

Tidal Residual Circulation に関する基礎的研究

柳 哲雄・柏井 誠・安田 秀一・
樋口 明生・北川 吉男

FUNDAMENTAL STUDY ON THE TIDAL RESIDUAL CIRCULATION

By *Tetsuo YANAGI, Makoto KASHIWAI, Hideichi YASUDA,*
Haruo HIGUCHI, and Yoshio KITAGAWA

Synopsis

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

The current in the bay flows always in one direction although the strength changes according to the phase. That is, the strong tidal residual circulation occurs. The vorticity calculated with mean constant current in 1×1 m mesh seems to be conserved in the interior region of the bay and dissipate in the boundary region.

1. ま え が き

沿岸海洋においては、一般に潮流により移動する水粒子は、1周期後に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。水粒子の元の位置と、一周期後の位置とを結ぶベクトルは、平均的には、オイラー流に測定した流速の、1周期間の平均値（いわゆる恒流）を、ラグランジェ流に表現したものと考えられる。これを tidal residue, またこれにより生ずる環流を tidal residual circulation と呼ぶ。

一般に恒流というのは、潮流の調和分解の結果求まる、周期性をも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、密度差、地球自転によるもののほか、海岸・海底地形による潮流の片寄りによるものが含まれている。このような恒流あるいは tidal residual current の発生や維持の機構については、ほとんど明らかにされていないが、潮流を含む水理模型においても発生し、これが沿岸海洋における物質の拡がりに重要な役割を果たすことが明らかにされた¹⁾ので、ここでは地形による効果のうち水平的なものに着目し、単純な境界条件（地形）のもとに基礎的な実験を行ない、このような流れの発生・発達・維持の機構を実験的に明らかにしようとした。

まだ十分な結果を得るに至らないが、これまでに得られた結果について述べる。

2. 従 来 の 研 究

沿岸海洋における物質の分布に及ぼす tidal residual circulation の重要性については、最近指摘されたばかりで、従来あまり研究されていない。

杉本・樋口^{2,3)}は、瀬戸内海の小型模型（水平縮尺1/10万、鉛直縮尺1/1000）による実験の結果、Fig. 1のような circulation の存在を認め、連続点源からの染料拡散実験の結果と比較して、強い環流の存在する海域では、弱い海域に比べて拡散係数が1桁程度大きくなることを見出し、内海規模の潮汐混合には tidal resi-

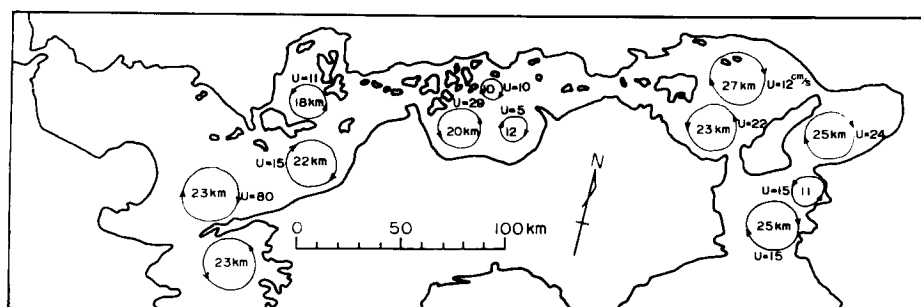


Fig. 1. Tidal residual circulation in Seto Inland Sea (model)

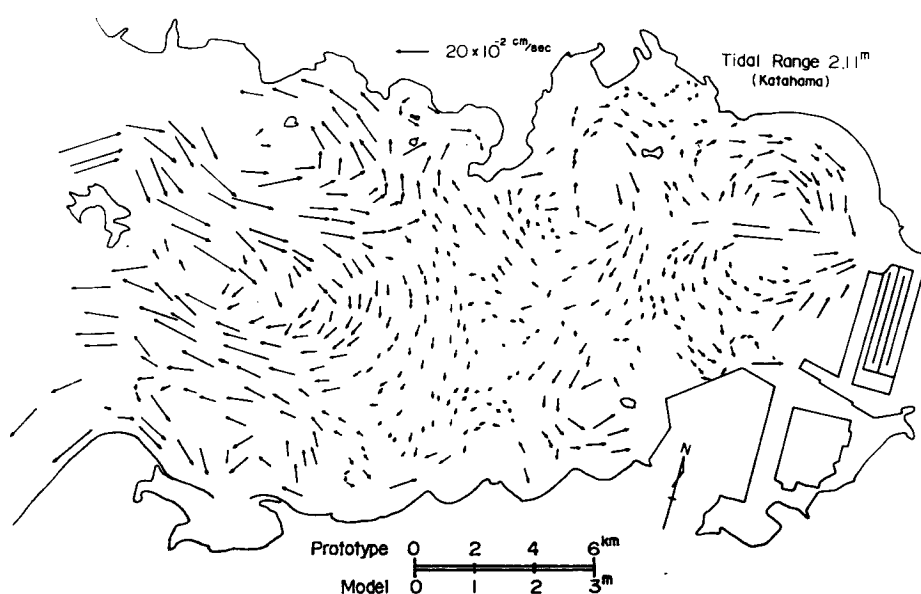


Fig. 2. Tidal residual current in Mikawa Bay (model)

dual circulation が決定的な役割を果たすことを指摘している。

また、樋口・柳・柏井¹⁾は、三河湾の水理模型（水平縮尺 1/2000、鉛直縮尺 1/160）実験の結果、水平的な染料の拡がりの pattern が、Fig. 2 に示すような tidal residual current に支配されていることを見出し、tidal excursion 以上の広範囲にわたる、半日周潮 100 周期程度の長期の拡散現象には、恒流が支配的であると結論している。このような tidal residue の等値線を画くと Fig. 3 のようになる。この図は、干潮からつぎの干潮までの tidal residue を画いたもので、干潮から干潮および満潮から満潮までの両者の平均値を示す Fig. 2 とは多少値が異なっている。図によると、このような tidal residue は、湾の中央部よりもむしろ周辺部の河口付近や岬、島の近く、および海峡部で卓越することがわかる。

一方、現地観測の資料を解析した結果から、山田・矢野⁴⁾は、島や岩礁、湾口が狭く片寄っている湾、流れの激しい狭い水道等で恒流が強くなることを指摘している。

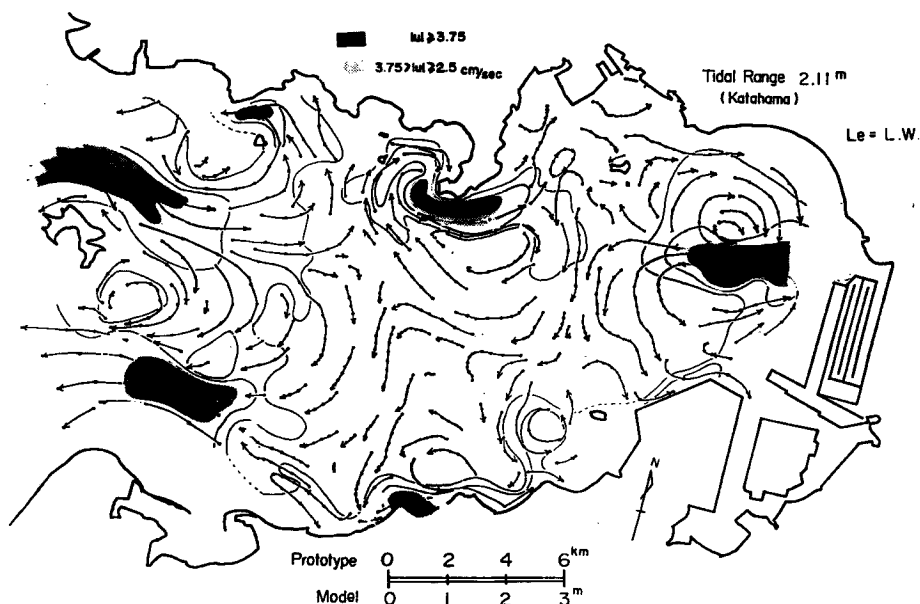


Fig. 3 Tidal residual current in Mikawa Bay, L.W. to L.W. (model)

3. 実験装置

1) 実験水槽

Fig. 4 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もつ 5×5 m、水深 10 cm の、正方形内湾を作って用いた。

2) 起潮機

長さ 5.36 m、幅 0.6 m、高さ 0.4 m のプランジャーを、回転する偏心円板上のピ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起潮機で、周期は 3～30 分、ストロークは 0～40 cm の間で調節できる。

3) 計測装置

水位の時間的变化は、模型と連通管でつながる直径約 3 cm の円筒内の水位を、電気抵抗式の水位計で連続自記録した。

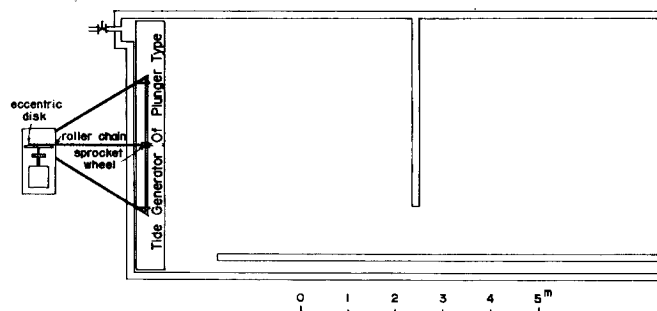


Fig. 4 Model basin

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。なお、染料水を放流して流れの微細構造を調べた。

4. 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 周期の間、水位、流況を調べ、その後染料拡散の実験を行なった。

1) 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、振幅は Fig. 5 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、湾口内側の測点における潮差 (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。

2) 流況

流速分布は浮標追跡により求めたが、湾口における上げ潮最盛時の流況を Fig. 6 に、下げ潮最盛時のそれを Fig. 7 に示す。図中の数字は流速 (単位は cm/sec) を示す。

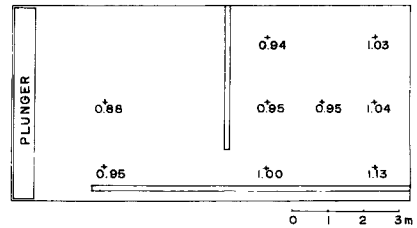


Fig. 5 Normalized tidal range (1.0 corresponding to 8.74 mm)

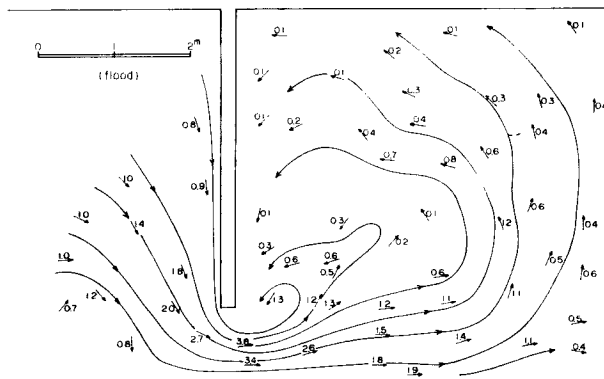


Fig. 6 Flow pattern in the flood (unit: cm/sec)

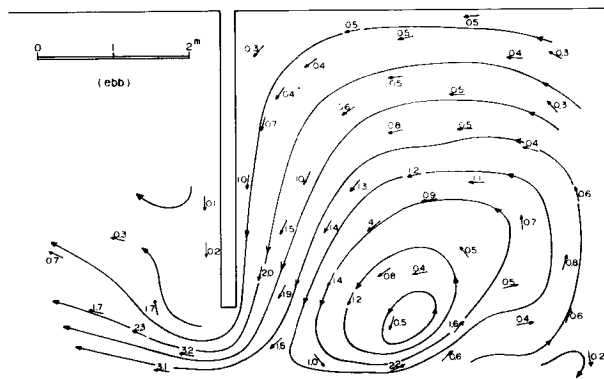


Fig. 7 Flow pattern in the ebb (unit: cm/sec)

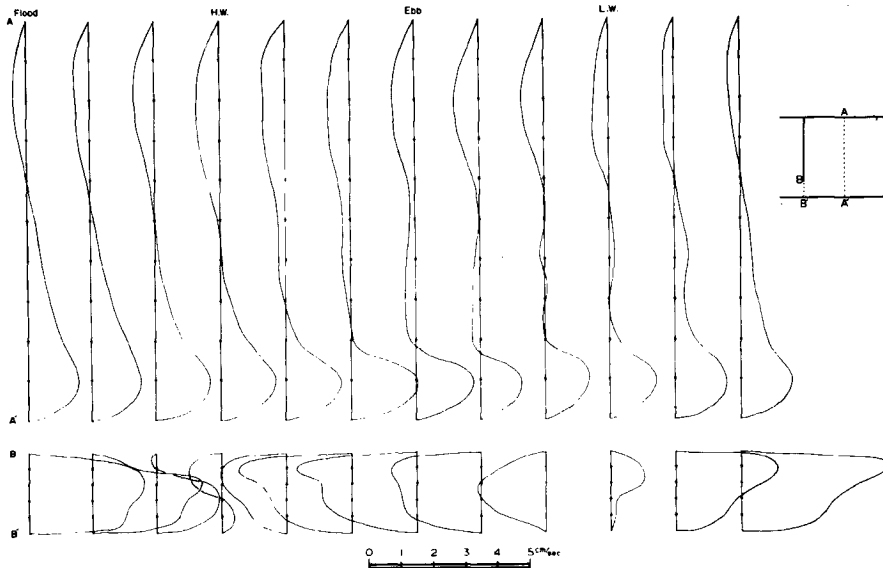


Fig. 8 Time change of the velocity crossing A-A' and B-B'

これらの図によると、湾口では上げ潮時には湾外から湾内に、下げ潮時には湾内から湾外に向かう規則正しい流れが見られるが、湾の内部では常に反時計回りの流れとなり、潮汐の位相に応じて流速の大小は現われるが、常に一方向に流れ、通常考えられるような往復流とはならない。また、環流の中心は、上げ潮時には湾口からまっすぐ流入するため湾口寄りにあり、そこに強い渦が発生する模様がみられる。また、下げ潮時には防波堤に沿う強い流れのため、中心は湾中央寄りになる。流速は、下げ潮時の方が上げ潮時に較べて大きい。

湾外においては、起潮機が存在するためにやや変形しているが、湾内と対称的な流れの pattern を示している。

湾口横断線 (B~B') 上および湾内中央横断線 (A~A') 上で求めた、各位相における流速分布は Fig. 8 のようである。これによると、湾口では干潮から満潮までは上げ潮、満潮から干潮までは下げ潮と規則正しく変化するが、中央線 (A~A') 上では、湾口に近い側 (A' 寄り) では比較的狭い幅の中に、常に奥に向かう強い流れが存在し、それ以外の部分では弱い逆向きの流れが存在することがわかる。流速ゼロの点は位相に応じて移動するが、湾口における下げ潮最盛時頃に、湾奥に向かう流れの幅が最も狭くなり、流速が最大になることは興味深い。

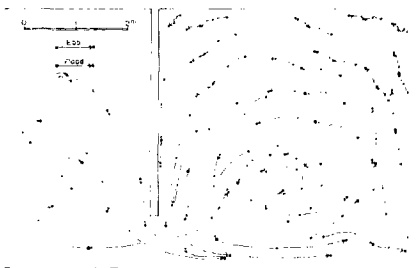


Fig. 9 Tidal locus, H.W. to H.W.

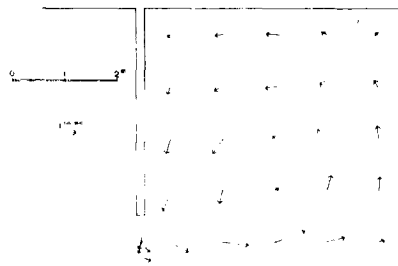


Fig. 10 Constant current

3) 環流

浮標追跡により求めた、満潮からつぎの満潮までの1周期の間の流跡を Fig. 9 に示す。図中●印は、満潮時における浮標の位置、■印は干潮時におけるそれを示す。この両端(●印から●印まで)を結んだものが tidal residue である。この図からもわかるように、湾内では反時計回りの環流が卓越し、通常考えられるような往復流は見られない。

この環流は、起潮機始動直後の上げ潮期に、湾口部の防波堤の内側で、小規模な渦として発生し、時間の経過とともに次第に発達し、5周期程度で湾全域に及ぶ大規模な環流となり、定常状態になる。

湾内を 1 m 間隔の格子に区切り、各格子内における浮標の30秒間の流れベクトルから求めた平均流速の1周期についての平均は Fig. 10 のようになる。図によると、中央線上やや湾口寄りに中心をもつ環流が見られる。流速は湾口寄りで大きい。湾口部では、横断方向に、防波堤先端から対岸に向かう恒流が存在する。

湾奥の中央から連続的に染料水を投入すると Fig. 11 のように拡がる。染料水は、湾内に発生する反時計回りの環流に乗って流れ、投入開始後5周期で湾口を通過して湾外に出ることがわかる。また、染料水は容易に湾の中心部には近づかない。なお、よく見ると角の部分に小さい反流が存在することがわかる。

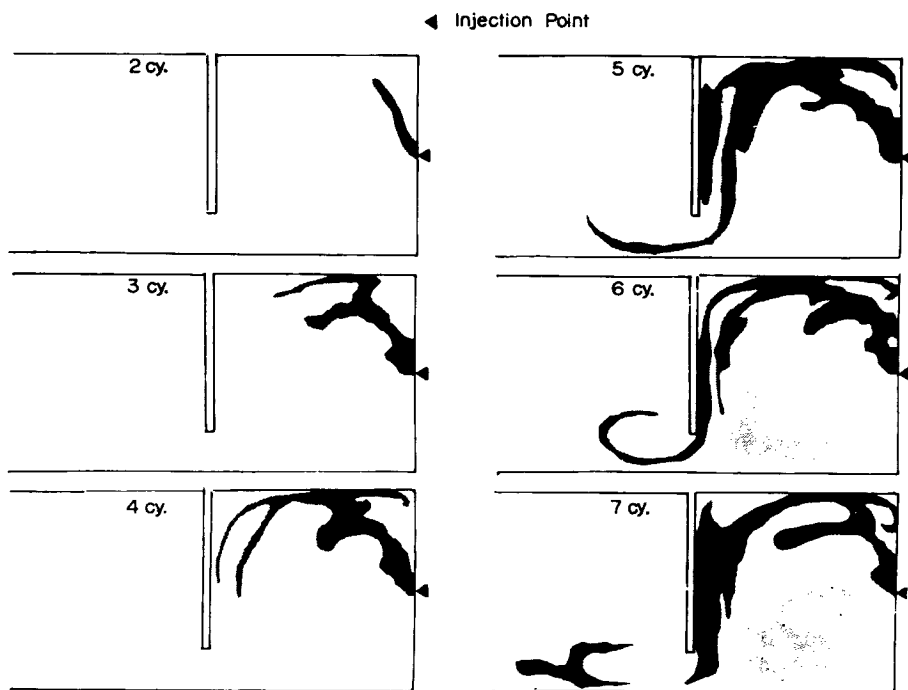


Fig. 11 Sketch of the dyed water continuously discharged

5. 考 察

いま、静水圧分布を仮定し、地球の回転を無視し、1次の抵抗を与えると、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式はつぎのようになる。ただし、ここでは流速の鉛直分布に関する係数は1とする。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -g \frac{\partial h}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - Ru \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= -g \frac{\partial h}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - Rv \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) = 0 \dots\dots\dots (5.2)$$

ここに R は抵抗係数である。

恒流に関する量に一、潮流に関する量に ' をつけ、

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

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。

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial y} + F = \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{\omega}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{\omega}}{\partial y^2} \right) - R\bar{\omega} \dots\dots\dots (5.3)$$

ただし、 ω は渦度を表わし

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

$$F = u' \frac{\partial \omega'}{\partial x} + v' \frac{\partial \omega'}{\partial y} + Q' \omega'$$

$$Q' = \frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y}$$

である。

この式は、潮流の非線型項により発生した渦度が、恒流による移流と、水平・鉛直の粘性逸散と釣合っていることを示している。

湾内を 1 m 間隔の格子で区切り、各格子内の恒流の平均値から、格子点での渦度(反時計回りを正とする)を求めると **Fig. 12** のようになる。図によると、湾の中央部に正の渦度が存在し、下半分に強い渦度が見られる。また、周辺部には負の渦度が存在する。この渦度分布は、内部領域では渦度が保存され、境界領域で逸散していることを示していると考えられるが、詳細な機構については十分吟味するに至っていない。

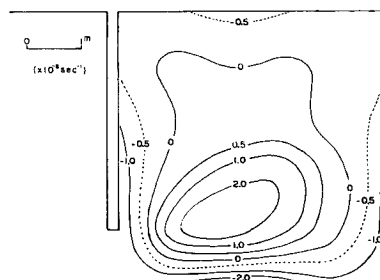


Fig. 12 Vorticity

6. あとがき

以上、著者らは幅 1 m の湾口を持つ 5×5 m (水深 0.1 m) 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、つぎ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、湾内には環流が生じ、常に一方に流れて憩流を見ない。
- 2) 湾の内部領域では、湾口寄りに中心をもつ正の渦度が保存され、境界領域では負の渦度が存在し、ここで逸散されているようである。

今後さらに解析をすすめ、実験資料をもとに渦度方程式の各項の評価を行ない、その機構を明らかにする必要がある。また、現地観測資料と対比して、恒流に関する相似則を明らかにしたい。

参 考 文 献

- 1) 樋口明生・柳 哲雄・柏井 誠：潮流による拡散の水理模型実験について(V)，京都大学防災研究所年

報, 第16号 B, 昭48.4, pp. 619-629.

- 2) 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(I)序報, 京都大学防災研究所年報, 第14号 B, 昭46.4, pp. 435-450.
- 3) 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), 京都大学防災研究所年報, 第15号 B, 昭47.4, pp. 431-440.
- 4) 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, 昭46.3, pp. 63-77.