

大阪湾の潮流に関する水理模型実験(2)

今本 博健・石垣 泰輔・馬場 康之

HYDRAULIC MODEL TEST OF TIDAL CURRENT IN OSAKA BAY(2)

By Hirotake IMAMOTO, Taisuke ISHIGAKI and Yasuyuki BABA

Synopsis

From the point of view of environmental management, it is important to know the behavior of tidal currents in Osaka bay which is semi-closed. This paper deals with the hydraulic model tests of Osaka bay and main results are as follows.

A pair of large scale eddies are observed when the westbound tidal currents through Akashi Strait are maximum. These eddies are unstable and changing its scale and location in spite of the same tidal condition.

The motion of fluid flowing into the bay is complicated near the strait. Fluid through Akashi Strait stay in Okinose circulating flow after the inflow, and one tidal cycle later some parts move to the south and others go back to Seto Inland Sea through the strait.

1. はじめに

大阪湾は外海水と接する湾口部の狭い閉鎖性の強い内湾であることに加えて、背後に大阪、京都、神戸などの大都市圏を抱えており、種々の物質の流入も多く、また湾岸域の開発も盛んで、開発による影響の評価も重要な課題となっている。このような湾域の流動機構を解明することは、環境の面からも重要であり、筆者らは大阪湾内の流況について検討してきた¹⁾²⁾。

前報²⁾では、瀬戸内海側と太平洋側の2箇所任意の波形の潮汐を発生できる起潮機を設置した大阪湾水理模型(水平縮尺1/5000、鉛直縮尺1/500)を用いて、湾内における潮流の挙動について検討した。実験に際しては、現地の検潮所における潮差、位相差の値と模型上での計測結果が一致するように調整しており、2台の起潮機を使用することで、従来太平洋側の1台の起潮機だけでは不十分であった点が改良され、現地での潮汐がより良く再現されるようになった。このように改良された装置で得られた湾内の流況は、潮流図などを初めとする現地観測結果³⁾を、湾全域及び海峡部において極めて良く再現していることが確認された。

本報では、同模型を用いて、潮流の流線パターンの不安定性について検討を行うとともに、大阪湾における海水の交流機構を解明するための基礎として、瀬戸内海側及び太平洋側から大阪湾に入り込んだ海水の挙動について検討する。

なお、実験に用いた水理模型は、前報²⁾で使用したものであり(**Fig. 1**)、その諸元を**Table. 1**に示す。湾内の流況に関する実験方法は前報²⁾に示すとおりである。また、海峡部から流入する海水の挙動に関する実験では、湾外からの流入が始まる直前に、湾外の水塊を染料で着色してその挙動を可視化し、流入から2周期間にわたって追跡した。なお、本文中では明石海峡での潮流の位相を基準として潮時を定めており、

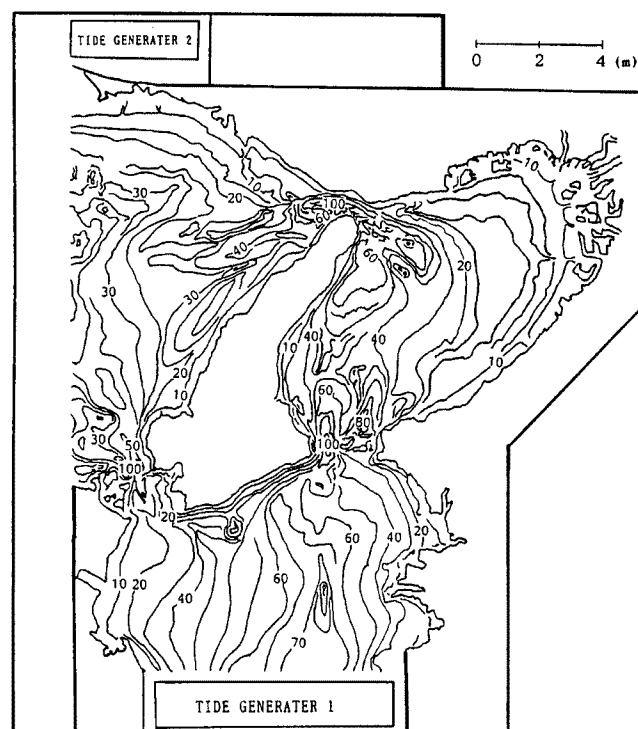


Fig. 1 Hydraulic model of Osaka bay.

Table 1 Example of flow visualization.

Factor	Scale	Prototype	model
Horizontal Distance x_r	1/5000	1000 m	20 cm
Vertical Distance y_r	1/500	1 m	2 mm
Time $t_r = x_r \cdot y_r^{-1/2}$	1/223.6	12 h 25 m	200 s
Velocity $v_r = y_r^{1/2}$	1/22.4	1 knot (1.852 km/s)	2.3 cm/s
Roughness $n_r = x_r^{-1/2} \cdot y_r^{2/3}$	1/0.89	0.025	0.028
Discharge $Q_r = x_r \cdot y_r^{3/2}$	1/5.6 * 10^7	1000 m ³ /s	17.9 cc/s

以下に用いる潮時を **Fig. 2** に示すように定義する。

2. 潮流の流動特性

本報では、明石海峡における4潮時（西流及び東流最強時と、その間の憩流時）について、大潮の場合には108周期分、平均潮と小潮についてはそれぞれ36周期分の流況の可視化を行い、湾内の流況について検

討した。その結果、湾内における流線パターンは、同じ潮汐条件、同じ潮時であっても基本的には同じ様相を呈しながら、少しずつ異なった部分を持つことが認められた。

なお、以下の図面に示す流線は、対象とする潮時を中央にはさむ 25 秒間（1 周期の $1/8$ に相当）の可視化によって得られた流跡線（**Photo. 1**）を基に描いたものである。

2.1 流線パターンの不安定性

大阪湾内の流線パターンは、同じ条件下においても、様々の異なったパターンを持つことが観察され、大潮の場合に不安定性が最も顕著に見られる。平均潮、小潮の場合においても若干の不安定性は認められたが、大潮の結果と比較するとその度合いは小さく、流線パターンの差異は有意ではない。そこで大潮の場合の可視化結果について、流線パターンの不安定性について検討する。

まず、明石海峡西流最強時には沖の瀬付近に 1 対の環流が形成されるが、この環流対に着目する。**Fig. 3** に、西流最強時に現われた流線パターンを、主に沖の瀬環流の形成状況に基づいて分類した結果を示す。108 周期の間に観察された沖の瀬環流パターンを分類すると、図に示す 4 種類に大別される。A は環流対の間の軸が西側に傾く場合、B は軸が南北方向に直立する場合、C は軸が東側に傾く場合のように、2 つの環流が存在するパターンが多い。また、出現回数は少数であるが、D のように環流が 3 つ観察される場合も見

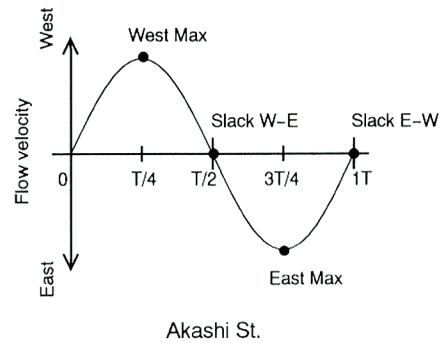


Fig. 2 Schematic tidal curve.

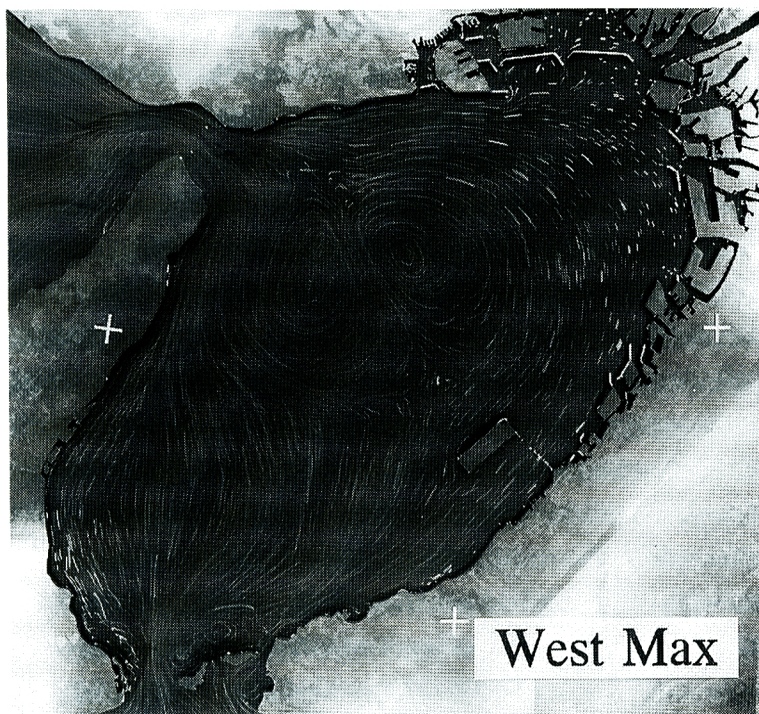


Photo. 1 Example of flow visualization.

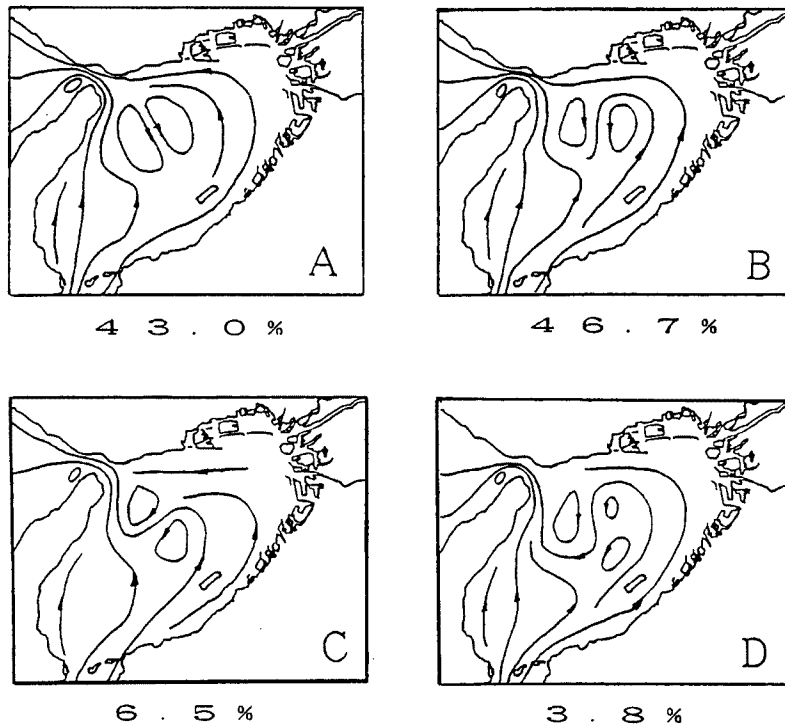


Fig. 3 Four typical flow-patterns of tidal current in Spring tide at West Max shown in Fig. 2.

られた。これら4つの分類の内でも、環流の大きさなどによる細かな分類も可能であるが、あまりに煩雑になり過ぎ、また湾域の大部分に関しては同じような流況を呈しているの、これ以上の分類は行わない。これらのパターンの内、最も高い頻度で出現するのはA、Bのパターンであり、その出現の割合は43.0、46.7%とわずかにBのパターンの割合が大きい程度で、ほぼ同様の割合で現われる。一方、C及びDのパターンはそれぞれ6.5、3.8%の割合で出現するが、A、Bのケースと比較するとかなり小さい値となっている。しかし、2つ合わせると約10%の割合になり、決して無視し得るものではないことが分かる。また、これら4つのパターンの出現の順序に関しては、規則性はいえなかった。

同様に、東流最強時や各憩流時においても、流線パターンの不安定性が認められた。

東流最強時には、流線パターンそのものが単純であるために西流最強時のようなパターンの明確な差異は見られない。この潮時においては、西宮及び大阪沖の海域が停滞する傾向にあるが、その停滞水域の形状が若干不安定となる。形状が不安定になる主な要因としては、須磨沖を東流する流れが西宮沖まで及んだり、関西国際空港の北の海域にまで主流部が達することなどが挙げられる。これらは湾西部を南下する主流部の位置のわずかな変化によって生じていると見られる。

憩流時においても不安定性は認められるものの、湾内流況を支配するような強い主流部が存在しないために、流線パターンはより不安定となり、パターンの差異は細かく多彩なものとなっている。東流への憩流時は基本的には環流対が分離しながら存在するパターンを示すが、その環流対の位置や大きさにはかなりのばらつきがあり、検討している4潮時の中でパターンとしてのまとまりが最も悪い。西流への憩流時には、東流への憩流時ほどのパターンのばらつきはないが、違いが細かく多彩であるのは同じである。主に見られる相異点は、沖の瀬付近に生じる環流対の内、南側の環流の形状についてであり、その形状が変わるに伴って周囲の流況も変化を見せる。

2.2 大阪湾内の基本的な流線パターン

以上のように、同じ条件下においても湾内の流線パターンは異なった様相を呈する。しかし、1つの条件下にはその条件に対応する基本的なパターンがあり、その基本的なパターンを示しながらも、その中に上述のような種々の相異点が見られるのである。

以下に、可視化結果から得られた基本的な流線パターンについて、大潮の場合から述べる。(Fig. 4)

明石海峡での潮流が東流最強時の時、瀬戸内海から明石海峡を経て大阪湾内に入り込んだ流れは、その幅を拡げながら湾の西半分、即ち淡路島沿いを南流し、縮流しながら友ヶ島水道を抜け太平洋へと出てゆく。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剥離渦が形成されるが、沖の瀬の環流は認められない。従来の研究⁴⁾では、沖の瀬の環流は1周期を通じて存在するとされているが、本実験では観察されなかった。また、神戸から東側の湾奥部において、全体的な流れは明石海峡から湾奥部を迂回して友ヶ島へ向かうものの、その流速は非常に微弱である。

西流への憩流時になると、沖の瀬付近に一對の環流対が形成される。この環流対は東流の流れが弱まるに従って出来始め、先の潮時に見られた剥離渦も取り込んで発達する。これらの環流の内、南側の環流が北側のものよりも大きくなっている。これは、南側の環流は東流時に流入した流れの主流部によって形成されたものであるのに対し、北側の環流は明石海峡から流入した流れの反流として形成されているためである。一方、友ヶ島水道での潮流の位相は明石海峡よりも早いために、友ヶ島水道東部の加太の瀬戸などでは既に北流が始まっている。

西流最強時に、太平洋から友ヶ島水道を抜けた流れは、海峡部を抜けて拡がる様相を呈するが、沖の瀬に生じる環流の影響を受けて、主流部は淡路島沿いを北上するようになり、明石海峡を経て瀬戸内海へと抜けてゆく。ただし、流入した流れの一部は泉州沖から神戸沖にかけて湾奥部を大きく迂回し、須磨沖を西流して明石海峡へ向かう。この2つの流れが沖の瀬の環流対を取り巻くような状態となるために、環流対はこの

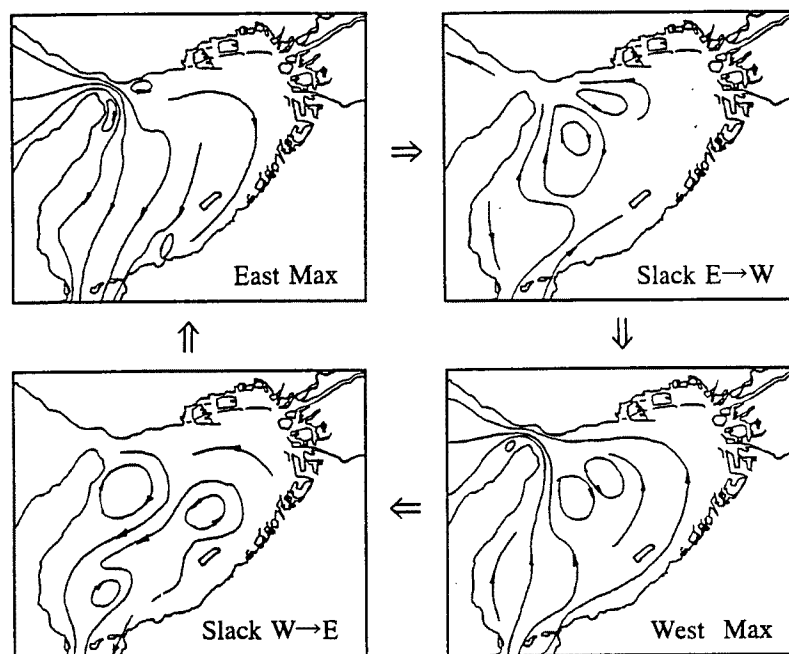


Fig. 4 Surface stream lines in Spring tide.

潮時においてその勢いを最も強くすることになる。

友ヶ島水道からの北流が弱まるにつれて、環流対を包んでいた周辺の流れも弱まり、東流への憩流時には環流対は次第に東西方向に分離し始める。この時、環流の勢い自体は西流最強時に比べて弱まっているものの、逆にそのスケールはより大きくなる。また、友ヶ島水道では既に南流が始まっており、海峡部の北側に時計周りの環流が見られる。

以上が大潮時に生じる湾内流況の基本的なパターンである。大潮時は湾内の流れが強いために、沖の瀬環流を初めとする複雑な流況が明確に現われ、各潮時の流況もそれぞれ特徴を持ったものとなる。また、湾内の流況は沖の瀬環流の生成消滅過程と合わせて一連のサイクルとして捉えることができる。

次に平均潮、小潮時に見られる基本的な流線パターンについて述べるが、潮流が弱くなるに従って、その流況は著しく単純になる。

まず平均潮の場合（**Fig. 5**），沖の瀬環流は明石海峡東流最強時少し後から始まって次の東流の前まで湾内に存在するが、その勢い、スケールともに大潮時とは比較にならないほど縮小している。

東流最強時の流況は明石海峡から友ヶ島水道へと向かい、大潮時と同様の傾向を示すが、明石海峡の東口に見られていた剝離渦はほとんど認められない。東流が弱まり憩流時になるに従って、沖の瀬に環流対は形成されるものの、その規模は小さく、友ヶ島から北上する流れの勢いも弱く、湾奥部では流れが停滞する領域が増える。西流最強時には、環流対はその勢いを最強とするも、その位置は沖の瀬から明石海峡寄りになり、大きさは非常に小さく、明石海峡へと向かう流れの中でかろうじて存在を保っているに過ぎない。東流への憩流時には、湾内に生じる環流は1つしか見られず、また湾奥部での流れは弱い。

潮汐条件が小潮になり潮流がさらに弱くなると（**Fig. 6**），流線パターンは一段と単純化し、1周期を通じて、沖の瀬の環流対は認められなくなる。

東流及び西流最強時には、それぞれ流入する海峡部から流出する海峡部へと向かう流れが生じるだけの流

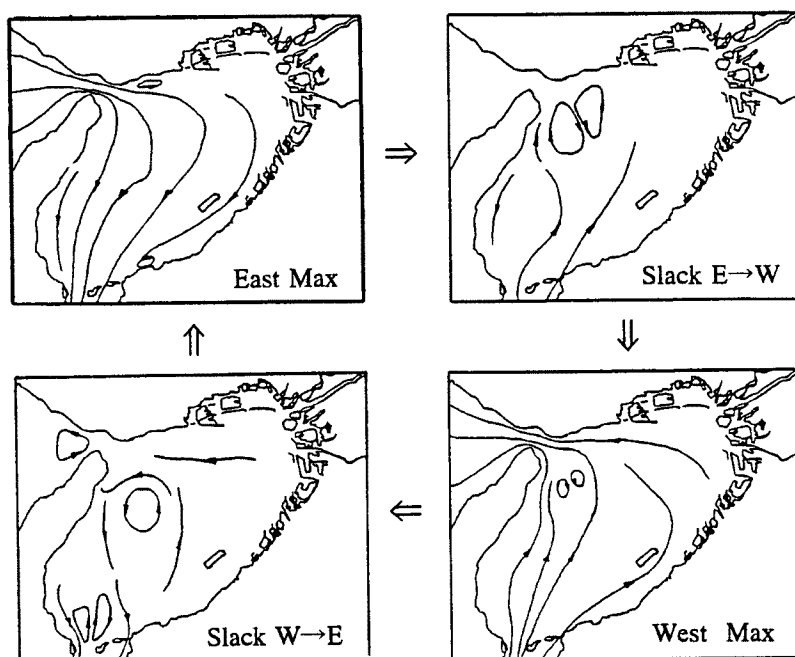


Fig. 5 Surface stream lines in Mean tide.

況となる。その主流部の形状も大潮の場合に比べて蛇行の度合いが減少する。また、各憩流時には湾全域の流れが微弱なものとなり、ほとんど停滞する状況となる。

3. 大阪湾における海水交流状況

大阪湾のように外海と接する海峡部が狭い内湾は、湾口部を通しての湾内水と外海水との交換性があまり良くない（閉鎖性が高い）ことが知られている。この閉鎖性については、湾の面積、湾口幅、湾内最大水深、湾口での最大水深といった湾域の幾何形状に基づいた閉鎖度指標と呼ばれる指標で評価され、閉鎖度指標が2以上の場合が閉鎖性の内湾と分類される⁵⁾。しかし、このような閉鎖性の内湾は現在及び将来においても開発の場として注目されており、開発による環境に対するインパクトを評価する上で海水の交換性は重要な要因となっている。そこで本報では、大阪湾における海水の交流機構を明らかにするための基礎として、湾内に流入する海水の挙動について検討する。

Fig. 7 は、大潮時に瀬戸内海側の海水が大阪湾に流入する状況を、明石海峡東流への憩流時から2周期間にわたって追跡したものである。図中に示す時間 t は流入開始からの経過時間を周期 T で表したものである。

東流への憩流時から西流への憩流時にかけて瀬戸内海から湾内への流入が続く。1周期目、東流最強時やその直後の潮時においては、明石海峡を抜けた東流の勢いが強く、流入した海水は関西国際空港方面に向かって直進し、東流の勢いが弱まるにつれて、流向を南東から南へと変える。そして明石海峡での西流が強まるに従って、流入した海水は瀬戸内海側の海水と切り離され、同時に沖の瀬環流に取り込まれる。1周期目の西流最強時やその次の潮時における可視化結果では、流入した海水が時計回りに回転している様子が認められるが、これは沖の瀬の環流対の南側の環流に取り込まれたことを示し、南側の環流は東流時に流入した

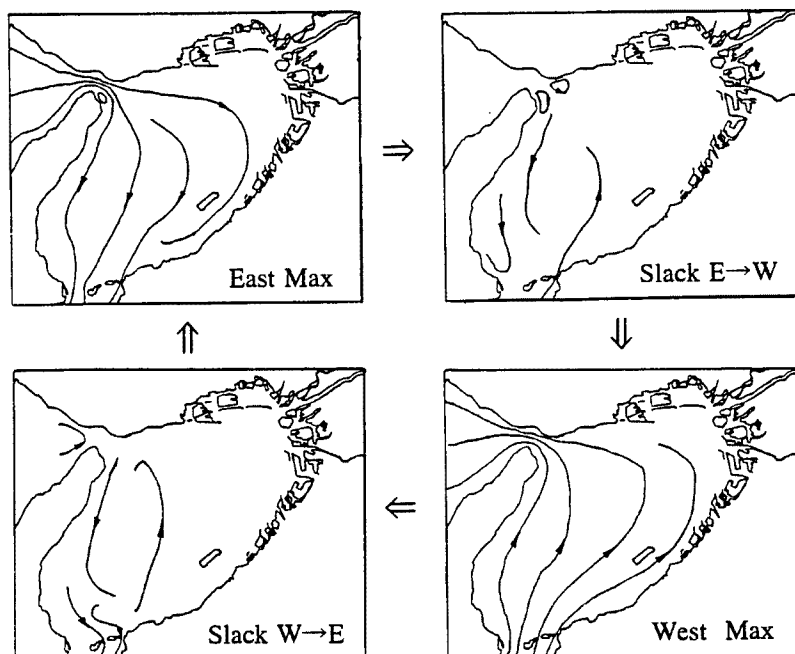


Fig. 6 Surface stream lines in Neap tide.

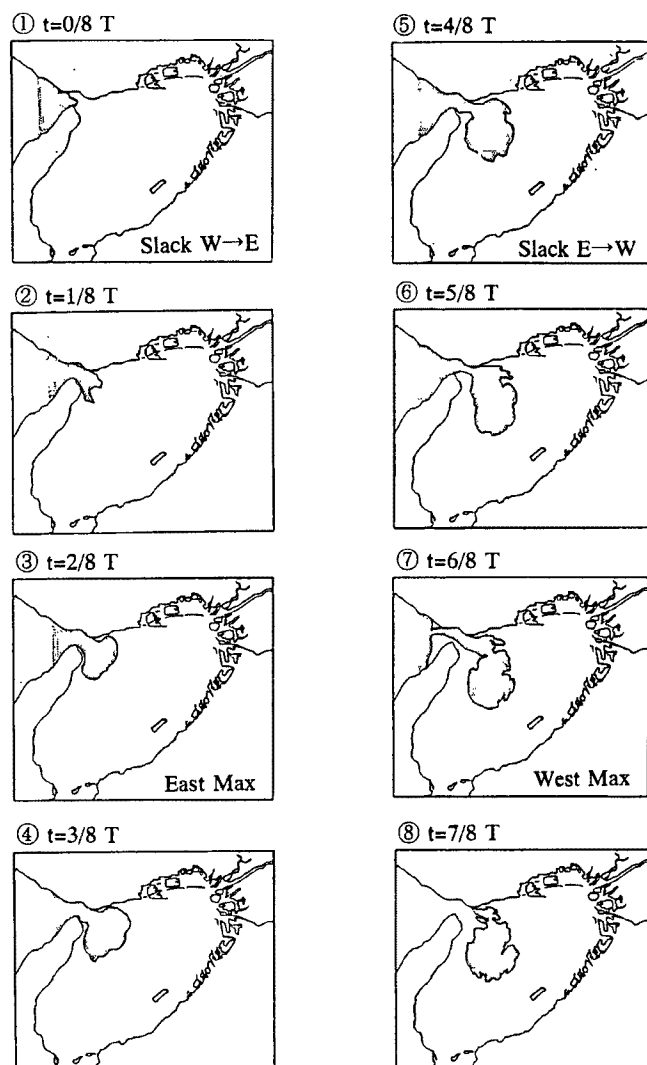


Fig. 7 (1) Movement of fluid colored by dye passing through Akashi Strait.

流れによって形成されることが分かる。

2 周期目の流入が始まる時、先の周期に流入した海水は依然時計回りに回転している。そして、その背後から新たな海水が前の周期と同様に流入し、流入が進むにつれて 1 周期目の海水は徐々に南へ移動する。明石海峡での東流が続いている間、先に流入した海水は南への移動を続けているが、西流への憩流時の頃になると、淡路島沿いに移動してきた前の周期の海水の一部が北上している様子が見られる。この動きは沖の瀬の環流対の流れに乗ったもので、先に示した西流への憩流時の流線図 (Fig. 4 参照) において、南側の環流がこの動きを表している。この環流はその中心には流入したばかりの海水、その外縁には 1 周期前の海水を取り込んでおり、この外縁の流れに乗って前の周期に流入した海水の一部が北上し、明石海峡を抜け瀬戸内海へと戻ってゆく。

このように瀬戸内海から流入した海水は、1 周期目には沖の瀬の環流、特に南側の環流に取り込まれ留まった後、2 周期目には徐々に南へ移動するものの、一部は環流の流れに乗って瀬戸内海へと戻ってゆくという複雑な挙動を示すことが分かった。

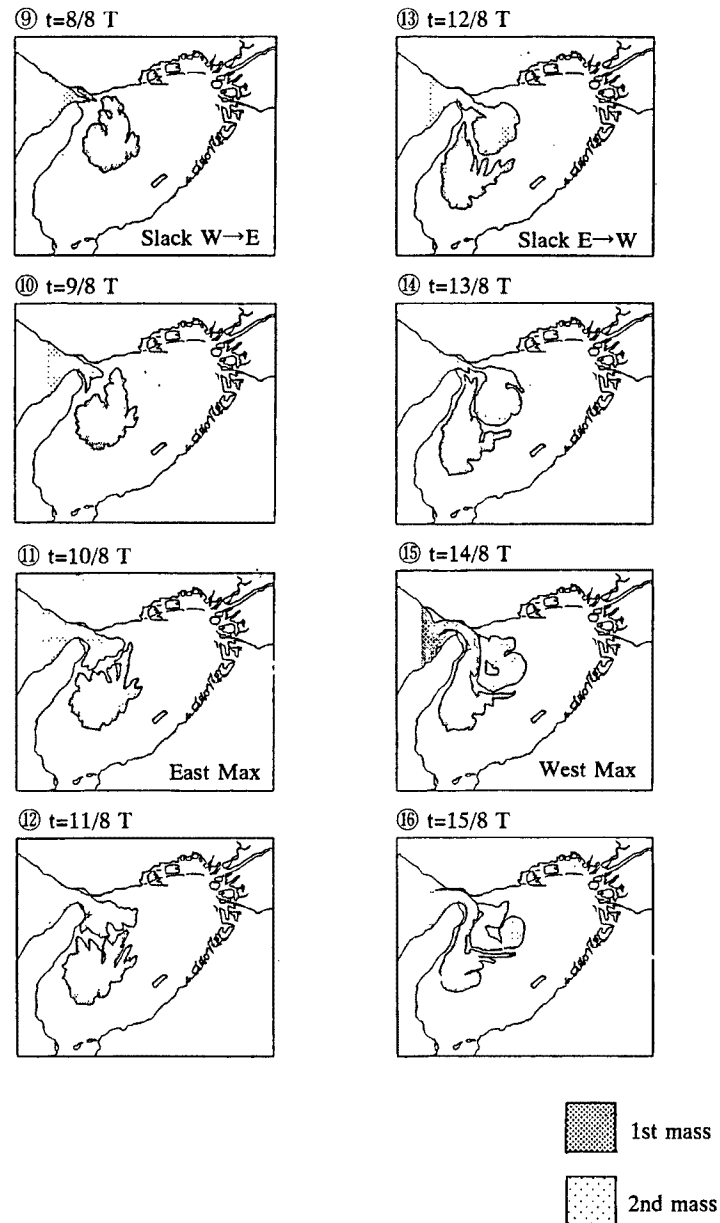


Fig. 7 (2) Movement of fluid colored by dye passing through Akashi Strait.

同様に友ヶ島水道から流入した海水の挙動を Fig. 8 に示す。図に示しているのは、流入した水塊の 1 周期目と 2 周期目のフロントの位置である。太平洋側から流入した海水は主に泉州沿いに大阪湾内に入り込んでくることが分かる。淡路島沿いの海域は潮流の主流部が存在するので、流入、流出ともに多く、その結果このような状況になると考えられる。

4. おわりに

本報では、前報に引き続き大阪湾内の潮流の流動特性について流況の面から検討を行うとともに、湾外か

ら湾内へ流入する海水の挙動について、その基本的な特性について検討を加えたものである。

以下に主な結果についてまとめる。

- ①湾内の流線パターンは、同じ潮汐条件、同じ潮時における可視化結果であっても、そのパターンは必ずしも同じではなく異なった様相を呈する。しかし、1つの潮時においては基本的なパターンなるものが存在し、それを基にして流線パターンの不安定性が見られる。
- ②湾内には、明石海峡西流最強時を中心として沖の瀬付近に環流対が観察される。この環流対は人工衛星からの観測結果⁶⁾にも見られるものであり、この環流対を通して湾内流況は1つのライフサイクルとして捉えることが出来る。
- ③明石海峡から湾内に流入した水塊は、全体的には友ヶ島水道に向かって徐々に南下する。しかし、その挙動は単純ではない。流入直後の水塊は一旦、沖の瀬の環流に取り込まれる。その後、直ちに湾外へ戻るのではなく、1周期間湾内に留まった後徐々に南下しながら、その1周期前の水塊の一部が環流の流れに乗って瀬戸内海へと戻ってゆく。また、友ヶ島水道からの流入水塊は、流動の比較的穏やかな海峡東部から泉州沖に向かって流入する。

本報における実験は、潮汐のみを考慮した一定条件下での実験であるにもかかわらず、湾内の流況は同一条件下においても異なるパターンを示した。しかし、その原因について現段階では明確ではなく、またこのような流線パターンの相違の現地での有無についても、現地における観測結果がないために比較検討が困難な状況にある。また、流入する水塊の可視化については、染料の拡散のために長時間の追跡が困難であり、長周期にわたる実験の際には工夫が必要となる。

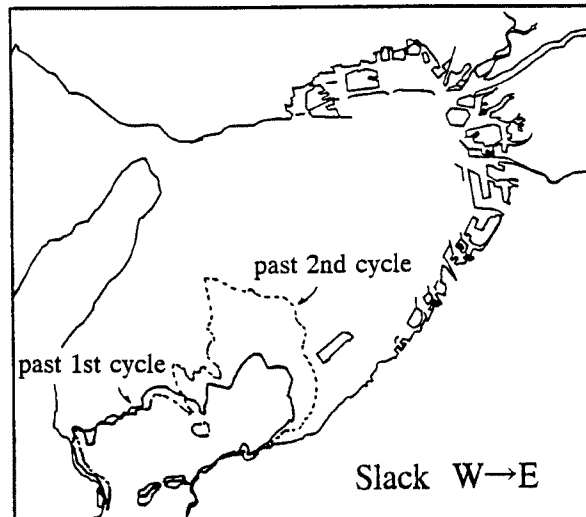


Fig. 8 Front lines of dye passing through Tomogashima Channel.

参考文献

- 1) 今本博健・大年邦雄・鈴木 隆：大阪湾の潮流と海水交換に関する研究，京都大学防災研究所年報，第35号 B-2，pp.331-348，1992.
- 2) 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.519-533，1992.
- 3) 海上保安庁：大阪湾及播磨灘潮流図，海図第6231号，1993.
- 4) 藤原建紀・肥後竹彦・高杉由夫：大阪湾の恒流と潮流，渦，海岸工学論文集，pp.209-213，1989.
- 5) 國松孝男・村岡浩爾編著：河川汚濁のモデル解析，技報堂出版，pp.239，1989.
- 6) 藤原建紀：大阪湾の密度流と潮流の構造，文部省科学研究費総合研究成果報告書「閉鎖性内湾における密度流に関する研究」，pp.9-12，1992.