

二層流における界面波と乱れとの関係

九州大学大学院 学生員 ○並川 正
九州大学工学部 正員 松永 信博
九州大学工学部 正員 小松 利光
九州大学大学院 学生員 古賀 俊行

1. まえがき

一般にかなり発達した密度二層流においては、界面変動および界面変動によって引き起こされる流速変動、主流のせん断によって生ずる乱れと3つの要素が複雑に絡み合っており、しかも界面変動は不規則かつ三次元的なものであるために、これら諸量間の関係を明らかにすることは非常に困難である。しかしそれが可能となるならば、連行現象の解明や乱れの特性の評価に多大な寄与をなすものと思われる。

著者らは前報¹⁾で、上層流において規則的な二次元界面波を人工的に発生させ、せん断流によって生ずる乱れと界面変動によって生ずる流速変動について調べた。しかしながら、この実験では流速が平均流速よりも大きいため、平均流速と流速とが一致する層つまり臨界面層が現れず、せん断流によって界面波が自然に形成されるような二成層流体場とはかなり異なつたものであった。従つて今回は、上層せん断流によって二層流体場の上流付近に比較的規則的な界面波が生じているのに着目して、その位置での流速・濃度・界面変動の同時測定を行い、界面波とそれによって引き起こされる流速変動との関係について考察を行ったので報告する。

2. 実験方法及び実験条件

実験水路として、長さ5.0m、高さ0.40m、幅0.15mの両面アクリル製の水路を用いた。静止した塩水(平均密度 ρ_2)の上に淡水(平均密度 ρ_1)を一定流量流すことにより上層密度流を作った。流体場が定常状態を保つように一定量の塩水を常時補給している。実験方法としてまず濃度変動の時系列をペン・レコーダーに出力させ、平均密度 ρ が $(\rho_1 + \rho_2)/2$ となる位置で定義されている平均界面位置が一定となるのを確認した後、比較的規則的な界面波が明確にあらわれている区間でなるべく下流側へ選が($x = 0.4\text{m}$)、液高、流速、濃度の同一点同時測定を行った。ここでX軸を水路上流端の塩水と淡水がはじめて交わる点から水平流下方向にとり、Z軸を平均界面位置から鉛直上方にとっている。表-1に実験条件を示す。 $U_m, h_1, g, u_w, f_w, L, \alpha, C$ はそれぞれ上層断面平均流速、上層水深、重力加速度、界面に作用する摩擦速度、界面波の卓越周波数、液長、振幅および流速である。その他の諸量は $\delta_x = u_w/(dU/dz)_{z=0}$, $\delta_m = U_m/(dU/dz)_{z=0}$, $\varepsilon = (\rho_2 - \rho_1)/\rho_2$, $Fr = \sqrt{U_m^2/egh_1}$, $Ri = \varepsilon g \delta_x^2 / u_w^2 \delta \rho$, $\delta \rho = (\rho_2 - \rho_1)/(dp/dz)_{z=0}$ で定義している。

表-1 実験条件および特性量 (cm-s単位系)

RUN	Flow Properties								Wave Properties				
	U _s	h ₁	εg	U _w	δ _z	δ _m	Fr	Ri	f _w	L	α	C	Z _{c1}
1	5.16	7.0	7.77	.182	.0403	1.05	.700	.762	.649	7.74	.127	5.03	1.0
2	5.38	7.5	5.45	.205	.0522	1.35	.842	.543	.516	9.88	.150	5.10	1.3
3	3.36	7.3	5.08	.164	.0573	1.15	.551	.126	.613	4.99	.154	3.06	1.3
4	4.92	7.8	4.74	.313	.0735	1.65	.808	.349	.627	7.46	.204	4.67	1.2
5	4.96	10.2	6.56	.209	.0871	2.00	.628	1.628	.484	8.55	.248	4.14	1.9

3. 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。

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

ここで $\bar{}$ は時間平均量、 η' は卓越した界面変動に関連する量、 η' はせん断によって生ずる乱れを意味している。また、 $\langle \rangle$ を $\bar{\eta}$ の位相に基づいたアンサンブル平均を意味するものとする。

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

とあらわすことができる。そして、 $\langle \eta \rangle$ を $\langle \bar{\eta} \rangle = \alpha \sin(kx - \omega t)$ とあらわしたときに、 $\langle u' \rangle, \langle v' \rangle$ は

$$\langle u' \rangle = |\bar{u}| \sin(kx - \omega t + \theta u), \quad \langle v' \rangle = |\bar{v}| \sin(kx - \omega t + \theta v)$$

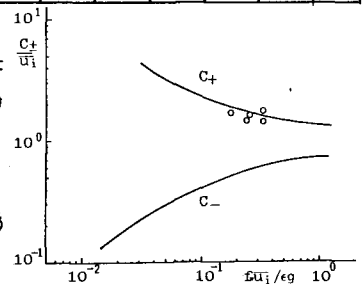


図-1 流速と周波数との関係

であらわされると仮定し、絶対値 $|u|, |v|$ と $\langle \eta \rangle$ との位相差 $\theta u, \theta v$ を定義する。ここで、 $k = 2\pi/L$, $\omega = 2\pi f_w$ である。

4. 実験結果及び考察

1) 界面変動の特性 図-1に界面波の波速 C を f_w に対してプロットしたものを示す。図中の実線は上層と下層がそれぞれ一様な速度勾配を持っている流れによつて誘起される界面深水波の波速と周波数との関係

$$\frac{C}{\bar{u}_i} = \left(1 + \frac{1}{8\pi} \frac{Eg}{f_w \bar{u}_i}\right) \pm \sqrt{\frac{1}{8\pi} \frac{Eg}{f_w \bar{u}_i} \left(2 + \frac{1}{8\pi} \frac{Eg}{f_w \bar{u}_i}\right)}$$

を示している。ここで $\bar{u}_i$ は界面における平均流速をあらわす。著者らは C_+ の波速をもった波を S・P 波、 C_- の波を L・P 波と名づけているが、図よりこの実験において生じている界面波は S・P 波であることがわかる。また、界面変動のスペクトル形によると、上流側では卓越した L・P 波はほとんど形成されていない。

図-2 は η の周期 $1/f_w$ と臨界面付近における代表的時間スケール $1/(dU/dz)_{z=z_{cr}}$ との関係を示したものである。明らかに $1/f_w \propto 1/(dU/dz)_{z=z_{cr}}$ であり、規則界面波の周期が臨界面での平均流速勾配の代表的時間スケールと密接な関係があることがわかる。

臨界面の位置 z_{cr} は浦らによつても示されているように、界面境界層厚さ δ_m とほぼ同じオーダーをもち、 $z_{cr} = 0.94 \delta_m$ で与えられる。規則的界面波の周期が臨界面における平均速度勾配と密接な関係があり、臨界面の位置が界面境界層厚さに一致していること等を考慮して a/δ_m を Ri に対してプロットしたものを図-3に示す。規則界面波の振幅は界面近傍の特性量に依存せず、界面境界層厚さの約 0.12 倍であることがわかる。

2) 界面変動に関連した流速変動成分の特性 波によつて引き起こされる流速変動の絶対値 $|u|, |v|$ の鉛直分布を図-4(a), (b)に示す。 $|u|$ はかなりばらつきが見られるが、ほぼ e^{-kz} の割合で減衰している。一方、 $|v|$ の方は臨界面の影響を受けて z_{cr} において極大値をとった後、 $|u|$ と同様に e^{-kz} の割合で減衰する。このことから、 $|u|, |v|$ はともに波動によつて誘起された変動であることが示唆され、臨界面における $|v|$ のエネルギーの輸送は $|u|$ の波動の特性を崩さないことがわかる。

図-5は位相平均量 $\langle \eta \rangle$ の分布から推定した臨界面における流れのパターンを示したものである。今回の実験結果に基づいて、cat's eye pattern の中心位置が界面波の谷より後方 0.15L にあり、その厚さ及び臨界面の平均高さはともに約 0.98 δ_m であることがわかった。

<参考文献>

- 1) 古賀・並川・植・松永
西部支部講演会報告集('85)
- 2) 並川・松永・小松・古賀
第30回水理講演会(1986)
- 3) Ura, et al., J.H.H.E
vol.2, No.1 (1984)

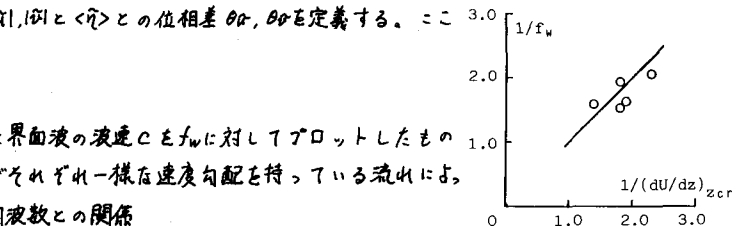


図-2 周期と時間スケール

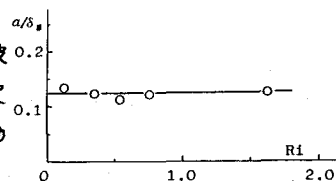


図-3 a/δ_m と Ri との関係

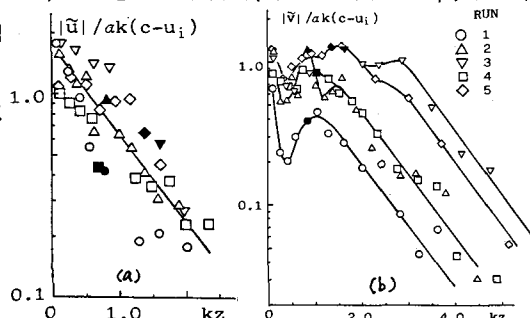


図-4 波による流速変動の鉛直分布 (黒印は臨界面)

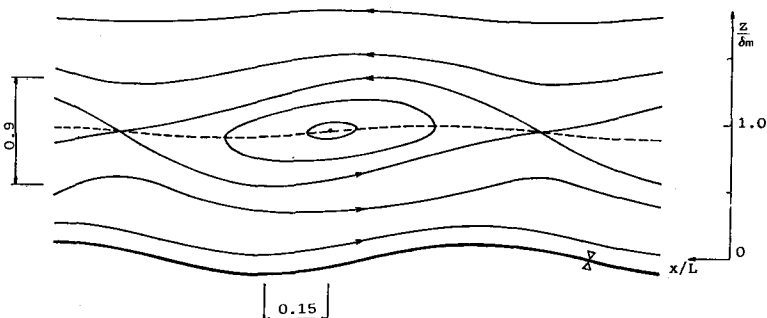


図-5 規則界面上の平均的 cat's eye flow pattern