

水平循環流の渦度分布と運動エネルギー特性

名古屋大学 工学部 正 高木 不折 ○正 和田 清
名古屋大学 工学部 学 富田 孝史 学 北村 浩幸

1. 緒言： 閉鎖的な内湾の湾口部は、地形の急変効果によって湾内に循環流を形成することが多く、この循環流から取り残された形で、汚濁の著しい停滞性水域が存在している。このような循環流域と停滞性水域が共存する湾内流動場の改善や循環流の規模の広域的な流況制御の観点からは、まず第一に湾口境界における流れの状態と循環流の関係を把握することが重要である。本研究では、湾口部で生じる潮汐振動流の水平シア分布が、循環流の形成過程とどのような関係にあるかを理論的に明らかにするとともに、その適用性について実験結果¹⁾から考察したので、その結果の一部を報告する。

2. 潮汐振動流と水平循環流の運動エネルギー： 和田¹⁾は長方形湾の底面傾斜を種々変化させた水理実験を行い、上げ潮および下げ潮最盛時における水平渦度分布から、湾口部における流れの水平シアと湾内に形成される水平循環流(残差環流)の関係を実験的に明らかにした。その結果によると、底面勾配が急になる状態では、湾口部浅水域での最大流速を用いた水平 Reynolds 数の増加につれて、交互に逆回転の水平循環流が形成され、湾奥部の停滞性水域が循環流化される。その水平 Reynolds 数(Re_{max})と湾口部に形成される水平循環流(第1環流)の循環値 Γ_1 の関係を示したのが図-1である。同図から、 Re_{max} の増加とともに第1環流の循環値 Γ_1 が大きくなり、湾内の循環流の個数が増加する傾向にあることがわかる。この水平循環流と湾口部における水平シアの関係を理論的に明らかにするために、湾口部に共通して形成される第1環流に着目して考える。鉛直方向に平均化した水平2次元の渦度方程式は、以下のように表される¹⁾。

$$\frac{\partial \xi_z}{\partial t} = - \left\{ \frac{\partial(u_T \xi_z)}{\partial x} + \frac{\partial(v_T \xi_z)}{\partial y} \right\} + \nu \left(\frac{\partial^2 \xi_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi_z}{\partial y^2} \right) - C_f \xi_z \quad (1)$$

ここで、 x, y ：水平面内の直交座標系、 t ：時間、 u_T, v_T ：潮汐振動流の x, y 方向流速成分、 $\xi_z (= \partial v_T / \partial x - \partial u_T / \partial y)$ ：潮汐振動流の渦度の鉛直成分、 $C_f (= \text{一定})$ ：1次の底面摩擦係数、 ν ：水平動粘性係数である。湾口部に形成される第1環流を一つの閉曲線(面積： A 、曲線長： s)とみなし、その閉曲線について式(1)を面積積分し、Gauss の定理を適用して1周期平均(T ：周期)を考えると、残差環流の循環 Γ' は以下のように表される¹⁾。

$$\Gamma' = \frac{1}{T} \int_0^T \Gamma_T dt = - \frac{\int_0^T \oint_S (u_n \cdot \xi_z) ds \cdot dt}{C_f T} \quad (2)$$

さらに、水平残差環流の流れ場は、渦度をもった循環流を形成するので、マクロ的には残差環流を楕円形の循環流とみなし、その領域内では渦度分布が一様な Kirchhoff の楕円渦(長軸： $2a$ 、短軸： $2b$ 、渦度： ξ_0)と仮定して取り扱えば、その運動エネルギー($K.E.$)_{RC}は以下のように求められる。

$$(K.E.)_{RC} = \frac{\rho H a b}{2} \pi (a^2 + b^2) \left[\frac{1}{4} \left(\frac{\xi_0}{2} \right)^2 \right] = \frac{\rho H (a^2 + b^2)}{32 \pi a b} \Gamma_E^2 \quad (3)$$

ここで、 $\Gamma_E (= a b \pi \xi_0)$ ：楕円渦の循環である。式(2)と式(3)の関係として、 $\Gamma_E = \gamma' \cdot \Gamma' (\gamma'$ ：補正係数)が成立するものとすれば、残差環流の運動エネルギー($K.E.$)_{RC}は、

$$(K.E.)_{RC} = \frac{\rho H (a^2 + b^2)}{32 \pi a b} \cdot \frac{\gamma'^2}{(C_f T)^2} \left[\int_0^T \oint_S (u_n \cdot \xi_z) ds \cdot dt \right]^2 \quad (4)$$

と表される。潮流場の非線形的な特性、すなわち潮汐振動流の水平シアが残差環流生成に寄与する程度を表すパラメータとして、湾口部から供給される潮汐振動流の運動エネルギー($K.E.$)_{TC}とその潮汐振動流の水平シアに起因する水平残差環流の運動エネルギー($K.E.$)_{RC}の比 S_0 を考えて、以下のように定義する。

$$S_c = \frac{(K.E.)_{RC}}{(K.E.)_{TC}} = \frac{\frac{\rho H(a^2+b^2)}{32\pi ab} \cdot \frac{\gamma'^2}{(C_f T)^2} \cdot \left[\int_0^T \oint_S (u_n \cdot \xi_z) ds \cdot dt \right]^2}{\frac{\rho}{2} HW \cdot \int_0^{T/2} u^3 dt} \quad (5)$$

上式は、湾口部に形成される残差環流（第1環流）を一つの閉曲線と考えた場合、その閉曲線上を横切る渦度 flux の分布状態と湾口部に供給される潮汐振動流の平均的な運動エネルギーの関係を示している。さらに、この湾口境界における流速分布を線形分布と仮定し、浅水深 h_1 ($y=0$) および深水深 h_2 ($y=W$) の流速をそれぞれ U_1, U_2 とすれば、式(5)は以下のように表すことができる。

$$S_{c0} = \frac{3(a^2+b^2)}{64ab} \cdot \frac{T}{(C_f T)^2} \cdot \frac{\gamma'^2}{W(h_1+2h_2)} \cdot \frac{\{3U_1(h_1+h_2)-6Q/W\}^2}{U_1(h_2-h_1)+6Q/W} \quad (6)$$

ここで、流量 Q は次のようである。

$$Q = (W/6) \cdot [U_1(2h_1+h_2) + U_2(h_1+2h_2)] \quad (7)$$

実験結果でも述べたように、海底傾斜の存在が湾口部での水平シアーを生成し、その大きさによって急勾配では複数個の水平残差環流が形成された。この残差環流の個数について着目し、式(6)で定義した潮汐振動流の水平シアーが残差環流の生成に寄与する程度を表すパラメーター S_{c0} との関係を示したのが図-2である。ただし、循環値の補正係数 $\gamma' = 1$ 、一次の底面摩擦係数 $C_f = 0.01$ とした。また、一次の底面摩擦係数 C_f によって S_{c0} は変化するので、 S_{c0} の絶対値は議論できないが、同図より明らかに、水平循環流の個数がパラメーター S_{c0} によって分類でき、湾口部における潮汐振動流の水平シアーの大きさに関するパラメーター S_{c0} が水平残差環流の個数を支配している。このことから、湾口境界における潮汐振動流の水平シアー（寄った運動エネルギーの分布）は、まず湾口部付近に形成される第1環流を維持するための運動エネルギーとして消費され、それよりも過剰な運動エネルギーの供給がある場合には、第1環流自身の循環流を強めるとともにそれに隣接する第2の残差環流を生成するために消費される。さらにそれ以上の運動エネルギーの供給があると、新たに湾奥部の第3の残差環流を生成し、湾全域に発達する安定した3個の水平残差環流を形成するものと考えられる。以上より、パラメーター S_{c0} は、水平循環流の個数およびそれが安定化する程度を表す指標であり、循環流安定数 (Circulation Stability Number) と呼称する。

3. 結 言 以上、湾口部における水平シアーの分布と水平循環流の関係を表す循環流安定数 S_{c0} を新たに提案したが、今後底面摩擦係数 C_f の評価を含めた定量的な評価を行う予定である。

(参考文献) 1) 和田 清: 名古屋大学博士論文, p.154, 1989.2(印刷中)。

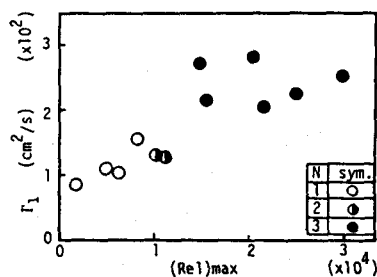


図-1 水平Reynolds数と第1環流の循環値

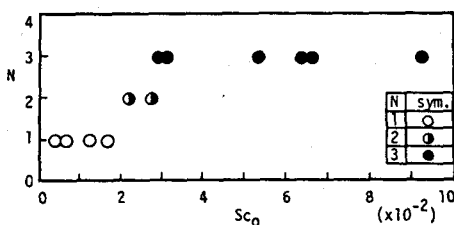


図-2 循環流安定数と水平循環流の個数