

上水汚泥の円管内流速分布について

東北大学工学部 学生員 ○植松静夫  
正会員 佐藤敦久  
学生員 陳 鴻霞

1 まえがき: ニュートン流体の円管内乱流流速分布に関する研究は従来から数多くなされてきたが、非ニュートン流体についてその理論的解析は極めて複雑である。一方 上水汚泥を対象とした流速分布に関する研究は未だ行われていない。そこで、本研究は上水汚泥を指数法則流体モデルとして取り扱い、円管内における断面流速分布をピトー管により実験し、この実験値と prandtl の混合距離の理論による推定値とを比較検討したものである。

2 解析方法: 指数法則模型に依り非ニュートン流体が十分に発達した乱流状態で流れる場合、円管内断面における任意の位置の流速  $u(r)$  は次の因子で表わせる。

$$u(r) = f(a, \rho, \tau_w, k', n', y), \quad (1)$$

また、次元解析により(1)式は(2)式となる。

$$u(r)/u_* = f_1(z, y/a, n'), \quad (2)$$

すなわち;

$$u(r)/u_* = A_n \ln[(\frac{y}{a})^m z] + B_n, \quad (3)$$

したがって、指数法則模型流体における全管断面にわたる速度分布

式は(2)のように与えられる。一方、摩擦損失係数  $f$  と一般化されたレイノルズ数  $Re_n$  の関係は(3)式から(3)式のように導くことができる。

$$1/f = C_w \log[Re_n f^{-1/2}] + D_w, \quad (4)$$

非ニュートン流体が乱流で流れる場合の速度分布の予測方法に Bradkey,

Lee and Chase らの方法がある。彼らは管内の任意の点における全せん断応力を(4)式のように考えた。したがって指数法則模型の場合、 $\tau_{rz}$  は(5)式のように示される。ただし、管内の速度分布

は(6)式のべき級数と仮定する。境界条件  $y=a$  で、 $u(r)=0$ ,  $\tau_{rz}=0$  を代入すると(6)式は(7)式となる。また、平均流速  $V$  は(8)式で示される。(7)式の  $u(r)$  を(8)式に代入して積分すると(9)式となる。ここで用いられた  $k', n'$  は指数法則流体の流動方程式(1)式を用いることにより実験的に求められる。

$$\tau_{rz} = \tau_{rz,2} + \tau_{rz,t}, \quad (5)$$

$$\tau_{rz}/\rho = k/\rho (-\frac{y}{a})^{n'} + \frac{1}{2} \tau_{rz,t} = \frac{1}{2} \tau_{rz,t} = \frac{1}{2} \tau_w = \frac{1}{2} \tau_w, \quad (6)$$

$$u(r)/u_{max} = 1 + a_1 (\frac{y}{a})^{c_1+1/2} + a_2 (\frac{y}{a})^{c_2}, \quad (7)$$

$$u(r)/u_{max} = 1 + (\frac{P-b}{b-c_1+1/2} \frac{y}{a})^{c_1+1/2} + \frac{c_1+1/2}{b-c_1+1/2} (\frac{y}{a})^{c_2}, \quad (8)$$

$$Q = \pi a^2 V = 2\pi \int_0^a u(r) r dr, \quad (9)$$

$$u(r)/u_{max} = 1 + \frac{2a_1 y}{(c_1+1/2)} + a_2/c_2, \quad (10)$$

$$\tau_w = k (-\frac{\tau_w}{\rho})^{1/n'}, \quad (11)$$

3. 実験装置および方法: 管路輸送実験装置を図1に示す。輸送管路は内径28mmの透明塩化ビニル管を使用し、摩擦損失の測定区間は44.9 cmの直線部とする。実験はポンプにより、試料を管路中に流し、流量を測定すると同時に圧力測定点の圧力差をマノメーターによって読み取るものである。また、流速分布の測定は図2に示すピトー管により、図1のA点で行った。このとき動圧区間は2mmを取った。ピトー管は内径1mm、外径3mmでこれより動圧を測定し、また静圧は管壁から枝管を取り付けて測定し、差圧  $\Delta H$  を測ることにより管路断面の流速分布を求めた。実験は上水汚

$a$ : 半径 (cm),  $\rho$ : 流体密度 ( $g/cm^3$ )  
 $y$ : 壁面からの距離 (cm)  
 $\tau_w$ : 壁面せん断応力 ( $dyne/cm^2$ )  
 $n'$ : 指数法則流体の構造粘度指数 (-)  
 $k'$ : 粘稠度指数 ( $g \cdot cm^{-1} \cdot sec^{-n'}$ )  
 $z$ :  $a^m \rho (u_* y)^{-m} / k'$  (-)  
 $u_*$ :  $\sqrt{\tau_w/\rho}$  摩擦速度 ( $cm/sec$ )  
 $A_n, B_n$ : 定数 (-)

$$Re_n = D^m V^{2-m} \rho / k' \quad (-)$$

$$f = \tau_w / (\rho V^2) \quad (-)$$

$$C_w, D_w$$
: 実験定数 (-)

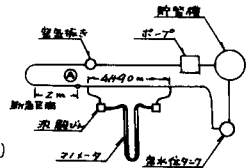


図1 実験装置の概略

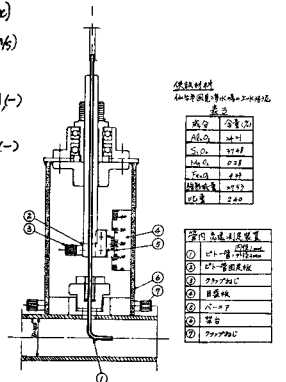


図2 ピトー管

泥の濃度と平均流速を変化させることにより行なつた。供試材料は仙台市国見浄水場の壺心濃縮された上水汚泥を0.074mmふるいび粗大固形物を取り除いたものである。

4. 実験結果および考察： 図3にいろいろな濃度の上水汚泥の速度勾配(%)と壁面せん断応力 $\tau_w$ の関係を示す。層流域の場合には、上水汚泥の流動曲線は濃度によらずすべて擬塑性流体の挙動を示すことがわかる。この図と(10)式により、指数法則流体の構造粘度指数 $n'$ および粘弾度指数 $k'$ が得られる。図4, 5, 6は平均流速が約3% $v_{sc}$ の場合の管路内断面流速分布である。ここで図中の点線は先に求めた $n', k'$ を(9)式に代入して求めた流速分布推定曲線である。図4の水の場合では、実測値と推定曲線はよく一致するが、上水汚泥では濃度の増加につれて、特に管断面中心部における差が大きくなる傾向にある。それは(9)式による推定値が流体の粘弾性効果を見逃しているためと考えられる。上水汚泥の場合には濃度の増加とともに、粘弾性効果が次第に顕著になり、その効果が無視できなくなる。また層流域から乱流域へ移行するに伴う、 $n'$ および $k'$ の変化が水の場合よりも著しいため、(9)式による上水汚泥の流速分布の推定法については、今後さらに検討する必要があると考える。図7はピトー管による実際の流速分布を(2)式により整理したものである。ただし粘底層および遷移域を除いた。乱流中心部の流速分布は各濃度とも、ほぼ直線と表わされ、(2)式の対数流速分布式が成立した。このとき、 $An'$ の値は7.7~8.9となり、平均値は8.55であった。

5. あとがき： 本実験結果は湖沼系の上水汚泥の流速分布の例を示したが、ピトー管による測定技術はまだ十分に言いがたく、さらに種々の工夫が必要と考えている。また流速分布の推定は粘弾性効果を見逃したBradley-Lee and Chaseの推定式によるが、上水汚泥 $n'$ は泥性状、濃度あるいはせん断速度の大きさなどにより、変化するので今後さらに検討する予定である。

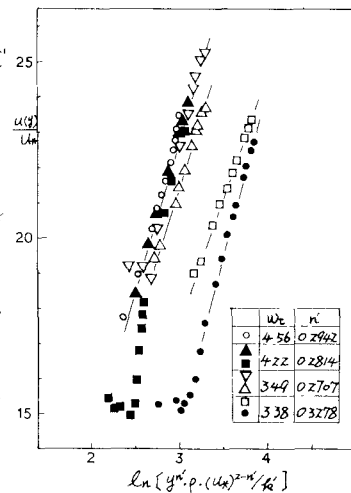


図7. 上水汚泥の対数流速分布式

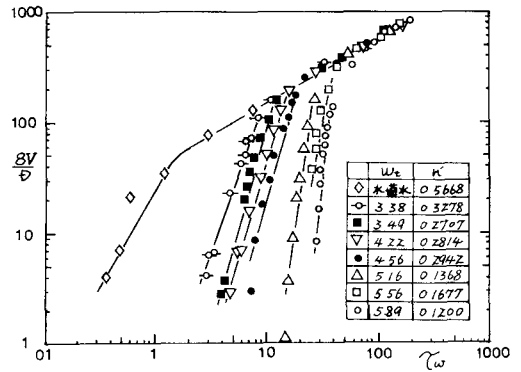


図3. せん断応力( $\tau_w$ )と速度勾配( $\frac{dy}{dy}$ )の関係

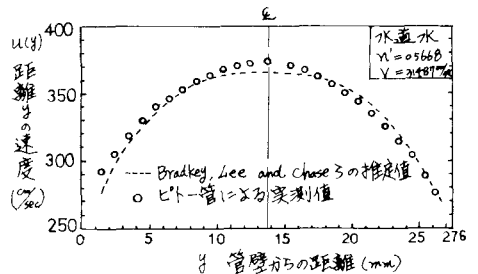


図4. 流速分布の推定値と実測値

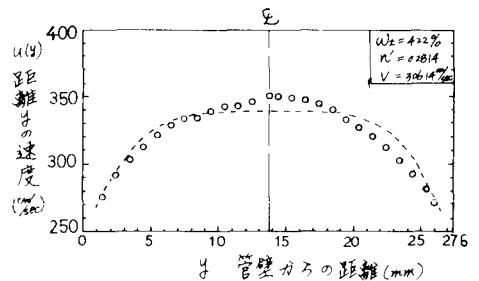


図5. 流速分布の推定値と実測値

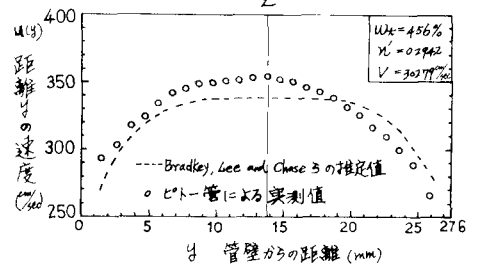


図6. 流速分布の推定値と実測値