

二成層場の吹送流の乱れ構造と連行係数

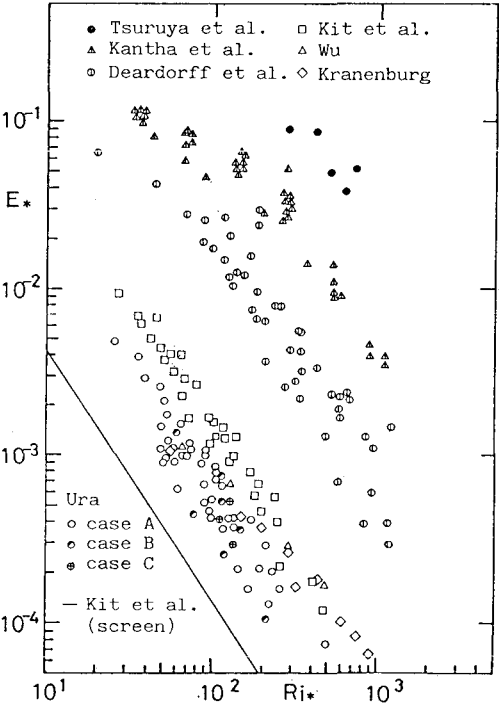
浦 勝*・岩 永 洋**・淡谷 武司**

1. ま え が き

成層化した水域の水表面に風による剪断応力が加わった場合の密度界面における連行速度を評価するために、これまで種々の実験的研究が行われてきた。これらの研究は実験に用いた水槽と剪断力の附加法によって表一1に示す4種に分類される。各分類における流れの特徴は水槽内に誘起される流れが密度界面上で剪断応力の方向に対して順流か逆流か、および水面に風波が存在しうるかどうかにある。ここでは各実験装置を用いて得られた連行速度を比較するために、淡・塩水による二層流のみを取り扱う。連行速度 u_e を直接的外力の代表速度である表面の水摩擦速度 $u_{*s}(=\sqrt{\tau_s/\rho_0})$ (τ_s は表面剪断応力、 ρ_0 は水の密度) によって無次元化したものを連行係数 $E_{*s}(=u_e/u_{*s})$ とする。界面の安定度を表すパラメータとしては、上層水深 h と相対密度差 $\varepsilon(=\Delta\rho/\rho_0)$ ($\Delta\rho$ は上・下層の密度差) および u_{*s} を用いた層平均リチャードソン数 $R_{i*}(=\varepsilon gh/u_{*s}^2)$ を用いる。表一1に示した実験者ら^{1)~7)}の結果を用いて E_{*} と R_{i*} の関係を示すと図一1となる。図一1よりわかることは、全ての E_{*} を R_{i*} の1つの関数として表すことはできないが、それぞれの実験による結果を

$$E_{*}=A_{*}R_{i*}^{-3/2} \dots\dots\dots (1)$$

と表示すれば、比例係数 A_{*} の値はそれぞれの流れに対して表一1に示すような範囲をとる。このように A_{*} の値が順流と逆流で大きく異なること、また表面波の存在



図一1 表面剪断流における E_{*} と R_{i*} の関係

によっても異なることは界面における流れや乱れ特性量の外部パラメータ u_{*s} , h に対する比が、それぞれの流れにおいて、ある限られた範囲の値をとることを示していると考えられる。

本報告は界面の連行現象が界面近傍の物理量によって支配されているとの考えから⁸⁾、分類3に属する風洞水槽を用いて、吹送流の流れと乱れ特性量を変化させた実験を行い、連行係数の実用的表示法について考察を行ったものである。

表一1 表面剪断力を用いた実験方法の分類

分類	水 槽	剪断応力 附加法	界面上の 流向	表面 波	実 験 者	A_{*}
1	環 状 水 槽	回転 スクリーン	順流	無	Kantha 他 ¹⁾ Deardorff 他 ²⁾	15~150
2	長方形水路	無限軌道式 スクリーン	逆流	無	Kit 他 ³⁾	0.13
3	風 洞 水 槽	風	逆流	有	Wu ⁴⁾ , Kit 他 ⁵⁾ , 浦 ⁵⁾ Kranenburg ⁶⁾	0.4~1.5
4	風洞水槽内の 塩水槽	風	順流	有	鶴谷他 ⁷⁾	700

* 正 会 員 工 博 九州工業大学教授 工学部開発土木工学科

** 学生会員 九州工業大学大学院 工学部

2. 実験装置及び方法

実験に用いた風洞水槽は図-2に示すように全長 6.0 m, 幅 0.2 m, 高さ 0.59 m の透明アクリル樹脂製である。風は、長さ 1.0 m の助走路直前で内寸 0.2 m 正方の断面に縮流され、長さ 5.0 m の貯水槽の水表面上を通り、水槽下流部より放出される。水表面上の風速分布は熱線風速計を、水表面変位量は容量式波高計を用いて、均質流体であらかじめ測定した。その後、貯水槽に水道水と塩水を用いて所要の密度差を有する二成層を形成した。水槽内の鉛直密度分布は上・下流部の 2 点 A, B において塩分濃度計を用いて測定した。水槽内の位置を表す座標軸は原点を水槽上流端の静止水面にとり、風下方向に x , 鉛直下向きに z をとった。界面の定義は上・下層の中間密度を有する位置とし、この深さを上層水深 h と表し、連行速度は $u_e = dh/dt$ とした。吹送流の流速分布は水槽のほぼ中央点 C において、円錐形の熱膜流速計を用いて測定した。

上記の測定は水槽内の流れ特性を変化させる目的で次の 3 つの case において行った。

Case A: 風路助走路部は、なめらか (smooth) で、水槽内には風波が発達する場合 (with waves)。

Case B: 助走路内面は case A の場合と同じであるが上・下層水に界面活性剤 (surfactant) としてドデシル硫酸ナトリウムを重量濃度 1.1×10^{-4} 混入し、風波の発生をほぼ完全に抑えた場合 (without waves)。

Case C: 風路助走路に高さ 0.5 cm の直角二等辺三角柱を間隔 3.0 cm で 0.2 cm のアクリル板にはりつけたものを設置し (rough), 風の乱れを case A の場合に対して変化させ、吹送流の流れと表面波に変化を期待した場合。

3. 実験結果

3.1 水表面の摩擦速度と水面変位量

表面の水摩擦速度 u_{*s} は (a) 吹送流の流速分布に対数則を適用する方法, (b) 水表面の風速分布に対数則を適用し、応力の連続を仮定する方法, (c) 二層密度界面の勾配から求める方法⁵⁾ のいずれか 2 つの方法を用いた。

(a) の方法の一例を示す。図-3 は case C の場合の

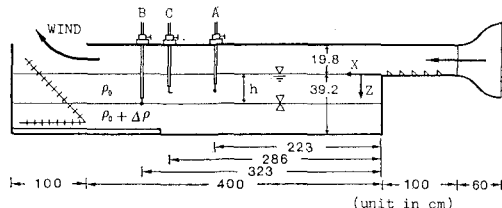


図-2 風洞水槽 (Case C の粗度を付けた場合)

二層場において測定した吹送流の平均流速 U を深さ z に対して片対数紙にプロットしたものである。水表面の順流部は、図中の直線で近似され、次の対数分布則に従うと言える。

$$(U_s - U)/u_{*s} = 5.75 \cdot \log(30z/k_s) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに U_s は表面流速, k_s は相当粗度である。図中にはこの直線の傾きより式 (2) を用いて求めた u_{*s} の値を示した。

図-4 はこのようにして求めた各 case の u_{*s} の値と水面上の一樣風速 U_{ma} の関係を示したものである。これより u_{*s} の値は助走路が smooth な場合に比べて粗度をつけるとわずかに大きくなり、surfactant を入れて表面波を抑えると小さくなるのがわかる。

水表面の変位量 η_s の rms 値 $\eta'_s = \sqrt{\eta_s^2}$ の風速に対する変化を図-5 に示す。図中の $x(\text{cm})$ は測定位置を表す。 η'_s の case A, C における差は明確ではないが、case B は表面波が抑制され検出できなかった。なお、

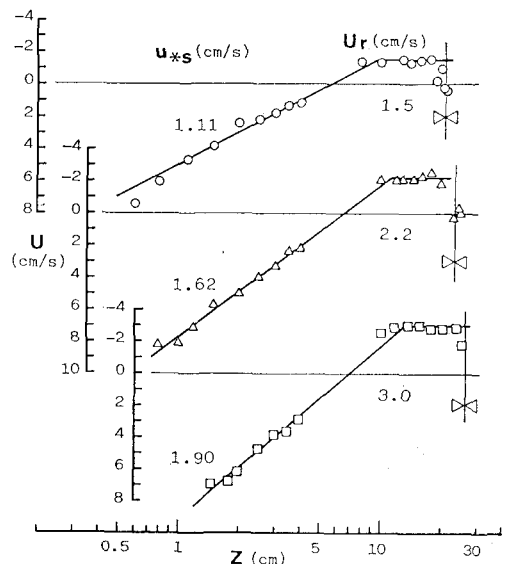


図-3 吹送流の流速分布 (Case C)

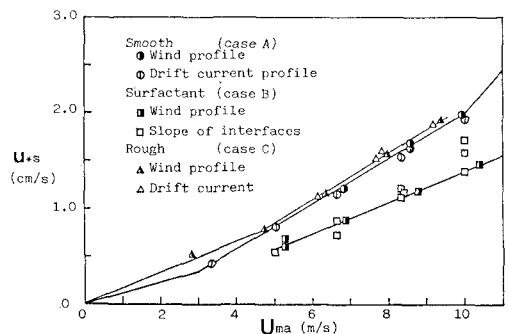


図-4 表面の水摩擦速度と一樣風速の関係

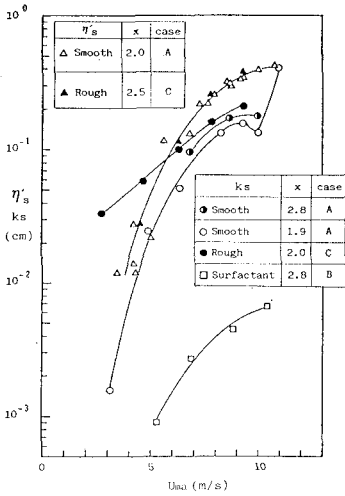


図-5 水表面変位量と相当粗度

有義波高 $H_{1/3}$ と η'_s の関係は $H_{1/3} = 3.60 \eta'_s$ であった。また、同図には水表面上の相当粗度 k_s も示した。これより、水表面の変位量は case C, A, B の順に大きくなっていると見える。

3.2 吹送流の平均流速と乱れ特性量の鉛直分布

吹送流の平均流速 U を u_{*s} を用いて無次元化し、これを z/h に対してプロットしたものを 図-6 (A-1), (B-1), (C-1) に示す。なお、流速の測定位置 z は測定時刻、測定場所における界面深さ h で無次元化している。これらはそれぞれ case A, B, C において測定されたものである。いずれの場合も、順流部流速は式 (2) で表されるが $z/h \approx 0.25$ で流向が逆転し、 $0.4 < z/h < 0.9$ でほぼ一様な逆流流速 U_r をとる。 U_r/u_{*s} の値は各 case に対して近似的に表-2 に示す関係にあるといえよう。

吹送流の時間変動量 u の rms 値 $u' (= \sqrt{u'^2})$ を u_{*s} で無次元化した値 u'/u_{*s} の鉛直分布を各 case に対して図-6 (A-2), (B-2), (C-2) に示す。同図より水表面の大きな乱れ強度は水深方向に減少し、逆流部 $z/h = 0.4 \sim 0.95$ の範囲でほぼ一様な値をとり、界面で減少することがわかる。逆流部の u' を u'_r と表示し逆流部乱れ強度 u'_r/u_{*s} の各 case における値を表-2 に示す。なお U_r を用いた乱れ強度 u'_r/U_r の平均値も表-2 に示した。

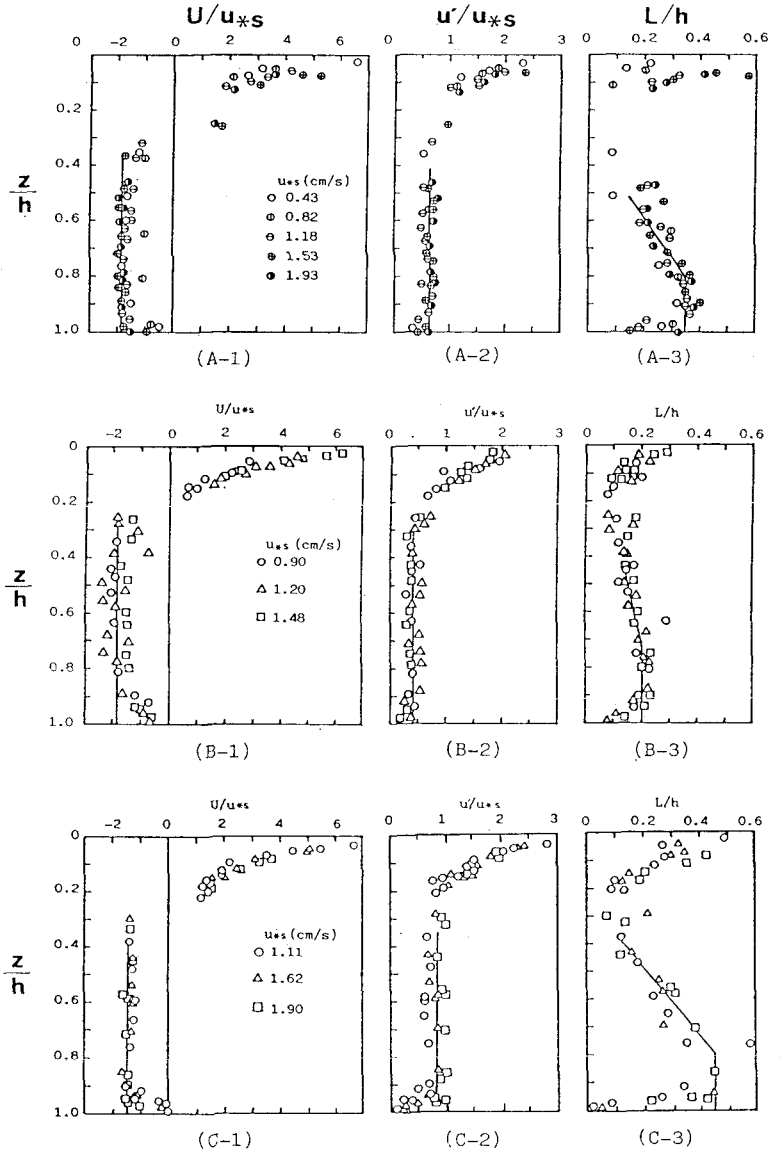


図-6 吹送流の平均流速と乱れ強度、乱れスケール

表-2 界面直上の流れと乱れ特性量の値

Case	U_r/u_{*s}	u'_r/u_{*s}	u'_r/U_r	L_r/h
A. Smooth	1.85 ± 0.3	0.65 ± 0.1	0.35	0.35 ± 0.05
B. Surfactant	1.85 ± 0.4	0.39 ± 0.15	0.21	0.20 ± 0.02
C. Rough	1.5 ± 0.15	0.82 ± 0.13	0.52	0.45 ± 0.05

乱れの代表的長さスケールとして、次式で計算されるマクロスケール L を求めた。

$$L = 0.8 u'^3 / \varepsilon_d \quad (3)$$

ここに ε_d はエネルギー散逸率である。なお、乱れの積

分スケール L_e および乱れの周波数スペクトル $E(f)$ より求められる平均渦のスケール $L_o (=U \cdot E(0)/4u^2)$ も求めた。その結果、逆流部では L_e , L_o ともに L と同程度の値をとることがわかったので、これを参考にして L の分布図を求めた。 L/h の鉛直分布を、図-6(A-3), (B-3), (C-3) に示す。これらの図より、水表面では水の波動運動のため大きなスケールをもつが水深方向にいったん減少し、逆流部では水深方向に増加し、 $z/h = 0.8 \sim 0.95$ ではほぼ一定の値 L_r となり、界面で減少することがわかる。各 case の L_r/h の値を表-2 に示した。以上表-2 に示した界面直上の乱れ特性値が界面の連行現象に主要な役割を果たすと考えられる。

3.3 連行速度

表-3 吹送流の実験条件と連行速度

Case	Exp. No.	$\epsilon_0 \times 10^4$	h_0 (cm)	u_{*s} (cm/s)	U_r (cm/s)	u_r'/U_r	L_r/h	$u_e \times 10^4$ (cm/s)
B	89	78	19.65	1.12	2.15	0.219	0.19	2.84
	90	78	19.65	0.834	1.80	0.211	0.15	0.884
	91	78	19.65	1.40	2.46	0.211	0.20	—
	92	42	19.0	0.834	2.65	0.211	0.20	6.48
	93	42	19.0	1.12	2.95	0.217	0.20	15.4
	94	78	19.0	1.40	3.25	(0.211)	(0.20)	6.36
	97	78	19.0	1.12	2.90	(0.217)	(0.20)	4.00
	106	78	19.2	1.12	—	(0.217)	(0.20)	5.93
C	601	250	19.2	1.90	3.00	0.58	0.45	10.0
	602	159	19.1	1.62	2.20	0.59	0.45	6.73
	603	89	19.2	1.11	1.50	0.50	0.45	3.25

連行速度の測定結果のうち、case A の場合は前報⁵⁾に示しているの、ここでは case B, C の場合の連行速度測定結果を吹送流の条件と共に表-3 に示す。なお ϵ_0 , h_0 は ϵ と h の初期値である。case A, B, C の実験で得られた連行係数 E_* と R_{im} の関係は図-1 に示した。同図より、case A, B, C の結果には系統的な差が見られず、 E_* に $2^{1/2}$ 倍の誤差を許せば、吹送流による連行は表面波に関係なく case A に対して示した関係式⁵⁾

$$E_* = 0.6 R_{im}^{-3/2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

で表示できるといえる。しかしながら、逆流を伴う流れに関して Kit 他⁶⁾が行った吹送流とスクリーンを用いた実験結果では、それぞれ $A_* = 1.5$ と 0.13 を得ており、波の存在の有無だけでは A_* の値が説明できないので、

逆流をもつ流れのすべてを E_* と R_{im} のみで表示するのは無理であろう。

4. 連行係数の平均流速表示

表面の水摩擦速度 u_{*s} を用いた E_* と R_{im} では表面剪断力に基づく連行係数しか議論することはできないし、前述のように表面波の存在の有無も説明できない。そこで、一般に平均流をもつ全ての二層流の連行速度を検討するために、代表流速として密度界面に相対的な平均流速 U_m を用いた連行係数 $E_m = u_e/U_m$ と、これを規定する量として U_m を用いた層平均リチャードソン数 $R_{im} = \epsilon g h / U_m^2$ の依存関係を調べてみる。

本実験の場合は U_m のかわりに逆流平均流速 U_r を用いて E_m と R_{im} を計算し、 E_m と R_{im} の

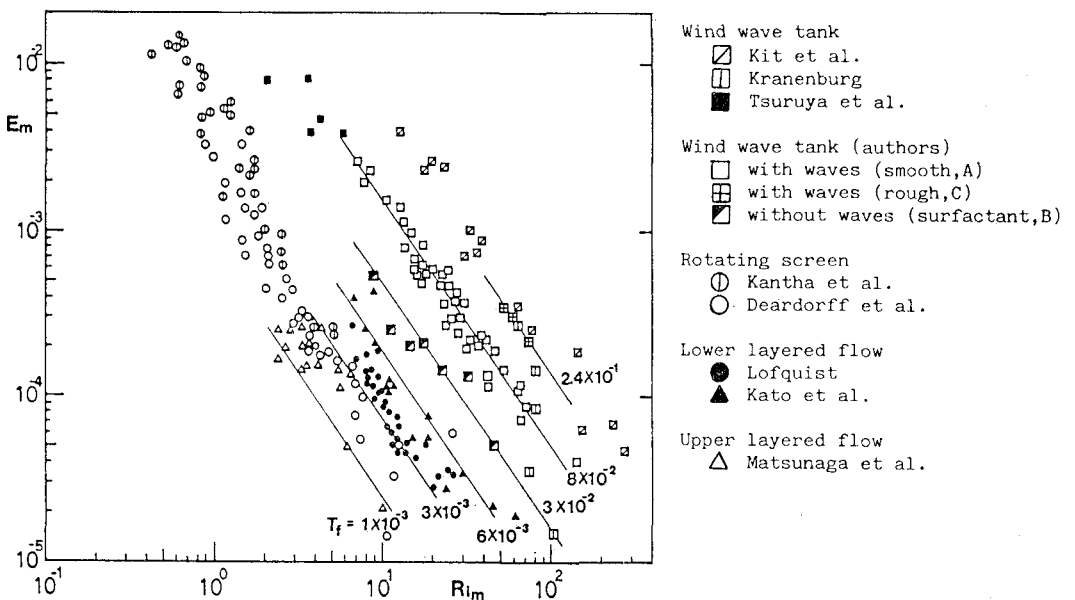
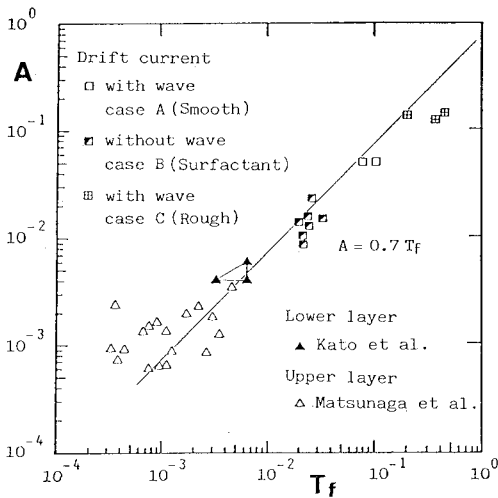


図-7 二層流の連行係数 E_m とリチャードソン数 R_{im} の関係 (数値は乱れファクター T_f の値)

図-8 係数 A と乱れ係数 T_f の関係

関係を図-7に示す。本実験における E_m の R_{im} に対する依存関係はいずれも

$$E_m = A \cdot R_{im}^{-3/2} \quad (5)$$

で表される。ここに A は比例係数であり、 A の値は case A, B, C に対して 5×10^{-2} , 1.6×10^{-2} , 1.38×10^{-1} である。なお同図には風洞水槽^{3,6,7}、環状水槽^{1,2}、上層流⁹、下層流^{10,11}の結果も示した。なお Kantha¹のデータはスクリーン速度 U_s が $U_s/u_{*s} = \text{const}$ となる時間帯において $dh/dt = u_e = \text{const}$ となることから、この時の値を用い $U_m = U_s/2$ として計算したものである。

また Lofquist のデータのうち、Csanady¹²の求めた有効動粘性係数 ν_e と動粘性係数 ν の比 ν_e/ν が 1.2 以下となるのは内部パラメータ $K(=u_{*i}^3/sg\nu; u_{*i}$ は界面における摩擦速度) が 0.03 以下と見なせるので、乱れが主要な役割をはたす場合を考えることにして $K < 0.03$ のデータは除外した。図-7より、全ての二層流の連行速度は乱れが卓越してくると式(5)で表示できるといえる。ここで比例係数 A を次式で定義される乱れ係数⁸⁾ T_f

$$T_f = (u'/U_m)^4 \cdot (L/h)^{-3/2} \quad (6)$$

を用いて整理すると図-8 のようになる。なお、 u' 、 L には表-3 に示した界面直上の乱れ強度と乱れのマクロスケールを用いた。同図より A は T_f によって一義的に定められ、 $1.4 \times 10^{-3} < T_f < 2 \times 10^{-1}$ の範囲で

$$A = 0.7 T_f \quad (7)$$

が成立するといえる。また図-7 には図-8 より得られる T_f の値を記入した。これより下層流や、スクリーン

による表面剪断流では $T_f = (3 \sim 6) \times 10^{-3}$ 程度の値をもつ乱れ構造になっているものと推定される。

5. あとがき

風洞水槽を用いて界面上の流れと乱れを変化させる実験を行い、これらの結果を示すと共に連行速度に及ぼす流れと乱れの間関係を調べた。その結果二層流に関して、乱れが卓越している場合は、界面上の平均流速差と界面位置およびその位置における乱れ強度と積分スケール(又はマクロスケール)が推定できれば式(5)~(7)式を用いて連行係数を求めることができることを示した。

最後に貴重な助言と討議を頂いた九州大学・工学部、松永信博助手に謝意を表し、実験と資料整理に尽力頂いた大学院生山本一君に謝意を表す。

参考文献

- 1) Kantha, L. H., O. M. Phillips and R. S. Azad: On the turbulent entrainment at a stable density interface, J. Fluid Mech., Vol. 79, pp. 753~768, 1977.
- 2) Deardorff, J. W. and Willis, G. E.: Dependence of mixed-layer entrainment on shear stress and velocity jump, J. Fluid Mech., Vol. 115, pp. 123~149, 1982.
- 3) Kit, E., E. Berent and M. Vajda: Vertical mixing induced by wind and a rotating screen in a stratified fluid in a channel, J. Hydraulic Research, Vol. 18, No. 1, pp. 35~58, 1980.
- 4) Wu, J.: Wind-induced turbulent entrainment across a stable density interface, J. Fluid Mech., Vol. 61, pp. 275~287, 1973.
- 5) 浦 勝: 風の剪断力による密度界面の変動と連行速度, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 561~565, 1983.
- 6) Kranenburg, C.: Mixed-layer deepening in lakes after wind setup, J. Hydraulic Eng., ASCE, Vol. 111, No. 9, pp. 1279~1297, 1985.
- 7) 鶴谷広一・中野 晋・戸秀久: 吹送流による密度界面の混合と乱れ特性, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 655~659, 1984.
- 8) 浦 勝・椿東一郎・松永信博・並川 正: 密度界面における連行に及ぼす乱れの寄与, 第29回水理講演会論文集, pp. 401~406, 1985.
- 9) 松永信博・浦 勝・並川 正・椿東一郎: 上層流における界面近傍の流れ特性, 第28回水理講演会論文集, pp. 345~351, 1984.
- 10) Lofquist, K.: Flow and stress near an interface between stratified liquids, The Physics of Fluids, Vol. 3, No. 2, pp. 158~175, 1960.
- 11) 加藤 始・中野 晋・池田高則: 下層2層流についての実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第21巻, 第1号, pp. 31~56, 1982.
- 12) Csanady, G. T.: Turbulent interface layers, Jour. Geophys. Res., Vol. 83, No. C5, pp. 2329~2342, 1978.