

湾口部流入水塊の移動と海水交換機構

上 嶋 英 機*

1. はじめに

湾規模での海水交換機構を把握する上で、湾口部を通しての水塊の挙動と混合状態を明確にする事が重要である。海水交換の空間的規模としては密度成層化した湾内水と湾口部から流入する湾外水の水塊の混合規模により決定される。一方、時間的規模としては tidal-exchange に見られる周期的な成分と、地形性の渦、気象要素（風、気圧）に起因する非周期的な成分とが重ね合わさって形成されていると考えられる。

そこで、海水交換機構の中での周期性とその寄与を明らかにする課題を提起し、まず日変化の中で基本的な潮汐周期成分を対象として観測から海水交換機構を検討したい。近年、海水交換に係る海峡部近傍での水塊の平面的分布と規模については、リモートセンシング情報が活用されている。しかしリモートセンシングと同時に海上での海水交換調査を行い、流入水塊の移動と混合状態を時空間的に連続して捉えた調査例は少ない。そこで今回、**図-1**に示す広島湾での2つの湾口部水域で航空機による MSS 撮像と海上での横断面観測を同時に行い、湾口から流入する「大スケール渦」の水塊挙動を1潮汐間追跡調査した。

本報では、この調査結果から1潮汐間での流入水塊の平面的移動形態と規模をMSS撮像資料から明らかにし、同時に各湾口部横断面内での鉛直構造を示す。さらに断面流量 (Volume Flux) と塩分輸送量 (Salt Flux) の相互の関係を論じ、塩分輸送項 (交換項) の中で “Stokes' drift” による輸送量及び、潮汐振動による trapping 効果と shear 分散項による輸送項の寄与から各湾口部の特性を示す。

なお、断面を通しての物質輸送の機構と解析については、これまで密度成層の発達した湾内河川域を対象として明らかにしてきた^{1),2)}。本研究では対象水域を湾口部に移し、湾外水と湾内水との混合域での物質輸送特性を上記と同様な解析法により示すものである。

2. 観測内容

広島湾の湾口部は西部側の大島瀬戸と、東部側の柱島水道からなる。この湾口部での横断面位置と航空機による MSS 撮像範囲を **図-1**に示す。更に大島瀬戸と柱島水道での横断面測定位置と海底地形図を **図-2**に示す。横断面位置は、湾外水の流入による

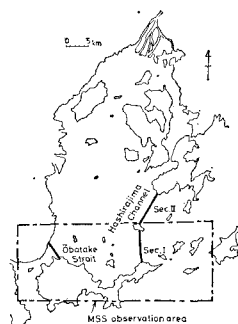


図-1 広島湾々口部観測位置図

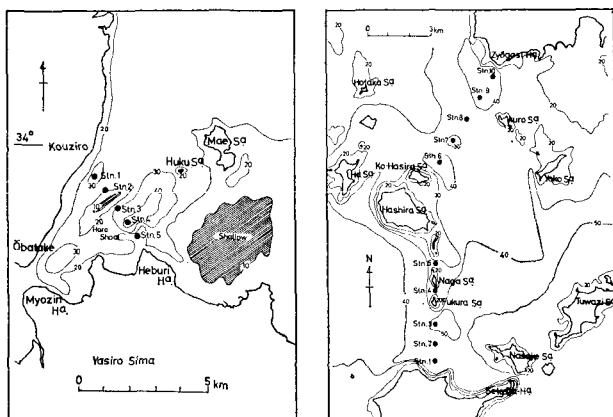


図-2 大島断面測点 (左図) と柱島断面測点 (右図) 及び、海底地形図

大スケール渦の発達が予想される水域を選定した。大島瀬戸横断面 (略。大島断面) では西岸側 (Stn. 1) から屋代島幣振鼻地先 (Stn. 5) までの約 4 km 間に 5 測点設け、各測点に船を係留し、表層から 0, 2, 5, 10, 15, 20, 底上 1 m の 7 層設定し 1 潮汐間 (13 時間)、30 分毎連続して流向流速、塩分、水温を測定した。一方柱島水道横断面 (略。柱島断面) では **図-2**に示すように屋代島側 (Stn. 1) から柱島を挟み、倉橋島域岸鼻地先の Stn. 10 までの約 11 km 間に 10 測点設け、柱島を中央に南側 (Stn. 1~Stn. 5) を Sec. I, 北側 (Stn. 6~Stn. 10) を Sec. II として 2 断面に分け、大島断面と同様な測定を行った。

各断面での観測は 1980 年 9 月 12 日に大島断面、2 日後の 9 月 14 日に柱島断面で行われ、湾内には 9 月 11 日

* 正会員 工務 通産省 中国工業技術試験所 内海水理研究室

に通過した台風 13 号による降雨のため各河川からの出水があった。MSS 撮像の調査は日本造船振興財団により実施され³⁾、湾口部横断観測と平行して 図-1 に示す両湾口部水域を対象として 14 000 ft 上空より 1 潮汐間、多数回撮像されたものである。

3. 流入水塊の移動形態について

a) 大島断面での水塊分布

図-3 にモデル化した 1 潮汐間での上潮初期 (No. 1), 上げ潮末期 (No. 2), 下げ潮初期 (No. 3) の 3 潮時について、熱映像による海面水塊分布と、大島断面内流速、塩分分布とを合せ、大島瀬戸から流入する水塊 (大スケール渦) の移動形態を時空間的に示す。図-2 に示した海底地形図からは大島瀬戸の最狭部から福島

にかけての水路上中央に水深約 10 m の浅瀬 (原州) があり、これによって屋代島側水路 (以下、東岸水路) と大島西岸水路 (以下、西岸水路) に 2 分された海谷を形成している。そこで 図-4 には熱映像から模式化した海面水温分布を No. 1, 2, 3 の潮時について示す。

No. 1 の上げ潮初期での流入水塊のパターンは舌状の低水温 (LL 印) の水塊が 2 枚重なった形で福島まで張り出している。この形は水路内の海底凹部により 3 次元流が発達するために生じるものと見られる。No. 2 の上げ潮末期では、流入した水塊が円形状に大スケールの渦を形成し、その先端部は前島手前まで伸びている。外輪のフロントでは、温められた水塊が带状にとりまいている。No. 1 と No. 2 の LL 水域の面積は、各々約 11.7 km² と 23.3 km² であり、その拡がり速度は約 800 m²/sec (No. 1 と No. 2 の時間幅を 4 時間とした) となる。

次に、No. 3 の下げ潮初期では、No. 2 で円形状に流入した水塊が、転流時に水平の shear を受けながら前島

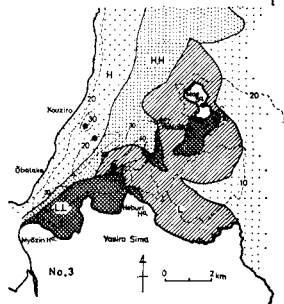
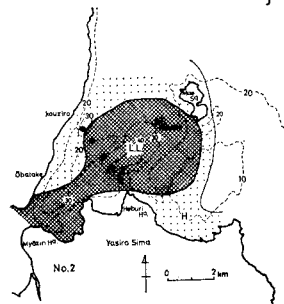
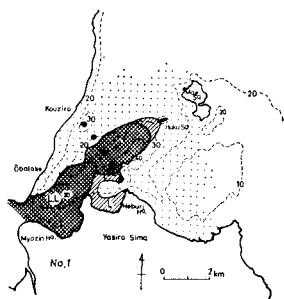


図-4 熱映像の模式図

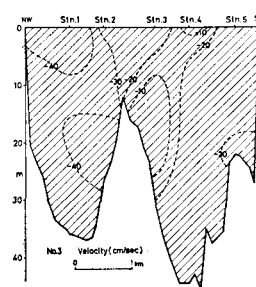
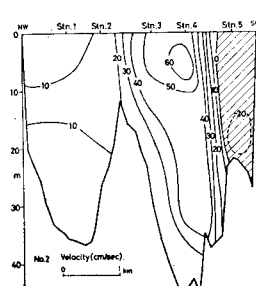
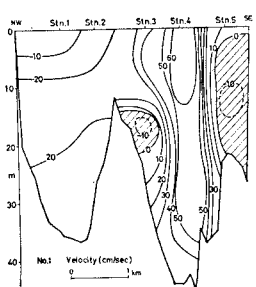


図-5 断面内流速分布

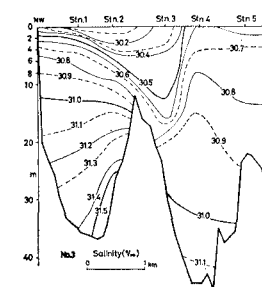
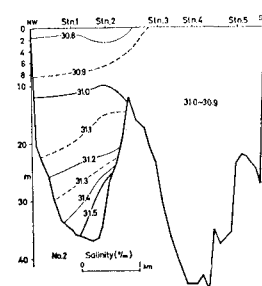
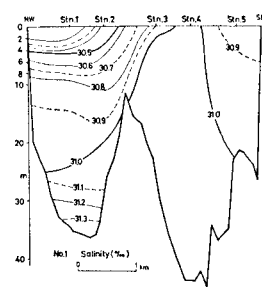


図-6 断面内塩分分布

(図-4 の破線及び数値は等深線, ● 印は横断面測点, 海面温度区分, LL: 22°~22.5°C, L: 22.5°~23°C, H: 23°~23.5°C, HH: 23.5°~24°C, 図-5 の斜線部は湾外への流出)

を囲むように水塊が trap される．一方，岩国沖に流出した河川水系の水塊が表層で温められ，密度流的傾向を強めながら（熱映像からは多重フロントの形成が認められる⁴⁾）帯状に南下し（HH 水域），流入した水塊を侵食している．従って，フロント部では強い水平 shear による混合が予想される．

図—5, 6 には 図—4 と対応した 3 潮時での断面内の流速分布と塩分分布を示す．流速は断面に直角成分で負符号（図中斜線部）は湾外への流出を示す．断面内は中央の浅瀬によって東西水路に 2 分される．

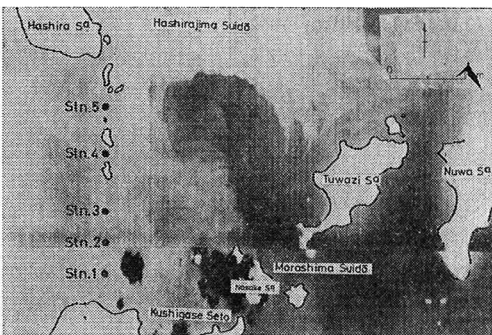
No. 1 の上げ潮初期では，東側水路 Stn. 4 から高塩分の水塊が上層部に強く流入し，図—4 の流入水塊の分布とよく対応している．一方，西側水路の Stn. 1, 2 では東側水路の分布と全く異なり，表層に低塩分，下層に高塩分の水塊が成層する．全体として水平，鉛直方向に強い shear と循環流の発生が予想される．

No. 2 では東側水路で鉛直方向に全く均一（約 31‰）な塩分分布を示し，強く流入している．西側水路では成層が維持され，流れは弱いが高層に高塩分の流入が見られる．Stn. 5 では No. 1 と同様に反流しており時計回りの循環流が発生している．No. 3 の下げ潮初期では西側水路の成層が強くなり，Stn. 2, 3 の表層から低塩分の水塊がクサビ状に東側水路中層に向けて侵入している．この低塩分の水塊は 図—4 と対比すると，南下してきた低塩高温な河川水系の水塊であることが解る．

以上より断面内での塩分，流速分布と熱映像による平面移動パターンがよく対応づけられ，流入水塊の時空間的構造を明らかにすることができた．

b) 柱島断面での水塊分布

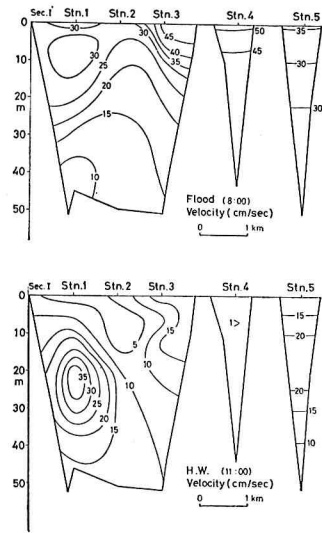
柱島断面 Sec. I 近傍に於ける上げ潮中期での MSS 熱映像による海面温度パターンを 写真—1 に示す．諸島水



写真—1 柱島水道海域での熱映像

道から流入した大スケールの渦による低温水塊（図中格子状域）が分布し，さらに串ヶ瀬々戸からの流入水塊が認められる．

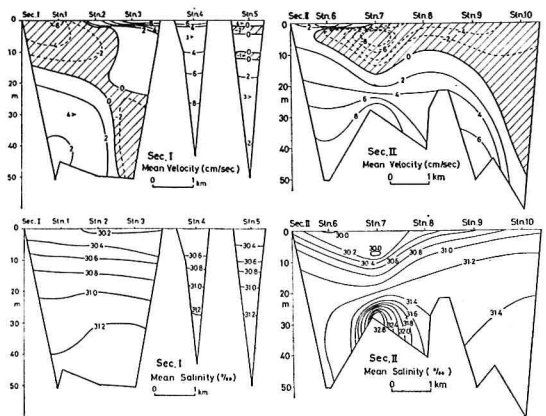
図—7 に Sec. I での上げ潮中期（図上段）と満潮時（図下段）での断面流速分布を示す．図中正符号は流入を



図—7 柱島断面 Sec. I の流速分布

示す．上げ潮中期での Stn. 3, 4, 5 に見られる高流速の分布は諸島水道からの流入水塊と見られ，満潮時での Stn. 1, 2 中層に位置する高流速分布は，少し遅れて到達した串ヶ瀬々戸からの水塊と考えられる．

この様に Sec. I の断面内では起源の異なる 2 つの渦が時間をずらせ侵入する形態が見られる．図—8 に柱島



図—8 柱島断面での 1 潮汐平均流速分布（上段）と塩分分布（下段）

断面 Sec. I と Sec. II の 1 潮汐平均断面内流速と塩分分布を示す，図—8 の中で斜線部は流出を示す．Sec. I では 図—7 で示した 2 つの流入水塊との差異が認められ，Sec. II では上層から湾内水が流出し，下層から高塩な湾外水が流入している．特に，Stn. 7 上層の低塩分，下層の高塩分の分布は終始認められ，Stn. 6 では諸島水道からの流入水塊と思わせる高流速分布が間欠的に認められた．

4. 湾口部での輸送特性

(1) 断面流量及び塩分輸送量の算出法

塩分輸送量の算出法についての詳細は別報^{1),2)}に譲り簡単に述べる。

断面に直角成分の流速 u , 塩分 s , 断面積を A とすれば各要素は次のように分解される。

$$\left. \begin{aligned} A &= \bar{A} + A_1 \\ u &= \bar{u}_A + U_A + u_a, \quad s = \bar{s}_A + S_A + s_a \end{aligned} \right\} \cdots (1)$$

断面積 A は、各時間での断面内格子状にとった面積要素 dA の和 ($A = \sum dA$) であり, A_1 は断面変動量で潮汐に対応して変化する。(1) 式の添字 A は断面平均値, 横棒は時間平均値を示す。 $\bar{u}_A$ は1潮汐断面平均流速, U_A は断面平均潮流である。 u_a は断面内の流れの shear を示す成分 ($u_a = u - u_A$) である。 u_a は更に, $u_a = \bar{u}_a + U_a$, $\bar{u} = \bar{u}_a + \bar{u}_{av}$, $U_a = U_t + U_v$ に分解される。添字 t, v は水平成分, 鉛直成分を示し, 塩分 s についても同様に分解される。

断面を通しての断面流量は $A \cdot u_A$ であり, この時間平均値は次式となる。

$$\overline{A \cdot u_A} = \bar{A} \cdot \bar{u}_A + \overline{A_1 U_A} \cdots \cdots (2)$$

次に, 断面を通しての平均塩分輸送量は, $\bar{F} = \overline{A(us)}_A$ であり, (1) 式及び, 前記の成分を考慮し分解すれば表-1の左欄に示す項から構成される。即ち, $\bar{F}$ は T_1 から T_8 に分解され, さらに T_6 の shear 分散による輸送項は T_7 から T_{12} に分解される¹⁾。この中で T_2 の $\overline{A_1 U_A} \cdot \bar{s}_A$ は Stokes' drift⁵⁾ ($A_1 U_A$) による塩分輸送項であり, T_4 の $\bar{A} \cdot \overline{U_A S_A}$ は trapping の効果による輸送項である。 T_2, T_4 については今後“Stokes' Flux”と“Trapping Flux”と仮称する。

T_6 の分解項 T_7, T_8 は水平, 鉛直循環流(残流流)による寄与, T_9, T_{10} は水平, 鉛直方向の shear による寄与を示す。

(2) 断面流量と塩分輸送量

図-9に大島断面と柱島断面 Sec. I, IIでの潮位(Tide), 断面平均流速と塩分の変動量 U_A, S_A について1潮汐間の変動を示す。これらの値の調和解析結果からは, 各成分とも M_2 潮の振動が支配的ではあるが, S_A では M_4, M_6 の倍潮成分が M_2 の振幅と同程度で, U_A では M_6 の寄与も認められた。

各断面での資料により算した断面流量 (Au_A) の規模を M_2 潮の振幅値で示せば, 大島断面では $3.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$, 柱島断面 Sec. I で $3.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$, Sec. II で $4.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ であり, 1潮汐間での収支は大島断面で $1.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ の流出を, 柱島 Sec. I で $5.5 \times 10^7 \text{ m}^3$ の流入を, Sec. II では $1.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ の流入を示す結果を得た。

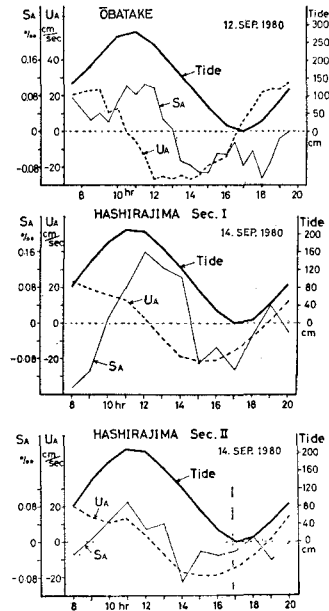


図-9 各断面での潮汐, U_A, S_A の変動

表-1 各断面での平均塩分輸送量

Salt Flux $\text{m}^3 \cdot \text{‰} / \text{sec}$	ŌBATAKE	HASHIRAJIMA Sec. I	HASHIRAJIMA Sec. II
$\bar{F}$	-96798.6	44313.5	110354.3
$\bar{A} \cdot \bar{u}_A \cdot \bar{s}_A$ T_1	-93578.7	36056.6	97227.8
$\bar{A}_1 \bar{U}_A \cdot \bar{s}_A$ T_2	-2722.1	7734.9	8704.1
$\bar{A}_1 \bar{s}_A \cdot \bar{u}_A$ T_3	-5.1	1.4	1.5
$\bar{A} \cdot \bar{U}_A \bar{s}_A$ T_4	200.9	-249.1	619.3
$\bar{A}_1 \bar{U}_A \bar{s}_A$ T_5	-3.2	-9.7	6.8
$\bar{A} \cdot (\bar{u} \bar{s} \bar{s})_A$ T_6	-687.0	780.0	3789.0
$\bar{A} \cdot (\bar{u} \bar{d} \bar{t} \bar{s} \bar{d} \bar{t})_A$ T_7	-206.0	-31.5	-419.1
$\bar{A} \cdot (\bar{u} \bar{d} \bar{v} \bar{s} \bar{d} \bar{v})_A$ T_8	-178.3	636.4	3710.3
$\bar{A} \cdot (\bar{U} \bar{t} \bar{S} \bar{t})_A$ T_9	-556.9	132.1	481.4
$\bar{A} \cdot (\bar{U} \bar{v} \bar{S} \bar{v})_A$ T_{10}	254.2	43.0	16.3
$\bar{A}_1 (\bar{U} \bar{t} \bar{S} \bar{t})_A$ T_{11}	-1.2	-0.3	4.9
$\bar{A}_1 (\bar{U} \bar{v} \bar{S} \bar{v})_A$ T_{12}	-2.3	-0.1	0.9
$\bar{U}_A$ cm/sec	-2.6	0.7	1.4
$\bar{S}_A$ ‰	30.9	30.8	31.1
$\bar{A}$ m^2	114873	163802	221770

次に各断面での塩分輸送量の算出結果を表-1に示す。負符号は湾外へ輸送(流出)を示す。平均塩分輸送量 $\bar{F}$ の値は大島断面から約 100 ton/sec の流出を, 柱島 2 断面から約 150 ton/sec の流入を示し Sec. II からの高塩分の流入が見られる。 $\bar{F}$ の内訳として各断面とも T_1 ($\bar{A} \bar{u}_A \cdot \bar{s}_A$) の平均流による輸送項が全輸送の 80% 以上も占める。これらの値は, 日変動, 長期変動を持つと見られ今後の検討を必要とする。

(3) Stokes' Flux と Trapping Flux の寄与

T_2 ($\bar{A}_1 \bar{U}_A \cdot \bar{s}_A$: Stokes' Flux) の輸送項の値は各断面とも他の輸送項 ($T_3 \sim T_{12}$) に比較して大きく, 柱島断面

Sec. I では T_1 の約 20%; Sec. II では約 10% にも達し、塩分輸送に重要な役割を持つ。これまで、この Stokes' Flux に対する実測例は少なく、今回の結果は注目すべきものである。

一方、 T_4 ($\bar{A} \cdot \bar{U}_A S_A$: Trapping Flux) の輸送項は、潮流と塩分変動の位相関係に伴い発生する項である。図一

ことができた。

各断面内の分布は、水塊の通過により特徴的な形態を維持し、塩分輸送機構を規定している。1 潮汐間の塩分輸送量からは、全断面とも T_1 による輸送量が支配的であった。各断面では大島断面で流出を示し、 T_7 , T_9 の水平 shear 及び循環流による寄与が大きく示された。これは図一4の熱映像で捉えた流入水塊の分布から、水平 shear を著しく発生し混合することを定量的に証明するものである。

柱島断面では全体として流入を示し、Sec. I では Stokes' Flux の寄与が全体の 20% 近くと大きく注目すべき値を得、さらに鉛直循環流 (T_8) による寄与が見られた。

Sec. II では Trapping Flux (T_4) と、鉛直循環流 (T_8) による寄与が3断面の中で最大であった。

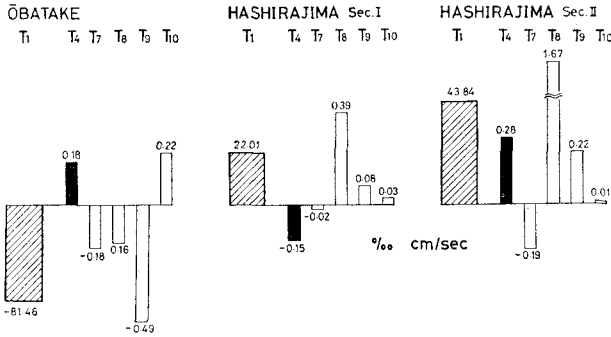
Trapping Flux 及び Shear 分散項による輸送量の変動には流入水塊 (渦) によると見られる短周期成分が認められた。

以上から、海水交換機構を解明する上で、リモートセンシングと、従来の海水交換調査とを有機的に活用することにより、海水交換の時空間的規模をより正確に把握できることを示した。また、短期間 (1 潮汐間) での海水交換機構の周期特性と、湾口部を流入出する水塊の影響が明らかとなった。

本研究に際し、種々御指導頂いた長岡技術科学大学の早川典生助教授、貴重な御助言を頂いた京都大学の國司秀明教授、理化学研究所の宇野木早苗先生に謝意を表す。また、MSS 撮像による調査資料を心よく提供いただいた日本造船振興財団の方々に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 上嶋英機・早川典生・国司秀明: 感潮河川における物質輸送の機構について (第 2 報), 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 623~627, 1979.
- 2) 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.
- 3) 上嶋英機: 広島湾の海水交換機構, 日本造船振興財団・日本国土海洋総合学術診断, 55 年度技術報告集 (海洋関係), pp. 49~82, 1980.
- 4) 大西外明・田中総太郎: 二成層密度流における多重フロント現象の観測とそれに基づく連行量算定法, 第 28 回海岸工学講演会論文集, 424~428, 1980.
- 5) Dyke, P. P. G.: On the Stokes' Drift Induced by Tidal Motions in a Wide Estuary, Estuarine and Coastal Marine Science, 2, pp. 17~25, 1980.



図一10 塩分輸送項の比較 (Net 値)

10 には各断面での各項の値を比較し易くするため単位面積当りの値 (Net 値) を用い模式化して示したものである。

T_4 の Net 値は前報²⁾で示した湾中央での値に比べ相対的に大きく、特に柱島断面 Sec. II が最も大きい。 T_4 の時間変動値 ($U_A S_A$) から周期性を見れば、大島断面では M_4 潮汐成分が大きく、柱島 Sec. I, II では M_2 , M_4 の他に M_6 の効果が大きく示された。このように Trapping Flux にとって U_A と S_A の位相関係の中に、渦が間欠的に侵入することの効果が短周期成分として含まれると考えられる。

(4) Shear 分散項による寄与

T_8 の shear 分散項による輸送量は表一1の結果から明らかなように、柱島 Sec. II の値が最も大きい。 T_6 の内訳として、 T_7 , T_8 , T_9 , T_{10} の Net 値を図一10に示す。

大島断面では T_9 の水平 shear による寄与が大きく、 T_7 の水平循環流の寄与と共に特徴的な輸送形態を示す。

柱島 Sec. I, II では鉛直循環流 T_8 による寄与が大きく、図一8に見られる鉛直構造からも裏付けられる。

5. 結 論

広島湾の2つの湾口部横断面で、1 潮汐間の海水交換調査と、同時に行なわれた MSS 撮像から、湾内に流入する“大スケール渦”の挙動と規模を時空間的に捉える