より1mの間隔で自動昇降させることにより同成分の水質観測を行った。同期間に同地点で、潮位、A.P.+12.3mの位置で風向風速、海底面(約A.P.-20.5m)にADCP(Teledyne RD Instruments社製 WORKHOURSE ADCP 600khz)を上向きに設置し、約A.P.-17mから表層まで1m間隔で流況の現地観測を行った(連続観測)。これらの観測機器は、定期的に適切なメンテナンスを実施した。

3. 観測結果と考察

(1) 水質の年間変動

観測期間中のSt.Cの水温とDOの結果を図-2に示す。水温については、4月中旬より上層・中層と下層との差が大きくなり、この傾向が9月上旬まで継続する。9月中旬からは、上層・中層と下層との水温の差が小さくなり、やがて10月中旬から11月中旬にかけて水温が逆転し(約20℃付近)、各層の水温が同様の傾向で2月下旬まで低下する。3月上旬から各層の水温が再び上昇し、4月の中旬までに上層・中層と下層の水温が再び逆転(約12℃付近)する毎年同様の傾向を観測した。DOについては、下層において、6月上旬から10月中旬まで約2から3mg/l

以下の貧酸素の状況が継続し、11月上旬から、概ね3mg/l以上の濃度に増加する毎年同様の傾向を観測した。

2008年度に観測された湾口から湾奥にかけて(St.25, St.C, St.E)の下層の水温とDOの観測結果を比較すると、水温については、6月上旬から11月中旬までは、最も湾口側に位置するSt.25でより低い水温が観測された。DOについては、6月上旬から10月中旬まで全地点で貧酸素の状況が観測されたが、St.25の観測結果は、DOが低下する時期が遅く、回復は早い傾向を示し、1mg/l以下のDOが継続して観測された8月においても、一時的な回復がより高頻繁で観測された。また、より湾奥の地点ほどDOが低い状況が長期間継続して観測された。これ以外の期間(4月から5月及び12月から3月)の観測結果については、各調査地点で水温、DOともに同様の傾向であった。

(2) 貧酸素からの回復過程の抽出

毎年秋季から冬季にかけての観測結果から、継続的な酸素回復過程が起こったと考えられる初期の期間A: 2007年10月09日~10月13日(図-2(d)), B: 2008年9月27日~10月1日(図-2(e)), C: 2009年10月21日~10月25日(図-2(f))における水質の変化とこれに伴う酸素回復過程に注目した。これらの期間に、各調査地点の下層で観測した、塩分と水温、密度とDOの関係を図-3に示す。St.Yについては、約A.P.-19mで10時に観測された結果を採用した。

期間Bの塩分と水温の関係については、27日までは、相対的に塩分が低く、水温は高い状況であったが、28日以降、塩分の増加に合わせて水温が低下する直線的な関

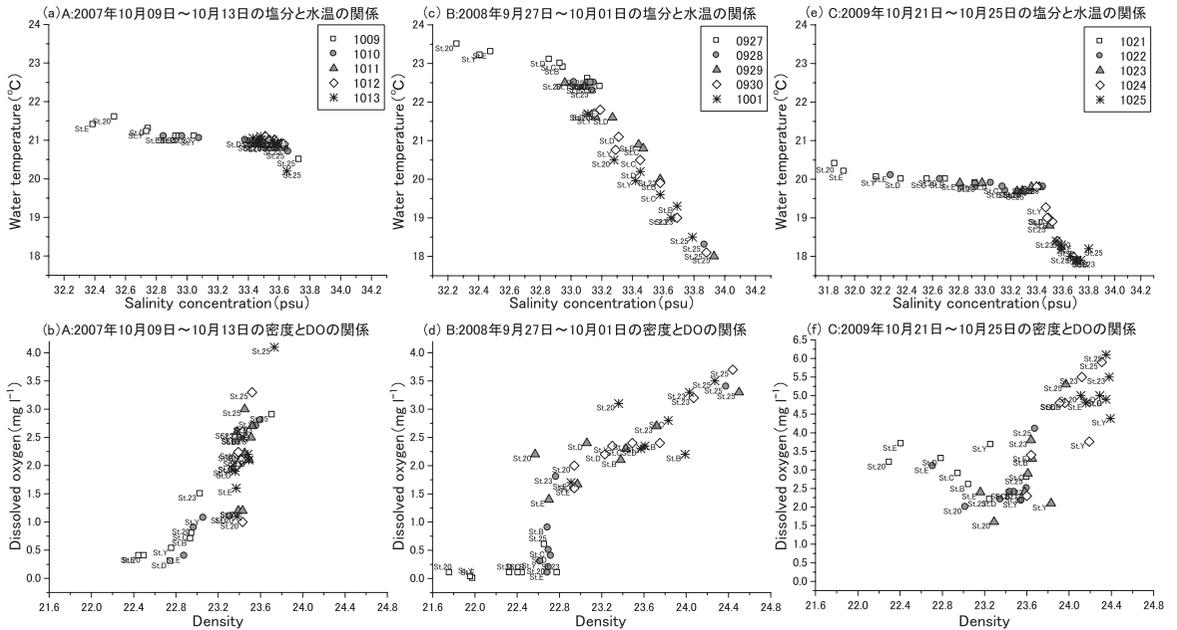


図-3 期間AからCの下層の塩分と水温（上段）、密度とDO（下段）の関係

係がみられた。密度とDOの関係については、27日までは、全地点で1mg/l以下の貧酸素の状況がみられ、密度も相対的に低い状況であったが、28日以降、水温低下と塩分増加による密度の増加に合わせてDOが増加する関係がみられた。これらの関係は、グレーの凡例で示す28日から29日にかけて、ともに顕著な変動がみられた。期間AとCの酸素回復過程については、主に塩分の増加による密度の増加に合わせてDOが増加する関係がみられた。これらの期間については、上層と下層の水温差が約0.5℃と、温度躍層が解消された状況であり、さらに、期間Cについては、10月8日の台風の影響等により、21日のDOは約2から4mg/lであった。

これらの回復過程の中で、最も大きな水質の変化とともに酸素回復過程を観測した期間Bに着目し、同期間の観測結果より作成した密度とDOの平面分布を図-4に示す。密度とDOの平面分布をみると、28日以降、湾口から湾奥方向に向けて、ともに濃度勾配がみられた。さらに、湾奥の地点から徐々に高密度な水塊の移動が観測されるのと同様の傾向で、DOが増加する状況が観測された。

これらのことから、この期間の調査地点付近の下層に、湾口方向から相対的に高密度（低水温、高塩分）の水塊が移動したことにより、貧酸素の状況が回復したことが示唆された。また、湾軸に近いライン（St.25, 23, 20）上の地点では、ほぼ同程度に位置する岸側の地点よりも密度やDOの増加が早く観測された。

(3) 下層に浸入する外洋水の平均的移動速度

この期間の湾軸に近いライン上の日々の等密度線の位置を比較し、その変動から水塊の移動速度を推定した。その結果、推定が可能であった範囲では、9月28日から29日にかけての移動速度が、 $4.9 \pm 0.9\text{km/日}$ （平均値±標準偏差）と最も大きく、この期間に平均 $2.7 \pm 1.2\text{km/日}$ 程度の移動速度を推定した。密度については、湾口から湾奥方向に向けた調査地点付近の地形に沿った濃度勾配がみられたため、このライン上の等密度線の位置から移動速度の推定が可能であると考えたが、DOについては、図-4 (h) や (j) のように東西方向に濃度勾配がみられる日もあり、より不規則な変動であったため、移動速度を推定することは困難であった。

(4) 風による外洋水侵入の様相

同期間の2008年9月27日0時から10月1日23時までの水質と気象・海象の連続観測結果を図-5に示す。(a)は風速ベクトル、(b)は潮汐、(c)は水温、(d)は塩分、(e)は溶存酸素濃度、(f)は密度、(g)は東西成分の残差流（東成分のみグレースケール表示）、(h)は南北成分の残差流（北成分のみグレースケール表示）を示す。なお水深の基準は、A.P.に統一した。

この期間は北風が卓越し、平均風速は5.7m/sであった。海面から約-2m（上層）までの残差流（25時間移動平均流）は、湾口方向への流れが卓越していた。約-3から-14m（中層）と約-14m以深（下層）では、湾奥方向への流れが卓越していた。下層の残差流の結果は、中層よりも弱

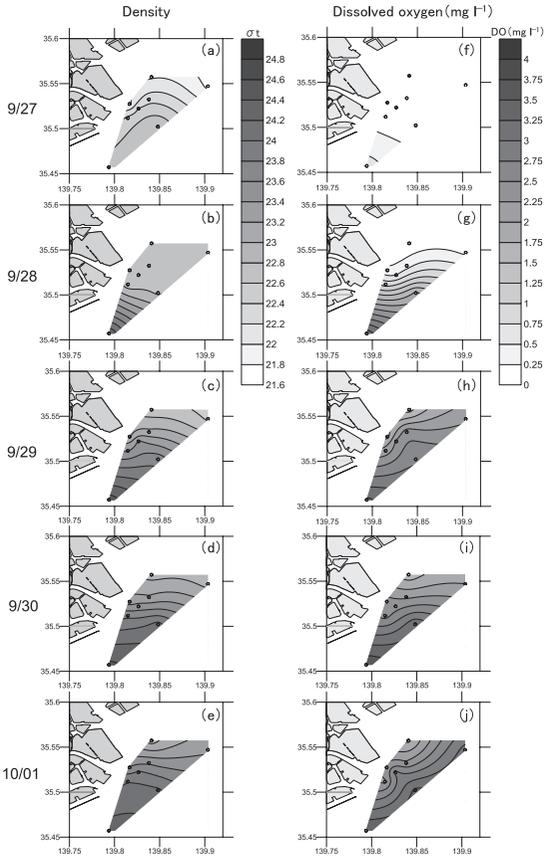


図4 2008年9月27日から10月1日の下層の密度と溶存酸素濃度の平面分布図

い湾奥方向への流れであったが、潮流の観測結果(図-6)をみると、潮汐に対応した北東方向と南西方向への流れが卓越していた。

水質については、約-10から-14m付近で変動する密度躍層が観測され、貧酸素の状況は、この躍層以下の水深で観測された。41時間後までの躍層以下のDOは、0.5mg/l以下であったが、その後、相対的に高密度の水塊が潮汐周期に合わせて湾奥方向へ移動すると同様の時機に、徐々にDOが増加し、この期間内に密度躍層以下のDOが約3mg/lまで増加した。この際、約23の等密度線の変動に合わせて、約2から2.5のDOの等濃度線の変動がみられた。DOの挙動については、平面分布や連続観測結果からも密度等の挙動と一致しない場合も多く、より複雑に移動する傾向が観測されたが、生物による酸素消費や拡散の違いなど、様々な反応過程が影響していることが示唆された。

これらの結果から、下層の継続的な貧酸素水塊の回復は、北風が卓越し上層水が湾口方向へ移動し、中層以下の水塊が湾奥方向へ移動する際に、湾口方向から相対的

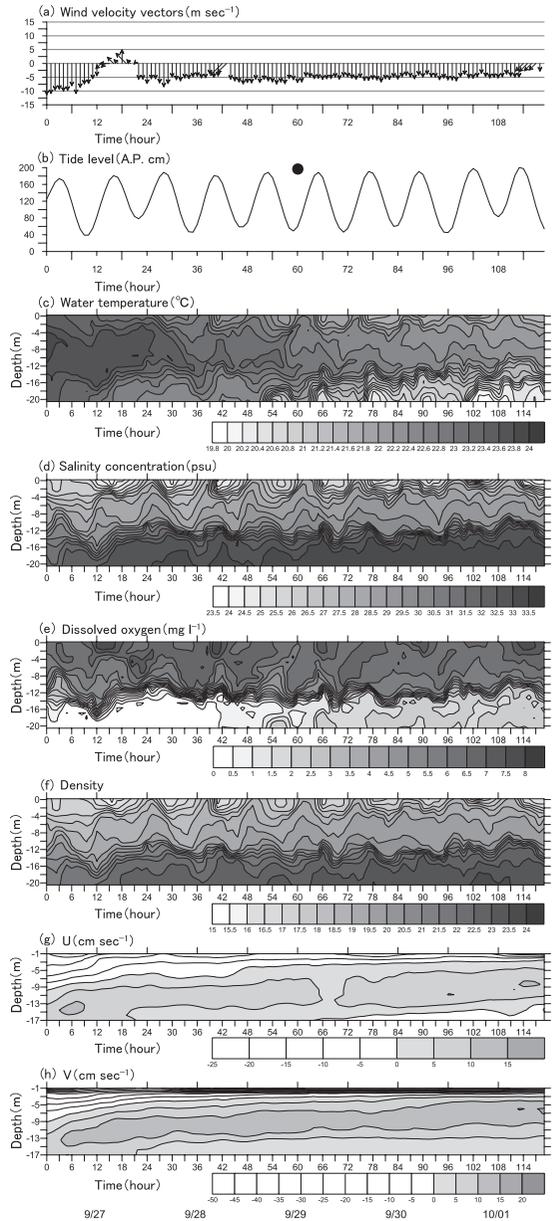


図5 2008年9月27日0時から10月1日23時の水質、気象・海象の連続観測結果

に高密度(低水温、高塩分)、高DOの水塊が移動することによって起こる場合の具体的な変化の様相が示された。

(5) 潮汐による外洋水浸入の様相

この期間の密度の観測結果と、同時刻に同水深で観測した潮流ベクトルを重ね合わせた結果を図-6に示す。59から71時間後までの65時間後に満潮となる周期の中で、密度躍層以下の下層において、密度23以上の水塊は、北東方向への流れが卓越する上潮時の63時間後から観測さ

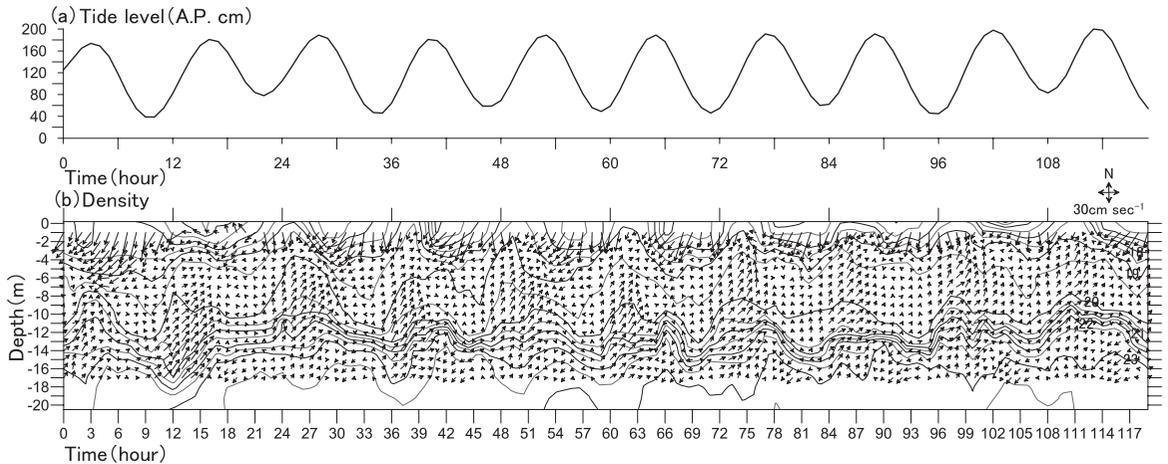


図-6 2008年9月27日0時から10月1日23時の密度と潮流の観測結果

れ、その後66時間後に南西方向への流れが卓越する際、最下層から約-16m以下の水深で観測された。この結果と同様に、96から108時間後の102時間後に満潮となる周期の中で、下層において南西方向への流れが卓越する102から106時間後にかけて最下層から約-18m以下の水深で23.5以上のより高密度の水塊が観測された。

これらの観測結果から、下層における相対的に高密度な水塊の侵入は、各潮汐周期の上げ潮時に湾奥方向への流れが卓越する満潮に近い時間から始まり、下げ潮時に湾口方向への流れが卓越する際に、最下層からより浅い水深で観測された。このように潮汐に同調して周期的に起こる過程で、密度が徐々に増加する変化の様相が具体的に示された。

4. まとめ

本研究で実施した現地観測により、以下のような貧酸素水塊の回復過程が示唆された。

- (1) 秋季に観測された下層の継続的な貧酸素水塊の回復は、北風が卓越し上層水が湾口方向へ移動し、中層以下の水塊が湾奥方向へ移動する際に湾口方向から相対的に高密度（低水温、高塩分）、高DOの水塊が移動することによって起こることがある。今回の観測期間中では、水質の変化の状況は多少異なるものの、2007年、2009年にもこれらの特徴的な風や流況が卓越する際、継続的な酸素回復過程が観測された。
- (2) 水質の平面分布の経時変化から、湾軸に近い地点でDOの増加がより早く起こることがあり、等密度線の位置の変動から、湾奥方向への1日スケールの水塊の移動速度が平均 2.7 ± 1.2 km/日程度であることが推定された。
- (3) 上記の1日スケールのゆっくりとした溶存酸素の回

復過程とともに、潮汐周期（下げ潮時）に合わせた密度の変化やDOの増加が観測され、沿岸部の溶存酸素の回復過程においては、湾内の下層でみられた局所的・潮汐周期に合わせた短期的な循環が関係していることが示唆された。

今後、さらに局所的・短期的な水塊構造の変化等を明らかにするためにも、詳細な流動と水質の鉛直構造の連続観測を継続的に実施して行くことが重要かつ必要であると考えます。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、現地観測については羽田再拡張D滑走路建設工事共同企業体の皆様多大な協力をいただいた。また、関東地方整備局の松永康男港湾空港企画官、東京空港整備事務所の松本茂環境課長、高野弘之環境計画係長には、大変有益な助言をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

中川康之・八木 宏・鯉淵幸生・日向博文・稲垣 聡・小倉久子 (1997)：東京湾内湾部における成層期の流動特性に関する現地観測，海岸工学論文集，第44巻，pp.401-405。
 平野敏行編 (1986)：沿岸域保全のための海の環境科学，恒星社厚生閣，pp4-15。
 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。
 森川雅行・村上和男 (1985)：成層期から対流期へ移行する東京湾の流動特性，海岸工学講演会論文集，第32巻，pp.762-766。
 八木 宏・Tanuspong POKAVANICH・安井 進・灘岡和夫・有路隆一・松阪省一・鈴木信昭・諸星一信・小田僚子・二瓶泰雄 (2008)：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，海岸工学論文集，第55巻，pp.1081-1085。