

東京湾の外海水進入特性に関する数値実験

八 木 宏*・片岡理英子**・山 口 肇***・藤 原 建 紀****

本研究では、東京湾への外海水進入特性を調べるために3次元流動モデルに基づく数値実験を行った。その結果、外海水の中層貫入現象発生時には、東京湾東側（千葉県側）中層に外海水が流入、西側（神奈川側）表層、底層から湾内水が流出する傾向があり、これが現地計測結果からも支持されることを示した。また、1998年1年間の各月の数値実験、及び1995～1999年の5年間の外海水特性の解析から、中層貫入発生時には外海水表層（水面下50～100m）で鉛直混合が進み高温・低塩分化の傾向があること、このような鉛直混合は秋季に発生しやすく外海水表層水の季節変動が中層貫入現象発生の重要な要因の一つであることを示した。

1. はじめに

地形的な閉鎖性が強い内湾域においても外海域の海洋変動の影響を直接受けて、湾内の物質循環・貧酸素動態・熱環境がダイナミックに変化していることが最近の現地観測をベースとした研究によって明らかにされつつある。今後、内湾域の水環境予測技術を向上させるためには、陸域からの負荷量評価精度の向上や内湾の物質循環プロセスの解明とともに、外海水と内湾水の交換過程、特に外洋変動に対応した外海水の湾内への進入特性を明らかにし、それを定量的に評価する手法を確立することが必要である。

本研究で対象とした東京湾については、Yanagiら(1989)によって、夏季に黒潮フロントが沿岸域に接岸した時に、外海水が湾内中層に貫入することが指摘されており、この中層貫入現象の詳細な空間構造が日向ら(2001)の現地調査によって捉えられている。一方、藤原ら(2000a)は、東京湾へ流入する外海水の進入深度算定方法を提案し、進入水深の変化に伴って湾内の貧酸素水塊がダイナミックに移動していることを示している（藤原ら, 2000b）。このように、外海水進入現象については徐々にその仕組みが明らかになりつつあるが、現地調査によるアプローチだけでは外海水進入特性、特にその空間構造やその力学特性、外海水進入パターンを支配する環境因子を明らかにすることは難しい。そこで本研究では、数値実験を通して外海水進入の空間構造を示し、進入特性を支配する環境要因を明らかにすることを試みた。

2. 数値実験の概要

東京湾の湾口部を介した外海水進入現象は、外海水と内湾水の密度差に起因する密度流に潮流・吹送流が重なることで実際の進入構造が特徴づけられていると考えら

れる（例えば、藤原ら, 2000b）。本研究では、外海水進入現象の基本的な性質を明らかにすることを目的として、密度流としての性質に着目した外海水進入特性の把握を数値実験によって試みた。

（1）数値モデルの基本構成

対象領域は図-1に示すように外海域を広く含む東京湾周辺海域である。本数値実験では、密度流としての外海水進入特性に着目しているため、内湾域と外海域の塩分水温構造を実現現象に対応させて適切に与えることが重要となる。ここでは、神奈川県水産総合研究所によって毎月実施されている定期海洋観測の結果に基づきこれを評価することを試みた。具体的には、神奈川県水産総合研究所の東京湾内湾部における観測点(Sta. 129, 124, 112, 図-1参照)の観測結果から内湾域の平均的な水温・塩分の鉛直分布を算出し、それを初期条件として計算領域全体に一樣に与えた上で、河川流量（東京湾に流入する主要5河川、多摩川、鶴見川、荒川、江戸川、隅田川の月平均流量：流量年表より算定）を与え、この状態で外海領域の塩分・水温分布を東京湾外海域の観測点（Sta. 29）

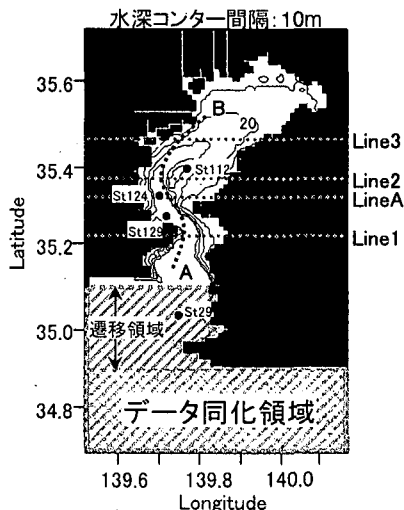


図-1 計算領域及び海底地形

* 正 会 員 博(工) 東京工業大学大学院助教授 理工学研究科
** 元東京工業大学工学部土木工学科
*** 学生会員 東京工業大学工学部土木工学科
**** 正 会 員 農 博 京都大学大学院教授 農学研究科

の観測値に近づけることで、現実に近い内湾と外海の密度分布を設定し対象領域に密度流を発生させた。ここで、外海域の塩分・水温は境界条件として与えるのではなく、計算領域の外海部に同化領域を設定し(図-1参照)、塩分・水温の移流拡散方程式に次式で表されるデータ同化項を加えることで外海域の塩分水温を数値計算に反映させた。

$$\text{データ同化項} = \frac{\beta}{\alpha}(\phi_{ob} - \phi_{cal}) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ϕ_{ob} , ϕ_{cal} : 塩分・水温の観測値と計算値, α はナッジング係数(6時間), β は、同化項の緩和係数であり同化領域と非同化領域の間で塩分・水温が滑らかに接続するように、同化領域で1, 非同化領域で0とし、その間の遷移領域で0~1に線形に変化するように設定した。本研究で用いた数値モデルは Princeton Ocean Model (POM) であるが、海底勾配が大きい東京湾湾口部においても正確な密度流計算を可能とするために、鉛直方向には水面付近では水位に追従した σ 座標、海底部付近ではレベル座標となるハイブリット型を用いている。計算格子間隔は、水平方向 $1/96^\circ$ 、鉛直方向には不等間隔25層で表層で格子間隔が小さくなるように設定した。

(2) 数値実験の内容

本研究では、まずはじめに外海水進入の空間構造を把握することを目的として、日向ら(2001)によって外海水中層貫入現象が観測されている1998年8~9月を対象とした数値実験を行った(数値実験I)。次に、外海水進入の季節変化特性を把握するために、1998年1年間の

各月についての外海水進入実験を行った(数値実験II)。

数値実験Iでは、初期条件として1998年8月における内湾域の塩分・水温鉛直分布を前述のように観測データに基づいて与えた上で河川流量を作用させ、外海域については計算開始から10日間は8月の外海水条件(Sta. 29の観測値)を、その後10日間(計算開始後10~20日)に9月の外海水条件を作用させることで、8月から9月への外洋変動に伴う外海水進入特性の変化を調べた。また数値実験IIでは、1998年各月における内湾域の平均的な塩分水温を初期条件とし、河川流量を与えた上で、各月の外海水条件(Sta. 29の観測値)を12日間作用させて外海水進入特性を調べた。

3. 数値計算結果と考察

(1) 外海水中層貫入現象の空間構造(数値実験I)

はじめに外海水進入の空間構造を把握するための数値実験(数値実験I)の結果について示す。前節で述べたように、数値実験Iでは計算開始後10日まで8月の外海水条件を、10日以降に9月の外海水条件作用させている。計算結果を詳細に検討すると、流動場は計算開始後10日までに8月の外海水条件に対してほぼ平衡な状態に達しており、11日以降に9月の外海水条件に対応するような流動場の変化が現れ、20日後にはほぼ平衡な状態に達していた。そこでここでは、計算開始後10日以降の結果を用いて、8月から9月への流動場の変化を示す。

図-2に、計算開始後10, 15, 20日の表層塩分と表層

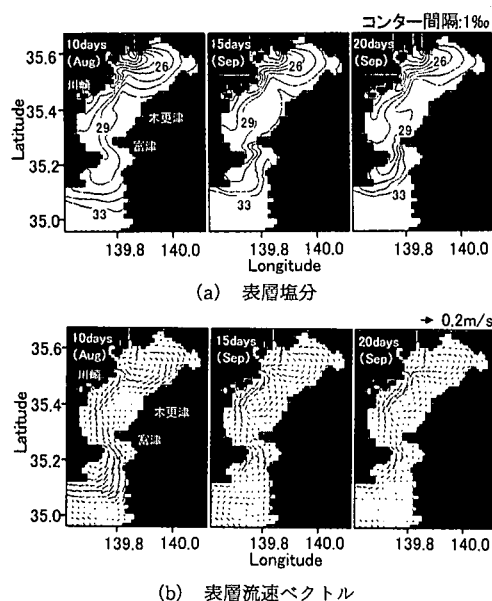


図-2 表層塩分と表層流速ベクトル(数値実験I)

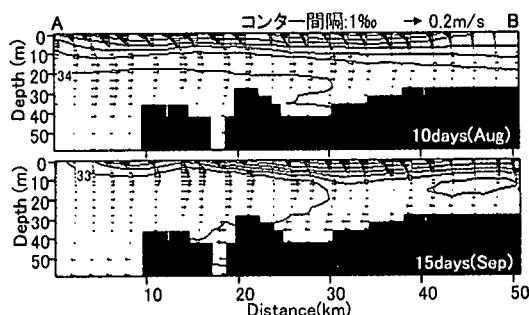


図-3 塩分と南北流速成分の湾軸断面内分布(湾軸 LineAB, 数値実験I)

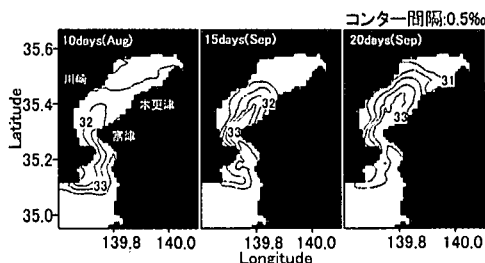


図-4 中層(水面下12m)の塩分平面分布(数値実験I)

流速ベクトルを示す。8月の外海水条件に対してほぼ平衡な状態に達している10日目を見ると、i)湾奥部に広がる低塩分水とそれに対応した時計回り環流の形成、ii)神奈川県側に沿った南下流の発生とそれに伴った低塩分水の流出、という成層期における東京湾の基本的な特徴が現れている。外海水条件が9月になった後(15, 20日目)も表層部の特徴には大きな変化は見られないが湾奥部の時計回り環流が弱くなる傾向が見て取れる。図-3に、流速(南北成分)と塩分の湾軸方向断面図(湾軸位置は図-1参照)を示す。これを見ると、10日目(8月)には表層で湾外へ流出、下層で湾内へ流入する典型的なエスチュアリー循環が形成されているのに対して、外海水特性が9月になると中層に高塩分水が流入、表層と底層で流出する3層構造に変化しており、中層貫入現象が発生したことがわかる。図-4は、水面下12mの位置における塩分の平面分布である。外海水条件の変化に対応して計算開始後15, 20日(9月)には33‰以上の高塩水が湾内に進入しており、平面構造の特徴としては高塩分水が千葉県沿岸に寄った形で湾内に進入する傾向がある。さらに外海水進入の空間構造の詳細を把握するために、流速(南北成分)の東西断面分布特性を湾内の3つの断面について調べた(図-5、断面位置は図-1参照)。

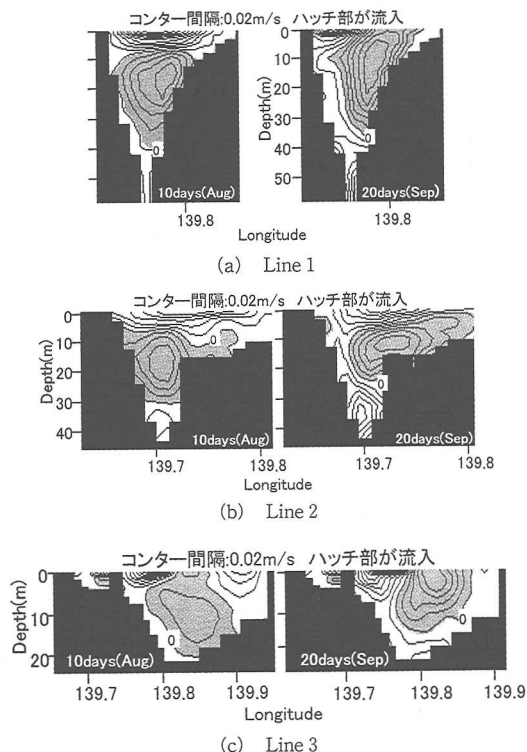


図-5 流速(南北成分)の東西断面分布(数値実験I)

これを見ると、湾口付近の断面(Line 1)では、10日目(8月)には表層流出・下層流入のエスチュアリー循環構造が発達しているが、外海水条件が9月になると流入流速が大きくなるのと同時に外海水の流入部分が東側(千葉県側)にシフトし、西側(神奈川県側)では全水深的に流出する形に流速構造が変化している。Line 2では10日目(8月)には水深の大きい部分を中心に下層流入となっているが、外海水条件が9月になると流入部の中心が千葉側の浅海域に乗り上げ、水深が大きい部分の下層で流出になっている。また、湾中央部のLine 3でも、8月から9月にかけて流入部の位置が東側にシフトすることで、西側海域で全層的に流出、東側海域で流入になっている。このように、中層貫入現象発生時には外海水が東側(千葉県側)に寄った形で内湾域に進入することが特徴であり、これは中層貫入する外海水が地球自転の効果



図-6 中層貫入現象発生時の流動構造の概念図

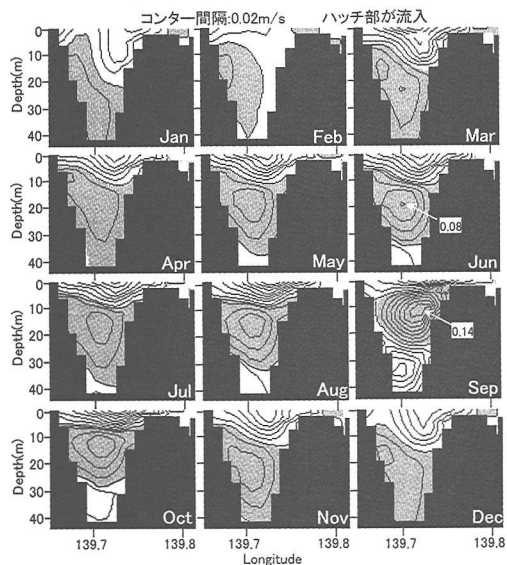


図-7 1998年各月に対する南北流速成分の東西断面分布 (Line-A, 数値実験II)

(コリオリ力の影響)によって流向を変化させることが原因と考えられる。上記のような中層貫入水の断面構造は、日向ら (2001) の観測結果ともその特徴がよく一致している。中層貫入発生時の外海水進入と内湾水流出の特徴をまとめると図-6 のようになる。

(2) 外海水進入の季節変動特性 (数値実験 II)

次に、外海水進入の季節変動特性を把握するための数値実験IIの結果を示す。図-7 は、1998 年 1 年間の各月に対する湾口部の東西断面 (Line A、図-1 参照) 内の流速分布 (南北成分) を示したものである。これを見ると、湾口部における外海水流入・内湾水流出の空間構造の 1 年間を通した特徴として、夏季には流入流速が相対的に大きく冬季に小さくなる傾向が見て取れる。さらに詳細に各月の特徴を比較すると、前節で中層貫入現象を検討した 9 月に流入速度が最大となっており、外海水流入の中心位置も他の月に比べて水面に近い傾向があること、9 月以外では 6 月も比較的流入流速が大きいことがわかる。図-8 は、今回の数値実験で外海境界条件とした観測点 St. 29 (図-1 参照) の塩分・水温の鉛直分布を成層期である 4 月～9 月について示したものである (観測点 Sta. 29 の水深 600 m のうち表層 100 m のみ表示)。これを見ると、外海水流入速度が大きく顕著な中層貫入パターンを示した 9 月及び進入速度が比較的大きい 6 月には、水面下 80 m 程度まで高温・低塩分化の傾向があり、その分布形から表層で鉛直混合が促進されたことが示唆

される。

中層貫入現象の発生原因としては、黒潮フロントの接岸などの外洋影響の可能性が Yanagi ら (1989) によって指摘されているがここでは外海表層水の季節変化に着目してさらに検討を行った。図-9 は、東京湾の外海水特性を表す観測点 Sta. 29 の塩分・水温鉛直分布の年間変動特性を 1995～1999 年の 5 年間について表示したものである。これを見ると、年によって多少差があるものの秋季 (9, 10 月; 図-9 の点線部) には表層 50～100 m のスケールで高温、低塩分化する傾向がある。さらに、外海水の内湾への進入を考える上では、外海水と内湾水の密度構造の違いが重要である (藤原ら, 2000b)。そこで東京湾外海域の観測点 (Sta. 29) と内湾域の観測点 (Sta. 129) の密度分布の特徴を 1995～1999 年の 5 年間について調べ、中層貫入現象発生時の特徴 (内湾底層密度 > 内湾域底層と同じ深度の外海域密度) を持つケースを調べると、1995 年 9 月、1996 年 10 月、1997 年 8 月、1998 年 6 月、1998 年 9 月の 5 ケースであった (図-10 参照)。こ

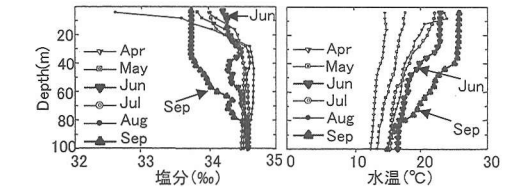


図-8 外海域観測点 (St. 29) における塩分・水温鉛直分布

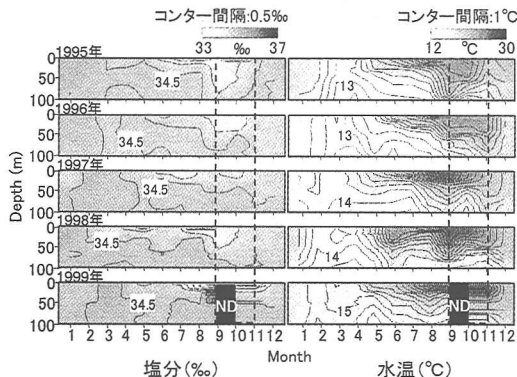


図-9 外海域観測点 (St. 29) における 1995～1999 年の塩分・水温の時空間分布

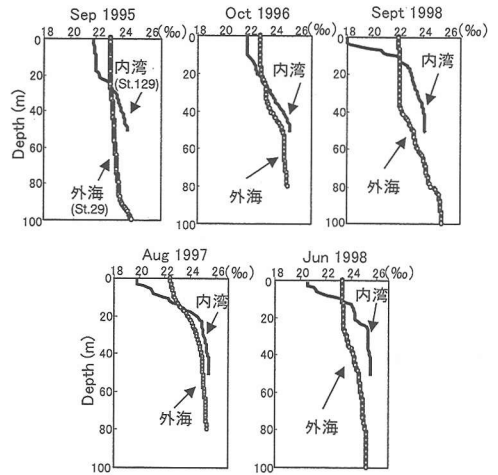


図-10 外海域観測点 (Sta. 29) と内湾域観測点 (Sta. 129) の密度鉛直分布の比較 (内湾底層密度 > 同じ高さの外海域密度のケース)

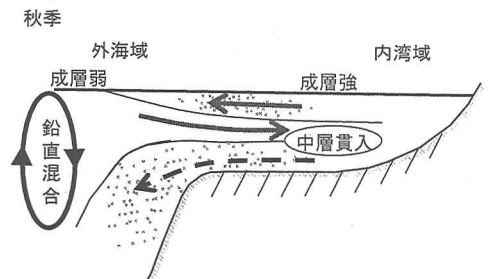


図-11 秋季の中層貫入現象発生時における流動構造の概念図

のうち3ケースが9, 10月(秋季)であり, 秋季には内湾域に密度成層が比較的維持された状態で外海水表層の鉛直混合が進むためにこのような密度構造が形成されたと考えられる。これは, 秋季には海面冷却が進行するため外洋水表面の鉛直混合が促進されるのに対し, 内湾域は河川流量の増加などで密度成層が比較的維持されることが原因であり, このような内湾域と外海域の成層構造の違いが中層貫入現象が発生する上で重要な環境要因であると考えられる(図-11)。以上の事実は黒潮フロント接岸などの間欠的な外洋影響に加えて, 外海水表層水の成層構造の季節変動も中層貫入現象発生にとって重要な要素であることを示している。

4. ま と め

本研究では, 東京湾における外海水進入特性を調べるために3次元流動モデルに基づく数値実験を行った。その結果から得られた外海水進入の特徴は以下のとおりである。

(1) 外海水中層貫入現象発生時の空間構造として, 湾内東側(千葉県側)中層に外海水が流入, 西側(神奈川県側)表層, 底層から湾内水が流出する性質があり, これは現地観測によって得られている傾向と一致する。また, 外海水中層貫入現象発生時には, 湾奥部に形成される時計回り環流の大きさや強度が変化する。

(2) 1998年1年間の各月の解析から, 中層貫入現象発生時の外海水は, 水面下80m程度まで鉛直混合によると考えられる高温・低塩分化が進んでいることを示した。さらに1995年~1999年の5年間の東京湾外海水と

内湾水の塩分水温比較解析から, 秋季(9, 10月)には, 外海域においては前述のような表層混合が進むが, 内湾域では河川水影響等で成層が維持されるために, 外海水中層貫入現象が発生しやすい密度構造となることがわかった。このことは外海水中層貫入現象の発生要因として, 黒潮フロントの接近など間欠的な外洋影響に加えて, 外海水表層水の成層構造の季節変動も重要な要素である事を示唆している。

謝辞: 本研究を行う上で海洋観測データを提供して頂いた神奈川県水産総合研究所に謝意を表します。本研究は文部省科学研究費基盤研究(c)『多重スケール沿岸海洋モデル構築に基づく外海栄養塩流入フラックス算定の試み』(代表者: 八木 宏, 課題番号: 13650563)の補助を受けて行われたものである事をここに付記する。

参 考 文 献

- 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水温沿岸水波及時における成層期東京湾内の流動構熱物質輸送特性, 土木学会論文集, No. 684, II-56, pp. 93-111.
- 藤原建紀・高橋鉄哉・山田佳昭・兼子昭夫 (2000a): 東京湾の貧酸素水塊に外洋海況変動が及ぼす影響, 海の研究, Vol. 9, No. 6, pp. 303-313. 431-435.
- 藤原建紀・佐々倉諭・高橋鉄哉・山田佳昭 (2000b): 東京湾における外洋水進入深度の算定法とその季節変化, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 431-435.
- Yanagi, T., H. Tamura, T. Ishimaru and T. Saino (1989): Intermittent outflow of high-turbidity bottom water from Tokyo Bay in summer, La Mer, Vol. 27, pp. 34-40.