

高速せん断装置による粒子流れの応力の測定に関する研究

Research of Stress Measurement on Granular Shear Flow by Improved Two-Dimensional Rapid Flow Apparatus

一場勝幸*・岩下和義**・小田匡寛***

ICHIBA Katsuyuki, IWASHITA Kazuyoshi and ODA Masanobu

*学生会員 工修 埼玉大学大学院理工学研究科生産科学専攻 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

**正会員 工博 埼玉大学助教授 工学部建設工学科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

***正会員 工博 埼玉大学教授 工学部建設工学科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

To study the micro-mechanics of granular flows, two-dimensional rapid flow apparatus is improved. The new ability of this apparatus is that normal stress can be measured. Then, normal stress and tangential stress generated by shear flow can be measured at the same time. By using this apparatus, various experiments have been performed under wide range shear strain rate and fraction. On stress ratio generated by granular flow, solid fraction has no influence, while shear strain rate has influence.

Key Words: shear flow, granular material, rapid flow, stress ratio

1. はじめに

土は粒子で構成されており、ダイレイタンスやせん断帯幅の寸法効果などが生じるのはそのためである。粒子によって構成されているものは粒状体と呼ばれる。粒状体は連続体のように挙動したり、流動や対流など液体的に挙動したりと、粒状体自身の特性や周囲の環境により様々な挙動を示す。粒状体が液体のように流れる現象は身近にいろいろと存在する。例えばサイロ内の穀物の流れ、ワイン工場での葡萄粒の流れ、化学プラントでの粒子・粉体の空気移送などをあげることができる。駅や通路での人間の移動なども粒状体の流れと見ることができるだろう。土質力学の問題でも、地すべり、斜面崩壊、土粒子と水分が混じって移動する土石流、乾燥した岩塊が外乱により流れだす岩屑流などは粒状体の流れである。このように粒状体の流れは自然界、工業界にごく普通に存在する。従来、粒状体の流れの研究は2つの極端なケースを中心に多くの研究が行われてきた。

1つめは例えば土の静的変形で見られる準静的流れ (quasi-static flow) と呼ばれるケースで、粒子の相対速度は遅く、粒子加速度の影響が無視でき、応力は粒子同士の継続的接触点での接触力により伝達される。もう1つのケースは、粒子の相対速度が速く、加速度や慣性の影響が大きく、応力が衝突する粒子間の運動量の交換により伝達される場合である。これは気体の分子運動に似た挙動を

示し、高速流れ (rapid flow, inertia-dominant flow) と呼ばれる。しかし上述の両極端のケースを除いた、中間の遷移領域の研究や全領域を通しての研究は進んでいない。

この原因はとくに室内実験において、使用する試験装置・試験材料による制限が強いこと、結果の評価が困難であること、3次元の流れでは内部構造の変化の観察が容易でないこと、流れによって生じる応力と同等かそれ以上の応力が粒子の自重によって生じてしまうことなどが障害となるためである。実験データが不足している以上、理論的解釈や数値実験の検証も不十分と言える。

せん断ひずみ速度が遅い場合やフラクション (粒子充填率) が小さい場合には、流れにより生じる応力は自重により生じる応力より小さくなるため、重力の影響を消した実験が必要となる。Bagnold¹⁾は粒子を同じ密度の液体に浮遊させることで重力の影響を消したせん断実験を行い、せん断領域境界に対してせん断方向と垂直方向に発生する応力を測定した。測定の結果、粒子の慣性が卓越する場合と、液体の粘性が卓越する場合とで発生する応力の性質が異なると報告している。せん断ひずみ速度が速い場合には粒子の慣性が卓越し発生する応力はせん断ひずみ速度の2乗に比例し、またせん断ひずみ速度が遅い場合には液体の粘性が卓越し発生する応力はせん断ひずみ速度に比例する、という結果を得ている。

Hanes & Inman²⁾は同心円せん断装置を用い3次

元実験を行い、粒状体の高速流れにおいて発生する応力を測定した。この実験では重力の影響を打ち消すために実験可能な範囲は 5000 (%/sec) を越えるようなせん断ひずみ速度及びフラクシオンの高い領域に限定された。得られた応力へのせん断ひずみ速度の関与傾向は Bagnold と同様である。

以上のように、既往の実験においては、液体の粘性もしくは重力の効果のどちらかが必ず含まれてしまう。

理論的アプローチとして、例えば、Savage & Jeffrey³⁾は弾性粒子同士が 2 粒子間で衝突 (binary collision) する際に瞬間的に運動量を交換することで応力が伝達されると仮定し、粒状体の高速流れで生じる応力テンソルの理論式を求めている。この場合、応力はせん断速度の 2 乗に比例する。ただしこの理論式は適用範囲が限られている。フラクションが高い場合には、多粒子間での衝突頻度が増加し、さらには、衝突ではなく持続する粒子間接触のネットワークを介する接触力による応力伝達が生じるようになる。またフラクションが低い場合には衝突をせず、粒子が直接運動量を伝達するようになる。以上のような binary collision 以外の接触状況への変化が考慮されていない。

数値実験的アプローチとして、Campbell & Gong⁴⁾は、2 次元円盤要素を用いた 2 次元粒子流れのシミュレーションを行い、フラクションによる影響を検討している。このシミュレーションではハードコンタクトモデルを採用し、隙間流体は考慮にいていない。Campbell らは 2 粒子間の衝突によって応力が伝達される collision と粒子が衝突せずに移動する streaming との 2 つの応力伝達機構に分割して考えている。フラクションが 0 に近づくとき streaming が卓越することで発生する応力が大きくなる、としている。

以上のように、理論的、実験的そして数値実験的と様々なアプローチで研究が行われているが、粒子流れのすべてが解明されているとはいえない。特に、準静的流れと高速流れの間の過渡領域に関しては、研究が進んでいないと言わざるを得ない。この領域では、希薄なガスで見られるように粒子が衝突なしに移動することで直接伝達される応力、粒子同士が衝突しその際に運動量を交換しながら伝達される応力、および土質力学で見られるような粒子間である程度持続する接触点を介する接触力で伝達される応力の 3 通りの形式があるといわれている⁵⁾。しかし従来の実験装置では粒子の流れを直接観察することが困難であるため、定量的な測定は未だ行われていない。

これらをうけて、岩下・一場・小田⁶⁾は、まず準静的から高速までの広いせん断ひずみ速度の範囲をカバーし、粒状体流れを同一装置で再現できる実験装置の開発を目指した。具体的には、重力が働かない平面上で球体の粒子を用いることにより、粒子の運動方向に重力の影響がなく、粒子周囲の粘性流体の影響もなく、粒子運動を二次元流れにすることで全粒子の運動を直接観察でき、せん断応力を測定することを可能にする高速せん断装置 (Saitama University Rapid Flow device, SURF) を作成した。この実験装置により、粒子間での衝突及び接触の形態が発生する応力に影響を与えていることを明らかにした。

本研究では岩下らの実験装置に新たな改良を加え、せん断応力と垂直応力を同時に測定することを試みた。この実験装置を用いてせん断ひずみ速度とフラクシオンの広い範囲で実験を行う。計測される応力を既往の測定データと比較し装置の検証を行う。仕様の異なる実験装置で得られた結果との比較に新たな粒子充填率、正規化フラクション ν^* を提案する。そして応力比 τ/σ へのせん断ひずみ速度・フラクシオンの影響について考察を行う。

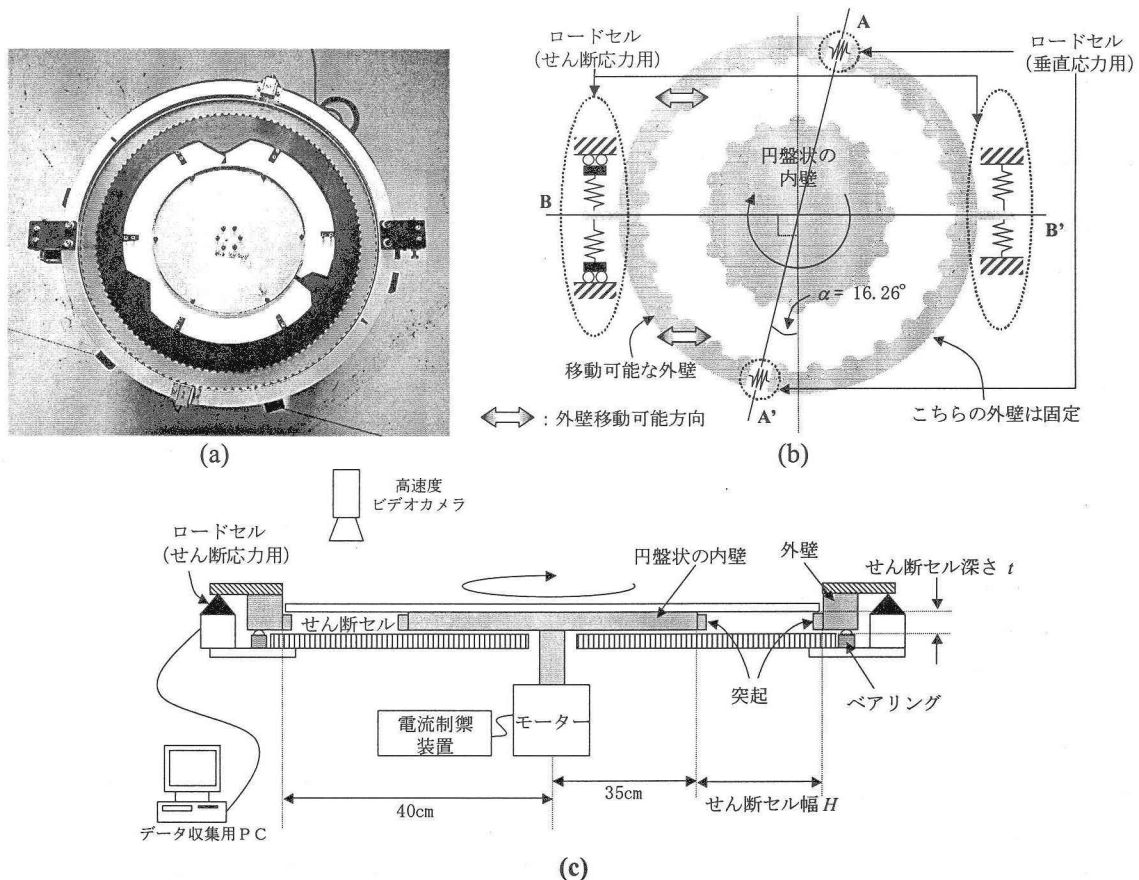
2. 高速せん断試験装置

2.1 装置概要

本研究で用いる実験装置は岩下ら⁶⁾の装置を改良したもので、図-1 に概要を、表-1 に改良前と改良後の能力差を、表-2 に高速度ビデオカメラの能力を示す。

実験装置は水平で平らなステンレス製の床板上に置かれた同心円の鋼製外壁と内壁に囲まれる部分をせん断セルとしている。せん断セルに配置した球形のスチールボールを粒子として用い、せん断流れを生じさせる。床板は完全に固定され不動である。ステンレス製床板と鋼製のスチールボールを用いるため、転がり抵抗は極めて小さく、粒子が転がって移動する場合にはエネルギーの損失や速度の減少はごく僅かである。特別な流体で周囲を被うことのない水平面上の実験であるため、粒子の運動方向に重力および粘性の影響は入らない。この実験装置では、粒子間の接触点を同一平面上に保つ必要があり、異なる粒径粒子の混在した流れを扱うことは出来ない。内壁・外壁およびステンレス製床板ともども、容易に交換が可能で、せん断セル幅およびせん断セルの曲率を変えることができる (現在は外壁半径 40cm が最大)。

せん断セルには透明アクリル製の上蓋をかぶせ



図－1 装置概要 (a)：上方からみた実験装置（実物），(b)：装置平面図，(c)：装置断面図。

表－1 実験装置の能力（改良前と改良後で比較）

	改良前	改良後
せん断応力用 ロードセルの能力	50N	50N
垂直応力用 ロードセルの能力	-----	150N
サンプリング レート	20Hz	20～5000Hz ※1
モーターの 回転速度	5～60rpm	3～180rpm (7～180rpm) ※2
トルクの最大値	5rpm で 3.7Nm 60rpm で 8.8Nm ※3	常に 15Nm

※1 今回は 20Hz に限定

※2 実際はカッコ内の範囲が測定可能範囲。

※3 モーターに働く反力が大きい高トルク域では，回転速度が安定しない。

ている。この上蓋は内壁に固定され，内壁とともに回転する。せん断セルの深さ t が粒子の直径 D よりも僅かに（0.5mm～1.0mm 程度）大きくなるよう，上蓋のステンレス製床板からの高さを調節する。せん断セル深さをあまり大きくしてしまうと粒子に二次元運動以外の運動を許してしまう。また，粒子の直径と等しくすると上蓋と床板で粒子を挟み込むようになり粒子の自由な運動を妨げてしまう。これらに注意することで，この実験は等体積せん断試験となる。上蓋は透明なのでセル内部の全ての粒子運動を，高速度ビデオカメラ等

表－2 高速度ビデオカメラの能力

取得範囲	縦 5.5cm×横 16.5cm
解像度	240×720 ピクセル
フレーム数	1 秒に 400 フレーム
開放時間	1/8000 秒
撮影時間	最長 1.1 秒 (440 フレーム)

を用いることで直接観察することが可能である。

せん断流れの境界で粒子が入れ替わることも考慮して，内壁と外壁のそれぞれの粒子と接触する側に粒子と同じ直径の半円柱形の突起を，粒子直径分の間隔を空けて設けてある。従来の壁に粒子を敷き詰めて貼り付ける方法とは違い，境界付近での粒子が入れ替わることが可能となりせん断流れの一部をセル内に再現しやすくなる。

外壁は応力測定の精度向上のために軽量化されている。この外壁はベアリングを介して床板の上に設置されている。外壁の軽量化とベアリングをより摩擦の少ないものに交換することで，以前よりも外壁は並進・回転運動しやすくなっている。外壁は図－1 (b)で示す AA' 線で二分割されており，その部分に 2 個のロードセルが設置されている。このロードセルの読みから，粒状体の流れによって外壁の外側方向に働く力（リング状の外壁に対して垂直方向に働く力）を計測する。また，BB' 線上には，図－1 (c)にも示されているロード

セルが設置され、これにより粒状体の流れが引き起こす外壁を回転させる力（外壁の接線方向に働く力）を計測する。せん断応力用ロードセルによって片側（図-1(b)の左側）の外壁はBB'方向にのみ移動が制限され、もう一方（図-1(b)の右側）の外壁は固定されている。

内壁はモーターにより速度可変で回転する。このモーターは装置改良前のものに比べて出力が高く、さらに回転速度範囲の広いサーボモーターに変更されている。変更したことで、より高いフラクシオン、より速い粒子流れの実験が可能となった。また低速で大きな反力がモーターに働く場合の実験が可能となり、準静的な流れにより近い流れを扱えるようになった。

せん断セル内のせん断ひずみ速度の平均値 $\dot{\gamma}$ (1/sec) は、回転による内壁の縁の接線方向速度 U とせん断セル幅 H より、以下の式(1)で定義する。

$$\dot{\gamma} = \frac{U}{H} \quad (1)$$

実験装置の外壁半径 r_{out} 、内壁半径 r_{in} およびそれらにより決まるせん断セル幅 $H = r_{out} - r_{in}$ は、粒子を流した場合のひずみ速度分布がセル内で一様になるよう設定した。図-2に10mmのスチールボールを用い、 r_{out} を40cm、 r_{in} を35cm（結果 H を5cm：粒子5個分）とした場合の粒子速度分布の一例を示す。実験を開始して十分な時間を経た後に高速度ビデオカメラにより粒子速度を測定したもので、図の上方が回転する内壁（図では、回転方向は左向き）、下方がロードセルにより固定された外壁にあたる。図-3に、図-2の粒子の流れ方向速度分布の測定結果を示す。縦軸は外壁から粒子中心までの距離をせん断セル幅 H で正規化したもので、横軸は各粒子の流れ方向の速度を内壁の回転速度 U で正規化したものである。図中の直線はセル内のせん断ひずみ速度が一様である場合の外壁からの位置と粒子の流れ方向の速度の関係を示している。図における傾きがせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ を示すことになる。セル内のせん断ひずみ速度分布は連続的で速度の不連続は見られず、ひずみの局所化は生じていないということと、セル内のせん断ひずみ速度がほぼ一様であるという2点が確認できる。この例のようにセル幅が狭く、十分な内壁の回転速度で実験を行えば、セル内の全粒子は一様なせん断ひずみ速度の流れを形成する。しかし、例えばセル幅を倍の10cm（粒子10個分）に広げると、内壁付近の粒子のみが流動し、外壁付近の粒子は細かに揺れるだけでほとんど流れない。その場合せん断セル内でのせん断ひずみ

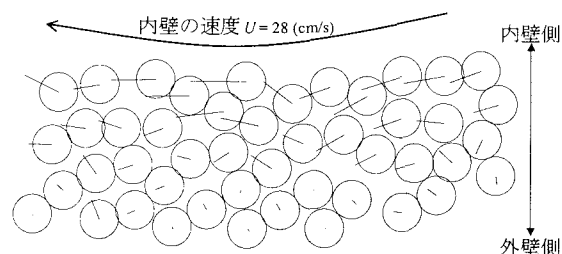


図-2 粒子速度ベクトル図: $\nu^* = 0.76$, $\dot{\gamma} = 5.53$ (1/sec)

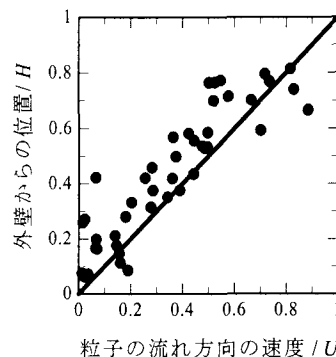


図-3 粒子速度の分布: $\nu^* = 0.76$, $\dot{\gamma} = 5.53$ (1/sec)

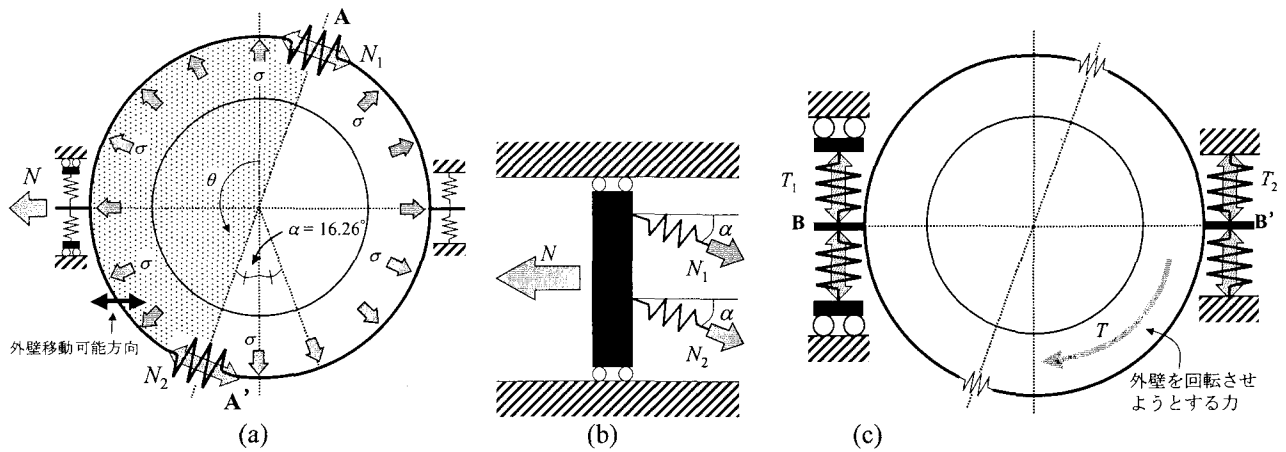
速度の分布は一様ではなく、ひずみの局所化が生じている。また、内壁の回転速度が低い場合には、粒子同士や粒子と外壁との間の衝突によるエネルギー損失が内壁より供給される運動エネルギーよりも大きくなってしまい、流れが維持されない。図-2, 3の例でも一様なせん断流れが満足されることを確認したので、 $r_{out} = 40\text{cm}$, $r_{in} = 35\text{cm}$, $H = 5\text{cm}$ という寸法を用いることとした。以降のデータ処理ではせん断セルのどの場所においてもせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ は一様であり、式(1)で求まるとみなすこととする。

モーター下限域近い速度での実験は、用いたロードセルの容量以上の力が生じるため不可能となっている。このため、装置の実験可能なせん断ひずみ速度の範囲は5~120 (1/sec)（モーターの回転速度で7~180rpm）となる。もちろん、より大容量のロードセルを用いることで測定範囲を広げることが出来る。

2.2 評価方法

設置した各種ロードセルによって粒子流れにおいて生じる応力を測定する。図-4にその概要を示す。

垂直応力の測定法の概要を図-4(a)に示す。外壁に垂直に作用する応力 σ (=垂直応力) を一定とする。図-1(b)に示すように、左側の外壁の移動可能方向は固定されている。このため、図-4(a)の色づけした部分の応力 σ により外壁は移動可能方向に合力 N を受ける。



図－４ 応力の測定法 (a)：垂直応力，(b)：垂直応力用ロードセルのモデル図，(c)：せん断応力

$$\begin{aligned}
 N &= \int_{-\alpha}^{\pi-\alpha} \sigma \sin \theta dA \\
 &= \int_{-\alpha}^{\pi-\alpha} \sigma \sin \theta \cdot t r_{\text{out}} d\theta \\
 &= 2\sigma t r_{\text{out}} \cos \alpha
 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 θ を σ の作用方向、 dA を外壁の微小面積、 t をせん断セルの深さ、 r_{out} を実験装置の外壁半径とする。この左側の外壁に働く合力 N と垂直応力用ロードセルに働く力 N_1 、 N_2 との関係（図－４(b)参照）は以下になる。

$$\begin{aligned}
 N &= N_1 \cos \alpha + N_2 \cos \alpha \\
 &= (N_1 + N_2) \cos \alpha
 \end{aligned} \quad (3)$$

式(2)、(3)より、垂直応力 σ は以下の式で求まる。

$$\sigma = \frac{N}{2t r_{\text{out}}} = \frac{N_1 + N_2}{2t r_{\text{out}}} \quad (4)$$

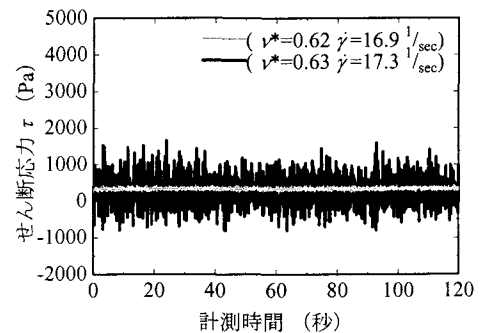
次に、せん断応力の測定法の概要を図－４(c)に示す。BB' 線上のせん断応力用ロードセルによって測定される力 T_1 と T_2 は、モーメントの釣り合いから、粒子流れによって発生する外壁を回転させようとする力 T と $T = T_1 + T_2$ の関係にある。よって、せん断応力 τ は T を外壁の面積 A で除することによって求まる。

$$\tau = \frac{T}{A} = \frac{T}{t \cdot 2\pi r_{\text{out}}} = \frac{T_1 + T_2}{2t \pi r_{\text{out}}} \quad (5)$$

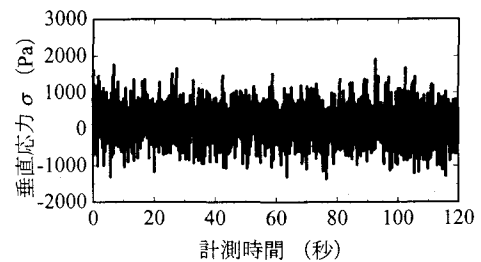
このように、本実験装置では応力 σ 、 τ を同時に測定する。

実測すると N_1 と N_2 、 T_1 と T_2 はそれぞれ異なった値で得られる。外壁が全体として回転可能であるが、ロードセルにより与えられる拘束によって片側の外壁のみ並進運動を許容しているために生じるゆがみにより、異なった値が得られたと考えられる。解決策としては、移動方向を厳密に固定するためのレールを敷設して外壁を支える方法が考えられる。今後の検討課題の一つとする。

図－５に測定されたせん断応力波形を示す。黒



図－５ せん断応力の時刻歴波形



図－６ 垂直応力の時刻歴波形

線は装置改良後に $\nu^* = 0.63$ 、 $\dot{\gamma} = 17.3$ (1/sec) のケースで測定されたせん断応力波形であり、灰色の線は装置改良前に $\nu^* = 0.62$ 、 $\dot{\gamma} = 16.9$ (1/sec) のケースで測定された波形である。どちらの計測もサンプリングレートは 20Hz としている。同様に、図－６に今回新たに測定可能となった垂直応力波形を示す。どの時刻歴波形においても同じような高振動数波形となっている。外壁がロードセルを介して支持されているために一自由度振動系となり、そのインパルス応答が捉えられたからだと考えられる。改良前の波形に比べて本実験で得られた応力波形は振幅が大きい。これは外壁の軽量化とベアリングの改良により外壁の運動にかかわる摩擦が軽減され減衰が小さくなったことが原因と考えられる。結果、計測された応力の時刻歴波形には負の応力（せん断応力では流れ方向とは逆方向

の応力、垂直応力では装置の中心に向かい外壁を縮める方向の応力)も測定されている。しかし、測定された応力の2分間分を単純に時間平均した値(以降、平均応力 $\bar{\sigma}$ 、 $\bar{\tau}$ とする)で比べると、装置改良前後でほとんど同じ値となっている。

他の実験と比較する際には、使用されている粒子の大きさや密度、せん断ひずみ速度が実験ごとに異なるので、平均応力 $\bar{\sigma}$ 、 $\bar{\tau}$ をそのまま利用することは出来ない。そこで以下に示す無次元化応力 $\bar{\sigma}^*$ 、 $\bar{\tau}^*$ を用いる。無次元化には2粒子間の衝突により運動量を交換すると仮定して導かれた応力の理論式²⁾を用いている。

$$\bar{\sigma}^* = \frac{\bar{\sigma}}{\rho_p D^2 (\dot{\gamma})^2} \quad (6)$$

ここで ρ_p は粒子の密度である。無次元化せん断応力 $\bar{\tau}^*$ も式(6)により平均せん断応力 $\bar{\tau}$ から求める。

粒子の充填率であるフラクシオンの計算法には、投影面積で計算する面積フラクシオン v_2 と体積で計算する体積フラクシオン v_3 がある。本研究では面積フラクシオンをもとに以下の正規化フラクシオン v^* を用いる。

$$v^* = \frac{v}{v_{\max}} \quad (7)$$

ここで $v_{\max}$ は実験装置に可能な限り粒子を詰めた場合のフラクシオンであり、実験装置固有の値である。この式(7)により実験装置ごとの差異を打ち消す。最密時に v^* は1.0となる。

2.3 粒子物性測定

実験に用いた粒子モデルのパラメータを表-3に示す。粒子には直径10mmのスチールボールを用いた。

実験に先立ち、高速度ビデオカメラを用いてステンレス製床板上でのスチールボールの運動について調べた。球面半分に色をつけたスチールボールに一定の初速を与えて床板上を移動させる実験において、粒子は床板上を滑らずに転がりで移動することを確認した。転がり移動中は粒子速度にほとんど変化はなく、転がり摩擦係数はほぼゼロであった。次にスチールボール3つを接着剤で三角形形状に接着し転がり移動を抑制したモデルを滑らせる実験を行った。三角形モデルの速度変化を調べたところ、床板とスチールボールとの間のすべり摩擦係数は約0.25であった。

続いて、粒子間衝突について調べるために、初速度 V_0 で純粋に転がり移動している粒子1を静止している粒子2に正面衝突させる実験を高速度ビデオカメラにより観察した。衝突直後、衝突した

表-3 スチールボールのパラメータ

粒子直径 D	1.00 cm
粒子質量	4.08 g
粒子密度 ρ_p	7.79 g/cm ³
粒子体積	0.523 cm ³
床板との間の転がり摩擦係数	0.0
床板との間のすべり摩擦係数	0.25
粒子間の反発係数 e	0.8 以上
$v_{\max}$ の時の粒子数	1044 個

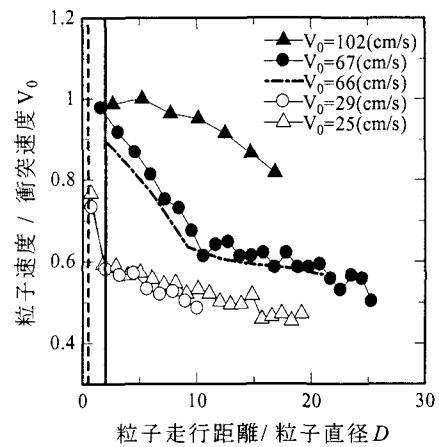
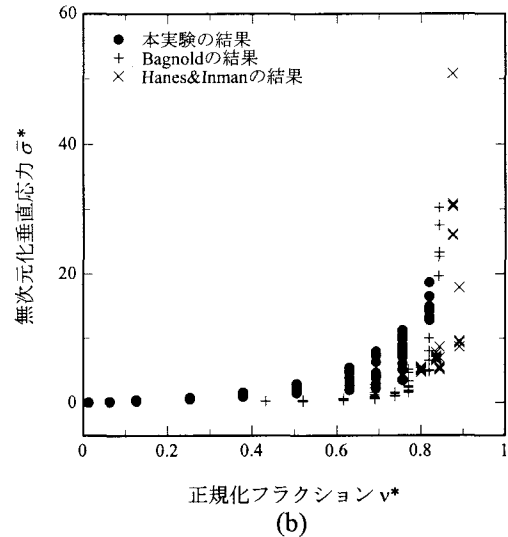
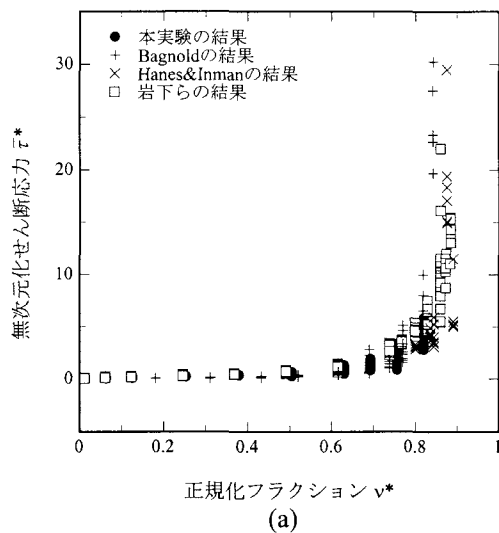


図-7 衝突後の粒子速度

粒子1は停止し、衝突された粒子2が移動し始める。このとき粒子1はその場で回転を続けていて、しばらくすると移動し始め、その後一定速度で移動する。粒子2は衝突直後から減速していき、その後一定速度で移動する。衝突後、どちらの粒子もすべりを伴いながら移動し、その後純粋な転がり運動に移行し、一定速度となっている。以上より、粒子速度の変化が急に小さくなった時点で純粋な転がりに運動が移行したと判断する。図-7に衝突する粒子の初速 V_0 を変化させた場合における衝突後の粒子2の移動距離と速度変化の関係を示す。横軸は粒子の移動距離を粒子直径で正規化してあり、縦軸は粒子速度を初速 V_0 で正規化してある。また縦に引かれた実線が実施した粒子流れの実験のうちフラクシオン(粒子充填率)が3番目に低い $v^* = 0.126$ のケースの、破線が中程度の $v^* = 0.505$ のケースの粒子間自由距離をそれぞれあらわしている。ここで粒子間自由距離とは、粒子を平面上に等間隔で配置(近接する粒子の中心を結ぶと正三角形となる)した場合の粒子間距離である。 V_0 をより速くすると、衝突直後の粒子2の速度も速くなるので、純粋な転がりに移行するまでの走行距離が長くなる。衝突直前の速度と衝



図－8 無次元化応力－フラクシオン関係 (a)：せん断応力，(b)：垂直応力

突後に純粋に転がり運動に復帰したときの速度より反発係数を求めると 0.6 程度となる．本研究では $v^* \leq 0.505$ のセル内に粒子数が少ない場合には，25(cm/s)程度の内壁回転速度ではエネルギー消耗のため流れが継続しない．また， $v^* > 0.505$ のセル内の粒子数が多い場合には粒子の走行距離は図－7の破線より短い．以上から本研究では反発係数 e が 0.8 以上の粒子を用いて実験を行っていると考えられる．

3. 測定結果

3.1 無次元化応力－フラクシオン関係

図－8に本実験の結果と Bagnold¹⁾，Hanes & Inman²⁾，岩下ら³⁾の実験データを示す．図の横軸に正規化フラクシオン v^* ，縦軸に無次元化応力 $\bar{\sigma}^*$ ， $\bar{\tau}^*$ を用いている．図－8(a)の $\bar{\tau}^*$ と v^* の関係をみると，本実験の結果は v^* が 0.7 程度より小さいときには $\bar{\tau}^*$ は小さく， v^* が 0.8 を越えると $\bar{\tau}^*$ は急に大きくなっている．この傾向は岩下らの実験や既往の実験でもみられる．また，図－8(b)の $\bar{\sigma}^*$ と v^* の関係をみると，本実験の結果は他の実験と比べると同一の v^* に対し $\bar{\sigma}^*$ が広く分布するものの，概ね傾向は一致している．

以上より，正規化フラクシオン v^* を用いることで，差異のある実験装置の結果とも比較できることが確認された．一方， $v^* = 0.8$ を越えるフラクシオンの高い領域において今回の実験データが不足していることも確認された．この原因はロードセルの容量不足にある．よってこの問題はより大容量のロードセルを用いることで解消できるであろう．

3.2 応力比

Bagnold は v^* の低いケースには垂直応力とせん断応力の比（応力比 $= \tau/\sigma$ ）が 0.32 に， v^* が増していくと約 0.4 に増していくと報告している．また， $\dot{\gamma}$ が遅いケースには応力比は約 0.75 になるとも報告している．Hanes & Inman の実験では τ/σ は 0.590～0.640 で，Bagnold の結果に比べせん断応力が大きく評価された．Savage & Jeffrey は 2 粒子間の衝突による運動量の交換から導いた応力理論から応力比は $8/3\pi$ (≈ 0.849) となると予測している．Campbell & Gong は数値実験の結果より，応力比はフラクシオンの低い場合に大きく，フラクシオンの高い場合に小さくなり，粒子の反発係数が大きければ小さくすると報告している．このようにそれぞれの実験や理論，数値実験で様々な値の応力比が報告されている．また報告値が大きく異なる理由も不明である．

図－9に既往の研究と本実験の v^* による応力比 τ/σ の変化を示す．Savage & Jeffrey の理論値は実験により測定された他の値に比べると大きい．本実験の結果は Campbell & Gong の報告にある v^* の低い場合に応力比が大きく， v^* の高い場合に小さくなるという傾向は見られない．本実験では粒子間衝突の反発係数 e を 0.8 以上とみなしているが，応力比では，Campbell らの反発係数 $e = 1.0$ （完全弾性衝突）の数値実験のケースと結果が良く一致している．Hanes & Inman の結果と比べると，本実験の結果は応力比が小さいが，彼らの実験では重力による影響で垂直応力が小さく測定されているため，実際の応力比の差はより小さいと考えられる． $v^* = 0.75$ を越えた範囲では，本実験の結果が Bagnold の実験に比べ小さな値となっているが，それ以下の v^* では概ね同じような範囲の応力比を

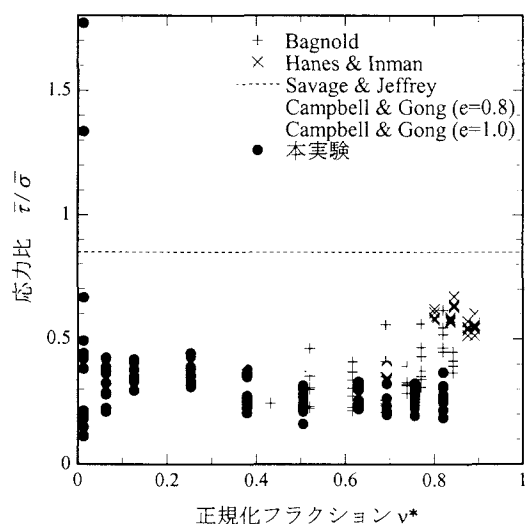


図-9 応力比-フラクシオン関係

示しており、その値は0.20～0.45である。

既往の実験では測定されていないせん断セル内に僅かな数の粒子しか存在しない $v^* = 0.013$ のケースでは、それより密なケースに比べて応力比のばらつきが広がっている。この場合を除けば、応力比は v^* の影響をほとんど受けず、同一のフラクシオンである範囲(0.20～0.45)の応力比を示す。

最後に、 $\dot{\gamma}$ による応力比の変化を図-10に示す。Bagnoldの結果は $\dot{\gamma}$ の増加とともに応力比が減少している。一方、Hanes & Inmanの結果は $\dot{\gamma}$ の増加とともに応力比も大きくなっている。本実験の結果も同一の v^* であれば $\dot{\gamma}$ の増加に伴って応力比が大きくなっている傾向がみられた。

4. まとめ

本研究では、粒状体の流れにおける微視的変形機構を解明するための二次元高速せん断装置を改良した。具体的には、モーターをより高出力のサーボモーターに交換することで広いせん断ひずみ速度・フラクシオンにおいても均一な流れを維持できるようにし、また垂直応力測定用ロードセルを設置することで、流れにおいて発生するせん断・垂直の両応力を同時に測定できるように改良した。

せん断・垂直応力は振幅の大きい高振動数成分をもつ波形として測定されたが、応力を単純に時間平均した値では装置の改良前後でほとんど同じ値となることを確認した。得られた無次元化応力-正規化フラクシオン関係は既往の実験と傾向が良く一致していた。また正規化フラクシオンを用いることにより、異なる実験装置によって得られたデータとの比較が可能であることを示した。

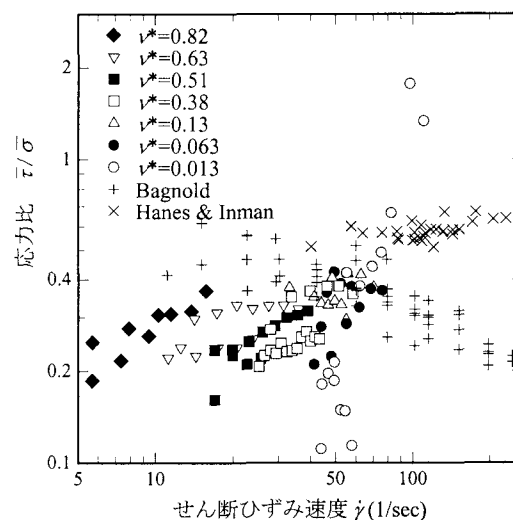


図-10 応力比-せん断ひずみ速度関係

今回の実験で得られた応力比 τ/σ は0.20～0.45であり、極小さなフラクシンの場合を除き、フラクシオンが応力比に与える影響は小さいという結果であった。一方、せん断ひずみ速度の増加に伴い、応力比が大きくなるという傾向がみられた。ただし、従来の実験には隙間流体や重力の影響が含まれているため、比較できる実験結果が不足していると言わざるを得ない。今回確認された結果が適正か判断するためにも、今後更なるデータの蓄積が必要であると思われる。

参考文献

- 1) Bagnold, R. A.: 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) Hanes, D. M. & Inman, D. L.: Observations of rapidly flowing granular-fluid materials, *J. Fluid Mech.*, vol. 150, pp. 357-380, 1985.
- 3) Savage, S. B. & Jeffrey, J. D.: The stress tensor in a granular flow at high stress rates, *J. Fluid Mech.*, vol. 110, pp. 255-272, 1981.
- 4) Campbell, C. S. & Gong, A.: The stress tensor in a two-dimensional granular shear flow, *J. Fluid Mech.*, vol. 164, pp. 107-125, 1986.
- 5) Shen, H. H.: Chapter 5 Rapid flow of granular materials, *Mechanics of granular materials*, eds, Oda, M. and Iwashita, K., A. A. Balkema, 1999.
- 6) 岩下和義・一場勝幸・小田匡寛: 高速せん断試験装置による粒状体の流動特性の研究, 土木学会論文集, (in press)

(2004年4月16日 受付)