

北海道大学工学部 正会員 岸 力
 北海道大学工学部 学生会員 加藤 正彦
 北海道大学工学部 学生会員 小野 正二

1 概説

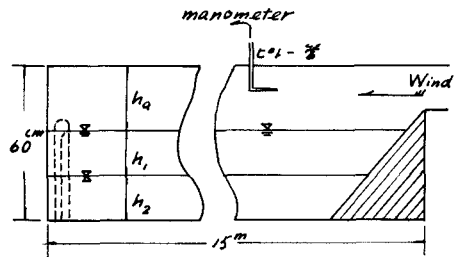
近年 臨海工業地帯における工業用水に利用するため、河口湖を建設し河川流量の貯溜をはかる、計画がある。 実際、千葉県では、河口湖開発委員会のもとに、小櫃川にモデル河口湖を建設し実験及び観測を行っている。 しかし河口湖において問題となるのは 下層に形成される塩水層が風により淡水層と混合を起し、淡水層に塩分を輸送するため 工業用水として使用することが不可能となることである。 本研究では風により Basin 内に生ずる乱流速度分布を測定し 又風による二相流の混合について 実験的に考察した。

Fig. 1 水路及び装置.

2 実験装置

実験に用いた水路及び装置を Fig. 1 に示す。

Blower の容量は 0~50 %sec であり 径 5cm~20 cm までのオリフスプレートを変えることにより風速を変化させる。 マノメーターには n-ヘキサンを使用した。 流速測定は流速が低流速のため、適当な流速計がなく、キシロール ($C_6H_4(CH_3)$ 比重 2.875)、四塩化炭素 (CCl_4 比重 1.594) の混合液に、アスファルトを少量混合した油滴を所定の比重として、ある区間を通過するに要する時間を測定して、流速を測定した。 塩分濃度の測定には 電導度計を使用した。



3 風による水面セリ断力

水面セリ断力を決定するには、水面勾配を測定し

$$\frac{dh}{dx} = \frac{n \tau_s}{\rho g h} \quad (1)$$

より求める方法があるが、本実験では set-up が 1mm 程度であり 測定困難なため 風速分布より決定した。 Fig 2 に水槽内の鉛直風速分布を示す。

風速分布が対数法則に従うものとするとき次式が成立する。

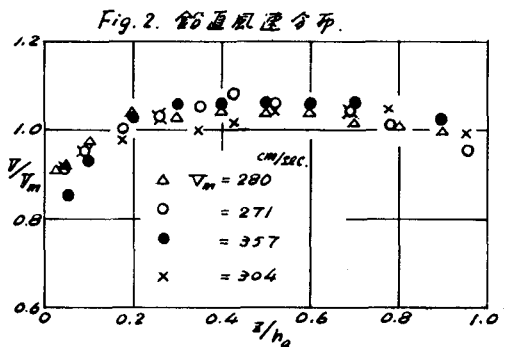
$$\frac{V}{V_{*a}} = \frac{1}{k} \log \frac{z}{z_0} \quad (2)$$

実験結果より水面セリ断力 τ_s を求めてみると、(3)式の関係を得た。

$$\tau_s = 1.011 \times \rho_a V_m^2 \quad (3)$$

ρ_a : 空気密度

V_m : 風洞内平均風速



4 表面流速と風速との関係

吹送流の表面流速に関する研究は Keulegan, Van Dorn によって行われている。

我々は Keulegan の実験に準らい、水面に波が発生している場合及び、波のない場合につき $Re = \frac{U_s h}{\nu}$ が $10^4 \sim 10^5$ の範囲で表面流速を測定し Fig 3, Fig 4 に示す。

測定にはパラフエンの薄片を用いた。

Keulegan の示唆により 水槽内の水量の

0.4% の液体洗剤を混合した所、風速が 10 m/sec 程度までは水面に波を生じなかった。液体洗剤を混入した流体の物理的性質は次のようであった。

動粘性係数 $\nu = 1.26 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{sec} \quad (15^\circ\text{C})$

表面張力 $T = 76.69 \text{ dyne/cm} \quad (20^\circ\text{C})$

Keulegan は $Re = \frac{U_s h}{\nu}$ が $1 \sim 10^5$ の範囲にわたり測定している。それによると、 $Re = \frac{U_s h}{\nu} = 500$ 程度までは $U_s/\nu = 76 \times 10^4 \left(\frac{U_s h}{\nu}\right)^{1/2}$ なる関係が成立するがレイノルズ数の増大とともに、 U_s/ν の値は 0.033 に漸近するとしている。Van Dorn は $Re = \frac{U_s h}{\nu}$ が $10^4 \sim 10^6$ の範囲につき測定し Keulegan の実験曲線がかなり一般性を有するものと述べている。

Fig 3, Fig 4 に示すとおり、我々の実験値も Keulegan の実験曲線とかなりの一致をみている。

又、表面に波のある場合と表面に波がない場合とを比較すると、両者にほとんど差がなく、これも Keulegan の指摘する所である。

これらの実験結果より、 $Re = \frac{U_s h}{\nu}$ が大きくなり、流れが turbulent になると、 U_s/ν の値はレイノルズ数に無関係に 0.03~0.04 に近づくものと思われる。Fig 5 には U_s/U_h の値について調べてみた。風速は、その測定の位置が水面からどの程度の高さであるかにより異ってくる。そのため、水面摩擦速度を用いて整理してみた。しかし Fig 5 に示されているように、Keulegan による実験曲線は、我々の測定値よりも小さくでている。これは、Keulegan が水面勾配より求めた水面摩擦速度が我々が風速分布より求めた水面摩擦速度よりも大きいため、あるいは、表面流速と風速との関係が異なるためであるが、その問題は、今後実験により解決したいと思う。

5. Basin 内の流速分布

Basin 内に生ずる吹送流の流速分布を調べることは、二層流の混合を論ずる上で非常に重要なことである。すなわち 塩水、淡水二層の境界面附近では、風によりどの程度の逆流速度が生ずる

Fig. 3. (presence of wave)

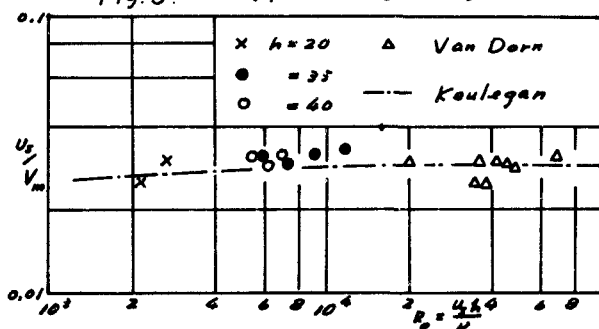


Fig. 4 (absence of wave)

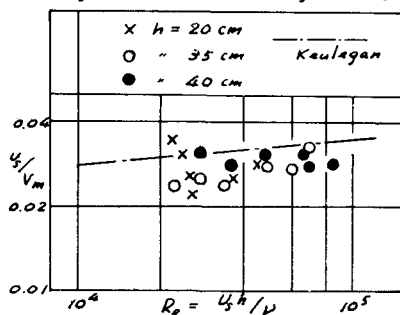
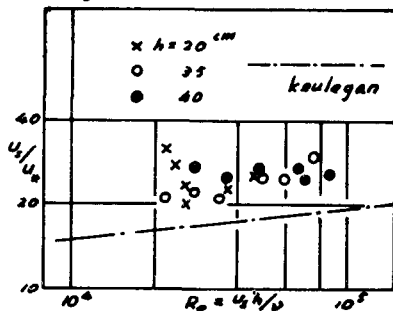


Fig. 5 (absence of wave)



かという事は、境界面の安定に大きな影響がある。流れが laminar であれば簡単に流速分布が求められる。

しかし、流れが turbulent になると直接的には解析が困難である。

又、turbulent 流の吹送流々速分布に関する研究も非常に少なく Bains & Knapp, Francis の研究がある程度である。我々は二層流の混合に関する研究に重要である turbulent の吹送流々速分布を、淡水層だけの場合と淡水、塩水二層の場合について、実験的に求めた。先にも述べたように、流速測定には油滴を用いたため測定は非常に困難であった。Fig. 6 Fig. 7 に示す流速分布は、数百回の測定値の平均値である。

我々の実験では、Bains & Knapp の実験曲線と異なり、底面附近にははっきりした凸部は認められず、かなり一様な逆流々速分布を示している。

又、一層の場合と二層の場合では、流速分布の形状がかなり類似していることが認められる。二層の場合、境界面下 1~2 cm の所まではわずかなが、流れが認められた。

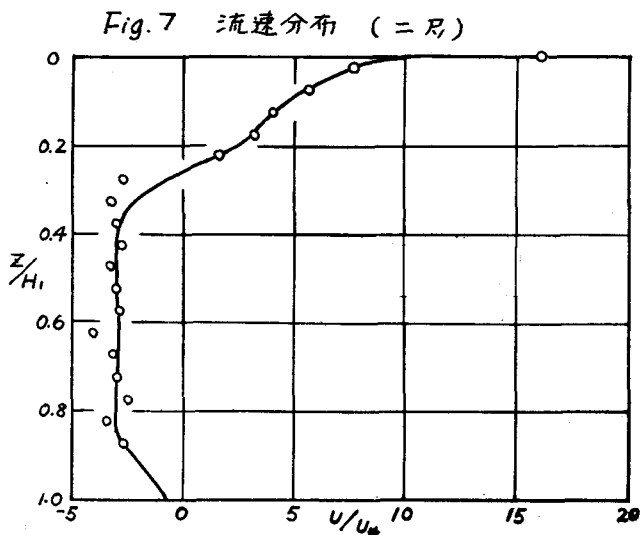
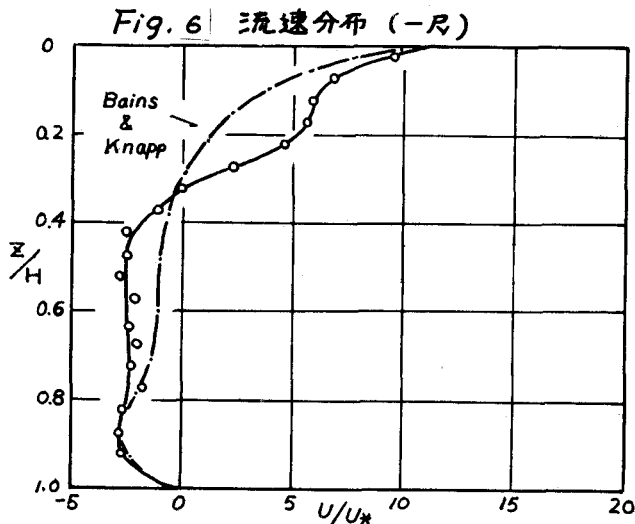
Bains 等も述べているが、本実験においても逆流部の面積が 2 割ほど大きい。あるいは水路内に 3 次元的な流れがあるかもしれない。二層流の混合に影響がある境界面附近の逆流々速は、本実験では $U_r/U_* = 3.2$ である。水面セリ断力は (3) 式で表わされるから、次の関係を得る。

$$U_r = 3.59 \times 10^{-3} V_m \quad (4)$$

又表面流速は流れが turbulent になると、 $U_s/V_m = 0.03 \sim 0.04$ となるから、境界面附近の逆流々速は、表面流速の約 10% 程度であることがわかる。

6 二層流境界面の安定

密度差のため二層に別れている流体の境界面安定問題は、古くから研究されている。二層流において、上下層の相対速度が限界値以下では境界面は内部波を生ずることなく安定であるが、相対



速度がある限界を越えると 境界面には内部波が発生する。我々の観察によると、内部波は境界面のあちこちに、小山をなして現れ、さらに相対速度が増加すると、波頭から破裂して塩水は上層へ舞い上がる。

これは Keulegan の観察とよく似ている。Keulegan は境界面に内部波を生ずることなく流れる最大流速を U_0 とし、境界面に内部波が現れる時の流速を U_1 とし、 U_0 と U_1 の相対平均

均をとり限界流速とした。限界流速を用いた Keulegan 数が限界 Keulegan 数であり、彼によると次のようになる。

$$Re = \frac{U_1 h_1}{\nu} < 1800 \quad K \text{ 対 } L \quad \theta = 0.127$$

$$Re = \frac{U_1 h_1}{\nu} > 1800 \quad K \text{ 対 } L \quad \theta = 0.178$$

我々の実験からは限界 Keulegan 数 $\theta = 0.30$ を得た。すなわち限界流速は 2 cm/sec 程度である。残念ながら実験例が少なく、確実に決定づけることはできないが、混入速度が 0 となる流速が 2 cm/sec となることから判断して妥当と思われる。

7. 下層塩分の混入速度

Fig. 8 に示す鉛直方向の塩分濃度分布を時間的に測定することにより、下層塩分の混入速度を調べることができる。 U_m を単位時間に境界面の単位面積を通り上層に混入する下層流体の体積、 V_0 を上層流体の体積、 C_0 を下層流体の単位体積当りの塩分、 A を境界面の面積、 ΔC を Δt 時間に上層の単位体積に混入する塩分とすると

$$V_0 \Delta C = A U_m C_0 \Delta t \quad \text{であるから、} \quad U_m = \frac{V_0}{A} \cdot \frac{\Delta C}{C_0 \Delta t} \quad \text{なる関係を得る。鉛直方向の濃度分布は、かなり一様であるから、単位面積を有する water column を考え、混入速度 } U_m \text{ を次式で表す。}$$

$$U_m = h_1 \cdot \frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{\Delta C}{C_0} \quad (5) \quad h_1: \text{上層水深}$$

(5) 式を用い U_m を計算し、流速々速との関係を調べると Fig. 9 が得られる。これより、 U_m と U_r との関係は次式で示される。

$$U_m = 4.0 \times 10^{-4} (U_r - 2.0) \quad \text{cm/sec} \quad (6)$$

限界流速は 2 cm/sec 程度であることから (6) 式を次式に書きかえることが可能である。

$$U_m = 4.0 \times 10^{-4} (U_r - U_c) \quad (7)$$

Keulegan の求めた実験式 $U_m = 3.5 \times 10^{-4} (U - 1.15 U_c)$ は我々が求めた (7) 式にかなりよく類似していることがわかる。なお、本研究の一部は、文部省総合研究、河口湖の水理学的研究（代表者 阪大 室田 明教授）によるものである。

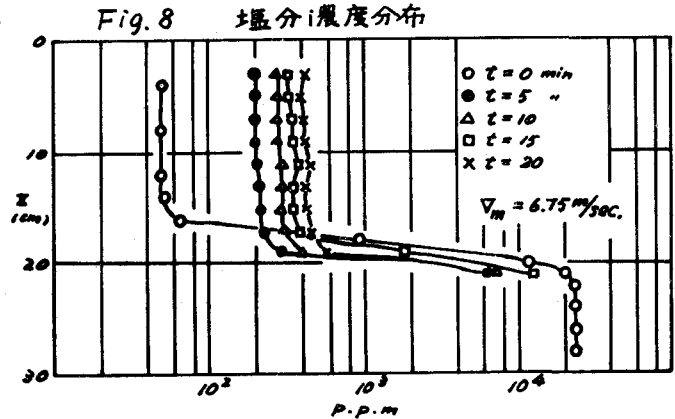


Fig. 9

