

潮汐残渣流の基礎的研究

樋口 明生*・柳 哲 雄**

1. まえがき

沿岸海洋において一般に潮流により移動する水粒子は1周期後元の位置に戻らない、これは流れの中の恒流成分と乱れによるものと考えられる。恒流 (constant flow) は潮流の調和分解の結果求まる周期性を持たない成分として定義されるものであるが、この中には風、波、流入河川水、気圧傾度、海流、密度流、地球自転の効果の他、海岸・海底地形による潮流の非線形効果によるものが含まれている。この中で特に潮流の非線形性に起因する流れを潮汐残渣流 (tidal residual flow) またこれによって生ずる環流を潮汐残渣環流 (tidal residual circulation) と呼ぶ。

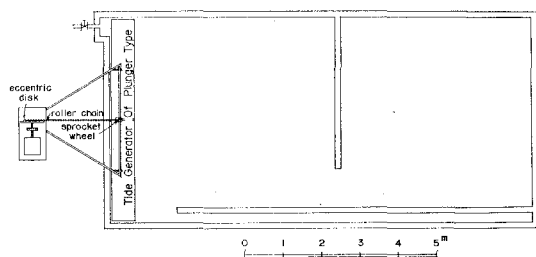
著者らは以前この潮汐残渣流が沿岸海洋の物質分布に重要な役割りを果たすことを指摘した^{1),2)}。

潮汐残渣流の発生に関連した研究は過去にいくつか行われているが³⁾⁻⁶⁾、水平的な地形の影響によるものを定量的に扱ったものはまだない。ここでは地形の効果のうち水平的なもののみに着目し、単純な境界条件のもとに基礎的な実験を行い、潮汐残渣流の発生維持の機構を明らかにしようとした。また同様な水平地形を持つ大阪湾堺港で観測を行い、現地でも同様な流動が起こりうることを確認した。

2. 実 験

(1) 実験装置

実験は京都大学防災研究所宇治川水理実験所にある平



図—1 模型一般図

面水槽を使用した。図—1 に示すような長さ 11 m, 幅 5.4 m, 深さ 0.27 m のコンクリートブロック製の水槽に仕切りを設け、幅 1 m の片寄った開口部を持つ 5 m × 5 m 水深 10 cm の正方形内湾を作って用いた。起潮機は長さ 5.36 m, 幅 0.6 m, 高さ 0.4 m のプランジャーを回転する円板上の偏心ビンにつながる鎖で上下させる、いわゆるプランジャー式のものを用いた。周期は 3 ~ 30 分ストロークは 0 ~ 40 cm の間で調節できる。水位の時間的变化は模型と連通管でつながる直径 3 cm の円筒内の水位を電気抵抗式の水時計で連続自記記録した。流速は水面上 5 m 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 (1/24 周期) で撮影する方法より求めた。

(2) 実験経過・結果

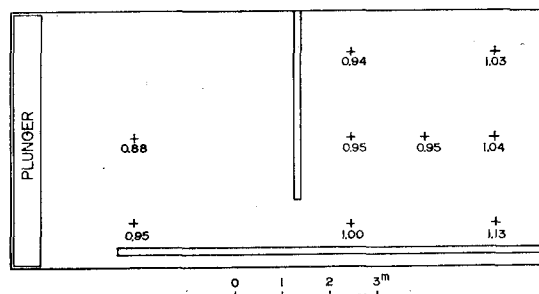
プランジャーのストローク (32 cm) と周期 (6 min) を一定に保ち、起潮機始動後 5 周期以上経過してから 5 周期間の水位、流況を調べた。

a) 水 位

各水位計測点における水位の時間的变化はほぼ正弦曲線を示すが潮差の分布は図—2 に示すようであり、全域で同一とはならない。図中の数字は湾口内側測点における潮差 (8.74 mm) を基準にして各点の潮差を比の形で表わしたものである。湾内各点の満潮時刻の位相差はほとんどみとめられなかった。

b) 流 況

湾口における上げ潮最強時の流況を図—3 に、下げ潮最強時のそれを図—4 に示す。図中の数字は流速 (単位は cm/sec) を示す。これらの図によると湾口では上げ潮



図—2 潮差分布

* 正会員 理博 愛媛大学教授 工学部海洋工学教室
 ** 理修 愛媛大学助手 工学部海洋工学教室

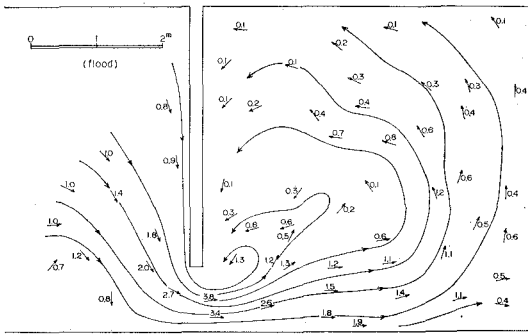


図-3 上げ潮最強時の流況

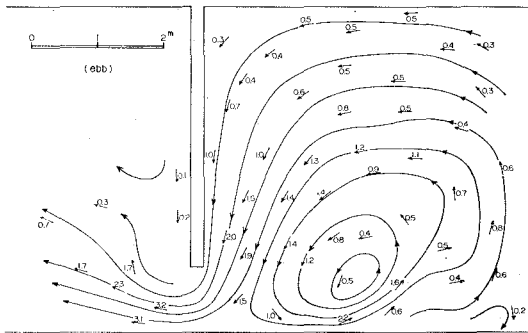


図-4 下げ潮最強時の流況

時には湾外から湾内に、下げ潮時には湾内から湾外へ向かう流れがみられるが、湾内では常に反時計回りの流れとなり、通常考えられるような往復流とはならない。環流の中心は上げ潮時には湾口より、下げ潮時には湾央寄りにある。湾外においては起潮機があるためやや変形しているが、湾内と対称的な流れのパターンを示している。

湾内中央横断線(A-A')および湾口横断線(B-B')上で求めた各位相における流速分布は図-5に示すようである。これによると湾口では干潮から満潮まで上げ潮、満潮から干潮まで下げ潮と規則正しく変化するが、中央線の上では湾口に近い側(A'寄り)で比較的狭い幅の常に奥に向かう強い流れがあり、それ以外の部分で弱い逆方向

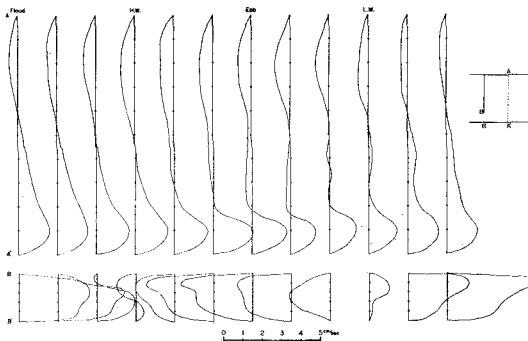


図-5 2断面における流速変化

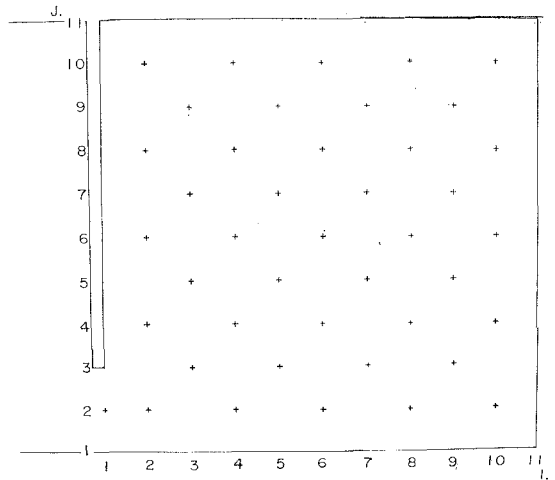


図-6 流速測定点

きの流れがあることがわかる。流速ゼロの点は位相に応じて移動する。

(3) 考察

実験結果を定量的に評価するために図-6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秒間の浮標の追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潮汐残流は図-7に示すようである。代表的な地点の

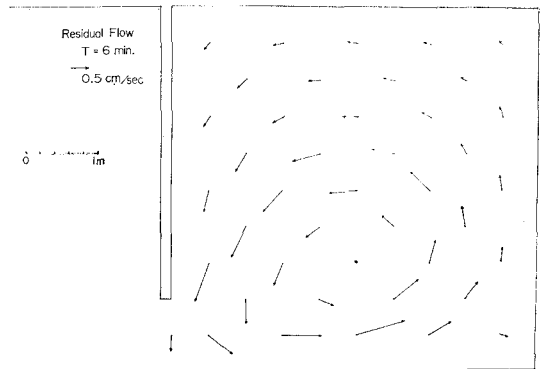


図-7 潮汐残流

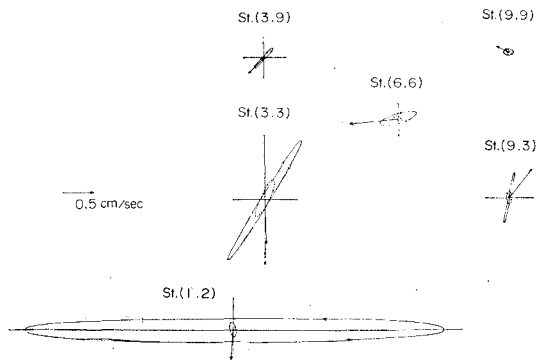


図-8 潮流楕円

潮流楕円を 図-8 に示した。图中実線の矢印は潮汐残渣流を、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（周期3分）を表わしている。これを見ると湾口部を除いて、湾内各点では潮流より潮汐残渣流の方が卓越している。また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。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \\ = -g \frac{\partial h}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - Ru \end{aligned} \right\} \dots\dots (1)$$

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

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) = 0 \dots\dots\dots (2)$$

ここに ν は水平渦動粘性係数、 R は抵抗係数である。潮汐残渣流に関する量に $-$ 、潮流に関する量に $'$ をつけ

$$u = \bar{u} + u' \quad v = \bar{v} + v' \quad h = \bar{h} + h' \dots\dots\dots (3)$$

で表わすことにすれば、これらの式から潮汐残渣流に関する渦度方程式として次式が得られる。

$$0 = -\bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} - \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} - F + \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} \right) - R\bar{w} \dots\dots\dots (4)$$

ただし w は渦度を表わし

$$w = \bar{w} + w' \dots\dots\dots (5)$$

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

$$F = \left\langle u' \frac{\partial w'}{\partial x} \right\rangle + \left\langle v' \frac{\partial w'}{\partial y} \right\rangle + \left\langle w' \frac{\partial u'}{\partial x} \right\rangle + \left\langle w' \frac{\partial v'}{\partial y} \right\rangle \dots\dots\dots (6)$$

である。ここで $\langle \rangle$ は1潮流周期平均を表わしている。

式(4)の各項の大きさを見積もるためには 図-6 で示した測点だけでは資料数が少なすぎる。そこで Spline 補間法⁷⁾により 図-6 の測点上で求めた流速値をもとに 図-9 に示したような 35×35 の格子点上で流速値を求めた。これらの格子点上での流速値から求めた潮汐残渣流の渦度分布を 図-10 に示す。式(4)の右辺の初めの2項の水平分布を 図-11 に、第3項Fの分布を 図-12 に示す。流速値の読み取り精度が有効数字3桁で差分を2回行うため、これらの図中の数値の信頼性が高いのは湾口部付近に限られる。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。

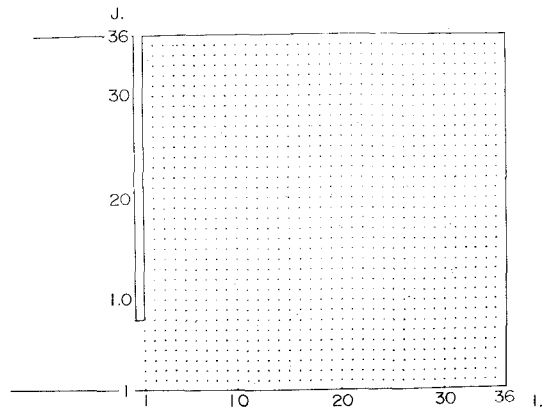


図-9 計算に用いた格子点

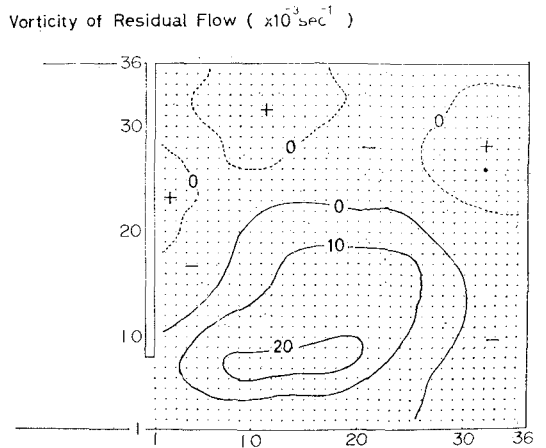


図-10 潮汐残渣流の渦度分布

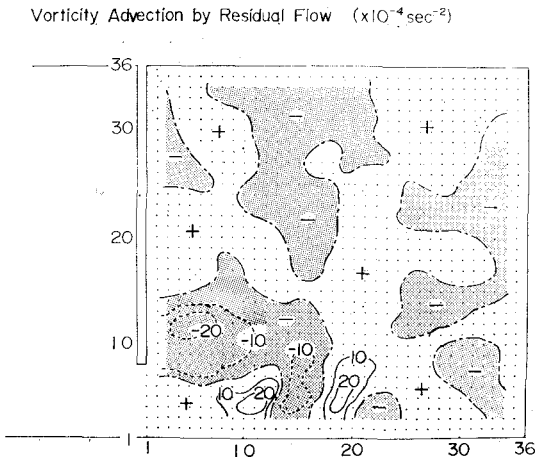


図-11 渦度移流項

このことは湾口部付近では潮流の非線形項の curl が湾内に比べて大きな値を持ち、潮汐残渣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潮汐残渣流は定常であるから、潮流から潮汐残渣流に供

Vorticity Transfer from Tide ($\times 10^{-4} \text{ sec}^{-2}$)

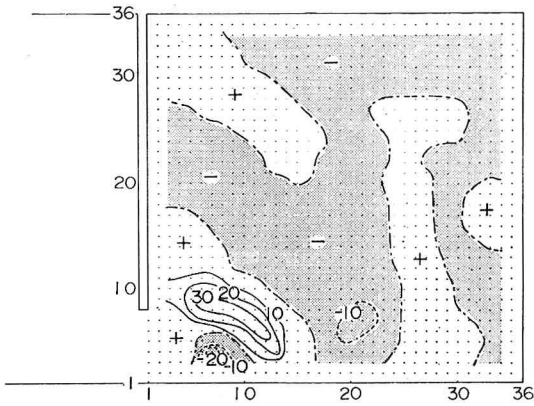


図-12 潮流からの渦度輸送項

Horizontal Dissipation of Vorticity ($\times 10^{-4} \text{ sec}^{-2}$) $\nu = 0.5 \text{ cm}^2/\text{sec}$

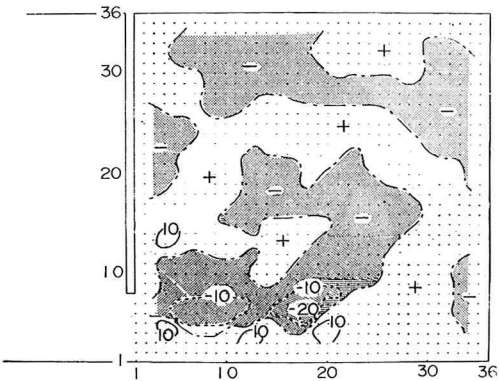


図-13 渦度の水平逸散項

Vertical Dissipation of Vorticity ($\times 10^{-4} \text{ sec}^{-2}$) $R = 0.05 \text{ sec}^{-1}$

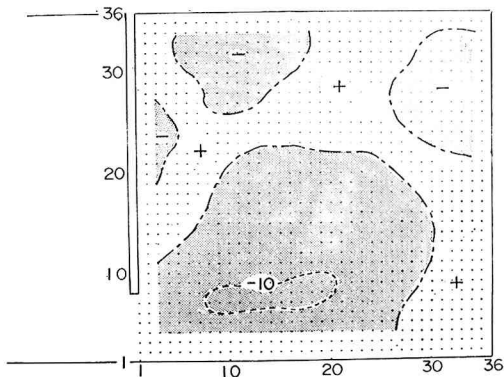


図-14 渦度の鉛直逸散項

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。そこで初めの3項と同じ order の値を与えるものとして $\nu = 0.5 \text{ cm}^2/\text{sec}$, $R = 0.05 \text{ sec}^{-1}$ としてその分布を描いた。これを見ると水平逸散は湾口付近で大きく、垂直逸散は湾中央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7区埋立予定地で流動観測を行った。この埋立予定地は広さ $1000\text{m} \times 800\text{m}$ 、水深 $0 \sim 6\text{m}$ 、北側に約 80m の片寄った開口部を持ち、水平地形は正方形に近く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日の大潮期に行い、流速観測、染料放流実験、深淺測量を実施した。

(1) 観測方法

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)を設置して、海面下 1m 層における1昼夜流向流速測定を行った。また海面上に放流した十数個のフロートと染料(ウラン)の航空写真撮影を行い、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点において船上からレッドによる深淺測量を行った。

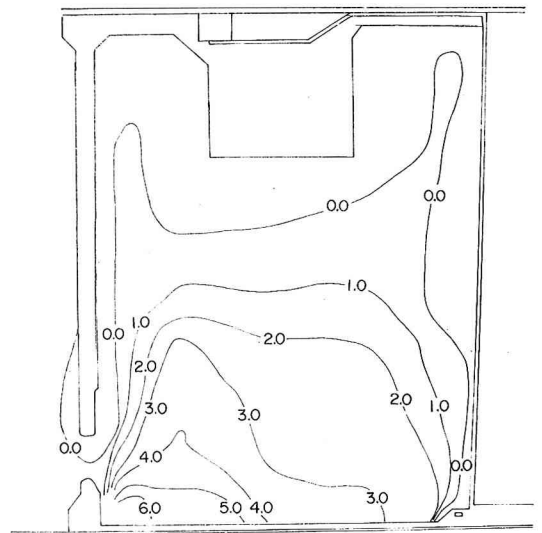


図-15 観測地の海底地形

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 図-13 に、垂直粘性によるそれを 図-14 に示す。 ν と R の値は2点における渦度方程式を ν と R を未知数とした連立方程式として解けば

(2) 観測結果と考察

図-15 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) における流向流速を 10 分間隔で読み取り、北方・東方分速を求め、流速曲線を作成し、25 時間調和分解を行った。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。調和分解の結果を潮流楕円として 図-16 に示した。これを見ると潮流より恒流の方が卓越している。図-16 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 写真-1 に示したように湾中央に 1 直線にウランを投入し、航空写真撮影によりそのパターンの変化を調

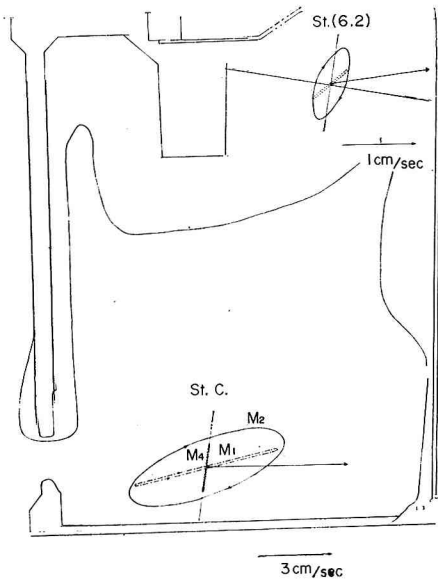


図-16 原型と模型の潮流楕円

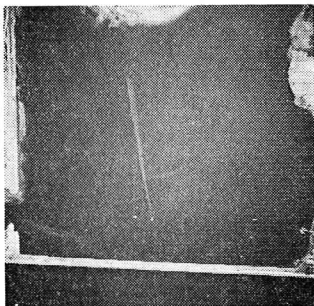


写真-1 8時20分撮影

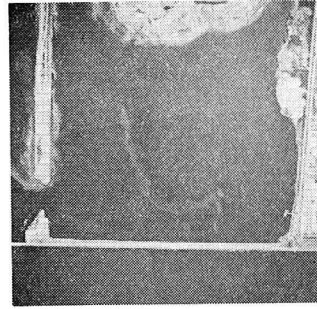


写真-2 8時40分撮影 (下げ潮期)

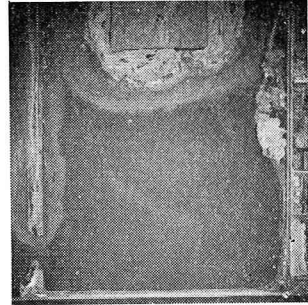


写真-3 14時52分撮影 (上げ潮期)

べた。写真-1, 写真-2 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 写真-1 と同様に染料を投入した。写真-3 は上げ潮期の流況を示している。これらのパターンは 図-5 で示した湾内中央横断線上の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

以上著者らは潮汐残渣流に関する基礎的な実験と観測を行った結果次のことが明らかになった。実験・観測の詳細については別報^{3),9)}を参照されたい。

(1) 片寄った湾口から出入りする潮流によって、湾内には潮汐残渣環流が生じ、常に 1 方向に流れて憩流をみない。

(2) この潮汐残渣環流の渦度は潮流の非線形項によって供給され、水平・垂直の粘性によって逸散されて定常状態にある。

(3) 原型においても湾口偏向の影響が顕著な場合には同様な流動が起りうる。

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、実験観測に御協力頂いた京都大学防災研究所 北川吉男技官、同研修員 柏井誠氏、中国工業技術試験所 安田秀一氏、(財)産業公害防止協会 室井和彦氏、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) 杉本隆成・樋口明生：瀬戸内海における潮汐混合の実験的研究(Ⅱ)，京大防災研究年報，第15号B，pp. 431~440, 1972.
- 2) 樋口明生・柳 哲雄・柏井 誠：三河湾における潮流による拡散の水理模型実験について，第21回海岸工学講演会論文集，pp. 361~366, 1974.
- 3) Hunt, J.M. & B. Johns.: Currents induced by tides and gravity waves, *Tellus*, 15, pp. 343~351, 1963.
- 4) Johns, B. & P. Dyke.: The structure of residual flow in an offshore tidal stream, *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 12, pp. 73~79, 1973.
- 5) 山田紀男・矢野雄幸：地形の影響による恒流と1/4日周潮流の発生について，水路部研究報告，第6号，pp. 63~77, 1971.
- 6) Sugimoto, T.: Effect of boundary geometries on tidal currents and tidal mixing, *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, Vol. 13, No. 1, pp. 1~13, 1975.
- 7) Oonishi, Y.: A note on a surface interpolation by the spline technique, *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, (in press), 1975.
- 8) 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，京大防災研年報，第17号B，pp. 657~664, 1974.
- 9) 柳 哲雄・樋口明生：Tidal residual circulation に関する基礎的研究(Ⅱ)，京大防災研年報，第18号B，(印刷中)，1975.