

潮 汐 残 差 流 の 基 礎 的 研 究 (続)

樋 口 明 生*・柳 哲 雄**

1. ま え が き

沿岸海域の物質輸送に“恒流”のはたす役割が大きいことが最近各方面で明らかにされつつある^{1)~3)}。我々は“恒流”と呼ばれる流れの主成分は潮流の非線形性に起因する潮汐残差流であると考え、前報⁴⁾において基礎的な水理模型実験によりその発生・維持機構を明らかにしようとした。

その結果偏心開口矩形湾における潮汐残差流の渦度バランスが次式によって表わされることがわかった。

$$F_{TT} + F_{SS} - \nu \Delta \omega_s + R \omega_s = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに

$$\left. \begin{aligned} F_{TT} &= \nabla \cdot (\overline{u \tau \omega_T}) \\ F_{SS} &= \nabla \cdot (\overline{u_s \omega_s}) \\ \omega_s &= \frac{\partial v_s}{\partial x} - \frac{\partial u_s}{\partial y} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

である。添字の T, S はそれぞれ潮流・残差流成分を表わし、 $\bar{}$ は 1 潮時平均を表わす。 ν は水平渦動粘性係数、 R は抵抗係数である。

一方、Oonishi (1976)⁵⁾ は数値模型実験によって (1) 式の F_{TT} を線形計算で得られた潮流から求め、次式を解くことによって水理模型と同様の潮汐残差流が得られることを示した。

$$F_{TT} + F_{SS} - \text{Re}^{-1} \Delta \omega_s = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに Re はレイノルズ数を表わす。

以上のことから潮汐残差流の生成には潮流自身の時間的な非線形効果 (F_{TT}) と残差流自身の空間的な非線形効果 (F_{SS}) が本質的であり、潮流と残差流の相互干渉は本質的でないことが一応結論づけられた。

今回潮汐周期、潮差、湾口幅、湾口形、水深などを変えて湾内の潮汐残差流がどのように変化するかを調べた。

2. 実験経過

実験装置・方法は前報のものと同様である。前報で行

った実験に加えて今回他の条件を同一にして、潮汐周期を 3 分と 9 分に、潮差を 0.5 cm に、湾口幅を 50 cm と 200 cm に、水深を 5 cm に、湾口形を変えて実験を行った。実験の一覧を表-1 に示す。表-1 に示した潮差は各実験ケースとも前報の図-2 で 1.13 と示した湾奥の測点のものである。

表-1 実験一覧

Run No.	Tidal Period T sec.	Tidal Range A cm	Depth H cm	Width of the Mouth l cm	
1	360	0.99	10.0	100	
2	180	0.72	10.0	100	
3	540	0.79	10.0	100	
4	360	0.90	10.0	50	
5	360	0.86	10.0	200	
6	360	0.84	5.0	100	
7	360	0.49	10.0	100	
8	360	0.90	10.0	100	with a training wall

3. 実験結果

Run 2~Run 7 の実験で得られた潮汐残差流を図-1 に示す。これを見ると強さの違いはあるがいずれも前報に述べた Run 1 の場合と同様反時計回りの環流を形成している。環流の中心はどの場合もほぼ湾奥にあり、系統的な移動はみられない。湾口に導流堤をつけると流れの様相は今までの場合と全く異なった。上げ潮の場合湾口から流入する潮流は図-2 (左) に示すように放射状に拡がり、下げ潮の場合は図-2 (右) に示すようにその逆向きに流れる。その結果潮汐残差流は図-3 に示すように流速が小さく潮流の渦に伴う小規模な渦流はあるものの湾全体を循環する潮汐残差環流は発生しない。

4. 考 察

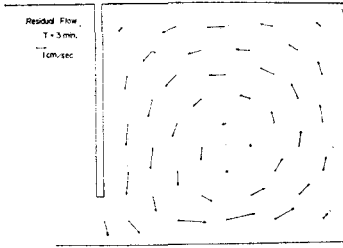
前報の (1) 式の非線形項を時間変化項、圧力項、水平粘性項、底の摩擦項でそれぞれ割って各実験ケースごとにストローハル数 ($St.$)、フルード数 ($Fr.$)、水平レイノルズ数 ($Re_h.$)、鉛直レイノルズ数 ($Re_v.$) を求めた。用いた代表流速値 U は湾口部の潮流の平均流速で次式により求めた。

$$U = \frac{2AL^2}{HT} \quad \dots\dots\dots (4)$$

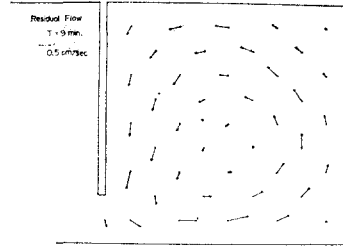
ここで A は潮差、 L は湾幅、 H は水深、 T は潮汐周

* 正会員 理博 愛媛大学教授 工学部海洋工学教室

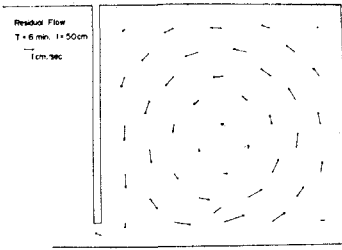
** 正会員 理修 愛媛大学助手 工学部海洋工学教室



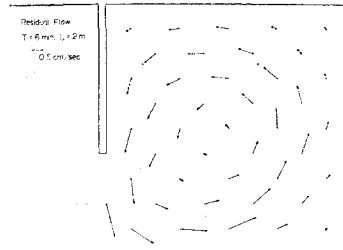
Run 2



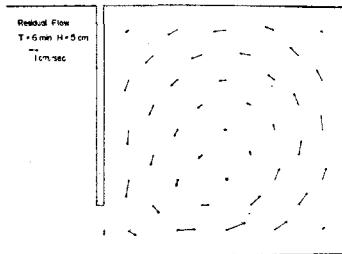
Run 3



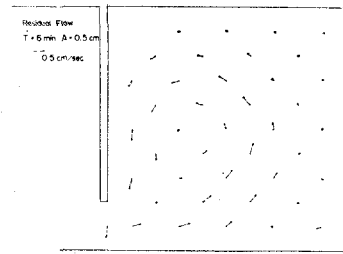
Run 4



Run 5



Run 6



Run 7

図-1 潮汐残差流

期, l は湾口幅を表わしている. ν と R は前報の結果から $\nu=0.5 \text{ cm}^2/\text{sec}$, $R=0.05/\text{sec}$ とした. 水深を 5 cm にした Run 6 では $R=0.1/\text{sec}$ とした. また湾内の潮汐残差流の流速の2乗の和 (Er) を半日周潮流の潮流楕円の主軸方向の流速の2乗の和 (Et) で割った無次元数を求めた.

結果を表-2 と 図-4 に示す. これをみると湾口に導流堤をつけた Run 8 を除いていずれも Et よりも Er の方が大きくなっている. また Er/Et は Rev に依っているようにみえる. Run 8 を除くと Er/Et は Run 1 の場合に極小値を取り, Rev がそれより大きくても小さくても Er/Et は大きくなっている. この理由については現在検討中である.

湾口に導流堤をつけると顕著な潮汐残差流は発達しない. この理由として前報の結論から類推すれば F_{TT} が小さいのではないかと考えられる.

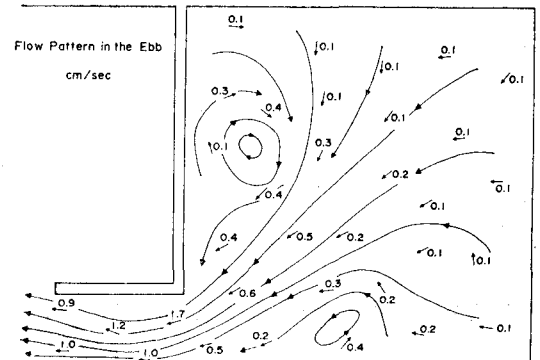
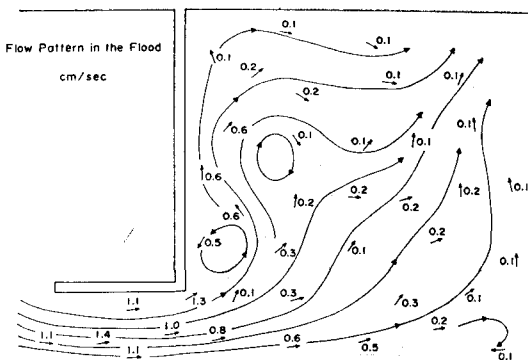


図-2 Run 8 の上げ潮流(左)と下げ潮流(右)

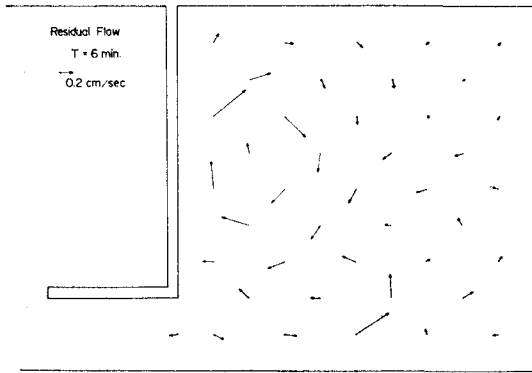


図-3 Run 8 の潮汐残差流

そこで F_{TT} を求めてみると 図-5 に示すようである。前報の 図-12 と比較すると今回はおよそ 2 桁ほど F_{TT} が小さい。同じ潮差、周期の潮汐を与えているのに何故であろうか。そこで両ケースとも潮流成分だけとりだして比較してみた。そうすると潮流の大きさはほぼ同様で

あるが湾内の位相差の分布が大きく異なっていることがわかった。図-6 にそれを示す。導流堤をつけない場合は突堤に沿って転流が湾口中心点より 15~30 秒早く起っていて、連続の関係をみたすために斜向面で転流が遅くなっている。このような位相差のあるなしで 図-7 に模式的に示すように湾口部の潮流の時間変化のパターンは導流堤がある場合とない場合で大きく異なる。湾内では同様の潮汐が起っているのであるから各時の湾口断面流量は上・下とも等しいが、その流れのパターンは異なる。 F_{TT} の大きさは潮流の渦度輸送の収束発散によって決まるから潮流シアーの大きさに強く依存している。したがって 図-7 に示したような湾口部の潮流の流況の違いが F_{TT} の大きさを決めたと考えられる。

何故このような位相差の分布の違い—湾口部の潮流の流況の違い—があらわれたのであろうか？ 通常往復流に伴う粘性境界層の厚さは線形計算によると $\sqrt{\nu T/\pi}$ (T は振動周期) で表わされ、境界層内では主流に対して働く摩擦力のために主流よりも位相の進みが生じる。しかし $\sqrt{\nu T/\pi}$ から期待される境界層の厚さは ν の大きさ

表-2 無次元数一覧

Run No.	Mean Velocity at the Mouth $U = 2AL^2/HTT$ cm/sec.	Strouhal number $St = UT/L$	Froude number $Fr = U^2/gA \times 10^3$	Horizontal Reynolds number $Re_h = UL/\nu \times 10^3$	Vertical Reynolds number $Re_v = UR/\nu \times 10^{-2}$	Energy of tidal residual flow $Er = \sum u_i^2$ cm ² /sec ²	Energy of tidal current $Et = \sum u_i^2$ cm ² /sec ²	Er/Et	Mark
1	1.38	0.99	2.0	1.4	5.5	14.82	13.44	1.10	○
2	2.00	0.72	5.7	2.0	8.0	99.26	55.15	1.80	◎
3	0.73	0.79	0.69	0.73	2.9	8.43	5.79	1.46	⊗
4	2.50	1.8	7.1	2.5	10	56.48	15.10	3.74	□
5	0.60	0.43	0.43	0.60	2.4	16.01	7.65	2.09	▣
6	2.33	1.7	6.6	2.3	4.7	49.12	37.95	1.29	△
7	0.68	0.49	0.96	0.68	2.7	3.59	2.07	1.74	▲
8	1.25	0.90	1.8	1.3	5.0	2.13	7.43	0.29	⊕

$L=500$ cm $g=980$ cm/sec². $\nu=0.5$ cm²/sec. $R=0.05$ /sec. (0.1/sec.: Run 6)

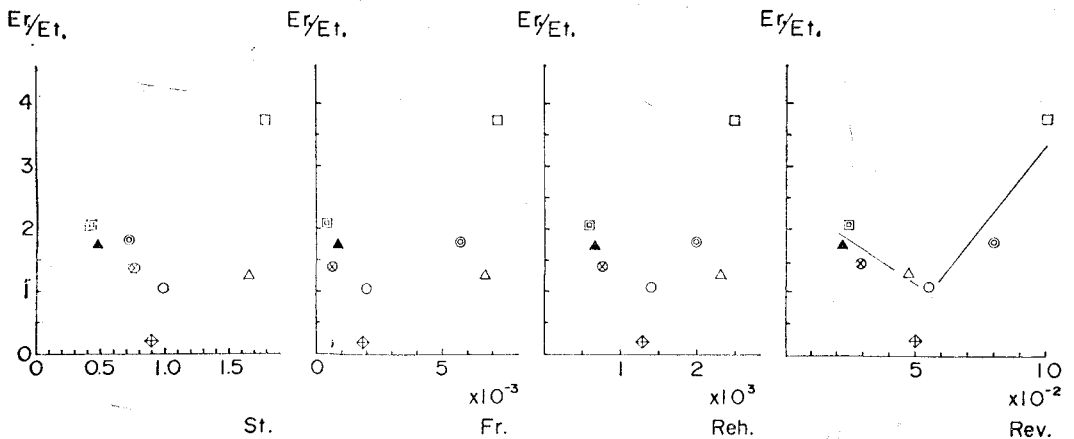


図-4 St , Fr , Re_h , Re_v と Er/Et

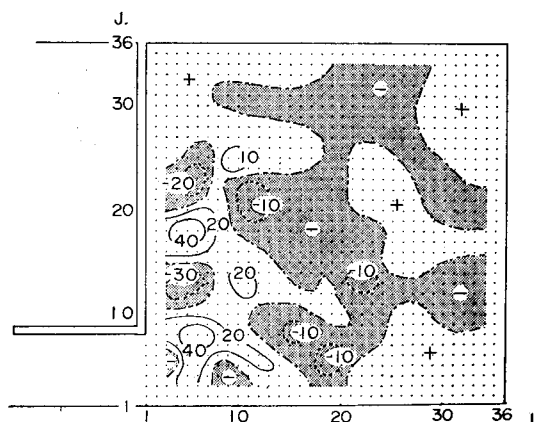
Vorticity Transfer from Tide ($\times 10^{-6} \text{sec}^{-2}$)

図-5 Run 8 の潮流からの渦度輸送項

Phase lag of M2 tidal current

■ : fast sec
 ▨ : late

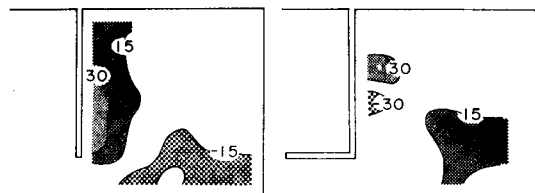


図-6 位相差の分布

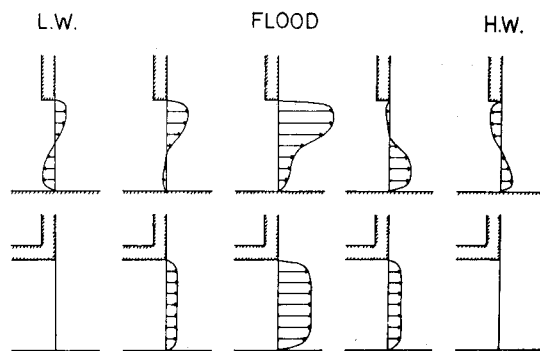


図-7 湾口部の潮流の流況

にもよるが高々数十 cm であり、このため導流堤をつけない場合のように 1 m 以上の厚さで位相の進みが生じるとは考えられない。この位相の進みは潮流自身の非線形性により突堤のまわりに円柱の後流渦域に相当するような伴流領域ができたためにもたらされたと考えられる。

5. あとがき

以上著者らは潮汐残差流に関する基礎的な水理模型実験を行った結果次のことが明らかになった。実験の詳細については別報⁶⁾を参照されたい。

(1)～(3) は前報に述べた。

(4) 与えた潮流に対する潮汐残差流の強さは鉛直レイノルズ数に依っているようである。

(5) 湾口に導流堤を設け潮流による後流渦域を減少させることで潮汐残差流の発生を制御することができる。

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、京都大学大学院理学研究科大西行雄氏、実験に御協力頂いた京都大学防災研究所北川吉男技官、京都大学大学院理学研究科武岡英隆氏に深甚なる謝意を表する次第である。なおデータ処理に際して愛媛大学計算機室の FACOM 230-28 を使用したことを付記する。

参 考 文 献

- 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.
- 松本英二：大阪湾における懸濁粒子の分布，科学，Vol. 45, No. 3, pp. 177～181，1975.
- 柿沼忠男・柳 哲雄：水島からの流出重油の拡がりについて，第23回海岸工学講演会論文集，pp. 213～218，1975.
- 樋口明生・柳 哲雄：潮汐残差流の基礎的研究，第22回海岸工学講演会論文集，pp. 559～563，1976.
- Oonishi, Y.: A numerical study on the tidal residual flow, Journal of the Oceanographical Society of Japan (in press).
- 柳 哲雄・樋口明生：Tidal residual circulation に関する基礎的研究(Ⅲ)，京大防災研年報，19号B，pp. 391～395，1976.