

# Tidal Residual Circulation に関する基礎的研究 (II)

柳 哲雄・樋口 明生

## FUNDAMENTAL STUDY ON THE TIDAL RESIDUAL CIRCULATION (II)

By *Tetsuo YANAGI* and *Haruo HIGUCHI*

### Synopsis

The tidal residual circulation in a bay was experimentally investigated with use of a simplified hydraulic model. The tide with a period of 6 min. was provided by a plunger-type tide generator to a square bay of  $5 \times 5$  m, 0.1 m in depth, through an opening of 1 m in width.

The current in the bay always flows in one direction although the strength changes according to the phase. That is, the strong tidal residual circulation occurs. The vorticity advection of the residual flow is balanced to the curl of the tide stress and the dissipation by the viscosity.

The simultaneous flow pattern occurs under the almost same configuration of the ground in the prototype.

### 1. ま え が き

国司<sup>1)</sup>は燧灘において潮流の2次元水平拡散テンソルによる塩分フラックスよりも、恒流の移流項による塩分フラックスの方が大きくなる可能性について指摘し、樋口・柳<sup>2)</sup>は三河湾の水理模型を用いて1次元拡散係数が恒流の分散係数としてほぼ説明できることを明らかにした。

このような考えが現実の海域にも適用できるとすれば瀬戸内海、三河湾等の閉鎖水域における物質分布は沿岸境界領域での初期分散(藤田<sup>3)</sup>)を境界条件として、内部領域において、潮流による分散テンソルと恒流を含む拡散方程式を解けば、少くとも2次元的にはかなりの精度で求まることが期待される。

一方、恒流によってつくられる環流の中心域には底泥への重金属の蓄積やゴミの推積が著しく(山田<sup>4)</sup>、柳、友沢<sup>5)</sup>)、そのような面からも恒流の重要性が指摘されている。したがって恒流の発生、維持の機構を明らかにすることは非常に重要であると考えられる。

ここでは特に湾口偏向の影響に着目し、単純な境界条件(地形)のもとに基礎的な実験を行ない、恒流の発生維持の機構を実験的に明らかにしようとした。前報<sup>6)</sup>に引き続き、その解析を進めたのでここに報告し、又同様な地形を持つ大阪湾堺港での観測結果もあわせて報告する。

### 2. 実験結果と考察

実験は前報<sup>6)</sup>の Fig. 4 に示したような幅1mの片寄った開口部を持つ $5\text{m} \times 5\text{m}$ 、水深10cmの正方形の内湾で行ない、周期6分、振幅0.5cmの正弦波を与え湾内の流況を調べた。流速は水面上5mの位置に固定されたモータードライブカメラにより、水面上にまかれた浮標を一定時間間隔で撮影する方法より求めた。

実験結果を定量的に評価するため Fig. 1 に示したような各点で1/12周期ごとの流速値を読みとった。各点の流速値は30秒間の浮標の流跡から求めたもので、ほぼ Euler 的と考えてよい。

流速値を1周期平均して求めた恒流は Fig. 2 に示すようである。代表的な地点の潮流楕円を Fig. 3 に示

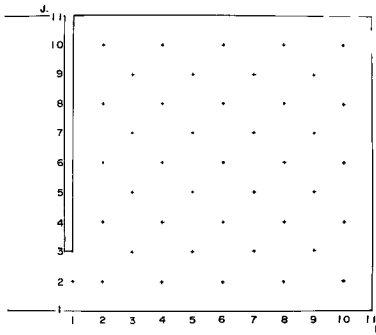


Fig. 1 Measuring points.

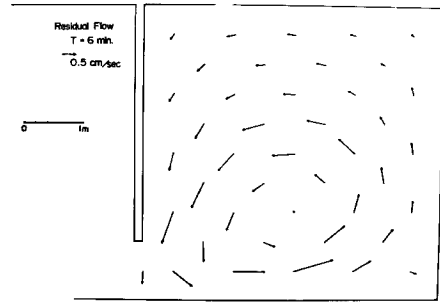


Fig. 2 Residual flow.

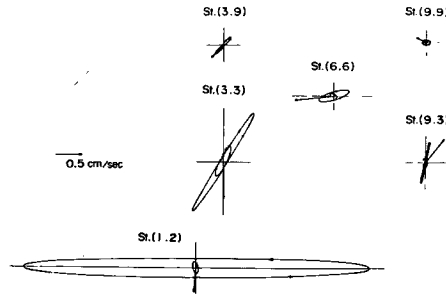


Fig. 3 Tidal ellipses.

した。図中実線の矢印は恒流を、実線の楕円は半日周潮流（この実験では周期6分）を破線の楕円は1/4日周潮流（この実験では周期3分）を表わしている。これを見ると湾口部をのぞいて湾内各点では潮流よりも恒流の方が卓越している。又、1/4日周潮流は湾口のすぐ内側で大きくなっていることがわかる。

いま静水圧分布を仮定し、地球の回転を無視し、1次の抵抗を考えると、海面から海底まで平均したいわゆる鉛直平均流に関する運動方程式および連続の式は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -g \frac{\partial h}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - Ru \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= -g \frac{\partial h}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - Rv \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) = 0 \dots\dots\dots (2.2)$$

ここに  $\nu$  は水平渦動粘性係数、 $R$  は抵抗係数である。恒流に関する量に  $-$ 、潮流に関する量に  $'$  をつけ

$$u = \bar{u} + u' \quad v = \bar{v} + v' \quad h = \bar{h} + h'$$

で表わすことにすればこれらの式から恒流に関する渦度方程式としてつぎの式が得られる。

$$0 = -\bar{u} \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial x} - \bar{v} \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial y} - F + \nu \left( \frac{\partial^2 \bar{\omega}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{\omega}}{\partial y^2} \right) - R\bar{\omega} \dots\dots\dots (2.3)$$

ただし  $\omega$  は渦度を表わし

$$\omega = \bar{\omega} + \omega'$$

である。また  $F$  は潮流の非線形項の curl をとることによりでてくる項で

$$F = u' \frac{\partial \omega'}{\partial x} + v' \frac{\partial \omega'}{\partial y} + \omega' \frac{\partial u'}{\partial x} + \omega' \frac{\partial v'}{\partial y} \dots \dots \dots (2.4)$$

である。潮流の非線形項を Reynolds' stress の analogy から tide stress と仮称すれば  $F$  は curl of tide stress と呼ぶことができる。

(2.3) 式の各項の大きさを見積もるためには Fig. 1 で示した測点だけでは資料数が少なすぎる。そこで Spline interpolation under tension 法<sup>7)</sup>により Fig. 1 の測点上で求めた流速値をもとに Fig. 4 に示したような  $35 \times 35$  の格子点で流速値を求めた。これらの格子点上での流速値から求めた恒流の渦度を Fig. 5 に示す。これは前報<sup>9)</sup>の Fig. 12 に示した渦度分布とはほぼ同様である。またこの渦度から求めた恒流の流れ関数を Fig. 6 に示す。これは Fig. 2 に対応するものである。

(2.3) 式の左辺の初めの 2 項の分布を Fig. 7 に第 3 項  $F$  を Fig. 8 に示す。流速値の読みとり精度が有効数字 3 桁で差分を 2 回行なうため、この図中の数値の信頼性が高いのは湾口部附近に限られる。これらの図を比較するとほぼ同地点で正、負が逆になりその絶対値もよく一致している。このことは湾口部附近では、潮流の非線形項の curl が湾内にくらべて大きな値を持ち、恒流の渦度移流項とつりあっていることを示している。一方、ここで測定した tidal residual circulation は定常なので、潮流から恒流に供給される渦度は粘性で逸散しているはずである。水平粘性による渦度の逸散を Fig. 9 に、垂直粘性によるそれを Fig. 10 に示した。 $\nu$  と  $R$  の値は 2 点における渦度方程式を  $\nu$  と  $R$  を未知数とした連立方程式として解けば求まるはずであるが、先述したような精度の関係で有意な値は求まらなかった。そこで左辺の 3 項と同じ order の値を与えるもの

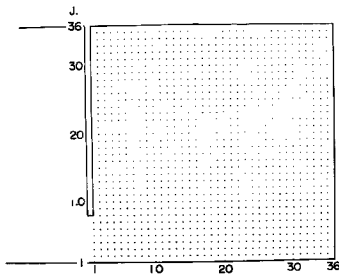


Fig. 4 Grid system for the calculation.

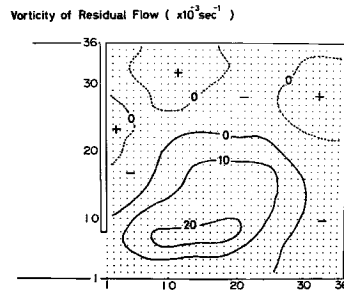


Fig. 5 Vorticity of the residual flow.

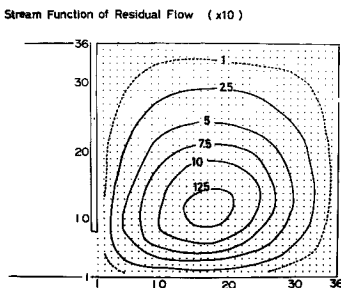


Fig. 6 Stream function of the residual flow.

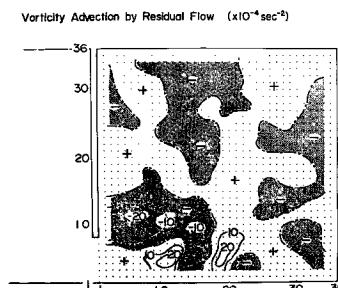


Fig. 7 Vorticity advection by the residual flow.

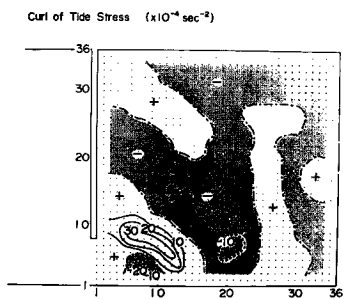


Fig. 8 Curl of the tide stress.

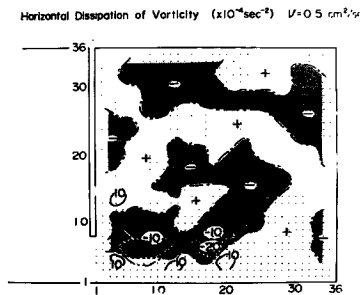


Fig. 9 Horizontal dissipation of the vorticity.

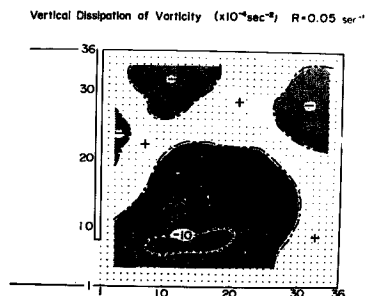


Fig. 10 Vertical dissipation of the vorticity.

として  $\nu=0.5\text{cm}^2/\text{sec}$ ,  $R=0.05\text{sec}^{-1}$  としてその分布を描いた。これを見ると水平逸散は湾口附近で大きく、垂直逸散は湾中部で大きい傾向があることがわかる。

### 3. 現地観測

一般に原型では、恒流は潮流の数%の大きさであり、上述したような実験結果がそのまま原型に適用できるかどうか疑問がある。そこで特に湾口偏向の影響が顕著な場合、原型でもこのような流動が起こりうるかどうか調べるため大阪湾堺臨海部第七区埋立地で流動観測を行なった。

この埋立地は観測当時埋立進行中であり、広さは $1000\text{m}\times 800\text{m}$ 、水深 $0\sim 6\text{m}$ 、北側に約 $80\text{m}$ の開口部を持ち、水平地形はこれまでの研究に使用してきた模型に類似している。観測は昭和49年3月25日～26日の大潮期に行ない、流速観測、染料放流実験、深淺測量等を実施した。

#### 3.1 調査方法

湾内中央横断線上の東西2点に流速計（ベルゲンモデル4自記流向流速計）を設置して、海面下1m層における1昼夜の流向流速の測定を行なった。又海面上に十数個のフロートを放流し、染料（ウラニン）を投入して航空写真撮影を行ない、湾内の流況を把握した。さらに南北方向に100m間隔、東西方向に200m間隔で予め定めた各測点において船上からレッドによる測深を行なった。

#### 3.2 調査結果と考察

Fig. 11 に深淺測量の結果を示す。図中の数字は O. P. を基準面とした水深を m で表わしている。ベルゲンモデル4自記流向流速計により観測した測点 C（海面下1m）の流向流速は10分間隔で読取り、北方・東方分速

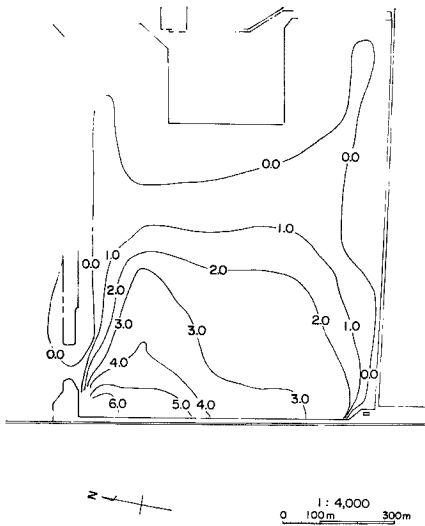


Fig. 11 Bottom topography of the observed basin.

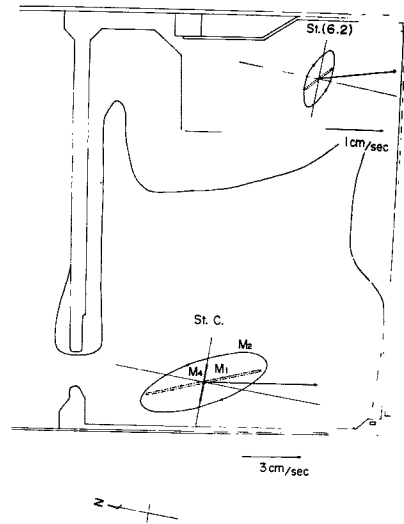


Fig. 12 Tidal ellipses in the model and the prototype.

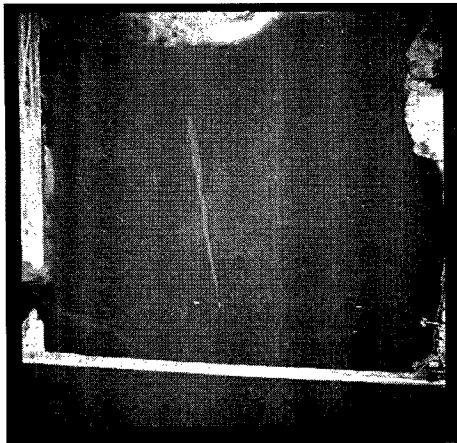


Photo. 1. 8h20m.

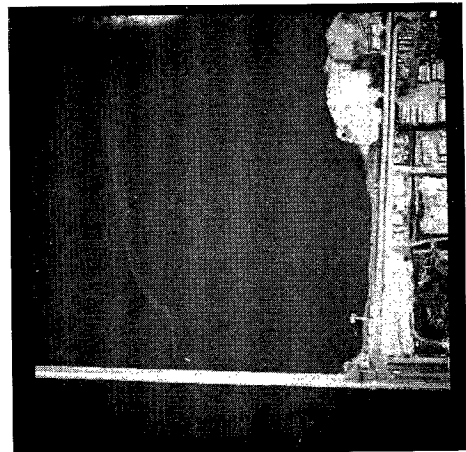
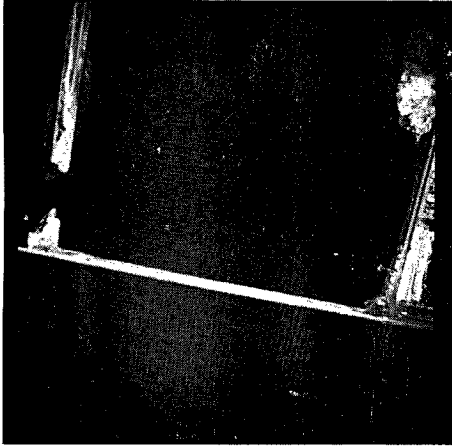
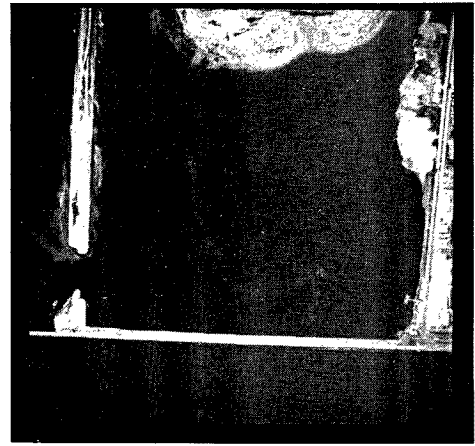
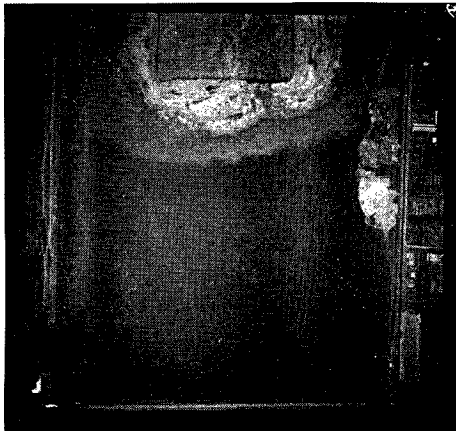
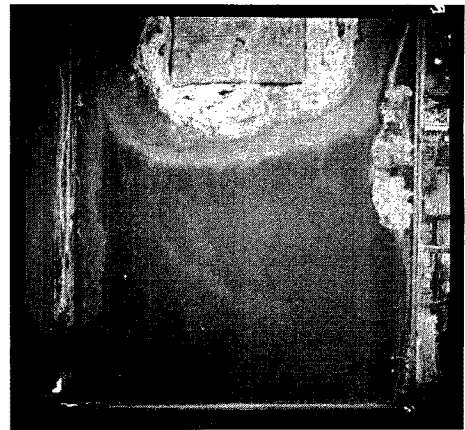


Photo. 2. 8h24m.

を求めて流速曲線を作成し、25時間調和解を行なった。測点 C の東方に設けた測点 B については流速計の不調から記録は信頼性に欠けていたため使用しなかった。調和解の結果は潮流楕円として Fig. 12 に示した。これを見ると潮流より恒流（約 6 cm/sec）の方が卓越している。Fig. 12 の右上に示したのは模型内のほぼ同地点での潮流楕円である。これらと比較すると軸の方向は多少異なるが、恒流、半日周潮流、1/4 日周潮流の大きさの関係は両者ともよく似ていることがわかる。

湾内の全体的な流況を把握するため下げ潮期と上げ潮期に Photo. 1 に示したように、湾央に 1 直線にウランを投入し、航空写真撮影によってそのパターンの変化を調べた。Photo. 1 ~ Photo. 4 は下げ潮期で写真の下にその撮影時刻が示してある。上げ潮期は 14 時 15 分に Photo. 1 と同様に染料を投入した。Photo. 5, Photo. 6 は上げ潮期の流況を示している。これらのパターンは前報<sup>9)</sup>の Fig. 8 で示した湾内中央横断線上の

Photo. 3. 8<sup>h</sup>29<sup>m</sup>.Photo. 4. 8<sup>h</sup>40<sup>m</sup>.Photo. 5. 14<sup>h</sup>34<sup>m</sup>.Photo. 6. 14<sup>h</sup>52<sup>m</sup>.

流速分布と非常に良く似ている。

以上の観測結果から、湾口偏向の影響が顕著な場合原型でも模型と同様な流動が起りうる事が確認された。

#### 4. あとがき

以上著者らは幅1mの湾口を持つ5m×5m(水深0.1m)の正方形の湾に潮汐を与え、それによりひきおこされる tidal residual circulation に関する基礎実験を行なった結果次のことが明らかになった。

- (1) 片寄った湾口から出入りする潮流によって湾内には環流 (tidal residual circulation) が生じ、常に一方方向に流れて憩流をみない。
- (2) この tidal residual circulation の渦度は潮流の非線形項 (tide stress) によって供給され、水平・垂直の粘性によって逸散され定常状態にある。
- (3) 原型においても湾口偏向の影響が顕著な場合にはこのような流動が起りうる。

この研究を進めるにあたって 貴重な助言、討論を頂いた 京都大学理学部国司秀明教授、計算機の使用に際して御協力頂いた 京都大学大学院理学研究科大西行雄氏、又観測に御協力頂いた (財) 産業公害防止協会室井

和彦氏，京都大学防災研究所研修員柏井誠氏，京都大学理学部学生武岡英隆氏に深甚なる謝意を表する次第である。

#### 参 考 文 献

- 1) 国司秀明：瀬戸内海の水塊構造と海水交換の検討，農林水産生態系における汚染物質と指標生物に関する研究，東海区水産研究所他，1973，pp. 113～118.
- 2) 樋口明生・柳哲雄：潮流模型における恒流と分散，沿岸海洋研究ノート，Vol. 12. No. 1, 1974, pp. 41～46.
- 3) 藤田政伸：琵琶湖における河川水の分散，沿岸海洋研究ノート，Vol. 12. No. 1, 1974, pp. 19～22.
- 4) 山田紀男：大阪湾の潮流と流程図について，水路要報第92号，1972，pp. 23～29.
- 5) 柳哲雄・友沢憲治：周防灘，鏝灘の流動と底質に関して，昭和49年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集，1974，pp. 58～59.
- 6) 柳哲雄・柏井誠・安田秀一・樋口明生・北川吉男：Tidal Residual Circulation に関する基礎的研究，京都大学防災研究所年報第17号 B，1974，pp. 657～664.
- 7) 大西行雄：スプライン法を用いた2次元補間について J. Oceanog. Soc. Japan (印刷中).