

高速せん断試験による粒状体の流動特性の研究

埼玉大学理工学研究科 学生会員 一場勝幸
 埼玉大学工学部 正会員 岩下和義

1. 背景及び目的

これまでに粒状体のせん断流れについて、さまざまな実験が行われている^{1),2)}。しかし、測定値に隙間の粘性流体や重力の影響が含まれる、実験可能なせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の範囲が限定される、粒子の運動の観察が困難である等の問題があった。本研究では、新規に実験装置を開発し、高速度ビデオカメラで観察した粒子同士の衝突形態と発生するせん断応力との関係を中心に考察した。

2. 実験装置及び実験方法

実験装置（図1）は鋼鉄製底板の上におかれた円盤状の内壁・外壁に挟まれた空間をせん断セルとした構造で、内壁を回転させることで、粒子にせん断流れを生じさせる装置である。内壁回転速度によって $\dot{\gamma}$ を、セル内の粒子数を変えることでフラクシオン v （粒子の充填率）を自由に変えられる。2次元実験であるので、粒子に重力が作用しない。また上面をアクリル製天板で覆うことで、粒子の運動を直接観察することが可能となる。粒状体として直径10mmの鋼鉄製球体粒子を使用し、セル内で $\dot{\gamma}$ が一様となる条件で実験を行い、外壁に作用するせん断応力 τ_{xy} を測定した。

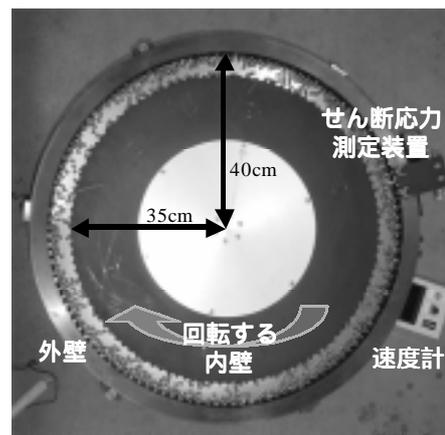


図1 実験装置（装置上部より撮影）

3. 評価方法

τ_{xy} を時間平均して得られる平均せん断応力 $\overline{\tau_{xy}}$ は、2粒子間での粒子衝突(binary collision)を仮定して導かれた応力の理論式³⁾に従い、以下の式で無次元化した²⁾。

$$\overline{\tau_{ij}}^* = \frac{\overline{\tau_{ij}}}{\rho_p D^2 (\dot{\gamma})^2} \quad (1)$$

ここで、 D は粒子直径、 ρ_p は粒子の密度である。 v は実験装置の最大フラクシオン v_{max} によって正規化し（式2）実験装置間の差異を打ち消す²⁾。

$$v^* = v/v_{max} \quad (2)$$

4. 結果と考察

図2に実験中観察されたセル内の状態を示す。 v^* 、 $\dot{\gamma}$ によって様々な衝突形態が観察された。図2(a)に示す低 v^* 領域では、セル内の粒子が少ないために粒子は

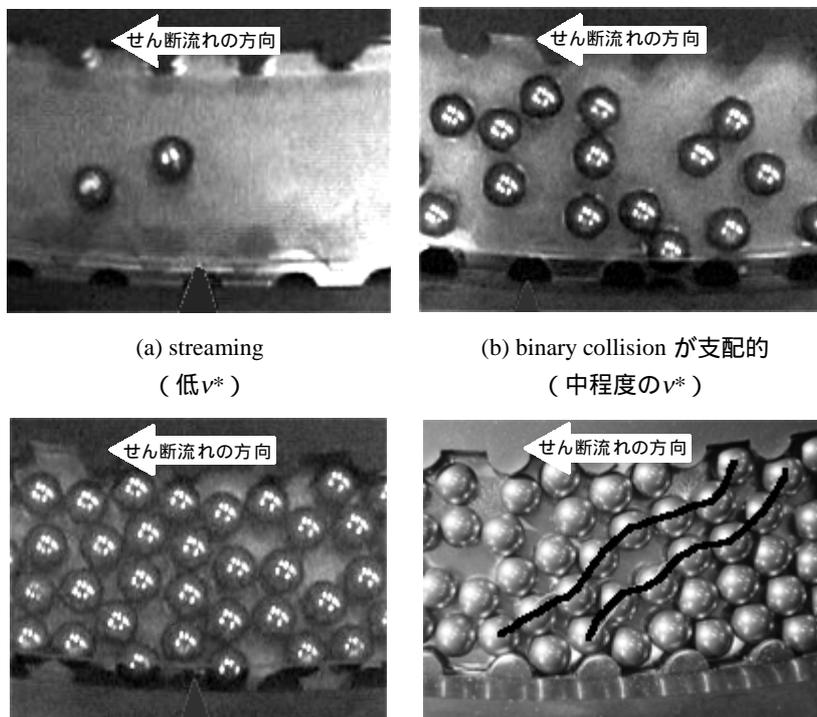


図2 v^* 、 $\dot{\gamma}$ による粒子衝突の形態の違い（矢印はせん断流れの方向）

キーワード：粒状体、せん断流れ、高速流れ、せん断応力、柱状構造

連絡先：〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255 埼玉大学理工学研究科 E-mail: ichiba@goemon.dr5w.saitama-u.ac.jp

ほとんど衝突することなく移動する。この流れは streaming と呼ばれる。粒子数が増え中程度の v^* になると図 2(b)に示すように、2 粒子が衝突する binary collision が多数観察された。さらに v^* を高くすると $\dot{\gamma}$ により異なる状態が観察された。 $\dot{\gamma}$ が高い場合には図 2(c)に示すように、binary collision よりも粒子多数が一度に衝突する多重衝突 multiple collision や多数の粒子がひとまとまりに移動するクラスターが多く観察された。 $\dot{\gamma}$ が低い場合には図 2(d)に示すように、粒子がセル幅いっぱいに連なり接触力を伝達する柱状構造（図中の黒線）が観察された。柱状構造が形成されると、粒子間できしる音が生じ、瞬間的に $\overline{\tau_{xy}}$ の2倍以上の応力が観察される。これら 2 点により柱状構造が形成されたかを判断した。また抵抗力に対しモータのトルクが不足し内壁の回転速度が不安定となった。以下、粒子間衝突の形態と、せん断応力の特性との関係を調べる。

図 3 に $\overline{\tau_{xy}}^*$ と v^* の関係を示す。得られた関係は既往の実験データ^{1),2)}の傾向とよく一致しており、本実験は妥当なものであると判断される。streaming と binary collision が主な衝突形態である低 v^* から中程度の v^* においては、 $\overline{\tau_{xy}}^*$ は小さいが、multiple collision や柱状構造が形成される高 v^* 領域では急激に $\overline{\tau_{xy}}^*$ が大きくなっている。

図 4 に $\overline{\tau_{xy}}^*$ と $\dot{\gamma}$ の関係を示す。 v^* によって $\overline{\tau_{xy}}^*$ と $\dot{\gamma}$ の関係は大きく変化している。streaming が卓越する低 v^* の場合、図の太線とほぼ同じ傾きであり、 $\overline{\tau_{xy}}$ は $\dot{\gamma}$ に比例している。binary collision が卓越する中程度の v^* の場合、図の破線とほぼ同じ傾きであり、 $\overline{\tau_{xy}}$ は $\dot{\gamma}^2$ に比例している。binary collision を仮定し導いた応力の理論式³⁾においても $\overline{\tau_{xy}}$ は $\dot{\gamma}^2$ に比例しており、本実験の結果と一致する。multiple collision が卓越する高 v^* の場合、特に $\dot{\gamma}$ が低い柱状構造が形成される場合（図中の大きな印）には、今回の実験データでみても、 $\overline{\tau_{xy}}$ に対する $\dot{\gamma}$ の影響ははっきりしない。

以上をまとめた粒状体のせん断流れの形態分布図を図 5 に示す。グラフの横軸は正規化フラクション v^* であり、縦軸は $\dot{\gamma}$ の無次元化量である Bagnold 数^{1),2)}となっている。

$$\text{Bagnold数} = \sqrt{\lambda} \rho_p D^2 \dot{\gamma} / \eta \quad (3)$$

$$\lambda = \sqrt{3\sqrt{3}v/\pi} - 1$$

ただし η は隙間流体（空気）の粘性係数である。図中の領域 A,B,C,D はそれぞれ streaming、binary collision、multiple collision、柱状構造が卓越する領域を示す。

参考文献

- 1) R. A. Bagnold, Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear, Proc. of Royal Society of London A, vol. 225, pp. 49-63, 1954.
- 2) D. M. Hanes & D. L. Inman, Observations of rapidly flowing granular-fluid materials, J. Fluid Mech., vol.150, pp. 357- 380, 1985.
- 3) S. B. Savage & J. D. Jeffrey, The stress tensor in a granular flow at high stress rates, J. Fluid Mech., vol.110, pp. 255- 272, 1981.

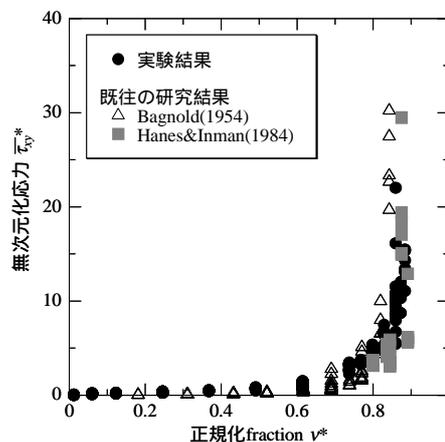


図 3 $\overline{\tau_{xy}}^*$ と v^* の関係

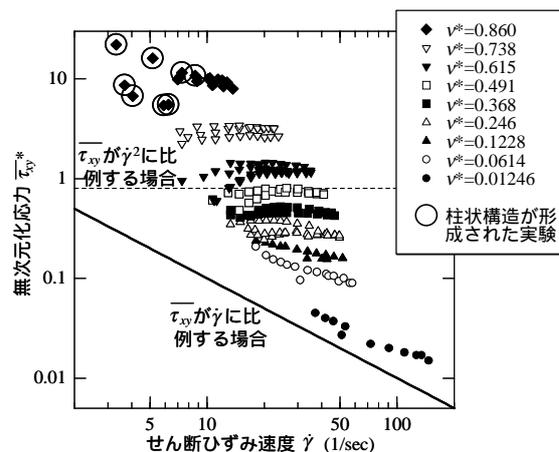


図 4 $\overline{\tau_{xy}}^*$ と $\dot{\gamma}$ の関係

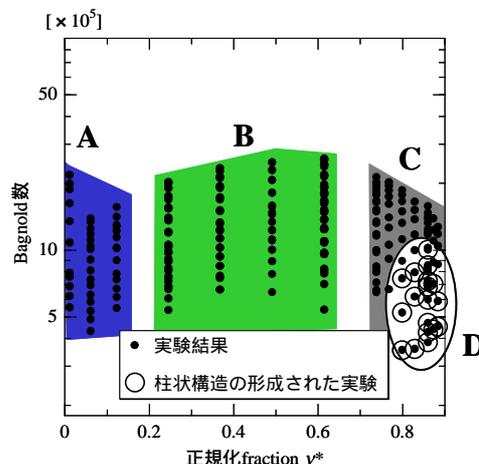


図 5 せん断流れの形態分布図