

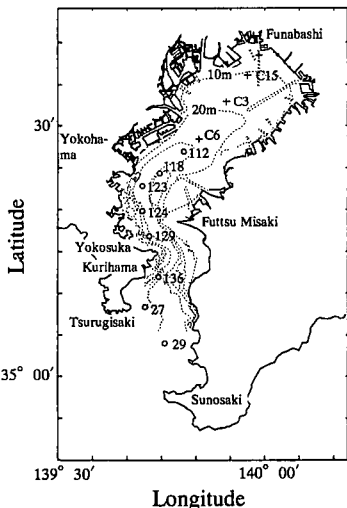
東京湾における外洋水の進入深度の算定法とその季節変化

藤原建紀*・佐々倉 諭**・高橋鉄哉**・山田佳昭***

1. はじめに

湾奥部に河川水が流入する内湾では、水平的な密度勾配が生じ、これがエスチュアリー循環流を起こす。外洋水が湾内水よりも重ければ、湾内水は表層から流出し、底層から外洋水が進入することになる。しかし、湾内水と外洋水の密度は、それぞれ異なる季節変化をするため、外洋水の進入深度も季節により変化すると考えられる。夏季の東京湾では、黒潮フロントが接岸すると暖水がその密度と等しい密度をもつ湾内中層に流入することが報告されている (Yanagi *et al.*, 1989)。しかし、年間を通じて流れを実測することは多大な労力を要するため、外洋水の進入深度が季節によりどのような変動をするかは不明な点が多い。

本研究では、湾内・湾外の水平圧力勾配から外洋水の進入深度を算定する方法を用いて、東京湾湾口部における外洋水の進入深度の季節変化を明らかにした。



図一 東京湾の地形と等深線および測点位置
+は千葉県水産試験場, Oは神奈川県水産総合研究所の測点位置を示す

* 正会員 農博 京都大学大学院助教 農学研究科海洋生物環境学
** 京都大学大学院農学研究科海洋生物環境学
*** 神奈川県横須賀三浦地区農政事務所

2. 方 法

(1) データ

解析には、神奈川県水産総合研究所が多項目水質計 (SEA-BIRD ELECTRONICS 社製 SBE-911 plus) を用いて 1995 年から 1999 年の間に行った浅海定線調査、および 1998 年、1999 年に 5 月から 10 月にかけて月に約 2 回の頻度で実施した水質調査のデータを用いた。測定間隔は 1 m であり、解析に使用した項目は水温、塩分である。また、湾奥部の測点として、千葉県水産試験場富津分場が行った定線調査のデータも併せて用いた。測点を図一に示す。

(2) 外洋水の進入深度の算定法

東京湾のように水平的な圧力勾配のある水路における密度流は、定常状態では、

$$\frac{\partial P}{\partial x} = g\rho \frac{\partial \eta}{\partial x} + g \int_0^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \rho \frac{d}{dz} \left(N_z \frac{du}{dx} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

で表される (Officer, 1976)。ここで水路の流軸方向を x 方向、海面から鉛直下向きを z 方向とし、 P は圧力、 ρ は海水の密度、 N_z は鉛直渦動粘性係数であり、 u は x 方向の流速、 g は重力加速度、 η は静止水面から計った水面の高さである。流れの駆動力 ($-\partial P/\partial x$; 単位体積の海水に働く力) は順圧成分と傾圧成分に分けられる。順圧とは海水の密度が圧力のみの関数で表される場合であり、傾圧成分の駆動力は深さ方向に一定となる。一方、傾圧とは海水の密度が圧力の他に水温や塩分の関数で表される場合である。傾圧成分の駆動力は深さと共に変化する。(1) 式の圧力勾配から、鉛直平均値を引くことにより、駆動力の傾圧成分を求めた。

3. 結 果

図二に、1998 年 9 月 7 日の横須賀沖 (Stn. 129) および久里浜沖 (Stn. 136) の密度と、この測点間から求めた横須賀沖における流れの駆動力および計算流速の鉛直プロフィールを示す。流速は、 $N_z = 0.01 \text{ m}^2/\text{s}$ 、海底摩擦係数 $= 0.0026$ として (2) 式から求めた。密度は表層 (水

深5 m以浅)と底層(水深35 m以深)では久里浜沖の方が高くなっており、中層では横須賀沖の方が高くなっている。流れの駆動力は一般的なエスチュアリー循環流とは異なり、流入・流出方向のピークはそれぞれ2つずつ見られる。流入の一つ目のピークは、横須賀沖と久里浜沖の密度が等しくなる水深10 m付近に見られる。日向ら(1999)は1998年9月8日、9日にADCPによる流動観測を行った。このとき磯子一中ノ瀬間で躍層直下に30 cm/sの強い流入を観測している。

湾外水が湾内に進入するとき、等密度線に沿って進入すると考えられる。これは(1)式を z で微分すると、

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) = g \frac{\partial \rho}{\partial x}$$

となり、 $\partial \rho / \partial x$ が0となる水深では流れの駆動力($-\partial P / \partial x$)が極値をとるためである。

圧力勾配から流速を求める際、 N_z の値が重要となるが、成層海域で N_z を精度良く求めることは困難なため、以下では実測値のみから求められる駆動力の傾圧成分を用いる。駆動力と流速のプロファイルが完全に一致するわけではないが、前者は後者を近似的に表している。

(1) 横須賀沖における水温の季節・年変化

まず、東京湾湾内の海況変動を理解するため、1995年から1999年までの横須賀沖(Stn. 129)における水温の季節変化について述べる(図-3)。湾内の水温は、表層では2月に最低、8月に最高となり、11月から3月には水温逆転が見られる。ここで、最も注目したい現象は、夏季、底層において急激な水温低下が発生していることである。水温低下現象は多くの年に現れており、東京湾では一般的な現象であることがわかる。また、頻度の高い観測を行った1999年では、水温の上昇・下降が頻繁に見られ、短い周期で変動していることがわかる。

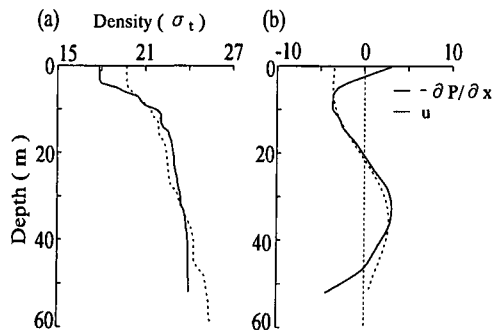


図-2 (a)横須賀沖(実線)と久里浜沖(点線)の密度(単位: σ_t)、(b)横須賀沖における密度流の駆動力(実線, 単位: 10^{-3}Nm^{-3})と計算流速(点線, 単位: cm s^{-1})。湾内流入が負

(2) 進入深度の年変化

1995年から1999年までの横須賀沖における流れの駆動力を図-4に示す。外洋水の進入深度は水温と同様、年、季節により大きく変動している。しかし、表層では年間を通じてエスチュアリー循環流のため常に流出傾向を示している。河川流量が増加する6月から10月には、表層で水平密度勾配が大きくなるため、駆動力も大きくなる。また冬季(11月から3月)には底層で流入方向となる様子が全ての年で共通している。1998年に注目すると、春季から秋季(4月から10月)にかけて、流入層は底層、中層と交互に変動していた。

(3) 進入深度の季節変化

以下では変動の激しい1998年の季節変化について記す。2月2日の水温、塩分、密度の縦断分布、および横須

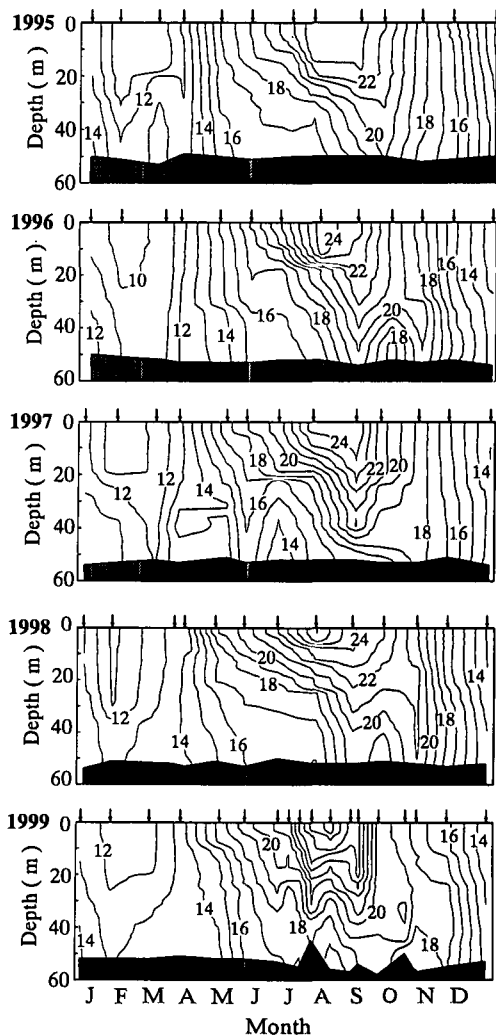


図-3 横須賀沖における水温の季節変化、図上の矢印は観測日を示す

賀沖の流れの駆動力を図-5に示す。2月には湾内・湾外とも成層が非常に弱くなっている。湾内は湾外に比べ、全層で低温低塩分となっている。密度は湾内の方が全層で湾外よりも低くなり、流れの駆動力は表層で流出、底層で流入方向に働いている。しかし、湾内・湾外の密度差は小さいため、駆動力は弱い。

次に、変動の激しい強成層期の海洋構造について述べる。図-6は6月1日の水温、塩分、密度の縦断分布および横須賀沖の流れの駆動力である。湾内は強く成層しており、表層は気からの加熱および湾奥部からの淡水供給のため高温低塩分となっている。湾内底層には16°C以下の冷たい水塊が存在している。湾外上層には高温高塩分な外洋系水が存在する。湾外水と湾内水の密度を比較すると、表層では湾外の方が高く、底層では湾外の方が

低くなっている。このため、駆動力は湾内水・湾外水が等密度となる密度躍層付近(水深約15 m)で、流入方向の極大となっている。8月5日には湾内・湾外とも成層

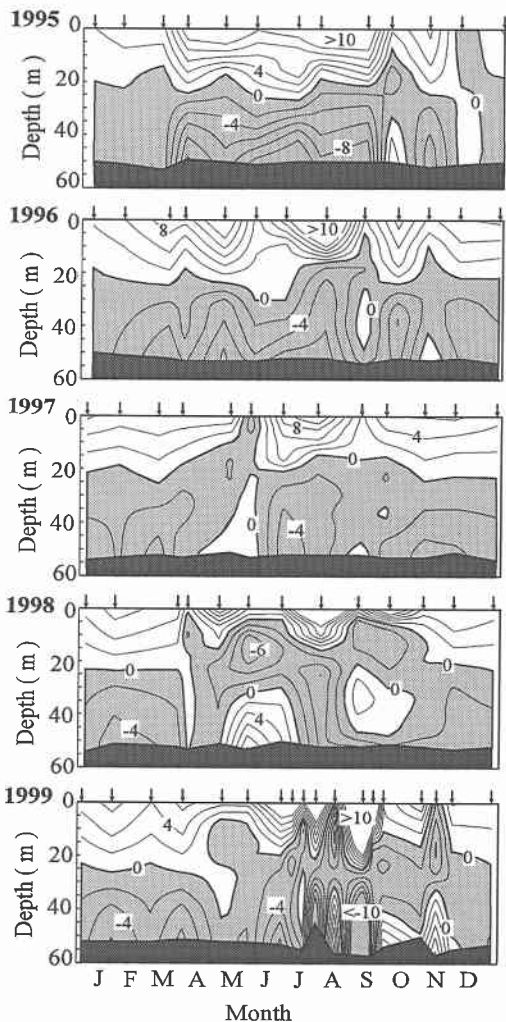


図-4 横須賀沖における流れの駆動力(単位: 10^{-3}Nm^{-3})。流入方向が負(陰影部)。図上の矢印は観測日を示す

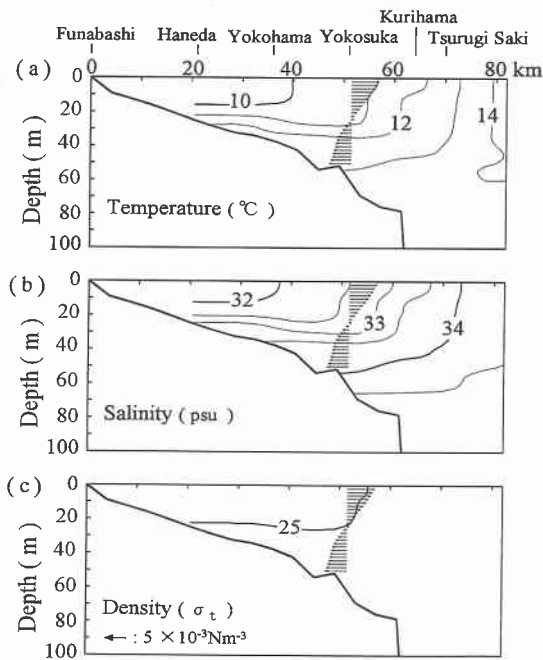


図-5 1998年2月2日における(a)水温、(b)塩分、(c)密度の縦断分布および流れの駆動力ベクトル(矢印);ベクトルのスケールを図の左下に示す

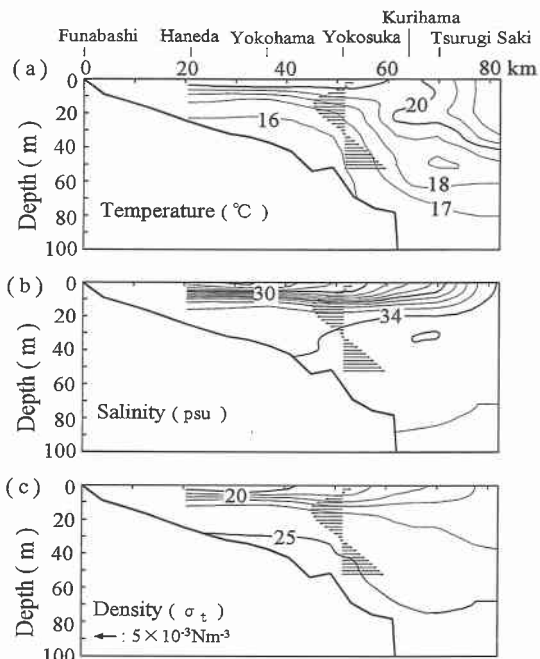


図-6 図-5と同様。ただし1998年6月1日

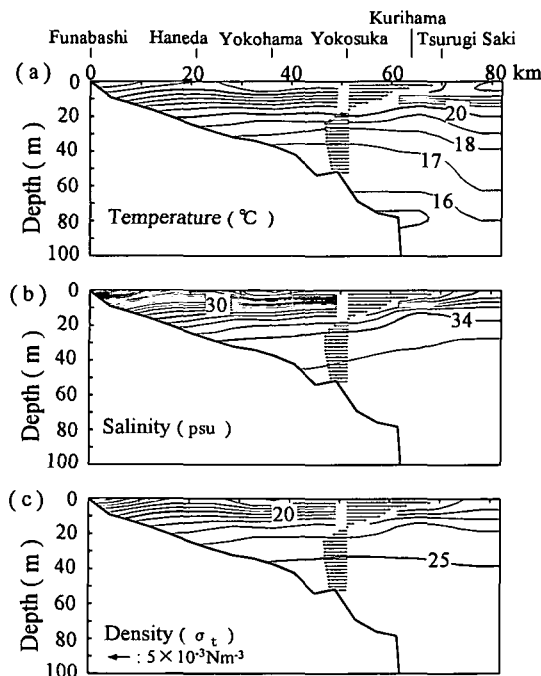


図-7 図-5と同様。ただし1998年8月5日

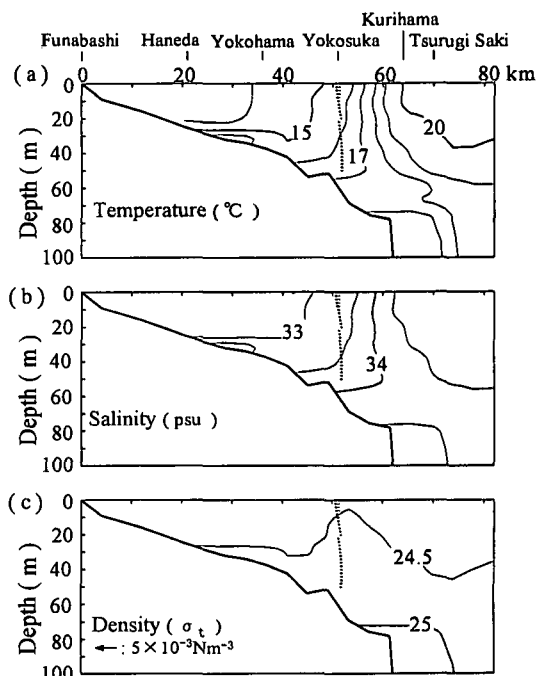


図-8 図-5と同様。ただし1995年12月4日

が強く発達している(図-7)。湾外中層(水深20-60 m)では、昇温期にも関わらず水温は6月よりも低下しており、塩分は6月よりも高くなっている。このため湾外水の方が湾内水よりも高密度となっており、駆動力は底層で流入方向を示している。

4. 考 察

このように、外洋水の進入深度は季節により大きく変動している。この機構を以下に述べる。

冬季には全ての年において駆動力は底層で流入方向に働いていた。大気からの海面冷却の影響により、対流が発生し、湾内・湾外とも鉛直一様な海洋構造となる。容積が小さく、淡水供給のある湾内は、低温で低塩分となる。密度では湾内全層で湾外よりも低くなり、流れの駆動力は上層で流出方向、底層で流入方向に働くこととなる。しかし、1995年12月のように、冬季においても、表層で流入方向となる時がまれに見られる。このとき、剣崎沖の水温は11月に比べて高くなっており、黒潮系の暖水が波及してきたものと考えられる(図-8)。湾口部に水温および塩分の急な勾配ができ、その急変帯において密度の極大が見られ、熱塩フロントが現れている。このようなフロント域においては、水平的な密度勾配は小さいため流れの駆動力も小さい。このため外洋水は夏季に比べて、湾内に進入しにくくなると考えられる。

夏季は年変動が激しく、1998年では底層進入、中層進

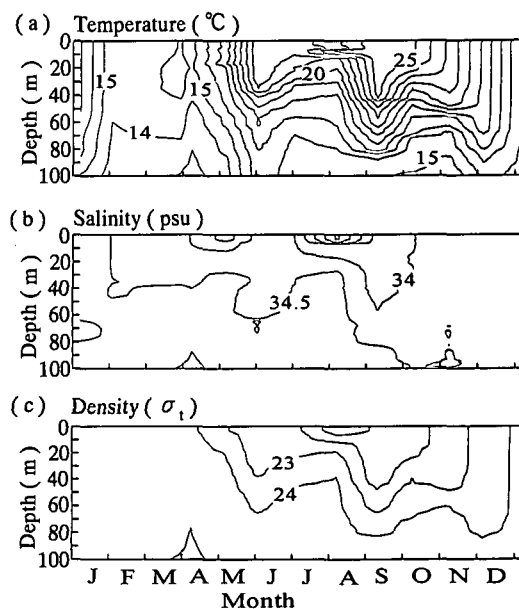


図-9 測点29における(a)水温、(b)塩分、(c)密度の季節変化

入と進入モードが交互に入れ替わっていた。この年の、最も沖合に位置する測点(Stn. 29)における海況変動を図-9に示す。この測点の水深は約600 mあるが、図には100 mまでを表示している。水温は3月から徐々に上昇し、6月には急激に上昇している。この急激な水温上昇

は水深 500 m 付近にまで達しており、黒潮系の暖水が波及してきたと考えられる。そのため、湾外の密度は小さくなり、流れの駆動力は中層からの進入を示した。その後、中層(水深 20~400 m)で水温は徐々に低下し、塩分は上昇している。この現象は湾内(図-3)よりも湾外で顕著に現れており、外洋水が湧昇したと考えられる。そのため、湾外中層の密度は湾内底層より大きくなり、駆動力は底層で流入方向を示した。東海・関東沿岸海域において夏季に 20~200 m 層付近で、水温が低下する現象は、これまでしばしば観測されており、“水温第 2 極小”と呼ばれている(中村, 1977; 宇野木・海野, 1983)。水温第 2 極小は本観測期間においても多くの年で現れており(図-3)、夏季における外洋水の底層進入に大きく影響していると考えられる。

その後 9 月 7 日には水温の急激な上昇が見られる。しかし、6 月の水温上昇とは異なり、水温が上昇した水深は 80 m 以浅であり、この層では塩分も低下している。黒潮からのストリーマー的な暖水波及および台風 4 号や前線の通過による河川水の出水、風や海面冷却による鉛直混合が湾外の水温上昇、塩分低下を引き起こしたと考えられる。

夏季、東京湾の底層には貧酸素水塊が形成される。貧酸素水塊の挙動は、湾内への外洋水の流入・後退にともない、大きく変動することが報告されている(藤原ら, 2000)。外洋水が底層から流入すると、貧酸素水塊は上層に持ち上げられ、中層貧酸素水塊を形成する。また流入した外洋水が後退する際には、貧酸素水塊は底層から湾外に流出する。貧酸素水塊は底生生物の生息環境に影響を及ぼすだけでなく、リン・アンモニア等を豊富に含んでいるため、貧酸素水塊の上昇は一次生産にも影響を与えると考えられる。

5. ま と め

湾口部の水平圧力勾配から、外洋水の進入深度を算定する方法を用いて、東京湾における進入深度の季節変化および年変化を明らかにした。本手法では 2 点の CTD データから容易に流れの駆動力を算定できる。本手法は外洋系水の進入深度やその季節変化を解明する上で有効である。

流れの駆動力は、夏季には変動が激しい。1998 年では中層進入、底層進入と進入モードが交互に入れ替わっていた。外洋での湧昇等により、湾外水が湾内底層水よりも高密度になると底層進入モードとなり、黒潮系の暖水波及等により、湾外水が湾内底層水よりも低密度になると中層進入モードとなる。

冬季には全ての年において底層進入モードとなっていた。しかし黒潮系の暖水が波及すると中層(上層)進入モードとなる事例が見られた。

進入モードの入れ替わりは、湾内の水質変動、生物生産に大きく影響すると考えられる。

参 考 文 献

- 宇野木早苗・海野 裕 (1983): 東海・関東沿岸海域における暖候期の低温化現象, 水産海洋研究会報, 第 44 号, pp. 17-28.
中村保昭 (1977): 駿河湾ならびに隣接海域の海況変動, 水産海洋研究会報, 第 30 号, pp. 8-38.
日向博文・灘岡和夫・田淵広嗣・吉岡 健・古川恵太・八木 宏 (1999): 東京湾における成層期流況の動的変動過程について, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 451-455.
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およぼす影響, 海の研究, (投稿中).
Officer, C. B. (1976): *Physical Oceanography of Estuaries*, 1st ed., John Wiley & Sons, pp. 112-129.
Yanagi, T., H. Tamaru, T. Ishimaru and T. Saino (1989): Intermittent outflow of high-turbidity bottom water from Tokyo Bay in summer, *La mer*, 27, pp. 34-40.