

九州大学応用力学研究所 学生員 〇 松永 信博
正員 金子 新

1. はじめに 作業流体として水を用い、微小振動条件のもとで波型底面上に形成される定常二次流れについては、すでに一部を前回で報告している¹⁾。本報では、作業流体としてグリセリンと水の混合液を用い、同様付振動条件のもとで流体の粘度を種々変えることにより形成される定常二次流れのパターンの変化を観察した²⁾。さらに、数値計算により二次流れの解析も行なった。

2. 実験

[水槽] テスト・セクションの長さ 60 cm, 断面積 15×15 cm の U 字型振動流水槽を用いた。この水槽は、可視化のために透明なアクリル板で作られており、振動条件は $d_0=11\text{ cm}$, $f=2.57\text{ Hz}$ まで変えることが可能である。

[実験方法] テスト・セクションの底面に、 $\alpha=1/7$ の模型波面 ($\lambda=4.3\text{ cm}$, $2\alpha=0.6\text{ cm}$) を取り付け、作業流体としてグリセリンと水の混合液を用い、ピストンによりこれを往復運動させることにより波面上に形成される定常二次流れを観察した。流れの可視化手法として、テスト・セクション正面から平行光線を当て、背後の水路側面に貼られた画面上に映る流れ模様を写真撮影するという直接投影法を用いた。

[結果] 写真 1 は $M=70$, $\eta/\delta=0.5$ のときに形成された定常二次流れを撮影したものである。このとき、二次流れは一層構造で、渦の回転の向きは波面を登る向きである。写真 2 は、作業流体の粘度を次第に落とし M の値を増加させ、二次流れが二層構造に変化したときの流れ模様を撮影したものである。第一層目の渦は峰で対をなし、波面を登る向きに回転している。写真 3 は、作業流体として水を用い、アルミ粉末法で二次流れを可視化したものである。このように M の値が非常に大きくなると第一層目の波面を登る向きに回転する渦は認められなくなる。第二層目の渦は、写真 1, 2 と同様に谷で対をなしている。(写真 3 についての実験は文献 1) 参照)

3. 解析 (i) 波型底面上の流れは二次元粘性流、(ii) 流体の振動幅は波長に比べて十分小さく ($\epsilon=d_0/\lambda \ll 1$) という仮定のもとで解析する。デカルト座標系 (x, y) を用いた渦度方程式は $\partial^2(\psi/\delta)/\partial x^2 - \partial^2(\psi/\delta)/\partial y^2 = 2\omega/\delta$ と与えられ、これを次のような直交曲線座標系 (ξ, η) に変換する。

$$\xi = \xi_0 - \alpha \exp(-k\eta) \sin k\xi_0, \quad \eta = \eta_0 + \alpha \exp(-k\eta) \cos k\xi_0 \quad (1)$$

さらに次のように無次元化する。

$$t = \omega \tilde{t}, \quad \xi = \xi_0/\lambda, \quad \eta = \eta_0/\delta, \quad \psi = \tilde{\psi}/U_0 \delta \quad (2)$$

次に差分法による数値計算の都合上 $\psi = \eta \cos t - \tilde{\psi}$ と変換し $\Omega = J \nabla^2 \psi \dots (3)$ とおけば運動方程式と境界条件は、それぞれ (4), (5) 式となる。

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} + \epsilon \left[\frac{\partial \psi}{\partial \xi} \frac{\partial \Omega}{\partial \eta} + (\cos t - \frac{\partial \psi}{\partial \eta}) \frac{\partial \Omega}{\partial \xi} \right] = \nabla^2 \Omega \quad (4)$$

$$\text{ただし } \nabla^2 = \frac{1}{M^2} \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2}{\partial \eta^2}, \quad J = \frac{1}{1 - 4\pi\alpha e^{-k\eta} \cos 2k\xi_0 + (2\pi\alpha)^2 e^{-2k\eta}}$$

$$\eta = 0 \quad \psi = 0, \quad \frac{\partial \psi}{\partial \eta} = \cos t, \quad \eta \rightarrow \infty \quad \psi = \frac{\partial \psi}{\partial \eta} = 0 \quad (5)$$

流れ関数 ψ を微小パラメータ ϵ で次のように振動展開し、 ψ_0 に含まれる定常成分を求める。

$$\psi = \psi_0 + \epsilon \psi_1 + \epsilon^2 \psi_2 + \dots \quad (6)$$

図 1, 2, 3 に実験条件とほぼ同じ条件における解析結果を示す。 $\xi_0=0.0, 1.0$ は波面の峰を示し、 $\xi_0=0.5$ は谷を示す。特に、写真 3 に示した実験においては、 δ が非常に小さく、差分間隔をそれ以下にしたり解析することは計算機の

容量の制限上困難である。そこで 図3は さらに縦座標を $\log \eta$ に変換し境界層内を拡大することにより、計算上の結果である。

4. 考 察

波型底面上に形成される定常二次流れを解析した結果、渦のパターン変化および渦の中心位置、スケールなど実験結果とよく一致した。 $M=85$, $\alpha/\delta=6.07$ の時、実験では第一層目の渦を認めることはできなかったが、解析結果によると波面上3mm程度の厚さ内に第一層目の渦が存在していると思われる。

5. おわりに

本研究において、直接、実験を支援して下さった文部技官白石洋二氏に感謝致します。

《参考文献》 1) 松永信博: "波型底面上の二次流れの構造" 第33回土木学会概要集 第2部 1978

2) 日野幹雄 藤崎奇治男: "波型底面上の粘性振動流" 第22回海岸講演会論文集 1975 pp35-40

《表記》 $\omega = 2\pi f$: 流体の角振動数 (rad/sec), ν : 動粘性係数 (cm^2/sec), U_{∞} : 最大流速 (cm/sec)

$\delta = \sqrt{2\nu/\omega}$: 振動境界層厚さ (cm), d_0 : 流体の振動幅 (cm), $\lambda = 2\pi/c$: 波面の波長 (cm)

2α : 波面の波高 (cm), $M = \lambda/\delta$, $a = 2\alpha/\lambda$, $\epsilon = d_0/\lambda$

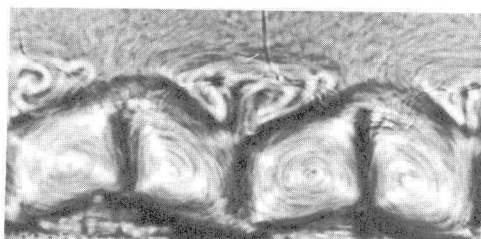


写真 1

作業流体: グリセリン+水, $\nu = 1.11 \text{ cm}^2/\text{sec}$, $f = 0.96 \text{ Hz}$
 $d_0 = 1.0 \text{ cm}$, $\delta = 0.60 \text{ cm}$, $M = 7.0$, $\alpha/\delta = 0.5$

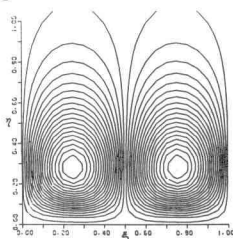


図 1

$M = 7.0$, $\alpha/\delta = 0.5$

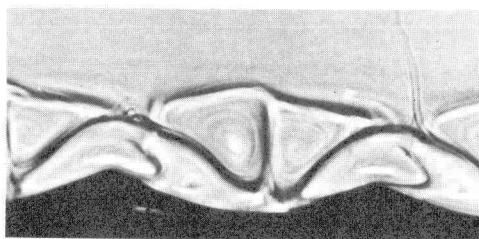


写真 2

作業流体: グリセリン+水, $\nu = 0.10 \text{ cm}^2/\text{sec}$, $f = 0.96 \text{ Hz}$
 $d_0 = 1.0 \text{ cm}$, $\delta = 0.18 \text{ cm}$, $M = 24.0$, $\alpha/\delta = 1.67$

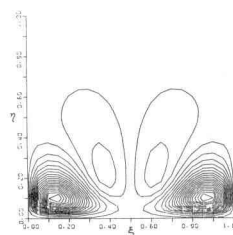


図 2

$M = 30.0$, $\alpha/\delta = 2.14$

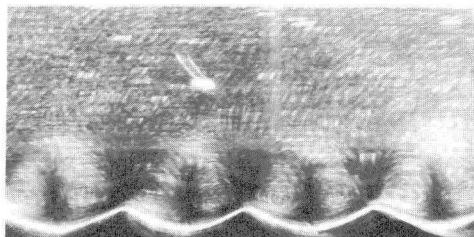


写真 3

作業流体: 水, $\nu = 0.013 \text{ cm}^2/\text{sec}$, $f = 1.65 \text{ Hz}$
 $d_0 = 0.6 \text{ cm}$, $\delta = 0.050 \text{ cm}$, $M = 85.0$, $\alpha/\delta = 6.07$

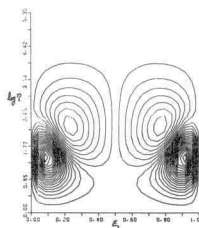


図 3

$M = 100.0$, $\alpha/\delta = 7.14$