

陸岸に囲まれた潮汐フロント域における物質輸送機構

小林志保¹・藤原建紀²・高杉由夫³

瀬戸内海中央部の潮汐フロント域において密度流の実測を行い、数値モデルとあわせてフロントを横切る方向に流れが生じる機構を明らかにした。潮汐フロント域では水平密度勾配に起因する密度流が生じる。流れの主成分は地球自転の効果によってフロントに沿う方向となる。しかしそれが陸岸に達した後は岸に沿って流れるため、フロントを横切る方向となる。この機構によって、フロントを横切る物質輸送が生じる。これは陸岸に囲まれた潮汐フロント域に共通するメカニズムであると考えられる。

1. はじめに

成層域の陸棚海域においては、海面加熱によって形成された成層が潮汐混合の影響によってところどころ壊され、成層域と混合域の境界には潮汐フロントが形成される。フロント近傍の成層域の垂表層から中層には、しばしば生物生産の極大層が形成される (Le Fevre, 1986)。このような極大層を説明するためには、混合域側から成層域中層への栄養塩の水平的な供給が重要である。このとき栄養塩の水平的な供給量に大きな影響を与えるのはフロントを横切る方向の流れ (cross-frontal transport) である。しかし、水平密度勾配によって生じる密度流は地球自転の効果によって地衡流としてフロントに沿う方向になるため、フロントを横切る方向の流れはきわめて小さくなる。このため、フロントを横切る物質輸送については不明点が多い。本研究では、本州・四国・九州に囲まれた半閉鎖性の陸棚海域である瀬戸内海を対象海域とする。成層期の瀬戸内海においては、灘部と海峡部の境界に強い水平密度勾配をとまう潮汐フロントが形成される。このような潮汐フロント域において密度流の実測を行い、数値モデルとあわせてフロントを横切る方向に流れが生じる機構を明らかにする。また、そのようなフロント域の流れが物質輸送に与える影響を示す。

2. フロント域における密度流の実測

2005 年 9 月 20 日に、瀬戸内海の備讃瀬戸と播磨灘の境界にあたる海域において、2 隻の船舶 (観測船 A・B) によって観測を行った。測点を図-1 に示した。観測船 A では水路の横断線 (測線 A) を 13 時間連続で往復し、RD Instrument 社製 ADCP (600Hz) による流動観測、アレック電子社製クロロテック (ACL1180-DK) による水温・塩分・クロロフィル蛍光・濁度の測定を行なっ

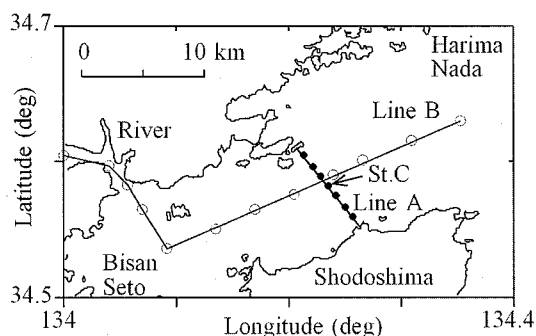


図-1 瀬戸内海中央部潮汐フロント域における観測点。白丸は CTD 観測を行なった測点、黒丸は ADCP 等連続観測を行なった測点を示す。

た。またアレック電子社製浮上式乱流微細構造観測プロファイラ (TurboMAP4) により乱流エネルギー散逸率の計測を行った。計測した乱流エネルギーの散逸率 ε から、Osborn・Crawford (1980) による (1) 式を用いて鉛直拡散係数 K_z を見積もった。

$$K_z = 0.2\varepsilon / N^2 \dots\dots\dots (1)$$

ここで N^2 はブラントバイサラ振動数である。また観測船 B では水路の縦断線 (測線 B) を航走し、CTD による水温・塩分の測定を行った。

図-2 に、CTD により得られた水路の縦断面 (測線 B) の物理構造を示す。図の左側 (西側) の備讃瀬戸では水温が鉛直一様であり、図の右側 (東側) の播磨灘では水温が上層で高く下層で低い成層状態を示していた。密度分布も水温分布と同様に、備讃瀬戸が強混合域、播磨灘が成層域となっていることを示しており、両者の境界にはフロントが形成されていた。また、図の左端から流入する河川が淡水の供給源となっており、低塩分水が上層を東に向かって流出する構造になっていた。

図-3(b) に、測線 A の中央の点 (測点 C) における、鉛直拡散係数 K_z (m^2s^{-1}) の時間変化を示す。下層では観測期間を通じて鉛直拡散係数が大きな値となっていた。これは潮流と海底との摩擦により生じる乱流エネルギー

1 農修 京都大学助手大学院農学研究科
2 正会員 農博 京都大学教授大学院農学研究科
3 正会員 農博 (独)産業技術総合研究所

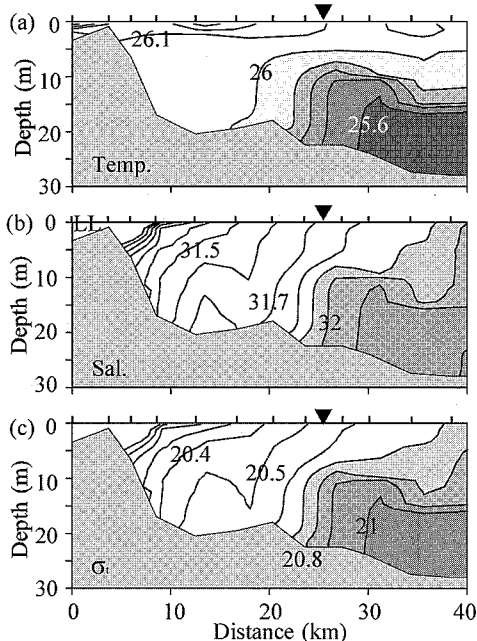


図-2 測線Bにおける(a)水温, (b)塩分, および(c)密度(σ_t)の分布. 図中の▼は測線Aの位置を示す.

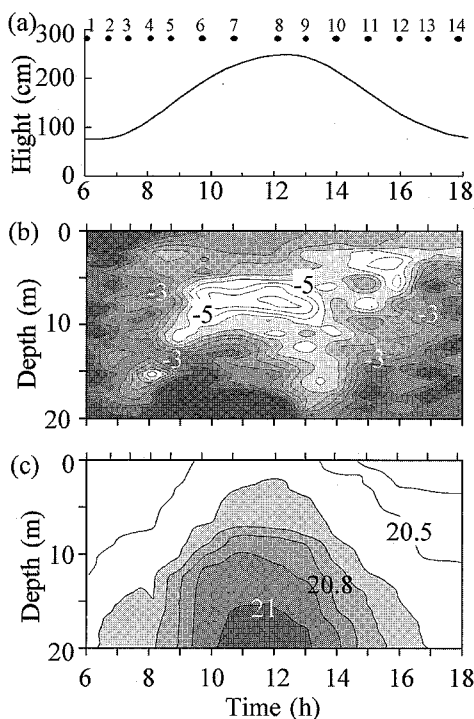


図-3 (a) 高松における2005年9月20日の予報潮位. 図中の黒丸の位置は測点Cにおける観測時刻を, 添え字は観測番号を示す. (b) 測点Cにおける鉛直拡散係数($\log_{10} K_z$)および(c)密度(σ_t)の時間変化.

の散逸によると考えられた. 一方, 中層から上層においては, 干潮時に最も大きく, 上げ潮時に小さくなって満潮時に最小となり, 下げ潮まで比較的小さな値が続き, 次の干潮時に再び大きくなるという潮汐周期の変化が見られた. これは干潮時には混合域側の水塊が, 満潮時には成層域側の水塊が調査定点を通ったことによるものと考えられた. 層間の摩擦にともなう中層での乱流エネルギーの散逸は観測されず, 調査定点への乱流エネルギーの移流がとらえられていると考えられた. これらの結果から, 鉛直拡散係数の値は, 混合域および成層域下層では $10^{-2} \sim 10^{-3.5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, 成層域上層では $10^{-3.5} \sim 10^{-6.5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ と見積もられた.

図-4に, 測点CにおいてADCPにより測定された流速の時間変化を示す. 調和解析により求めた M_2 潮の長軸方向は, 北から時計回りに 76° となり, ほぼ水路に沿う方向であった. ここでは, 流速ベクトルを長軸方向と短軸方向とに分け, 図-4(a)では長軸方向の成分を, 北から時計回りに 76° の方向を正, その線対称の方向を負として示した. また図-4(b)では短軸方向の成分を, 北から反時計回りに 14° の方向を正, その線対称の方向を負として示した. 長軸方向の流れはほぼ鉛直一様であるとともに, 周期的な変動を示しており, 潮流が支配的な成分となっていると考えられる. 一方, 短軸方向の流れは, 上層と下層で大きく異なっていた. 上層の流れは流速 $5 \sim 10 \text{ cm s}^{-1}$ で水路を横切って南下する方向であり, 下層の流れは流速 $10 \sim 20 \text{ cm s}^{-1}$ で水路を横切って北上する方向であった.

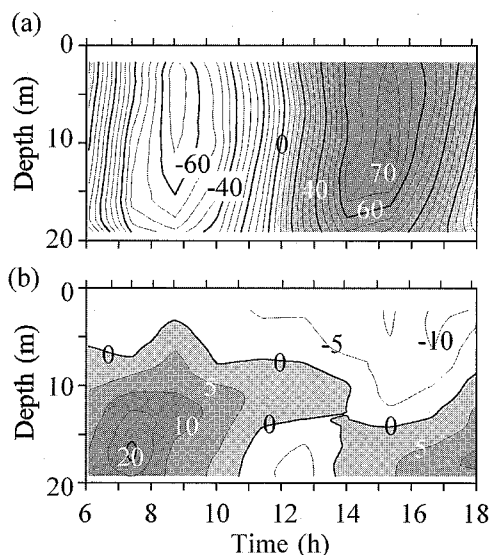


図-4 測点Cにおける流速 (cm s^{-1}) の時間変化. (a) は長軸方向, (b) は短軸方向の成分を示す. コンター間隔はともに 5 cm s^{-1} である.

図-5に、測点Cの1/2水深(10 m)における流れを、進行ベクトルとして示した。横軸は東向き成分、縦軸は北向き成分である。この点における Tidal excursion は、約 10 km であった。したがって、図-2の縦断面図において水温 26℃ の等値線と海底が交わる付近にある bottom front は、一潮汐の間に約 10 km 移動すると考えられる。また図-3(c)において、測線 A の中央の点(測点 C)では干潮時に混合域側の水塊が観測されていることから、フロントは干潮時には測線 A よりも東側に位置していたと考えられる。これらを用いて、図-3および図-4の横軸を距離に置き換えると、フロントと短軸方向の流れの位置関係は図-6のようになる。フロント付近には、水路を横切る方向に上層ではほぼ南向き、下層ではほぼ北向きの密度流ジェットが形成されていたと考えられる。

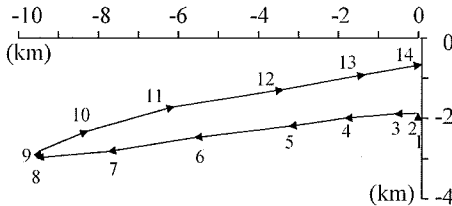


図-5 測点Cの1/2水深(10m)における流れの進行ベクトル。ベクトルに添えた番号は、図-3(a)に示した観測番号を表す。

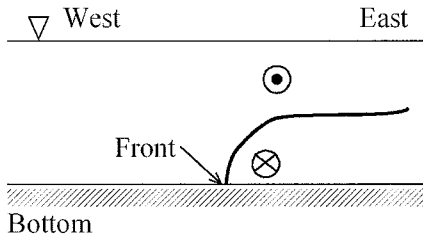


図-6 水路の縦断面におけるフロントと短軸方向の流れ。

図-7に、観測により得られた水温および塩分の横断分布の時間変化を示した。図-5に示したように、水塊は潮流によって東西方向に約 10 km 移動する。フロントが最も東に位置していた時(干潮時)、観測断面では混合域側の水塊が観測された。このとき低塩水は水路の北側に分布していた(図-7(a))。上げ潮時に観測断面をフロント付近の水塊が通過した際には、低塩水は上層全体に広がっていた。また低塩水の層厚は南側ほど厚くなっていた(図-7(b))。さらにフロントが最も西に位置していた時(満潮時)には、観測断面は成層域側の水塊をとらえており、このとき低塩水は南岸に押しつけられるように分布していた(図-7(c))。図-8は、この観測結果を、水路を上から見た模式図にまとめたものである。

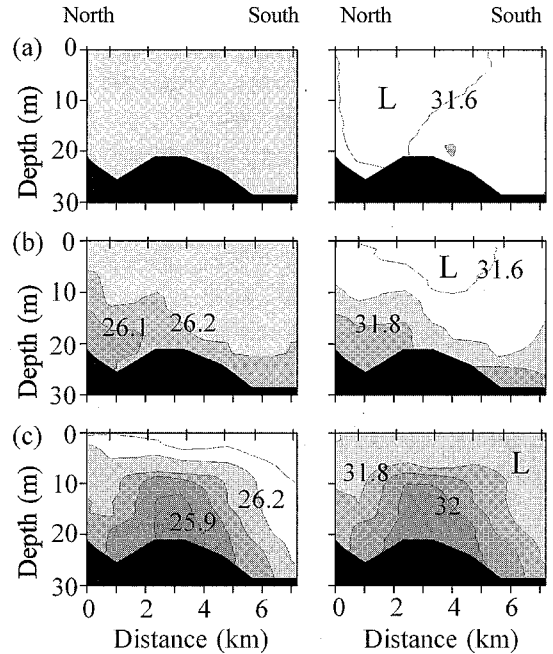


図-7 測線 A における水温(左列)および塩分(右列)の分布。(a)干潮時、(b)上げ潮時、(c)満潮時。

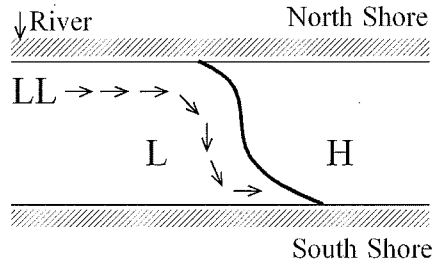


図-8 水平面の塩分分布。矢印は低塩水の動きを示す。

水路の西側で北岸から流入した低塩水は、フロント域で南下し、南岸に達した後は岸沿いに東へ向かって流出していたと考えられる。

3. 実地形モデルによる密度流の再現

f 平面、静水圧近似、Boussinesq 近似、北半球を想定した地球自転効果を加えた数値モデルを用いて上記の観測結果を再現した。モデル地形を図-9(a)に示す。メッシュサイズは鉛直方向に 1 m、水平方向に 1 km とした。図中の点線は測線 A の位置を示し、これより西側を混合域、東側を成層域とした。鉛直拡散係数には実測値を用い、混合域および成層域下層では $10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 、成層域上層では $10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ を与えた。鉛直粘性係数は鉛直拡散係数と同じ値とし、水平粘性係数・拡散係数については鉛直拡散係数の 10^4 倍の値とした。海面は自由表面であ

る。初期値および東西の境界密度には実測した密度を与えた。なお、開境界では潮汐による水位や流速の変動は与えていない。計算では、実測された海域間の水平密度差によって駆動される密度流を求めた。

海底摩擦には、流速に比例する形の摩擦を、Officer (1976) にしたがって与えた。これは、潮流による往復成分がある場における定常流成分（ここでは密度流）にはたらく摩擦力を求めるものである。以下に簡単に説明する。流速 U が、定常流 u と潮流 $U_{tide} \cos 2\pi t/T$ の和であるとする。ここで U_{tide} は潮流の振幅、 T は潮流周期、 t は時間である。ここで海底摩擦係数を γ^2 、海水の密度を ρ とすると、流速 U で動く海水に働く摩擦応力は $\gamma^2 \rho U^2$ となる。 $U_{tide} \gg u$ の条件下では、摩擦応力の潮汐周期平均は

$$\overline{\gamma^2 \rho U^2} = \gamma^2 \rho (\overline{u + U_{tide} \cos 2\pi t/T})^2 \cong 4\pi \times \gamma^2 \rho U_{tide} \times u \quad \dots\dots\dots (2)$$

と近似される。ここでバーは潮汐周期平均を表す。つまり、定常流成分が往復流成分の振幅よりもずっと小さいとき、定常流成分 u にはたらく摩擦応力は線形となり、その係数 ($4\pi^{-1} \gamma^2 \rho U_{tide}$) には潮流振幅が含まれる（詳しくは Officer, 1976）。 γ^2 は、一般的に使用される 2.6×10^{-3} とし、潮流振幅 U_{tide} には、この海域にお

る M_2 潮流振幅の代表的な値として 0.6 m s^{-1} を与えた。また、ここで用いた海底摩擦の与え方は、診断モデル（藤原ら, 1992）等において一般的に用いられている方法である。

上記のモデルにより流れが定常的になるまで計算を行い、密度流の流速を求めた。図-9(b) に計算された密度分布を示す。計算結果は、実測された密度分布とよく一致した。混合域と、成層域の間にあたる領域には潮汐フロントができていた。このときの流れを図-10 に示した。(a) は表層、(b) は海面下 16 m の流れを示す。表層ではフロント域で水路を横切って南下し、南岸に達した後、岸にそって東側に向かう流れが生じた。一方、海面下 16 m では、南岸に沿って西に向かう流れの一部がフロント域で水路を横切って北上し、北岸に達した後、岸沿いを西に向かって進んでいた。

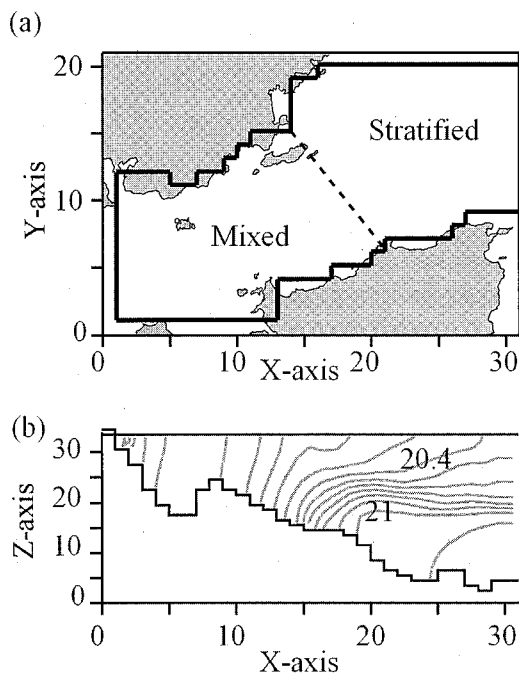


図-9 (a) モデル地形。図中の点線は測線 A の位置を示す。(b) 実地形モデルにより計算された縦断面 (Y=9 の位置) の密度分布。

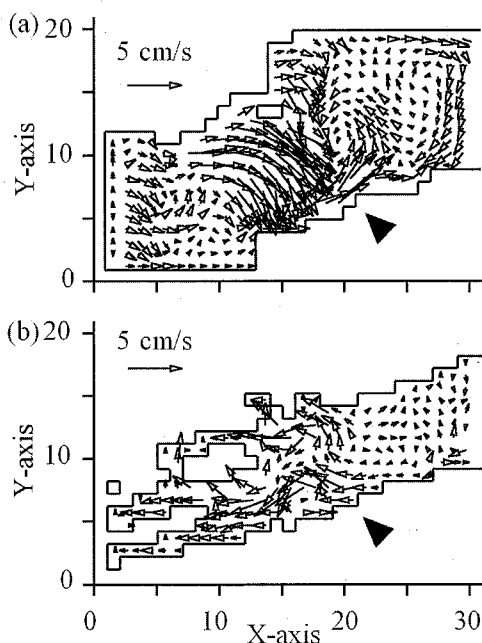


図-10 実地形モデルにより計算された(a)表層、(b)海面下 16 m の流れ。図中の▲は測線 A の位置を示す。

4. フロントを横切る物質輸送機構

これまでの結果を元に、cross-frontal flow の生じるメカニズムを、矩形モデルを用いて示す。モデル地形は図-11 に示した。計算領域は 20 km (図では上下間) $\times 30 \text{ km}$ (図では左右間) とし、水深は一律で 20 m とした。なお、以下では、この図の上方を北、右方を東と考える。メッシュサイズは水平方向に 2 km 、鉛直方向に 2 m である。西側 ($i=0 \sim 7$) を混合域、東側

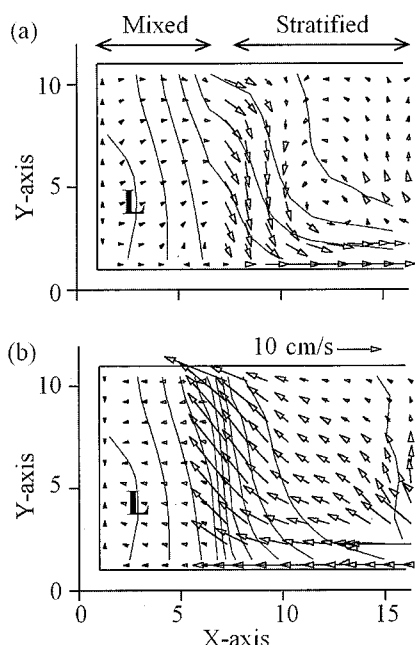


図-11 矩形モデルによる計算結果。(a)表層,(b)底層流れ.コンターは等密度線を示す.

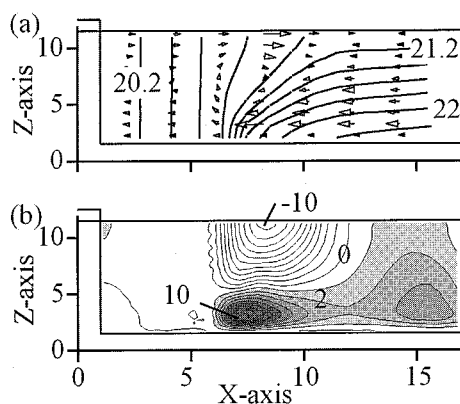


図-12 矩形モデルによる計算結果。(a)水路中央部の縦断面($Y=6$ の位置)における密度分布と流速ベクトル.コンター間隔は 0.2 とした。(b)同断面における流速の北方成分(cm s^{-1}).コンター間隔は 1 cm s^{-1} とした.

($i=8\sim 15$)を成層域とし,東端は開境界とした.鉛直および水平粘性係数・拡散係数は前項に示した実地形モデルと同様に与えた.西側の境界密度は 20 に固定し,東

側の境界密度には底層で 22.5 ,表層で 21 となる連続成層を与えた.

図-12(a)は,水路中央部の縦断面($Y=6$ の位置)における密度分布と流速ベクトル,図-12(b)は流速の北方成分を示している.フロント付近には,上層で南向き,下層で北向きの流れが生じていた.これは図-6に示した観測結果とよく一致していた.図-11(a),(b)に示した矩形モデルの計算結果は,図-10(a),(b)に示した実地形モデルの結果の特徴をほぼ再現していた.また水平面における低密度水の分布は,図-8に示した観測結果とよく一致していた.以上のことから,地球自転の効果によってフロントに沿う方向となった密度流が,陸岸に達した後岸に沿って進むことにより生じるフロントを横切る流れは,矩形領域での計算においても再現されることが示された.陸岸に囲まれた潮汐フロント域においては,このような流れにより,フロントを横切る方向の物質輸送が生じると考えられる.

5. おわりに

潮汐フロント域では水平密度勾配に起因する密度流が生じる.流れの主成分は地球自転の効果によってフロントに沿う地衡流となる.しかしそれが陸岸に達した後は岸に沿って流れるため,フロントを横切る方向となる.この機構によって,フロントを横切る物質輸送が生じると考えられた.これは陸岸に囲まれた潮汐フロント域に共通するメカニズムであると考えられる.今後,陸岸の影響によって地衡流バランスの崩れる領域を明らかにすることにより,フロントを横切る物質輸送を定量化することが課題である.

参考文献

- 藤原正幸・明田定満・武内智行(1992):マルチレベル密度流モデルの開発と人工湧昇流への適用,水工研技報 水産土木, No.14, pp.13-35.
- Le Fevre, J.(1986): Aspects of the biology of frontal systems, Adv. Mar. Biol., Vol. 23, pp. 164-299.
- Officer, C. B.(1976): Physical Oceanography of Estuaries and Associated Coastal Waters, John Wiley, 465p.
- Osborn, T. R. and W. R. Crawford(1980): Turbulence velocity measurements with an airfoil probe, In: Instruments and Methods of Air-sea Interactions, L. Hasse et al. (Eds), Plenum Press, pp. 369-386.