

# 密度流の流速分布に関する実験

電力中央研究所 正会員 日野 幹雄  
同 四方 浩  
同 中井 真行

矩形断面の開水路に水深方向に密度勾配のある流れを作り、層流・遷移・乱流の各状態について流速分布を測定した。この実験のために、水素気泡法による流速分布の測定器および塩分濃度計の試作を行った。また、カルマン渦の発生についても二、三の実験を行った。

## 1 序 論

今まで取扱われて来た密度流の問題は、上下二層の場合が多かったが、ここでは密度が深さ方向に変化し断面全体にわたって流れている場合を対象とした。

流れが密度勾配をもつと、流速分布や抵抗係数が均一な流体の場合と異なることは、Vanoni<sup>1)</sup>の実験以来土砂流については良く知られている。また、日射による対流や地面からの熱輻射のために温度成層の形成されやすい大気の接地気層内の風速分布についても Monin-Obukhov の相似理論<sup>2),3)</sup>による研究が進んでいる。今ここで、密度勾配のある水の流れを取り上げるのは、固体粒子の浮遊によって作られる密度流と塩分濃度の変化による密度流とではその特性が当然異なるであろうと考えられるし、またせん断応力  $\tau = -\overline{u'v'} = \text{const}$  と考えられる接地気層とせん断応力が水深方向に変化する水路流とでも差異があると考えられるからである。一方、大気汚染や水質汚濁と関連して、こうした密度分布のある流れを実験室内に作り、流れの安定度と拡散係数との関係を明らかにしようとの要請もあるからである。すでに温度成層風洞は二三造られているが、<sup>4),5)</sup> 密度勾配をもつ流れを作ることは水の場合がより簡単であり、また flow visualization の点でも有利と考えられる。

## 2. 実験装置

水路系： 実験を行った水路は断面が  $6 \times 6 \text{ cm}$ 、長さが  $350 \text{ cm}$  で、水理実験用としては特に小型のものである。水路のディメンションが小さい上に、水路上流のリザーバーなどに整流格子を 2~3 個取りつけたので流れはそのままでは層流状態にある。それゆえ、水路上流に turbulence stimulator や乱流格子を取付けて、遷移や乱流状態をつくった。

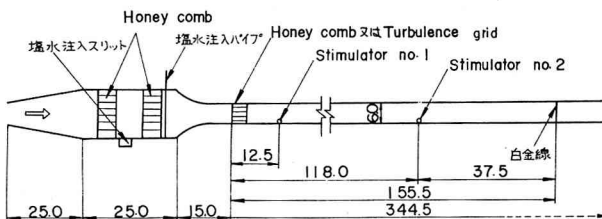


図-1 実験水路

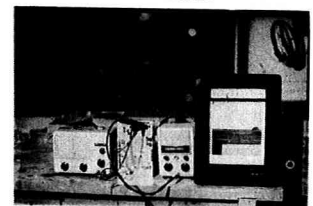
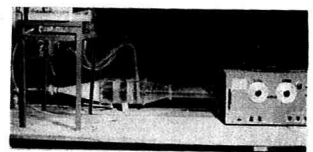


図-2 実験装置

流速分布は  $x = 15.5.5 \text{ cm}$  , カルマン渦は  $x = 5.8 \text{ cm}$  の所で行った。密度分布は、整流槽内に小孔を多数あけたパイプ 11 本から塩水を噴出させるとか、整流槽の底面のスリットから塩水を出して作った。

水素気泡法による流速計：この実験は密度勾配のある流れの安定度と拡散係数との関係を調べることを目的の一つとしてはじめられたので、特に  $10 \text{ cm/s}$  以下の微流速を対象とした。ビート管や小型のプロベラ型流速計は使用しえないし、試作した hot-film 流速計も思わしくなかったので、浜<sup>6)</sup>, kline<sup>7)</sup> その他<sup>8),9)</sup> が最近使いはじめた水素気泡法による flow visualization の方法を採用ことにした。これは細い金属線を陰極とし、流れている水を直接電気分解して金属線に発生する水素の微気泡をトレースとする流れの観察法である。金属線に通ずる直流電流をパルスにすれば、次々に発生する水素気泡の白い線から流速分布がえられ、また金属線に一定間隔でキンクを付ければキンクから流れる水素気泡から streak line (流跡線) が観察される。

われわれの用いた直流パルス発生装置は、出力約  $1 \text{ kv}$  (パルスの繰返し周期は  $140 \mu \text{sec}$  まで) また通電時間は  $0 \sim 2.2 \mu \text{sec}$  である。パルス発生器の原理と主要構成部は図-3のブロック線図に示すとおりである(製作は開発電子)。

塩水の導電率はその濃度によって大きく変化するから直流パルス発生装置の容量は大きくとってあり、直列に可変抵抗器を入れて電流を調節している。陰極としては太さ  $100 \mu \sim 15 \mu$  の白金線を用いた。

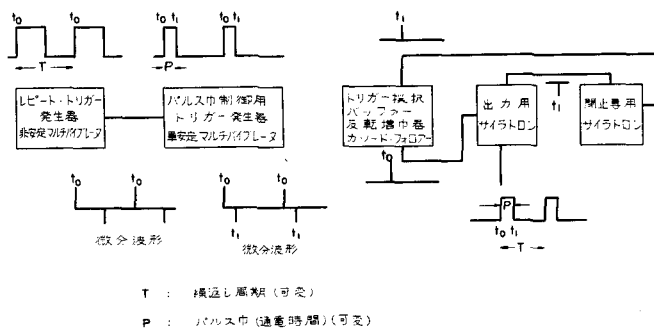


図-3 直流パルス発生器の原理と主要構成部のブロック線図

塩水濃度計：塩水濃度は図-4に示すコールラウシュ・ブリッジを使用した回路により測定した。プローブはベークライト樹脂に白金線を埋込んだもので、白金線の先端は白金ブラックとした。試作した計器の不均衡電圧と塩水密度との関係は、図-5のようである。液温による検定曲線の変化も調べたが  $20^\circ \text{C} \pm 3^\circ \text{C}$  の間では液温の影響は無視できることが認められた。

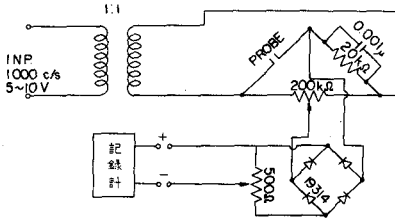


図-4 電導度計回路図

### 3. 流速分布・密度分布についての実験

層流 : 前にのべたように水路のディメンションや流速が小さいし, honey comb の効果が良くきいて, 流れはそのままでは層流状態

である。図-6はこのような状態での  $x = 155.5\text{ cm}$ における流速分布の写真である。均質流体の場合に較べて密度流の場合には, 境界層の発達が少く, また流速分布が丸みをおびていることがわかる。密度分布は図-9のようである。塩分濃度計のトレースをみると水路底に近い所では濃度の時間変化はほとんどないが, 水面近くでは濃度変動はかなり激しくなっている。

遷移 :  $x = 12.5\text{ cm}$ と  $x = 118.0\text{ cm}$ の水路底に一辺約  $6\text{ mm}$ の四角柱と径約  $6\text{ mm}$ の円柱を turbulence stimulator として入れたときの流速分布の写真が図-7である。密度分布は stimulator を付けても変化はなかった(図-9)。このときの流れは, 図-7にみるように未だ乱流状態にはなっていない, 層流から乱流への遷移の状態にあると云える。このような境界層の層流から乱流への遷移は, high-shear layer での vorticity の形成によって行われることが最近の研究からわかって来たが<sup>6), 10), 11)</sup>, 図-7(a)の均質流体の流速分布にもこの過程がみられる。これに反して, 図-7(b)の密度流の場合には未だ遷移過程が十分でなく, 遷移の発達が押えられていることが明らかである。また, こうした遷移の過程に発達する“縦渦”についても観察を推めている。縦渦は水路の2次流の形成・落水束の分解・砂漠地方のワジなど水理現象にも大いに関連している。<sup>12), 13)</sup>

乱流 : 流速を大きくし, また乱流格子などによって流れを乱流状態にした場合の写真が図-8, これから読みとった流速分布が図-10である。(  $U_0 = 10\text{ cm s}$ ,  $h = 6\text{ cm}$ )これからカルマン定数  $\kappa$ , 摩擦速度  $U_*$  をもとめると  $\kappa \approx 0.1$ ,  $U_* = 0.45\text{ cm s}$  である。密度勾配のある場合 ( $R_i > 0$ ) には, カルマン定数  $\kappa$  が均質流の場合の  $\kappa = 0.4$  より小さくなることは土砂流の場合には良く知られている。塩水密度流でもこのように  $\kappa$  の減少がみられるが, この実験の場合には極端すぎるように思われる。この点について今後さらに Richardson 数との関係を調べる必要がある。

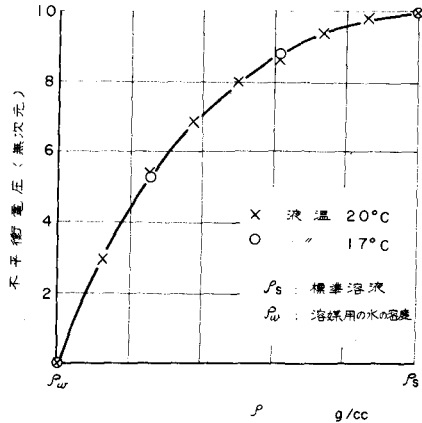
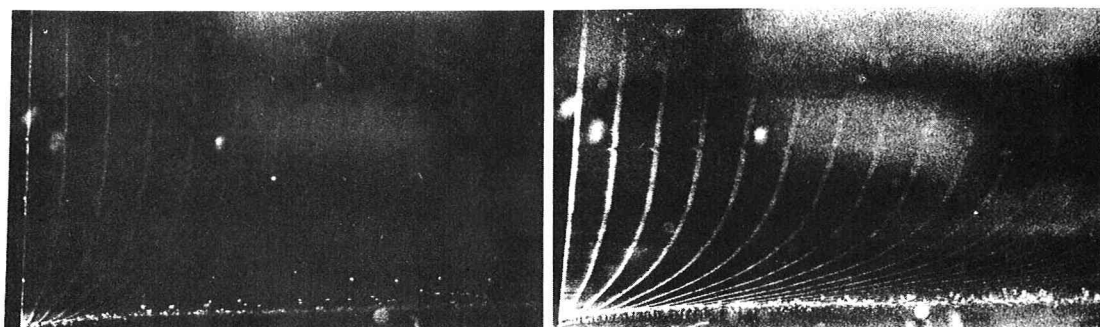


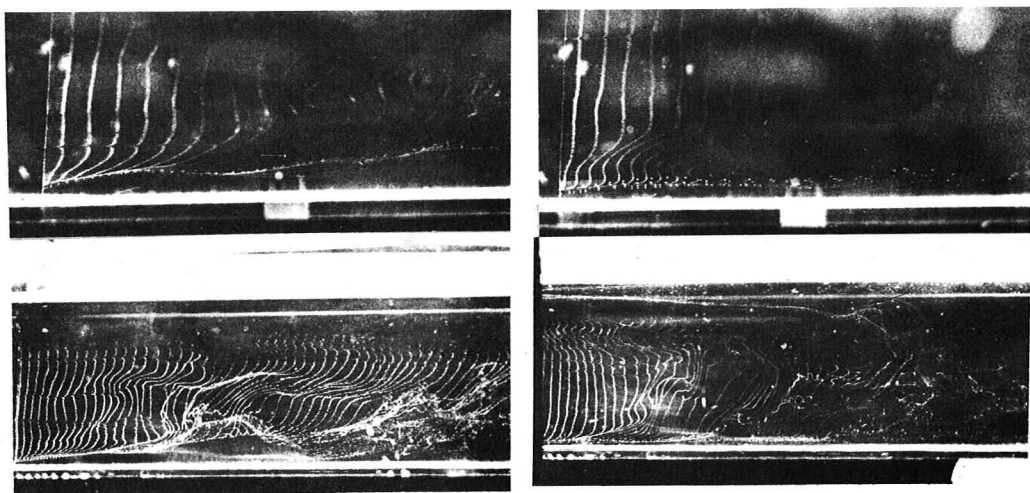
図-5 密度～不平衡電圧検定曲線



a) 均質流体

b) 密度流  $\frac{d\rho}{dz} = 5 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^4$

図-6 層流状態での流速分布,  $U_r = 6 \text{ cm/S}$



a) 均質流体

b) 密度流  $\frac{d\rho}{dz} = 6 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^4$

図-7 遷移状態での流速分布 ( $U_0=6\text{cm/s}$ (上段),  $U_0=10\text{cm/s}$ (上段))

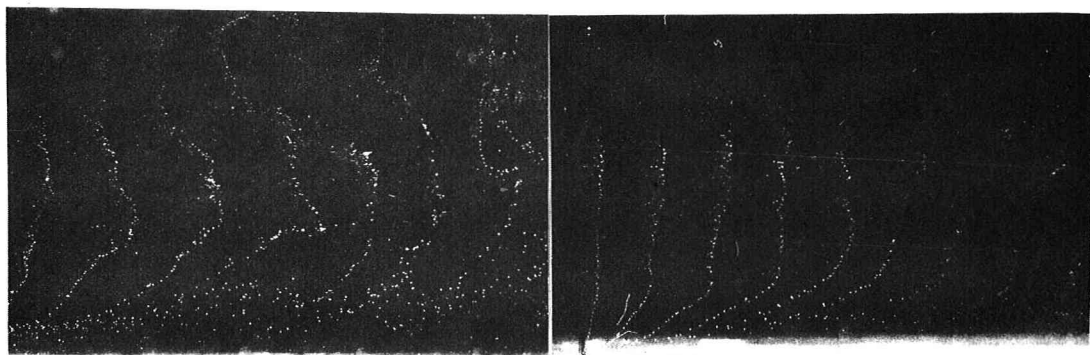


図-8 乱流状態での流速分布

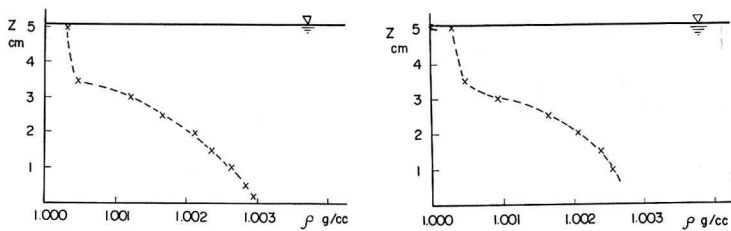


図-9 密度分布

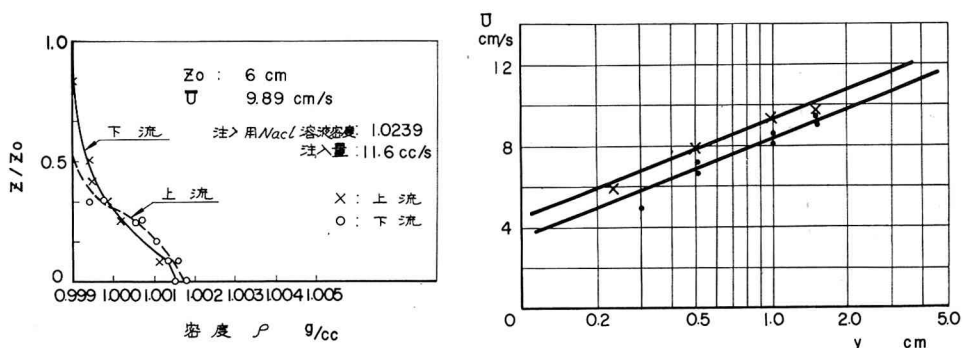
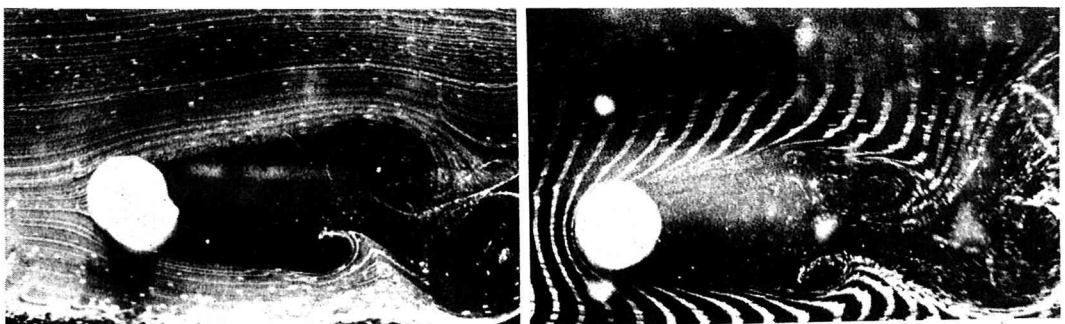


図-10 流速分布および密度分布(乱流の場合)

以上、層流・遷移・乱流の各状態における均質流体と密度流の特性の違いを、水素気泡法による観察にもとづいて簡単に述べたが、そのどの状態にも新しい問題が含まれていることがわかった。今後これらについて詳しく研究するつもりである。

#### 4. カルマン渦

流れの中の物体から交互に発生するカルマン渦は、流れの不安定現象であるから、柱体の軸が水平におかれている場合のカルマン渦の特性は、均質流体と密度流とは異なることが当然予想される。し



a) 均質流体

b) 密度流

図-11 カルマン渦の発生 ( $U_0 = 6 \text{ cm/s}$ ,  $Re = 315$ )

かし,  $d\rho/dz = 0$  および  $d\rho/dz = 8 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^3$  の場合について,  $Re = U_0 d\rho/\nu = 315, 210, 140$  の3ケースについて両者の間にはっきりとした差異を認めることはできなかった。

## 参 考 文 献

- 1) Vanoni, V.A.: Transportation of suspended sediment by water, Proc. A.S.C.E. Vol. 70, (1944)
- 2) Lumley, J.L. and Panofsky, H.A.: The structure of atmospheric turbulence, Interscience Publishers, (1964)
- 3) モーニン・ヤグロム: 統計流体力学—乱流力学 第1部 (露文) (1965)
- 4) Webster, C.A.G.: An experimental study of turbulence in a density-stratified shear flow, J. Fluid Mech. Vol. 19, 221-245 (1964)
- 5) Cermak, J.E., Sandborn, V.A., Plate, E.J., Binder, G.H., Chuang, H., Meroney, H. R.N. & Ito, S.: Simulation of atmospheric motion by wind-tunnel flows, Fluid Dynamics and Diffusion Lab, Colorado State Univ. May (1966)
- 6) Hama, F.R. and Nutant, J.: Detailed flow-field observations in the transition process in a thick boundary layer, Proc. 1962 Heat Transfer and Fluid Mech. Institute.
- 7) Schraub, F.A., Kline, S.J., Henry, J., Runstadler, Jr., P.W. and Littell, A.: Use of hydrogen bubbles for quantitative determination of time-dependent velocity fields in low-speed water flows, Trans. ASME, J. Basic Eng. Vol. 87 429-444, jun. (1965)
- 8) Clutter, D.W. and Smith, A.M.O.: Aerospace Engineering, Vol. 20, 24 (1961)
- 9) 浅沼 強・武田 定彦: 水の電気分解による流れの可視化について, 日本機械学会論文集 31巻, 222号, 223-232 (1965)
- 10) 谷 一郎: A review of some experimental results on boundary-layer transition, International Symposium on Boundary Layers and Turbulence including Geophysical Applications, Sep. 19-24, Kyoto (1966)
- 11) 荻田 広之: Non-linear development of disturbance in a laminar boundary layer, Int. Sym. Boundary Layer and Turbulence, Sep. 19-24, Kyoto (1966)
- 12) Karcz, I.: Secondary currents and the configuration of a natural stream bed, J. Geophys. Res., Vol. 71, No. 12, jun (1966)
- 13) Levi, E.: Longitudinal streakings in liquid currents, J. Hydraulic Research, Vol. 3, No. 2, 25-39 (1965)