

二層密度流におよぼす規則界面波の効果 Effects of a Regular Interfacial Waves on Two-Layered Density Flow

九州大学工学部 正員 松 永 信 博
九州大学工学部 正員 椿 東 一 郎
九州大学大学院 学生員 並 川 正
九州大学大学院 学生員 古 賀 俊 行

1. まえがき

二層密度流における流速や流速変動および界面変動の特性に関する定性的あるいは定量的研究が盛んに行われている。^{1) 2) 3) 4)} 著者らは⁵⁾ 上層流におけるそれら諸特性を界面摩擦速度と界面リチャードソン数を導入することにより統一的に説明した。しかしながら、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、さらにせん断流によって誘起された乱れと界面変動によって誘起された流速変動とが絡みあっているため、界面近傍の平均流速や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って界面変動がほとんど発生していない状態のもとで界面を人工的に振動させ、単一周期の二次元界面波を伝播させる実験を行い、流速、濃度、界面変動の同時測定結果に基づいて規則界面波が流れや流速変動に及ぼす効果を調べた。

2. 実験方法および実験条件

図-1に実験装置の模式図を示す。水路の長さ、高さ、幅はそれぞれ5.0m、0.40m、0.15mで、テスト・セクションの長さは2.5mであった。静止した塩水(密度 ρ_2)の上に淡水(密度 ρ_1)を流すことにより二層密度流を作った。淡水の流量として、せん断流によって界面変動が発生しない範囲内でできる限り大きな流量を選んだ。このように流速が制限されていることから、レイノルズ数の十分大きな実験を行うためには、上下層流体の密度差をかなり大きくする必要があり、相対密度差 $\epsilon = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_2$ の値は0.0297~0.0437の範囲で行った。ガイド板先端より5cm下流側の界面位置に取り付けた造波板を上下に振動させることにより、二次元規則界面波を下流方向に伝播させた。界面は密度が $(\rho_1 + \rho_2) / 2$ となる位置として定義されている。二成層場は、平均界面位置が一定となるように塩水を常時補給することにより定常状態に保たれた。

流速測定には、日本科学工業社製X型2方向ホットフィルム流速計を、密度の測定には4電極電導度式塩分濃度計を用いた。ほぼ同

一点における流速変動と濃度変動を測定するため流速計に濃度計を固定し、さらに鉛直方向の分布が得られるように流速計をポイント・ゲージに取り付けた。界面波の測定には抵抗線式波高計を用い、流速計および濃度計と同一鉛直面内にあるように波高計をセットした。ここで便宜上、ガイド板の下流端から流下方向にx軸を、平均界面位置から

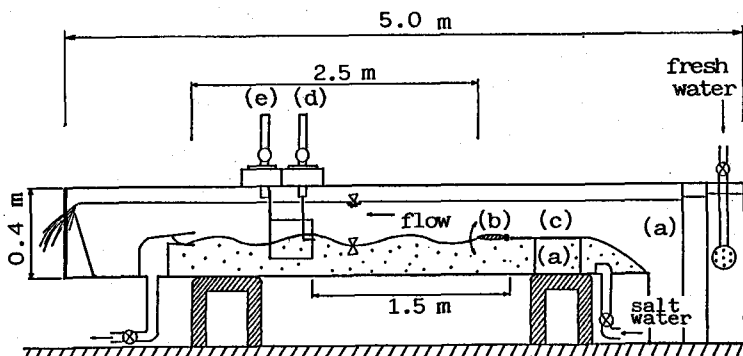


図-1 実験装置の概要

(a) 整流板, (b) 造波板, (c) ガイド板,
(d) 流速計と濃度計, (e) 波高計。

鉛直上向きに z 軸をとることに
する。

実験は次の要領で行われた。
二成層流体場が定常状態に達し
た後、濃度計からの信号をペン
レコーダーに出力させることに
より、流下方向に 0.25 m の間
隔で界面位置を決定し、界面勾
配を算定した。次に界面勾配が
一定である範囲のはば中央($x =$
1.5 m) で流速、濃度、界面波

表-1 実験条件と結果の要目 (cm-s unit)

RUN	Flow Properties						Wave Properties			
	U_m	h_1	g	u_*	Fr	Re	f_w	L	α	c
1	6.12	9.15	29.27	.335	.374	6360	.382	20.5	.393	7.79
2	5.76	9.00	36.53	.454	.318	5630	.504	17.6	.386	8.90
3	7.71	8.24	36.78	.374	.443	6910	.464	26.1	.358	12.1
4	6.20	9.02	35.87	.538	.345	6110	.506	18.9	.316	9.57
5	5.46	8.90	29.08	.439	.339	5300	.423	23.6	.427	10.0
6	7.60	9.80	42.78	.653	.371	7720	.487	24.0	.408	11.7

の同時測定を行った。それぞれの信号を TEAC 製 R-80 データ・レコーダーに収録し、A-D 変換後統計処理を行った。サンプリング間隔は $\Delta t = 1/3 \times 7.5$ 秒、サンプリング個数は 8192 個である。界面波の波長 (L) および波速 (c) は実験中に測定し、界面に動く摩擦速度 (u_*) は水路側壁の摩擦を考慮した上層密度流の不等流モデルを用い界面勾配より算定した。実験条件ならびに結果の要目は表-1 にまとめて記している。表中の U_m , h_1 , g , f_w , α はそれぞれ上層断面平均流速、上層水深、重力加速度、界面波の振動数、界面波の振幅で $Fr = \sqrt{U_m^2 / \epsilon g h_1}$, $Re = U_m h_1 / \nu_1$ である。

3. 統計諸量の定義

界面変位 η と x 方向および z 方向の流速成分 u , v は次の様に分解できる。

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

ここで $\bar{\cdot}$ は時間平均量を、 $\tilde{\cdot}$ は造波された二次元界面波に関する変動量を、 $'$ は乱れを意味している。今回の実験においては $\sqrt{\langle \eta'^2 \rangle} \gg \sqrt{\langle \tilde{\eta}^2 \rangle}$ であり η' を無視することができる。 $\langle \cdot \rangle$ を $\bar{\eta}$ の位相に基づくアンサンプル平均量を表わすものとする

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

特に

$$\bar{\eta} = a \sin(kx - \omega t) \quad (1)$$

で表示したとき、 $\tilde{u}$, $\tilde{v}$ は

$$\begin{aligned} \tilde{u} &= |\tilde{u}| \sin(kx - \omega t + \theta_{\tilde{u}}) \\ \tilde{v} &= |\tilde{v}| \sin(kx - \omega t + \theta_{\tilde{v}}) \end{aligned} \quad (2)$$

で表わされると仮定し、 $\theta_{\tilde{u}}$, $\theta_{\tilde{v}}$ によって界面波との位相差を定義する。ここで $k = 2\pi/L$, $\omega = 2\pi f_w$ である。界面波の存在が乱れに及ぼす影響を示す量を

$$\begin{aligned} \tilde{r}_{11} &\equiv \langle u'^2 \rangle - \overline{u'^2} \\ \tilde{r}_{22} &\equiv \langle v'^2 \rangle - \overline{v'^2} \end{aligned}$$

によって定義する。

4. 実験結果および考察

(1) 時間平均量の鉛直分布

図-2 は $(\bar{u} - u_i)/u_* = u_* |z|/\nu_e$ に対してプロットしたものである。ここで $\bar{u}_i$ は界面における平均流速、 ν_e は $u_*^2 / (d\bar{u}/dz)_{z=0}$ によって定義される有効粘性係数である。図中の実線は滑面乱流境界層の壁法則から得られる流速分布を表わしている。上下層の界面近傍における流速分布は直線分布をしている。⁵⁾ 上層流

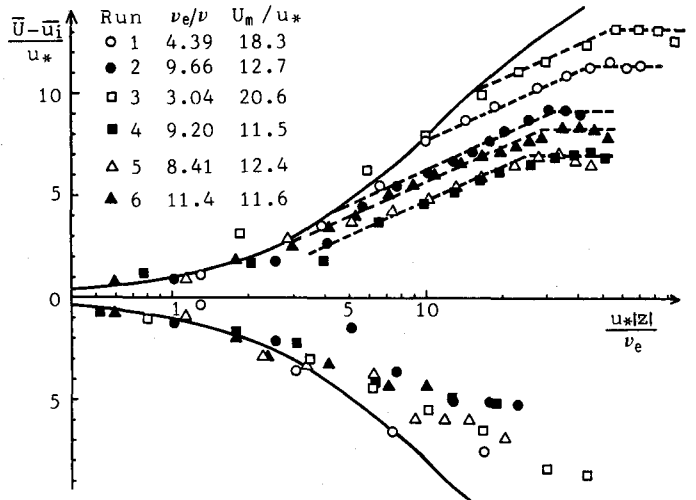


図-2 平均流速分布

体において界面から離れた所では、流速分布は壁面境界層の完全乱流層内のそれと類似して対数分布となるが、直線分布から対数分布に移る位置 $u_* z / \nu_e$ の値は Osanady が述べている様に ν_e / ν が小さくなる程大きくなり、壁法則で表わされる流速分布に近づく傾向が見られる。対数分布から一様分布に変わる位置について明瞭な特徴は見られないが、 $\overline{Om} / u_*$ の値が大きいか程一様となる $(\bar{U} - \bar{u}_i) / u_*$ の値は大きくなっている。

図-3 (a)~(c) に界面波によって誘起された流速変動強度と乱れ強度およびレイノルズ応力の鉛直分布の一例を示す。図-3 (a) より任意の z において、波による変動エネルギー $-\overline{u^2}$ と乱れエネルギー $\overline{u'^2}$ の和は $(\overline{u} + \overline{u'})^2$ にほぼ等しく図-3 (b), (c) においても同様であることから、本実験では波による変動と乱れとの相互作用は十分小さいと考えられる。界面近傍ではせん断流によって誘起される乱れは小さく、大部分が波動運動に起因していることがわかる。 $\sqrt{\overline{u^2}}$ と $\sqrt{\overline{v^2}}$ の値は z の増加とともに急激に減少しており、 $kz \div 1$ で波による変動強度と乱れ強度の大きさが逆転している。また、 $\sqrt{\overline{u^2}}$ の分布は界面近傍で極小値をとるが、 $\sqrt{\overline{v^2}}$ は界面で最大となる傾向がある。波によるレイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ は界面直上で正の値をとり、界面より下では負となる。そして $|kz|$ の増加とともに 0 に収束する。一方、 $-\overline{u'v'}$ は kz の大部分において正の値をとるが、界面近傍ではほとんど値をもたない。 $-\overline{u'v'}$ が最大値をとる位置は乱れ強度が最大となるところで、これは平均流速分布が一様となり始める点とほぼ一致する。

このように $\sqrt{\overline{u^2}}$ が界面で極小値をもつことや、 $-\overline{u'v'}$ が界面近傍において値をもつことはポテンシャル理論⁶⁾では説明することはできない。そこで簡単なモデルではあるが、静止した二層密度場の界面に $\eta = ae^{i(kx - \omega t)}$ で表わされる変動を与えた時、粘性を考慮することにより上下層の流体中に誘起される流速変動を求めた。計算において流速変動の絶対値を規定する無次元パラメータは ν_1 / ν_2 , $\sqrt{\frac{\nu_1}{\omega}} k$ および $eg \frac{ak^2}{\omega^2}$ の3つである。ここで添字 1, 2 はそれぞれ上, 下層の諸量を表わす。図-4 は得られた流速変動強度とレイノルズ応力の分布形の一例である。界面で $\sqrt{\overline{u^2}}$ は極小値をもち、 $-\overline{u'v'}$ の分布が界面近傍で図-3 (c) に示したパターンと類似していることがわかる。このことから、界面近傍における流速変動の特性は粘性を考慮することにより説明できるものと考えられる。

(2) 位相平均諸量

図-5 (a), (b), (c) はそれぞれ $z = -0.5 \text{ cm}$, 0.0 cm , 0.5 cm における $\tilde{u}$, $\tilde{v}$ のパターン変化を示したものである。界面より下では、 $\theta_{\tilde{u}} \div 0^\circ$ であり、界面より上では $\theta_{\tilde{u}} \div 180^\circ$ となる。流速計が平均界面位置にセットされた場合、流速計が下層流体中にあるときは (a) のパターンを示し、上層流体中にあるときは (c) のパターンを示す。 $\tilde{v}$ は上下層を通じて $\theta_{\tilde{v}} \div -90^\circ$ であることがわかる。

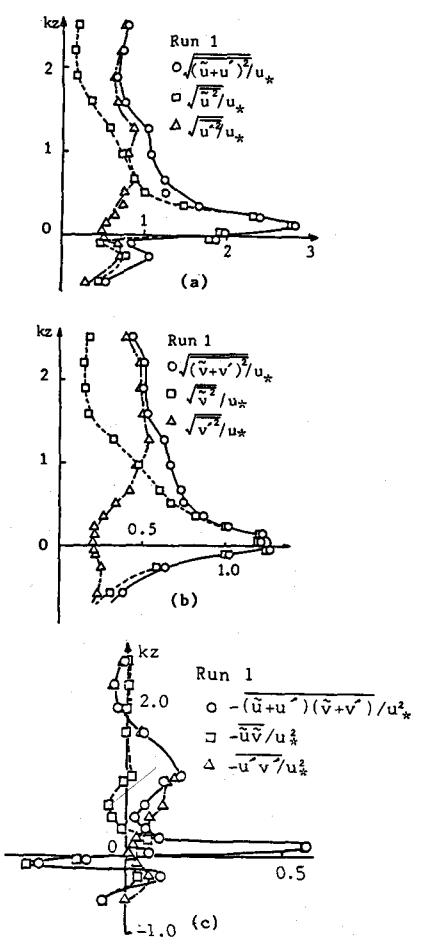


図-3 流速変動強度およびレイノルズ応力の鉛直分布

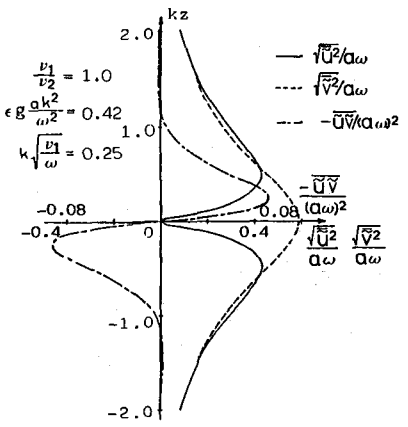


図-4 界面波によって静止二成層流体中に誘起される流速変動強度とレイノルズ応力の分布形

図-6 (a), (b), (c) は $|\tilde{u}|/ak(c-\bar{u}_i)$, $|\tilde{v}|/ak(c-\bar{u}_i)$ および $\theta_{\tilde{u}}$, $\theta_{\tilde{v}}$ の kz 依存性を示したものである。 $|\tilde{u}|$, $|\tilde{v}|$ はほぼ e^{-kz} に比例して減衰しているが、界面近傍における $|\tilde{u}|$ の e^{-kz} からのずれは振動境界層の影響であると考えられる。位相差 $\theta_{\tilde{v}}$ は $-1.0 < kz < 1.0$ においては -90° の値をとり、 $\theta_{\tilde{u}}$ は $kz < 0$ で 0° を $kz > 0$ で -180° をとることがわかる。本実験においては $c > \bar{u}_i$ であることを考慮すれば、これらの結果は浜田・加藤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 $\theta_{\tilde{u}}$ は 0° から -180° へめらかに移行する。

図-7 は $\langle u \rangle / U_m$ の分布に及ぼす界面波の影響を調べたものである。界面近傍において波による変動 $\tilde{u}$ のため、位相 1, 2, 8, 9 で平均流速 $\bar{U}$ より小さな値をとり、位相 4, 5, 6 で大きくなっている。しかしながら、位相 2 と 8, 3 と 7, 4 と 6 において $\langle u \rangle$ の分布に顕著な違いが認められないことより、主流は界面波の存在によって加速、減速の影響をほとんど受けていないことがわかる。

図-8 は $z = 0.62 \text{ cm}$ における $\langle \sqrt{u'^2} \rangle$ と $\langle \sqrt{v'^2} \rangle$ のパターンを示したものである。 $\langle \sqrt{u'^2} \rangle$ は界面波と約 110° の位相差をもっており、 $\langle \sqrt{v'^2} \rangle$ はあまり明瞭でないが $\tilde{\eta}$ と同位相となっている。 $\bar{r}_1$ が波の谷で正の値をとる理由として次の様に考えられる。 $c > \bar{U}$ であることより波は相対流速 $c - \bar{U}$ を受ける。従って波の存在によって波峰の前方では加速の流れのため乱れ強度は小さくなり、逆に波峰の後方では減速の流れのため乱れ強度が大きくなる。このように $\langle u \rangle$ には波の存在による加速、減速の影響が明瞭に現れないが、 $\langle u'^2 \rangle$ には顕著にその影響が認められる。

(3) 流速変動スペクトル

図-9 に $z = 0.15 \text{ cm}$ における $\tilde{u} + \tilde{u}'$ の周波数スペクトル $E(f)$ を示す。波の基本周波数 f_w の整数倍のとこ

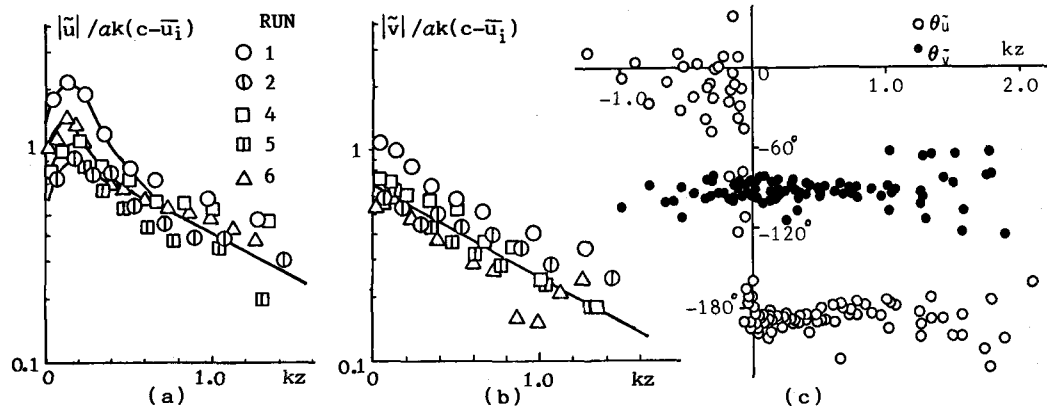


図-6 $|\tilde{u}|/ak(c-\bar{u}_i)$, $|\tilde{v}|/ak(c-\bar{u}_i)$, $\theta_{\tilde{u}}$, $\theta_{\tilde{v}}$ の kz 依存性

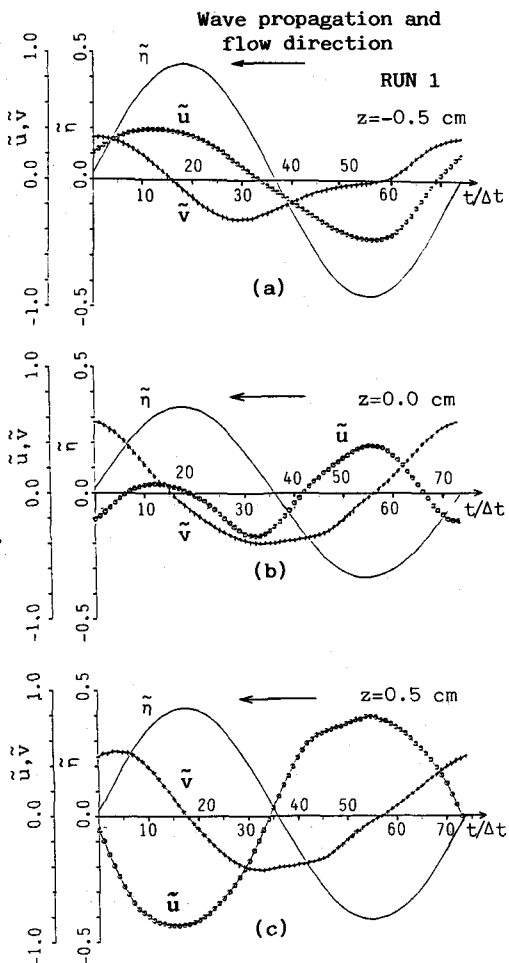


図-5 $\tilde{u}$, $\tilde{v}$ の分布
($\tilde{\eta}$:—, $\tilde{u}$:●●, $\tilde{v}$:++)

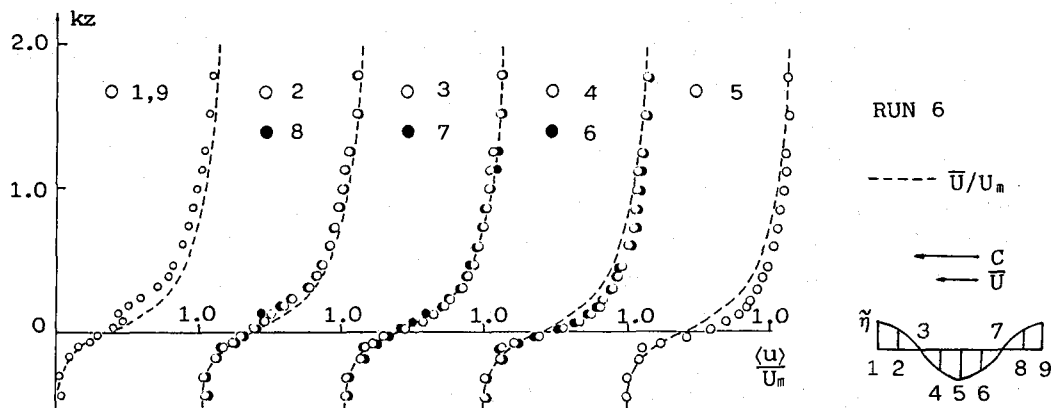


図-7 $\langle u \rangle / U_m$ の鉛直分布

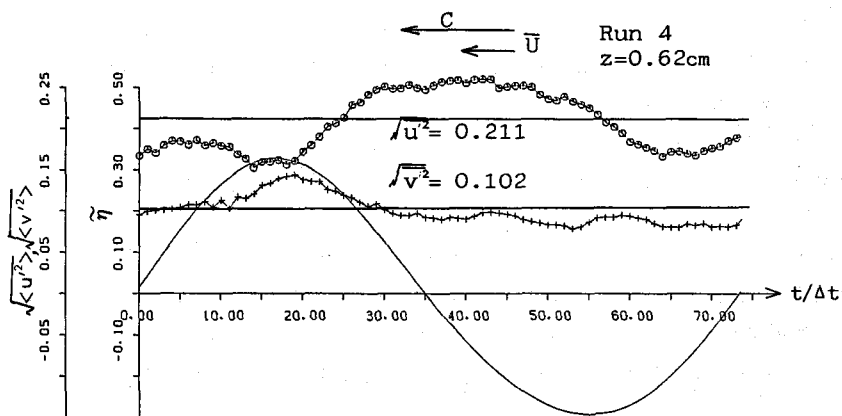


図-8 $\sqrt{\langle u'^2 \rangle}$ と $\sqrt{\langle v'^2 \rangle}$ の分布

(η : — , $\sqrt{\langle u'^2 \rangle}$: ○○ , $\sqrt{\langle v'^2 \rangle}$: ++)

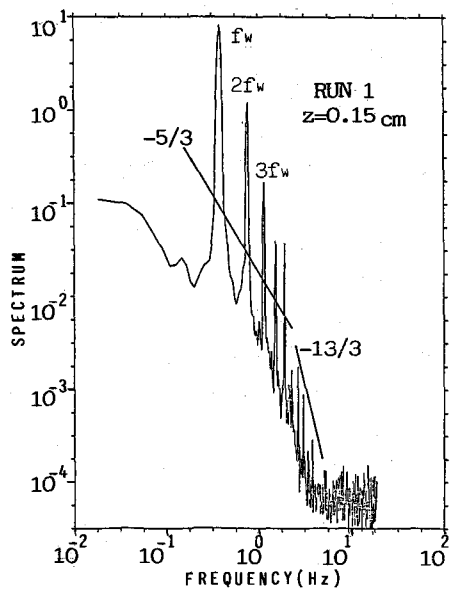


図-9 $\tilde{u} + u'$ の周波数スペクトル

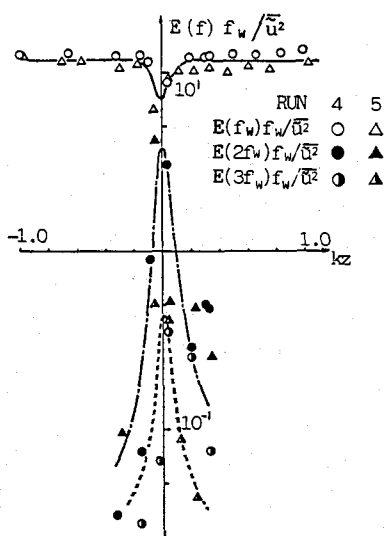


図-10 エネルギー・レベルの kz 依存性

ろにエネルギー・ピークが見られる。図-10は、 f_w , $2f_w$, $3f_w$ におけるエネルギー密度を $\overline{u^2}$ と f_w に基づいて無次元化し、 kz に対してプロットしたものである。基本周波数におけるエネルギー・レベルは界面近傍でわずかに減少するが、 kz の広範囲にわたって

$$\frac{E(f_w)f_w}{\overline{u^2}} = 12$$

で表わされる。高調波成分のエネルギー・レベルは界面において最大となり、 $|kz|$ が大きくなるにつれて急激に減衰することがわかる。この様に界面近傍で高調波成分のエネルギーが卓越するのは、図-5(b)で示したように流速計が上層と下層の界面波による流速変動を交互に受けるためである。

5. むすび

二層密度場において人工的に二次元規則界面波を伝播させた時、界面波が上層流に与える効果について調べた。本研究結果は次の通りである。

- (i) 界面近傍における平均流速は有効粘性係数を用いることにより統一表示でき、滑面乱流の粘性底層における流速分布と同様直線分布で表わされる。また、直線分布から対数則に従う位置は y_δ/ν の値が小さい程界面より離れる傾向がある。
- (ii) 界面近傍における流速変動の大部分は界面波によって誘起されたものであり、 x 方向の流速変動強度が界面で極小値をもつことやレイノルズ応力の分布形の定性的特性は界面における振動境界層を考慮することにより説明できる。
- (iii) 界面波の存在によって位相平均流速は波による流速変動の影響を受けるが、界面が変動していることによる加速、減速の影響を明瞭に示さない。しかし乱れ強度の位相平均 $\langle u'^2 \rangle$ に対しては、平均流の加速、減速の影響が顕著に現われる。
- (iv) 基本周波数における流速変動のエネルギー密度は kz の広範囲にわたって $12 \cdot \overline{u^2}/f_w$ で表わされる。

最後に本研究を行うにあたり有益な討論ならびに助言をして下さいました小松利光助教授に謝意を表します。

参考文献

- 1) Csanady, G. T. : Turbulent interface layers, J. Geophys. Res., Vol. 83, 1978.
- 2) 椿東一郎・小松利光・下田五郎 : 2層境界面における内部波と乱れに関する実験的研究, 第25回水理講演会論文集, 1981.
- 3) Andow, T., K. Hanawa and Y. Toba : Experimental study on internal waves in a stratified shear flow, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 37, 1981.
- 4) Hino, M. and S. H. Nguyen : Velocity distribution, interfacial friction and entrainment in two-layered stratified flows, J. Hydrosoci. and Hydraul. Eng., Vol. 1, No. 1, 1983.
- 5) Ura, M., T. Tsubaki and N. Matsunaga : Characteristics of flow and turbulence near interfacial waves in upper-layer flow, J. Hydrosoci. and Hydraul. Eng., Vol. 2, No. 1, 1984.
- 6) 浜田徳一・加藤始 : 2層流と波, 第9回海岸工学講演会論文集, 1962.