

独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

Vol.49 No.1 March 2010

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 49 卷 第 1 号 (Vol. 49, No. 1), 2010年3月 (March 2010)

目 次 (CONTENTS)

密度流・湧昇流の計算を目的とした三次元沿岸域流動モデルの開発について	田中陽二・鈴木高二朗..... 3
(Development of Non-Hydrostatic Numerical Model for Stratified Flow and Upwelling in Estuary and Coastal Areas	Yoji TANAKA, Kojiro SUZUKI
連続観測によって観測された東京湾口と湾奥の流況・水質の特性について	鈴木高二朗..... 27
(Characteristics of the Water Quality and Current at the Mouth and Head of Tokyo Bay obtained by Continuous Monitoring	Kojiro SUZUKI)

連続観測によって観測された東京湾口と湾奥の 流況・水質の特性について

鈴木 高二朗*

要 旨

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。外洋水は一般に酸素を多く含むため、その東京湾への流入は富栄養化した東京湾を浄化するものと考えられるが、一方で外洋水は、高塩分であるため湾奥へ移動すると表層の低塩分水と混合せず、密度成層を強化して湾内の環境を悪くしている可能性もある。このような外洋水の東京湾の湾中央・湾奥への影響を調査する上では、湾口と湾中央、湾奥での観測が必要になる。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、既に数カ所で水質や流況の長期的な連続観測が実施されている。

そこで本研究では、東京湾口のフェリー観測データのほか、東京湾内で計測されている各種連続観測データの特性を調べた。次に、それらの連続データに加え、小型調査船による東京湾の広域調査のデータを用いて東京湾口と湾中央、湾奥の関係を調べた。その結果、以下のことが分かった。

1) 東京湾フェリーで計測された湾口の残差流の断面分布の年平均は、上層流出、中層流入、下層流出の3層構造であり、久里浜から2.5km沖合で水深30m地点での流入が大きく、最大で7~8cm/sだった。

2) 東京湾フェリーの流向流速データから得られた海水交換日数は冬季に多く1月には約40日だった。また、4~5月、9~11月に海水交換日数が少なく、10月は約20日であり、高尾ら(2004)のBoxモデルによる算定結果とほぼ一致した。

3) 河川流量Rに対する海水交流量Qの比Q/Rは成層期の6~9月が20~25であるのに対し、3~5と11~12月のQ/R比は40~45と大きく、1~2月は若干小さく約32~38だった。東京湾奥の水質データと比較したところ、成層期の海水交換効率Q/Rは東京湾奥の密度成層の発達と逆相関の関係にあった。また、Q/R比には、風向きの影響と外洋水の東京湾への進入深度が関連する可能性があることを示した。

キーワード : フェリー観測, エスチュアリー循環, 海水交換

* 海洋・水工部 海象情報領域 海洋環境情報研究チームリーダー
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人 港湾空港技術研究所
電話 : 046-844-5049 Fax : 046-844-1274 E-mail : suzuki_k@pari.go.jp

Characteristics of the Water Quality and Current at the Mouth and Head of Tokyo Bay obtained by Continuous Monitoring

Kojiro SUZUKI*

Synopsis

Tokyo bay is the semi-enclosed bay which is frequently influenced by the outer ocean through the mouth of the bay. Oceanic water including rich oxygen might make the Tokyo bay clear. On the other hand, salty and dense oceanic water intruding into the bottom of the bay possibly makes the strong density stratification and consequently bring up the anoxic water inside Tokyo bay. In order to clarify the oceanic water effect to the environment of Tokyo bay, water quality and current observation data at the mouth, middle, and head of Tokyo bay are compared.

In this report, characteristics of the water quality and current of Tokyo bay obtained by the continuous observation is examined. Moreover, including the periodical observation data measured by small observation vessel, the relationship of the mouth, middle and head of Tokyo bay is also examined. As a result, followings are clarified.

1) Yearly averaged residual current at the mouth of Tokyo bay observed by ferry monitoring had the characteristics of 3 layers, that is, upper layer outflow, middle layer inflow and bottom layer outflow. Inflow at the point of 30m water depth, 2.5km offshore from Kurihama was the largest. The variation of harmonics and residual current from 2004 to 2008 was small. 2) The largest number of days for water exchange at the mouth of Tokyo bay observed by ADCP is 40 days on January. The number is smaller on April, May, September, October and November. The smallest number is 20days on October. These exchange rates are coincident with the rates estimated by Box model. 3) The ratio of water exchange rate Q and river discharge R is affected by the stratification inside Tokyo bay. Q/R is 20~25 in Jun to Sep. The largest Q/R is 40~45 in Oct to Nov.

Key Words: Ferry Monitoring, Estuarine Circulation, Water Exchange

* Head of Marine Environmental Information Division, Marine Environment and Engineering Department
3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan Port and Airport Research Institute
Phone : +81-46-844-5049 Fax : +81-46-844-1274 E-mail : suzuki_k@pari.go.jp

目 次

要 旨	27
1. はじめに	31
1.1 研究の背景と目的	31
1.2 東京湾の地形の特徴と海水流動を駆動する要因	32
2. 東京湾における連続観測と小型調査船による調査	33
2.1 連続観測	33
2.2 小型調査船による観測	35
3. 東京湾口における海水交換の季節変化	36
3.1 東京湾口の残差流の特徴	36
3.2 断面平均流速と海水交換量	40
3.3 海水交換量と淡水流入量の比	40
4. 湾奥の水質（千葉灯標）と湾口の海水交換の関係	42
4.1 各季節の水質の特徴	42
4.2 水質の月平均データ	43
4.3 密度成層の発達と溶存酸素量	45
4.4 密度成層の発達と東京湾口の海水交換	45
5. 東京湾口と湾央・湾奥との関係	46
5.1 東京湾口（東京湾フェリー）と湾奥（千葉灯標）の水質の長期変化	46
5.2 東京湾口と湾央、湾奥の水温の長期変化	46
5.3 冬季の外洋水の流入	46
5.4 秋季の外洋水の流入（中層流入）	50
6. おわりに	55
謝辞	56
参考文献	56
付録A. 東京湾口の潮流天文潮成分の変化	57
付録B. 第二海堡海象計、HFレーダーのデータの特徴と潮流の変化	57

1. はじめに

1.1 研究の背景と目的

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、これまでも、湾口での海水交換や湾口をとおした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、冬季に外洋水（黒潮系の暖水）が流入すると、東京湾口では図-1.1, 図-1.2のような熱塩フロントが見られる。図-1.1は東京湾口の東京湾フェリーによって計測された一例であり、黒潮系の暖水が千葉県側から流入しているのが分かる。図-1.2は同じく湾口の千葉県鋸山から見られた湾口のフロントである。一方、これと同じ時季に東京湾の湾奥では高温高塩分の水塊が下層部に進入し、湾奥の千葉灯標では図-1.3のように下層に高温高塩分の水塊が見られる。このような冬季の東京湾の湾奥の高温高塩分水塊の流入については、東京湾口を通じた外洋水の影響ではないかとも指摘されているものの（山尾ら, 2006）、その進入過程は現在のところ不明である。すなわち、外洋水が直接東京湾口から湾奥まで移動するのか？あるいは、黒潮系暖水がもともと湾央にある高温・高塩分水を湾奥へ押し込んでいるのか？あるいは、それ以外の機構が起きているのかが現在のところ未解明である。

また、外洋水は一般に酸素を多く含むため、その東京湾への流入は富栄養化した東京湾を浄化するものと考えられるが、一方で外洋水は、高塩分であるため湾奥へ移動すると表層の低塩分水と混合せず、密度成層を強化して湾内の環境を悪くしている可能性もある。

このような外洋水の東京湾の湾央・湾奥への影響を調査する上では、湾口と湾央、湾奥での観測が必要になる。東京湾の観測についてみると、近年の観測技術の向上とともに、既に数カ所で水質や流況の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、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海象計による波浪観測が実施されているが、2003年3月から3層の流向流速が得られるようになってい

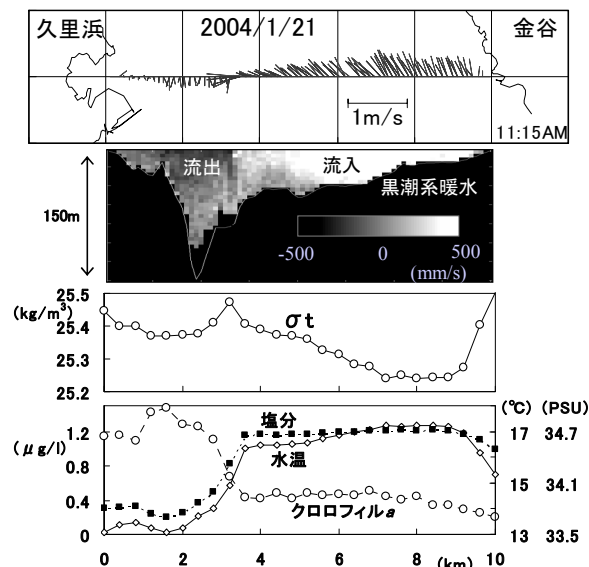


図-1.1 湾口で見られる冬季の外洋水（黒潮系暖水）の流入状況

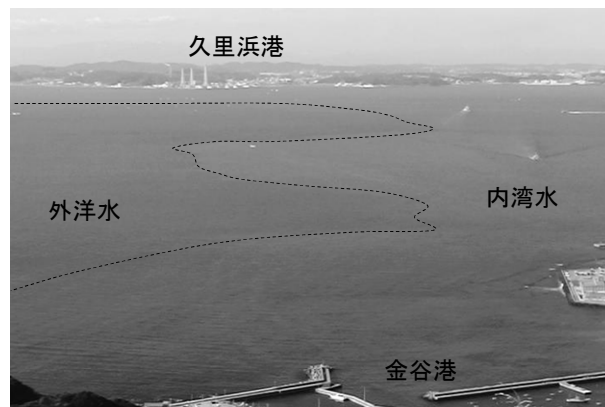


図-1.2 湾口で見られる冬季の湾口フロント

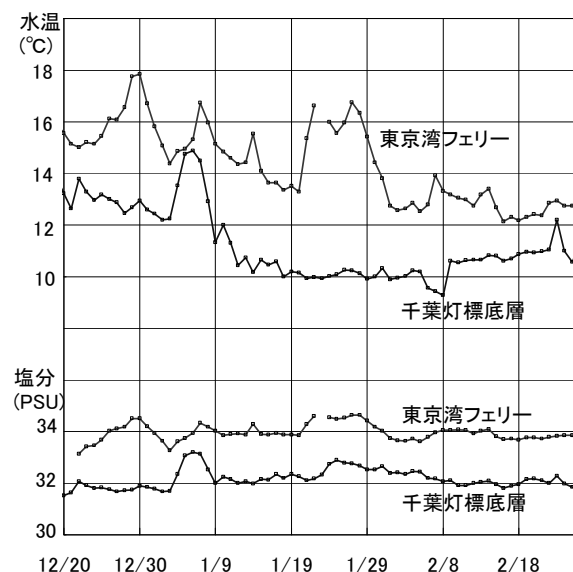


図-1.3 東京湾口表層と東京湾央（千葉灯標）下層で見られる高温高塩分水

さらに、東京湾表層では HF レーダーを用いた連続観測が実施され（日向, 2005）、最近では東京国際空港（羽田空港）D 滑走路の建設にとまない、湾中央に千葉灯標と同様な水質の連続観測が 2007 年より開始されている。

そこで、本研究では、東京湾口のフェリー観測データ、東京湾奥の千葉灯標の観測データ、東京湾中央（風の塔）におけるデータの比較を行い、外洋水の東京湾奥へもたらす影響について調べることにした。さらに、それらの連続データに加え、2007 年 8 月から国土交通省横浜港湾空港技術調査事務所が実施している小型調査船による東京湾の広域調査のデータを比較した。

1.2 東京湾の地形の特徴と海水流動を駆動する要因

(1) 東京湾の地形の特徴

図-1.4 は東京湾の水深図である。東京湾は北から約 45 度、北東-南西の向きに傾いており、その長さは約 50km、幅は約 20km である。

東京湾の湾口には氷河期の古東京川によって作られた海底溪谷があり、久里浜沖で 150m、観音崎沖で 70m、本牧沖で 40m ほどあり、多摩川河口でも 25m ほどになっている。溪谷は羽田沖までは東京湾の西側に偏ってきているが、それより北になると東側（千葉側）に深い部分が続いている。一方、主要な河川である荒川、江戸川、多摩川は東京湾の北西側に位置している。

なお本論文では、図-1.4 に示すように東京湾の湾口・湾中央・湾奥を定義している。

(2) 東京湾の海水流動を駆動する要因

東京湾の海水流動を駆動する最も大きな要因としては、①河川からの淡水流入によって駆動されるエスチャリー循環流（重力循環流）（図-1.5(a)）、②風によって駆動される吹送流（図-1.5(b), (c)）、③黒潮の流軸変化などによる外洋系水塊の流入（図-1.5(d)）、および④海表面での受熱と放熱のバランスによる受熱期の水温成層の発達と放熱期の鉛直混合、および熱成循環流があげられる。

①エスチャリー循環流は、河川水の流入にともなって内湾に生じる上層流出・下層流入の流れである。河川水に連行されて外海水もともに流出するため、その流量は河川流量よりも大きく、東京湾では河川流入に対して、冬は 13 倍、夏は 6 倍にもなるといわれている（宇野木, 1998）。エスチャリー循環は河川流入の多い夏季に大きく、冬に小さい傾向にあるものの、河川水の流れは湾奥から湾口に向けて表層を流れており、向きは一方向であるため、吹送流などと比較すると、変化の少ない流れである。

②吹送流は短期的には低気圧の通過などにもなって流向が変わるものの、長期的には夏は南よりの風により

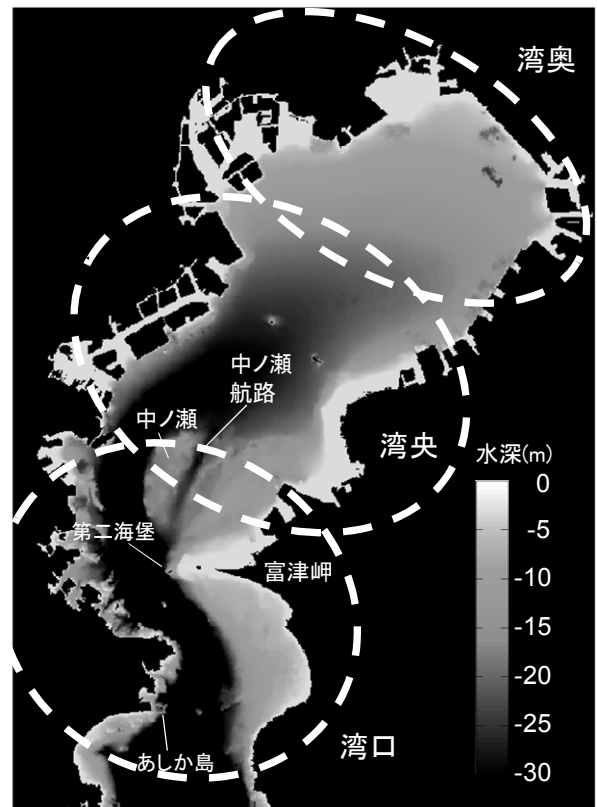


図-1.4 東京湾の水深図と湾口、湾中央、湾奥の定義

図-1.5(b)のように、冬は北寄りの風の日により図-1.5(c)のようになる日が多くなる。塩分・密度の大きい外洋水は東京湾の下層から流入する傾向にあるため、図-1.5(b)に示すような北寄りの風は、湾口から湾奥への外洋水塊の流入を強めるものと考えられる。

③外洋系の水塊の流入は、台風や低気圧の通過と黒潮流軸の変動による黒潮系暖水の流入に大きく分けられる（石戸谷ら, 2006）。黒潮流路変動の時間スケールは数日-数カ月程度であり（日向, 2004）、東京湾にもその時間スケールで外洋水の流入がみられるものと考えられる。

東京湾の流れや水質は、これらの要因が絡み合って駆動されている。

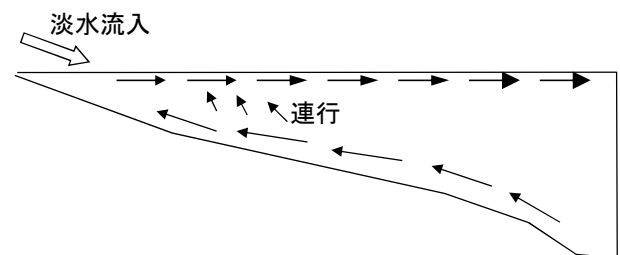


図-1.5(a) エスチャリー循環（鉛直循環）の模式図

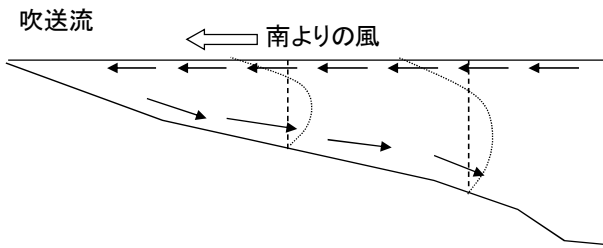


図-1.5(b) 南風による吹送流の模式図

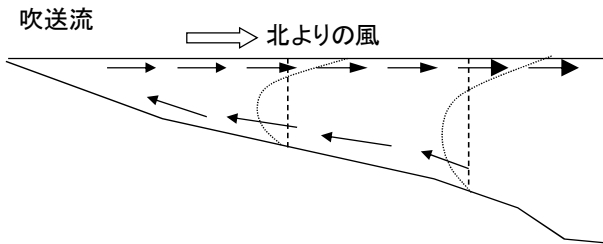


図-1.5(c) 北風による吹送流の模式図

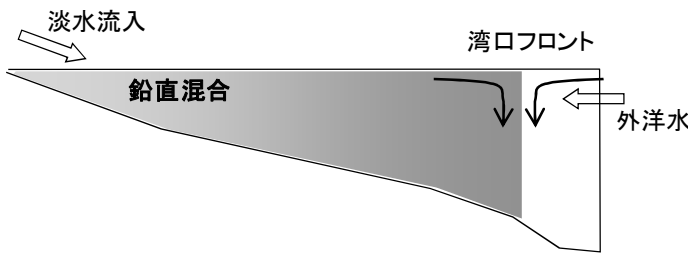


図-1.5(d) 冬季の外洋水の流入 熱塩フロント(湾口フロント)の模式図

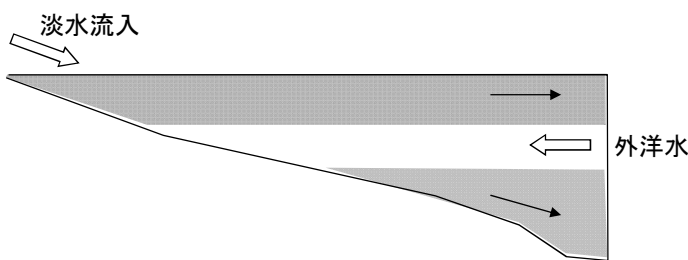


図-1.5(e) 秋季の外洋水の流入 中層貫入の模式図

2. 東京湾における連続観測と小型調査船による調査

2.1 連続観測

図-2.1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。

(1)東京湾口のフェリーによる連続観測

東京湾口では、当研究所が図-2.2, 2.3に示すように東京湾フェリー株式会社の協力により、フェリーによる流況と水質の連続観測を実施している。観測を実施しているフェリーは東京湾フェリー株式会社所有の3隻のフェリーのうちの“かなや丸”であり、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、日中、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。連続観測は2003年12月から実施されている。なお、フェリーによる観測手法および東京湾口の2003~2005年の水質・流況の特性については、鈴木・竹田(2006)に述べられている。

(2)第二海堡の海象計による連続観測

東京湾口の第二海堡は、図-2.4に示す観音崎と富津を結ぶ線上に位置し、東京湾フェリー航路よりも東京湾よりに位置する。第二海堡では、国土交通省関東地方整備局(旧運輸省第二港湾建設局)が、1961年より潮位を、1969年より風向風速を、1979年より波高を、それぞれ現

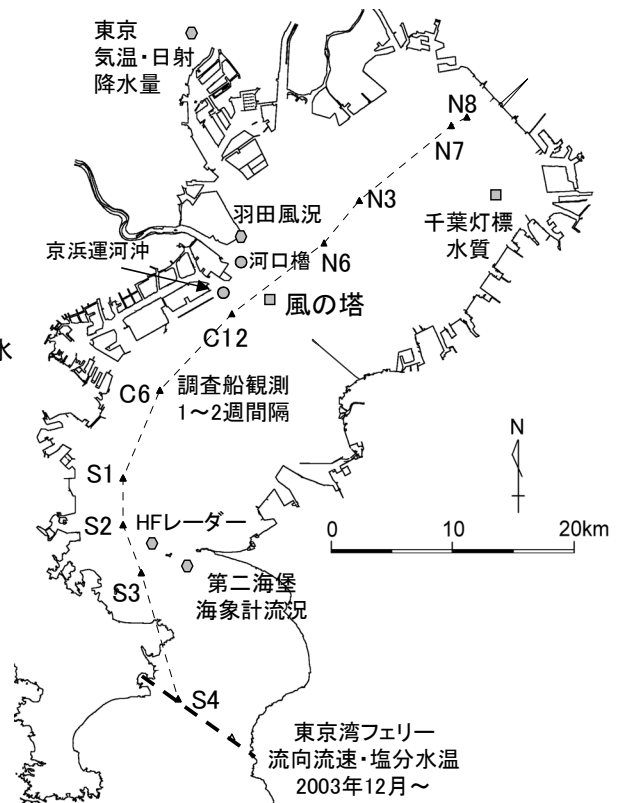


図-2.1 連続観測の実施場所

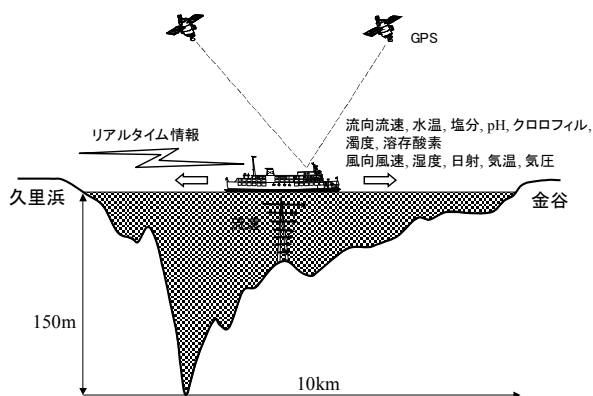


図-2.2 東京湾口の連続観測

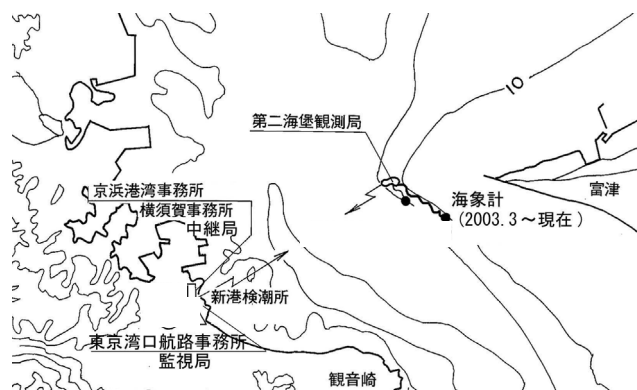


図-2.4 第二海堡周辺の海象計の設置位置

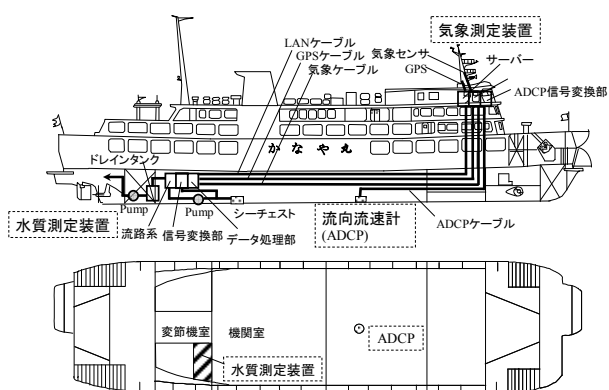


図-2.3 東京湾フェリー“かなや丸”と観測装置

在に至るまで連続的に観測している。波高計は2003年2月まで旧式の波高計で実施されていたが、2003年3月より波高のほか、3層の流向流速と波向きを測定できる海象計に替えられた。

海象計の設置水深は28.8mであり、計測機の高さを差し引くと、海象計の送受波器から海面までの距離は28.1mである。今回対象とする流向流速は上中下の三層で計測されており、上層が水深10m、中層が水深15m、下層が20mである。

海象計は200kHzと500kHzの2種類の超音波の送受波器、さらに水圧計からなっており、200kHzの送受波器は1ビームで水面位置を、500kHzの送受波器は3ビームで3層の流向流速を測定しており、波向きを算定できるようになっている(橋本ら, 1995)。サイドローブによる流速の測定不能域は、500kHzの送受波器ではビーム角が30度であるため、海象計付近の海底直上と表層の約13.4%が計測できない。設置水深が28.8mであるため、表層と下層の約3.9mが計測できない。なお、200kHz、500kHzの超音波測定装置と水圧計のサンプリングは0.5s間隔で実施されている。

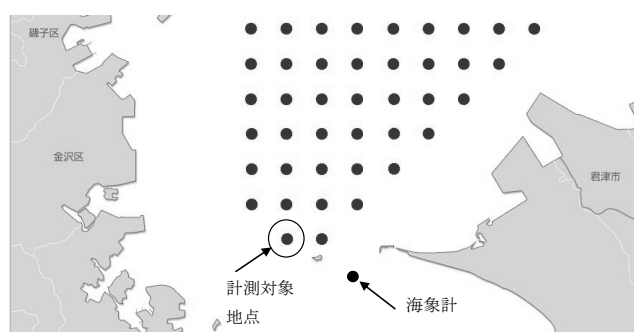


図-2.5 海象計とHFレーダーの解析対象地点

今回解析した海象計の観測データは、2003年4月1日から2008年12月までのデータである。途中2005年4～7月にかけて長期の欠測があるものの、それ以外はほぼ連続的にデータが蓄積されている。

なお、本解析では2006年3月までのデータとして、毎偶正時の20分間(正時前10分から正時後10分)に0.5秒間隔で観測された流速の20分平均データを用いた。一方、2006年4月以降は、1時間に3回、上記と同様な20分平均したデータを用いた。したがって、2006年4月以降のデータはそれ以前のデータに比べて6倍データ数が多い。

(3)HF レーダーによる表層の観測

海象計では表層の流速が得られないため、第二海堡周辺のHFレーダーの表層流速データと比較した。東京湾表層では、HFレーダーによる連続観測が実施されはじめている(Yanagi et al., 2003; 日向, 2005)。現在、国土交通省関東地方整備局が観測を実施しており、東京湾環境情報センターを通して、2006年からのデータを公開している。図-2.5のように多点のデータの時系列データが公開されており、本論文ではこのうち、黒丸で囲んだ北緯35度19分45.978秒、東経139度43分39.144秒の地点のデータを解析した。

(4) 東京湾中央の連続観測（風の塔）

東京湾中央では、東京湾横断道路の換気塔（風の塔）において、東京大学の磯部教授と鯉淵講師により、水温・塩分・クロロフィル *a*・溶存酸素・濁度の連続観測が2004年4月から連続的に実施されている（鯉淵ら、2005）。

風の塔は、北緯 35 度 29 分 29 秒，東経 139 度 50 分 04 秒に位置し、水深は 25m である。水質計は表層(0.5m)，中層(12.5m)，下層(24.5m)に設置されており、10 分間隔でデータが取得されている。

(5) 東京湾奥の千葉灯標での連続観測

東京湾奥では海上保安庁海洋情報部が千葉灯標（水深 11m）において2003年から水質と流況，気象の連続観測を実施している。千葉灯標は東京湾の北東部（北緯35度33分54秒，東経140度2分54秒，千葉港の南西約5km）に位置し、水深は10mである。観測システムは、自動昇降水質測定システム，流向流速プロファイラー測定システム，風向風速測定システムの3つの観測システムによりなっており、水温，塩分，溶存酸素，クロロフィル *a*，濁度，海潮流の流向・流速，海上風の風向・風速の7項目を連続観測されている。水質測定装置（深さ，水温，塩分，溶存酸素，クロロフィル *a*，濁度）は，1時間に1回，計測器を海面から海底まで1m間隔で自動的に昇降してデータを取得している。観測データは，“東京湾リアルタイム水質データ モニタリングポスト”のホームページで公開されている。

千葉灯標における水質の特性は，これまでに，山尾（2003, 2004, 2006），渡邊（2009）によってとりまとめられており，①沿岸湧昇を起こしやすい風は86度方向つまり，東から吹く風が最も強く影響していること，②2005年には2003，2004年よりも貧酸素水塊継続期間が長かったこと，③冬季にも外海由来の高温・高塩分水の流入による貧酸素水塊の発生が起こることが示されている。

(6) 気象データ

気象データとしては，気象庁によって計測された陸域の影響を受けにくい羽田の風向風速と，東京の気温等のデータを用いた。

(7) 河川流量

河川流量は国交省水文水質データベースで公開されている河川水位から推定した。荒川は大芦橋，江戸川は流山，多摩川は石原，鶴見川は亀の子橋の水位データから推定している。

2.2 小型調査船による観測

2.1 節の連続データは，時間的には密なもの空間的には粗いため，国土交通省横浜港湾空港技術調査事務所

では湾口から湾奥まで図-2.6 に示す小型調査船による広域調査を行っている。観測は2007年8月から始まり，2週間隔という高頻度で，多項目水質計（AAQアレック電子製）を用いて行われている。AAQによる観測項目は，電気伝導度・塩分・水温・濁度・クロロフィル *a*・溶存酸素である。このほか，透明度，海色，風向風速，日射も併せて計測されている。

図-2.7は観測地点であり，東京湾の南側と北側を2日に分けて計測している。また，図中の丸で囲まれた地点では，採水も同時に行い，後日，栄養塩も計測している。観測地点は，東京湾全体を網羅するように設定されているほか，千葉湾奥の湊渚窪地（N8とN10），三番瀬（N9），荒川河口（N1），京浜運河（C1,C2,C3,C4）といった，局所的に重要と考えられる地点も設定されている。また，湾口では東京湾フェリーの観測データとの比較を行うため，フェリー航路に3測点設けられている。



図-2.6 横浜港湾空港技術調査事務所（小型調査船）

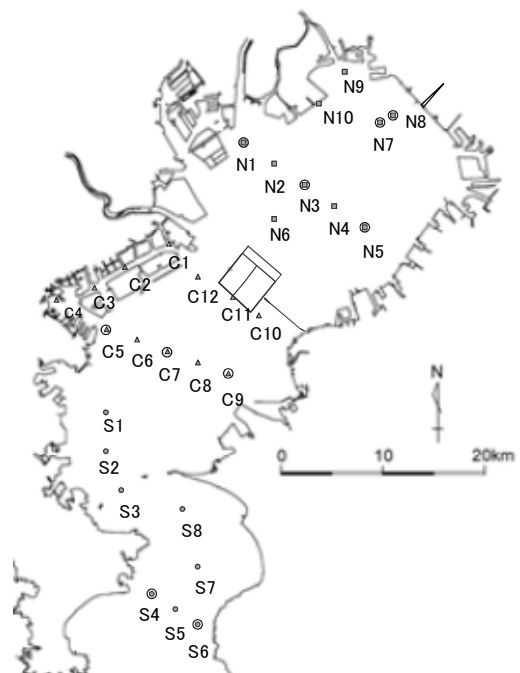


図-2.7 小型調査船による観測地点

3. 東京湾口における海水交換の季節変化

ここではまず、3.1節で東京湾フェリー“かなや丸”のADCP観測によって得られた流向流速データから、東京湾口における残差流の特徴を述べる。次に、3.2節において、残差流から東京湾口における各月の海水の流量と東京湾での淡水の滞留時間を求める。

3.1 東京湾口の残差流の特徴

(1) 年平均残差流

図-3.1は、フェリーの航路に垂直な残差流の年平均である。年毎に1年間の調和解析を実施して、観測値から潮汐成分を差し引いて残差流を求めた後、その年の残差流を平均したものである。求められた残差流には密度流、吹送流、潮汐残差流のほか、ノイズ成分が含まれている。

水深の最も深い久里浜から2.5kmの地点で深さ30mを中心とした場所での流入量が多く、それよりも千葉側(2.5～9km)では表層から深さ20mまでが流出となっている。

(ただし、サイドローブの影響で、表層～深さ10mの流速が計測できないため、表層～深さ10mまでは推定である。) さらに、久里浜から2.5km地点では、深さ70m以深で流出となる場合が多い。

このように、全体的に見ると、フェリー航路の残差流の流向流速は、上層流出、中層流入、下層流出である。富津一観音崎以北の水深30mより浅い部分と対応させるならば、上層流出、下層流入であり、東京湾のエスチュ

なアリー循環と対応しているものと考えられる。

なお、より岸に近い部分を見ると、久里浜から1.5kmまでは流出、金谷から1.5kmまでは流入となっている。

図-3.2は、図-3.1の残差流の断面プロファイルである。最も深い久里浜から2.5km地点では、水深30m付近で流入流速が7～8cm/sで最大値をとり、水深70mで流速が反転し、水深80m付近で流出流速が2～3cm/sで極小値をとる。一方、水深10～20mのプロファイルの傾きからすると、表層では流出となり、5～10cm/sの流出流速となっているのではないかと推定される。

2.5km地点以外の点では表層流速はさらに大きく、5kmや6.25km地点では、流出流速が15cm/sよりも大きいのではないかと推定される。このように、ADCPで計測される流向流速は、表層～深さ10mまでの流向流速が計測されていないため、全体を平均すると流入になるが、実際にはその流入量に匹敵する量の水塊が表層～深さ10mで流出しているものと考えられる。

(2) 月平均残差流

図-3.3(a)～(e)は、2004年～2008年の残差流の月平均断面図である。データ(航海数)の少ない月は、誤差が大きくなると考えられるため、図中にその月のデータ数(航海数)を示している。年によって変化はあるものの、降水量の大きい3～5月と9～11月にかけて、流入、流出の平均流速がともに大きくなり、コンター図のコントラストが大きい傾向にある。

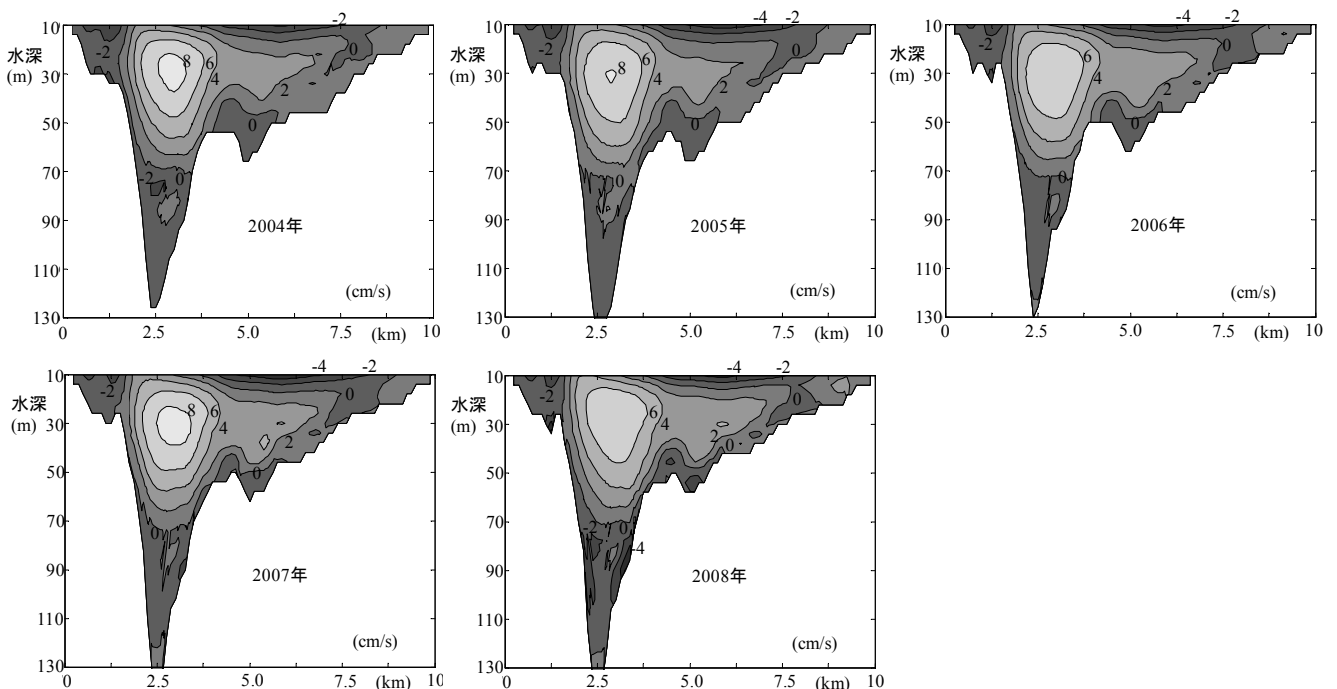


図-3.1 東京湾口の残差流の年平均断面分布図

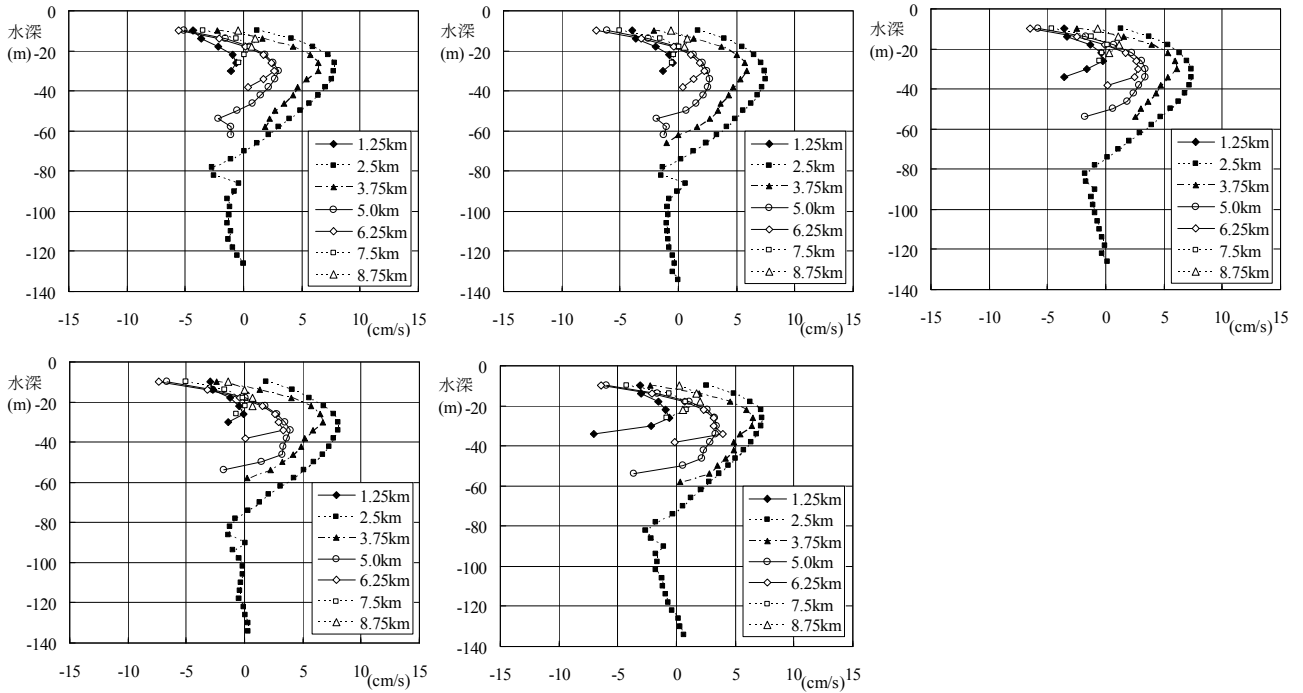


図-3.2 残差流の鉛直プロファイル 久里浜から1.25kmおきに出力

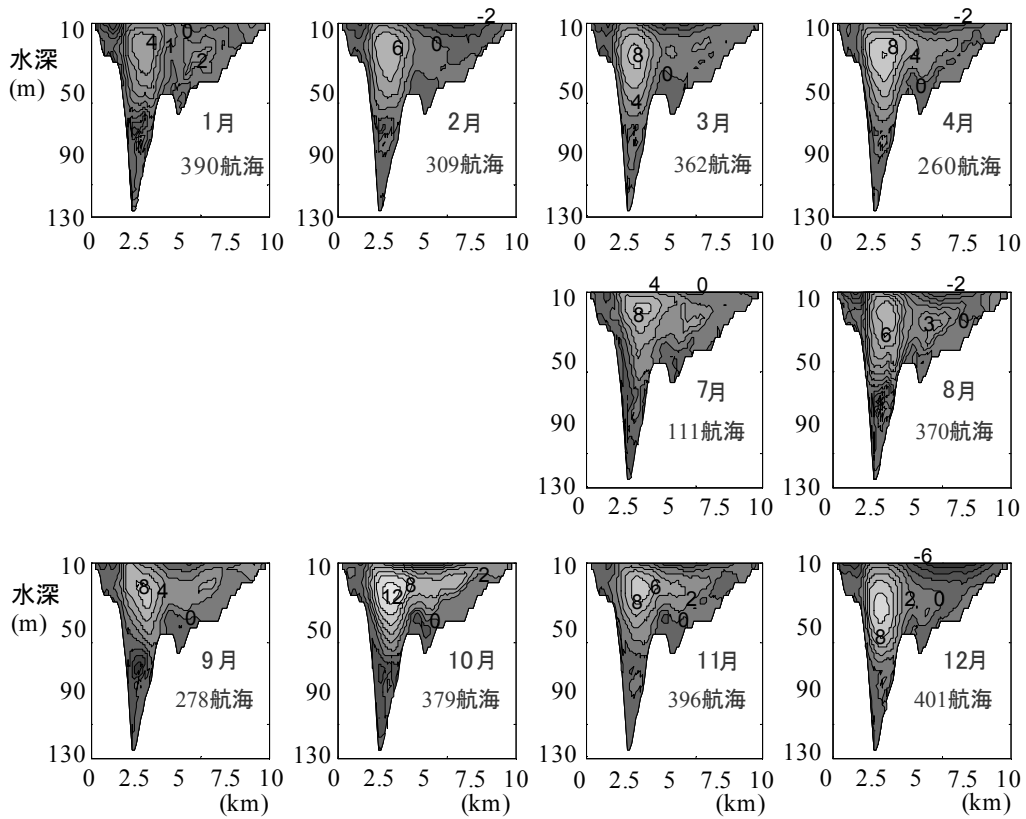


図-3.3(a) 残差流の月平均断面図 (2004年)

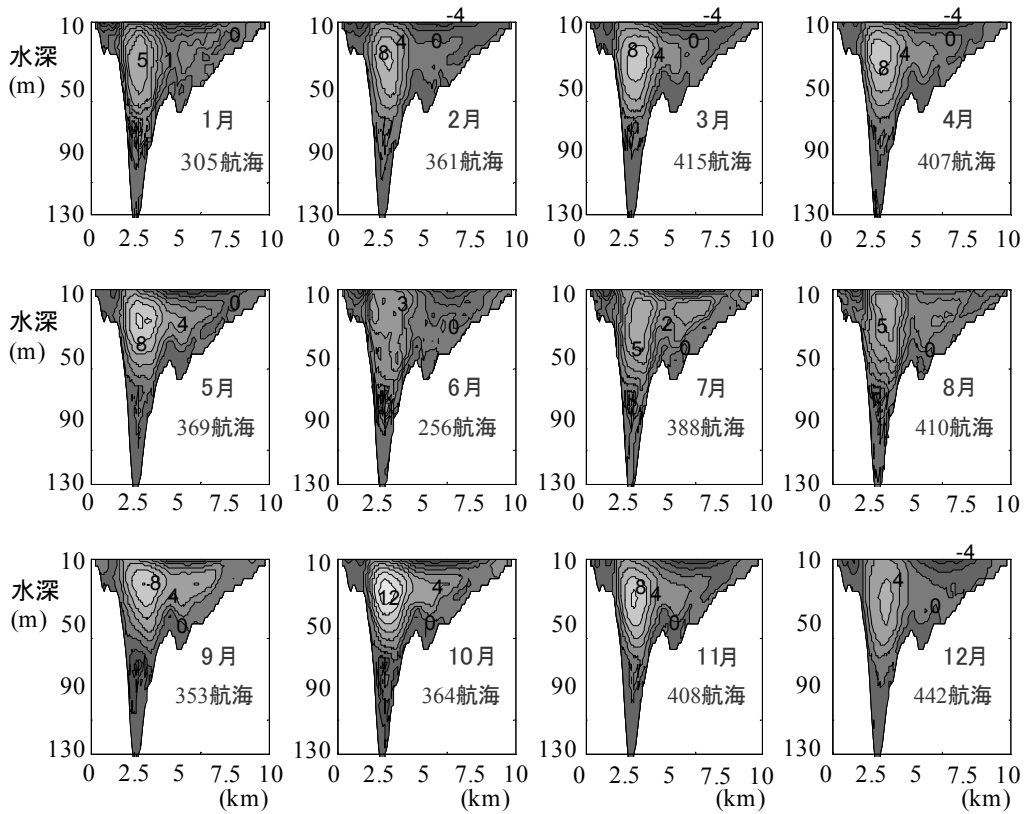


図-3.3(b) 残差流の月平均断面図 (2005年)

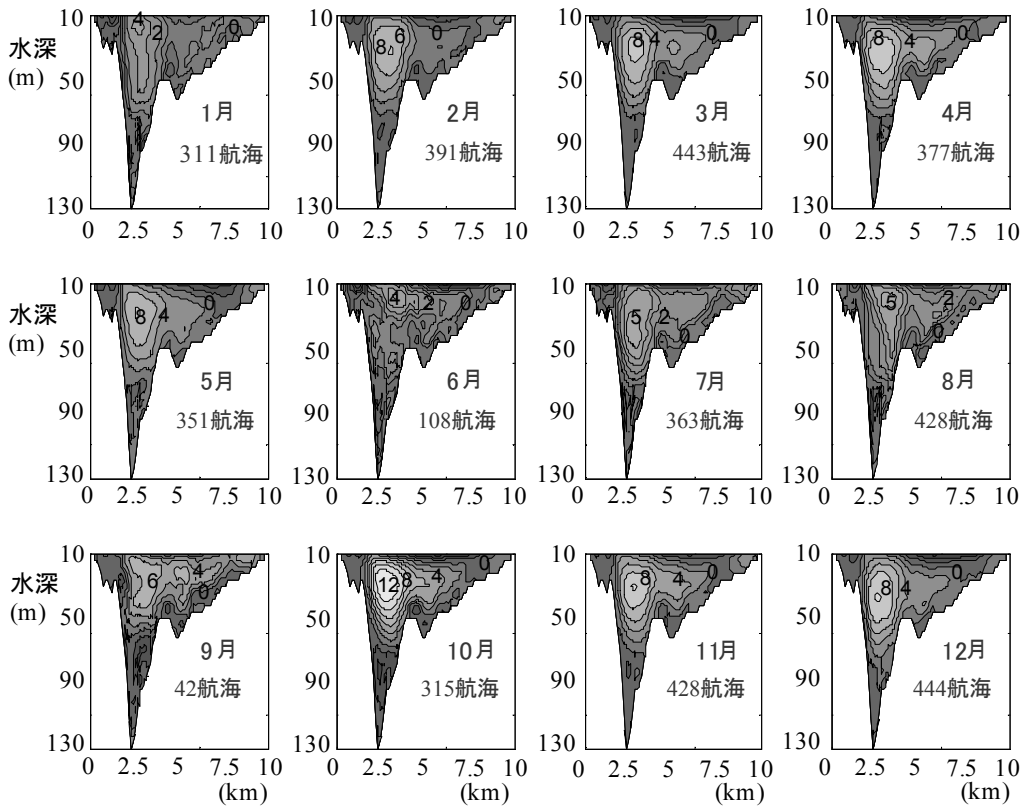


図-3.3(c) 残差流の月平均断面図 (2006年)

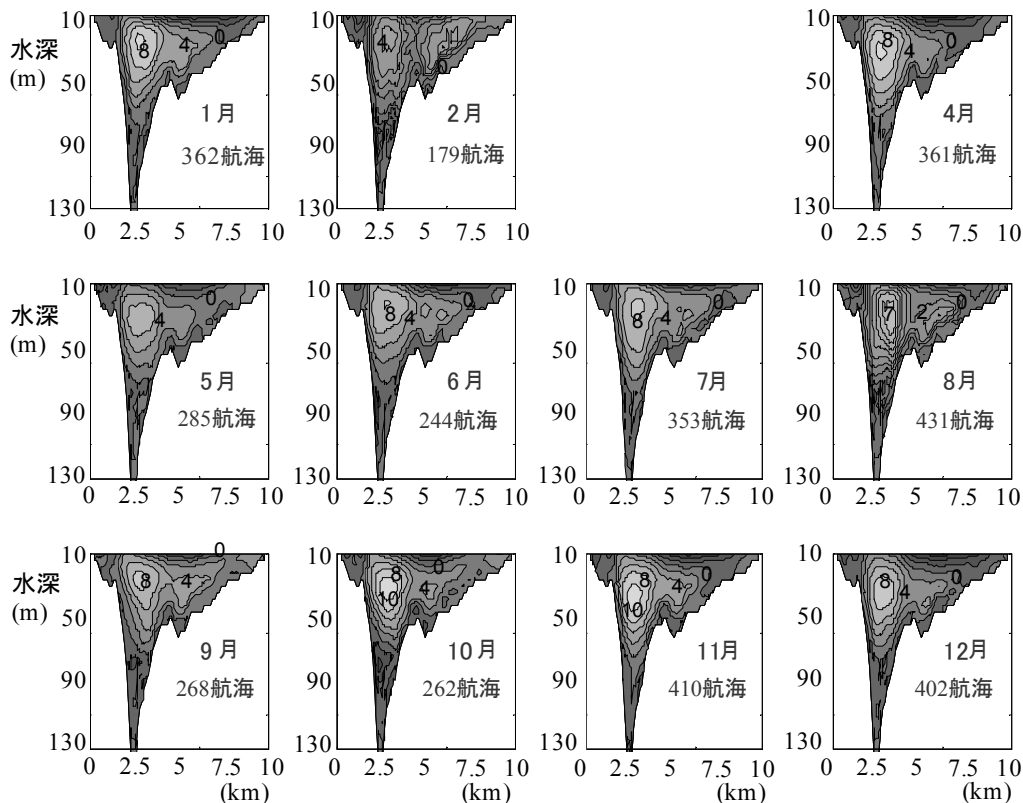


図-3.3(d) 残差流の月平均断面図 (2007年)

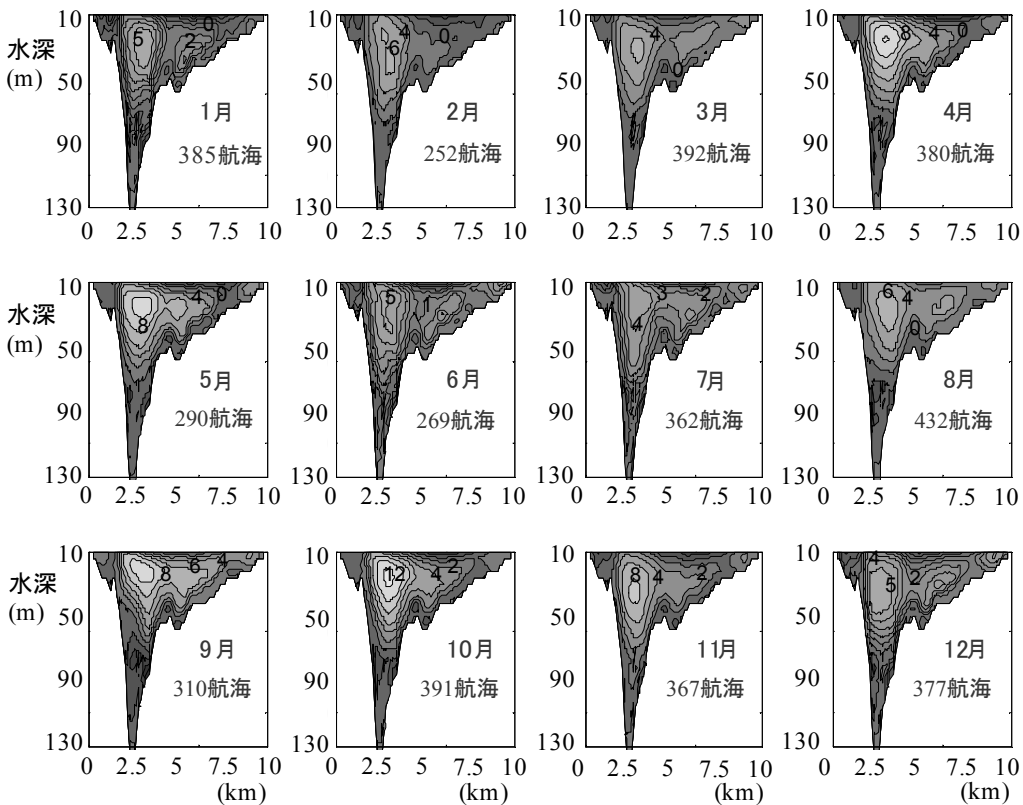


図-3.3(e) 残差流の月平均断面図 (2008年)

3.2 断面平均流速と海水交換量

図-3.4は、各年の残差流の東京湾への流入流速 $\overline{u_{in}}$ と流出流速 $\overline{u_{out}}$ の断面平均であり、5年間の平均値とともに示している。なお、 $\overline{u_{in}}$ 、 $\overline{u_{out}}$ は式(1)、(2)で表される。

$$\overline{u_{in}} = \int u_{in} dA_{in} / \int dA_{in} \quad (1)$$

$$\overline{u_{out}} = \int u_{out} dA_{out} / \int dA_{out} \quad (2)$$

ここで、 $\overline{u_{in}}$ 、 $\overline{u_{out}}$ はそれぞれ流入と流出の残差流の月平均流速であり、 A_{in} 、 A_{out} は流入、流出している位置の断面積である。

この図からすると、淡水流入の多い9～10月が最も平均流速および海水交換量が大きく、ついで4～6月が大きい。一方、1～3月と6～8月の平均流速が小さい。

全体に流出流速が流入流速よりも小さくなっているが、流入流出量は足し合わせるとゼロになるべきであることと、エスチュアリー循環の性質上、流出量が大きくなると考えられる表層～深さ10mまでのデータがADCPでは得られていないことから、流出流速も流入流速と同程度であるものと考えられる。また、海水交換量 Q （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）は、流入流速と流出流速を用いて、通常以下の式の第2項で表されるが、ここでは表層の流出流速が得られないことから流入流速のみを用いて次式の3項として考える。

$$Q = (\int u_{in} dA_{in} - \int u_{out} dA_{out}) / 2 = \int u_{in} dA_{in} \quad (3)$$

図-3.5は、式(3)の第3項で表される各月の海水交換量である。海水交換量は、10月が最大で5年平均で約11,500(m³/s)、1月が最小で約6,000(m³/s)である。

次に、図-3.6は東京湾フェリーより北側の東京湾内の水容量1.82*10¹⁰(m³)を図-3.5の海水交換量で除した滞留時間である。1月が40日と最も遅く、最も早い9～10月には約20日で交換していることになる。

高尾ら(2004)は2002年に計測された東京湾の塩分・水温等のデータを用いてBoxモデルによる東京湾の海水交換日数を図-3.7のように算出し、夏季に約20日、冬季に約40日と算出した。高尾ら(2004)の海水交換日数は、富津-観音崎より北側の東京湾に対して実施した解析であり、今回の久里浜-金谷より北に対する海水交換量とは厳密には異なるが、今回の東京湾フェリーの流行流速デー

タから求めた海水交換日数とほぼ一致している。

高尾ら(2004)は、近年の人口増加や工業化によって東京湾へ流れ込む淡水流入量が増え、エスチュアリー循環が強化されて海水交換日数が小さくなっている可能性を指摘している。表-3.1は各種解析結果の比較であり、1947～74年の塩分水温の観測データから求めた宇野木・岸野(1977)の結果と比較すると、今回のフェリー観測から得られた海水交換日数は著しく小さく、高尾ら(2004)の海水交換日数を5年間のデータにより支持している。

3.3 海水交換量と淡水流入量の比

図-3.8は、月平均の海水交換量 Q と淡水流入量 R である。エスチュアリー循環のため、淡水流入量 R が多ければ海水交換量 Q が大きくなるという傾向が見られるものの、ばらつきがかなり大きい。

図-3.9は、海水交換量と淡水流入量の関係の5年間平均であり、それぞれの月を表示した。これをみると、6～9月にかけての関係と3～5月、11～12月の関係と大きく違うことが分かる。

そこで図-3.10に各月の淡水流入量に対する海水交換量の比 Q/R を示した。ここでは Q/R 比は河川流量に対するエスチュアリー循環の効率であると考えて、以降、海水交換効率 Q/R とよぶことにする。6～9月の Q/R 比は20～25であるのに対し、3～5と11～12月の Q/R 比は40～45と大きく、1～2月は若干小さく約32～38であることが分かる。

宇野木(1998)はボックスモデルにより、海水交換量が冬季には淡水流入量の約13倍、夏季には約6倍になっていることを示した。宇野木の海水交換量は観音崎-富津での量であり、本研究の海水交換量は久里浜-金谷での量であるため、大きさは異なるものの、夏季に Q/R 比が小さく、冬に Q/R 比が大きい傾向は一致している。宇野木(1998)は、この原因として、密度成層の発達が生じたエスチュアリー循環を抑えるためとしている。

そこで、次章において、 Q/R 比に密度成層が関係しているのかどうかを、東京湾奥で連続的に水質を観測している千葉灯標のデータと比較することにより、調べることにした。

なお、最も水温の低い1～2月にかけて Q/R 比がいったん極小値をとることは今回初めて明らかになった現象であり、その原因については4章、5章で考察する。

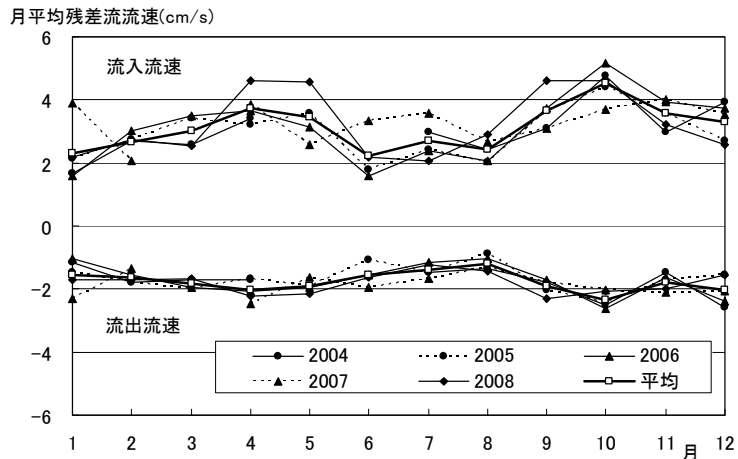


図-3.4 月平均の残差流断面平均流速 流入流速と流出流速

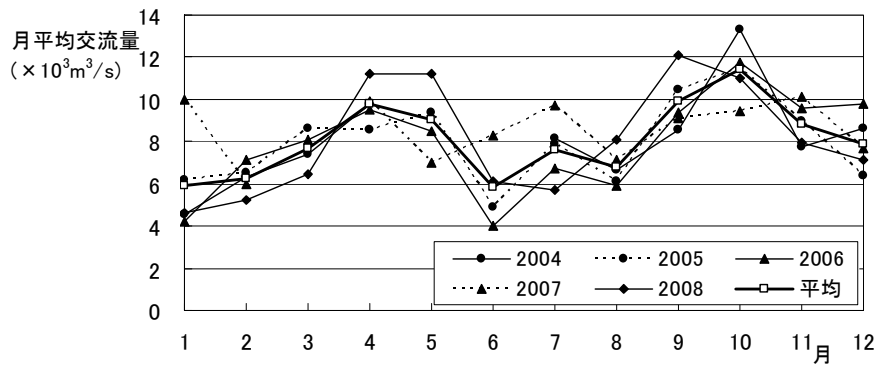


図-3.5 東京湾口における月平均交換量

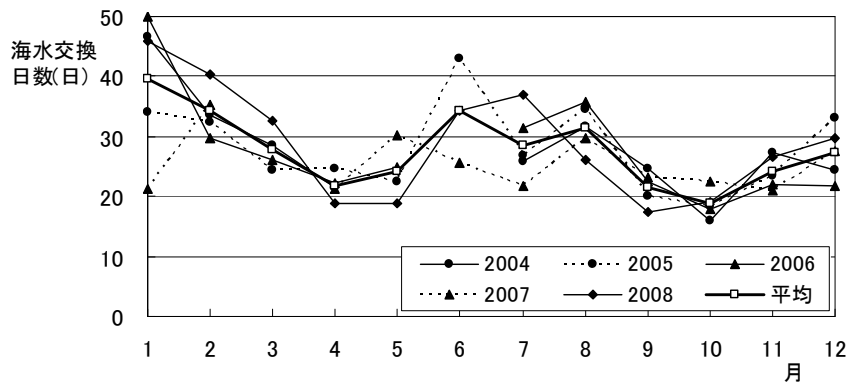


図-3.6 残差流から求めた東京湾の海水交換日数

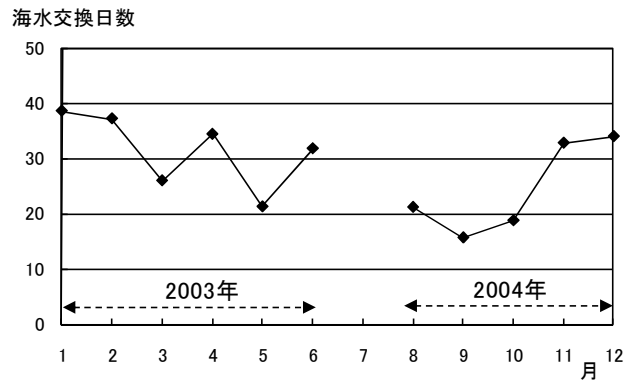


図-3.7 ボックスモデルによる2002年～2003年の海水交換日数 高尾ら(2004)のデータから図化

表-3.1 既往の研究による海水交換日数

	対象年	滞留時間		分割線
		夏期	冬期	
松本ら(1974)	1974		1.7~2.3ヶ月	現地観測 観音崎-第一海堡
宇野木ら(1977)	1947-1974	1.1ヶ月	2.65ヶ月	ボックスモデル 浮島-盤洲, 観音崎-富津
宇野木(1998)	1961-1970	1.0ヶ月	2.7ヶ月	ボックスモデル 観音崎-富津
松村ら(2002)	1998-1999			ボックスモデル 浮島-盤洲, 観音崎-富津
高尾ら(2004)	2002-2003	20日	40日	ボックスモデル 観音崎-富津

Q: 月平均の海水交換量(10³m³/s)

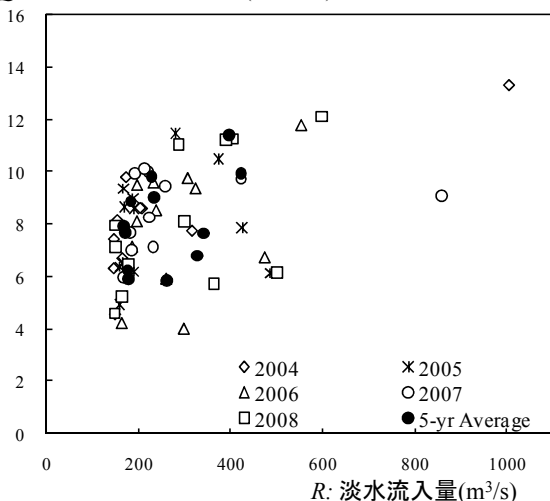


図-3.8 淡水流入量と月平均の海水交換量

Q: 月平均海水交換量の5年平均(10³m³/s)

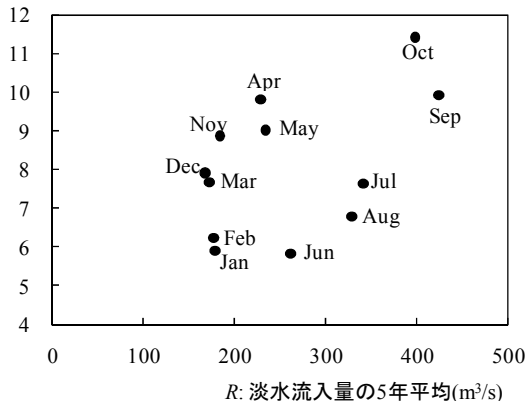


図-3.9 月平均淡水流入量と月平均海水交換量の5年平均

4. 湾奥の水質(千葉灯標)と湾口の海水交換の関係

ここでは、まず、4.1, 4.2節で千葉灯標において観測されたデータの特徴を述べたのち、4.3, 4.4節で各月の密度成層の発達度合いと溶存酸素量、さらに、湾口の海水交換量との比較を行うこととした。

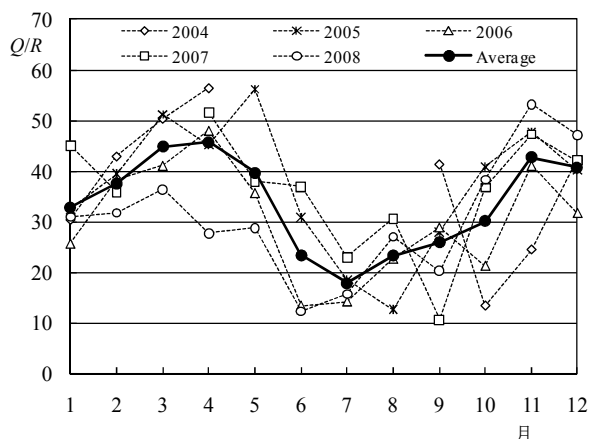


図-3.10 各月の海水交換効率Q/R

4.1 各季節の水質の特徴

図-4.1は、2003年12月~2009年8月までの千葉灯標の水溫、塩分、クロロフィルa、溶存酸素と密度σ_tであり、黒が表層(深度1m)、灰色が下層(深度10m)を示している。年変動が大きいものの、全般的な傾向として、4月頃から密度成層が発達し始め、夏期7月~8月にかけては表層と下層の水溫差は5~8℃ほどになる。その後、9月中旬から10月中旬にかけて、表層から下層にかけての水溫差がなくなる時期がある(図中①)。水溫差はほとんど見られない一方で、塩分、σ_tには表層と下層で差があり、下層の方が高い状態にある。

その後、11月下旬までは、下層の水溫が表層よりも高くなり、しばらく表層と下層で水溫差がみられる。(ただし、2006~2007年の冬期は1月まで水溫差がみられた。)また、10~12月初旬は全般にクロロフィルaが小さい。

冬季12月(図中②)になると、鉛直混合によって表層と下層の水溫差があまり見られなくなり、その後、2月までこのような状況が続く。σ_tは水溫が低いいため他の季節に比較して全般に高いが、下層塩分は鉛直混合で表層と同程度になるため、他の季節と比較して小さい。

一方、冬季には時々、高温・高塩の水塊が下層に流入することがある。ただし、このような水塊の密度は、その時期の下層密度と比較して大きな違いがない。一方、クロロフィルaを見てみると、1~2月に急激に大きくなること(図中③)、密度成層がないためか表層から下層まで大きな値を示している。また、夏期と比較して全般に継続時間が長いという特徴がある。

春季3月~5月にかけては高塩分水塊が下層に進入し、年間を通して最も密度の大きな水塊が進入する場面が見られる(図中④)。この時期から徐々に密度成層と貧酸素水塊が発達するようになる。

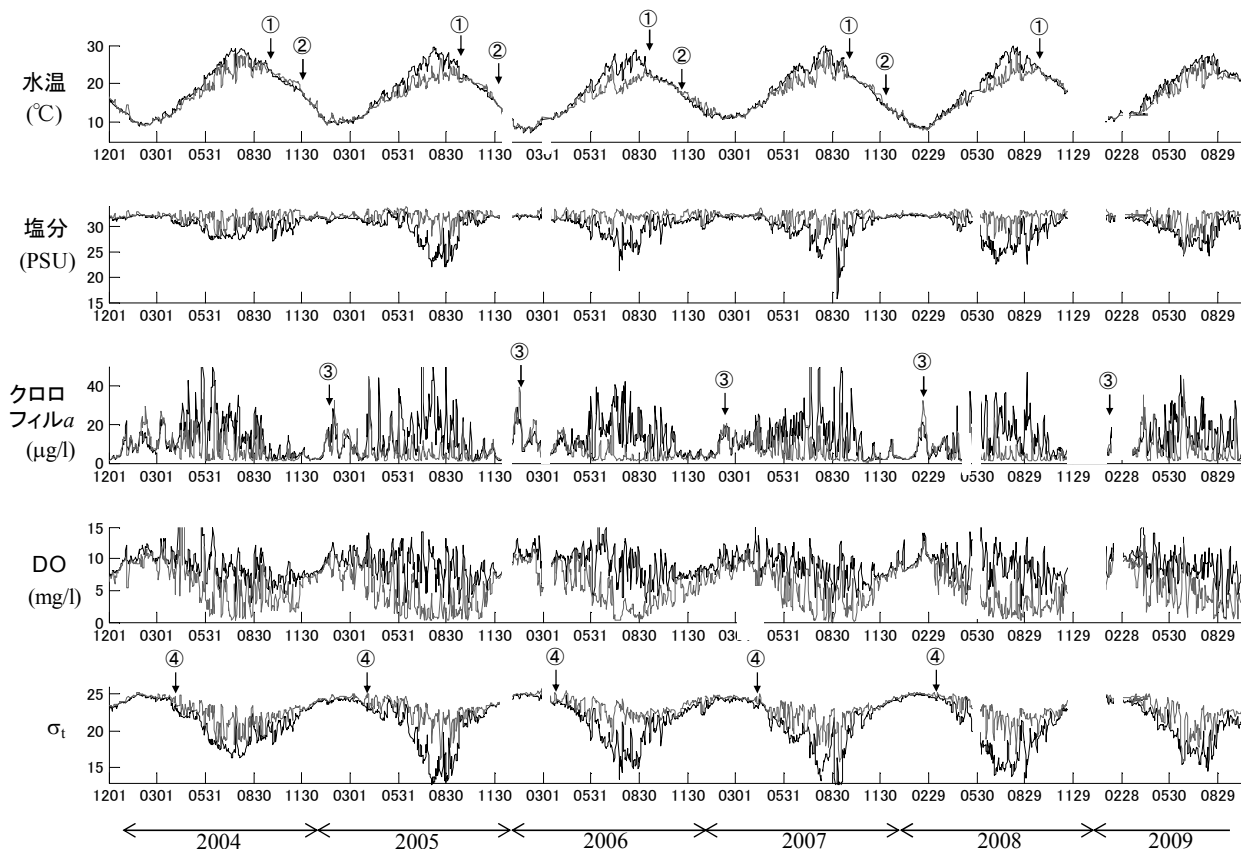


図-4.1 千葉灯標の水質の時系列 黒：深さ 1m 灰色：深さ 10m

4.2 水質の月平均データ

次に月平均した水質の性質を見てみる。水温は年変動が大きく、密度成層の発達にも年によって差が見られる。また、2006年、2008年の冬期水温が低いのに対し、2007年と2009年は水温が高く、その差は3~4℃である。

図-4.2(a)~(e)は、水温、塩分、クロロフィルa、溶存酸素、 σ_t の月平均データである。(a)が表層(深さ1m)、(b)が中層(深さ5m)、(c)が下層(深さ10m)、(d)が全層平均である。点は各年の値であり白抜きの点は5年平均である。

まず、水温について見ると、水温は2月に最小、8月に最大となり、表層と下層を比較すると(d図)、4月頃から水温差が見られはじめ、7~8月にその差が最大となる。10月にいったん、表層と下層の水温差が無くなった後、11月は約1℃ほど下層の方が高くなり、12月から4月にかけては表層と下層の水温差があまり見られない。年変動は、1月と2月、7月と8月に大きく、特に下層で年変動が大きい。下層の1月の水温は2006年と2007年で4.5度、8月の水温は2004年と2006年で5℃の違いが見られる。

次に、塩分について見ると、表層、中層、下層ともに8月が最小となっている。ただし、河川出水の影響を受けるため、表層は6~9月にかけて年変動が大きい。下層の

塩分は、他の層と比較すると若干異なっており、1月に極大を取った後、いったん3月に極小値をとって、次に5月に極大値をとり、その後8月まで徐々に低下する。10月には再び塩分が上昇して最大値をとる。下層の塩分は年変動が5月~6月が最も大きいという点も、表層、中層と異なる点である。10~11月に最も高塩分水が流入しやすいものと考えられるが、5年間の最大値を見ると5~6月の塩分が最も高い。

クロロフィルaは、密度成層の有無により、表層と下層で異なっており、表層は夏季7月に最大となり、冬季12月に最小となるが、下層は逆に冬季2月に最大となり、夏から秋にかけては小さな値となっている。2月のクロロフィルaは表層よりもむしろ下層の方が大きくなっており、このときの中層~下層のクロロフィルaは夏季表層のクロロフィルaの半分ほどもある。全層平均で見ると、2月の方が7月よりも大きくなってきている。また、2月のクロロフィルaの増大は、夏季と比較してその継続時間が長いという特徴も持っている。このような2月頃のクロロフィルaの増大(ブルーム)は、佐々木ら(2001)の2001年の京葉シーバースでの連続観測にも表れており、夏季における基礎生産に匹敵する量であると述べられている。

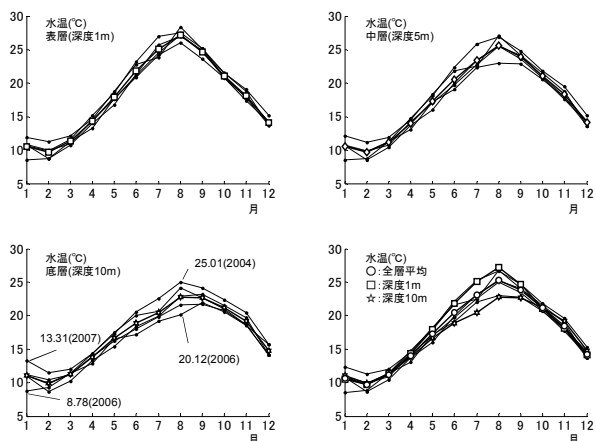


図-4.2(a) 千葉灯標の水温の月平均 白抜きは5年平均

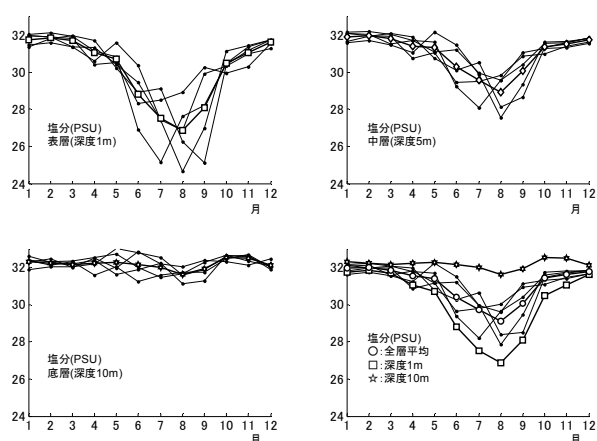


図-4.2(b) 千葉灯標の塩分の月平均

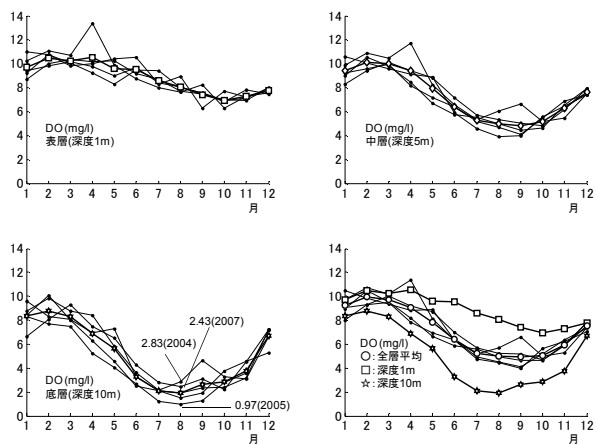


図-4.2(c) 千葉灯標のDOの月平均

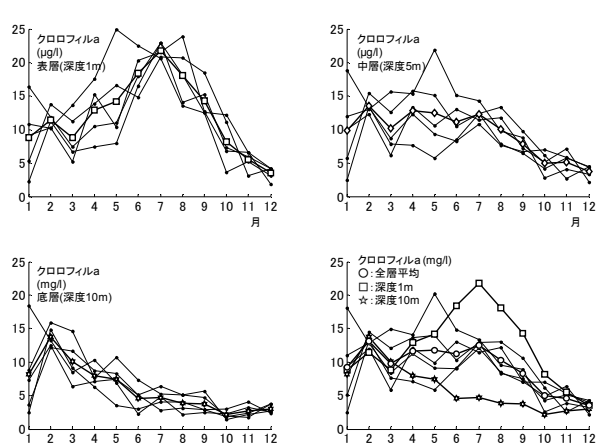


図-4.2(d) 千葉灯標のクロロフィルaの月平均

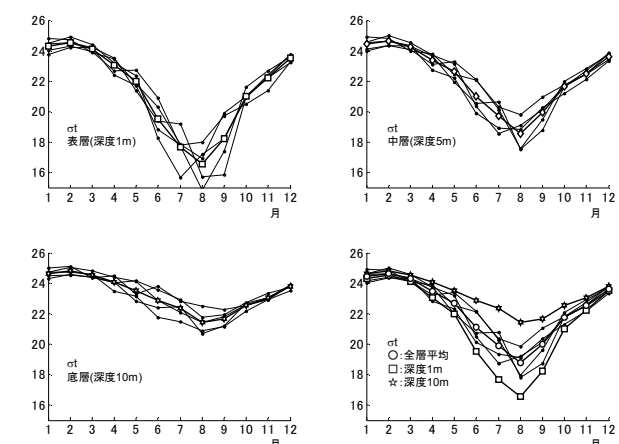


図-4.2(e) 千葉灯標の σ_t の月平均

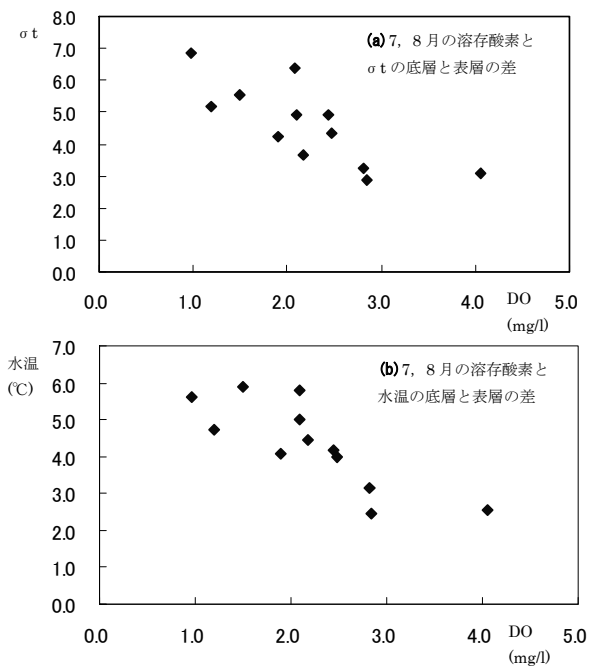


図-4.3 DOと下層と表層の σ_t , 水温の差 $\Delta\sigma_t, \Delta Temp$

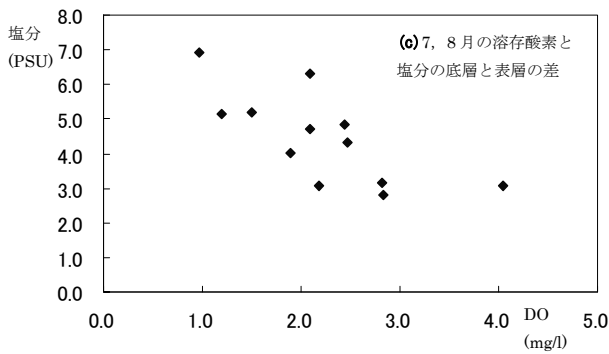


図-4.3(c) DOと下層と表層の塩分差 Δsal

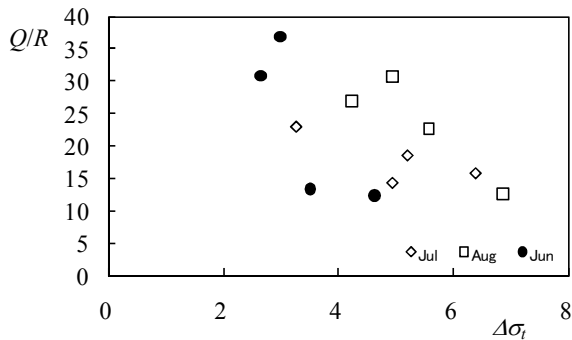


図-4.4(a) 表層と下層の密度差 $\Delta\sigma_t$ と海水交換効率 Q/R

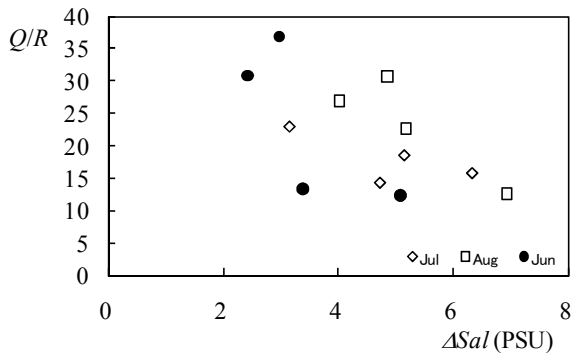


図-4.4(b) 表層と下層の塩分差 Δsal と海水交換効率 Q/R

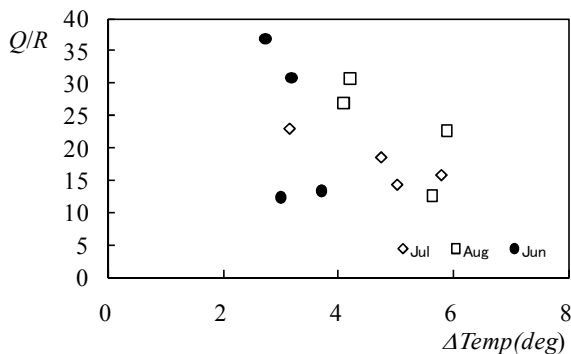


図-4.4(c) 水温差 $\Delta Temp$ と海水交換効率 Q/R

4.3 密度成層の発達と溶存酸素量

図-4.2(d)の下層の溶存酸素は、2月に最大で8月に最小となっている。年変動はいずれの月も約2~3mg/lである。2005年が特に溶存酸素が低く、8月は平均で0.97mg/lである。渡邊(2009)は、“2005年は、貧酸素水塊の初観測日が2月と最も早かったうえ、総観測時間に占める貧酸素水塊発生時間の割合が50%を超えていた。”と述べている。一方、溶存酸素が高かったのは、2004年と2007年であった。あらためて図-4.1, 4.2(a), (b)をみると、2004年と2007年は表層と下層の水温差、塩分差、 σ_t の差が小さく、一方で、2005年、2006年はそれらの差が大きくなっている。

図-4.3は、7月、8月の表層と下層の水温、塩分、 σ_t の差の月平均と、下層DOの月平均の比較図である。いずれの場合も、逆比例の関係にある。表層と下層の水温・塩分・ σ_t の差は密度成層の発達度合を示すことから、密度成層の発達が貧酸素水塊の発達に大きく影響していることが分かる。

4.4 密度成層の発達と東京湾口の海水交換

次に、3章で述べた海水交換量と密度成層の発達の関係について調べてみる。図-4.4は、淡水流入量に対する海水交換量の比 Q/R と密度成層の発達を示す表層(深度1m)と下層(深度10m)の密度差 $\Delta\sigma_t$ 、塩分差 Δsal 、水温差 Δt_p とを比較したものである。 Q は東京湾フェリーによる観測値、密度差 $\Delta\sigma_t$ と塩分差 Δsal 、水温差 Δt_p は千葉灯標での観測値であり、それぞれ6~8月のデータを比較している。この図から、密度成層の発達と海水交換量が逆相関の関係にあることが分かる。すなわち、密度成層が発達することにより、エスチュアリー循環による海水交換効率が低下しているものと考えられる。

4.3節で述べたように成層期(7~8月)の東京湾奥では密度成層の発達度合いと溶存酸素の減少が比例関係にある。海水交換量効率 Q/R の低下は湾奥下層の水塊を停滞させ、溶存酸素を減少させる一因となるものと考えられ、密度成層の発達は、図-4.5に模式的に示すように海水交換効率を下げることにより、間接的に溶存酸素の低下に寄与している可能性がある。

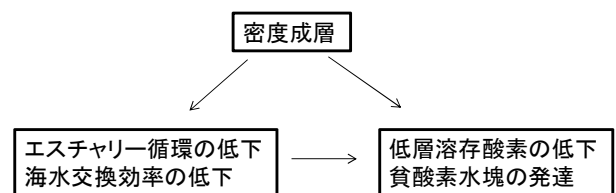


図-4.5 海水交換—密度成層—溶存酸素

5. 東京湾口と湾央・湾奥との関係

3章と4章では東京湾口と湾奥の年平均、月平均データから、東京湾口での海水交換量 Q 、海水交換効率 Q/R と東京湾奥での密度成層の関係を調べた。その結果、成層期の密度成層の発達に東京湾口での海水交換効率 Q/R を抑えている可能性があることが分かった。

しかし、密度成層の発達が海水交換効率を下げるという説明だけでは、3.3節で述べた密度成層が最も小さくなる1~2月に、海水交換効率 Q/R 比が11~12月、3~5月よりも小さくなる理由を説明できない。

そこでここでは、エスチュアリー循環だけでなく、東京湾上の風向風速や湾口からの黒潮系暖水の流入が海水交換量に及ぼす影響を調べることにする。

まず、5.1節と5.2節で東京湾フェリーと千葉灯標などの長期連続観測データを比較して、東京湾の水質変化の概略を述べる。次に、5.3節以降で各季節の特徴を調べる。

5.1 東京湾口（東京湾フェリー）と湾奥（千葉灯標）の水質の長期変化

図-5.1は、2003年12月~2008年4月までの塩分水温、千葉灯標の塩分水温、溶存酸素を比較したものであり、河川流量と羽田の南北風速もともに示している。フェリーと千葉灯標の塩分水温は同じ軸で示している。

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-5.1中①）、湾奥表層の水温が急激に下がり湾奥表層と下層、および湾口の表層水温和が全て同程度になる時期がある。塩分と密度も湾口と湾奥下層で、同程度となっており、表層流出・下層流入によって、湾内と湾口の水塊が活発に入れ替わっているものと推定される。しかし、この時点では湾奥下層の溶存酸素は回復しておらず、貧酸素水塊の解消には結びついていない。

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下層の密度が等しくなる11月末頃（図-5.1中②）である。

12~2月にかけては湾口表層の方が湾奥表層と下層よりも塩分、水温和、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-5.1中③のような水温和、塩分の急上昇を月に数回見ることが出来る。このような水温和、塩分の急上昇は、湾奥下層でも発生している。

気温と風向の変化が激しい3~5月にかけては（図-5.1中④）、湾奥下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、この期間に湾奥下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-5.1中⑤矢印）を過ぎると、密度成層が発達し始め、湾奥の溶存酸素が徐々に低下する。

また、密度成層の発達とともに湾奥下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。

5.2 東京湾口と湾央、湾奥の水温和の長期変化

ここでは、図-5.1を拡大して、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-5.2）。

湾奥では4月初旬になると成層化し始め、表層（深さ1m）と下層（深さ11m）の水温和が異なってくる（図-5.2①）。一方、湾央の中層（深さ12.5m）と下層（深さ24.5m）の水温和は4月下旬まで表層（深さ0.5m）より高くなっている（図-5.2②）。

夏になって密度成層が発達すると、湾奥の水温和は湾央と比較して風向きによって変化しやすく、南風で水温和が上昇し、北東の風で水温和が低下している（図-5.2③）。

9月下旬から季節風が北風になると、5.1節で述べたように表層の水温和は急激に低下し、湾奥、湾央、湾口の水温和が、深さに関係なく全て同じ値になる（図-5.2④）。湾奥・湾央の表層水温和はさらに低下して、10月中旬から湾央の中層下層、湾奥の下層よりも低くなる（図-5.2⑤）。

一方、湾奥の下層、湾央の中層下層の水温和は11月初旬まで暖かく、湾口の表層水温和と同じ値をとっている（図-5.2⑥）。さらに、湾央の下層水温和は、12月下旬まで湾口の水温和と同じで高い状態のままである（図-5.2⑦）。

以上のように東京湾口、湾央、湾奥の長期連続的な水温和データから、9月下旬から11月初旬までは、湾奥の下層と湾央の中層・下層に外洋水が流入し、さらに11月以降も湾央の下層に流入しているのではないかと推定される。

5.3 冬季の外洋水の流入

(1) 小型調査船データとの比較

5.1、5.2節で見られたように、秋から冬にかけては、外洋水が湾口をとおして湾央・湾奥へ流入している可能性が高いことが分かった。

しかし、湾口のフェリー、湾央の風の塔、湾奥の千葉灯標は、空間的に大きく離れており、外洋水がどのように流入しているのかが不明である。たとえば、図-1.3や図-5.2では、東京湾口での塩分・水温和の上昇と同時に湾央・湾奥で塩分・水温和が上昇する場合とそうでない場合があり、どのように外洋水が東京湾央・湾奥へ影響しているのかが分からない。

また、東京湾フェリーの観測では、表層の水質（水温和・

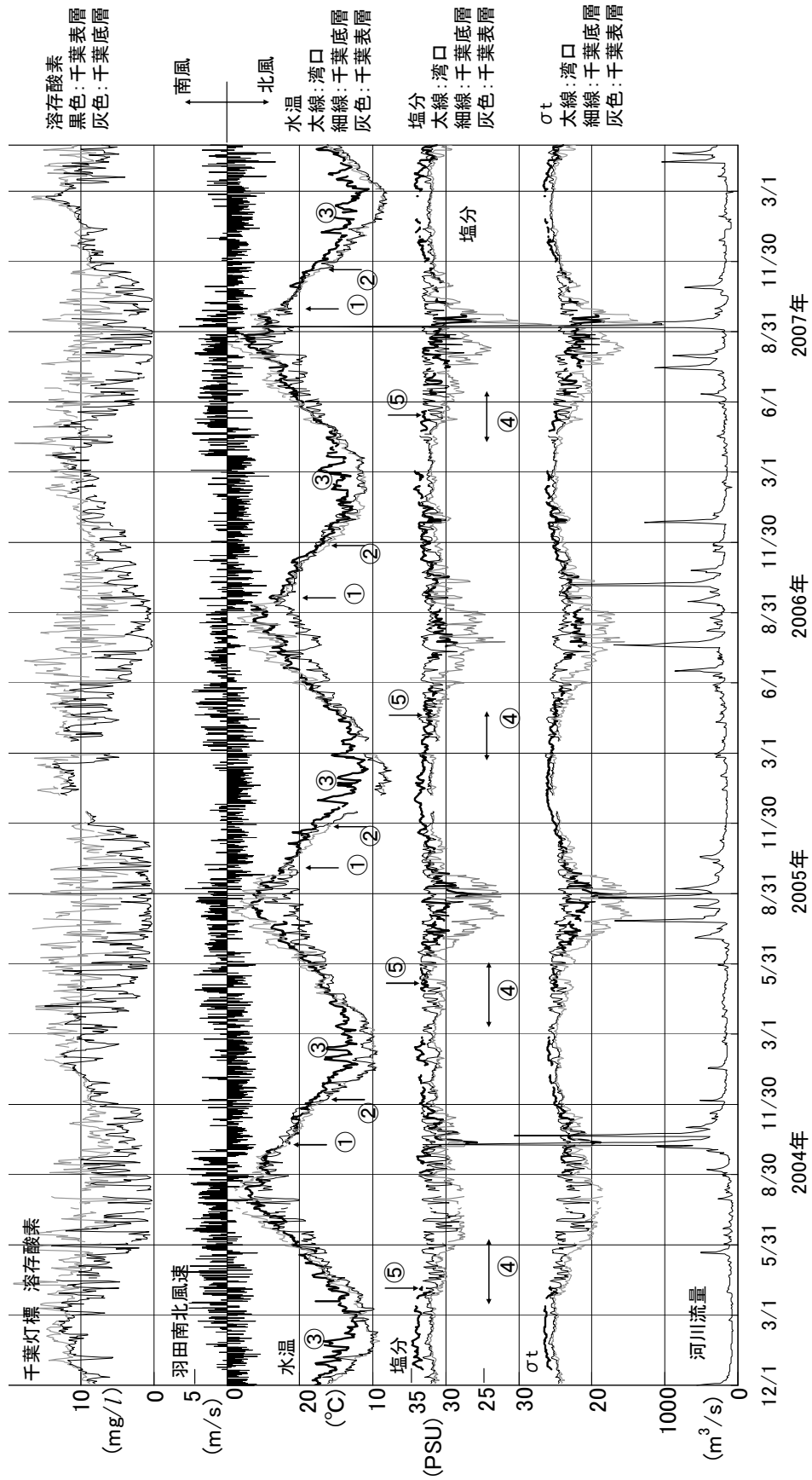


図-5.1 2003年12月～2008年4月までの各種連続データの比較

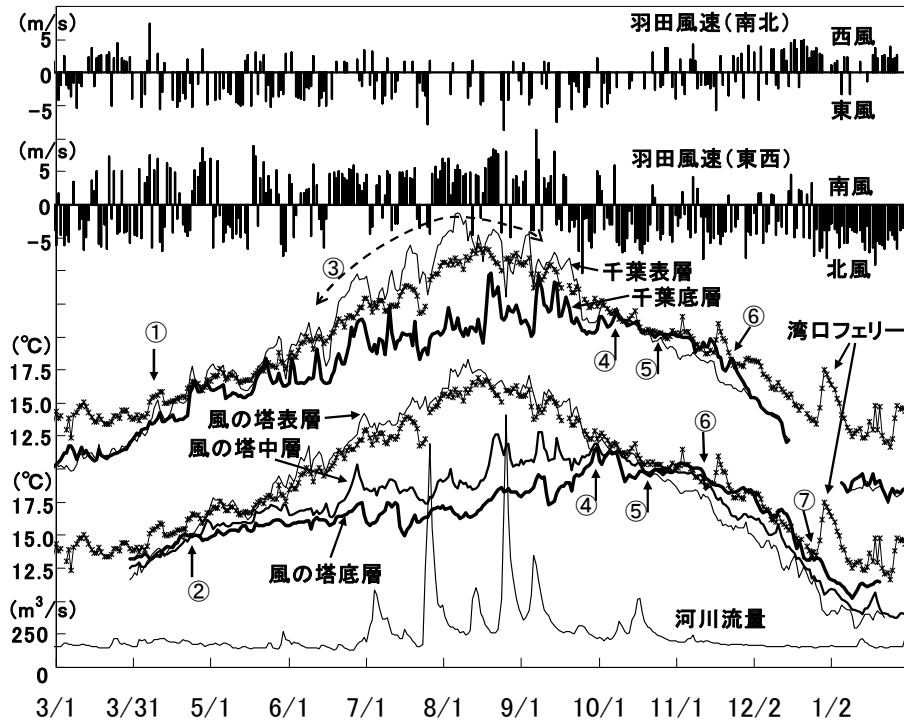


図-5.2 2005年の湾口と湾央、湾奥との関係

塩分)が計測できるものの、深さ方向の水温・塩分の観測データが得られていないため、湾口のどの深さの水塊が湾央・湾奥の水塊と関係しているのかが分からない。特に、塩分と密度が大きい外洋水は、中層・下層から東京湾内へ流入するため、湾口の深さ方向のデータが重要となる。

そこでここでは、2007年夏季から観測されている小型調査船による広域データと比較することにより、各季節の外洋水の湾央・湾奥への流入状況を調べることにした。

(2) 2007年から2008年にかけての冬季の外洋水の流入前掲図-5.1に戻ってみると、図-5.1③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、ここでは、このような湾奥での水温の急上昇が、直接、湾口から外洋水が流入しているのかを調べる。

図-5.3は湾口フェリー、観測船データ、千葉灯標のデータを並べたものである。図-5.3①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-5.3②)になって湾口から下層の水温上昇が、湾央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-5.4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、湾口の下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、下層から高温高塩分の水塊が下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。

以上のことから、冬季、湾口からの外洋水は、水深の深い湾央には直接流入するものの、水深の浅い湾奥には流入しにくく、前掲図-5.1③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。

(3) 風向が外洋水の流入と海水交換効率へ及ぼす影響
湾口の外洋水が湾奥下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、この原因は主に風向きの影響と考えられる。

図-5.3で風速と下層水温を比較すると、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も、このような北東～東の風が吹いていた。山尾(2004)は、千葉灯標における湧昇現象が、56°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、このような風による湧昇現象が千葉灯標の水温塩分上昇に結びついたものと推察される。

図-5.5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

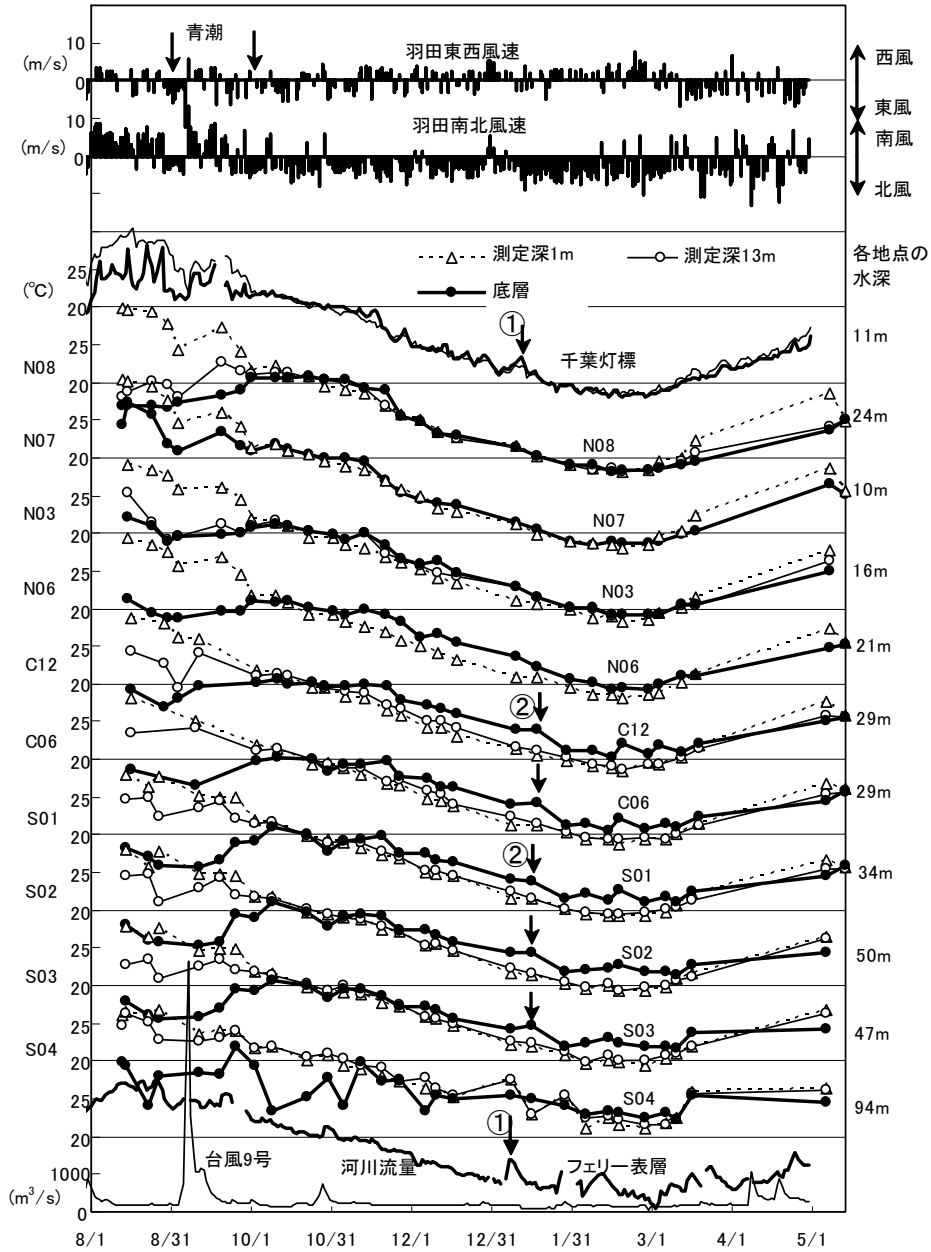


図-5.3 2007年～2008年にかけての水温の変化

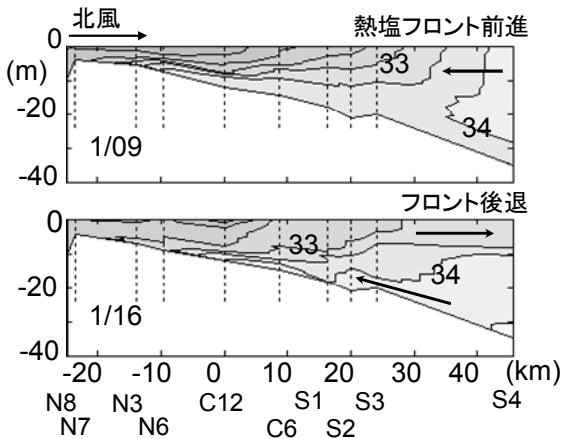


図-5.4 冬季外洋水の流入状況

グラムである。千葉灯標で見られた高温高塩分水塊は、湾央N06の測定深13m、湾央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。

そこで、ここでは各月の風向きについて調べてみる。図-5.6は羽田の各月の風配図である。夏は南よりの風が多く8月は約50%が南よりの風である、一方、秋から冬は北よりの風が多く、10月～2月は約80%を占める。

ただし、秋から冬の風配図をよく見ると、9～11月は北東の風が卓越するのに対し、12～2月は北西の風が卓越している。山尾(2004)が示したように、千葉の湾奥では北よりも北東の風の方が青潮などに結び付きやすいことから、9～11月と12～2月の風向きの違いは東京湾奥への

外洋水塊の流入の有無に影響するものと考えられる。

東京湾の長軸は北東-南西の軸にそっていることから、このように秋から冬にかけて北東風から北西風に風向きが変わることで海水交換効率 Q/R が小さくなる可能性がある。このような風向きの変化が、前掲図-3.10で1~2

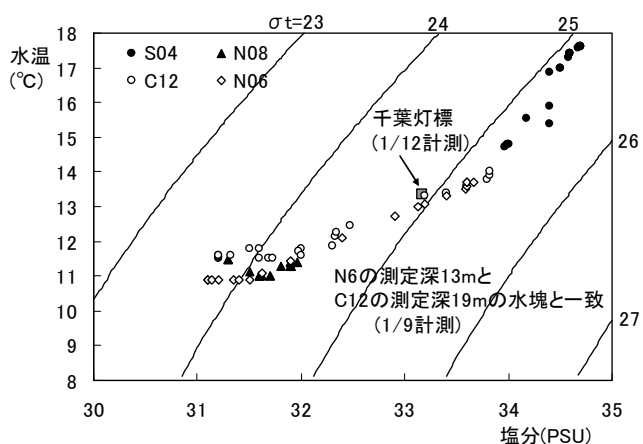


図-5.5 外洋水流入時の千葉灯標下層と流入前の湾央N6,C12のTSダイアグラム

5.4 秋季の外洋水の流入（中層流入）

月の海水交換効率 Q/R が低かった原因とも考えられる。

(1) 中層流入と流入深度の変化

図-5.7は、湾口から湾奥までの各水質の時系列コンター図である。まず、湾口S4の図-5.7(a)を見てみる。

秋季の2008年10月27日の水温は深さ10~30mの範囲で高くなっている。図-5.8はこのときの東京湾の断面コンター図である。湾口では中層の水温が高くなっており、水温20度の水塊が湾奥まで伸びている。

いわゆる中層貫入となっているものと推定される（日向ら, 2001）。この中層流入は図-5.8(e)のように12月中旬まで頻繁に見られ、図-5.7(a), (b)の破線で示されるように流入深さは徐々に深くなり、流入水塊の塩分密度が高くなっていく。

2008年10月23日の湾央・湾奥のデータをみると、湾口S4の中層（水深30~50m）は、東京湾内では下層に相当するため、水深45mの横須賀沖S3では中層流入であるが、水深16mのN3地点では下層流入である。また、11月中旬になると流入深度が深くなるためN3だけでなくS3でも下層流入となっている。

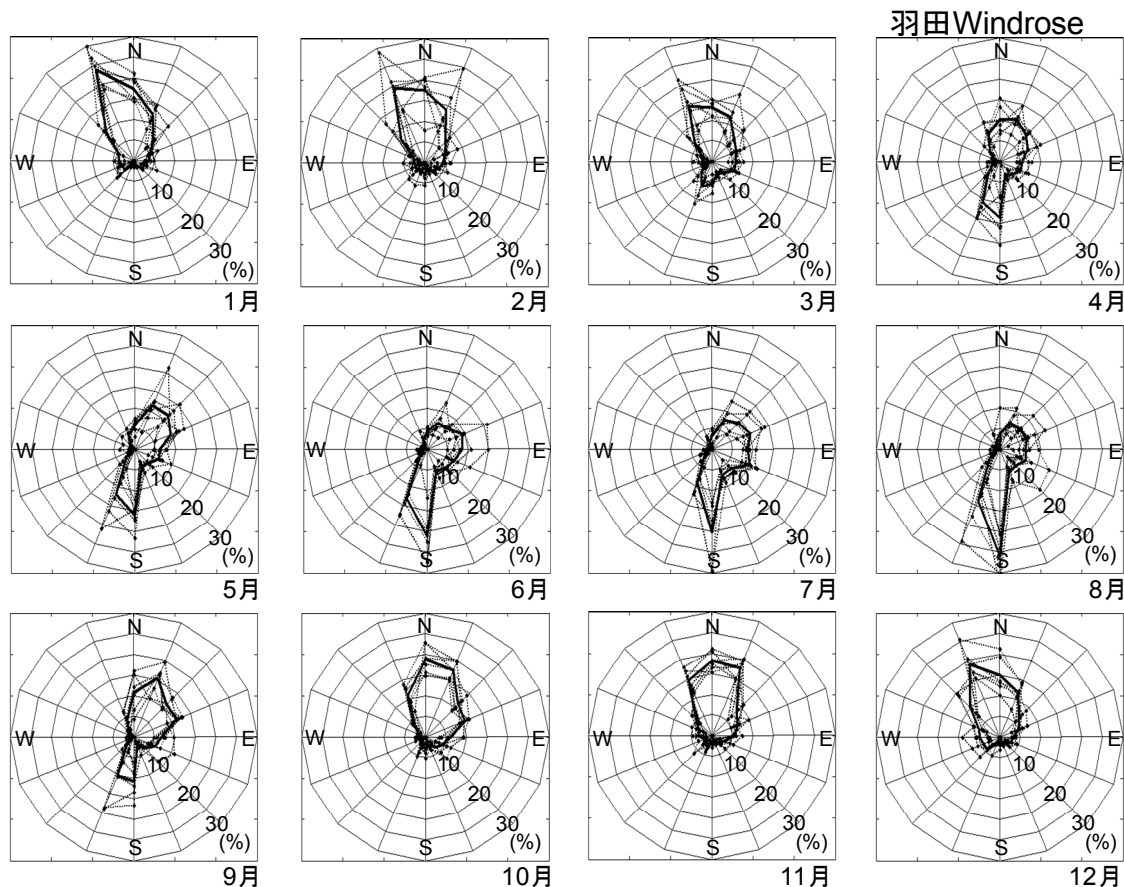


図-5.6 羽田の風配図 細線は2000~2005年の風配図、太線は2000~2005年の平均風配図

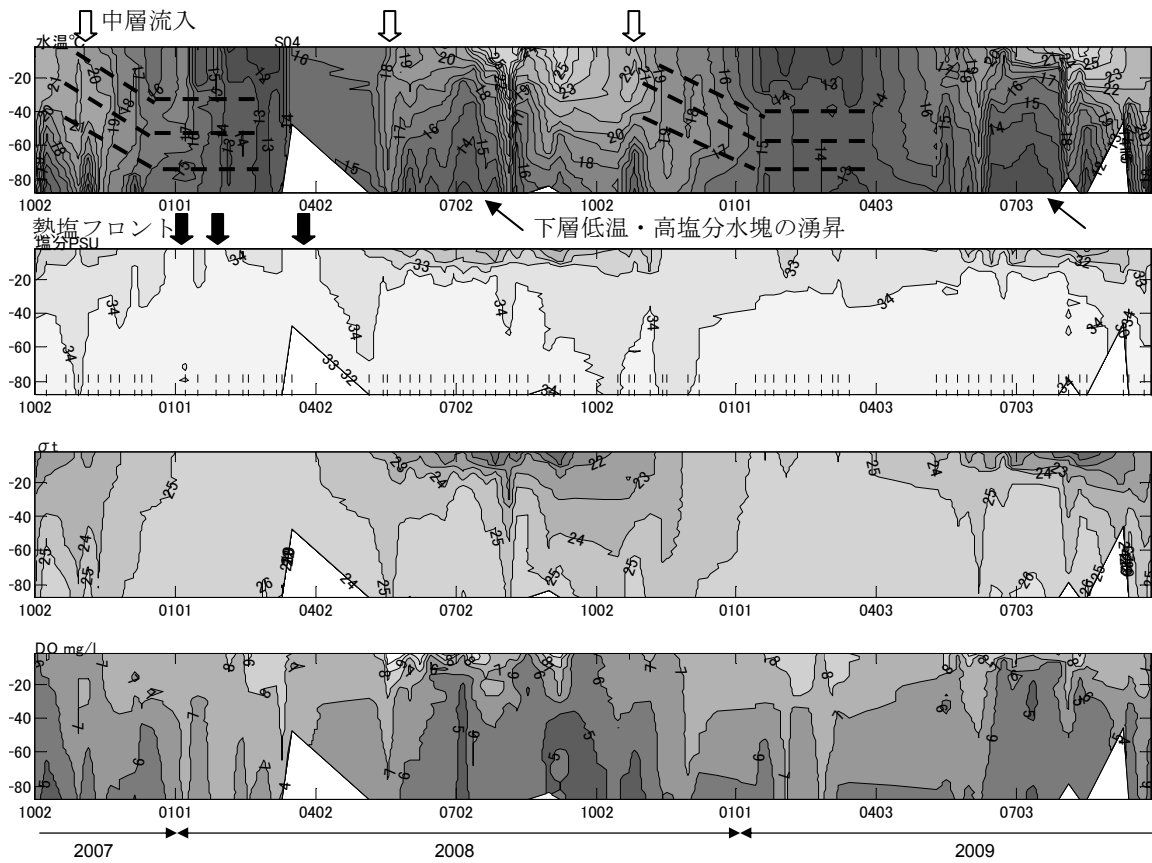


図-5.7(a) 久里浜沖 S04 の時系列コンター図

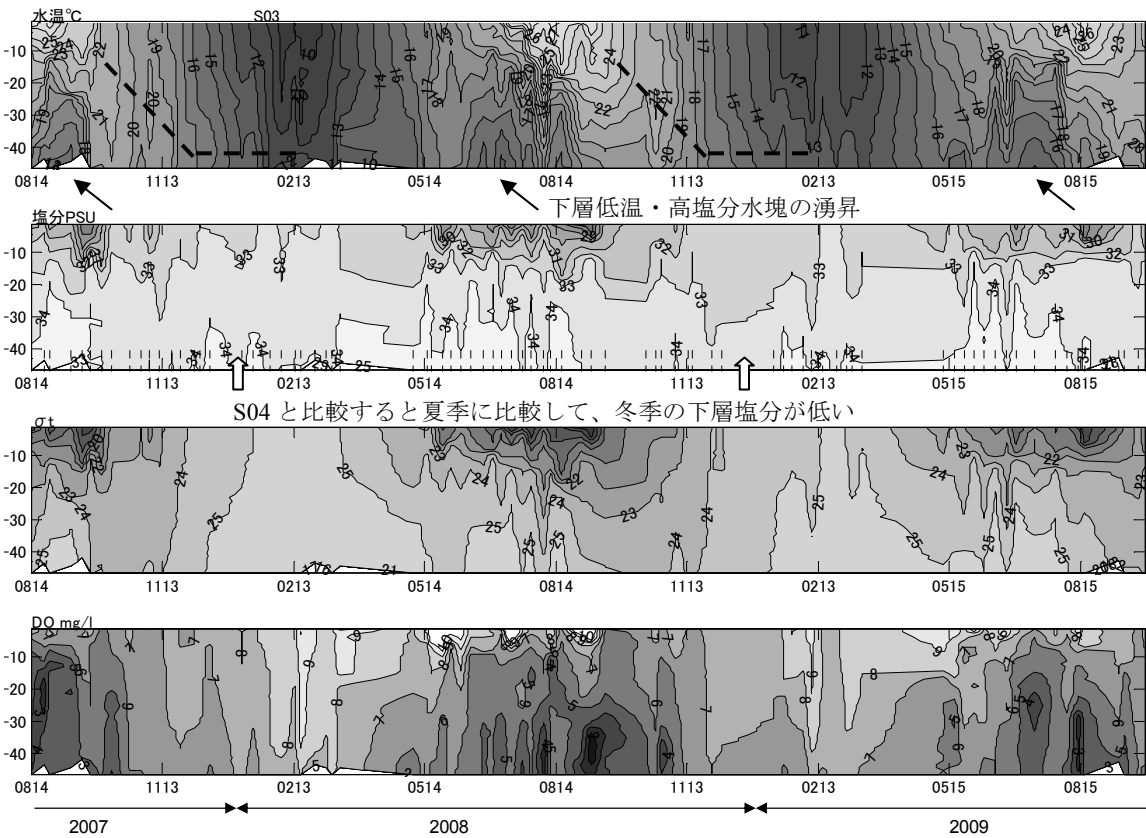


図-5.7(b) 横須賀沖 S03 の時系列コンター図

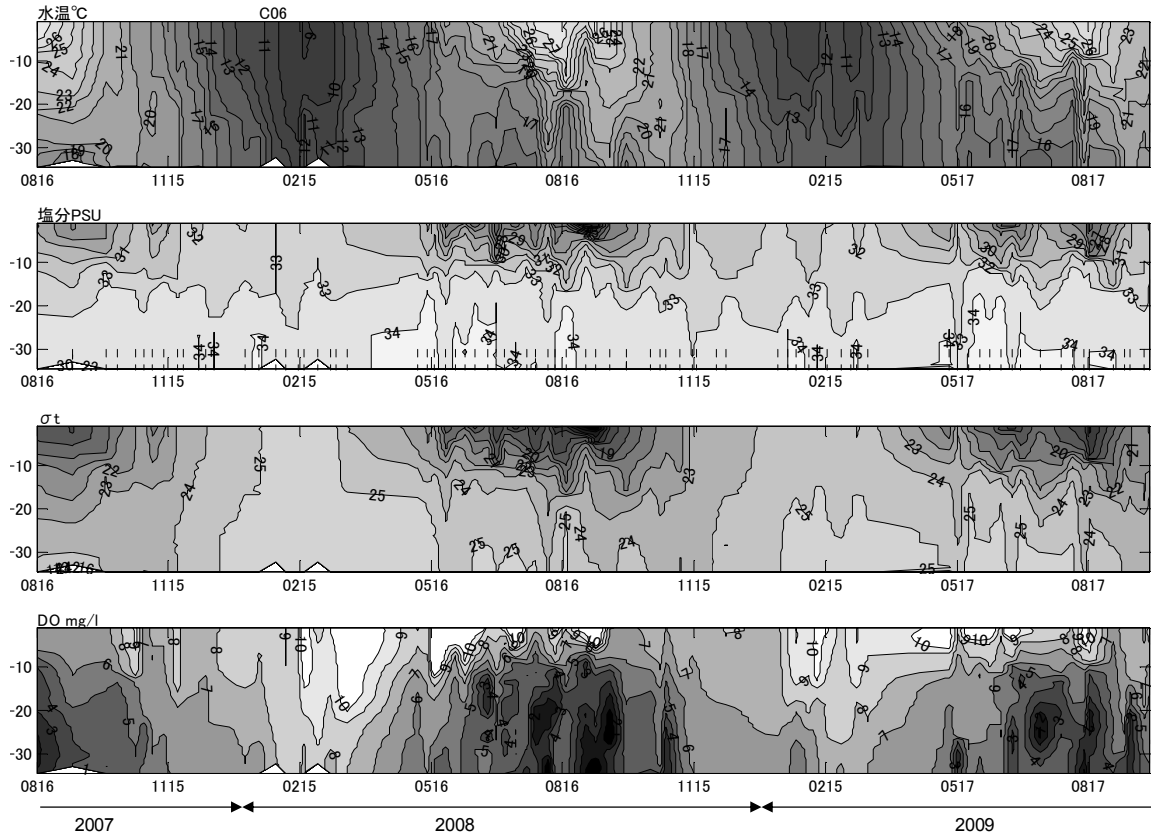


図-5.7(c) 横浜沖 C06 の時系列コンター図

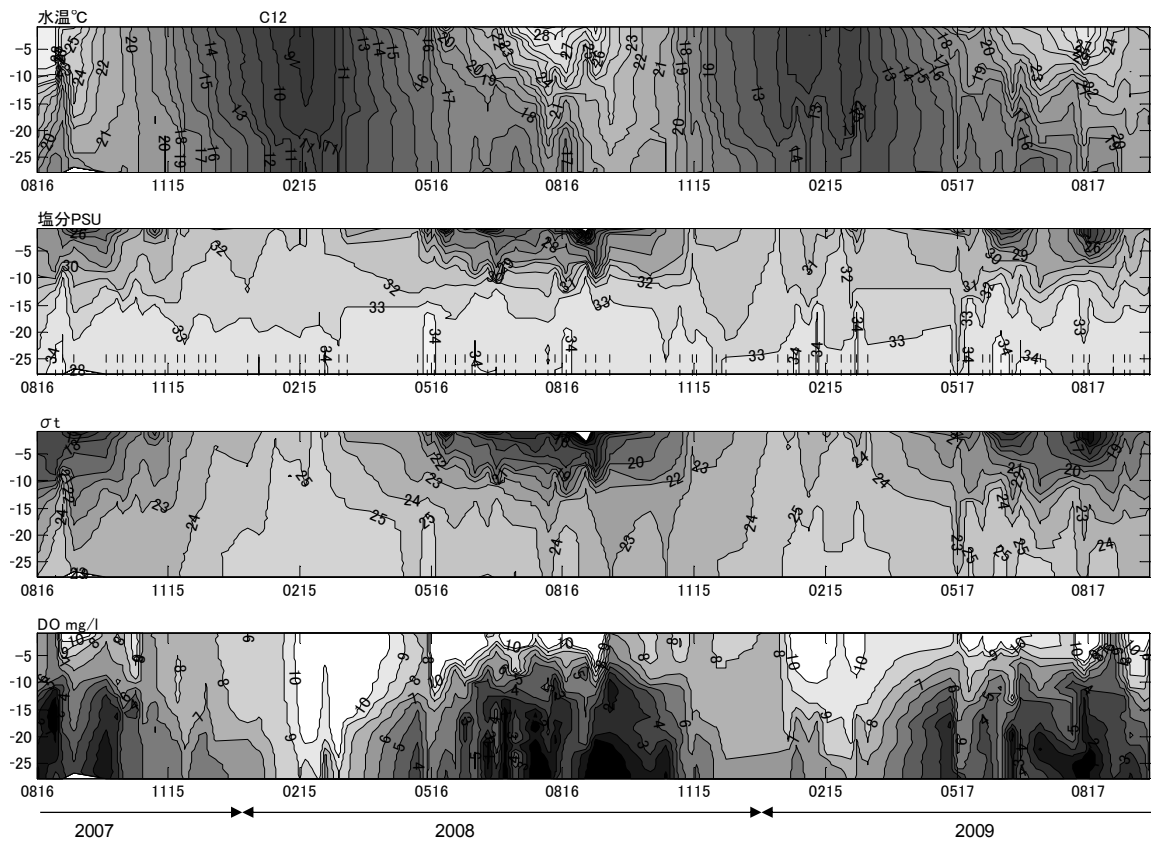


図-5.7(d) 川崎沖 C12 の時系列コンター図

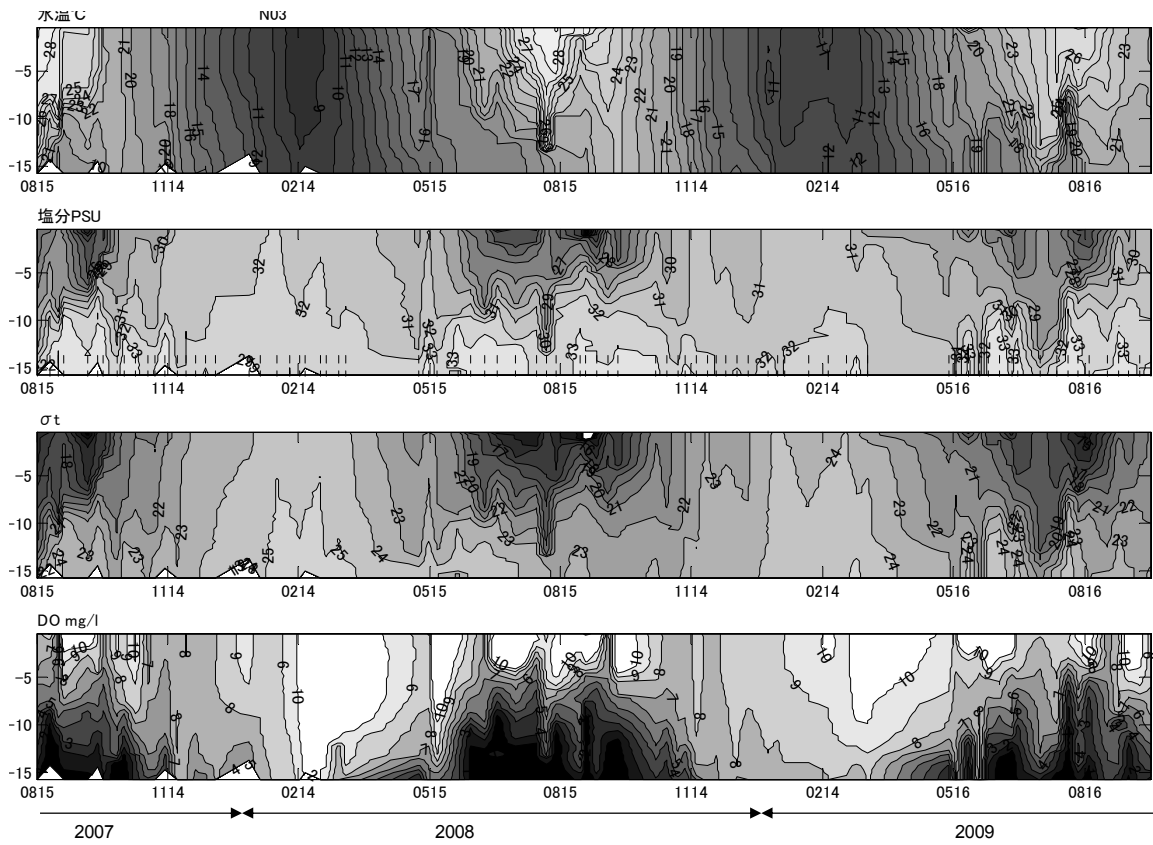


図-5.7(e) 湾奥 N03 の時系列コンター図

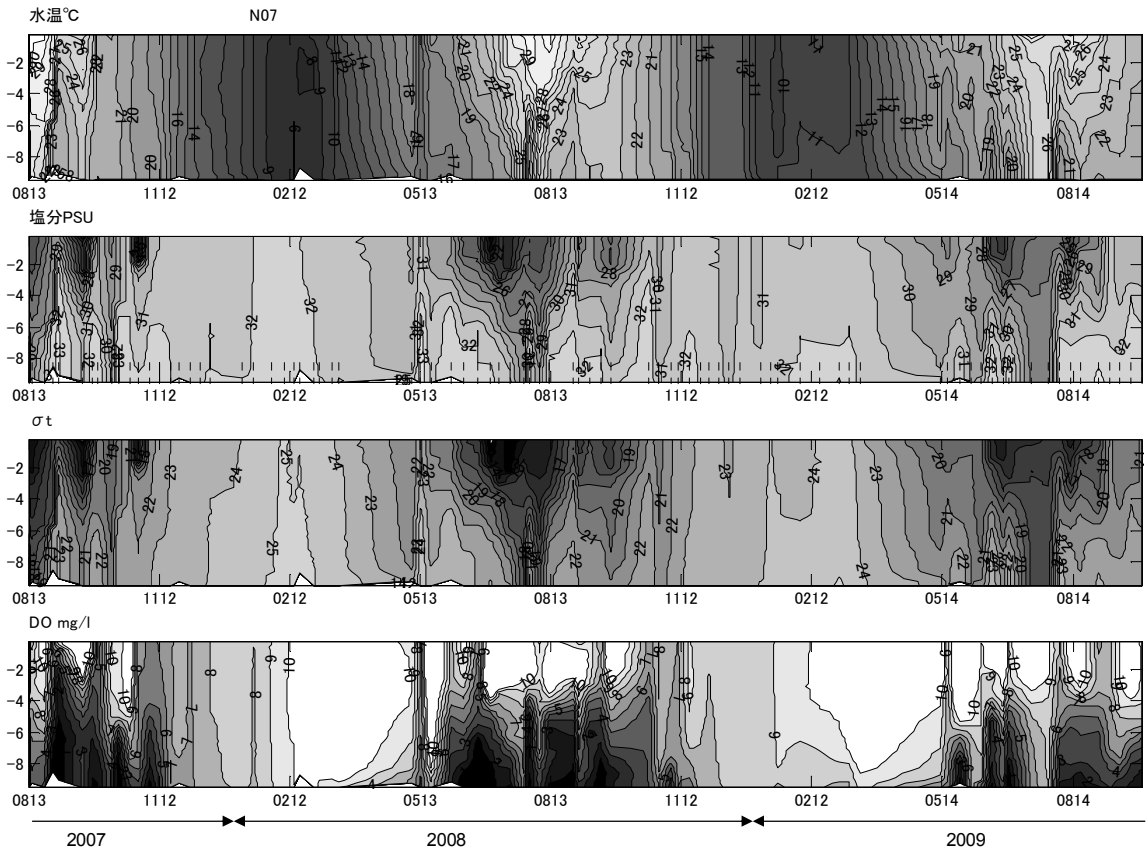


図-5.7(f) 湾奥 N07 の時系列コンター図

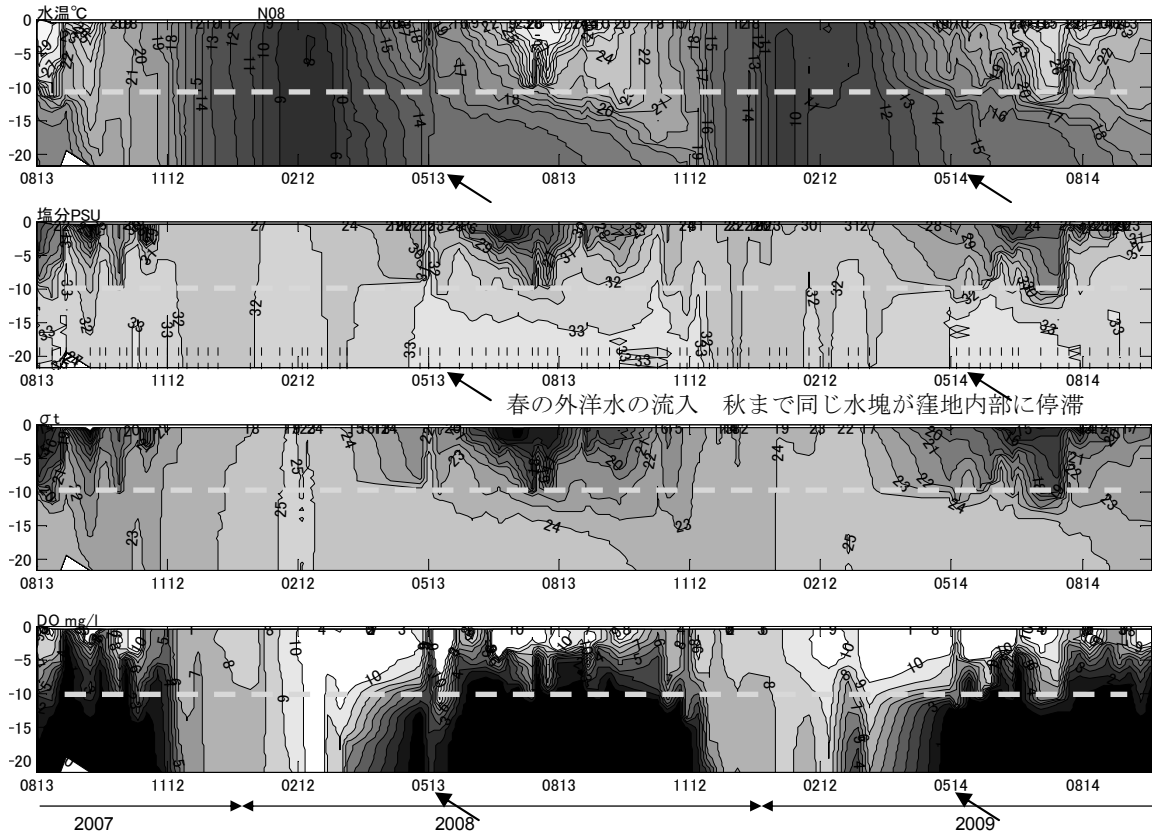


図-5.7(g) 浚渫窪地 N08 の時系列コンター図 (波線以下が浚渫窪地に対応)

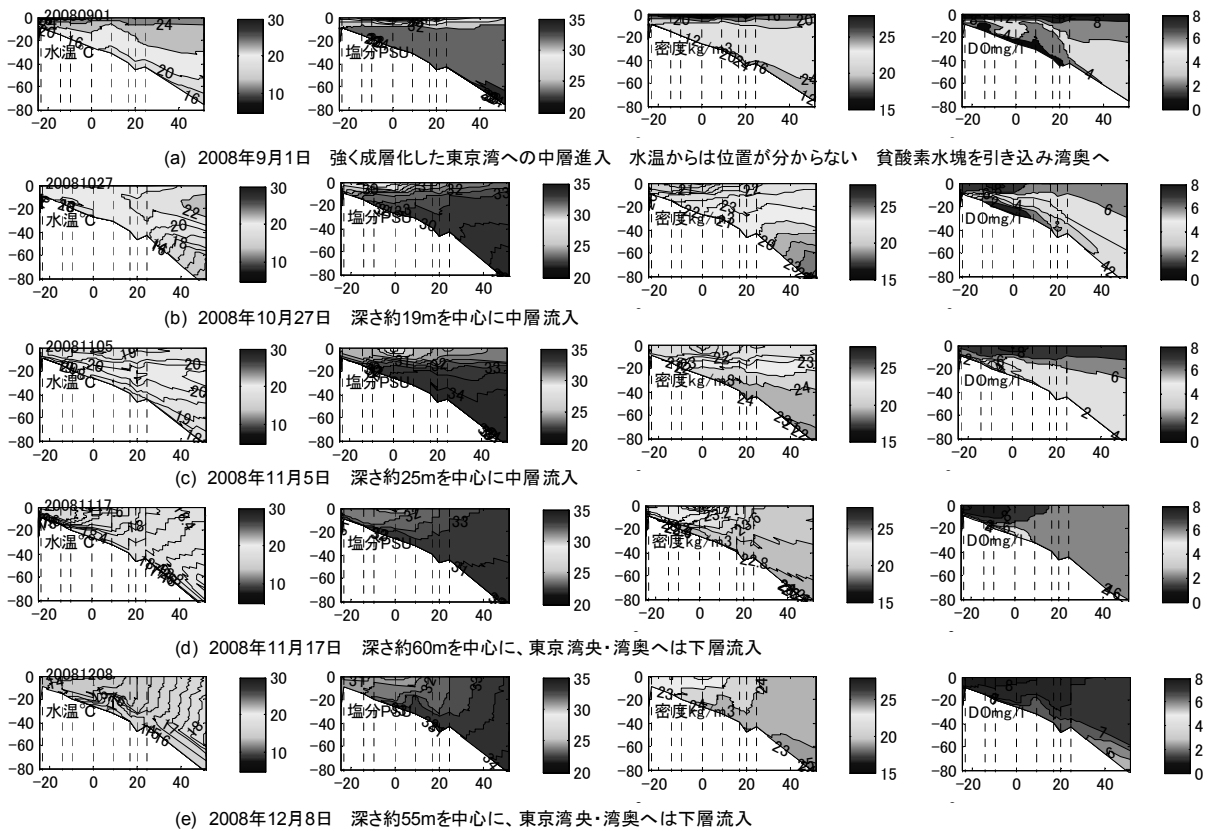


図-5.8 夏季から秋季にかけての外洋水の中層流入

なお、夏季も外洋水は中層から流入しているものと推定されるが、表層の水温が中層で流入する水塊の水温よりも高いために、図-5.8(a)の水温分布図からは中層流入であることが判別できない。

海面冷却によって、表層の水温が徐々に低下すると、10月初旬に表層よりも中層の水温の方が高くなり、図-5.8(b)～(c)のように外洋水が中層流入していることが水温分布からも推定できるようになる。

(2) 外洋水の進入深度が海水交換効率へ及ぼす影響

前述したように冬季になると徐々に外洋水の進入深度が深くなり、1～2月にかけては東京湾奥のN7, N8 (図-5.7(f), (g)) では外洋系の暖水の進入が見られない。

前節 5.3(3)では、前掲図-3.10 で1～2月の海水交換効率 Q/R が低かった原因として、風向きの影響を挙げた。しかし、ここであげた冬季に外洋水の進入深度が深くなることも、東京湾奥への外洋水の進入を減少させるため、1～2月にかけての海水交換効率を下げる要因の一つとなっている可能性がある。

6. おわりに

本論文で得られた結果は以下のとおりである。

(1) 東京湾フェリーで計測された残差流の断面分布の年平均は、上層流出、中層流入、下層流出の3層構造であり、久里浜から2.5km沖合の水深30m地点で流入流速が7～8cm/sで最大値をとり、水深70mで流速が反転し、水深80mで流出流速が2～3cm/sで極小値をとった。ADCPでは表層約10mが計測不能域であるが、水深10～20mのプロファイルの傾きから推定すると、表層では約5～10cm/sの流出流速となっているものと推定される。

(2) 東京湾フェリーのADCPから得られた海水交換日数は冬季に多く1月には約40日だった。また、4, 5月, 9～11月の海水交換日数が少なく10月は約20日であり、この日数は高尾ら(2004)のBoxモデルによる算定結果とほぼ一致した。ただし、高尾ら(2004)では観音崎-富津以北の東京湾を、本研究では久里浜-金谷以北の東京湾を対象として海水交換を算定している。

(3) 河川流量 R に対する海水交流量 Q の比 Q/R を、ここでは河川流量に対するエスチュアリー循環の効率と考えて、海水交換効率 Q/R と定義した。6～9月の Q/R 比は20～25であるのに対し、3～5月と11～12月の Q/R 比は40～45と大きく、1～2月は若干小さく約32～38であることが分かった。

(4) 2004～2008年の千葉灯標の下層の月平均溶存酸素と表層-下層の月平均密度差(密度成層を示す値)は逆比例の関係にあった。密度成層の発達で東京湾の湾奥の溶存

酸素量に影響を与えていることを示唆する結果となった。(5)成層期の東京湾奥(千葉灯標)の表層と下層の密度差と海水交流量の月平均データを比較したところ、密度差と海水交流量が逆相関の関係にあった。このことは、密度成層が発達することにより、エスチュアリー循環による海水交換効率が低下している可能性を示している。(4)で述べたように成層期(7～8月)の東京湾の湾奥では密度成層の発達度合いと溶存酸素の減少が比例関係にある。一方で海水交換量効率 Q/R の低下は湾奥下層の水塊を停滞させ、溶存酸素を減少させる一因となるものと考えられる。したがって、密度成層の発達は、海水交換効率を下げることに伴い、間接的に溶存酸素の低下に寄与している可能性がある。

(6) 各種連続観測データと小型調査船による東京湾の広域の水質観測データを比較した。その結果、冬季には下層から高温高塩分の外洋水が流入しており、湾奥まで頻りに流入する。しかし、水深の浅い湾奥までは直接到達せず、湾奥に流入した高塩分水がその後、北東風により湾奥まで流入することが分かった。

(7) 羽田の月ごとの風配図を調べたところ、夏は南よりの風が多く8月は約50%が南よりの風だった。一方、秋から冬は北よりの風が多く、10月～2月は約80%を占めた。ただし、秋から冬の風配図を見ると、9～11月は北東の風が卓越するのに対し、12～2月は北西の風が卓越していた。東京湾の長軸は北東-南西の軸にそっていることから、このように秋から冬にかけての北東風から北西風への風向きの変化が海水交換効率 Q/R にも影響を及ぼす可能性がある。密度成層が弱い1～2月の海水交換効率 Q/R が低かった原因として、このような風向きの変化が一つの要因ではないかと推定された。

(8) 秋季には外洋水の中層貫入現象(日向, 2001)が見られる。観測船のデータを調べたところ、秋から冬になるにつれて湾口では外洋水の進入深度が深くなり、東京湾の湾奥まで流入しにくくなっていることが分かった。(7)では1～2月の海水交換効率 Q/R が低かった原因として、風向きの影響を挙げたが、冬季に外洋水の進入深度が深くなることも1～2月にかけての海水交換効率 Q/R を下げる要因の一つとなっている可能性がある。(7)と(8)の海水交換効率へ及ぼす風向きおよび外洋水の進入深度の影響については、今後数値計算等によって定量的に評価することが課題として残された。

(2009年11月7日受付)

謝辞

本研究の実施にあたっては、東京湾フェリー株式会社の皆様、国土交通省横浜港湾空港技術調査事務所の皆様に多大なる支援と助言をいただいた。また、風の塔のデータを東京大学大学院新領域創成科学研究科の磯部教授、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。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 岩戸谷博範・北出裕二郎・松山優治・岩田静夫・石井光廣・井桁庸介(2006)：黒潮小蛇行の東進に伴い相模湾および東京湾湾口に発生した急潮，海の研究，15(3)，pp.235-247.
- 宇野木早苗・岸野元彰(1977)：大局的に見た内湾の海水交流，第24回海岸工学論文集，pp.486-490.
- 宇野木早苗(1998)：内湾の鉛直循環流量と河川流量の関係，海の研究，Vol.7，No.5，pp.283-292.
- 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.
- 佐々木淳・渡邊亮太・磯部雅彦・五明美智男(2001)：自動昇降式観測システムを用いた冬季の東京湾湾奥における基礎生産の推定，海岸工学論文集，第48巻，pp.1091-1095.
- 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.
- 高尾敏幸・岡田知也・中山恵介・古川恵太(2004)：2002年東京湾広域環境調査に基づく東京湾の滞留時間の季節変化，国総研資料，第169号，78p.
- 橋本典明・永井紀彦・高山知司・高橋智晴・三井正雄・磯部憲雄・鈴木敏夫(1995)：水中超音波のドップラー効果を応用した海象計の開発，海岸工学論文集，第42巻，pp.1081-1085.
- 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時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.
- 松村剛・石丸隆・柳哲雄(2002)：東京湾における窒素とリンの収支，海の研究，11(6)，pp.613-630
- 松本輝寿・金子安雄・寺尾 健・川島 毅(1974)：海水交流に関する現地観測，第21回海岸工学講演会論文集，pp.291-296.
- 山尾理(2003)：千葉灯標モニタリングポストによる水質・流況・海上風の常時モニタリング，海洋調査技術，15(2)，pp.137-141.
- 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下層溶存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.
- 渡邊奈保子・山尾理・須藤幹男・荻籠泰彦(2009)：2003年～2008年の東京湾奥部の下層溶存酸素濃度時間変化，日本海洋学会秋季大会講演集，pp.67.

付録A 東京湾口の潮流天文潮成分の変化

図-A.1(a)～(d)は、潮流の天文潮成分の断面分布図であり、5年間の変化である。フェリーの航路に垂直な流速の1年間の時系列データに対して8分潮の調和解析を実施したものであり、そのうち主要4分潮を表示している。全般に表層が大きい傾向にあり、M2分潮の場合は、久里浜から2km付近の潮流の振幅が大きく、約28cm/sである。最も水深の深い久里浜から2.5km付近よりも、少し久里浜に近い位置で流速が大きい。

図-A.2(a)～(d)は、潮汐の位相の断面図である。M2分潮の位相は表層かつ深い部分で大きく、海底に近いところほど小さい傾向にあり、さらに、神奈川側で大きい傾向にある。磯崎・宇野木(1963)の潮位の位相図は、神奈川側で大きい傾向にあり、今回の潮流の解析結果は潮位の位相に対して位相が90度小さくなっている。いずれの分潮の位相も2004年以降、少しずつ位相が小さくなっている傾向にあり、この原因は解析誤差ではないかと考えられるが、今後、検討を要する。

図-A.3(a), (b)は、2004年以降の調和定数の変化である。若干の変動は見られるものの、大きな変化は見られない。

付録B 第二海堡海象計、HFレーダーのデータの特徴と潮流の変化

図-B.1(a)～(d)は、これまでに観測されたHFレーダー(表層)と海象計の上層(深さ10m)、中層(深さ15m)、下層(深さ20m)の全時系列データである。それぞれ、実測データ(20分平均)と潮汐成分、残差流の時系列変化であり残差流については日平均したのもあわせて示した。

海象計のデータは、2003年4月からのデータであるため、2003年は3ヶ月分通常の年よりもデータが少なく、また、2005年は4～7月にかけてデータが欠測していた。さらに、2008年は8月までを対象としたため、通常よりも4ヶ月分データが少ない。一方、解析に用いたHFレーダーのデータは期間が2006年2月18日～2009年9月28日であるが、2008年2月14日～3月20日および2008年11月16日～2009年4月16日のデータは欠測していた。

図-B.2は、図-B.1のデータのうち、海象計の中層と下層の2008年のデータを時間方向に拡大したものであり、南北流速の潮汐成分と残差流の24時間移動平均データである。残差流は約10日～2週間程度の周期で約10～20cm/sで変動している。流速が流入となる時期は、小潮や大潮とはあまり関係ないようであり、清水ら(2001)が指摘するような、大潮小潮との関係(大潮時に湾口で海水が混合するため、小潮時の方が外洋水の出入りが大きくなるという現象)はあまり明瞭ではない。

図-B.3は、2006年のHFレーダーによる表層と、2004年の海象計による深さ10, 15, 20mの主要4分潮の潮流楕円である。M2分潮の長径はいずれも約24～25cm/sである。HFレーダーのデータは観測位置が違い、第二海堡の北西側にあるため、潮流楕円の方向が海象計のものとは異なっているが、いずれも湾口の形状に沿うように流れている。

図-B.4は7年間の調和定数の変化である。欠測があるためか年によって若干の変動はあるものの、長期的な変化は小さい。位相を上中下層で比較すると、全般に下層の方が小さく位相が進んでいるのが分かる。このように海底面に近い場所での流速の位相が進むのは、潮汐が摩擦のある振動流の性質を示しているためと考えられる。

図-B.5は、HFレーダー、および海象計の南北方向の24時間移動平均である。HFレーダー(表層)のデータは全般にマイナス(流出)方向にドリフトしている。また、海象計のデータは上層、中層、下層と深くなるにしたがって、プラス(流入)側へドリフトしている。

図-B.6は、南北流速の年平均の鉛直プロファイルである。6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おり、下層では年平均で8～9cm/sの流入流速となっている。なお、2005年の下層のデータが小さめとなっているが、これは、流入の大きい夏季のデータが欠測していたためだと考えられる。

図-B.7は、各月の残差流の平均値であり、南北流速成分を表示している。HFレーダーは3～8月にかけて流出流速が小さく、1～2月および9～12月に大きい傾向にある。これは、エスチュアリー循環により全般に流出する傾向にあるものの、それ以外に夏と冬の季節風による吹送流が乗っており、その結果、夏は流出が小さく、冬に流入が大きくなっているものと考えられる。

一方、海象計のデータの中層・下層流速の5年間の平均を見ると1月～3月に小さく、5～10月にかけて大きい傾向にある。この結果は、3.3節の東京湾フェリーの観測データと異なっている。第二海堡周辺は東京湾フェリーと比較すると全般に水深が小さいことなど、空間的な違いが影響しているのではないかと推定されるが、この点については今後さらに検討が必要である。

参考文献

- 磯崎一郎・宇野木早苗(1963)：東京湾の潮汐と津波の数値計算の試行，第10回海岸工学講演会講演集，pp.59-63
- 清水学・柳哲雄・野村宗弘・古川恵太(2001)：東京湾の大潮・小潮期における残差流変動，海の研究，10(5)，413-422.

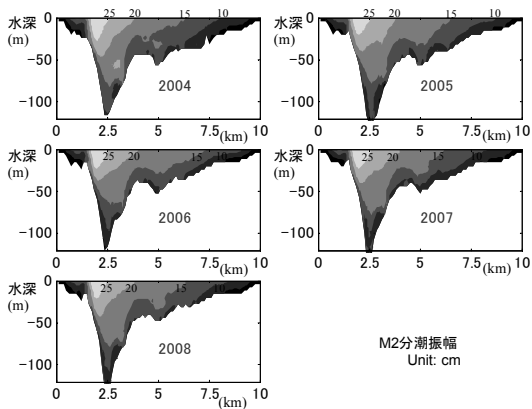


図-A.1(a) 潮流振幅の長期変化 (M2分潮)

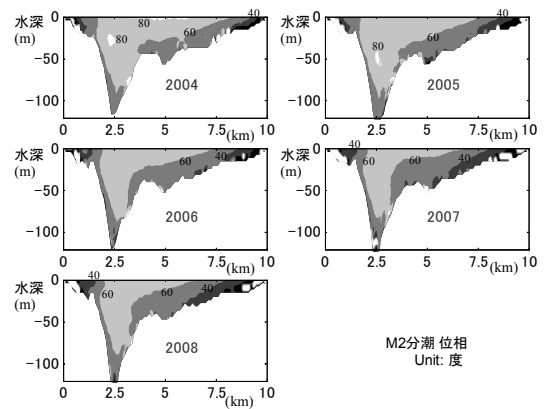


図-A.2(a) 潮流位相の長期変化 (M2分潮)

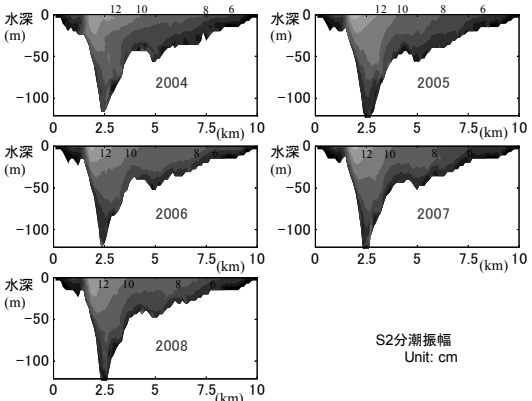


図-A.1(b) 潮流振幅の長期変化 (S2分潮)

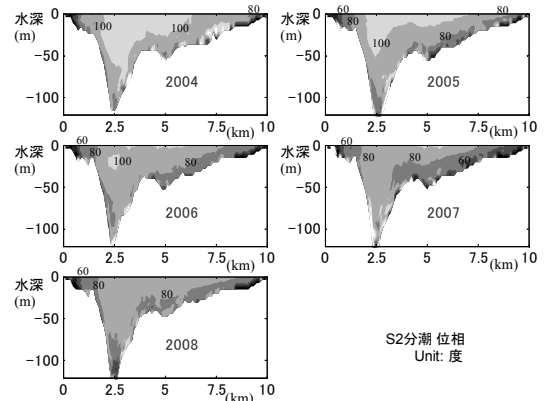


図-A.2(b) 潮流位相の長期変化 (S2分潮)

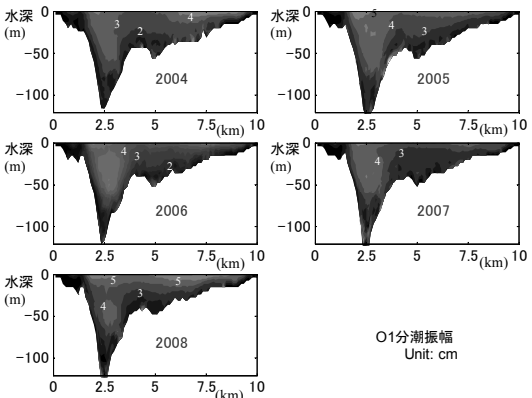


図-A.1(c) 潮流振幅の長期変化 (O1分潮)

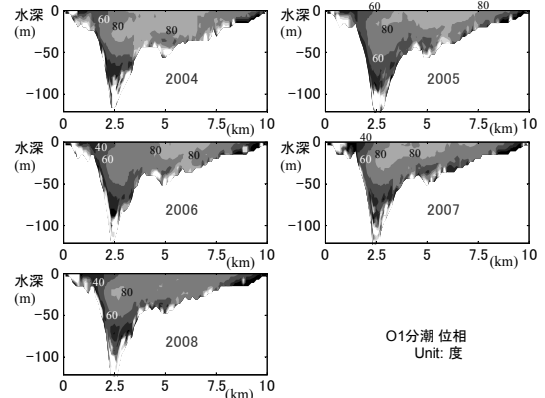


図-A.2(c) 潮流位相の長期変化 (O1分潮)

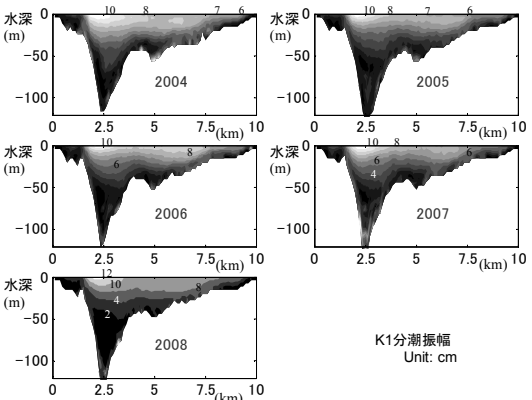


図-A.1(d) 潮流振幅の長期変化 (K1分潮)

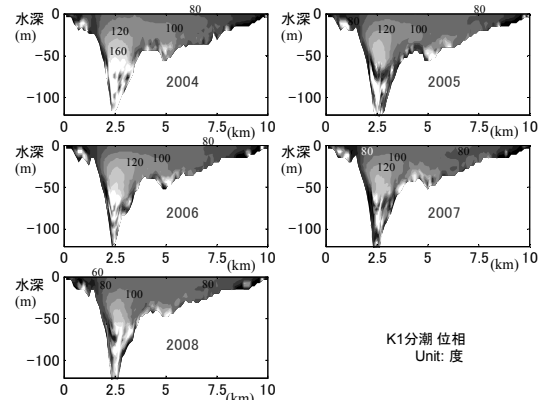


図-A.2(d) 潮流位相の長期変化 (K1分潮)

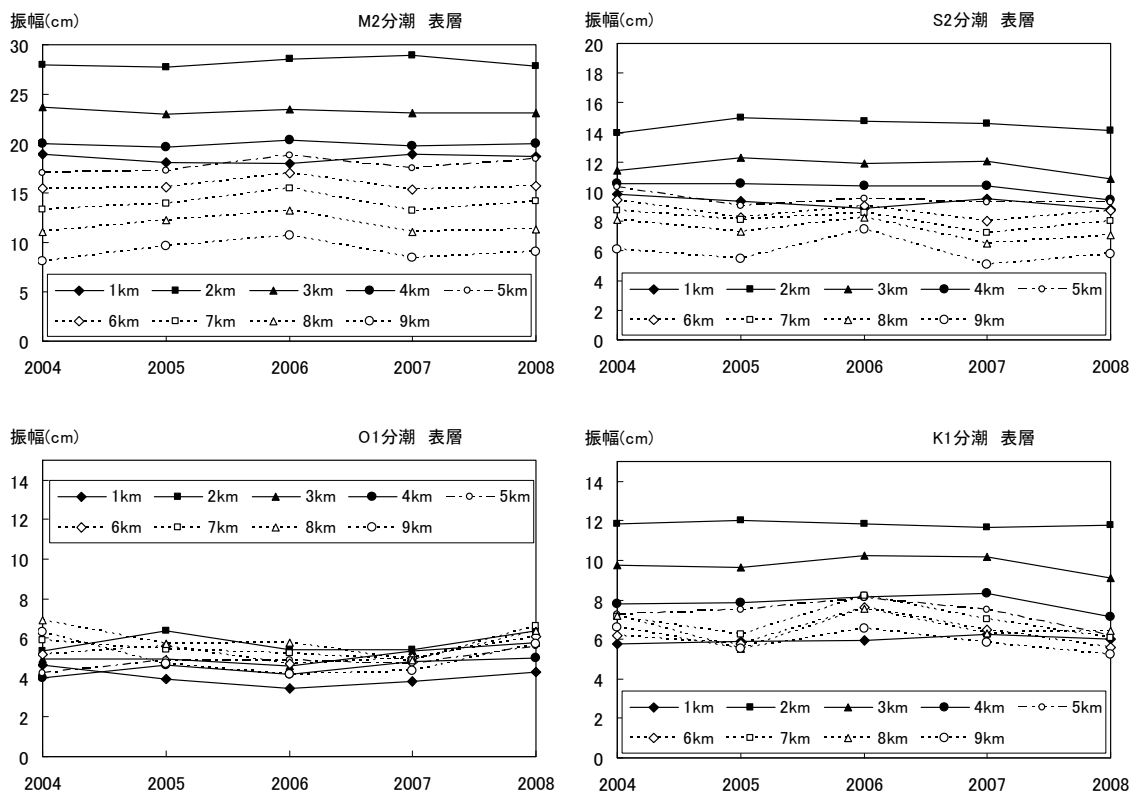


図-A. 3(a) 東京湾口の潮流振幅の経年変化 表層 (深さ 10m)

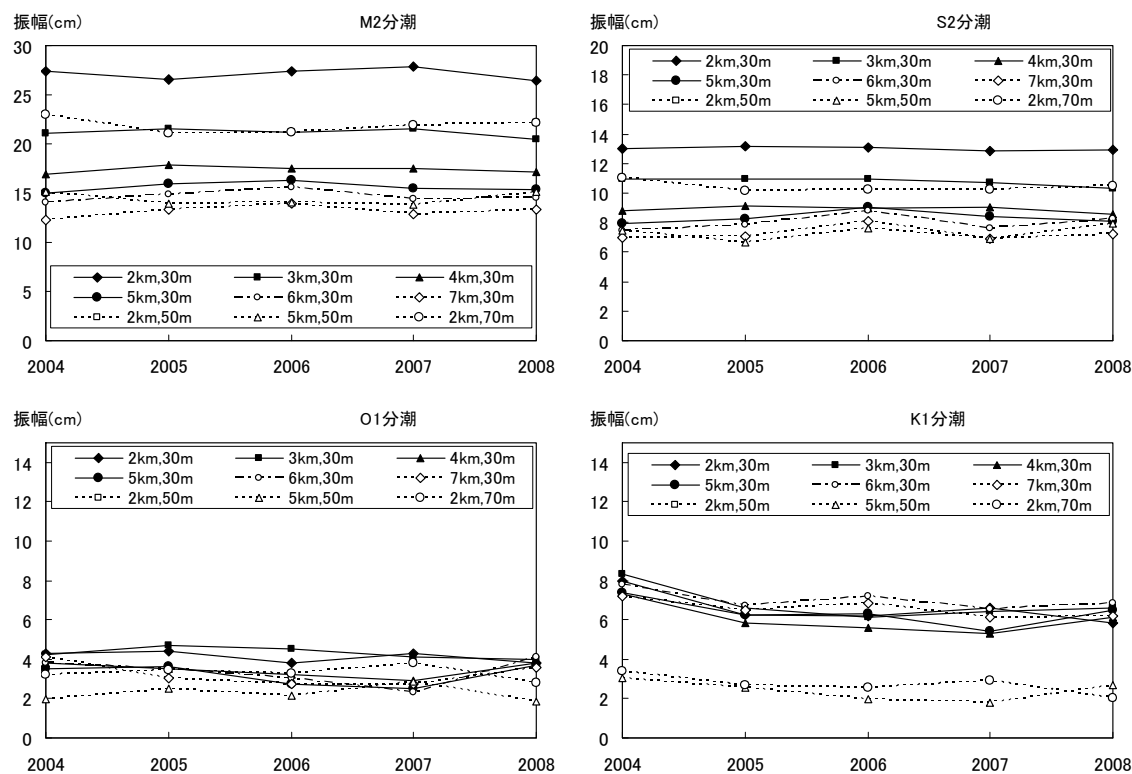


図-A. 3(b) 東京湾口の潮流振幅の経年変化 深さ 30m, 50m, 70m

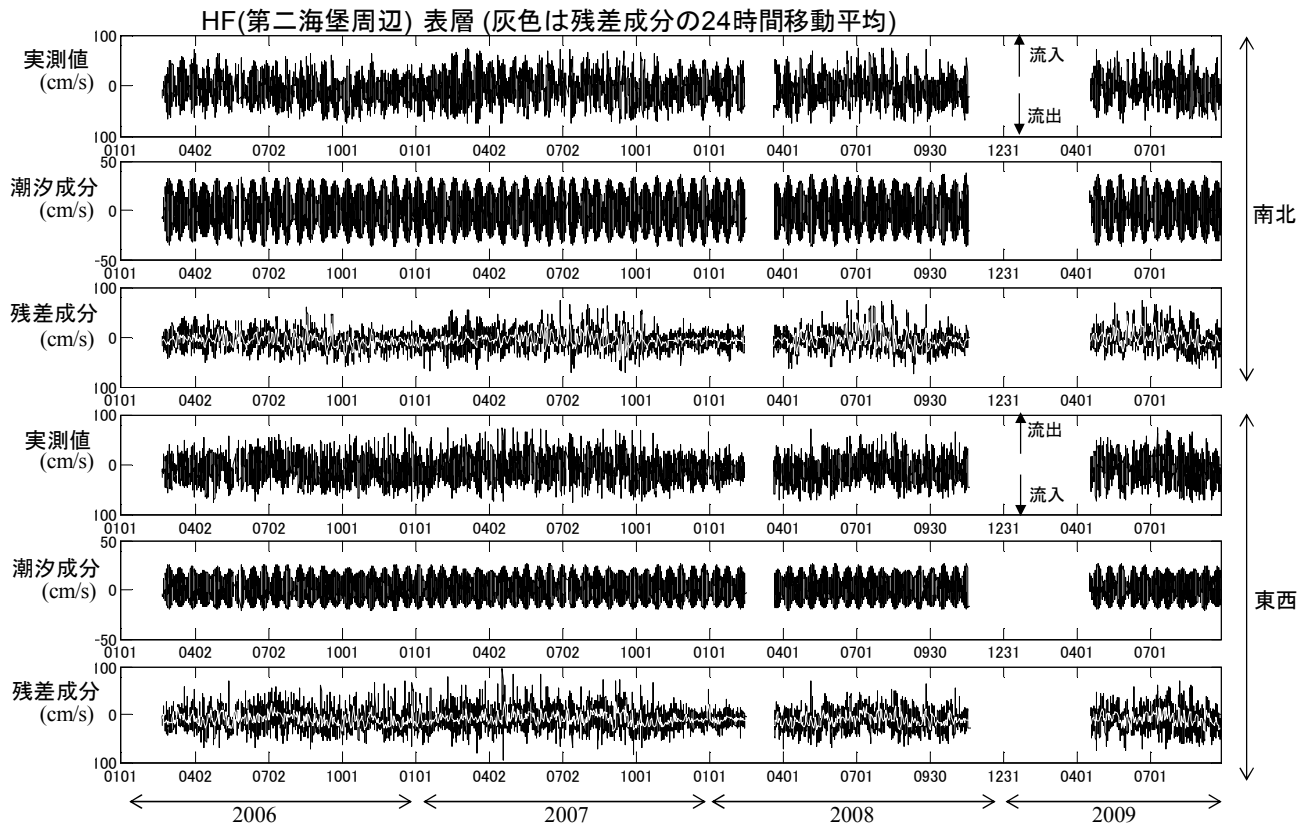


図-B.1(a) 第二海堡周辺 表層の流向流速 (HF レーダー)

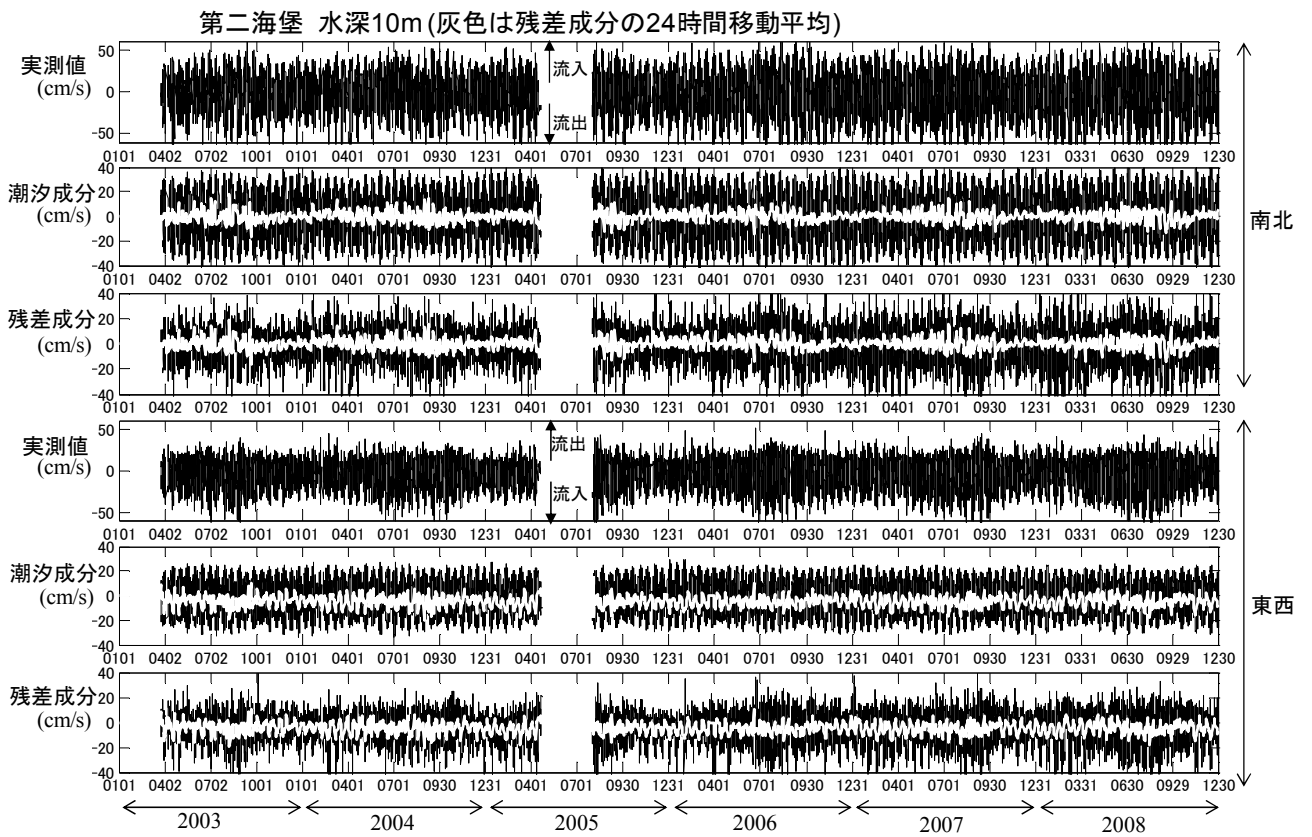


図-B.1(b) 第二海堡周辺 表層の流向流速 (海象計 水深10m)

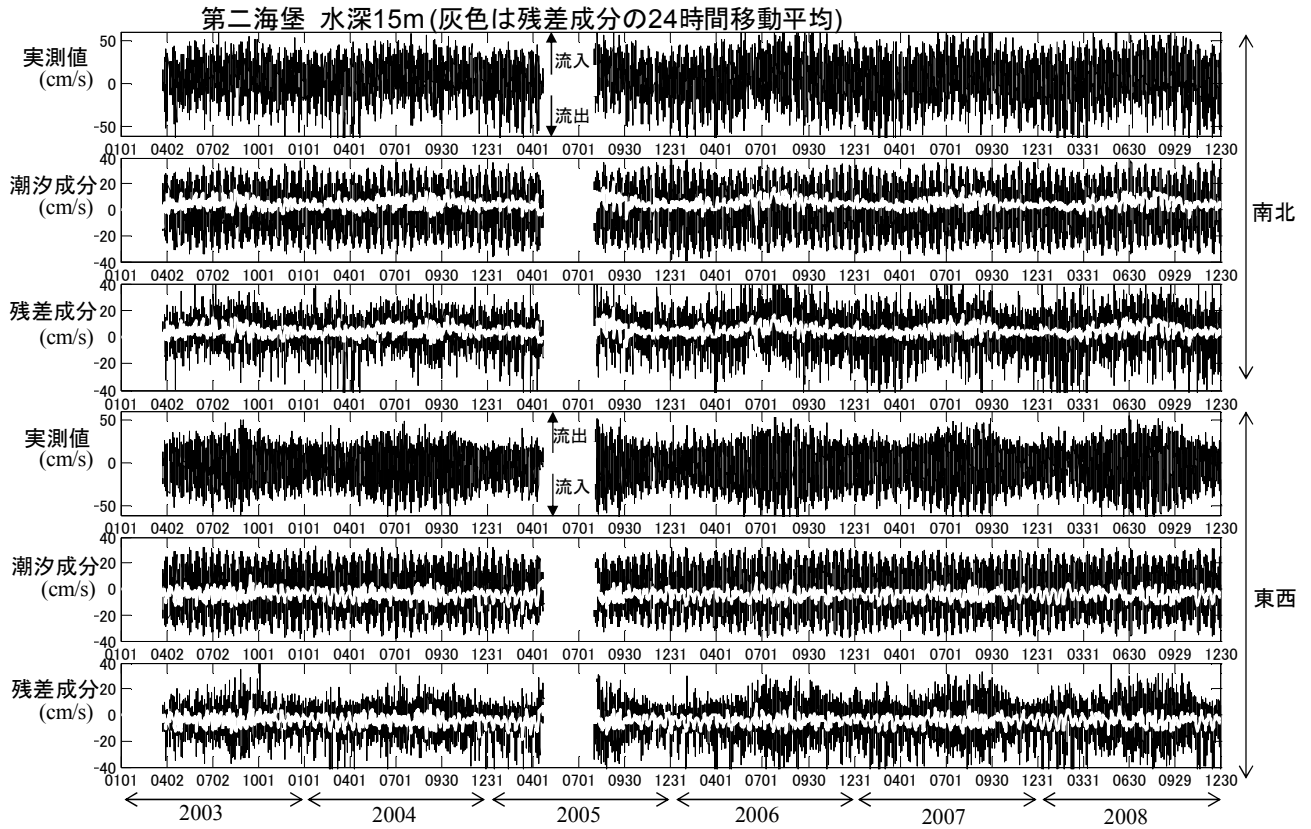


図-B.1(c) 第二海堡周辺 表層の流向流速 (海象計 水深 15m)

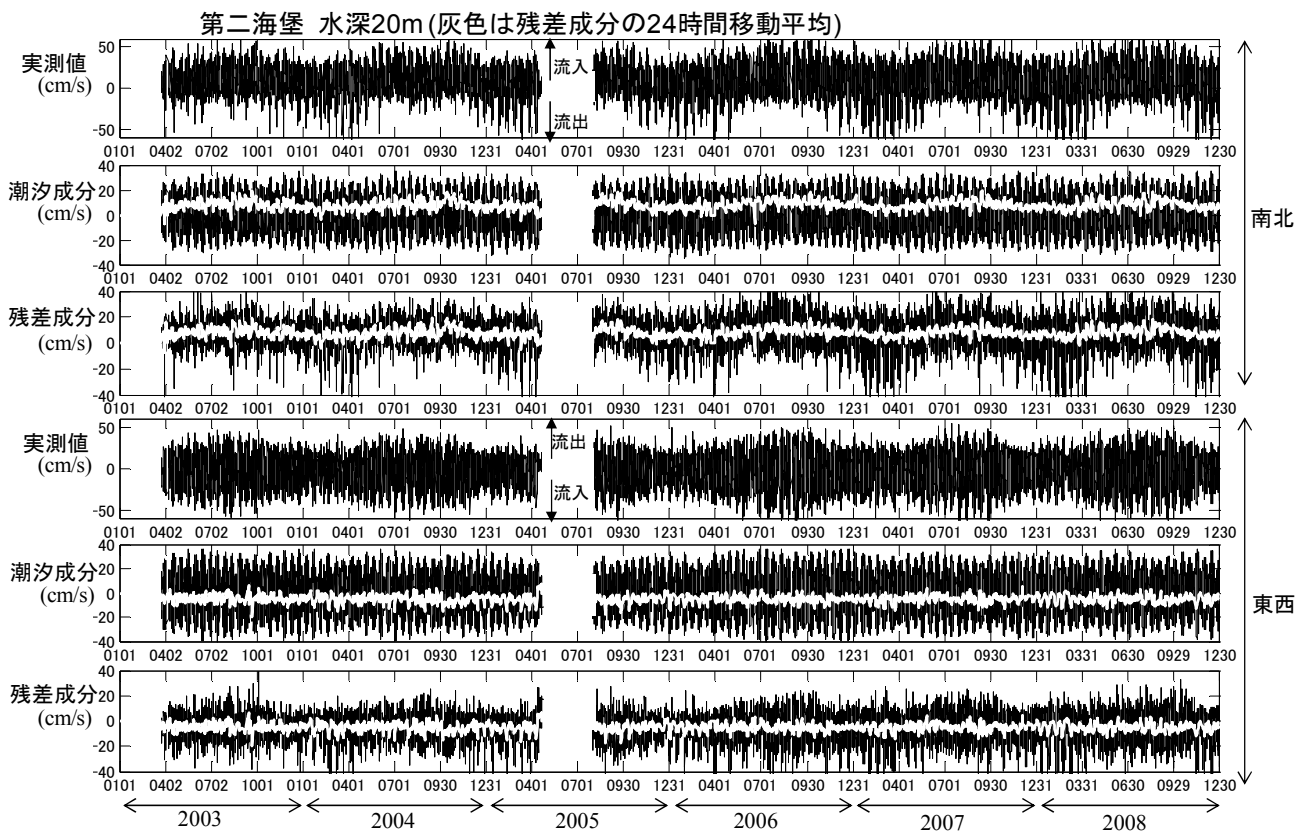


図-B.1(d) 第二海堡周辺 表層の流向流速 (海象計 水深 20m)

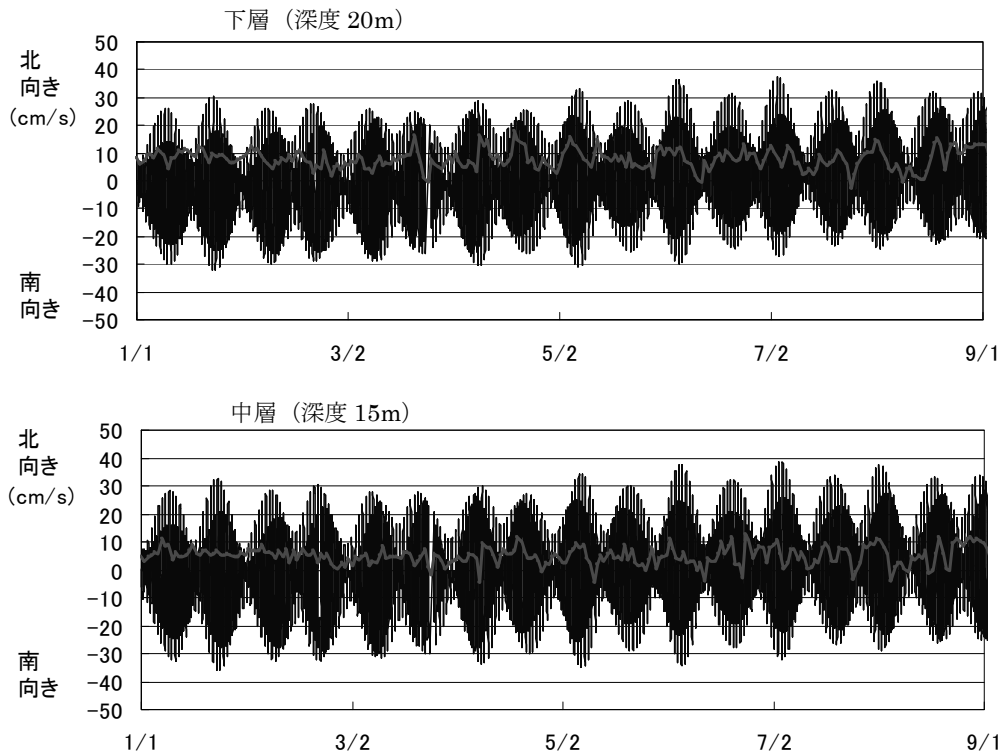


図-B.2 海象計の下層と中層の潮流潮汐成分と残差流の24時間平均（南北流速の拡大図）（2008年1月～8月）

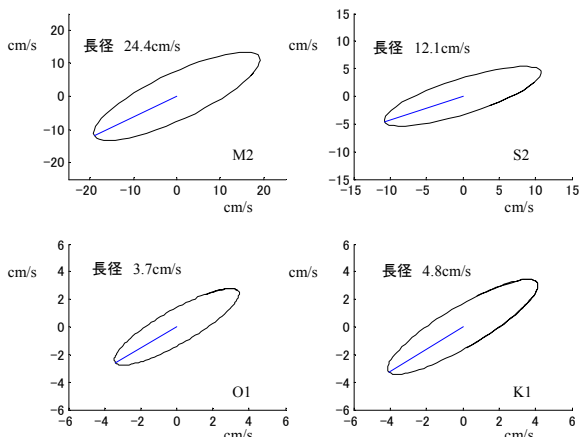


図-B.3(a) 表層の潮流楕円（HFレーダー2006年）

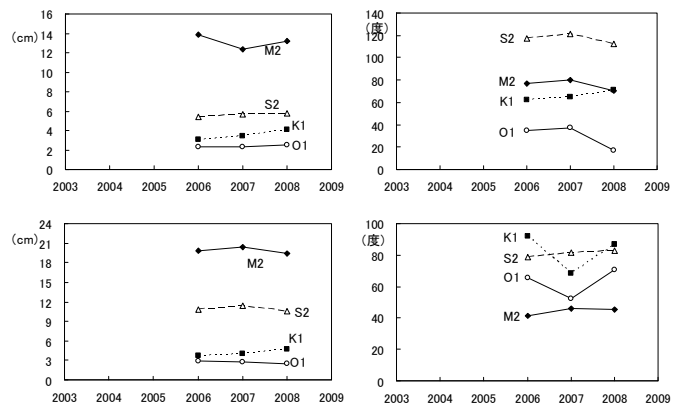


図-B.4(a) 表層の各分潮の経年変化（南北流速成分）

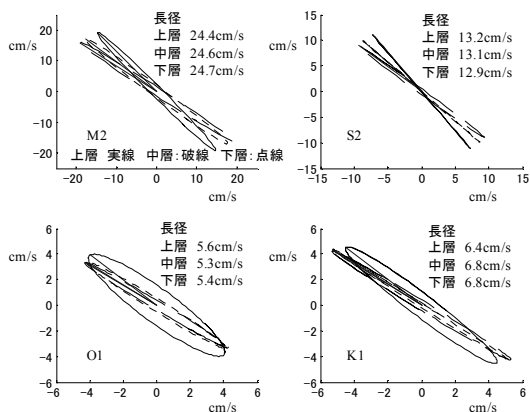


図-B.3(b) 上中下層の潮流楕円（海象計2006年）

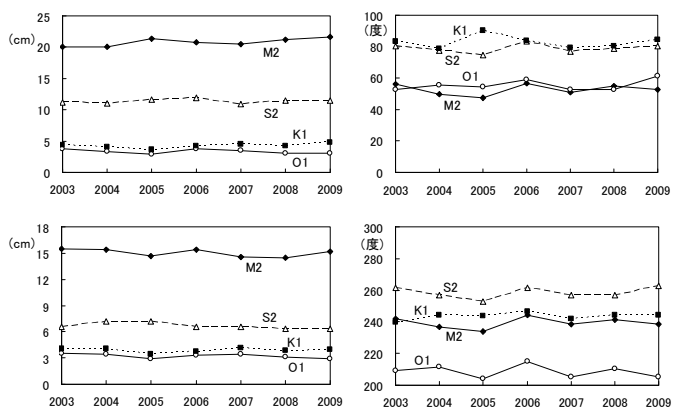


図-B.4(b) 上層の各分潮の経年変化（南北流速成分）

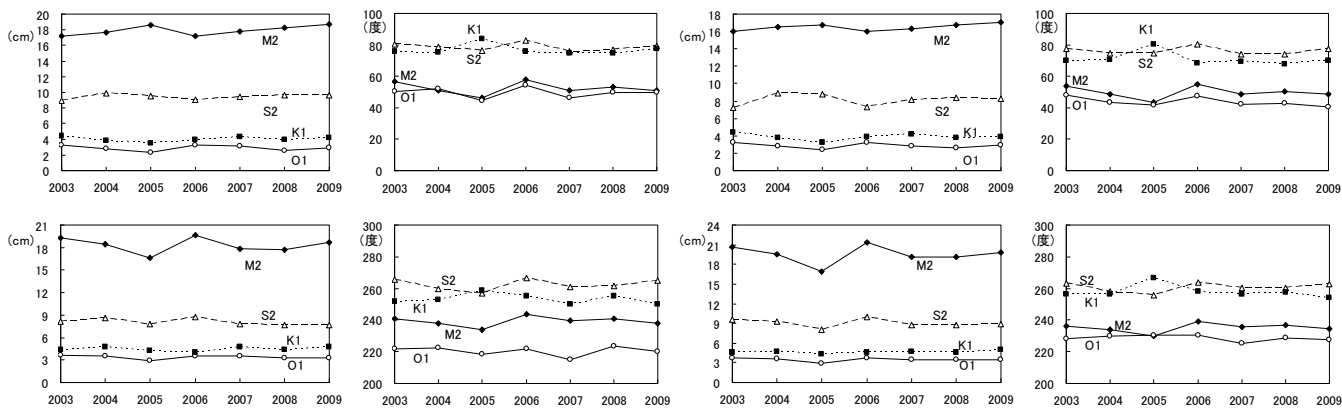


図-B. 4(c) 中層の各分潮の経年変化 (南北流速成分)

図-B. 4(d) 下層の各分潮の経年変化 (南北流速成分)

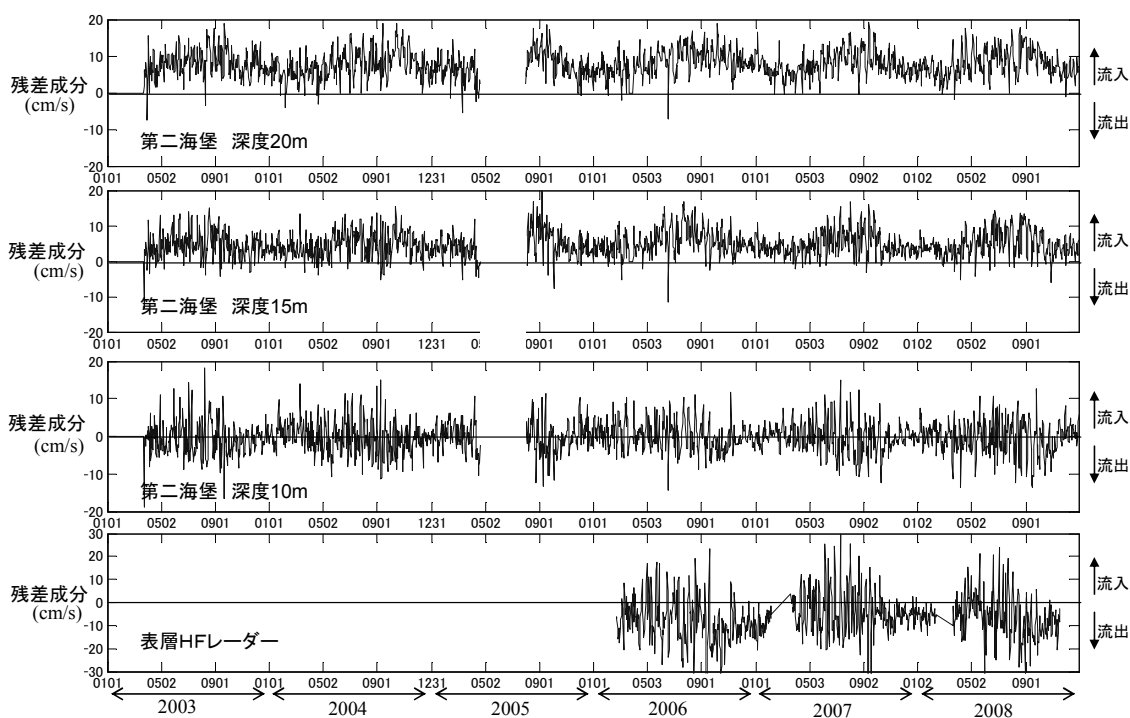


図-B. 5 南北方向残差流の24時間平均データの時系列

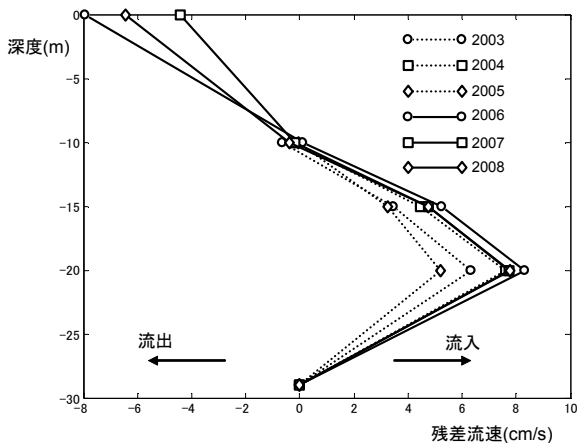


図-B. 6 南北方向流速の鉛直プロファイル (年平均)

2005年は夏季欠測のため流入流速が小さい

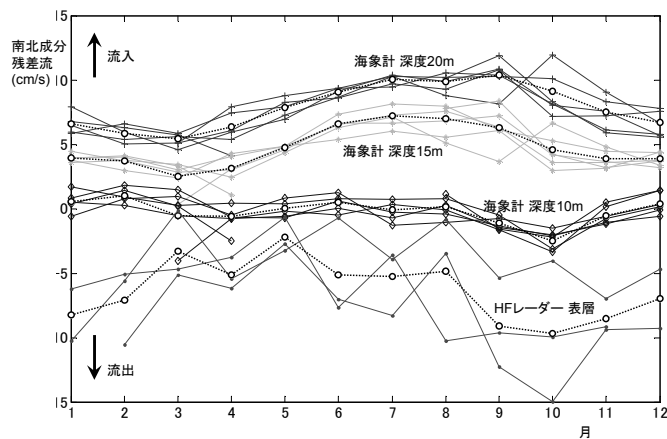


図-B. 7 南北方向残差流の各月の平均

港湾空港技術研究所報告 第49巻第1号

2010.3

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 昭和情報プロセス株式会社

Copyright © (2010) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

CONTENTS

Development of Non-Hydrostatic Numerical Model for Stratified Flow and Upwelling in Estuary and Coastal Areas	Yoji TANAKA, Kojiro SUZUKI	3
Characteristics of the Water Quality and Current at the Mouth and Head of Tokyo Bay obtained by Continuous Monitoring	Kojiro SUZUKI	27