

流況・水質の長期連続データから見た東京湾口と湾奥の関係について

Relationship of Water Quality and Flow between the Mouth and the Head of Tokyo Bay based on the Long Term Continuous Observation

鈴木高二朗¹・磯部雅彦²・諸星一信³

Kojiro SUZUKI, Masahiko ISOBE, and Kazunobu MOROHOSHI

In order to clarify the relationship of water quality and flow between the mouth and the head of Tokyo Bay, several long term continuous observation data are compared. According to the current observation at the mouth of Tokyo Bay, estuarine circulation is dominant throughout the years. Especially in September and October the circulation is larger because of rain fall. Oceanic water intrudes into the lower layer of the center of Tokyo Bay and forms the warmer water layer in winter (cooler water layer in summer). Such intruded oceanic water is transported from the center to the head of Tokyo Bay by the wind driven upwelling.

1. はじめに

東京湾は閉鎖的であるものの湾口から外洋の影響を強く受ける海域である。そのため、秋期の中層貫入現象(日向ら, 2001)など、外洋水の進入現象が精力的に研究されてきている。しかし、外洋水の季節毎の進入頻度や、その湾央・湾奥の貧酸素水塊の発生・発達・解消との関連性、あるいは青潮の発生に及ぼす影響の有無など、未だに不明な点が多い。例えば、千葉湾奥の千葉灯標では、冬期に高温高塩分、低酸素の水塊が底層部に進入することがあり、外洋の影響ではないかと指摘されているものの(山尾ら, 2006)、その進入過程は不明である。

このような外洋水の湾奥への影響を調査する上では、湾口と湾央、湾奥での連続観測が役立つものと考えられる。そこで、東京湾の観測についてみると、近年の観測技術の向上にともない、既に数カ所で長期的な連続観測が実施されている。前述した千葉湾奥の千葉灯標では多項目水質計を用いた連続観測(山尾ら, 2006)が2003年3月から開始され、東京湾口ではフェリーを用いた連続観測(鈴木ら, 2003)が2003年12月から開始され、約4～5年が経過している。また、東京湾央においては、鯉渚らが2004年より東京湾横断道路の風の塔において水質の連続観測を実施している(鯉渚ら, 2005)。一方、湾口の第二海堡では波浪観測が実施されているが、最近、外洋水の進入についても観測されていることが分かってきた(田中ら, 2007)。さらに表層では、HFレーダーを用いた連続観測が実施されている(日向, 2005)。

そこで、本研究では、東京湾口のフェリー観測データ、千葉灯標の観測データ、風の塔におけるデータを用いて、東京湾口と東京湾奥との比較を行い、外洋水の東京湾奥へもたらす影響について調べることとした。さらに、それらの連続データを補うために、2007年8月から東京湾内の水質を小型調査船によって計測した。

2. 各種観測データの諸元

図-1は、今回比較した連続観測の実施されている地点を示している。湾口では、東京湾フェリーの航路で表層の水質(塩分・水温・クロロフィル等)とADCPによる水深約150mまでの断面の流向流速が、約1時間に1回の間隔で6:20から20:00まで計測されている。第二海堡では海底(水深28.8m)に海象計が設置され、流向流速が計測されており、測定されている水深(以下、測定深とよぶ)は10,15,20mの3点である。ただし、海象計で

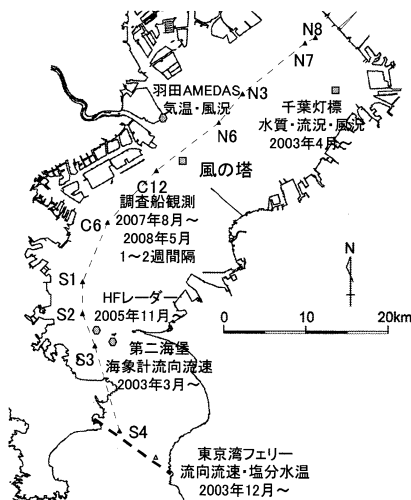


図-1 調査地点図

1 正 会 員	工 修	(独)港湾空港技術研究所海洋・水工部
2 フェロー	工 博	東京大学大学院新領域創成科学研究科教授
3 正 会 員		関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所長

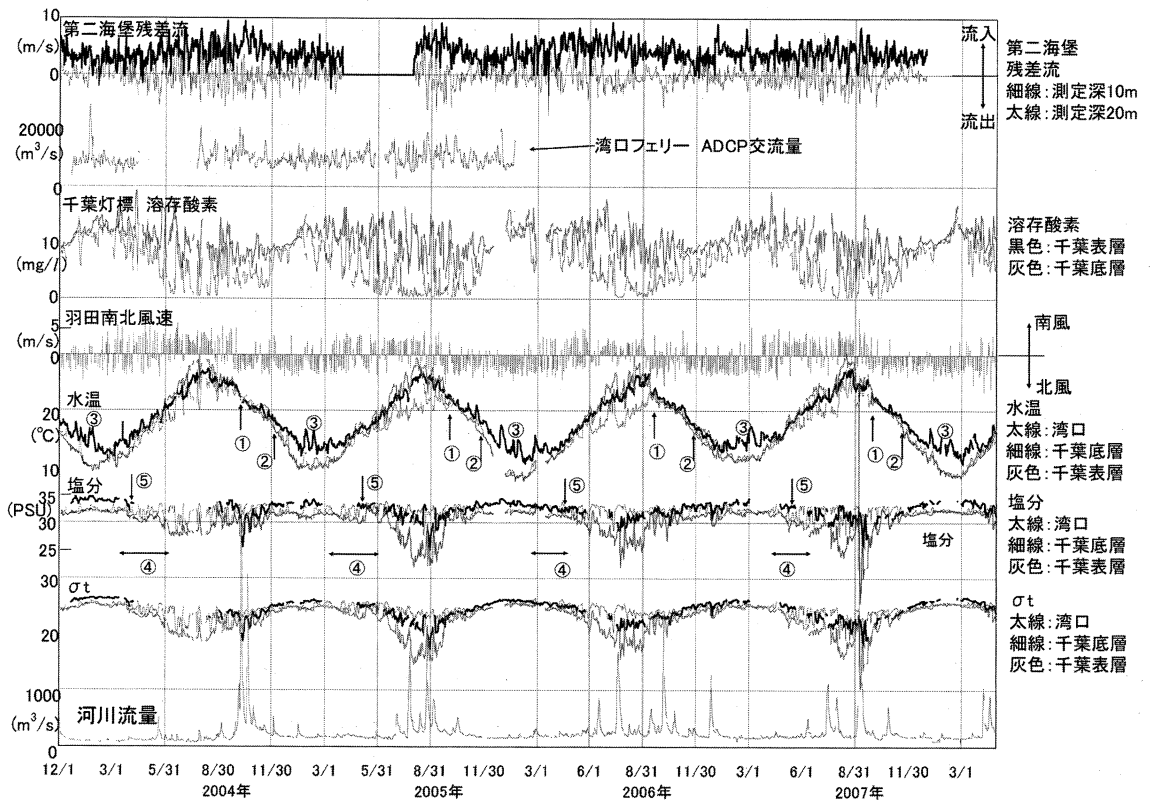


図-2 2003年12月～2008年4月までの各種連続データの比較

は表層の流速が得られないため、近くの HF レーダーのデータと比較した。なお、フェリー ADCP、海象計のデータは調和解析により残差流を求めた。また、ADCP データは、以下の式(1)で海水交換量（外洋と湾内を湾口断面で往来する単位時間あたりの海水量）を求めた。

$$Q = \int u_+ dA_+ - \int u_- dA_- \quad (1)$$

ここで、 u_+ 、 u_- はそれぞれ残差流で、湾内に流入する流速と流出する流速であり、 A_+ 、 A_- は流入流出している位置の断面積である。

風の塔（水深25m）では、測定深0.5m、12.5m、24.5m に各種水質センサーが設置されている。千葉灯標（水深11m）では自動昇降装置により、水質が表層から底層まで1m ピッチで1時間おきに計測されている。また、気象データは、羽田アメダスのデータを用いた。河川流量は国交省水文水質データベースの河川水位から推定した。

上記のような連続データは、時間的には密なもの空間的には粗いため、湾口から湾奥まで、2007年8月～2008年5月まで1～2週間隔で国土交通省横浜港湾空港技術調査事務所の小型調査船により、多項目水質計（AAQ アレック電子製）を用いた水質観測を行った。

3. 各季節の主な特徴

図-2は、2003年12月～2008年4月までの各種連続データを並べて表示したものであり、以下に全般的な流れの特徴と各季節の水質の主な特徴について述べる。

(1) 表層流出・下層流入（全般的な傾向）

図-2中、第二海壁の海象計の南北方向残差流は、5～10月にかけて測定深10mと20mの流速の差が大きくなっており、冬期にその差が小さい。海象計では表層を計測できないため、HF レーダーによる近隣の表層流速の残差流をもとめ、その年平均值を図-3の南北流速の年平均鉛直プロファイルで示した。4年とも表層流出・下層流入というエスチュアリー循環の性質を示している。

図-4は各月毎の残差流であり、年によって変動はあるものの、5～10月にかけて表層流出・下層流入であり、特に9～10月にその差が大きい。図-2を見ると東京湾フェリーの海水交換量も秋期に大きくなっており、エスチュアリー循環による活発な海水交換が行われていることを示している。なお、このような第二海壁での表層流出・下層流入現象は特に河川からの大量出水時に大きかった。

(2) 秋季の貧酸素水塊の解消過程

台風は大量出水をもたらすので上記のように大きな海

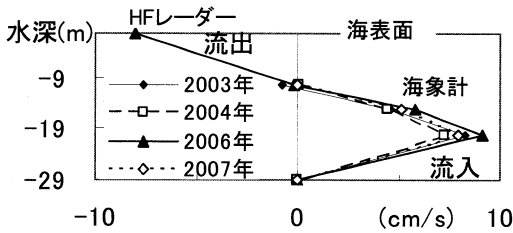


図-3 第二海壁周辺における年平均残差流

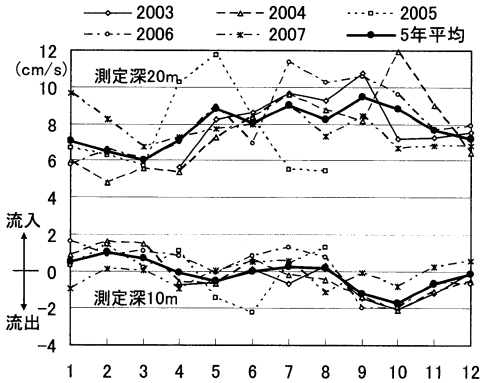


図-4 第二海壁での月平均残差流

水交換を引き起こしているものと考えられる。しかし、湾奥底層の溶存酸素と比較すると、一時的な攪乱だけにとどまっており、あまり解消していないことが分かる。

一方、季節風が南風から北風に変わり、青潮が発生し始める時期(図-2中①)には、湾奥表層の水温が急激に下がり、湾奥表層と底層、および湾口の表層水温が全て同程度になる時期がある。塩分も湾口と湾奥底層で、同程度となっており、上述した9~10月の表層流出・下層流入によって、湾口から外洋水が流入している可能性がある。

しかし、この時点でも湾奥の溶存酸素は回復していないことが分かる。溶存酸素が回復するのは、湾奥表層の水温が低下し、淡水流入量が小さくなって表層と底層の密度が等しくなる11月末頃(図-2中②)である。

(3) 冬季外洋水の流入

12~2月にかけては湾口表層の方が湾奥表層と底層よりも塩分、水温、密度が大きくなる。また、冬期は東京湾口の表層に、黒潮系暖水が流入するため、図-2中③のような水温、塩分の急上昇を月に数回見ることができる。このような水温、塩分の急上昇は、湾奥底層でも発生することがあるものの、外洋水との関連は不明である。

(4) 春季の外洋水の流入と貧酸素水塊の発生

気温と風向の変化が激しい3~5月にかけては(図-2中④)、湾奥底層の塩分と密度が徐々に大きくなり、湾口よりも大きくなる。そのため、この期間に湾奥底層に塩分の大きい外洋水が流入しているものと考えられる。春のある時期(図-2中⑤矢印)を過ぎると、密度成層が発

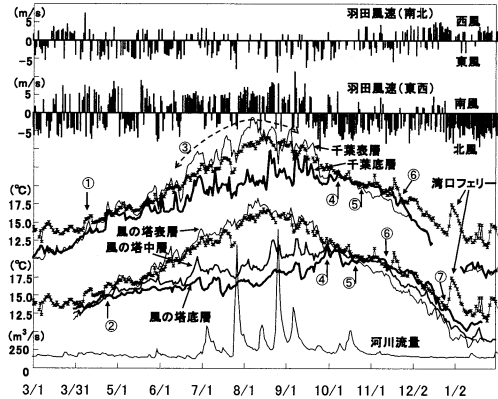


図-5 2005年の湾口と湾央、湾奥との関係

達し始め、湾奥の溶存酸素が徐々に低下するようになる。また、密度成層の発達とともに湾奥底層の密度が湾口表層より大きくなっている。密度は湾奥の方が大きくなり、外洋から海水が入りにくくなるものと考えられる。

4. 外洋水の湾央・湾奥への影響について

(1) 千葉灯標、風の塔、湾口フェリーデータの比較

3. では、湾口と湾奥の全般的な傾向を示したが、ここでは、より詳細に2005年の千葉灯標(湾奥)と風の塔(湾央)、湾口フェリー(湾口)のデータを比較する(図-5)。

湾奥では4月初旬になると成層化し始め、表層(測定深1m)と底層(測定深11m)の水温が異なってくる(図-5①)。一方、湾央の中層(測定深12.5m)と底層(測定深24.5m)の水温は4月下旬まで表層(測定深0.5m)より高くなっている(図-5②)。

夏になって密度成層が発達すると、湾奥の水温は湾央と比較して風によって変化しやすく、南風で水温が上昇し、北東の風で水温が低下している(図-5③)。

9月下旬から季節風が北風になると、3. (2)で述べたように表層の水温は急激に低下し、湾奥、湾央、湾口の水温が、深さに関係なく全て同じ値になる(図-5④)。湾奥・湾央の表層水温はさらに低下して、10月中旬から湾央の中層底層、湾奥の底層よりも低くなる(図-5⑤)。

一方、湾奥の底層、湾央の中層底層の水温は11月初旬まで暖かく、湾口の表層水温と同じ値をとっている(図-5⑥)。さらに、湾央の底層水温は、12月下旬まで湾口の表層水温と同じで高い状態のままである(図-5⑦)。

以上のことから、9月下旬から11月初旬までは、湾奥の底層と湾央の中層底層に外洋水が影響し、さらに11月以降も湾央の底層に影響を及ぼしていることが分かる。

(2) 環境調査船データとの比較

以上のように湾奥の底層、湾央の中層底層に外洋水の影響があることが分かったものの、湾口から湾奥へかけ

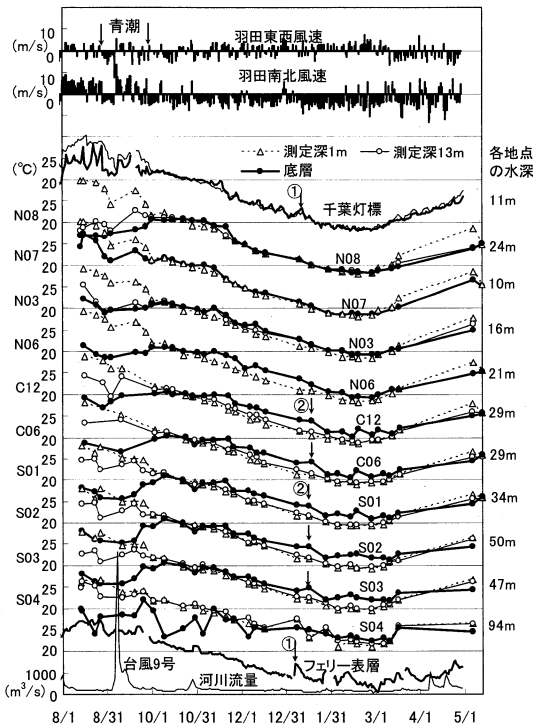


図-6 2007年～2008年にかけての塩分水温の変化

ての外洋水の進入過程は不明である。そこで、外洋水の進入過程をより詳細に調べるため、図-6のように2007～2008年の調査船によるデータとの比較を行った。

a) 外洋水の湾央・湾奥への流入過程（冬期）

前掲図-2に戻ってみると、図-2③のように冬期には湾口や湾奥で水温が急上昇するのが見られる。そこで、このような湾奥での水温の急上昇が、直接、湾口から影響しているのかを確かめるため、図-6①について詳細に見てみる。図-6①では、1月9日に湾口の水温が急上昇し、千葉灯標の水温も遅れて1月12日に上昇している。フェリーのデータと、千葉灯標のデータだけからすると、一見、直接外洋水が湾奥まで進入しているようにも見えるが、途中のS4からC12では、この時点で水温が上昇しておらず、1月16日（図-6②）になって湾口から底層の水温上昇が、湾奥に向けて伝播している。しかし、水深が浅くなるにつれて水温上昇は無くなり、水深10mのN7や浚渫窪地のあるN8では変化がない。

図-7は、このときの塩分の断面図である。1月9日には、湾口に高温高塩分の外洋水が進入しており、湾口の底層ではむしろ塩分が低くなっている。一方、1月16日にはフロントが外洋へ後退し、底層から高温高塩分の水塊が底層をはって湾央部まで達している。湾央C12付近には温度躍層が見られ、高温高塩分の水塊はそれより浅い湾奥まで到達していないのが分かる。

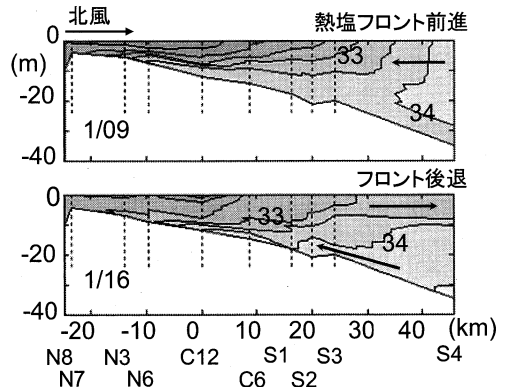


図-7 冬期外洋水の流入状況

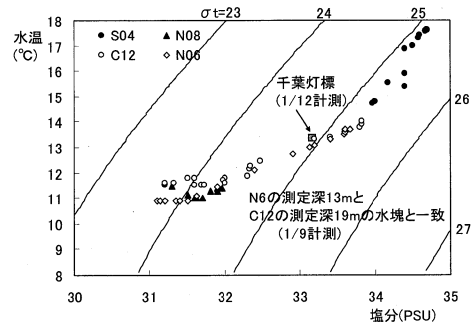


図-8 水温上昇時の湾奥と湾央のTSダイアグラム

以上のことから、湾口からの外洋水は、水深の深い湾奥には直接影響するものの、水深の浅い湾奥には影響を与えにくく、前掲図-2③の湾口と湾奥の水温上昇は直接関係が無い可能性がある。

b) 北東風による湾央底層水の湾奥底層への移動

a)で述べたように湾口の外洋水が湾奥底層に直接流入しないとすると、1月12日の千葉灯標での水温、塩分の上昇に疑問が残るが、この原因は主に風の影響と考えられる。ここでは示さないが、風向風速と底層水温を詳細に比較すると、水温は北西～南西の風が吹くと低下し、逆に北東～東の風が吹くと上昇する傾向にあり、前掲図-2③で見られた水温の上昇時には、ほとんどの場合、このような北東～東の風が吹いていた。山尾(2004)は、千葉灯標における成層期の湧昇現象が、 56° ～ 104° 方向からの風によって起こりやすく、 86° 方向の風で最も起こりやすいと述べているが、冬期においても、同様な風による湧昇現象が発生している可能性がある。

図-8は、1月9日の各観測点と1月12日の千葉灯標のTSダイアグラムである。千葉灯標で見られた高温高塩分水塊は、N06の測定深13m、C12の測定深16mの水塊と同じであり、風によって湧昇したものと考えられる。

c) 水深の同じ湾央C12と湾奥浚渫窪地N8の比較

図-9は、C12、N8での水温塩分とDOの変化である。

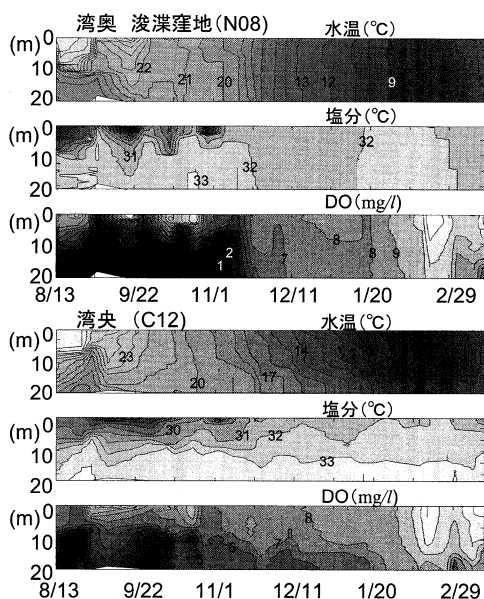


図-9 湾奥と湾奥窪地での水温塩分、DOの変化

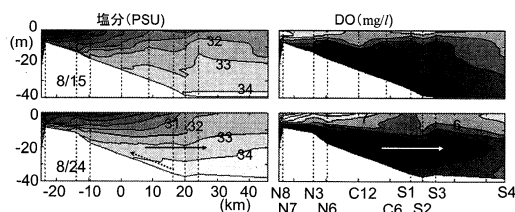


図-10 夏期外洋水の流入状況

湾奥 C12では、冬期、底層の水温が高く、外洋水が流入していることが分かる。一方、C12と水深がほぼ等しい湾奥の浚渫窪地 N8では、11～2月にかけて水温が鉛直方向に一樣になっており、外洋水が流入しにくくなっていることが分かる。これらのことから、外洋水は底層を這うようにして湾奥まで進入するものの、水深の浅い湾奥へは直接、進入しにくいことが分かる。なお、DOについてみると、浚渫窪地 N8では11月以降、鉛直方向の密度差が無いため底層 DO が高いのに対し、湾奥 C12では密度差があるため、底層 DO が低くなっている。

d) 外洋水の湾奥・湾奥への流入過程（夏期）

次に、夏期の外洋水の進入について見てみる。図-10は、2007年8月中旬から下旬に発生した低温高塩分の外洋水の流入状況である。夏期の低温高塩分の外洋水の流入は、南風によって関東・東海沿岸海域に発生する“水温第二極小”によるものとして、藤原ら（2000）によって示されているが、図-10も同様な現象と考えられる。

8月24日に湾奥底層に進入した外洋水は、8月15日に底層にあった貧酸素水塊を中層（水深20m）に持ち上げ、湾口へ押し出している。この場合も、冬期と同様に外洋

水の進入は湾奥までにとどまっていた。ただし、外洋水は湾奥の直近まで来ており、その後、9月2日の北風で湧昇し青潮に至っている。したがって、外洋水の湾奥までの流入は、青潮を発生しやすくしている可能性がある。

5. まとめ

- (1) 湾口の長期連続流況観測によると、平均的な流れは表層流出、下層流入であり、その傾向は淡水流入の多い9～10月に顕著で、2月頃に小さくなっていた。
- (2) 季節風が南風から北風に変わり青潮が発生し始める時期に、湾奥表層の水温が急激に下がり湾奥表層と底層、および東京湾口の表層水温が全て同程度になる時期が見られた。湾奥湾奥の中層水温は11月初旬まで湾口の水温と同じ値をとっている。さらに、湾奥の底層水温は、12月下旬まで湾口表層水温と同じで高い状態のままだった。
- (3) 冬期の外洋水の湾奥湾奥への進入過程を調べたところ、湾口からの外洋水は底層を這うようにして湾奥まで進入するものの、水深の浅い湾奥へは直接進入できず、風による湧昇で湾奥へ到達することがわかった。ただし、外洋水は湾奥の直近まで来ており、青潮を発生しやすくしている可能性がある。

謝辞：本研究を実施するにあたり、風の塔の観測データを東京大学大学院新領域創成科学研究科の鯉淵准教授から、千葉灯標のデータを海上保安庁海洋情報部から、HF レーダーのデータを東京湾環境情報センターから、第二海堡のデータを NOWPHAS から頂いている。湾口観測では東京湾フェリー株式会社の皆様から、調査船の観測では横浜技調の皆様から多大なご協力を頂いている。

参 考 文 献

- 鯉淵幸生・磯部雅彦（2005）：2004年の東京湾西岸横浜港周辺における青潮の発生要因，海岸工学論文集，52巻，p.896-900。
- 鈴木高二朗・竹田 晃（2006）：東京湾口フェリーによる海洋環境の2003～2005年の観測結果とその特徴，港空研資料，No.1134，37p。
- 田中陽二・永井紀彦・鈴木高二朗・清水勝義（2007）：海象計による流況観測データを用いた東京湾第二海堡における残差流の変動特性に関する解析，港空研資料，No.1168，42p。
- 日向博文・灘岡和夫・八木 宏・田淵広嗣・吉岡 健（2001）：黒潮流路変動に伴う高温沿岸水波及しにおける成層期東京湾内の流動構造と熱・物質輸送特性，土木学会論文集，No.684/II-56，pp.93-111。
- 日向博文（2005）：HF レーダーによる東京湾の M2 潮流観測，国総研資料，第212号，17p。
- 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。
- 山尾 理（2004）：強成層期の東京湾奥における水質の短期変動に対する海上風の影響，海洋情報部技報，Vol. 22，pp. 78-84。
- 山尾 理（2006）：東京湾奥部における底層表層酸素濃度の時間変化（2003年-2005年），海洋情報部技報，Vol.24，pp.116-126。