

上層流における界面近傍の流れ特性 Flow Properties Near an Interface in Upper - Layer Flow

九州大学工学部 正員 ○松永 信博
九州工業大学 正員 浦 勝
九州大学大学院 学生員 並川 正
九州大学工学部 正員 椿 東一郎

1. まえがき

2成層流体場における種々の定性的・定量的特性が、数多くの可視化実験および流速や界面変動の測定により明らかにされてきている。¹⁾²⁾³⁾⁴⁾ 下層密度流に関しては、Lofquist⁵⁾が界面摩擦速度や連行速度などを測定する実験を行い、Csanady⁶⁾は Lofquist のデータを用いて有効粘性係数を算定することにより平均流速分布や連行速度などの普遍表示を試みた。最近では、加藤ら⁷⁾⁸⁾によってさらに詳細な測定もなされている。しかしながら、上層密度流に関しては多くの実験がなされているにもかかわらず、得られた特性量を重要な因子で無次元化し統一的表示を行う試みは、あまりなされていないように思われる。

本研究では上層密度流に関して実験を行い、界面近傍の特性量には摩擦速度が1つの重要な因子であると考え、後述する3つの方法で摩擦速度の評価を試みた。特性量を主に内部パラメータでまとめ、Lofquist のデータとの比較・検討も試みた。さらに、流速変動と界面変動のスペクトル形に関しても若干の考察を行った。

2. 実験装置および実験方法

実験装置として長さ6.0 m、幅0.26 m、高さ0.3 mの両面アクリル製の水平床水路を用い、静止した塩水(密度 ρ_2)の上に淡水(密度 ρ_1)を循環させ2層上層流を作った。水路上流端には長さ1 mの平板ガイドを界面位置に水平に取り付け、上層流の境界層を発達させることにより淡水と塩水が初めて接する所で急激な混合が生じないようにした。また、下流端では下層流体の逆流、内部波の反射、中間層の発達を防ぐため、排水スリットを界面付近に設けて強制排水にならない程度に中間密度流体を排水した。従って、有効水路長は約4.0 mであった。2成層場の定常状態は、上層水の塩分濃度と下層水深が一定となるようにそれぞれ淡水と塩水を常時補給することによって得られた。ここで便宜上、ガイド平板の先端から下流方向へ x 軸を、界面より鉛直上向きに z 軸をとることにする。

流速測定にはDISA社製V型2方向ホットフィルム流速計を用い、密度測定には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との同時測定を行うため流速計に濃度計を取り付け、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。内部波の測定には2つの抵抗式波高計を用い、波速を求めることができるように1.0 cm下流方向にずらしている。前方の波高計が流速計および濃度計と同一鉛直面内にあるようにセットした。なお実験水路ならびに測定プローブの配置に関する詳記は、文献2)を参照されたい。

実験は次の要領で行った。2成層流体場が定常状態に達した後、濃度計を用いて流下方向に0.25 mの間隔で界面の位置を求め、界面勾配を算定した。界面は平均密度が $(\rho_1 + \rho_2)/2$ となる位置と定義し、濃度変動時系列を直接ペン・レコーダに出力させることによって決定された。次に、界面勾配が一定である範囲のはば中央($x \div 2.75$ m)で流速、濃度、内部波高の同時測定を行った。連行速度は一部の実験において同時測定の終了後、淡水と塩水の補給を停止して界面の低下速度によって求められた。得られた同時測定データはTEAC製R-80データ・レコーダに収録し、A-D変換後統計処理を行った。サンプリング間隔

は $\Delta t = 1/18.75$ 秒, $N = 4096$ 個であった。

実験条件ならびに結果の要目は表-1にまとめて記してある。 U_m, h_1 はそれぞれ上層断面平均流速と上層水深であり、 $\epsilon = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_2$, $Fr = U_m / \sqrt{\epsilon G h_1}$ である。ここで、 G は重力加速度である。

2. 実験結果と考察

(1) 界面摩擦速度と有効粘性係数

界面摩擦速度 u_* の評価の方法として、次の3通りの方法を試みた。

(i) 界面における Reynolds stress $-\overline{u'v'}$ と shear

stress $\nu dU/dz$ から求める方法: $u_* = \sqrt{-\overline{u'v'} + \nu dU/dz} \Big|_{z=0}$,

(ii) 平均流速分布が対数則に従うと仮定し、Karman 定数 0.4 を用いて求める方法、⁷⁾

(iii) 水路側壁の摩擦を考慮した2層上層密度流の不等流モデルを用い、界面勾配より求める方法:

$$u_* = \sqrt{\epsilon G h_1 \cdot dh_1/dx \cdot (1 - Fr^2) (h - h_1) / h - 2 \tau_w h_1 (h - h_1) / \rho_1 B h}$$

ここに、 U, B, h, τ_w はそれぞれ平均流速、水路幅、全水深、壁面摩擦応力である。 τ_w の算定には Blasius の抵抗則を用いて $\tau_w / \rho_1 = 0.055 (U_m B / 2 \nu)^{1/4} U_m^2 / 2$ で評価した。その結果、(i)の方法では界面における $-\overline{u'v'}$ のばらつきが大きく信頼性のある値を評価しえなかった。また(ii)によって推定した u_* と(iii)によって推定したものとの比が 0.94 程度で一致したが、2層密度流における平均流速分布に対数則をあてはめる理論的根拠は明らかでない。従って、本研究では界面勾配より理論的に算定する方法(iii)によって求めた u_* を用いる。図-1は、 $\nu_e = u_*^2 / (dU/dz)|_{z=0}$ によって定義される有効粘性係数を局所クーリーガン数 ($K = u_*^3 / \epsilon G \nu$) に対して Lofquist

の結果と本実験結果とをプロットしたものである。両者はほぼ一致しており、上層流および下層流において有効粘性係数は、

$$\nu_e / \nu = 1 \quad (K \leq 0.025)$$

$$\nu_e / \nu = 6.32 K^{1/2} \quad (K \geq 0.025) \quad \dots (1)$$

で評価できる。

表-1 実験条件と結果の要目 (cm-sec unit)

Run	U_m	ϵG	h_1	Fr	u_*	l_u	L_u	L_p	ν_e/ν	K
1	4.96	6.56	9.50	.628	.201	.097	2.55	.65	1.77	.113
2	3.51	7.60	7.89	.453	.224	.122	2.05	.38	2.38	.129
3	1.05	6.79	7.05	.152	.107	.202	2.08	.60	1.88	.016
4	2.25	6.01	7.76	.330	.181	.108	1.47	.47	2.22	.112
5	4.25	6.26	8.59	.579	.226	.082	1.65	.63	2.04	.203
6	3.14	5.69	7.28	.488	.208	.063	1.00	.41	1.47	.179
7	2.92	6.17	5.90	.484	.203	.076	1.13	.40	1.73	.152
8	1.50	6.43	6.52	.232	.149	.107	1.19	.24	1.81	.058
9	2.92	11.3	7.37	.320	.236	.104	1.40	.32	2.58	.123
10	3.51	10.5	7.10	.406	.251	.086	1.30	.33	2.24	.156
11	5.13	10.6	8.18	.552	.366	.092	1.50	.57	3.49	.483
12	5.36	9.88	10.0	.539	.365	.090	1.43	.63	3.37	.507
13	3.61	6.42	8.57	.487	.302	.181	2.54	.67	5.63	.442
14	2.94	3.32	8.38	.557	.211	.123	1.89	.41	2.63	.286
15	3.44	2.97	9.56	.646	.153	.113	2.75	.57	1.72	.121

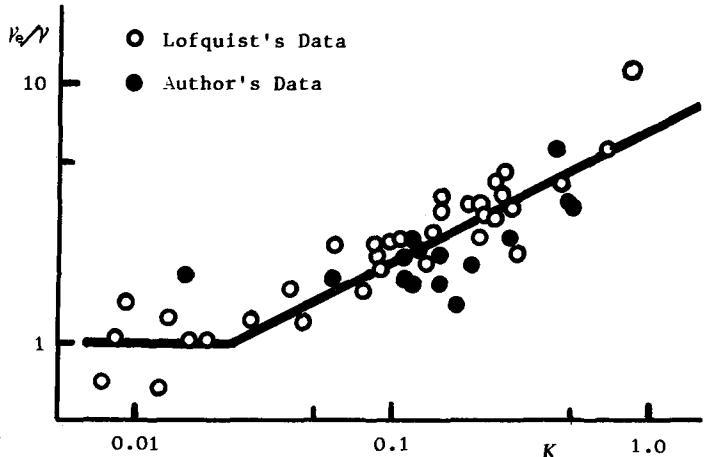


図-1 有効粘性係数の K 依存性

(2) 平均流速と平均密度に関する特性量

図-2は、流速係数 U_m/u_* を K に対してプロットしたものである。両者の結果はかなり一致しており、広範囲の K にわたって

$$\frac{U_m}{u_*} = 17 \quad (1)$$

である。金子⁹⁾によって提案された界面における抵抗係数を表す式

$$\left(\frac{u_*}{U_m}\right)^2 = 0.1 \left(\frac{U_m^3}{\varepsilon G \nu}\right)^{-1/2}$$

を K で表すと $U_m/u_* \sim K$ を意味するが、これは図-2に示した結果と一致しない。風により表面波が発生して

いるとき、水表面における摩擦速度は10 m平均風速 U_{10} のみで支配され、特に低風速においては U_{10} に比例するという結果¹⁰⁾は式(1)の結果と類似しており興味深い。また U_m/u_* は ν_e/u_* によって定義される乱れの代表長さスケール ℓ_u と $U_m/(dU/dz)|_{z=0}$ で定義される混合層の厚さとの比 Lu/ℓ_u とも解釈され、 Lu は $17 \ell_u$ で評価できる。

図-3は、 $(U-u_i)/u_*$ を $u_*|z|/\nu_e$ に対してプロットしたものである。ここで u_i は界面における平均流速である。図中の実線は滑面乱流境界層の壁法則から得られるものである。有効粘性係数を用いると上層の

流速分布は $u_*|z|/\nu_e \lesssim 5$ で粘性底層のそれと一致し、粘性底層が成り立つ範囲とも一致する。 $u_*|z|/\nu_e$ が大きくなると当然流速分布は直線分布からはずれてくるわけであるが、Csanady は K が小さい程そのはずれ方は大きいようであると指適している。しかしながら本実験結果によるとそれとはほぼ逆の傾向が見られ、むしろ Fr が小さい程ははずれ方が大きいことがわかる。下層の流速分布に対しても $u_*|z|/\nu_e \gtrsim 2$ で同様な傾向が見られる。混合層から遠ざかるにつれ平均流速が一様となり直線分布布からはずれる傾向は、 K よりむしろ

粘性を含まない Fr をパラメータとすると考える方が物理的に妥当であるように思われる。図-3の結果から、界面近傍の上層の平均流速は

$$\frac{U-u_i}{u_*} = \frac{u_*|z|}{\nu_e} \quad (0 \leq \frac{u_*|z|}{\nu_e} \leq 5) \quad (2)$$

で表される。また、本実験において u_i/u_* はほぼ一定値で6.4であった。

図-4は $(\rho_2 - \rho_1)/(d\rho/dz)|_{z=0}$ で定義された界面厚さ $L\rho$ と ℓ_u の比を Lofquist の結果も添えて K に対してプロットしたものである。かなりのばらつきが見られるが $L\rho/\ell_u$ は7程度の値をとる。

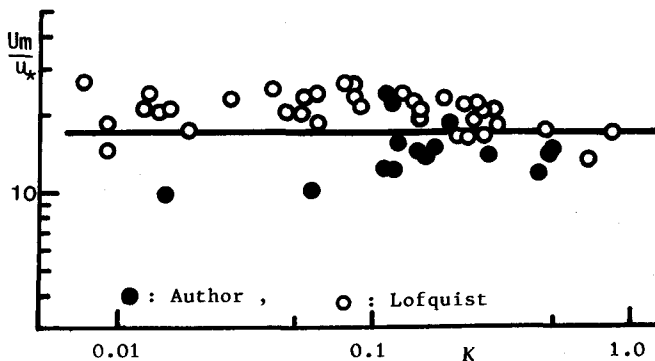


図-2 流速係数

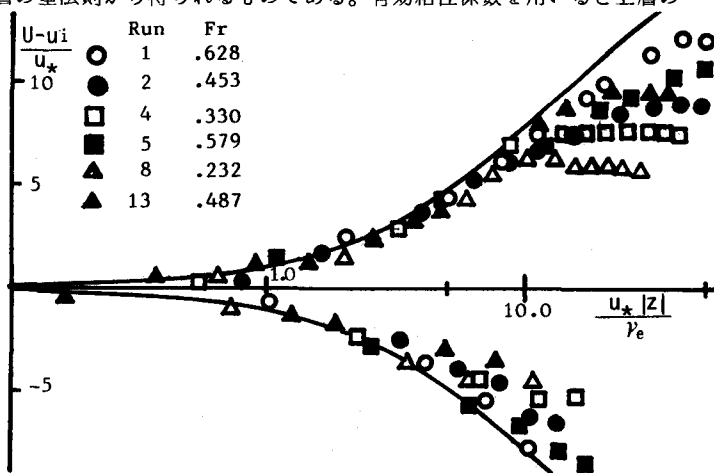


図-3 平均流速分布

(3) 変動に関する特性量

図-5は流速変動強度 u' の z 方向の分布を示したものである。全体的にばらつきが大きいのは波による変動と平均流による乱れとを含めた u_* で無次元化したためであると考えられる。しかしながら、一般に K が小さくなるにつれ u'/u_* は小さくなる傾向があるように思われる。また、 u' は界面よりわずか上方で最大値をとることがわかる。

界面変動の r. m. s. 値 η' は

$$\eta' = f(u_*, \varepsilon GLu)$$

で表されると考え、 η'/Lu を $u_*^2/\varepsilon GLu$ に対して示したものが図-6である。これによると η' は

$$\eta' = 250 \left(\frac{u_*^2}{\varepsilon GLu} \right)^{3/2} \quad (3)$$

で表される。

(4) 流速変動と内部波のスペクトル

図-7に $z = 0.68 \text{ cm}$ と 3.32 cm における流速変動と界面変動のスペクトルの1例を示す。界面には周波数の異なる2つの卓越波が存在していることがわかる。著者らは、これらの低周波の卓越波をL.P.波、高周波の卓越波をS.P.波と呼んでいる。界面近傍では流速変動はL.P.波、S.P.波の両方の影響を受け、慣性小領域特有の $-5/3$ 乗が見られない。また、高周波域では界面変動スペクトルも流速変動スペクトル特有の $f^{-13/3}$ で減衰している。界面より離れた点では、 u' のスペクトルにはS.P.波の影響はほとんど見られず、 $-5/3$ 乗に従う領域が現われる。しかしながら、L.P.波の影響をまだ受けている。物理的理由は今のところ明らかではないが、逆に v' のスペクトルにはL.P.波の影響はあまり現われず、S.P.波の影響が見られる。 u' と v' の自己相関係数においては、さらにこの特性が明らかとなる。

u' の周波数スペクトル $E(f)$ を無次元の一次元波数スペクトル $F^*(k^*)$ に変換するには、 $E(f)$ と f を次式のように無次元化すればよい。

$$F^*(k^*) = \frac{E(f)}{2\pi u'^2 T}, \quad k^* = 2\pi T f$$

ここで k^* は無次元波数、 T は積分時間スケールである。図-8は z の異なる点における $E(f)$ を波数スペクトルに変換したものである。 T はスペクトルから $E(0)/4u'^2$ により求めた。図中の実線は、乱れの発生域と慣性小領域において成立つ式として Karman¹¹⁾ が提案した式

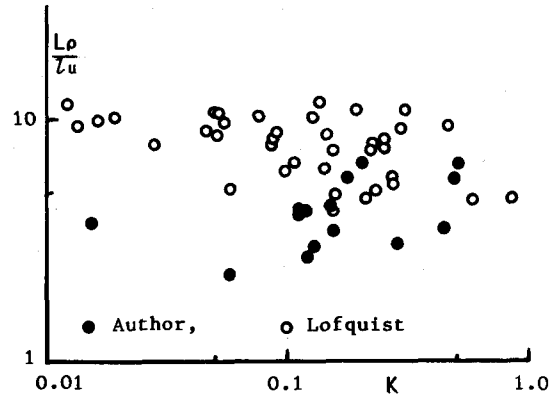


図-4 界面厚さ

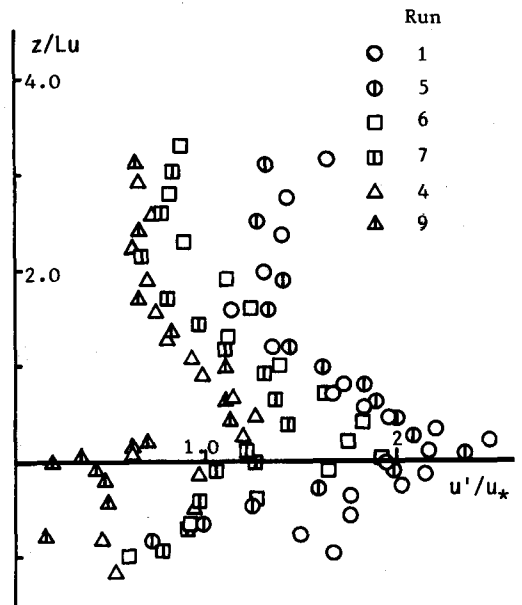


図-5 乱れ強度

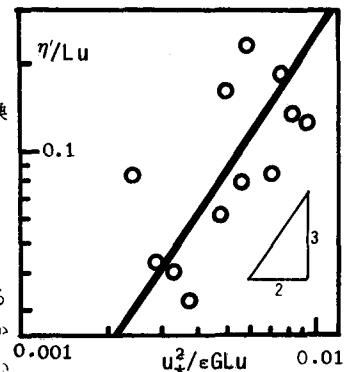


図-6 界面変動の r. m. s.

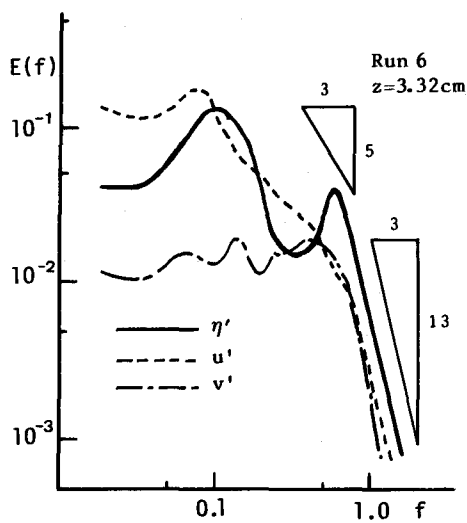
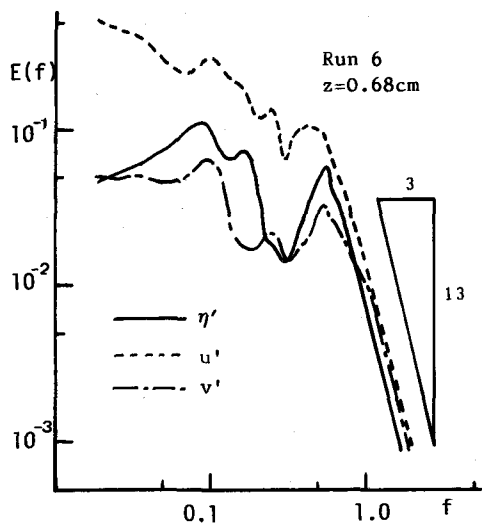


図7 流速変動および界面変動スペクトル

$$F^*(k^*) = \frac{2}{\pi} (1 + k^{*2})^{-5/6} \quad (4)$$

である。 u' のスペクトル形は、基本的には式(4)で示される形をとるが、界面近傍ではL.P.波、S.P.波によって引き起こされた変動のため、それらに対応した波数においてスペクトル形は式(4)からずれ、ピークを示す。

図-9は、 u_1 を用いて無次元化した波速を無次元波長に対してプロットしたものである。図中の実線は浜田・加藤¹²⁾の2層流モデルにおいて界面で non-slip の条件を課し、流速を直線分布と仮定した時の深水波の式

$$\frac{c \pm}{u_1} = 1 \pm \sqrt{\frac{\varepsilon GL}{4\pi u_1^2}} \quad (5)$$

である。図中の黒ぬりと半黒ぬりの記号は、それぞれの実験における高周波域と低周波域に見られるスペクトル

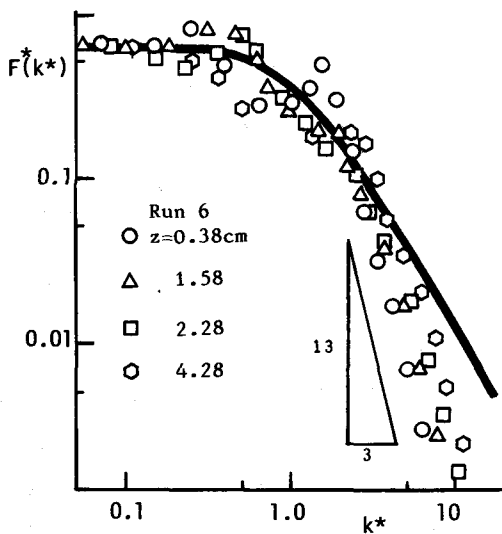


図-8 u' のスペクトル形

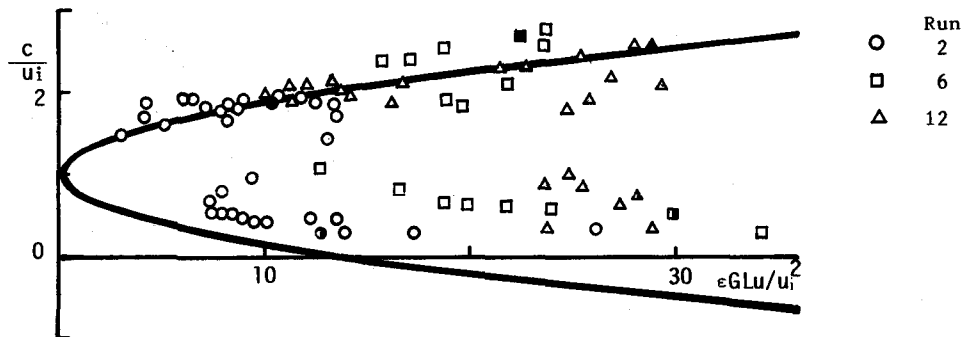


図-9 内部波の波速

ピークに対応する波の波速を示している。L.P.波では(5)式よりかなりずれるが、S.P.波においてはよい一致が見られる。

次に、界面変動のスペクトル形の決定を試みる。一般にS.P.波のスペクトル・ピーク位置が明瞭であったことを考慮して、一部の実験における代表的な内部波のスペクトルをS.P.波のスペクトル・ピーク f_{PS} を用いて無次元化したものが図-10である。 F がほぼ同じ値のデータをまとめたためによるのかもしれないが、それらはよく一致しており一つのスペクトル形で表示できる。S.P.波、L.P.波のスペクトル・ピークのレベルとL.P.波の卓越周期 f_{PL} は、それぞれ次式で評価できる。

$$\begin{aligned} E(f_{PS}) &= 0.6 \eta'^2 f_{PS}, & E(f_{PS}) &= 1.80 \eta'^2 f_{PS} \\ f_{PL} &= 0.15 f_{PS} \end{aligned} \tag{6}$$

図-11は $f_{PS} u_* / \epsilon G$ を K に対してプロットしたものである。図より

$$f_{PS} = 0.025 \epsilon G / u_* \tag{7}$$

で評価できる。

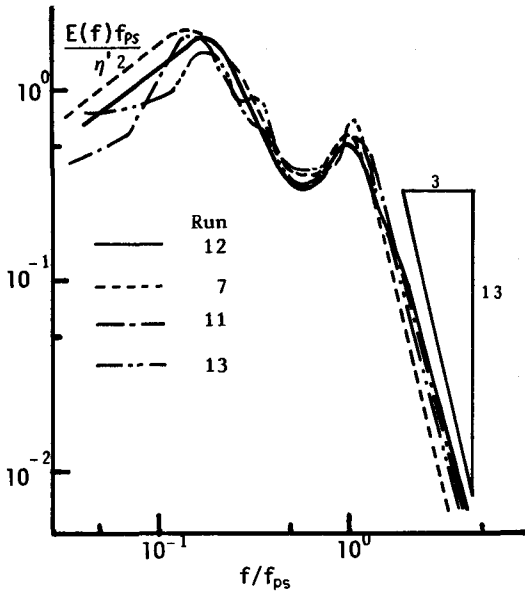


図-10 内部波のスペクトル形

(5) 連行速度

連行速度をフルード数で評価する従来の考え方とは異なるが、連行速度 V_e は次式

$$V_e = f(\epsilon G, u_*, \nu)$$

で規定され则认为、 V_e / u_* を K に対して Lofquist と本実験の結果を示したものが図-12である。これによると V_e は

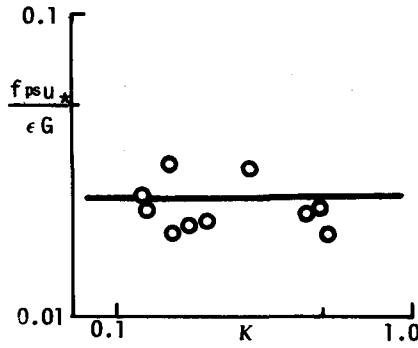


図-11 S.P. 波の卓越周波数

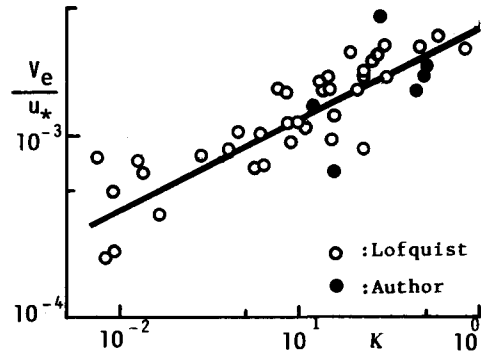


図-12 連行速度

$$\frac{V_0}{u_*} \sim \left(\frac{u_*^3}{\varepsilon G \nu} \right)^{1/2} \quad (8)$$

で表される。

4. むすび

2層上層流によって生ずる特性諸量を内部パラメータで表し、考察を加えた。今後さらに実験を行いそれらを明確にしなければならないが、本研究結果は次の通りである。

- (i) 界面摩擦速度は、ほぼ平均流速に比例する。
- (ii) 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アナロジー的に滑面乱流の粘性底層における流速分布形で表すことができる。
- (iii) 界面近傍の流速変動スペクトルは、Karmanのスペクトル形にL.P.波、S.P.波の影響を重畳した形となる。
- (iv) f_{ps} と η' を用いて内部波のスペクトルを無次元化することにより、スペクトルの普遍形が得られる。

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とデータ整理に尽力下さった本学学生の古賀俊行君に謝意を表します。

参考文献

- 1) 室田明・平田健正：成層密度流における内部波特性と混合機構について、第22回水理講演会論文集，1978.
- 2) 椿東一部・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) Ando, 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 N. S. Hung : Velocity distribution, interfacial function and entrainment in two-layered stratified flows, J. Hydroscience and Hydraul. Eng., vol. 1. 1983.
- 5) Lofquist, K. : Flow and stress near an interface between stratified liquids, Phys. of Fluids, vol. 3, 1960.
- 6) Csanady, G. T. : Turbulent interface layers, J. G. Res. vol. 83, 1978.
- 7) 加藤始・池田高則：下層密度流の実験(1)、第28回海岸工学講演会論文集，1981.
- 8) 加藤始・中野普・池田高明：下層密度流の実験(2)、第29回海岸工学講演会論文集，1982.
- 9) 金子安雄：2層流境界面抵抗係数の一例、第13回海岸工学講演会論文集，1966.
- 10) 光易恒：海面に及ぼす風の応力、第19回水工学に関する夏期研修会講義集，1983.
- 11) von Karman, T. : Progress in the statistical theory of turbulence, Proc. of N.A.S., vol. 34, 1948.
- 12) 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.