

密度流による物質輸送と鉛直勾配分散

上 嶋 英 機*

1. はじめに

物質輸送および分散機構を支配する素過程と、その寄与を定量化するため、これまで、閉鎖的な広島湾を対象として湾奥部の河川水流出域および、湾口部の湾外水流入域での現地調査から、潮流および吹送流に係る輸送効果を明らかにして来た^{1),2),3)}。しかし、密度成層の発達に伴う密度流による輸送への寄与を定量的に促えた例はなく、その実態は明らかにされていない。

そこで、広島湾奥部で密度成層が最も発達している夏季と成層が微弱な冬季において同地点、同条件下の箱状空間で、1潮流連続して観測を実施したところ、夏季には冬季に比べ密度流による強い鉛直循環流が観測された。本論文では、この両観測資料の解析から密度流によって生じる物質輸送と鉛直 shear に基づく鉛直勾配分散への寄与を定量的に示すものである。

2. 観測内容

観測水域は、図-1 に示すように、広島湾奥部中央の

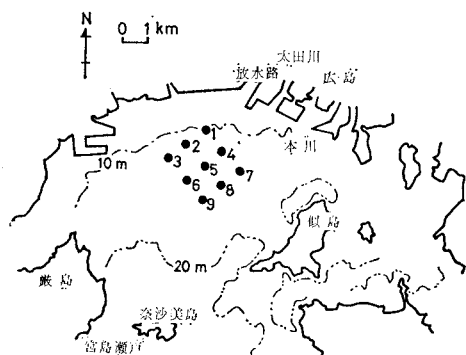


図-1 広島湾奥部箱状観測点位置図

太田川河口（本川）沖 5km の津久根島付近を中心とする平均水深約 13m の水域内に、2km 四方、1km 間隔で 9 測定点からなる箱状空間を設定した。この箱状観測点に於て、1979 年 9 月 7 日の夏季と、1982 年 1 月 11 日の冬季の 2 回、各測定点に係留した船上より、1 潮流間 30 分

ごとに表層から 7 層 (0, 2, 4, 6, 8, 10m, 底上 1m) で流速流向、塩分、水温を連続観測した。潮汐はともに大潮で振幅は同程度であった。太田川河川流量は、夏季観測では 250~300 m³/s、冬季観測では 50 m³/s 前後であり、夏季には太田川河川水が湾奥部の全域に影響を与えていた。なお、年平均流量は約 70 m³/s、洪水期には 5 000 m³/s にも達する流量が記録されている。一方、両観測期間内で風向風速を湾内の観測用ロボットブイ（広島県所有）および大奈沙美島山頂にて観測した結果、午前と午後の風向が反転するが、ともに 3m 以下の弱風で、日中は無風状態が観測された。これから、流れ全体に与える吹送流の影響はきわめて微弱なものと判断できる。なお、図-2 に示すように箱状観測点から流出方向 (y 軸) に

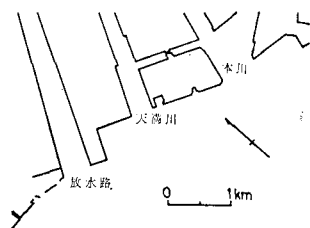


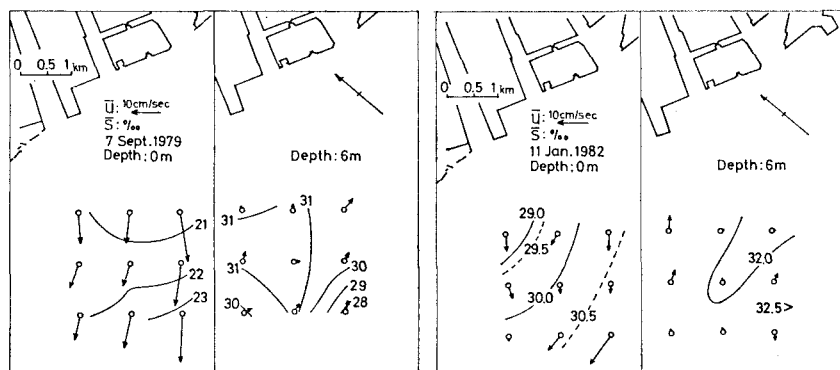
図-2 縦横断面位置と座標

対する横断面として、河口側から Y₁, Y₂, Y₃ の 3 断面を、縦断面として、西側放水路沖より X₁, X₂, X₃ の 3 断面を設定した。

3. 夏季、冬季観測結果と流動、密度分布の比較

図-3 には、夏季と冬季の観測から得られた表層 (0m) と中層 (6m) での 1 潮流平均流速 ($\bar{u}$) と塩分 ($\bar{s}$) の水平分布を示す。夏季の表層分布からは、各測定点とも沖合に一樣な強い流出が見られ、中層に深からは逆に、河口向きの流入が有り、上下層で強い二層流が形成されてい

* 正会員 工務 通産省 中国工業技術試験所 内海水利研究室

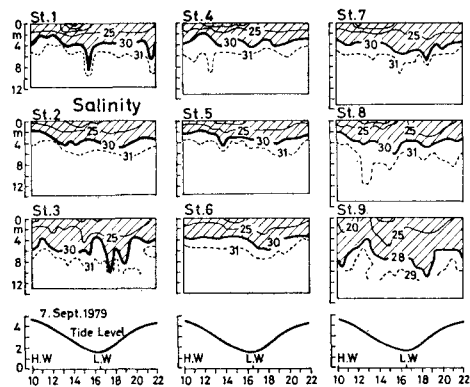


図—3 1 潮汐平均流速 $\bar{u}$ と、塩分 $\bar{s}$ の表層 (0 m) と中層 (6 m) の水平分布, (左図: 1979 年 9 月 7 日, 右図: 1982 年 1 月 11 日)

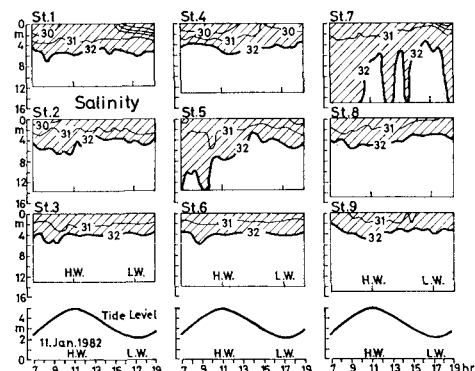
る。塩分分布は表層では沖合ほど高塩であるが、中層以深では沖合ほど (特に St. 9) 低塩となっている。これに対し、図—3 右に示す冬季の分布では全体的に夏季に見られる強い二層流は認められず、塩分分布からは上下層とも沖合ほど高塩化し河口近くで低塩化している。

図—4, 5 は、箱状観測点における鉛直塩分分布の時系列変化を夏季と冬季について示したものである。図中斜線部は河川水混入層として沖合水と区別したもので、夏

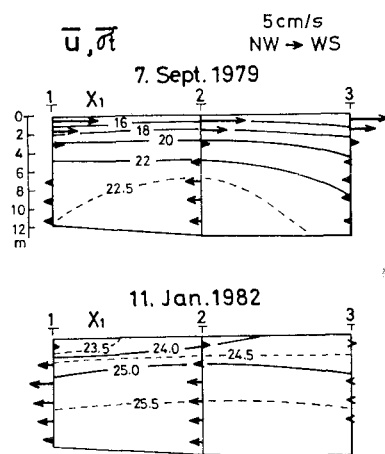
季では 30‰ を、冬季は 32‰ を基準とした。なお夏季の St. 9 では沖合に流出した河川水が低層まで混入し 30‰ 以下に低塩化していたため、28‰ を基準とした。全体的に夏季には強い成層が維持されており沖合ほど河川水層は厚く、河口寄りではむしろ層厚は浅い。しかし、冬季では河川流出量が少ないこともあって、夏季のように沖合まで強く流出していないが、本川河口沖 St. 7 から St. 5 にかけて上げ潮時に下層まで河川水が混入し淀みを見ている。



図—4 箱状観測点 (St. 1~9) の鉛直塩分分布の変動 (夏季)



図—5 箱状観測点 (St. 1~9) の鉛直塩分分布の変動 (冬季)



図—6 1 潮汐平均流速 $\bar{u}$ と密度欠損 $\bar{\sigma}_t$ の X_1 縦断分布 (上段: 夏季, 下段: 冬季)

図—6 には、 X_1 縦断面での夏季 (図中上段) と冬季 (下段) での 1 潮汐平均流 ($\bar{u}$) と密度欠損 ($\bar{\sigma}_t$) の縦断分布を示す。流速は Y 断面に直角成分の値である。夏季では上下層の密度差は大きく $\bar{\sigma}_t = 20$ 基準にすれば、4 m 水深を境に上層では河川水による低密度化と強い沖合への流出が見られる。下層では潮汐流に対応する流出が見られ高密度となっている。一方、冬季では鉛直方向の密度差および流速値は小さく、上層厚は極度に浅い。密度成層の強度を上下層の密度差から見れば、夏季は冬季の 3 倍以上の強度となっている。

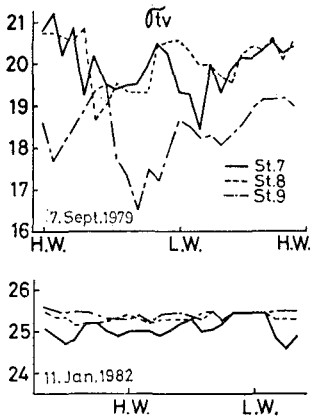


図-7 鉛直平均密度欠損 (σ_{tv}) の変動
(上段: 夏季, 下段: 冬季)

図-7 には太田川支川, 本川河口流出軸上の X_3 縦断面測点 St. 7, 8, 9 における鉛直平均密度欠損 (σ_{tv}) の変動を示したものである。夏季(上段)では全体に低密度で潮汐に対応した変動が大きく, 特に St. 9 の沖合観点が極度に低密度化している。冬季は $\sigma_{tv}=25\sim26$ の間で安定している。

以上のように夏季には密度成層が形成され, 鉛直方向での二層流(循環流)により, 沖合測点では鉛直混合が促進され深部まで河川水が混入する。一方, 冬季では密度成層は弱く二層流も明確でない上に, 密度変動も少ない状態であった。

4. 密度流による鉛直循環流

密度成層の発達した夏季の観測資料と, 成層が微弱な冬季資料から断面内での流れの shear を求め, 両者の差異から密度流による鉛直循環流の規模について考察する。

断面内の流動変化を知るため, 各測点での断面に直角成分流速値 u (負が流出) から, 潮汐に対応して変化する断面積 A での毎時の断面平均流速 u_A を算出した。 Y_1, Y_2, Y_3 横断面での夏季, 冬季の u_A の変動は図-8に示すものである。さらに, この u_A から1潮汐断面平均流速 $\bar{u}_A$ を求め, 断面内各測点での1潮汐平均流速 $\bar{u}$ に対する偏差値 $\bar{u}_a$ を算出した。即ち, $\bar{u}_a = \bar{u} - \bar{u}_A$ であり, この $\bar{u}_a$ が恒流による断面内の shear (循環流)を示すものである。

各横断面 ($Y_1 \sim Y_3$) で算出した恒流による shear 成分 $\bar{u}_a$ の各測点での鉛直分布を図-9に示す。図-8に示す u_A の変動からは夏季, 冬季ともに変動規模は同程度であるが, 各測点での shear 成分は図-9に示されるように大きく異なっている。 Y_1 断面の本川河口寄測点 St. 7 では, 表層での $\bar{u}_a$ の値が夏季では冬季の4倍もの流出を示し, 中層以深では強く流入する大きな鉛直循環流

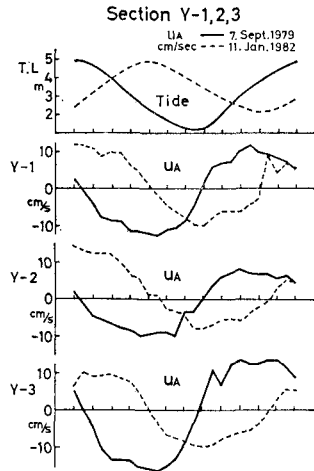


図-8 断面平均流速 u_A の変動
(Y_1, Y_2, Y_3)

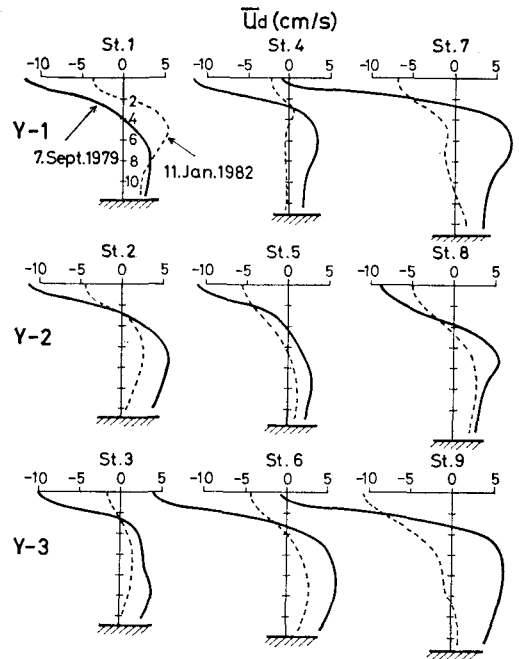


図-9 断面内恒流 shear 成分 $\bar{u}_a$ の鉛直分布 (Y_1, Y_2, Y_3 内の分布)

が見られる。St. 4 での冬季の shear はほとんどない。 Y_2 断面でも, 平均的に夏季の shear が冬季の2倍以上の強度を示している。 Y_3 断面では, 夏季に見られた(図-4)河川水の強い鉛直混入を裏付ける強い鉛直循環流が St. 9, 6 に形成されている。

この shear ($\bar{u}_a$) の発生要因として, 潮汐流, 密度流, 吹送流が主に考えられ, 実際にはこれらが相乗し合って shear が形成されていると見られる。このため, 各要因別に shear を分離することは困難である。しかしながら, 仮に潮汐流による shear (T_{ua}) と密度流による shear

面内での「鉛直勾配分散」と「水平勾配分散」の分散機構の組合わせによって得られるものである⁴⁾。両者は鉛直、水平の shear と乱れ拡散の相互作用により物質を拡散させる現象である。前節で示した shear 分散の輸送項 (T_s) の中で、 T_s+T_{10} が鉛直勾配分散項、 T_7+T_9 が水平勾配分散項による輸送項として定義できる⁴⁾。

前節で求めた式 (3) の断面内平均輸送量 (Net 値) $\bar{F}_N$ と各項の輸送量より、断面内でのほぼ主流方向 (図-3) に直角な Y_2 横断面において、次式で定義する一次元分散係数を求める。

$$K_x = \frac{\bar{u}_A \cdot \bar{s}_A - \bar{F}_N}{\frac{\partial \bar{s}_A}{\partial x}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

右辺の分子は、 $-(T_7+T_8+T_9+T_{10})$ で示される。さらに、Fischer⁵⁾ (1979) にならって、shear 分散項について求めた。

$$D_0 = \frac{-(T_7+T_8+T_9+T_{10})}{\frac{\partial \bar{s}_A}{\partial x}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$D_0 = D_1 + D_2 + D_3 + D_4$$

式 (4), (5) から、表-1 の値を使用して得られた Y_2 断面での夏季と冬季の結果を表-2 示す。

表-2 1次元分散係数 (Y_2)

cm^2/sec	Summer	Winter
$D_0 (T_s)$	-3.4×10^5	1.1×10^5
$D_1 (T_7)$	2.2×10^4	5.8×10^4
$D_2 (T_8)$	-3.4×10^6	9.5×10^5
$D_3 (T_9)$	2.3×10^4	3.8×10^4
$D_4 (T_{10})$	4.3×10^3	4.4×10^4
K_x	-3.5×10^6	3.7×10^5

夏季では負の分散係数が見られるが、 K_x の値は冬季より 1 オーダ大きい。一方、shear 分散による D_0 の値も夏季で大きく、鉛直勾配分散 (D_2+D_4) の中で鉛直循環流による D_2 の値が D_0 のほとんどを支配している。この結果から密度流の卓越する夏季には、鉛直勾配分散に代表される分散が全体に大きく寄与している。

(2) 2次元分散係数の算出結果

2次元的な拡がりを持つ場での2次元分散係数を、前報¹⁾での定義にならい算出する。

水平2方向 (x, y) での2次元分散係数 E_x, E_y は次式により定義される。

$$E_x = - \left\{ \frac{h \bar{U}_h S_h + h (\bar{u}_{av} s_{av})_h}{h \frac{\partial \bar{s}_h}{\partial x}} \right\}$$

$$E_y = - \left\{ \frac{h \bar{V}_h S_h + h (\bar{v}_{av} s_{av})_h}{h \frac{\partial \bar{s}_h}{\partial y}} \right\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

上式では、平均水深を h 、塩分 s 、水平2方向の流速を

u, v とし、深さ方向単位幅での1潮汐平均塩分輸送量 $\bar{f}_x, \bar{f}_y$ を潮位変動による水深変化を無視して算出した。ここで、 u, v, s はおのおの、 $u = \bar{u}_h + U_h + u_{av}$, $v = \bar{v}_h + V_h + v_{av}$, $s = \bar{s}_h + S_h + s_{av}$ に分解され、 $\bar{f}_x = h(\bar{u}s)_h$, $\bar{f}_y = h(\bar{v}s)_h$ に代入し得られる輸送項から、式 (6) の分子はおのおの、 $h \bar{u}_h \bar{s}_h - \bar{f}_x$, $h \bar{v}_h \bar{s}_h - \bar{f}_y$ として求まる。即ち、2次元分散係数は、2方向の鉛直勾配分散よりなるものである⁴⁾。

式 (6) から、夏季、冬季の観測資料を用いて、St. 5 どの直交する X_2, Y_2 の測点間で E_x, E_y を求めた。その結果を表-3 に示す。 E_x, E_y は共に夏季の値が大きく、流出軸上の E_y の値は、夏季では冬季の2オーダーも大きく、密度流による寄与の相異が示された。

表-3 2次元分散係数 (St. 5)

cm^2/sec	Summer	Winter
E_x	-4.4×10^6	-1.2×10^5
E_y	2.2×10^7	2.2×10^5

7. 結 語

潮汐規模が同等で、吹送流の影響がともに無視できる状況下で実施された夏季と冬季の2回の箱状観測資料の解析から、密度流による輸送量と分散への寄与を考察し、次の結果を得た。

(1) 夏季の密度流によって冬季の数倍以上にもなる規模の鉛直循環流が形成された。(2) Shear 分散による塩分輸送量から、密度流による寄与が鉛直循環流の輸送量として定量的示され、夏季の輸送量は冬季の10倍を超えるものであった。(3) 1次元分散係数からは、鉛直循環流による鉛直勾配分散係数 (D_2) が支配的であり、2次元分散係数では、夏季には冬季の2オーダー大きい $10^7 \text{ cm}^2/\text{s}$ の値が得られ、ともに夏季の密度流による寄与が冬季の差として示された。

本研究は環境庁一括計上の公害防止技術特別研究「瀬戸内海における海水交換性および負荷量影響度の研究」の一環として行ったものである。本研究に際し、調査においては当所内海水理研究室の研究員諸氏に多大の協力を得たことを感謝します。

参 考 文 献

- 1) 上嶋英機・早川典生：河川水の流出する湾内の分散機構，第27回海岸工学講演会論文集，pp. 492~496, 1980.
- 2) 上嶋英機：湾口部流入水塊の移動と海水交換機構，第28回海岸工学講演会論文集，pp. 461~465, 1981.
- 3) 上嶋英機：台風通過に伴う物質輸送の変化，第29回海岸工学講演会論文集，pp. 594~598, 1982.
- 4) 上嶋英機・早川典生：瀬戸内海の物質拡散，分散特性，沿岸海洋研究ノート，第20巻，第1号，pp. 1~11, 1982.
- 5) Fischer, H. B.: Mixing in Inland and Coastal Waters, Academic Press Inc., pp. 253~262, 1979.