

大阪湾の潮流に関する水理模型実験 (3)

今本 博健・石垣 泰輔・馬場 康之

HYDRAULIC MODEL TEST OF TIDAL CURRENT IN OSAKA BAY (3)

By Hirotake IMAMOTO, Taisuke ISHIGAKI and Yasuyuki BABA

Synopsis

Residual currents are known to be responsible for the transport of mass, pollution and sediment, despite their magnitudes are small relative to those of tidal currents. The residual currents in the previous research have been obtained by averaging temporal variation of velocity at a fixed point. To study the transport processes, however, handling the phenomena from Lagrangian viewpoint is necessary.

Many factors like tide, wind and density are related to residual currents. In case of Osaka Bay, additionally, the existence of currents running toward the east in the Seto island sea (the constant flow) is pointed out in the previous studies, and the currents has influence on transport processes.

This paper shows some experimental results, which take the constant flow into account, of the residual currents in Osaka Bay using a hydraulic model test and a tracer method.

1. はじめに

既報^{1,2)}において筆者らは大阪湾水理模型を用いた模型実験を行い、湾内における潮流の流動特性について検討してきた。その結果、潮流はいくつかの基本的な流動パターンを持つが、ある程度の不安定性を有すること、その流動パターンは1潮汐周期間にわたるライフサイクルを持ち生成消滅を繰り返すなどの知見を得た。本報では湾内の物質の移動に係る残差流について模型実験手法を用いて検討する。

沿岸海域での物質の輸送を考える上で、「残差流」と呼ばれる流れが重要であるとされている。通常、沿岸海域では半日周潮流が卓越しており、半日(12時間25分)あるいは1日(24時間50分)の測流結果を平均するとその平均はほぼ0になることが予想される。ところが実際の現場海域で測流を行うと平均流は0にはならず、ある値を持つ。この平均流が残差流とされ、海域にまとまった流系として現れることがある。残差流の強さは潮流に比較して小さく、従来沿岸海域における物質の広がりには最も卓越する流動成分である潮流の役割が大きいと考えられてきた。しかし、実際には数潮汐周期以上の長期間の物質輸送に対しては、往復流である潮流よりも微弱ではあるが残差流の果たす役割が無視できないことが明らかになってきた。

ところで、残差流は固定点における潮流速の時間平均値であり、この流れは厳密には実際の海水の移動を表現するものではない。いま単純な往復流中にある水粒子を考える。任意の1点での流速の時間平均をとると0となり流れはない。水粒子が出発点からわずかに離れたとき、粒子の位置における水位と流れは同じ時刻の元の出発点における水位や流れの状態とは少し異なる。このように出発点と異なる運動を続ける水粒子

は1周期後には出発点に戻ることができずに離れた場所に位置する。このように場所に固定したオイラー的な量とは別に水粒子そのものに着目したラグランジュ的な残差流ともいうべき量が存在する。本報告は、ラグランジュ的な観点から湾内の残差流について検討したものである。

2. 実験及び解析方法

本実験に使用した大阪湾水理模型は水平縮尺1/5000、鉛直縮尺1/500のフルードの相似則に基づく歪み模型である。模型の概要及び諸量の対応は既報^{1,2)}に示すとおりであるが、本実験では模型に新たにポンプ(図中P印)を1台設置した(Fig. 1)。この点に関しては第4章で述べる。実験における潮汐条件は大潮のみとし、その他の条件としては、周辺河川からの淡水流入を考慮して、淀川、大和川の2河川から平水流量に相当する温水を流入させた。

実験では以下に示す流れの可視化手法を用いて粒子の移動を捉えた。追跡する粒子として防水性の紙片で作成した4cm角のトレーサを約20個用意した。このトレーサは可視化結果において識別できるように各々に異なる模様がつけてある。このトレーサを模型内の水表面に散布し、個々のトレーサの位置をスチール撮影により Fig. 2 に示す1潮汐周期を8等分したタイミングで、5周期間にわたって捉えた。また1回の実験で追跡できる粒子の数が約20個と少ないため、同じ実験を3回繰り返して実施することで湾内全体を網羅した。撮影には20mmレンズを使用し、撮影条件は絞り $f = 2.8$ 、開放時間 $t = 1/15$ sec である。

こうして得られた可視化結果より、まずディジタイザーを用いて写真上のトレーサの位置を数値化する。次にこれらのデータをトレーサ別に整理し、各トレーサの1/8周期毎、計5周期にわたる一連の移動データを得た。これらよりトレーサの移動軌跡や潮流速、1周期間の移動により生じた残差などを求めた。

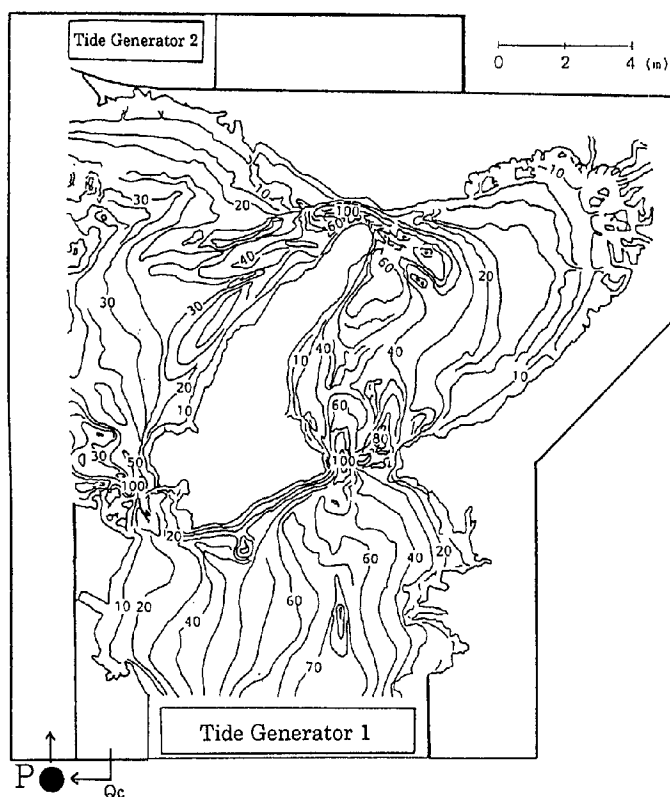


Fig. 1 Hydraulic model of Osaka Bay

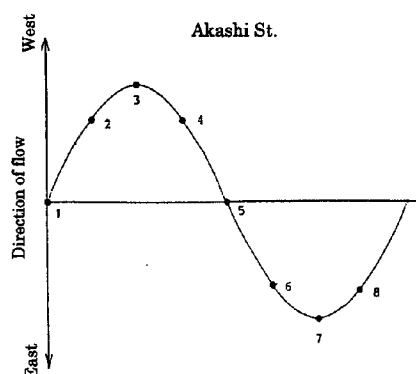


Fig. 2 Schematic tidal curve

3. 湾内の粒子の移動・残差流に関する検討

まず初めに、粒子の移動軌跡について述べる。模型内に投入したトレーサの移動から、湾の西と東では物質の移動特性は大きな差を持つことが知れた。すなわち湾の西側では1周期間の移動が非常に大きく湾のス

ケールの半分にも及ぶのに
 対して、湾の東側では1周
 期後経っても出発点と同じ
 付近に留まる。このとき湾
 の西と東は大阪湾の水深
 20 m ラインによって分け
 られるが、従来の研究にお
 いて、また既報^{1,2)}におい
 ても大阪湾内の流動が水深
 20 m ラインを境に異なる
 流動特性を持つことが知ら
 れており、そのことに符合
 する結果となっている。湾
 の東側でみられる主な移動
 軌跡はFig. 3に示す3つ
 に大別される。須磨沖から
 神戸付近及び関西国際空港
 近辺では東西もしくは南北
 方向に往復する形の移動軌
 跡となる。また淀川沖から
 大和川沖の海域では、反時
 計回りの円運動を行いなが
 ら徐々に北または北西に移
 動する軌跡を描く。このこ

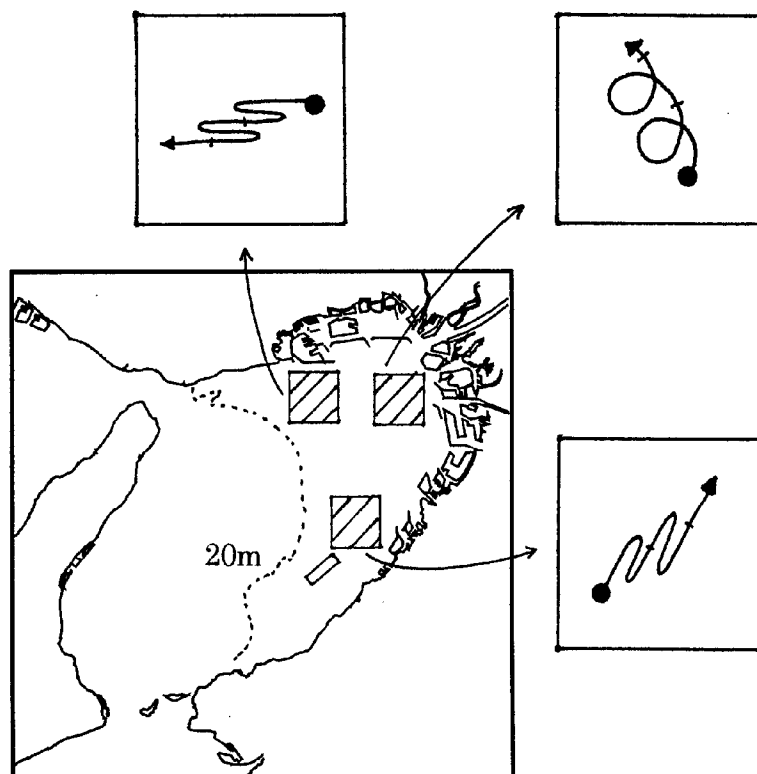


Fig. 3 A model of traces trajectories

とは友ヶ島水道から北上する潮流の影響が湾の東岸に沿うように反時計回りに及び、明石海峡より流入する潮流の影響も同様に陸岸に沿う形となり、時計回りの流動をもたらすことを表している。そしてこのような軌跡を描きながら、湾の東側では全体として北上する移動の傾向を示す。

しかしながら、いくつか実施されている現地観測の結果³⁾によると、淀川沖や大和川沖に投入された漂流板等の移動は南向きであるとされ、本実験結果と一致しない。原因として、本実験で使用した水理模型では潮汐条件と河川水の流入しか考慮しておらず、現場海域において流動を引き起こすその他の要因（例えば海水の塩分濃度分布、風、気圧など）が無視されていることが挙げられる。模型上では現地の条件を全て満足することはできていないが、本模型における潮汐の再現状況や模型内の潮流と潮流図等との比較の結果は良好であり、潮汐により生じる海水の移動は再現されているものと考えられる。従って現地において単に潮汐の影響のみを考慮した理想的な条件下では、本実験のように湾の東側では北向きの移動となることが予想される。しかし、実際にはその他の要因による流動も無視できず、その影響が潮流の影響を上回る大きさを有するために観測結果と実験結果が異なる結果を示すと考えられる。

一方、湾の西側における移動軌跡は上述の東側ほど単純ではなく、まとまった特徴を持たない。唯一特徴的なものとしては、沖の瀬付近に生じる環流によって時計回りに移動する様子が見て取れるのみである。湾の東側では、1潮汐周期間のどの段階で移動を開始しても、ほぼ同様の軌跡を描いて同じ方向に移動する。しかし湾の西側では、同じ点を出発しても移動を開始する時刻によって到達する場所が大きく異なる。これは湾の西側は潮流速が大きく、流向、流速の変動が激しいために、時間的・空間的なわずかな違いにより移動特性が全く異なることによる。

先にも述べたように、一般的に残差流とは固定点における潮流速の観測結果の時間平均値であり、オイ

ラー的な量である。ここでは実験結果より移動する粒子そのものに着目したラグランジュ的な観点から残差あるいは残差流を求め、定点での平均値としての残差流と比較検討する。ある時刻に移動を開始した粒子の元の位置と1周期後に達した位置の差を残差とし、この距離を所要時間で除したものをラグランジュ的な残差流として算定する。

Fig. 4 に実験結果より得られたラグランジュ的な残差ベクトル及びコンターを示す。なおこの残差ベクトルは明石海峡における潮流の西流最強時から1周期間の移動より算定したものである。また **Fig. 5** には定点での時間平均値として求めた残差ベクトル及びコンターを示す。これらのベクトルは以下の手順で求めた。まず可視化により得られた粒子の位置データ（1周期につき8点）から移動軌跡を推定し、**Fig. 2** に示す8潮時における潮流速を算出した。次にその流速値を格子点での値に変換し、各格子点における8潮時分の潮流速の平均値を求めた。**Fig. 4**、**Fig. 5** を比較すると、湾の西側、特に沖の瀬周辺での差異が大きく、対照的に湾の東側ではあまり違いはみられない。両者の違いは同一現象の捉え方の違いに起因するものであるが、物質の移動を直接表現するラグランジュ的な残差流と潮流速の定点平均値が異なる部分を持つことは、定点平均値としての残差流は常に物質の移動を表すものではないことを示している。両者の隔たりの大きな沖の瀬付近は、湾内でも最も潮流速が大きく、沖の瀬環流と呼ばれる環流が1周期の大半にわたり存在する領域であり、潮流速の時間的及び空間的な変動も大きく、複雑な流況を呈する。このように流動の変化が激しい領域では、わずかの時間の移動距離が大きく、移動先は元の地点とは全く異なる流況となり、結果として元の地点とは全く異なる移動特性を持つことになる。従って、流動の変化が激しい領域では出発点における流動特性は移動に関してはそれほど影響しないことから、物質の移動に関する議論には粒子に着目した検討を要することがわかる。

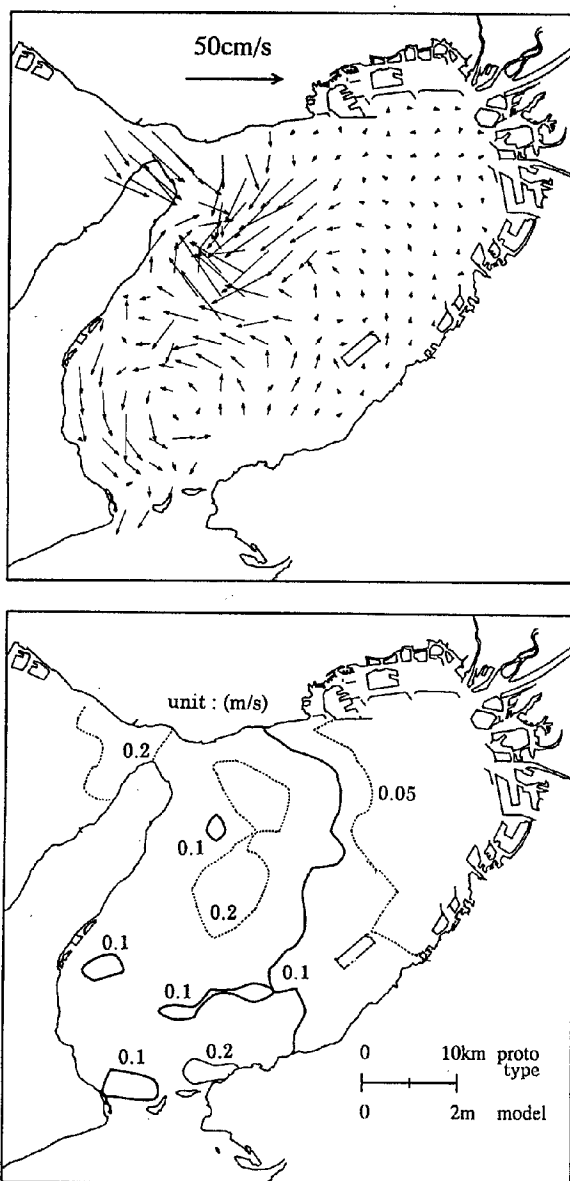


Fig. 4 Vectors and distribution of residual velocity from Lagrangian viewpoint

4. 恒流成分の有無による流動の変化に関する検討

第2章で本実験を行うにあたり、模型に新たにポンプを1台設置する改良を行ったことを述べた。このポンプは模型の紀伊水道側から播磨灘側へ水を循環させるものであるが、これは従来の研究の中で指摘されている“瀬戸内海を西から東へ向かう流れ”を再現するためのものである。この流れは物質輸送、海水交換に大きな影響を及ぼすことが予想される。しかし、本模型は紀伊水道と播磨灘に閉境界を有し、周辺海域との

相互関係を十分に満たすことができないために、従来の方法ではこの流れに対する再現性が乏しいと考えられる。そこで強制的に明石海峡を東進する流れを作り出すことで、この流れに関する条件を考慮した。従来の研究において、上述の流れは恒流や貫流などと呼ばれているが、ここでは恒流成分とする。以下に恒流成分に関する研究結果の概略を述べる。

速水・宇野木⁴⁾は瀬戸内海の海水の交流と物質の拡散について検討する中で、塩分の濃度に関する1次元的な計算を行った。海水の流入量を変えたときの塩分濃度の計算結果と実測値の比較から、現実に近い濃度分布が得られる海水流入量として $Q = 7 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{year}$ を算出した。

安田⁵⁾は恒流成分を生起させる要因として豊後・紀伊の両水道間の潮位の差に着目し、瀬戸内海を1次元化したモデルを用いて考察した。両水道間の潮位差は黒潮の変動に伴い変化し、一定ではないものの、約10 cm以上の潮位差が予想され、その際、恒流成分は明石海峡で東向き20 cm/s前後の流速、流量にして $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{sec}$ となることを示した。

模型実験手法を用いた研究としては、樋口ら⁶⁾や上嶋⁷⁾のものが挙げられる。樋口ら⁶⁾は瀬戸内海の海水と外洋の海水の交換について、太平洋の一部を含む瀬戸内海水理模型（水平縮尺：1/50000、鉛直縮尺：1/500）を用いた実験を行った。実験では黒潮についても再現し、黒潮の流動形状によっては小さいながらも内海において東向きの恒流成分がみられ、その流量は現地換算して $3.5 \times 10^{11} \text{ m}^3/\text{year}$ 程度であるとしている。

また上嶋⁷⁾は大型の瀬戸内海模型（水平縮尺：1/2000、鉛直縮尺：1/159）を使用して、瀬戸内海の海水と外洋水との海水交換について検討している。紀伊水道、豊後水道、関門海峡を含む瀬戸内海全域を対象とした実験を行い、豊後水道の水位を他より16 cm（現地換算値）高くすることにより東向きの恒流成分を再現している。その結果、紀伊水道において $1.66 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{sec}$ の流出となることを示している。

本実験では、以上の研究結果から実験条件として考慮する恒流成分を、明石海峡における表面流速で20 cm/s及び10 cm/sの2種類に設定した。この恒流成分に関する条件を満足するために必要な流量は、あらかじめ求めた循環流量と表面流速との関係より、現地換算値でそれぞれ 4.23×10^4 及び $2.11 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{sec}$ （模型内：0.755及び0.377 l/s）であり、これらの流量を強制的に循環させて模型内で再現した。

Fig. 6 と **Fig. 7** にそれぞれ恒流成分を10 cm/s及び20 cm/s与えた場合の残差ベクトルとコンターを示す。恒流成分無しの場合の結果は先の **Fig. 4** であり、恒流成分の有無による流況の比較を行う。

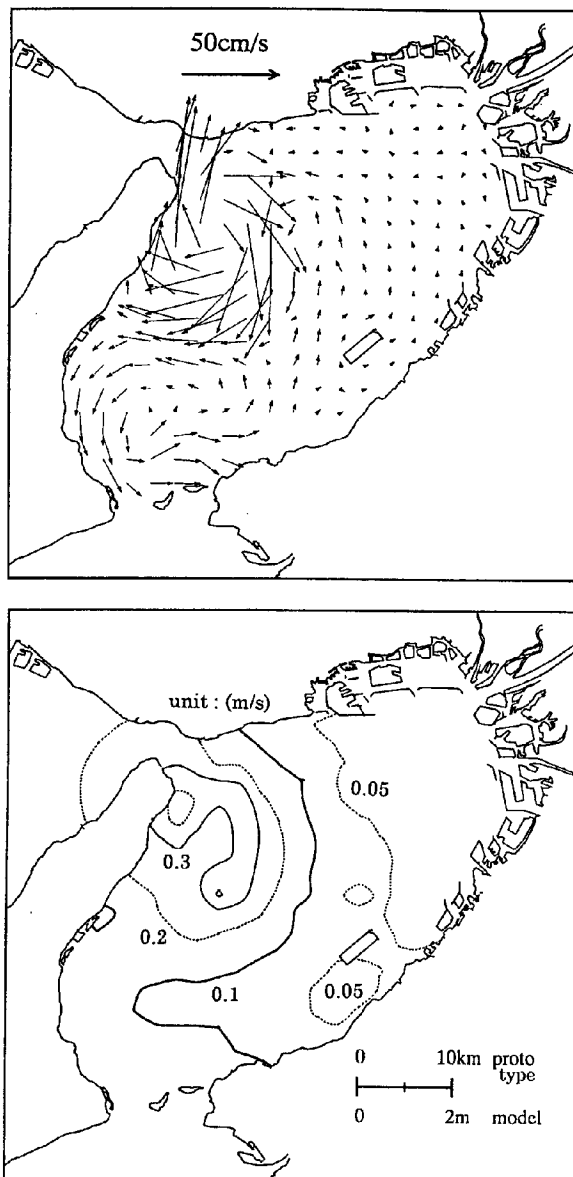


Fig. 5 Vectors and distribution of residual velocity obtained by averaging temporal variation of velocity at fixed points

恒流成分が 10 cm/s の場合、全体的な傾向は無しの場合とほぼ同様となる。湾の東半分には残差流速の小さな領域が大きく広がり、その大きさもほとんど変わらない。湾の西側でも、北側に時計回りに回り込むようなベクトル群、南側に反時計回りの環状を呈する残差流が認められる。しかし、恒流成分が流入することで北側の残差流速の増大がみられ、その領域も拡大している。また、南側の反時計回りの残差流は恒流成分無し時には東西約 20 km、南北約 15 km に及ぶのに対し、恒流成分が付加されるとその規模を一回り縮小させ東西約 15 km、南北約 10 km となり、残差流速も減少する。結果として恒流成分の流入により、湾の西側の流況が南側につぶされた形となる。さらに恒流成分の流入により友ヶ島水道からの流出が目立つようになり、洲本沖から淡路島沿いに流出する様子が見られる。

恒流成分が 20 cm/s になると、湾内の残差流の流況は先の 2 条件下における結果と大きく異なる。沖の瀬周辺にみられた時計回りに回り込む残差流が湾の西側全体に及び、友ヶ島水道の北に存在した反時計回りの残差流が消滅している。時計回りの残差流の影響は関西国際空港周辺及び南側の海域にまで達し、関空周辺では残差流速が約 2 倍になっている。それに伴い湾東側の残差流速の小さな領域が減少し、湾の奥部でも流向が明確になっている様子が認められる。湾からの流出は恒流成分 10 cm/s の場合と同様友ヶ島水道の淡路島寄りで行われるが、洲本沖では北に向かう残差流となり、前の結果とは逆の流況を示している。

恒流成分の有無による 3 つの結果において残差流速を比較すると、その最大値が無しの場合から順にほぼ 10 cm/s ずつ増加していることがわかる。このことは恒流成分が残差流の流況に多大な

変化をもたらすこととあわせて、湾内の物質の移動に大きく関与することを示すものである。さて、実際の恒流成分の大きさであるが、本実験で参考にした数値は計算や実験から推定された値であり、現地観測で計測された例はほとんどみられない。また本実験結果との比較検討が可能な現地における漂流板等の追跡結果も多くないために恒流成分の値については推測の域を出ないが、数少ない現地観測結果によると沖の瀬付近で時計回りに回転する漂流板の軌跡が得られている。このことから恒流成分は時計回りの残差流が湾の西側全体に及ぶ 20 cm/s のような大きな値ではないことが示される。

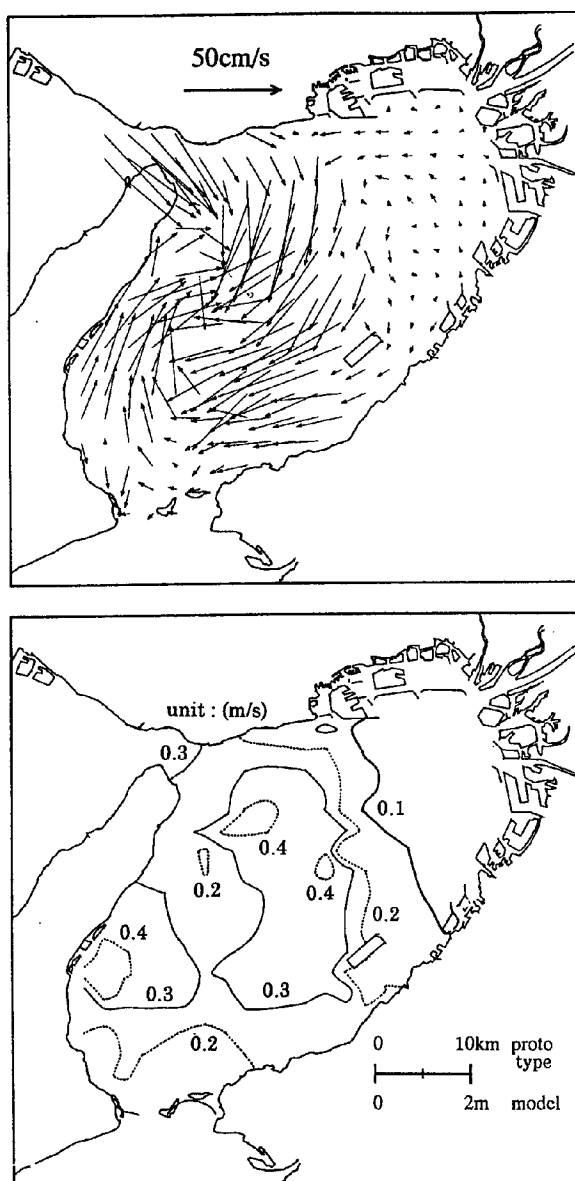


Fig. 6 Vectors and distribution of residual velocity ($Q_c = 2.11 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{sec}$; Q_c is the constant flow discharge)

5. おわりに

本実験では、大阪湾水理模型を使用し、湾内の残差流について移動する粒子そのものに着目したラグランジュ的な観点から検討した。また従来より指摘されてきた瀬戸内海を東進する流れが湾内の残差流に与える影響についても考察を加えた。その結果、ラグランジュ的な残差流と定点での時間平均値として得られる残差流は同様の傾向を示す部分と異なる傾向を持つ部分の存在すること、瀬戸内海を東進する流れは湾内の物質の移動に大きな役割を持つことが示された。今後の課題は、ラグランジュ的な残差流と定点平均値との差異を生み出す要因に関する検討などである。

参考文献

- 1) 今本博健・石垣泰輔・野井潤生・馬場康之：大阪湾の潮流に関する水理模型実験 (1), 京都大学防災研究所年報, 第36号B-2, pp.519-533, 1993.
- 2) 今本博健・石垣泰輔・馬場康之：大阪湾の潮流に関する水理模型実験 (2), 京都大学防災研究所年報, 第37号B-2, pp.501-510, 1994.
- 3) 上嶋英機・湯浅一郎・宝田盛康・橋本英資・山崎宗広・田辺弘道：大阪湾停滞性水域の流動と水塊構造, 第34回海岸工学論文集, pp.661-665, 1987.
- 4) 速水頌一郎・宇野木早苗：瀬戸内海における海水の交流と物質の拡散, 第17回海岸工学論文集, pp.385-394, 1970.
- 5) 安田秀一：潮位変動からみた瀬戸内海の貫流に関する考察, 第27回海岸工学論文集, pp.434-438, 1980.
- 6) 樋口明夫・武岡英隆・北川吉男：瀬戸内海における海水交流の実験的研究 (II), 京都大学防災研究所年報, 第19号B-2, pp.411-422, 1976.
- 7) 上嶋英機：瀬戸内海の物質輸送と海水交換性に関する研究, 中国工業試験所研究報告, 第1号, pp.135-158, 1986.

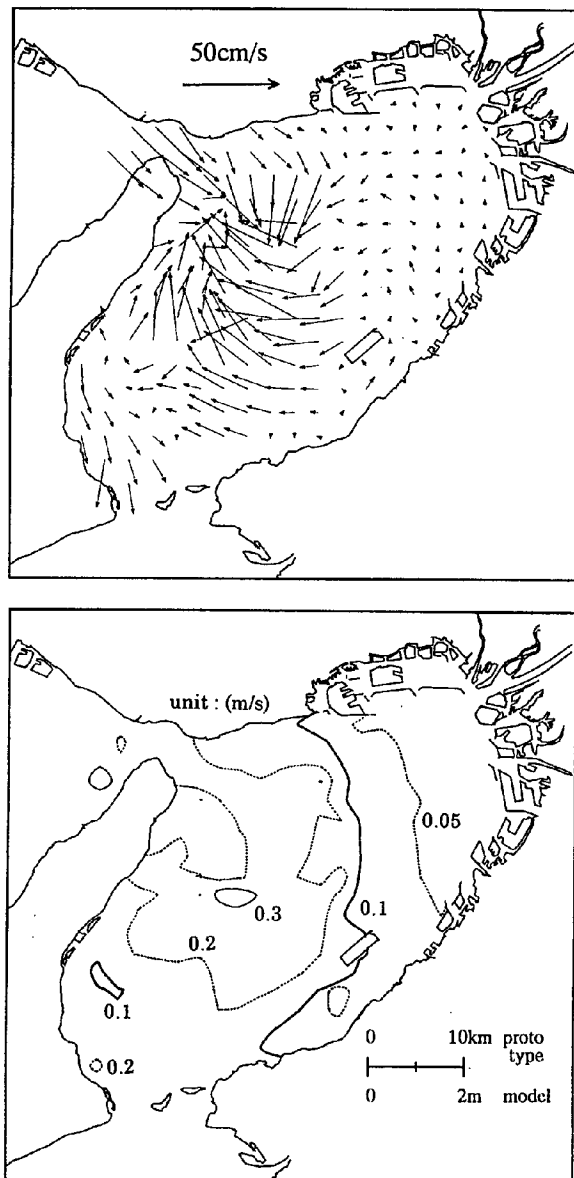


Fig. 7 Vectors and distribution of residual velocity ($Q_c = 4.23 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{sec}$; Q_c is the constant flow discharge)