

## 412-⑨ 吹送流による密度二成層流について

九州工業大学 正 浦 勝  
 大学院 学 ○ 気玉 英信  
 学 柳本 達雄

1. はじめに 貯水池など閉じた水域において温度や物質濃度の差により鉛直方向に密度成層化されている場合が多いが、この状態で、水面に風が吹くと、表層部に波と吹送流が生じる。この吹送流による流れと乱れにより、下層部の流体が密度境界面を通して上層に運行されて上層濃度が増加していく。このプロセスを明らかにすることは、貯水池を熱交換器あるいは水資源として利用するためには重要なことである。

本報告は、外力として風により与えられる空気せん断力での何らか吹送流の形成に寄与しているかを解明するため、二層流の場の運動方程式と実験により、吹送流の流れのせん断力を直接求め、 $\tau_s/\tau_a$ を無次元量  $U_{xa}/\sqrt{gF}$  と関係を求めた結果を報告するものである。

2. 二成層の吹送流 密度界面の運行を規定する外部パラメータとしては風のせん断力が考えられる。しかし、このせん断力、すなわち、風から水への運動量輸送は水表面における表面波の運動量と吹送流の運動量となる。したがって、風のせん断力  $\tau_a$  は、水表面で波を造らせん断力  $\tau_w$  と、流れをつくるせん断力  $\tau_f$  になるとすると次式となる。

$$\tau_a = \tau_w + \tau_f \quad (1)$$

したがって、吹送流へ伝えられる応力と全外力の割合は次式で表わされる。

$$\tau_f/\tau_a = 1 - \tau_w/\tau_a \quad (2)$$

すなわち、吹送流に伝えられるせん断力は全外力のうち波の形成維持のためのせん断力の分だけ小さくなることが想像される。

風から水面に伝わるせん断力は保存されることから次式を得る。

$$\tau_a = \rho_a U_{xa}^2 = \rho_0 U_{xa}^2 \quad (3)$$

ここに、 $\rho_a$ : 空気密度、 $\rho_0$ : 水の密度、 $U_{xa}$ : 空気摩擦速度、 $U_{xo}$ : 水摩擦速度である。ところで、 $\tau_a$  は水表面の風速分布の測定から  $U_{xa}$  を求めて計算しうる。

一方、 $\tau_f$  を次のように表し、吹送流の摩擦速度  $U_{xf}$  を定義する。

$$\tau_f = \rho_0 U_{xf}^2 \quad (4)$$

ここで、二層流の流れの場を図1のように記述し、運動方程式から次のようにして  $\tau_f$  を求めうる。このとき現象は、 $x$ 、 $z$  の2次元定常状態を考え、内部境界面における連行量は考えない。 $x$  方向の主流が卓越し、 $\partial u / \partial x \ll \partial u / \partial z$  と仮定する。これより運動方程式は  $\epsilon$ : 渦動粘性係数、 $g$ : 重力加速度とすれば、

$$0 = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{2}{\rho z} (\epsilon \frac{\partial u}{\partial z}) \quad (5), \quad 0 = -g - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial z} \quad (6)$$

となり、この2式をそれぞれ上、下層において積分し、整理すれば次式を得る。

$$\tau_f = \Delta \rho g H_i (-\frac{\partial z}{\partial x}) \quad (7)$$

ここに、 $\Delta \rho$ : 上下層の密度差、 $H_i$ : 上層の水深、 $-\partial z / \partial x$ : 密度界面形状勾配である。したがって、 $\Delta \rho$ 、 $H_i$ 、 $-\partial z / \partial x$  を測定すれば  $\tau_f$  を求めうる。

また、吹送流の摩擦速度はもう1つの方法として、直接、吹送流の流速分布を測定し、これが対数分布則に従

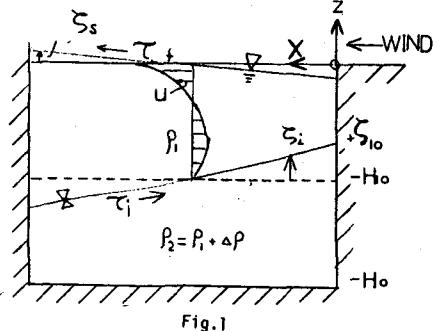


Fig.1

うとして次式からも算出しうる。

$$U_{kf} = (U_2 - U_1) / 5.75 \log_{10} (Z_1 / Z_2) \quad (8)$$

3. 実験装置及び方法 風洞水槽は  $600 \times 59 \times 20$  cm で、このうち風路高は 20 cm、貯水部は全木深 39 cm、長さ 500 cm である。実験は貯水槽に初期密度差  $\rho_0$ 、初期界面深さ  $H_0$  の 2 成層の場を水道水と塩水を用いて作り、風速は 7 フンの回転数を制御して実験を行った。式(4), (7)に従って  $U_{kf}$  を算出した実験条件の一例を表 1 の A1 ~ A5 に示した。代表風速  $U_b$ 、空気摩擦速度  $U_{*a}$  は  $X=200$  cm の値であり、 $Ria$  は  $U_{*a}$  を用いた Richardson 数 ( $Ria = \alpha g H_0 / \rho_a U_{*a}^2$ ) である。界面形状勾配  $\alpha/X = 0$  は  $X=50$  cm 毎に、目測して、各位置における界面位置をプロットして求めた。なお、

Table 1

Exp. No.	$U_b$ (m/s)	$U_{*a}$ (cm/s)	$U_{*0}$ (cm/s)	$Ria$	$dc_i/dx$ ( $\times 10^{-3}$ )	$U_{*f}$ (cm/s)	$T_f/T_a$	$U_{*a}/\sqrt{gF}$
A1	1.66	6.97	0.242	98.67	8.32	0.219	0.820	0.0141
A2	3.40	19.00	0.658	44.98	25.68	0.542	0.678	0.0384
A3	5.81	43.10	1.493	35.24	14.58	1.077	0.520	0.0869
A4	7.48	58.40	2.020	27.44	21.35	1.534	0.576	0.1180
A5	9.13	65.30	2.264	67.60	11.80	1.994	0.776	0.1319
B1	3.40	18.20	0.636	44.46		0.525	0.681	0.0368
B2	5.20	37.80	1.325	53.02		0.889	0.450	0.0764
B3	6.90	52.60	1.842	40.70		1.395	0.574	0.1063
B4	8.55	59.80	2.110	60.56		1.890	0.802	0.1208
B5	10.10	68.70	2.416	126.30		2.200	0.829	0.1388

確認のために、 $X=200, 280, 350$  cm で鉛直密度分布の測定から界面位置を求めた。 $U_{*0}$  は式(3)より、 $U_{kf}$  は式(4), (7)より求めたものであり、これより  $U_{kf}/U_{*0}$  および、 $T_f/T_a$  を求めた。また、式(8)に従って  $U_{kf}$  を求める実験は、表 1 の B1 ~ B5 の実験条件で行った。この実験ではコニカルタイプのホットフィルム流速計を  $X=250$  cm にセットして、上層の水表面近傍の流速分布を求めた。なお、測定値はデータレコーダに記録し、統計処理を行った平均値を用いた。

#### 4. 実験結果

図 2 は空気流により水に加えられた水の摩擦速度  $U_{*0}$ 、吹送流の流れの摩擦速度  $U_{*f}$  を風の代表風速  $U_b$  の関係として示した。 $\circ, \bullet$  は式(3)により算出した  $U_{*0}$ 、 $\square, \blacksquare$  はそれぞれ式(7), (8)により算出した  $U_{*f}$  であるが、ほぼ同一の値を示している。風速の増加とともに、 $U_{*0}$  は 4 つの直線で示されるよう変化を示すが、 $U_{*f}$  は風速が  $0 \sim 3$  m/s の低風速が、 $10$  m/s の高風速では  $U_{*0}$  との差は小さいが、風速  $4 \sim 9$  m/s の範囲では  $U_{*0}$  との差が大きくなることがある。

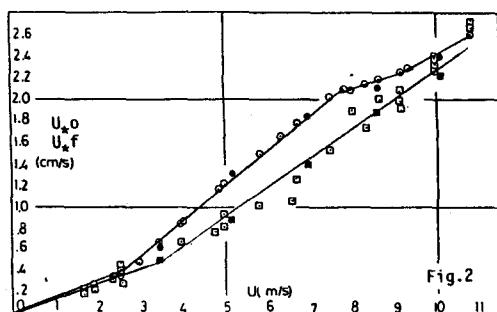


Fig. 2

図 3 には水の流れをつくるせん断力  $\tau_s$  と風のせん断力  $\tau_a$  の比率  $\tau_s/\tau_a$  を風のせん断力の無次元表示  $U_{*a}/\sqrt{gF}$  で関係づけたものを示した。 $\square, \blacksquare$  は式(7), (8)をそれぞれ用いて算出したものである。これより、 $U_{*a}/\sqrt{gF}$  が  $0 \sim 0.02$  では  $\tau_s/\tau_a$  の比率が大きいことから、風のせん断力は大部分が水の流れをつくり、波を起こしていない。また、

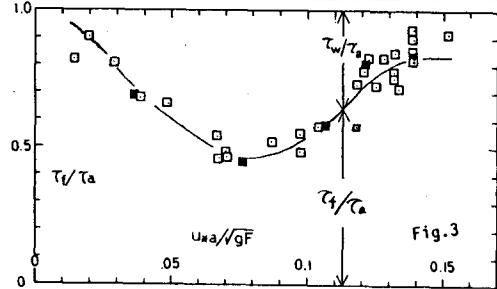


Fig. 3

0.02 ~ 0.13 と風速が増加するにつれて、 $\tau_s/\tau_a$  が減少していることから、風のせん断力のうち、かなりの部分が、波をつくるせん断力に費やされていることがわかる。これは  $U_{*a}/\sqrt{gF}$  が  $0.13$  以上に増加すると  $\tau_s/\tau_a \approx 0.8 \sim 0.9$  とほぼ一定となる。これは、 $U_{*a}/\sqrt{gF}$  が  $0.13$  以上 (図 2 において  $U_b > 9.5$  m/s) では波が発達した平衡領域に達していることから妥当な結果であり、Phillips<sup>2)</sup> の  $\tau_s/\tau_a \approx 0.2$  とも一致する。

5. おわりに 最後に御指導いただいた九州大学工学部橋東一郎教授はじめ、助言をいただいた九太小松利光助教授、柴田敏彦技官、本学講師土木工学科、西村直人技官、大学院生、足田芳徳、松村武男、卒論生江口尚、川上英人、林間俊一の各君に心から謝意を表す。

(参考文献) 1) 清、松村、江口、川上、土木学会西部支部年譲(1982) 2) Phillips, O.M.; The Dynamics of the upper Ocean, 2nd. ed (1977) P191