

立命館大学理工学部 正員 大同 淳之

立命館大学大学院 学生員 加藤 一平

1 はしぎ Newton流体を含む高濃度固体粒子分散系のせん断機構に関し、Bagnoldは、粒子衝突による運動量伝達モデルを考へ、法線応力の存在を説明した<sup>(1)</sup>。法線応力  $p$  とせん断力  $\tau$  との関係は  $\tau = p \tan \alpha$  --- (1) とし、 $p = K \rho \lambda f(\lambda) D^2 (\frac{du}{dy})^2$  --- (2) を理論的に導き、粒子の慣性が卓越する領域に対し  $p = K \rho (\lambda D)^2 (\frac{du}{dy})^2$  --- (3)、流体の粘性が卓越する領域に対し  $\tau = \beta \lambda^{\frac{1}{2}} \eta_0 \frac{du}{dy}$  --- (4) を実験的に求めた。ここに  $K, \beta$ : 係数、 $\rho$ : 粒子密度、 $D$ : 粒子径、 $\lambda = \frac{1}{(C_0/C)^{\frac{1}{3}} - 1}$ : 線濃度、 $C$ : 粒子の容積濃度、 $C_0$ : 最大容積濃度、 $f(\lambda)$ : 粒子の衝突頻度より求まる関数、 $\eta_0$ : 流体のみの粘度である。しかし、このモデルにおいては、固体粒子と流体との相互作用、粒子の形状、界面現象および粒子の回転やすべりによる応力伝達などが考慮されておらず、式中の係数を一義的に決められるところまで至っていない。また、濃度の表現が不適確であり、実験に用いた粒径も1種類に限られるなどの問題がある。そこで、この理論に基づく場合に、粒径や濃度の影響およびその適用範囲を明確にするため、特に粒子の慣性が卓越すると予想される条件で、法線応力およびせん断力を測定した。

2 実験方法および条件 Bagnoldに従い、図1に示すような共軸二重円筒型回転粘度計の内筒周面にゴム膜を張り、せん断に伴う法線応力をゴム膜内部の空気圧増加により検出した。同時にトルクを測定しせん断力を求めた。粘度計は、外筒半径  $R_0 = 5.7 \text{ cm}$ 、内筒半径  $R_i = 3.95 \text{ cm}$ 、内筒高  $h = 15.2 \text{ cm}$  であり、試料を内外筒間げき全体に注入し上ぶたを取り付けた。回転数は0から200 r.p.m. である。粒子として比重0.870 粒径0.585 0.404 0.374 0.295 cmのパラフィン粒子を使用した。したがって、内外筒間げきと粒径との比  $\frac{4R}{D}$  は、各々2.99, 4.33, 4.68, 5.93 である。また、流体として比重0.870、粘度2.1 c.s. のアルコールを用い、粒子との密度差をなくすと共に水温管理に注意した。

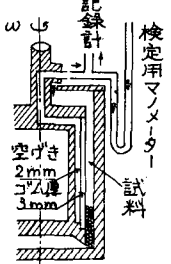


図1 実験装置

この方法では原理的に (i) 圧力が微小でゴムに吸収され空気圧増加が線形でない恐れがある、(ii) 流体のせん断に伴うゴム膜の歪による圧力発生、(iii) 固体粒子の偏在による圧力発生、などが問題になるが、(i) は差圧により検定し、(ii) は流体のみの圧力検定により補正し、(iii) については粒子と流体との比重差をなくし、常に試料が膜全体を覆っているようにした。

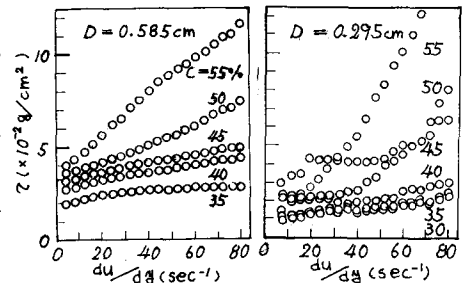


図2  $\tau$  と  $du/dy$  の関係

3 実験結果 (i) せん断力  $\tau = T/2\pi R_i^2 h$  と速度勾配  $\frac{du}{dy} = 2\omega/R_i^2 (\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_0^2})$  の関係を図2に示す。ここに  $T$ : トルクモーメント、 $\omega$ : 回転角速度 である。これより降伏値を持つ擬塑性流体  $\tau - \tau_y = \eta (\frac{du}{dy})^n$  --- (5) の関係が成立する。図3より、 $\frac{4R}{D} = 4.68$  の場合 測定範囲全体を通じて  $n = 1$  とみよせる また  $\frac{4R}{D} = 5.93$  にあると  $n = 2$  とする傾向を示している。 $n = 1$  の領域で粘性係数  $\eta$  を求め、線濃度  $\lambda$  との関係を示すと図4となり、粒径に無関係な(4)式が成立する。(4)式は、粘性効果を正確に説明するものではないが、実験の範囲では測定結果とよく一致する。 $\tau_y$  は図5に示すとおり、粒径と無関係に 容積濃度の2乗に比例する。

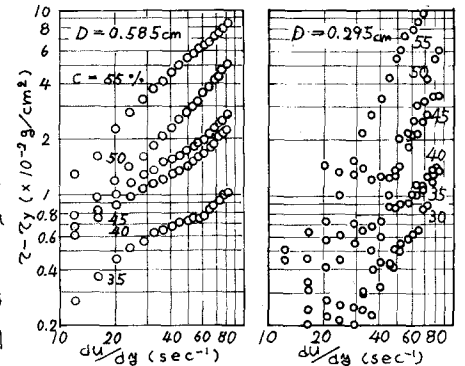


図3  $(\tau - \tau_y)$  と  $du/dy$  の関係

(ii) 法線応力  $p$  : 測定結果を図6に示す。  
初期の影響をなくするために  $\gamma$  に対応する  
法線初期応力  $p_i$  をとると図7より

$p - p_i = k \left( \frac{du}{dy} \right)^n$  --- (6) が成立する。 $n$   
の次数を調べるために、横軸にレイノル  
ズ数  $Re$  に 対応する無次元ひずみ速度  
慣性力  $\frac{\lambda^2 \sigma D^2 (du/dy)^2}{\lambda \frac{1}{2} \eta_0 (du/dy)} = \lambda^2 \sigma D^2 (du/dy) / \eta_0$   
粘性力  
をとって、縦軸に無次元応力をとると図8  
を得る。これより  $\frac{4R}{D} \cong 4.68$  の場合、  
 $Re < 6 \times 10^2$  では  $n = 1$ 、(1) 式の  $\tan \alpha =$

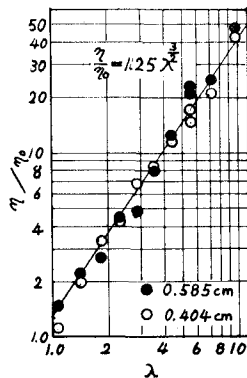


図4  $\eta/\eta_0$  と  $\lambda$  の関係

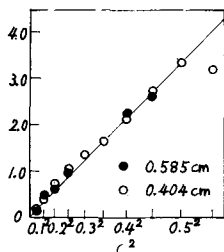


図5  $\gamma$  と  $C^2$  の関係

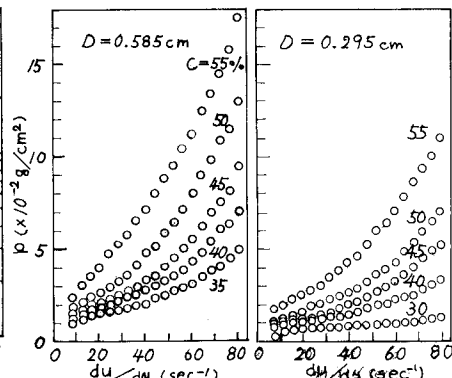


図6  $p$  と  $du/dy$  の関係

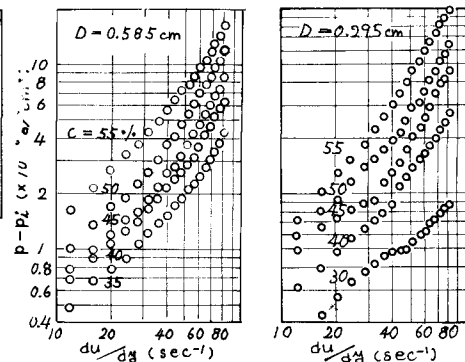


図7  $(p - p_i)$  と  $du/dy$  の関係

$Re > 10^3$  では  $n = 2$ 。  $\tan \alpha$  は  
 $Re$  の増加と共に減少し、  $Re = 3 \times 10^3$  ぞは  
ば 0.41 である。また、グラフより (3) 式  
の係数  $K \cos \alpha$  を求めると図9を得る。こ  
の値は、Bagnoldの実験値 0.04 に比  
較すると、桁小さく、濃度の増加、粒径  
の増加に伴い減少する傾向がある。しか  
し、さる  $\frac{4R}{D}$  の増大に伴って この限界  
レイノルズ数が減少し  $\frac{4R}{D} = 5.93$  ぞ約 400 ぞあった。さらに  
せん断力についても  $n = 2$  の関係が生じ  $\tan \alpha$  が一定ぞあると  
みせる。  $K \cos \alpha$  も  $2.25 \times 10^{-3} \sim 3.2 \times 10^{-3}$  の値を示した。これは  $\frac{4R}{D}$  の  
増大に伴って粒子の衝突効果が増し、さらに、粒径の減少に伴う衝突頻度  
の増大が乱れに対する影響を強めたものと予想される。

4 まとめ Bagnoldの理論  
に基づくと 限界レイノルズ  
数以上ぞ乱流、以下ぞ層流の  
関係を生じるが、  $\frac{4R}{D}$  により  
この値が変化する。また、係  
数  $K \cos \alpha$  も小さく、濃度や粒  
径により変化する。したが  
て、このBagnoldによるモデル  
を完全に説明してまいよう  
に思われ、粒径、濃度、せん  
断層の厚さおよびその他の応  
力伝達機構を考慮する必要が  
ある。

参考文献: (1) Bagnold; Experi-  
ments on a gravity-free dispersion  
of large spheres in a Newton fluid  
under shear: Proc 1st. Civil Eng 1955

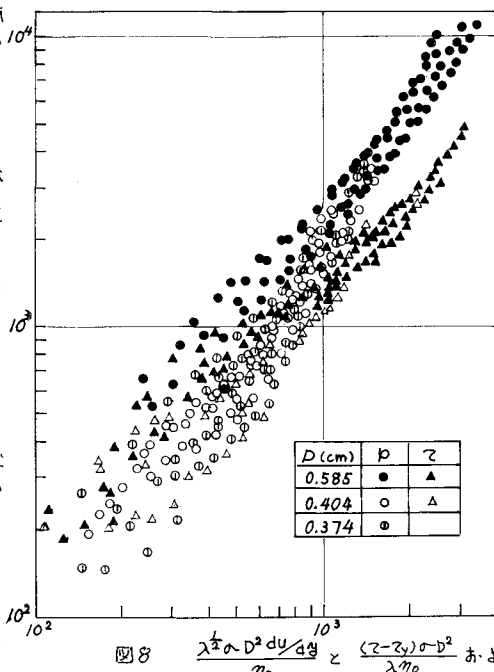


図8

$\frac{\lambda^2 \sigma D^2 du/dy}{\eta_0}$  と  $\frac{(p - p_i) \sigma D^2}{\lambda \eta_0}$  および  $\frac{(p - p_i) \sigma D^2}{\lambda \eta_0}$  との関係

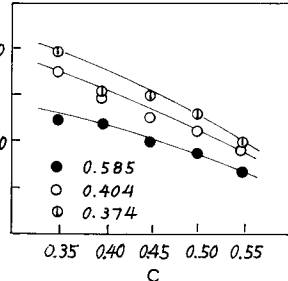


図9  $K \cos \alpha$  と  $C, D$  との関係

