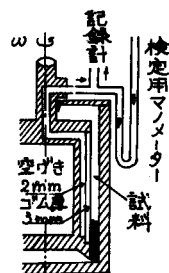


# 流体を含んだ粒子流の流動機構に関する研究

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 はしがき 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与え、法線応力の存在を説明した。法線応力  $p$  とせん断力  $\tau$  との関係は  $\tau = p \tan \alpha$  --- (1) とし、 $p = K \lambda f(\lambda) D^2 \left(\frac{du}{dy}\right)^2 \cos \alpha$  --- (2) を理論的に導き、粒子の慣性が卓越する領域に対し、 $p = K (\lambda D)^2 \left(\frac{du}{dy}\right)^2 \cos \alpha$  --- (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、 $\rho$ : 粒子の密度、 $D$ : 粒子径、 $\lambda = \frac{1}{(C_0/C)^{1/3} - 1}$ : 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、 $\alpha$ : 衝突角、 $\eta_0$ : 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、外筒径  $R_o = 5.7$  cm、内筒径  $R_i = 3.95$  cm、内筒高  $h = 15.2$  cm であり、試料を内外筒間へき全体に注入し上げたを取り付けた。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 cm のパラフィン粒子を使用、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。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。



3 実験結果 (i) せん断力  $\tau$ :  $\tau = T/2\pi R_i^2 h$   
 $\frac{du}{dy} = 2\omega/R_i \left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_o^2}\right)$  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  $\tau = \tau_0 + \eta \left(\frac{du}{dy}\right)^n$  --- (5) の関係が成立する。図3より、濃度が低い場合および速度勾配が小さい場合  $n < 1$  であるが、測定範囲全体を通じては  $n = 1$  とみさせる。 $n = 1$  の領域で粘性係数  $\eta$  を求め、線濃度

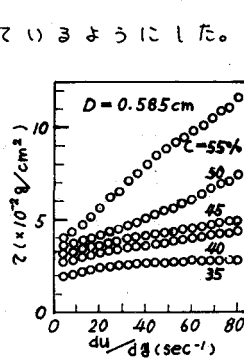


図2  $\tau$  と  $du/dy$  の関係

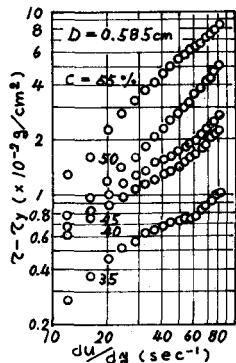


図3  $(\tau - \tau_0)$  と  $du/dy$  の関係

$\lambda$ 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。

(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 $\tau_y$ に対応する法線初期応力  $p_i$  をとると、図7より  $p - p_i = f\left(\frac{du}{dy}\right)^n$  (6) の関係が成立する。ここに  $f$  は粒径、濃度、密度からなる係数である。 $n$  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  $\frac{\lambda^2 \rho D^2 (du/dy)^2}{\lambda \eta_0 (du/dy)} = \lambda \frac{\rho D^2 (du/dy)}{\eta_0}$  をとり、縦軸に無次元応力をとると図8を得る。これより  $Re < 6 \times 10^2$  では  $n = 1$ 、(1)式の  $\tan \alpha = 0.65$ 、 $Re > 10^3$  では  $n = 2$ 、 $\tan \alpha$  は  $Re$  の増加と共に減少し、 $Re = 3 \times 10^3$  では  $0.41$  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の実験値に比較すると、1桁小さく、また濃度の増加、粒径の増加に伴い減少する傾向がある。

4 まとめ Bagnoldの理論に基づくと  $Re < 600$  で  $p - p_i$  または  $\tau - \tau_y \propto \lambda^{\frac{1}{2}} \eta_0 \frac{du}{dy}$ 、 $Re > 1000$  で  $p - p_i \propto \lambda^2 D^2 \left(\frac{du}{dy}\right)^2$  の関係が見られるが  $\tau - \tau_y \propto \lambda^2 D^2 \left(\frac{du}{dy}\right)^2$  の関係は、この範囲では成立しない。また、係数  $K \cos \alpha$  も小さく濃度や粒径により変化する。したがって、このBagnoldによる粒子衝突モデルは、粒子流のせん断機構を完全に説明していないように思われる。今後、より実験の範囲を広げ、粒子流の流動機構を明確にしていきたい。

#### 参考文献

- (1) Bagnold  
Experiments on a gravity-free dispersion of large spheres in a Newton fluid under shear:  
Proc. Inst. Civil Eng.  
Proc 3 174 1955

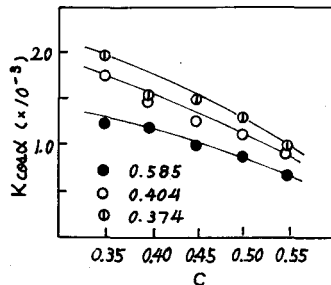


図9  $K \cos \alpha$  と  $C, D$  の関係

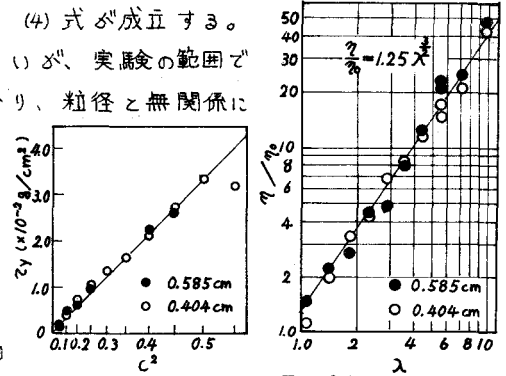


図5  $\tau_y$  と  $C^2$  の関係

図4  $\eta/\eta_0$  と  $\lambda$  の関係

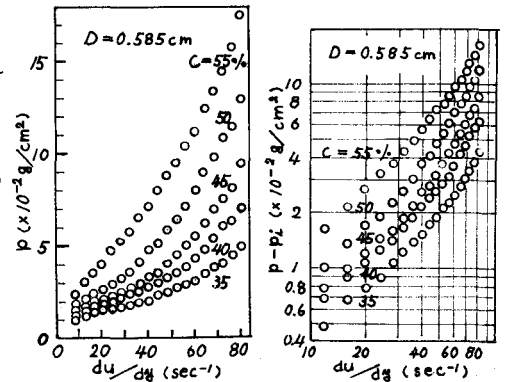


図6  $p$  と  $du/dy$  の関係

図7  $(p - p_i)$  と  $du/dy$  の関係

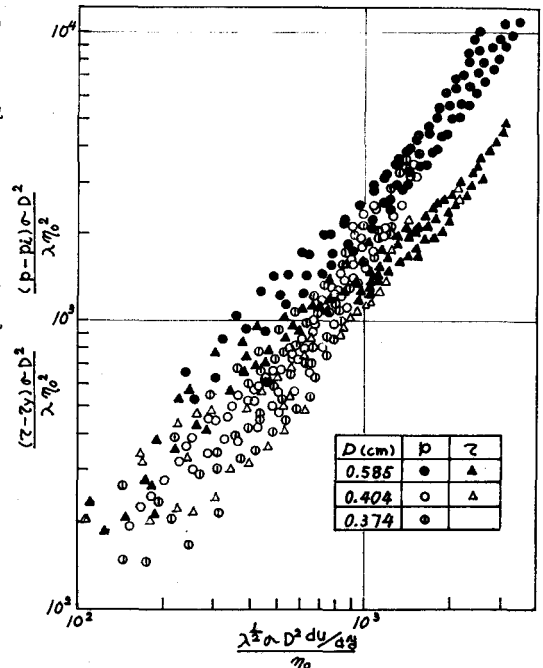


図8 無次元で表わした  $(p - p_i)$  および  $(\tau - \tau_y)$  と  $du/dy$  の関係