

九州工業大学 正 浦 勝  
九州工業大学大学院 学 児五 英信  
九州工業大学 西村 直人

はじめに 貯水池等と閉じた水域において水深方向に密度の急変する密度境界面が存在する場合、水表面に風が吹くと界面を通り、下層流体が上層に混合される。

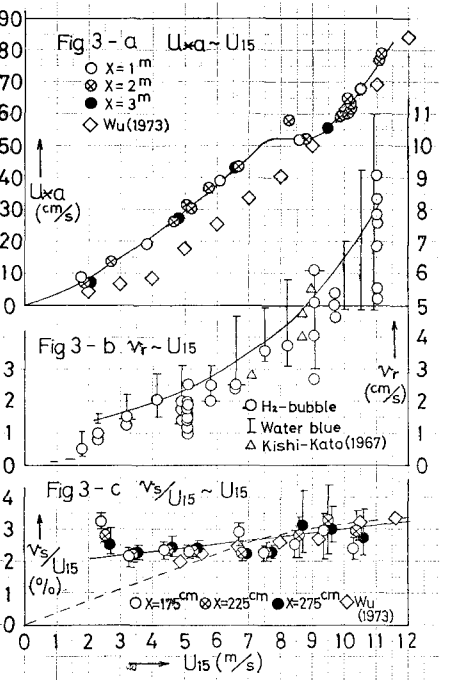
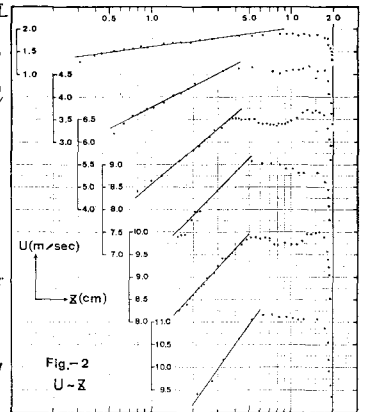
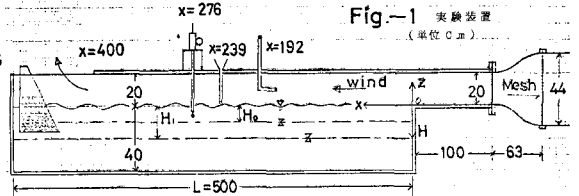
この現象を風波水槽を用いて実験を行ない、進行係数と Richardson 数との関係を求めた。

**実験装置** 装置の概要を Fig.1 に示す。水槽部は  $500^t \times 40^t \times 20^B$  cm, 風路部は  $600^t \times 20^t \times 20^B$  cm のアクリル樹脂製である。位置の表示は Fig.1 に示すように、水槽部上流端の静止水面位置に原点をとり風下側に X 軸、鉛直上向きに Z 軸をとり、水深は H で表示した。

**水表面上の空気摩擦速度  $U_{*a}$**  風路内の風速分布はピトー静圧管を用い、 $x \div 1, 2, 3$  m の位置で代表風速  $U_{15}$  ( $z=15$  cm の風速) を  $2 \sim 11$  m/s に変化させて測定した。  $x \div 2$  m における風速分布の一例を Fig.2 に示す。これより、水面近傍の風速は対数分布とみなすことができ、直線の傾きから水表面上の空気摩擦速度  $U_{*a}$  を求めた。  $U_{*a}$  と  $U_{15}$  との関係を図 Fig.3-a に示したが Fitch の違いによる差異はこの範囲では認められない。  $U_{*a} \sim U_{15}$  の曲線が  $U_{15} = 9.5$  m/s 近傍で変化するのは表面波の碎波によるためであろう。

**吹送流—表面流速  $v_s$** — 表面流速は  $\phi 6$  mm 比重 0.76 の球の移動速度より求めた。  $v_s/U_{15}$  と  $U_{15}$  の関係を Fig.3-c に示す。かなりのばらつきがあるが、図の実線が近似されるようにこの実験範囲では  $v_s/U_{15}$  は風速とともに  $2 \sim 3\%$  と漸増しているようである。

**吹送流—逆流最大速度  $v_r$** — 密度境界面より上側の流速分布を  $x=220$  cm において水素気泡法を用いて測定した。その一例を  $U_{15} \div 4$  と  $10$  m/s の場合について Fig.4 に示す。  $H_1$  は上層厚さ、  $v_r$  は水の摩擦速度、水表面のせん断力の連続を仮定して  $v_r = (\frac{\rho_a}{\rho_w})^{1/2} U_{*a}$  ( $\rho_a, \rho_w$  はそれぞれ空気と水の密度) より求めた。同図には岸田藤より求められた分布形も示した。水素気泡による測定は水粒子が水表面の波動運動の影響を受けて空間的にも時間的にも変動するため測定精度は悪いが、Fig.4 より最大逆流速度は  $v_r = (2 \sim 3)v_{*a}$  であり、岸田藤の結果よりやや低めの結果と一致した。水素気泡法で得られた逆流最大速度  $v_r$  と  $U_{15}$  との関係を図 Fig.3-b に示した。水素気泡法には測定に制約があるため、Water-blue 粒子を用いて、その移動時間より  $v_r$  を求めたがやはり大きなばらつきがあった。この結果は Fig.3-b にその上限と下限を示す意味で I で示した。この両方法を考慮して  $v_r$  と  $U_{15}$  の関係は Fig.3-b の曲線で近似されるとみることができた。



密度境界面における進行速度 Fig.1の水槽中に水と塩水で初期密度差  $\Delta\rho$ , 初期界面深さ  $H_0$  の二成層を形成した後, 水面上に  $dt = 2.8 \text{ cm}^2/\text{sec}$  の加速度で所定の代表風速に達するよう送風機の回転数を増加させた。進行速度測定の実験条件と結果は Table-1 に示す。ここに  $U_{1/2}$  は代表風速で,  $x=192 \text{ cm}$ ,  $z=15 \text{ cm}$  の値とする。進行速度  $U_e$  は,  $x=276 \text{ cm}$  における鉛直密度分布の測定より密度境界面を上下層の中間密度と取る深さ  $H_1$  とし,  $H_1$  が時間的変化  $dH_1/dt$  より求めた。密度界面の低下量  $(H_1-H_0)$

は初期, 吹送流の形成, 内部波が伝達するなどのため変動するが, やがて時間に線形的に増加し,  $U_e = dH_1/dt = \frac{d(H_1-H_0)}{dt}$  は実験中一定値とみなすことができる。Table-1の結果より, 進行係数と  $Ri$  数との関係は, 水表面に加えられた仕事量が上層のポテンシャルエネルギーの増加量に比例するという考えに基づき,  $E = U_e \Delta\rho_a$  と  $Ri = \frac{\Delta\rho g H_0}{\rho_a U_e^2}$  を用いて整理すると,  $U_e$  の違いにより流一的に表現し得るから<sup>1)</sup>

そこで, 既に岸如藤<sup>2)</sup> が着目したように密度境界面の進行に支配的流速は逆流最大速度  $U_e$  であるとし, さらに  $Ri$  数の長さのスケールとしては Fig. 4 の吹送流の流速分布図より, 逆流速度のスケールは上層厚さの  $1/2$  とみなすことにした。

このようにして,  $E = U_e \Delta\rho_a$ ,  $Ri = \frac{\Delta\rho g L}{\rho_a U_e^2}$  とする時,  $V = U_e$ ,  $L = H_0/2$  を用いて,  $E = U_e^3$  と  $Ri = \frac{\Delta\rho g (H_0/2)}{\rho_a U_e^2}$  を Table-1 の記号を用いて示したものが Fig. 5 である。右方向の  $\diamond$  印は  $Wu^3$  の  $U_e$  の値から Fig. 3-a, b を用いて  $V$  を推定したものであり,  $\square$  印は上層表面にスクリーンで一定せん断力を与えた Kantha<sup>4)</sup> の  $\bar{v}$  の内スクリン速度  $U_s$  が一定値と仮定し, 仮定の値を  $V = U_s/2$ ,  $L = H_0$  として計算したものであり,  $\nabla$  印は下層流の Lofquist<sup>5)</sup> の結果を  $V = \bar{U}_2$  (下層平均流速)  $L = H_2$  (下層厚) として  $\nabla$  印以外のものがある。Fig. 5 より吹送流の進行係数の値は, Kantha の平均曲線  $E = 5 \times 10^3 Ri^{-2}$ , Lofquist の  $E = 8.5 \times 10^3 Ri^{-2}$ , 芦田・江頭<sup>6)</sup> の  $E = 1.5 \times 10^3 Ri^{-1}$  並列にあるといえる。

おわりに 吹送流による密度境界面の進行係数については, 右方向の場合の値にのみ検討すべき点が多いが, 概略的に見れば境界面の進行速度は, 逆流速度により支配されており, 加えられる外乱エネルギーの差による, 平均流のなれ構造により, 規定されていると見てもよいと考える。最後に, 多くの有益な示唆をいただいた九州大学工学部 椿東一郎教授に心からなる謝意を表す。また実験装置の製作・実験に協力いただいた本学卒業生 栗山恭彦(新潟) 中村明(福岡市), 阿部聖(三井不動産建設)に謝意を表す。

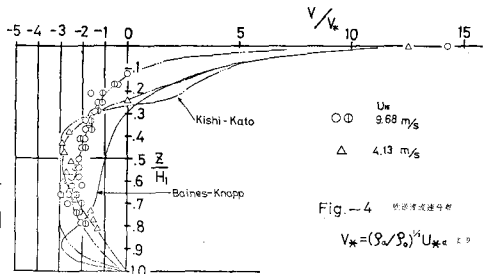


Table-1 実験条件と結果

Exp.	5	3	2	4	1	12	14	11	13
Symbol	⊖	●	⊗	●	⊕	△	▲	△	▲
$U_{1/2}$ (m/s)	5.20	5.25	5.22	5.07	5.06	10.08	9.92	10.12	10.00
$U_{2a}$ (cm/s)	30.5	30.7	30.0	31.4	31.0	60.1	62.2	63.8	65.3
$\rho_a$ ( $\times 10^3 \text{ g/cm}^3$ )	1.255	1.233	1.228	1.238	1.255	1.262	1.232	1.250	1.235
$\Delta\rho$ ( $\times 10^3 \text{ g/cm}^3$ )	21.5	36.4	67.2	95.4	223	131	175	270	538
$H_0$ (cm)	9.7	10.0	10.0	9.6	9.85	19.3	19.3	19.4	19.0
$Ri_a$	17.7	30.7	59.6	73.6	178	54.3	69.4	101	190
$U_e$ ( $\times 10^2 \text{ cm/s}$ )	53.4	34.5	4.43	3.45	1.77	59.2	35.0	35.9	6.89
$U_e/U_{2a}$ ( $\times 10^{-2}$ )	175	47.2	14.8	11.0	5.71	98.5	56.3	71.9	10.6
$V/U_e$ (cm/s)	2.42	2.44	2.43	2.37	2.35	6.55	6.35	6.62	6.45
$Ri_r$	1.74	3.00	5.58	7.99	19.5	2.89	4.10	5.86	12.04
$U_e/V$ ( $\times 10^{-2}$ )	22.1	5.94	1.82	1.46	0.759	9.04	5.51	2.40	1.07

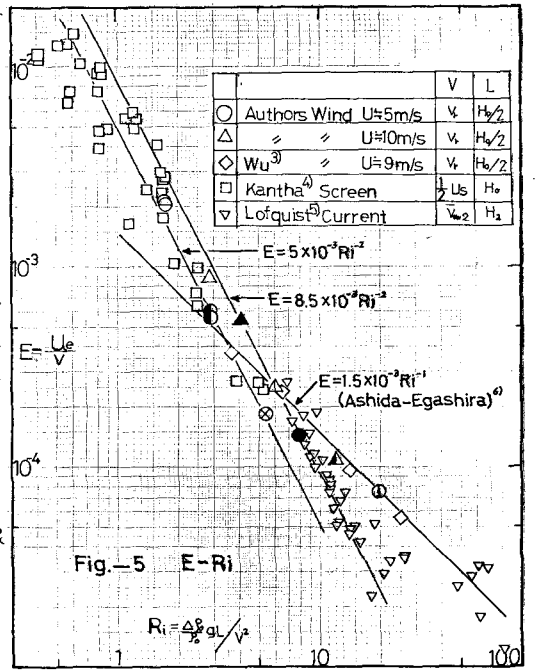


Figure-5 E-Ri

参考文献  
 1) 津山・児玉西村; 工学会西部支部年報 P.169 (1980)  
 2) 岸如藤; 第14回海岸工学講演集 P.240 (1967)  
 3) Wu, J.; J. F. M. vol. 61 P.275 (1973)  
 4) Kantha, L; Johns Hopkins Univ. Rep. GFDL/TR-75-1 (1975)  
 5) Lofquist, K; Phy. of Fluid vol. 3 No. 2 P.158 (1960)  
 6) 芦田・江頭; 京大防災研年報才18号 B.R.L (1975)