京都大学防災研究所年報　第40号　B-2　平成9年4月
Annuals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No. 40 B-2, 1997

大阪湾の潮流に関する水理模型実験（4）

今本博健・馬場康之

要旨

本報は大阪湾水理模型を使用し、湾内の流動特性について実験的手法により検討したものである。実験では、異なる5段階の水深に抵抗板を持つフロートを用いて、それぞれ抵抗板の水深における流動を捉えた。水深別の流動特性の比較より、潮流の流速・流向が大きく変化する海峡部付近では水深方向に流動の違いが見られたが、それ以外の領域では流動特性の水深方向変化は小さいものであることが知れた。また、海峡部での流入・流出に際して、主流部に偏りが見られることがわかった。

キーワード：水理模型実験，潮流，流れの可視化

1. はじめに

筆者らは大阪湾内の潮流の流動特性を解明することを目的として、大阪湾水理模型を用いた模型実験を実施してきた（今本ら，1993, 1994, 1996）。その結果、2台の起潮機を制御することで湾内の潮流場が良好に再現されることや、人工衛星等による現地観測より確認されている大規模な環流対が模型内に再現されること、湾内の流動パターンが前述の環流対の生成消滅過程に対応したライフサイクルをもつこと、さらに湾内の流動は各潮時における基本的なパターンをもつものの、ある程度の不安定性を有することなどの知見を得た。ここにあげた従来の結果は、いずれも水表面上に散布されたトレーサの移動軌跡をスチルカメラで撮影する流れの可視化法を用いて得られたものである。本報では、抵抗板を有するフロートを使用した水理模型実験を行い、水深別の流動を捉え、湾内における潮流の内部構造に関する検討を行った。

2. 実験装置及び方法

実験に用いた大阪湾水理模型（水平縮尺：1/5000、鉛直縮尺：1/500）については既報（今本ら，1993, 1994）を参照されたい。この模型は水平方向と鉛直方向の縮尺が異なるひずみ模型である。まずここで模型ひずみに関して、その必要性について述べる。

本研究で対象としている潮流の場合、水平方向の運動が鉛直方向の運動よりも卓越しているとして、鉛直方向に平均化した運動方程式を基礎式とすることが多い。模型実験を実施する際には、水理相似則をこの基礎式に適用して、原型と模型におけるフルード数を一致させるという条件と、水平縮尺、鉛直縮尺、及び粗度縮尺に関する関係式を得る。

次に先の相似則より得られた関係を満足する模型を作るために、模型縮尺の選定が行われる。一般に模型はできるだけ大きくする方が望ましいことが多いが、模型の縮尺は、実験場の広さ、給水等の周辺装置の能力、及び時間などの制約により上限が、模型内で再現

される水深や計測精度等より下限が決定されることになる。湾域や湖沼の場合、対象範囲の水平方向のスケールが鉛直方向のスケールに対して非常に大きいため、水平縮尺と鉛直縮尺が等しい場合には模型内の水深が極端に小さくなる。その結果粘性や表面張力の影響が無視できなくなり、計測も困難になるなど実験の遂行に支障をきたすことになる。また、水平縮尺と鉛直縮尺が等しい場合には、粗度縮尺を満たすように粗度調整が必要となる。しかし粗度調整に関しては不明な点が多く、試行錯誤的に行われているのが現状であり、できるだけ粗度調整が不要となるように、水平縮尺、鉛直縮尺を設定することも要求される。

上記の問題に対応するため、水平縮尺に対して鉛直縮尺を小さくして模型をひずませることが行われる。これにより模型内により大きな水深が確保されるとともに、計測面での不利な点も解消される。また縮尺の選び方により、粗度縮尺が1に近くほとんど粗度調整を必要としない模型とすることも可能となる。これらの長所に対して、模型がゆがめられてしまうために、厳密な意味での相似性は確保されなくなるという欠点も生じる。要するに、水位や断面平均流速などは再現されるが、流れの詳細はもはや異なったものとなってしまうということである。模型ひずみによる流れへの影響には不明な点が多いが、ひずみ模型内部ではある程度模型ひずみによる特有の流動特性が包含されていることを考慮に入れて、実験結果の解釈、考察を行わねばならない。

Fig.1 に本実験で使用したフロートを示す。フロートは水表面に浮かぶ標識部と、流れを捉える抵抗板からなり、その間を極細の釣り糸でつないでいる。標識部の大きさは 1cm 四方で、抵抗板は縦 1cm、横 2cm のプラスチック板を十字に組み合わせたものである。標識部と抵抗板の間の長さは図に示す5種類で、抵抗板底面の位置は現地換算すると水面下 5, 10, 15, 20, 25m に相当する。これらのフロートを可視化実験で使用する前に、フロートによりそれぞれ抵抗板の位置する水深の流速が捉えられていることを確認するための検定を行った。検定は、幅 39cm、深さ 19.5cm、長さ 13m の長方形断面直線水路の下流端から 8m の位置に長さ 70cm、深さ 10cm の凹部を設け、鉛直方向の流速変化を大きくして、抵抗板の位置の違いによるフロートの挙動の差異が明確になる条件下で行った。Fig.2 に検定結果を示す。図中×印は LDA（レーザ・ドップラ流速計）により計測された流速分布である。フロート

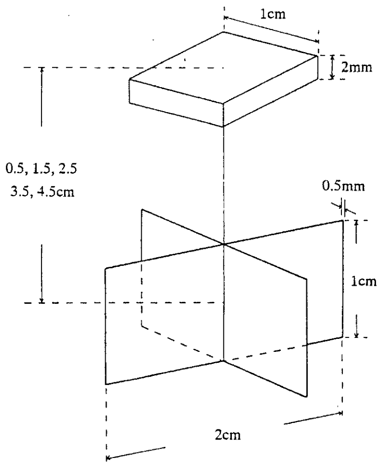


Fig.1　A model float for hydraulic model test

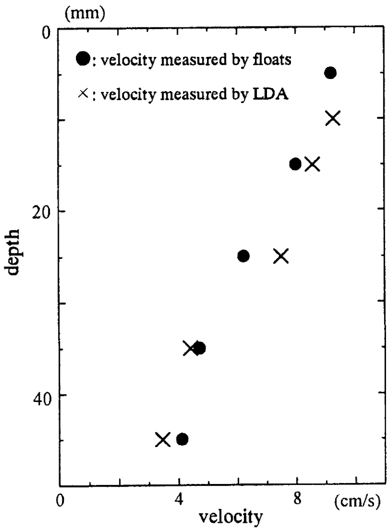


Fig.2　Comparison between velocity distribution measured by LDA and that measured by floats

の流下速度は、LDA による計測断面の前後における流下距離と流下に要した時間より、その間の平均速度として算出した。両者の計測結果を比較すると、フロートは抵抗板の位置する水深の流速を比較的良好に捉えていることがわかる。

本実験における潮汐条件は大潮のみで、その他の条件としては、周辺河川から大阪湾への淡水流入を考慮して、淀川と大和川の２河川より平水流量に相当する温水を流入させた。流入水は密度差を考慮するため周囲水よりも５℃高く水温が設定したが、この温度差は従来の検討より経験的に得られたものである。

流れの可視化は湾内に浮かべたフロートの移動軌跡をスチルカメラにより撮影する方法で、１潮汐周期を８等分したタイミング（Fig.3）で行った。撮影は３台のスチルカメラで湾全体を網羅し、これらのカメラを１台のコンピュータで制御することで、同一のタイミングでの可視化を実施している。本実験で使用したレンズは 35mm × １本、50mm × ２本で、開放時間と絞りはそれぞれ 25sec(1/8 潮汐周期に相当)の時 F=8、12sec（1/16 潮汐周期に相当）の時 F=11 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フロートの位置と移動距離を数値化した。次にこの移動距離と所要時間からその間の平均速度としてのフロートの流速を算出した。その結果、湾内の潮流ベクトルが得られるが、フロートの分布状況が湾内一様でないために、ベクトルデータの分布にも偏りが生じる。結果の比較検討のためにはデータの分布が一様であることが望ましいため、湾内を 1km 四方の格子に分割し、可視化結果より得られた流速ベクトルを各格子点における流速ベクトルに変換した。さらに、格子点化された流速ベクトルより、各格子点における渦度も算出し、等流速線図とともに等渦度線図も得た。なお渦度の算出は、以下の式に従って計算した。

$$rot(\omega) = \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x}$$

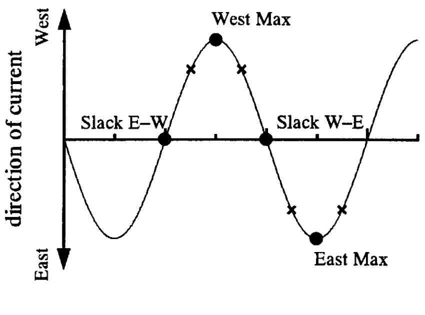


Fig.3　Schematic tidal wave

3.　湾内の潮流の内部構造に関する検討

3.1　水深別の流況に関する検討

Fig.4(a),(b)に水深 5m、25m（現地換算値）における潮流速ベクトルを示す。図には可視化を行った８潮時のうち、明石海峡における潮流速の西流及び東流の最強時（West Max、East Max）と、その間の各憩流時（Slack W-E、Slack E-W）の４潮時について結果を示す。このうち水深 5m における結果は本実験において最も表層の結果であり、従来の可視化実験結果と比較して本実験結果の再現性を検証する。従来の結果は現地観測結果等（海上保安庁, 1993 他）との比較より湾内の流況が良好に再現できることが確認されており、湾内流況の概要は以下に示す通りである。

・明石海峡西流最強時（West Max）

湾内に１対の大規模な環流対が観察される。友ヶ島水道から流入した流れはやや広がる様相を示しながら、環流対の影響を受けてその主流部は淡路島沿いを北上し、明石海峡を抜けて播磨灘へと達する。また流入した流れの一部は湾東岸を大きく迂回して、神戸沖を西へ向かう。

・西流から東流への憩流時（Slack W-E）

友ヶ島水道からの流入が弱まるのに伴い、環流対周辺の流れも勢いを弱め、環流対は徐々に東西方向に分離し始める。このとき環流対の勢いは西流最強時に比べて弱まるものの、そのスケールは逆に大きくなる。

・明石海峡東流最強時（East Max）

明石海峡から湾内への流れは、その幅を拡げながら

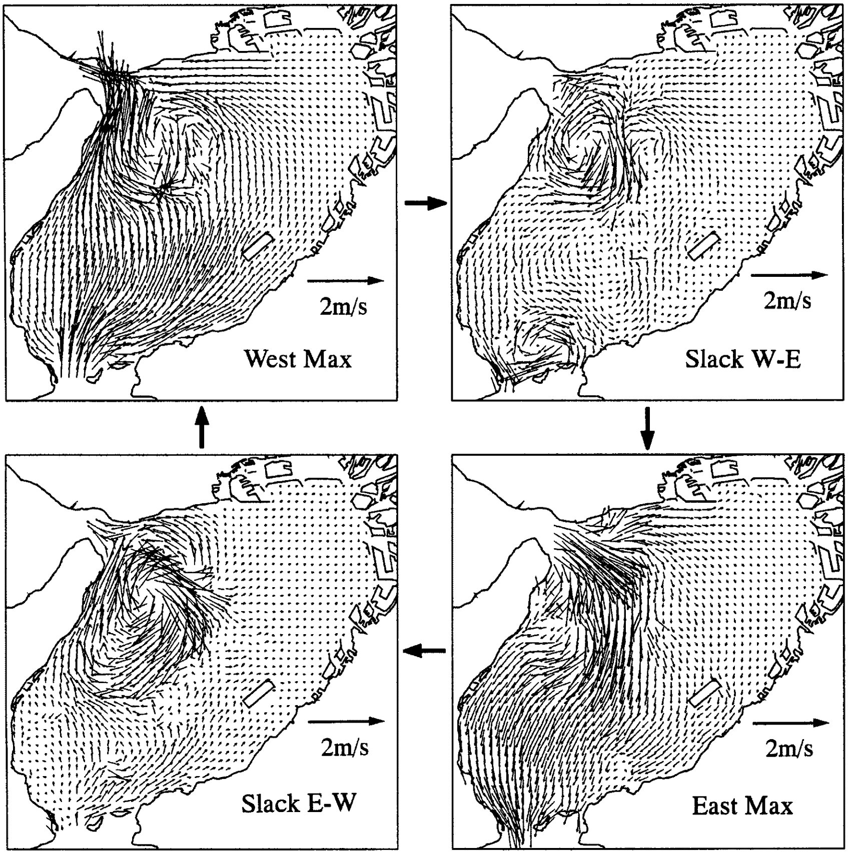


Fig.4(a)　Velocity vectors 5m below water surface

湾の西半分を南下し、縮流しながら友ヶ島水道を抜けてゆく。明石海峡の東口には、海峡を抜けた流れの両側に局所的なはく離渦が形成されるが、先の潮時に見られた大規模な環流対は確認されない。

・東流から西流への憩流時（Slack E-W）

湾内への流入が減少する一方で、湾内に環流対が形成される。この潮時における環流対は、南北方向に大きく伸びた形状をしている。先の憩流時と同様、湾の東側の潮流速は非常に小さい。

これらの結果と本実験における水深 5m の結果を比較すると、上に示した各潮時における流況が本実験結果でも認められ、本実験結果は従来の実験と同様の状態を再現できていることが確認できる。

Fig.4(b)は水深 25m における潮流速ベクトル図で、本実験範囲内で最も底層の結果である。これらを水深 5m の結果と比較すると、湾内に現れる環流対の規模や 25m 等深線付近の流れに若干の違いが認められる程度で、全体的な流況はほとんど変わらない。このことから本実験の範囲内では、潮流の流動は水深方向に大きな変化のないことがわかる。

次に可視化を行った５つの水深における流況を水深 5m の結果と比較する（Fig.5(a),(b)）。対象とする潮時は、環流対が最も発達する明石海峡西流最強時と湾内に環流対の見られなくなる東流最強時である。

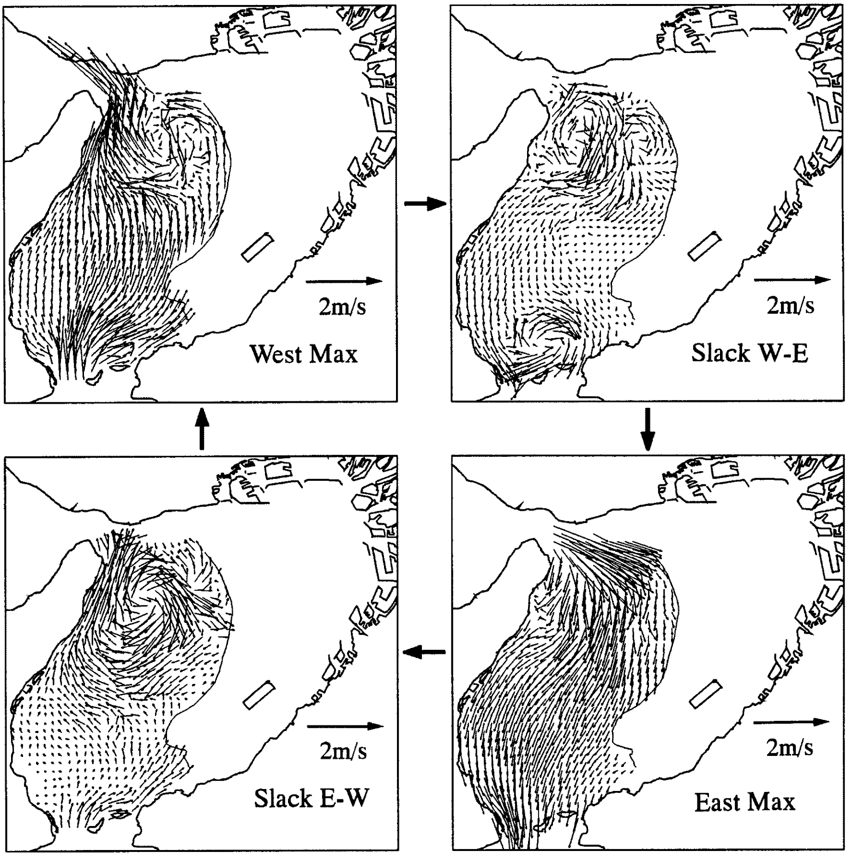


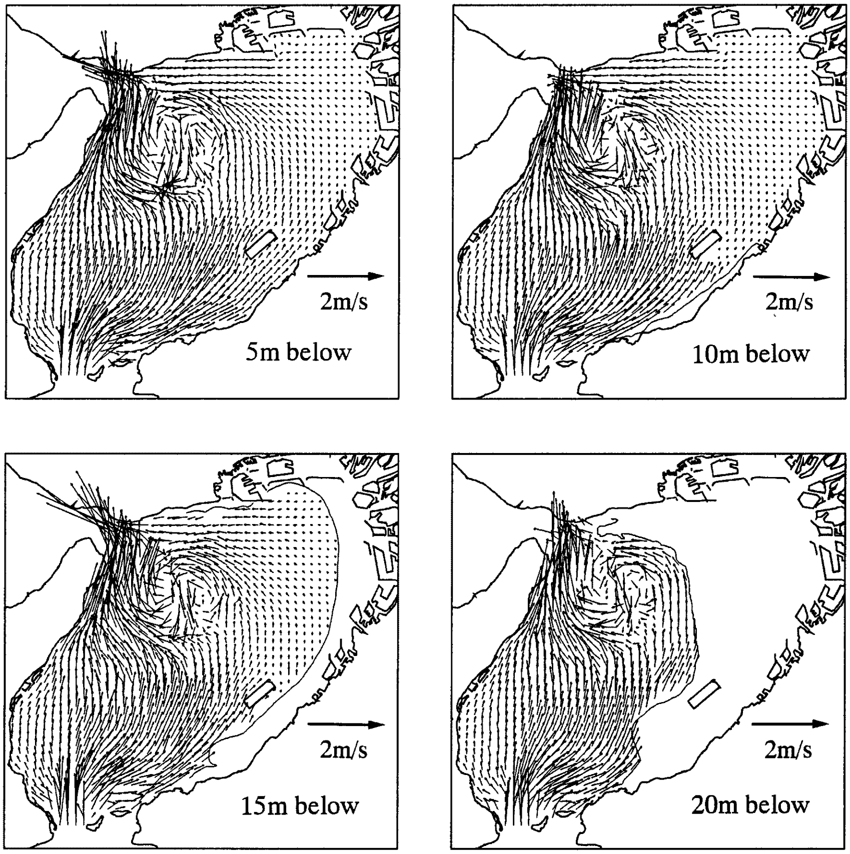
Fig.4(b)　Velocity vectors 25m below water surface

明石海峡西流最強時における５層の流況は、ベクトル図で見る限り流況に変化は見られない。等流速線図においても潮流速の分布状況はほとんど変わらないが、淡路島北部沿いに見られる潮流速の大きな領域は水深5m～15m までは同程度の大きさとなるのに対して、水深 20m、25m になるとその領域が狭くなる。

明石海峡東流最強時の流況も、明石海峡から湾内への流入の様子が水深によってわずかに変化している程度で、先の西流最強時と同様大きな変化はない。また、どの水深においても明石海峡から噴流状に流入してきた流れの到達する範囲がほぼ同じであり、この点からも水深方向への流動の変化が少ないことがわかる。

これまでの記述の中で、湾内の流況を特徴づけるものとして１対の環流対の存在があげられているが、その環流対の動きを水深 5m、25m における結果から比較する。流速ベクトルから算出された渦度分布から、渦度極大点の１潮汐周期間における移動の様子を示したものが Fig.6 である。渦度極大点は２つの環流のうち、南側に位置する環流の中心位置にほぼ相当しており、ここでは極大点の位置を環流中心とする。環流中心の移動状況は次のようになる。

明石海峡東流最強時(East Max)に明石海峡を抜ける流れにより、淡路島沖に地形性の渦が生成される。その渦の中心は流れにのり、東流から西流への憩流時



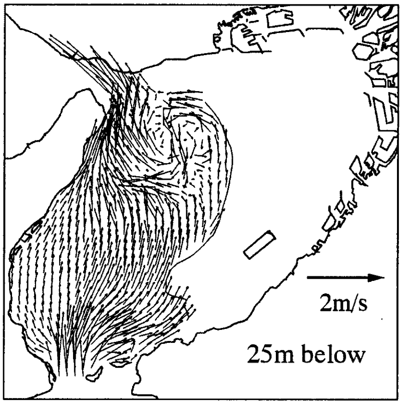


Fig.5(a) Velocity vectors in five horizontal sections (West Max)

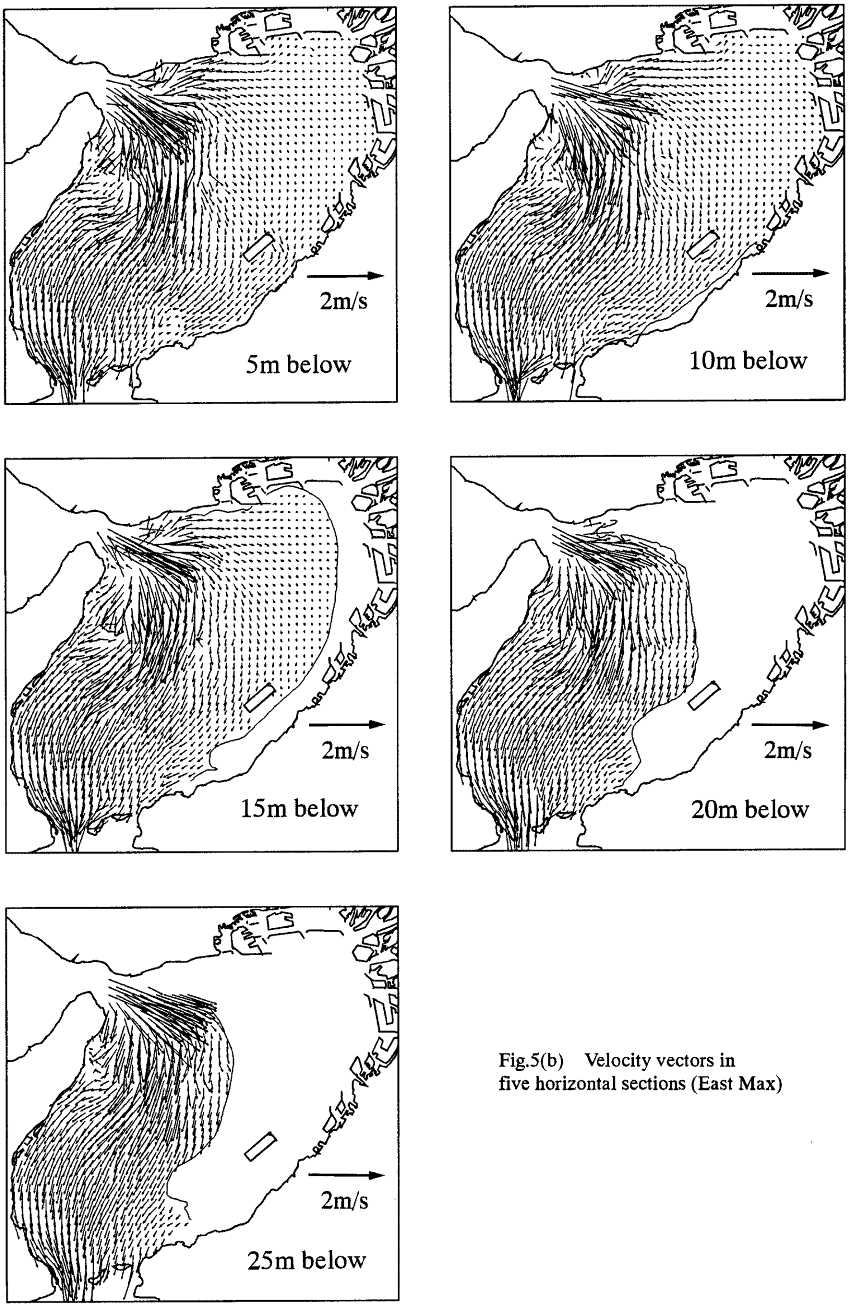


Fig.5(b) Velocity vectors in five horizontal sections (East Max)

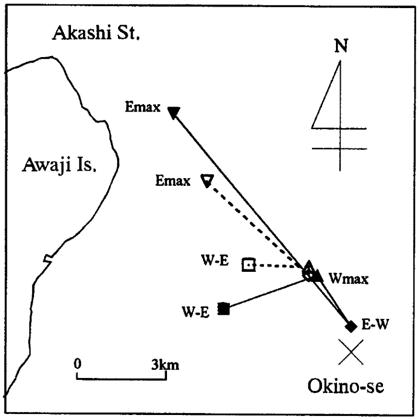


Fig.6 Loci of the center of the large scale eddy during one tidal period
Closed symbols : 5m below
Open symbols : 25m below

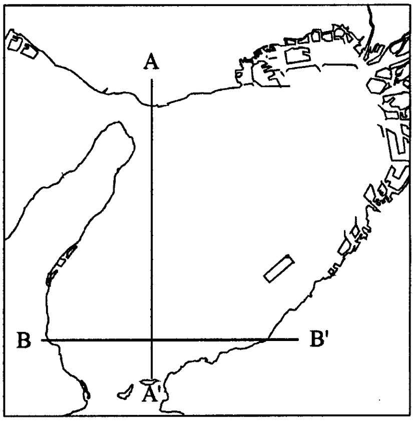


Fig.7 Location of the cross sections in the bay

(Slack E-W)には沖の瀬と呼ばれる海底丘陵付近まで達する。明石海峡西流最強時(West Max)には、周囲の流れが強まる中でわずかに北西に移動した位置にとどまり、次の西流から東流への憩流時(Slack W-E)には、西側へ移動する。

ここで、西流最強時においては渦度極大点の位置が両水深においてほぼ一致するのに対し、他の3潮時では渦度極大点の位置に違いが生じていることがわかる。このことは、環流対が明石海峡西流最強時に最も発達して、水深方向にも安定していることを示すとともに、他の潮時では環流の発達が不十分で、水深方向の流動の差異が渦度極大点の位置の違いとなって現れていると考えられる。

水深別の流況を平面的に見た場合には、本実験での範囲内では水深方向の変化は小さく、ほぼ一様な流況となっていることが知れた。

3.2 鉛直断面内の流況に関する検討

湾内に設定した鉛直断面内において、潮流の流動特性について考察する。鉛直断面を設定した測線は Fig.7 に示す2測線である。南北方向の測線 A-A'は潮流の主流部を2分する位置にあり、湾内の特徴的な流動である環流対の一部分も通過する。東西方向の測線 B-B'は友ヶ島水道を通過して流入・流出する際の流動を捉える位置にある。

測線 A-A'における鉛直断面内の流速ベクトル図と等流速線図を Fig.8 に示す。図中のベクトルは各水深における水平面内のものであり、鉛直成分は含まれていない。図中東向きの流速成分が正のベクトルを黒色、東向き成分が負のベクトルを白抜きで表示している。どちらの潮時においても、明石海峡に近い部分に流速の大きな領域が広がっている。これらの領域には、東流最強時の場合は明石海峡を東進する流れが、西流最強時においては淡路島沿いを北流する環流の一部と明石海峡を抜け出る流れがそれぞれ相当する。潮流速を比較すると、東流最強時の方が西流最強時よりも大きくなっているが、西流最強時においては潮流速の大きい領域が鉛直断面の1/3程度にまで及んでいる。これは西流最強時には測線上に明石海峡を通過する流れだけではなく、海峡部の潮流速にも匹敵する流速を有する環流の一部分を捉えていることによる。また潮流速の大きな領域では、前節における平面的な流況からはあまり認められなかった流向・流速の水深方向の変化が見られる。特に東流最強時においてはその傾向が強い。このことは明石海峡内の地形の変化が大きく、流れがその複雑な地形の影響を受けているためと考えられる。一方断面の南側半分では、流速は比較的小さく、

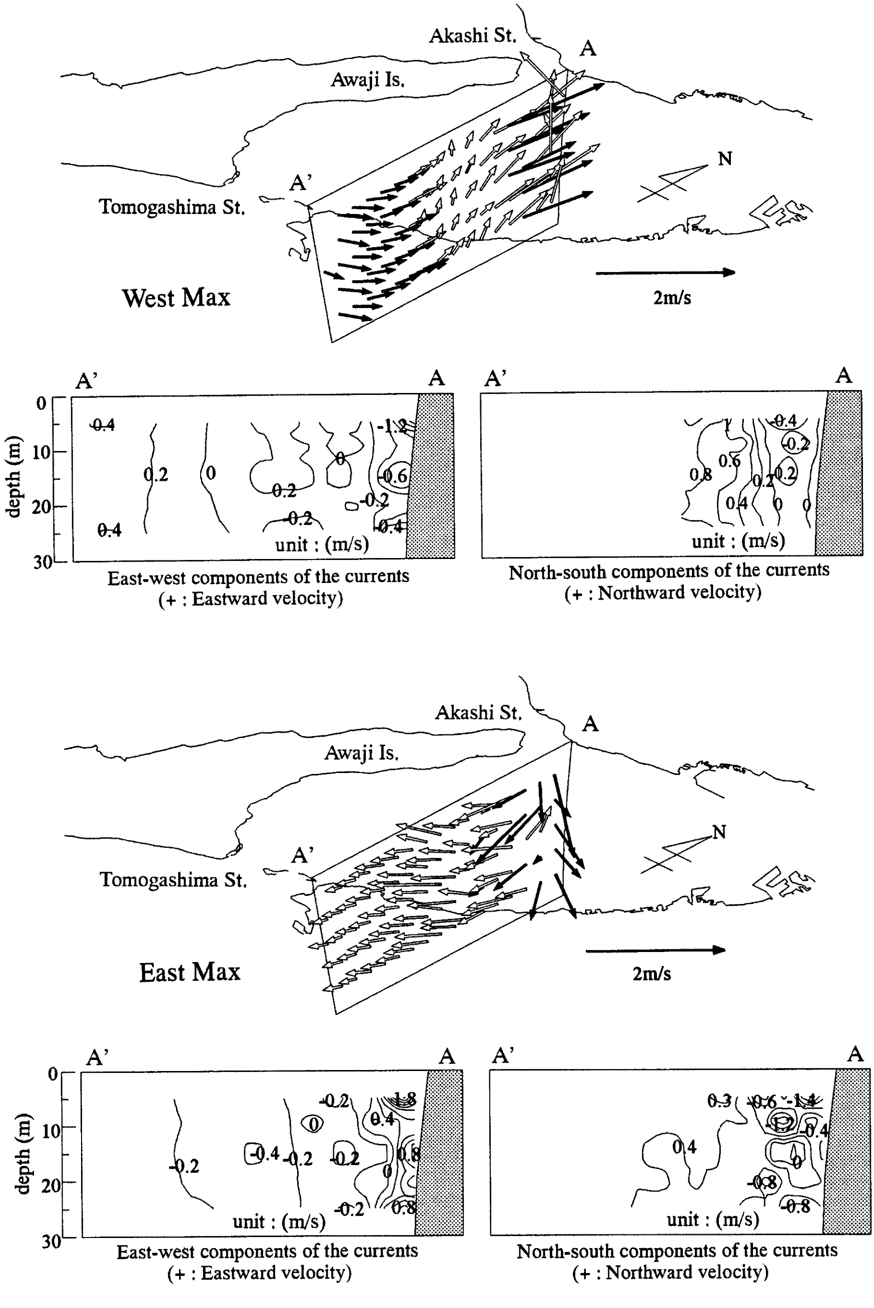


Fig.8 Velocity vectors and contours at the cross section indicated in Fig.7 as A-A' line

流況の水深方向変化は明石海峡付近と比べて非常に少なくなっている。

Fig.9 は測線 B-B'の鉛直断面内の流速ベクトル図と等流速線図である。この図においてもベクトルは水平面内の流速を示しているが、前図との違いは流速の大きなベクトルが黒色、流速の小さなベクトルが白抜きで表示されていることである。この断面では、先の A-A'断面とは異なり水深方向の流向・流速の変化はあまり見られない。しかし、友ヶ島水道を通じての流入・流出の際に、主流部の位置が異なる様相が認められる。友ヶ島水道からの流入時（明石海峡西流最強時）には、主流部は断面中央から東側に偏り、淡路島沿いの流速が小さくなっていることがわかる。逆に友ヶ島水道からの流出時（明石海峡東流最強時）においては、淡路島沿いに主流部が存在し、東側の流速は流入時に比べて半減以下となっている様子が確認できる。過去に行われた友ヶ島水道からの染料投入実験において、流入した水塊が湾東岸沿いに北上する結果が得られており、この断面における結果はその実験結果を裏付けるものとなっている。

4. おわりに

本実験では抵抗板を有するフロートを用い、従来水表面だけで行われてきた流れの可視化を水深方向に拡張して、得られた結果より湾内の潮流の内部構造について検討した。その結果、可視化を行った範囲では湾内の流況の水深方向変化はほとんど見られず、鉛直方向にほぼ一様な流れとなっていることが示された。しかし鉛直断面内における流況の考察より、潮流速の大きな海峡部付近では、流向・流速が水深方向に変化している様子が確認され、また流入・流出により主流部の位置が異なる様子なども認められ、従来の実験結果を裏付ける結果が得られた。本実験での可視化範囲は大阪湾の平均水深程度までであり、さらに水深の深い領域を通過する潮流の内部構造については、まだ議論の余地を残している。

参考文献

今本博健・石垣泰輔・野井潤生・馬場康之(1993)：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.

今本博健・石垣泰輔・馬場康之(1994)：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.

今本博健・石垣泰輔・馬場康之(1996)：大阪湾の潮流に関する水理模型実験（３），京都大学防災研究所年報，第 39 号 B-2，pp. 519-525.

海上保安庁（1993）：大阪湾及播磨灘潮流図，海図第 6231 号.

海上保安庁（1985）：鳴門海峡・友ヶ島水道・明石海峡潮流図，海図第 6202 号.

日本海洋学会・沿岸海洋研究部会編（1987）：日本全国沿岸海洋誌，東海大学出版会.

Hydraulic Model Test of Tidal Current in Osaka Bay(4)

Hirotake IMAMOTO and Yasuyuki BABA

Research Center for Disaster Environment, D.P.R.I., Kyoto University

Synopsis

This paper shows some experimental results of tidal currents using a hydraulic model. Inner tidal currents in the model were observed using a flow visualization technique. A tracer has a submerged cross-shaped plate which is set 5, 10, 15, 20 and 25m below the water surface in the prototype scale. It is found that vertical velocity distribution is not uniform in the regions near straits.

Keywords : hydraulic model test; tidal currents; flow visualization

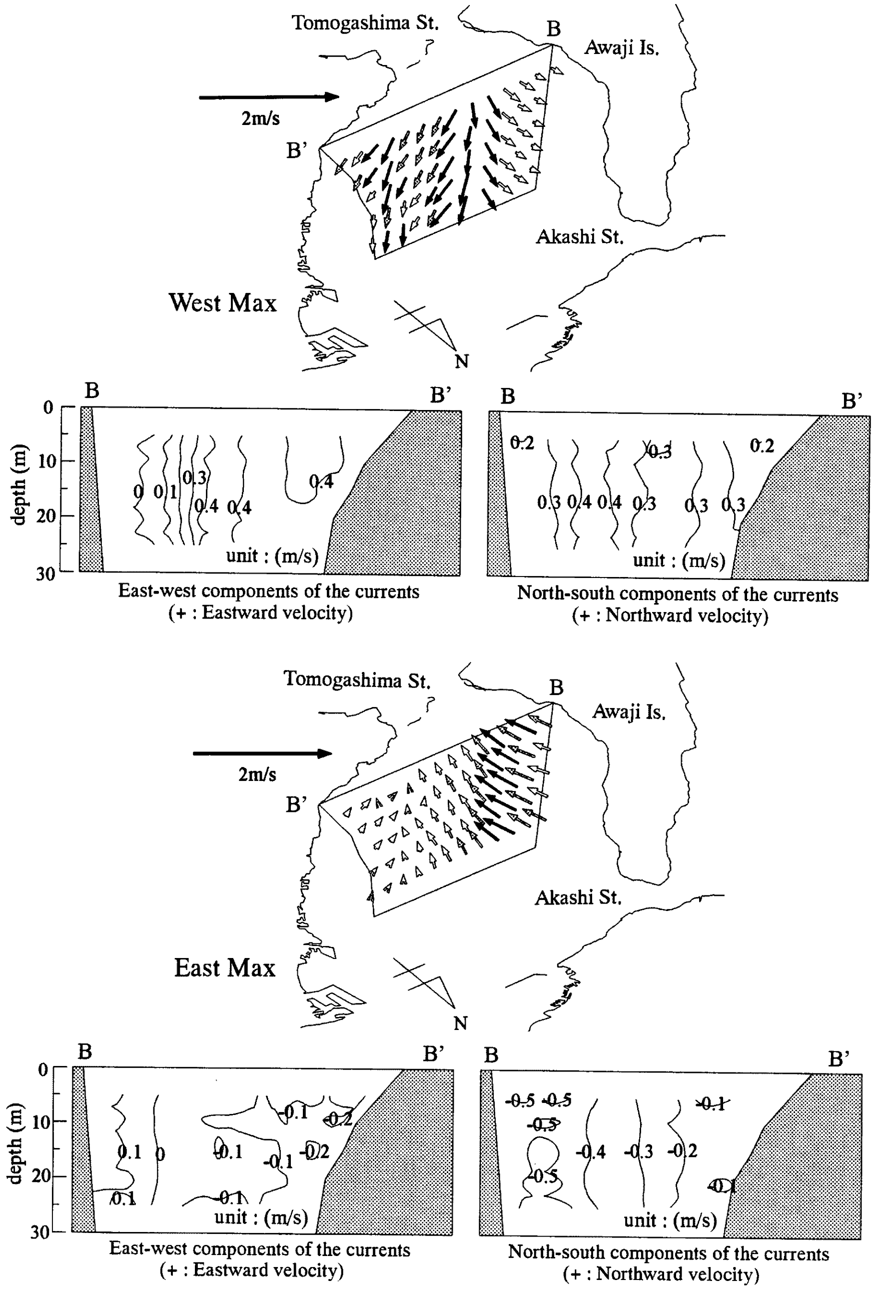


Fig.9 Velocity vectors and contours at the cross section indicated in Fig.7 as B-B' line