

台風通過に伴う物質輸送の変化

上 嶋 英 機*

1. はじめに

湾奥部に河口を持つ閉鎖的な湾では、水質汚濁が著しく夏期には強い密度成層が形成される。しかし、この密度成層も気象擾乱によって著しく変動を受けることが知られているが、その詳細については解っていない。特に、密度成層下での強風によって生じる流動場と成層状態の変化を横断面内多数点で捉えた調査例はない。

このため、成層期における流動と物質輸送機構を調べる目的で、太田川河口を持つ広島湾奥部中央の横断面で15日間連続調査を実施したところ、台風8013号通過による強風によって、強い吹送流と鉛直循環流が観測された。本報では、この調査資料を基にして、15日間の物質輸送形態を明らかにし、台風通過時における流動場の変化と物質輸送の変動について解析した結果を紹介する。

2. 観測内容

広島湾北部は図-1に示すように、湾中央部から宮

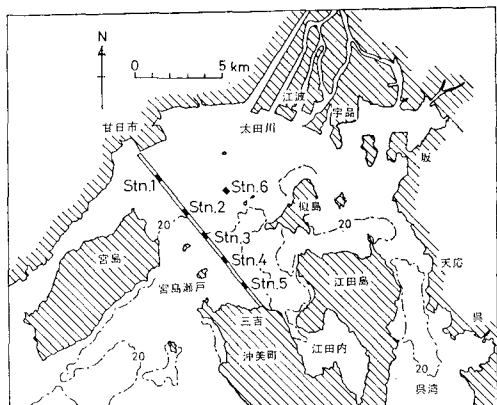


図-1 広島湾北部横断観測位置図

島瀬戸によって区分された湾奥部に当り、太田川河口が位置している。水深は瀬戸部周辺を除けば20m以浅が85%も占める浅海域で、海水容量が約28億 m^3 である。太田川から流出した河川水は、湾内に強い密度成層を形成しながら、宮島瀬戸から湾中央部へ流出すること

がこれまでに観測されている¹⁾。横断面観測位置は図-1に示すように、湾北部中央の宮島瀬戸寄り、廿日市から三吉を結ぶ約12km間に5測点(Stn. 1~Stn. 5)と、太田川河口と宮島瀬戸を結ぶ河川水流出軸上の中央の1測点(Stn. 6)である。図-2に示す横断面図によると、

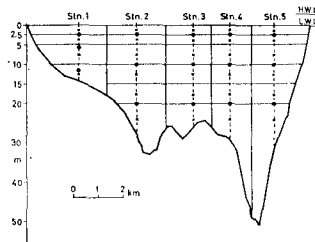


図-2 横断面観測点図、(●, 実測点, ×, 格子代表点)

Stn. 1(廿日市地先)の水深が約15mと浅く、Stn. 5(三吉地先)附近で約50mと深くなり、平均水深は約30mである。断面内の実測点は●印で示す海面下2.5m, 10m, 20mの3層(Stn. 1は2.5, 6, 12m)であり、各測点にはアンダー流速計を設置した。Stn. 6も同様である。観測は1980年9月7日から23日までの大潮、小潮を含む15日間、5分間隔で流向流速、塩分、水温を連続測定した。

観測期間中の気象状態として、風向風速、気圧、さらに太田川河川流量と潮位の変動を図-3にまとめて示す。観測が実施される1週間前の8月31日に太田川から約2200 m^3/s (日平均流量)の大洪水があり、湾内に流出した河川水は約2億 m^3 以上と、湾北部容積の約1割にも達するものであった。このため観測開始時には、湾内水は低塩分化し強い成層が形成されていた。9月9日から台風8013号の接近によって気圧は低下し始め、台風の中心が広島湾西部を通過した11日の午後には979mbの最低値を記録した。これに伴って風速は強まり、湾奥部に吹き込む南寄りの風、13~17 m/s (平均風速)の強風が続いた。このため、11日の平均潮位は8日に比べ約55cm上昇し、11日17時の干潮時では予報値(広島気象台、宇品港)より106cmも上昇した。なお、台風による降雨のため、11, 12日に約400 m^3/s (日平

* 正会員 工修 通産省中国工業技術試験所 内海水理研究室

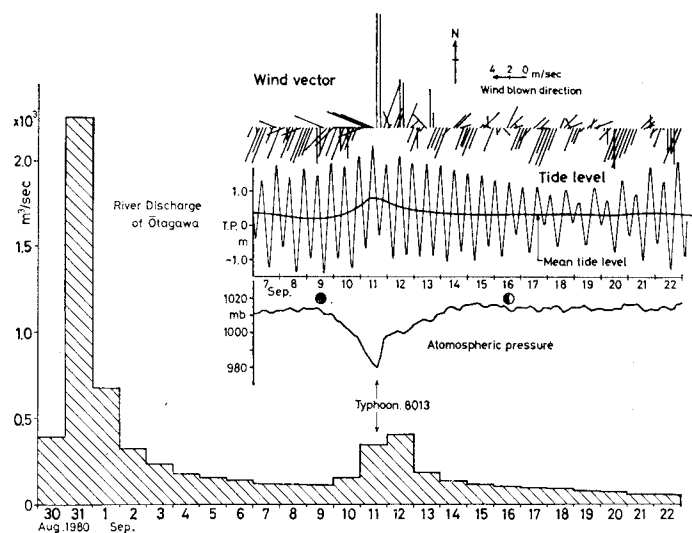


図-3 河川流量(太田川・矢口第一), 風向風速(江波, 3 時間平均値), 潮汐(宇品港), 気圧(江波)の記録

均)の出水が見られた。

3. 横断面観測結果

(1) 台風通過による流動変化

図-4 には, 横断面中央測点, Stn. 3 における水深方

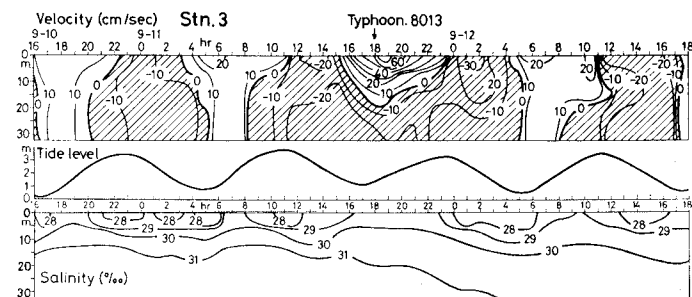


図-4 横断中央 Stn. 3 の流速(断面直角成分, 斜線部は流出), 塩分, 潮汐(宇品港), 1980 年 9 月 10~12 日

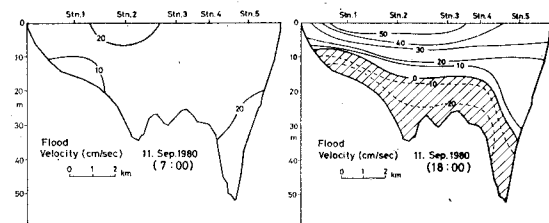


図-5 横断面流速分布(断面直角成分, 斜線部は流出方向) 左図は 9 月 11 日 7 時, 右図は 9 月 11 日 18 時の上げ潮時

向の流速, 塩分分布と潮汐の時間変動を, 台風通過の 11 日を含む前後 3 日間について示す。流速値は断面に直角成分で, 30 分毎平均値を用い, 正が流入, 負(図中斜

線部)が, 流出を示す。台風通過前の上げ潮, 下げ潮流の分布は一定したパターンを保持しているが, 台風が最も接近し通過する 11 日 15 時から 23 時の下げ潮末期から上げ潮期にかけての流速分布は平常時と大きく異なり, 上層からは 1 潮汐前と同じ潮時の約 3 倍にもなる 60 cm/s 以上の強い流入があり, 下層からは上げ潮時であるにもかかわらず, 逆に流出を示している。これは, 潮汐流の上に, 吹送流(風にエネルギー源を持つところの流れ)が加わり, 通常の流動場を大きく変えたことによるものと考えられる。

そこで, 台風通過前と通過時での上げ潮時の断面流速分布を図-5 に示す。これより両者の流動場の相異が明らかである。即ち, 台風通過時には, 風向に応じて上層から流入し, 下層から流出する強い鉛直循環流が湾北部全体に形成され, これは, Stn. 6 の記録からも明らかである。このため, 成層は台風時の鉛直混合によって崩され, 図-4 下段の塩分分布で見られるように, 台風通過前の強い成層が弱められると共に, 低層 31‰ の高塩分水塊は消滅する(高塩分水塊は 18 日に至って観測された)。

以上から, 台風通過によって, 湾内の循環機構は大きく変化し, 通常得られない強い物質輸送(海水交換)がなされるものと考えられる。

(2) 台風による吹送流の見積り

上記資料から, 台風時に発生する吹送流の大きさを見出し, その時間的な推移と断面内での吹送流の分布から, 風速との対応を概略的に考察する。

図-6 には, 11 日の 1 日 2 回潮における, 30 分間平均値を基に得た断面平均流速(u_A), 塩分

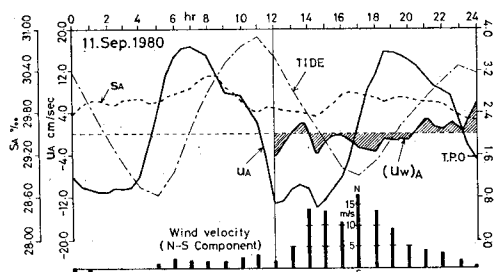


図-6 断面平均流速 u_A , 塩分 S_A , 潮汐 Tide, 風速(N-S 成分, 1 時間平均風速)及び, 断面平均吹送流(u_w)_Aの時間変動図

(s_A)、潮汐 (Tide) 及び、平均風速の南北成分を示す。台風最接近の 13 時には 979 mb の最低気圧が記録され、14 時以降は SES~S, 10 m/s 以上の強風が 19 時まで続いた。特に、17 時には約 17 m/s の平均風速が記録されている。

そこで、11 日の 2 回潮の内、風の影響が微弱と見られる午前の 1 潮汐間と、台風による吹送流を含む午後の 1 潮汐間から、対応する各時間での流速値の差により近似的に吹送流を求めてみた。潮汐の予報によれば、11 日の 2 回潮の日潮不等は少なく、両者はほぼ対象と考えられ、更に、各測点での流速が、潮流、恒流、密度流、吹送流によって線型に重ね合っているとすれば、午後の 1 潮汐間の流速 u_2 (t_2 , 12 時~24 時の値) から、午前の流速 u_1 (t_1 , 0 時~12 時の値) を差し引くことにより、吹送流の大きさを近似的に見積ることができると考えられる。即ち、吹送流 u_W が u_2 にのみ存在しているとして、次式より u_W が求まる。

$$u_W = u_2(t_2) - u_1(t_1), \quad t_2 = t_1 + T, \quad T: \text{潮汐周期} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ただし、 u_1, u_2 として 図-2 に示す横断面内格子の代表点 (×印) での値を実測値 (●印) から内挿し、30 分毎平均した流速値を使用する。

1 潮汐間での吹送流 u_W の断面部分によれば、風速が強まるに従って上層の吹送流が発達する過程が明らかとなった。図-7 には、18 時 (図-5 と対応) の分布と、

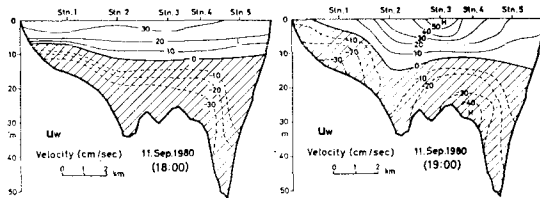


図-7 吹送流の断面分布、(左図: 11 日 18 時, 右図: 11 日 19 時)

最も吹送流が発達した 19 時の u_W の断面分布を示す。風速が強くなった 17 時から約 2 時間後に u_W の値は最大となり、上層から流入、下層から流出する強い 2 層流が形成され、上層の厚さは約 10 m で断面平均水深の約 1/3 に相当した。19 時の u_W の値は表層で 57 cm/s、底層近くで -41 cm/s の最大流速が見られる。しかし、20 時以降は次第に弱まり、24 時の値は表層で 5 cm/s 以下となり、下層からの流出は見られない。一方、 u_W の断面平均値 (u_W)_A については、図-6 に示す結果を得た。全体の断面平均流速 u_A に対して値は小さく、吹送流の最も発達した 19 時前後では -1.0 cm/s で安定し、定常状態にあることを示している。

図-8 左図には、吹送流による 1 潮汐間の平均値 $\bar{u}_W$ の断面分布を示す。上、下層の流入、流出分布が平均的

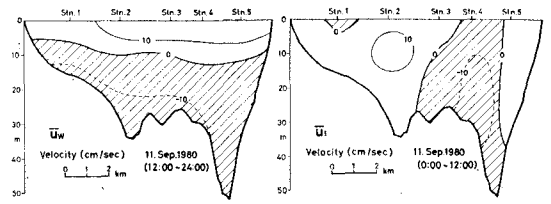


図-8 平均吹送流 $\bar{u}_W$ の分布 (左図) と、平均流 $\bar{u}_1$ の分布 (右図)

には海面下 1/3 水深で区分され、各々の値が約 10 cm/s と対象である。この分布から、吹送流によって強い鉛直循環流が形成されていることが分る。しかし、 $\bar{u}_W$ の断面平均値は -0.2 cm/s と小さい。図-8 右図に示す u_1 の断面分布は、風の影響を受けない通常のパターンであり、 $\bar{u}_W$ の分布との差異が明らかである。ちなみに、 $\bar{u}_1$ の断面平均値は 1.0 cm であった。

風速と吹送流との関係は、一般に風速係数³⁾ (風力係数) と呼ばれる比例係数で表現されている。そこで、今回得られた吹送流 u_W の値と、風速 W から、風速係数 K を次式から試算した。

$$u_W (\text{cm/s}) = K \cdot W (\text{m/s}) \quad \dots\dots\dots(2)$$

u_W の値とし、風の効果を最も顕著に受ける表層の断面方向平均値を使用し、風速の卓越している期間 (図-6)、14 時から 19 時までの平均風速、12.6 m/s と平均吹送流、29.1 cm/s より $K=2.26$ が得られた。更に、平均風速の最大値 (17 時)、16.6 m/s と、最大吹送流 (19 時)、56.9 cm/s から $K=3.42$ の値を得た。この結果は従来から使用されている係数 2~4% の範囲にあり、妥当なものと考えられる。

4. 塩分輸送の変動

(1) 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前報^{1),2)}に譲り、ここでは主要な輸送項について取扱う。

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

$$\left. \begin{aligned} A &= \bar{A} + A_1 \\ u &= \bar{u}_A + U_A + u_a, \quad s = \bar{s}_A + S_A + s_a \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(3)$$

断面積 A は、図-2 で示したように、各時間での断面内格子状にとった面積要素 dA の和であり、 A_1 は断面変動量で潮汐に対応して変化する。 u, s は、各格子代表点の値で、実測値から内挿し求めたものである。式 (3) の添字 A は断面平均値、横棒は時間平均値を示す。従って、 $\bar{u}_W$ は 1 潮汐断面平均潮流、 U_A は断面平均潮流、 u_a は流れの shear を示す成分 ($u_a = u - u_A$) である。 u_a は更に、 $u_a = \bar{u}_a + U_a$, $\bar{u}_a = u_{at} + u_{av}$, $U_a = U_t + U_v$ 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。

断面を通しての平均塩分輸送量は $\bar{F} = \overline{A(u\bar{s})}_A$ であり、式(3)及び、前記の成分を考慮し分解し、主要な項をあげれば次式となる。

$$\left. \begin{aligned} \bar{F} \simeq & \bar{A}\bar{u}_A\bar{s}_A + \bar{A}_1\bar{U}_A\bar{s}_A + \bar{A}\bar{U}_A\bar{s}_A + \overline{A(uas_a)_A} \\ & \overline{A(uas_a)_A} \simeq \bar{A}(\bar{u}_{au}\bar{s}_{ai})_A + \bar{A}(\bar{u}_{av}\bar{s}_{av})_A \\ & + \bar{A}\cdot(\bar{U}_i\bar{S}_i)_A + \bar{A}(\bar{U}_V\bar{S}_V)_A \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(4)$$

式(4)で、 T_1 は平均流(恒流)による輸送項、 T_2, T_4 は前報³⁾で示した Stokes drift による輸送項 (Stokes flux) と、trapping による輸送項 (Trapping flux) である。 T_6 は shear 分散による輸送項で、 T_6 は主に、 T_7 から T_{10} の4項に分解される。 T_7, T_8 は水平、鉛直循環流による輸送、 T_9, T_{10} は水平、鉛直方向の shear による寄与を示す。

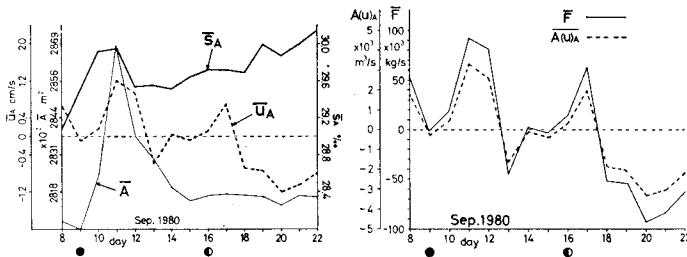
(2) 15 日間塩分輸送特性

図—9 の差図には、日平均した断面積 $\bar{A}$ 、断面平均流速 $\bar{u}_A$ 、塩分 $\bar{s}_A$ の 15 日間の変動を示す。なお、 u, s については 5 分間の基本データから 30 分毎平均した値を基に 1 日 2 潮汐、25 時間平均して求めた。 $\bar{A}$ は平

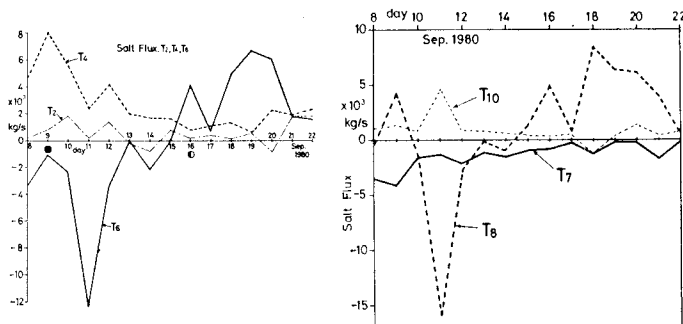
均潮位に対応して変動し、台風通過の 11 日最大となる。 $\bar{u}_A$ は 11 日に流入方向に 1.2 cm/s の最大値を、20 日には流出方向 1.2 cm/s の最大値を示している。 $\bar{s}_A$ の値は、低塩分化していた 8 日から台風接近により高塩分の沖合水の流入を受け一挙に 1% も上昇し、台風通過後は出水も加わって低塩分化している。

図—9 右図に 15 日間の日平均塩分輸送量 $\bar{F}$ と断面流量 $\overline{A\cdot u_A}$ の変動を示す。11 日での各々の値は流入側に最大となり、 $\bar{F}=93 \text{ ton/s}$ 、 $\overline{A\cdot u_A}=3000 \text{ m}^3/\text{s}$ の値を示した。20 日には逆に、同量の流出が見られた。なお $\bar{F}$ の内訳として T_1 の輸送量が支配的であった。

図—10 左図には、 T_2, T_4, T_6 の輸送量を示す。 T_2 の Stokes flux は、前報で示した湾口部に比べ、その寄与は小さい。 T_4 の Trapping flux は、塩分の急上昇と対応して 9 日に最大となった。 T_6 の shear による輸送量は、台風通過の 11 日に最大流出し、断面内の shear が、吹送流によって著しく発達した事を裏付けるものである。そこで、 T_6 の内訳は 図—10 右図に示すように、 T_9 の値は微少であり、 T_8 の鉛直循環流による輸送量が支配的に大きく、特に台風時には最大となり、図—8 (左図) で示した吹送流によって生じた鉛直循環流による寄与を量的に示すものである。更に、 T_{10} の鉛直 shear に



図—9 左図: $\bar{u}_A, \bar{s}_A, \bar{A}$ の 15 日間変動
右図: 日平均塩分輸送量 $\bar{F}$ と断面流量 $A(u)_A$ の変動



図—10 左図: 塩分輸送項 T_2, T_4, T_6 の 15 日間変動
右図: T_7, T_8, T_{10} の 15 日変動

よる輸送も日に大きい。一方、 T_7 の水平循環流による寄与は台風時においても T_8 に比べ、はるかに小さいものであった。

上記、各輸送項の中で、吹送流のみに起因する輸送量を区別するため、前節で求めた吹送流 u_w の値を式(4)の流速値に使用し解析した。なお塩分 s はその時間の値をそのまま使用した。この結果を対比するため、吹送流を含まない、台風通過前の1潮汐間の流速 u_1 から同様に解析した。前者をCas. 1、後者をCas. 2として得た値と、 T_7 、 T_8 、 T_9 、 T_{10} の対比を図-11にまとめて示

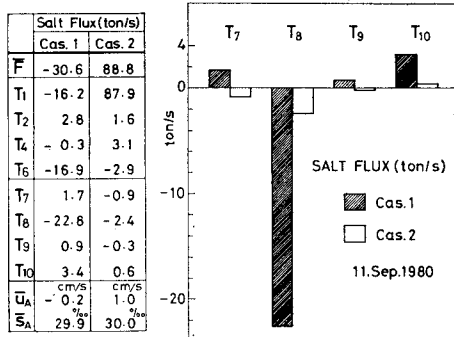


図-11 Cas. 1 (u_w による結果), Cas. 2 (u_1 による結果)の塩分輸送量

す。吹送流 u_w から得られたCas. 1の $\bar{F}$ の値が、30.6 ton/sとCas. 2の約35%ではあるが、相対的に T_1 の値が小さいことによる。しかし、 T_6 のCas. 1の値はCas. 2の5倍以上にも達し、吹送流によって生じるshearの強さを示している。更に、 T_6 の分解項の中で、吹送流による鉛直循環流の寄与(T_8)が最も大きく、吹送流を含まない通常時の10倍にもなる輸送量が得られた。

5. 結 語

洪水時以降の成層の発達した広島湾々奥部の中央横断面で行った15日間連続観測資料の解析から、観測期間中に湾西部を通過した台風8013号による、流動場の変化と、それに伴う物質輸送への寄与と変動を明らかにし次の結果を得た。

(1) 台風通過時の横断面内流速分布は、断面に対し、ほぼ直角方向に吹く南寄りの風に誘因される吹送流により、上げ潮時において、上層から強く流入し、下層から

は流出する特異な流動場を形成する。このため、強い成層は崩され、下層の高塩分水は消滅した。

(2) 近似的に解析して得た断面吹送流分布(u_w)の時間変化からは、風速の成長に伴い吹送流も増大し、表層吹送流の値は、強風時より2時間後に約57 cm/sの最高を示し定常となった。海面下、1/3平均水深を境に上層は流入し下層は流出する2層流(循環流)が形成されていた。1潮汐平均断面吹送流分布(u_w)からは鉛直循環流の強い形成が確認された。しかし、その断面平均値は0.2 cm/sと微少であった。吹送流と風速から試算した風速係数は平均的には、 $K=2.26$ 、最大3.42の値が得られた。

(3) 台風時での塩分輸送量は15日間の中でも最高であり $\bar{F}$ は93 ton/sの流入を示し、恒流による T_1 の寄与が大半であった。 T_2 、 T_4 の寄与は全体として小さいが、台風接近時の塩分上昇期に対応して T_4 も増大した。台風によって最も増大したのは、shear効果による T_6 の値であり、その中で鉛直循環流(T_8)の寄与が支配的に大きく示された。

(4) 台風時の吹送流のみによる塩分輸送量を u_w の値を使用し算出した結果、鉛直循環流 T_8 の値は22.4 ton/sにもなり、吹送流のない場合(Cas. 2)に対し10倍もの寄与が見られた。

以上により、台風によって生じる吹送流は強い鉛直循環流を形成し、物質輸送、混合に大きな役割を持つことを示した。

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、調査に於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。更に、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、長岡技科大の早川典生助教授に謝意を表す。

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) 小長俊二・西山勝暢：瀬戸内海東部の表面流について，海と空，第51巻，第2号，pp. 17~23, 1976.