

ADCP 観測による浦の内湾の差し込みの流れ構造と 浮遊物質分布

宗景志浩*・田村圭一**・中川倫寿***

1. はじめに

成層期の浦の内湾では内部波や差し込みが生じるため、潮汐による往復流以外にも特徴的な流れが観測される。また、鞭毛藻プランクトンは5月頃から潮流の弱い湾奥部でゆっくり増殖しているが、差し込みの発達に伴って短期間に赤潮を形成し、表層部を湾奥から湾口側に移動し(宗景ら, 1992), 湾口側の一定水域で滞留する(田村ら, 1993) など、水理と結びついた特徴が見られる。本研究では浦の内湾の水質、流速及び浮遊物質の分布を定期的に観測し、差し込みの規模と差し込みが水質や浮遊物質の分布・挙動に及ぼす影響を調べた。

2. 方 法

2.1 水質観測

図-1に示す St. 0 から St. 7 の定点で、FSI 社製多項目水質測定器を用いて水温、塩分、DO、Chl. a 及び透過率を観測した。観測は、1993 年 8 月 17, 23 日及び 1994 年 8 月 24, 26 日に行った。また、一昼夜連続観測を 1993 年の 8 月 25~26 日と 9 月 24~25 日及び 1994 年の 8 月 8~9 日に湾奥の目の糞 (St. 3) で 1~2 時間おきに行った。

2.2 流速連続観測 (MTCM-5)

1994 年 8 月 3 日~9 月 25 日に St. 5 (水深 12 m) の底上 1 m に鶴見精機製 MTCM-5 を設置し、流向、流速、水温、塩分の連続測定 (10 分間隔) を行った。

2.3 ADCP による流速分布の観測

RD Instrument 社製 ADCP (1200 kHz, ビーム角 30°) を用いて流速及び Relative Backscatter (BS, 散乱音波強度) の測定を行った。

a) 移動観測

横浪半島側 (南岸) と対岸 (北岸) を横断する観測線 (測線 A~E) を定め、1993 年 8 月 20 日及び 1994 年 4 月 14 日に横断面の観測を行った。また、1993 年 8 月 20 日 (上げ潮後期) に湾口側の岩が崎から湾奥の目の糞付近に

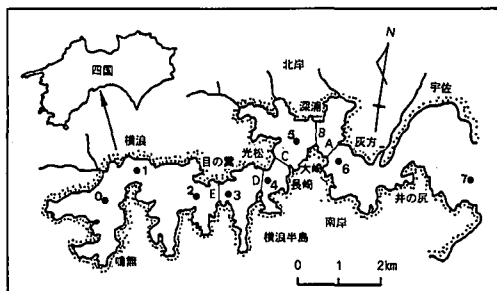


図-1 CTD 観測定点及び ADCP 観測線

かけて湾軸に沿った縦断観測を行った。なお、移動観測は約 2.5 ノットの船速で行った。

b) 固定連続観測

水質の一昼夜観測に並行して ADCP の固定連続観測 (St. 3) を行った。

c) 流量観測

差し込み流量を推算するため、1994 年 8 月 24 日の 8:00 から 25 日の 9:00 にかけて、測線 C で一時間毎に ADCP による横断観測を行った。ADCP の測定は水深 0.89 m 以深を 0.25 m 間隔で行ない、計算には約 25 sec (距離にして約 30 m) 間隔で平均したデータを用いた。0.89 m 以浅は第一層の流速を用いた。また、海底からの反射の影響で測定できない $D \cos 30^\circ = 0.8D$ (D : 水深) より底層の流速は、水底で流速ゼロとなるように線形補間を行った。流軸は北から 20° とし、流入を正、流出を負の値とした。この流速値と断面積の積から 0.25 m 層毎の流量を求め、さらに航路差による断面補正を行って、各層の流量を求めた。

2.4 差し込みモデルによる流量の推算

塩分を指標とする二層ボックスモデルを用いて差し込み流量を推算した。図-2に示すように湾内を水深 10 m で上下層に分け、各ボックスを①, ②, ③, ④とする。差し込み海水は④から②に流入し、等量の海水が②から①へ上昇し、さらに①から③へ流出する移流として扱う。差し込みの流量を Q_H 、潮汐による海水交換率を r_T 、海水交換量を $q_i (r_T q_i = Q_{i3} = Q_{31})$ 、鉛直混合量を $Q_{i2} (= Q_{21})$ とすると、上下層における塩分収支は次式となる。

* 正会員 農博 高知大学助教授 農学部生産環境工学科
 ** 農修 (株)エコー
 *** 農修 水産庁西海区水産研究所 海洋環境部

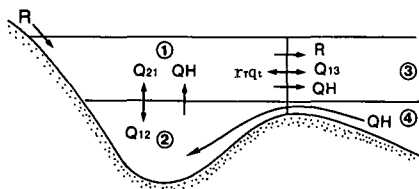


図-2 差し込みモデル

$$V_1 \frac{dC_1}{dt} = r_1 q_1 (C_3 - C_1) + Q_{12} (C_2 - C_1) + Q_H (C_2 - C_1) - C_1 R \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$V_2 \frac{dC_2}{dt} = Q_{12} (C_1 - C_2) + Q_H (C_4 - C_2) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $C_1 \sim C_4$ は各ボックスの体積平均塩分濃度、 R は淡水供給量、 V は体積、 t は時間である。また、 Δt 期間に湾に流出した海水量 q_1 は、潮位差 η と湾内水面積 S とから与える。大崎-深浦以南を湾内として体積平均濃度を求め、湾外塩分は St. 7 のデータを用いた。

3. 結果と考察

3.1 差し込み時の海況

1993年8月17日及び23日における塩分とDOの縦断分布を図-3に示した。8月17日の分布をみると、表層には25‰以下の低塩分水が広がっており、30‰の等塩分線は湾外から湾内底層にかけて差し込んでいる。また、湾奥中層には1 ml/l以下の貧酸素水塊が分布しているが、湾中央層はDO濃度は3~4 ml/l程度に上昇している。23日になると、湾内底層の塩分は31‰以上に高塩分化し、DOも4~5 ml/lに上昇していた。また、湾奥の貧酸素水塊は消失していた。これより、17日には既に湾外水の差し込みが始まっており、23日にかけてさらに発達したことが分かる。

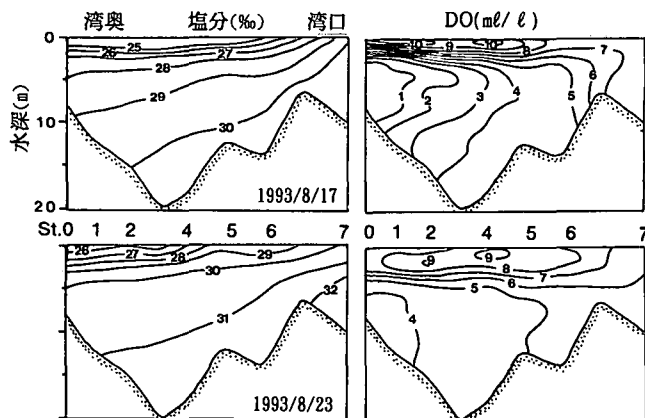


図-3 差し込み時の塩分及びDO縦断分布

成層期には、まとまった降雨の後晴天が続くと差し込みが生じる。1993年は降水量が多く、とくに8月初旬は湾内の密度が著しく低下し、湾内外の塩分差(密度差)が増大したため、8月中旬以降の大潮を中心に大規模な差し込みが生じ、湾奥中層へ貧酸素水塊が押し込められた。一方、1994年は1993年や例年と比べ降水量が極端に少なく、湾内の密度があまり下がらなかったため大規模な差し込みは発達せず、むしろ湾外水が中層へ差し込むこともあった。

3.2 流れ構造

1993年8月20日は月齢2.3の中潮であった。ADCP観測は下げ潮時に3回、上げ潮時に2回行った。流速分布の結果の一部を図-4に示す。

1回目の観測(上段)は満潮から下げ潮に変わった頃で、湾中央(測線E)の流速は10 cm/s以下で、水深3~4 mより下層で流入、表層で流出の分布が見られた。湾口側の測線でも、水深6~7 mより下層で流入成分が、それより上層では流出する流れが卓越し、とくに表層部(表層~水深3 m付近)の流速は20 cm/sを超えていた。

下げ潮前期から下げ潮後期(中段)になると、表層を中心に流出成分の流れが卓越し、その流速は湾中央の測線で流速10~20 cm/s程度、湾口側で20~30 cm/sであった。底層の流入成分は下げ潮時にはあまり見られなかった。

上げ潮前期(下段)には、流速10 cm/sを超える流入成分が湾内の水深5~6 m以深で見られ、とくに底層では流入成分が卓越した。上げ潮後期には、湾中央(測線C~E)でも流速10 cm/s以上の流入成分がさらに広がっていた。

3.3 差し込み流量

a) ADCP

ADCPによる流量観測の結果を図-5に示した。2 mごとの各層の恒流成分は水深6 m以浅では流出、以深では流入となった。また、この時期の塩分やDOの縦断分布から差し込み層厚は底上6 m程度であったので、6 mごとに3分割して表層、中層、底層とした。これによると、下げ潮時に表層で流出成分の流れが、上げ潮時には底層で流入成分が卓越した。また、憩流時にも表層で流出し底層で流入する差し込み時に特有の傾向が見られた。これらの特徴は1992(田村・宗景, 1993)、1993年の差し込み時(図-4)の観測結果とも一致する。

25時間平均による各層の恒流成分と平均断面積との積から恒流量を計算すると、表層(水深0~6 m)で $-2.35 \sim -2.39 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$ 、中層(水深6~12 m)で $1.03 \sim 1.10 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{h}$

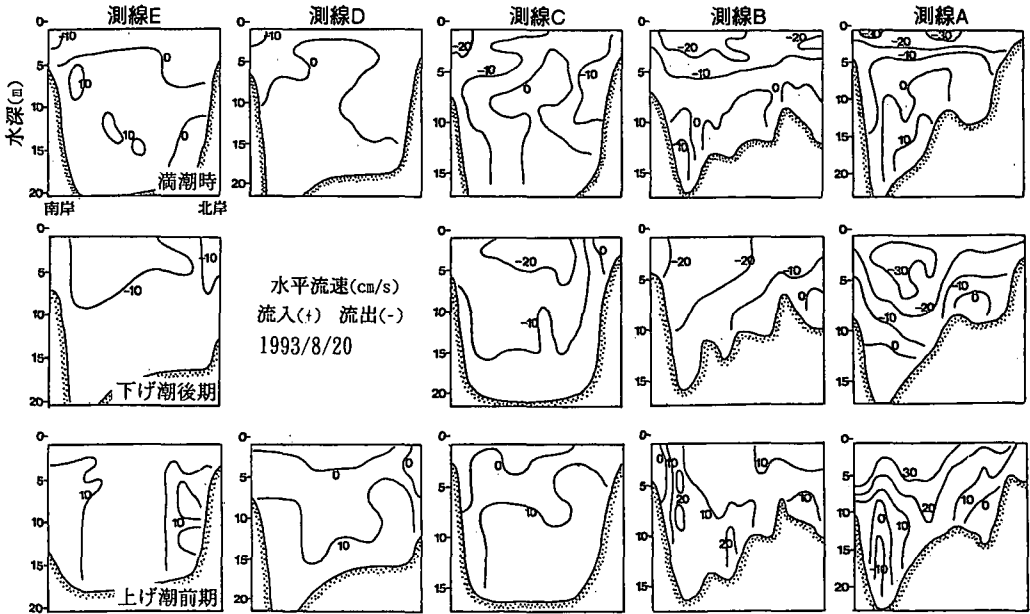


図-4 差し込み時の流速分布

h, 底層 (水深 12~18 m) で $1.25 \sim 1.31 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$ となった。差し込み流量は $1.3 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$ 程度と推定され、平均潮位差 (1 m) による潮汐流量 ($7 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$) の 2 割程度であった。

b) MTCM-5

1994 年 8 月 16 日から 28 日における St. 5 の底上 1 m の流速と 25 時間移動平均による恒流成分を図-6 に示した。差し込みが発達すると、湾口浅部の流速は大潮を中心に流入成分 (流軸を東西とする) が卓越した。ADCP による流量観測と同時期の恒流は 4.5 cm/s 程度の流入であった。この恒流速と測線 B の断面積を用いて差し込み流量を推算した。測線 B の差し込み流が卓越する水深 10 m 以深を底層とすると (田村ら, 1993), 底層断面積は約 750 m^2 , 差し込み流量は $1.2 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$ 程度となり, ADCP 観測による結果とほぼ等しい値となった。

c) 差し込みモデル

表-1 に 1987 年, 1992, 1993 年及び 1994 年のボックスモデルによる差し込み流量の推算結果を示す。

1994 年 8 月 19 日と 26 日の塩分を用いて推算した平均差し込み流量は $1.3 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$ となり, ADCP や MTCM-5 による推算結果とほぼ等しくなった。

MTCM-5 による St. 5 の底層部の塩分の連続記録を見ると, 8 月 19 日頃から急激に上昇し始め, 25 日頃に終わっていた。差し込みはこの間の 6 日間程度継続したとすると, 差し込み総流量は $187 \times 10^5 \text{ m}^3$ に達する。この流量は, 水深 10 m 以深の底層海水量 ($162 \times 10^5 \text{ m}^3$) とほぼ等しく, これを移流と見なすと底層水は全て交換された

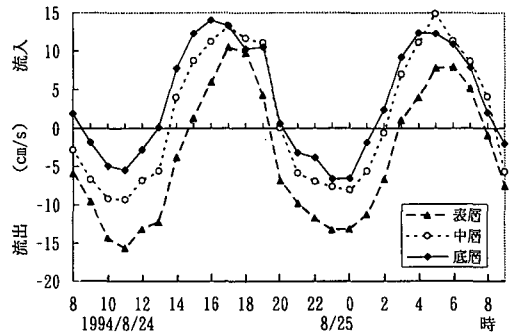


図-5 各層平均流速

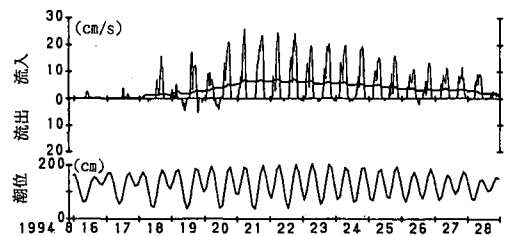


図-6 St. 5 の底上 1 m の流速と恒流成分

ことになる。

1994 年は降水量が少なかったため, 大規模な差し込みは起こらなかったが, 大雨の後に大潮と重なった 1987 年

8月17～27日, 1992年
9月9～16日, 1993年8
月11～23日の期間には
差し込み流量が著しく増
大し, 1994年の約2倍の
 $2\sim3\times10^5\text{ m}^3/\text{h}$ にも達
した。長期間続いた貧酸
素化の後にこのような大
規模な差し込みが起これ
ば, 3日程度で底層水が
交換(輸送)され, 湾内
の水質環境が激変する。

3.4 浮遊物質分布

a) 赤潮パッチの移動

差し込みのあった1994年8月24日の干潮及び満潮時, 26日干潮時におけるクロロフィルa(相対値)の縦断分布を図-7に示した。クロロフィルaは, どの観測日も表層直下で値が大きく下層で小さい。ピークの水深は観測日によって異なり, 水深2mから6mの間に現われていた。

クロロフィルaのピークは午前満潮から午後干潮の間に湾中央の目の糞付近から湾口側の大崎付近まで, 距離にして約2kmも移動していた。26日の干潮時には,

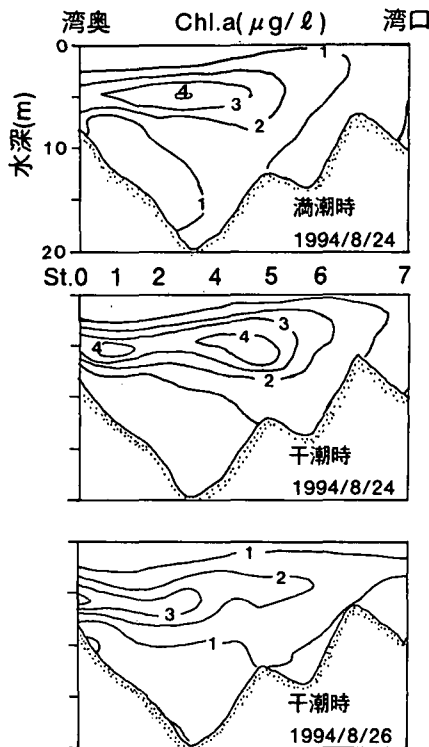


図-7 Chl. a (相対値) の縦断分布

表-1 差し込み流量 ($\times 10^5\text{ m}^3/\text{h}$)

期 間	Q_H
1987 7/18- 8/ 3	1.1
8/ 3- 8/17	1.6
8/17- 8/27	3.1
9/ 1- 9/11	1.4
1992 9/ 9- 9/16	3.0
1993 8/11- 8/23	2.4
8/17- 8/23	1.8
9/16- 9/29	2.2
1994 8/19- 8/26	1.3
9/ 5- 9/13	0.8

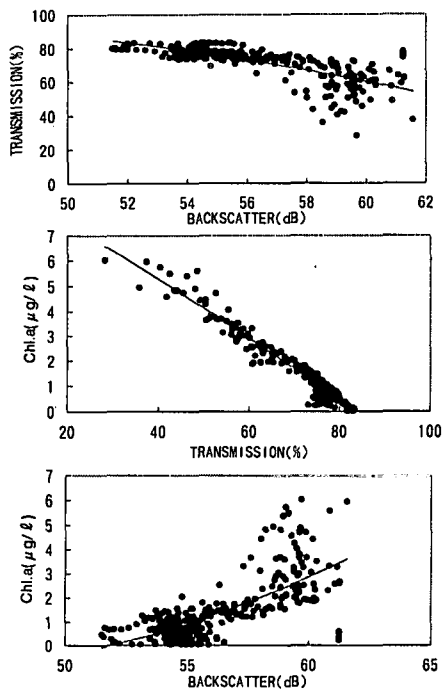


図-8 透過率, Chl. a 及び BACKSCATTER の関係

湾奥に新たな高濃度域が出現している。赤潮プランクトンは湾の最奥部に増殖しパッチを形成しながら, 差し込み海水に乗って湾中央の目の糞～光松付近に移動し, さらに湾口側の長崎～大崎付近で滞留する傾向が見られた。

b) BACKSCATTER

透過率(TRANSMISSION), クロロフィルa及びBS値の相互関係を図-8に示す。図は湾中央のSt.3で赤潮が形成されていた1993年8月25日～26日に観測した結果である。水面下2m以浅はBS値がやや大きめになり相関が極端に下がるため省いている。この日は浮遊物質に占める植物プランクトンの割合が大きかったため, いずれも相関が見られる。

透過率, クロロフィルa及びBS値の相互関係を詳しく調べると, 透過率に対するBS値はいつも相関が高いが, クロロフィルaと透過率との相関が見られず, BS値とも相関の低い場合もあった。このような場合は植物プランクトンが少なく, サルパ類が多いことなどが指摘されている (Flagg and Smith (1989)).

c) 湾口浅部の底泥の巻き上げ

図-9は湾中央の目の糞付近から湾口側の岩崎付近までのBS値と流速の縦断分布である。大崎付近の湾口側浅部では, 上げ潮時には底層ほど流入成分が卓越し, BS値も湾内で最も高くかつ底層ほど高い値を示した。しかし, 底層の高BS分布域は下げ潮時や干潮時には消失していたことから, 上げ潮時の底層部の強い流速によって

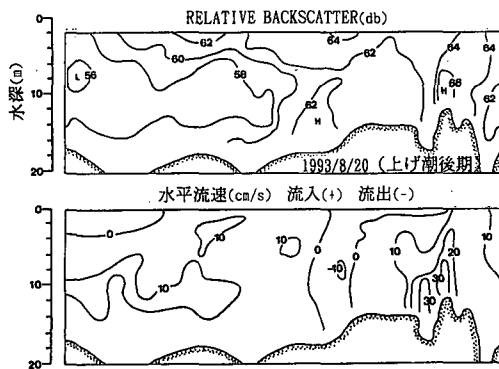


図-9 BACKSCATTERと流速の縦断分布

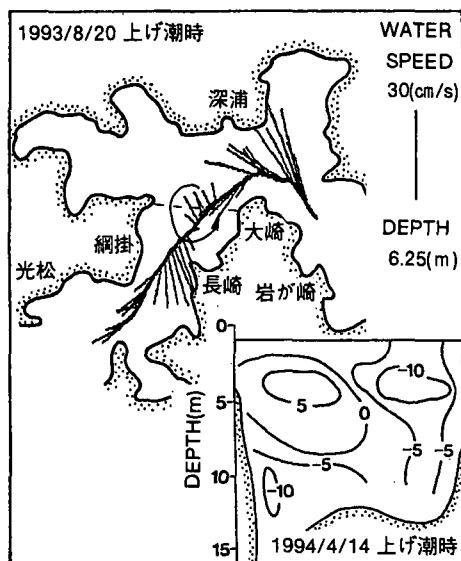


図-10 流速ベクトルと網掛-大崎断面の流速分布

底泥表面の懸濁物が巻き上げられたものと思われる。また、BS値は湾奥側では低くなるが、底層付近で高くなる傾向が見られることから、湾口側浅部で巻き上げられた浮遊物質が底層水の流入に乗って湾奥側へ運ばれていくと考えられる。

d) 長崎付近の渦流と浮遊物質の滞留

図-9によれば大崎から約1 km 湾奥(長崎よりやや湾口側)でBS値が高く、海水の逆流する海域が見られる。図-10にはこの時のADCP観測航路に沿った水面下6 mの流速ベクトルを示した。この流速ベクトルから図中の矢印で示す様に長崎～大崎間で反時計回りの渦流が生じていたと考えられる。

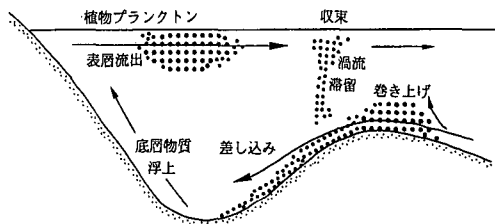


図-11 差し込みによる鉛直循環と浮遊物質の移動

事実、1994年4月14日の上げ潮時に破線の測線で行った流速分布(図-10右下)でも、大崎側で逆流が確認された。この渦流は上げ潮時に限って発達するようであるが、反流域でBS値が増大することから、浮遊物質の滞留が生じているものと思われる。この渦流は深浦-大崎間で一旦狭まった断面が湾奥側で急激に広がり同時に流軸が曲がっているために、剥離と逆流(高杉ら, 1987)が生じたものと考えられる。

4. 結 論

浦の内湾に湾外水の差し込みが発達する時期にあわせて、水質、流速及びBSを観測し、結果をまとめて図-11の模式図で示した。

差し込みによる海水輸送量は、潮汐流量の2～3割であるが、移流であるため鉛直循環を形成して効率のよい海水交換が生じる。湾内の浮遊物は表層では植物プランクトンに、下層では湾口側混合域で巻き上げられた底泥に由来するもので、その分布は流れに支配され、とくに差し込み時には湾奥表層で増殖した赤潮プランクトンは湾口側へ、湾口側で巻き上げられたり沈降した懸濁浮遊物は差し込み海水に乗って湾奥側へ運ばれる。

参 考 文 献

- 高杉由夫・肥後竹彦・埜口英昭 (1987): 瀬戸・海峡部における流れの特性、ドップラープロファイラーによる流速測定, La Mer, No. 25, pp. 167-174.
- 田村圭一・宗景志浩 (1993): 湾外水の差し込みに伴う流れ構造と浮遊物質の挙動について, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 236-240.
- 藤原建紀・高杉由夫・肥後竹彦 (1989): 超音波ドップラー流速プロファイラーによる沿岸域の流れの可視化, 海洋調査技術, 1巻, 1号, pp. 57-65.
- 宗景志浩・木村晴保 (1992): 湾外水の差し込みが浦の内湾の鞭毛藻赤潮の発生に及ぼす影響, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 986-990.
- FLAGG C. N. and S. L. SMITH (1989): On the Use of the Acoustic Doppler Current Profiler to Measure Zooplankton Abundance. Deep Sea Research, No. 36, pp. 455-474.