

規則界面波を伴った密度二層流

九州大学工学部 学生員 ○古賀 俊行

九州大学工学部 学生員 並川 正

九州大学工学部 正員 橋 東一郎

九州大学工学部 正員 松永 信博

1. まえがき

二層流において形成される界面変動は一般に不規則で三次元的であり、せん断流による乱れと界面変動によって誘起された流速変動とが複雑に絡み合っているため、界面付近の流速変動に及ぼす界面変動の効果を直接的に明らかにすることは困難である。従って、本研究では上層流による界面変動がほとんど発生していない状態のもとで、界面に人工的に発生させた単一周期の二次元界面波と、それにより誘起された流速変動との関係について述べる。

2. 実験方法および実験条件

長さ5.0m、高さ0.40m、幅0.15mの両面アクリル製の水路において、静止した塩水(密度 β)の上に淡水(密度 α)を流して二層密度流を作り、水路上流側の界面位置に設置した逆波板により二次元規則界面波を下流方向に伝播させた。ここで便宜上、水路の上流側のガイド板下流端より流下方向に x 軸を、平均界面位置から鉛直上向きに z 軸をとることにする。実験は、まず、ベンレコーダーに濃度変動時系列を出力させて平均界面位置を流下方向に求め、界面勾配を算定し、さらに、界面勾配が一定である範囲のほぼ中央で流速、濃度、界面波の同時測定を行った。実験条件は、上層断面平均流速(U_m)、上層水深(h_1)、有効浮力($Eg: E=(\beta-\alpha)/\beta$)、フルード数(Fr)、レイノルズ数(Re)の流流の特性量が、 $U_m=5.46\sim 7.71$ 、 $h_1=8.24\sim 9.80$ 、 $Eg=29.08\sim 42.78$ 、 $Fr=0.318\sim 0.443$ 、 $Re=5300\sim 7720$ であり、界面波の振動数(f_w)、波長(L)、振幅(a)、波速(C)の界面波特性量は、 $f_w=0.382\sim 0.506$ 、 $L=17.6\sim 26.1$ 、 $a=0.316\sim 0.427$ 、 $C=7.79\sim 12.1$ であった。単位系は $cm\cdot sec$ である。実験方法ならびに実験条件に関する詳記は、文献1)を参照されたい。

3. 実験結果および考察

(1) 統計諸量の定義

界面変位 η と x 方向及び z 方向の流速成分 u, v は次のように分解できる。

$$\eta = \bar{\eta} + \eta', \quad u = \bar{u} + \tilde{u} + u', \quad v = \bar{v} + \tilde{v}$$

ここで、 $\bar{\cdot}$ は時間平均量を、 $\tilde{\cdot}$ は逆波された二次元界面波による周期的変動量を、 $\cdot'$ は乱れを意味している。 $\tilde{\eta} = a \sin(kx - \omega t)$ の界面波により誘起される周期的流速変動は、

$$\tilde{u} = |\tilde{u}| \sin(kx - \omega t + \theta_u) \quad \tilde{v} = |\tilde{v}| \sin(kx - \omega t + \theta_v) \quad (k=2\pi/L, \omega=2\pi f_w)$$

で表わされると仮定し、 θ_u, θ_v により界面波との位相差を定義する。

今、二層流ポテンシャル理論²⁾において平均流速分布が $U(z) = U_i + \alpha z$ であるような二層流作場の界面に $\eta = a \sin(kx - \omega t)$ の周期的界面波が発生した時の流れ関数は、深さ z を考慮して次のようになる。ここで U_i は界面平均流速で、 α は速度勾配である。

$$\Psi_z = a(C - U_i)e^{kz} \sin(kx - \omega t) \quad (+: \text{下層} \quad -: \text{上層})$$

よって、この時の周期的流速変動は、上層で、

$$u = \partial \Psi / \partial z = ak(C - U_i)e^{kz} \sin(kx - \omega t - 180^\circ)$$

$$v = -\partial \Psi / \partial x = ak(C - U_i)e^{kz} \sin(kx - \omega t - 90^\circ)$$

下層で、

$$u = \partial \Psi / \partial z = ak(C - U_i)e^{kz} \sin(kx - \omega t)$$

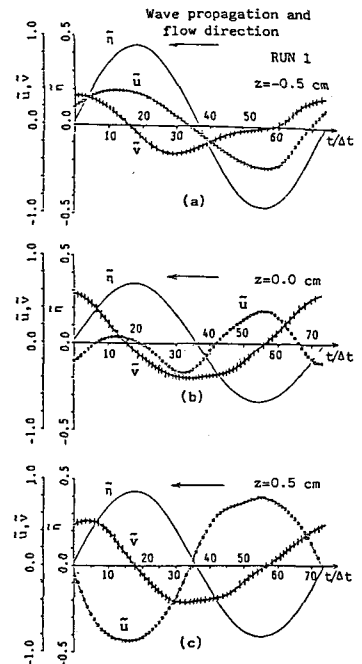


図-1 $\tilde{u}, \tilde{v}$ の分布

$$v = -2\epsilon \cdot \partial x = a k (c - \bar{u}_i) e^{kz} \sin(kx - \omega t - 90^\circ)$$

 となり、 $\theta_{\bar{u}}$ は上層で -180° 、下層で 0° 、 $\theta_{\bar{v}}$ は上下層を通じて -90° である。

(2) 位相平均諸量

図-1(a)(b)(c)は各々、 $z = -0.5\text{cm}, 0.0\text{cm}, 0.5\text{cm}$ における $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ のパターン変化を示したものである。 $\bar{u}$ について、流速計が下層流体中にある時は(a)のパターンで $\theta_{\bar{u}} \approx 0^\circ$ となり、流速計が上層流体中にある時は(c)のパターンで $\theta_{\bar{u}} \approx 180^\circ$ となることがわかる。さらに $\bar{v}$

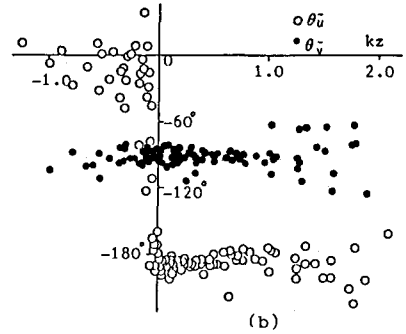
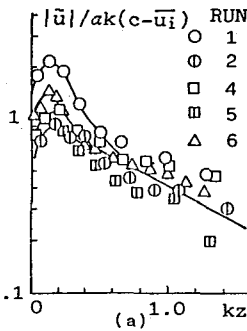


図-2 $|\bar{u}|/ak(c-\bar{u}_i)$ 、 $\theta_{\bar{u}}$ 、 $\theta_{\bar{v}}$ の kz 依存性

については上下層を通じて $\theta_{\bar{v}} \approx -90^\circ$ であることがわかる。また(b)のように、流速計が平均界面位置にある時は、流速計が上層流体と下層流体に交互に入るため、上層流体中にある時は $\bar{u}$ は(c)のパターン、下層流体中にある時は(a)のパターンとなるが、 $\bar{v}$ にはその影響が見られない。

図-2(a)(b)は各々、 $|\bar{u}|/ak(c-\bar{u}_i)$ 、及び $\theta_{\bar{u}}$ 、 $\theta_{\bar{v}}$ の kz 依存性を示したものである。ここで、 $\theta_{\bar{u}}$ 、 $\theta_{\bar{v}}$ は $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ と $\bar{v}$ のクロス・スペクトルの位相角より求めたものである。(a)より、振幅 $|\bar{u}|$ は、ほぼ e^{-kz} に比例して減少しているが、界面近傍において振動境界層の影響により e^{-kz} からずれている。振幅 $|\bar{v}|$ についても、同様の結果が得られたが、振動境界層の影響は $|\bar{v}|$ ほど顕著でない。また、(b)によれば位相差 $\theta_{\bar{u}}$ は、 $kz < 0$ で 0° を、 $kz > 0$ で -180° をとり、 $\theta_{\bar{v}}$ については、 $-1.0 < kz < 1.0$ でほぼ -90° となることがわかる。本実験において $c > u_i$ であることを考慮すれば、前述の二層流ポテンシャル理論と矛盾しない。しかしながら、界面近傍では振動境界層の存在のため $\theta_{\bar{u}}$ は、 0° から -180° へなめらかに移行する。

(3) 流速変動と界面変動の相互相関係数

図-3(a)(b)(c)(d)は、流速変動と界面変動の相互相関係数の鉛直分布を示したものである。(a)より、 $\bar{u}\bar{\eta}/\sqrt{\overline{u'^2}\overline{\eta'^2}}$ はほぼ $0 < kz < 1.2$ で -1.0 、 $-1.0 < kz < 0$ で 1.0 の値をとり、さらに(b)より $\bar{v}\bar{\eta}/\sqrt{\overline{v'^2}\overline{\eta'^2}}$ はほぼ、 $-0.2 < kz < 1.0$ において 1.0 の値をとっていることより、これらの範囲内においては界面変動の影響がほとんど瞬時的に上下層に伝播していることがわかる。また、これらの相互相関係数の、 $kz > 0$ 及び $kz < 0$ における符号は、二層流ポテンシャル理論で説明でき、さらに(a)において界面近傍で負値から正値へとなめらかに移行することは、振動境界層のためである。また(c)(d)については、流速変動に乱れの影響が入っているため、(a)(b)に比べ、狭形配(α/L)が小さいほど、その絶対値が小さくなり、界面から離れた位置での相関の減少の度合は大きくなっていることがわかる。

〈参考文献〉 1) 松永、椿、並川、古賀：第29回水理講演会論文集、1985
 2) 浜田、加藤：『二層流と波』、第9回海岸工学講演会講演集、1962

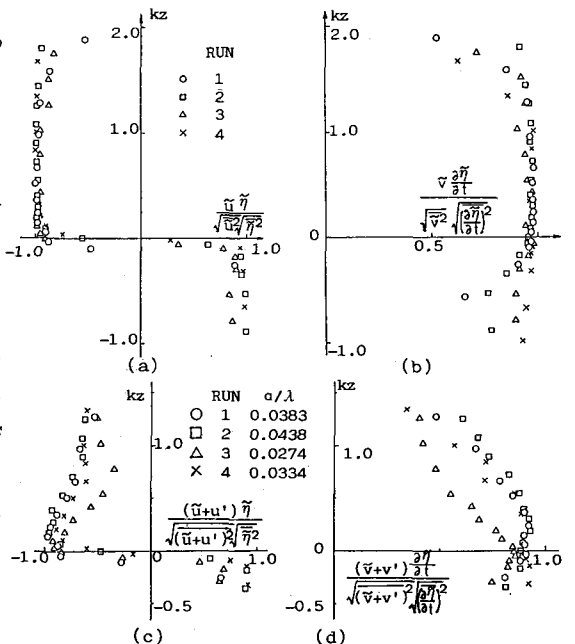


図-3 流速変動と界面変動の相互相関係数の鉛直分布